# 제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 “철도 핵심부품 및 장치 기술개발”과제(세부과제 “고속열차용 감속기 모니터링시스템 기술개발”)의 보고서로 제출합니다.

2014. 12.


주관연구기관명 : 한국철도기술연구원
주관연구책임자 : 이동형 책임연구원
연 구 원 : 권석진 책임연구원
" : 김재철 책임연구원
" : 김형진 책임연구원
" : 문경호 책임연구원
" : 이웅용 연 구 원
" : 지해영 연 구 원

공동연구기관명 : 케이티엠엔지니어링(주)
공동연구책임자 : 송영천 연구 소장
연 구 원 : 박병수 선임연구원
연 구 원 : 정성환 연 구 원
연 구 원 : 윤영태 연 구 원
연 구 원 : 한종원 연 구 원
연 구 원 : 제현수 연 구 원
연 구 원 : 이영진 연 구 원

위탁연구기관명 : 동국대학교
위탁연구책임자 : 곽문규 교수

위탁연구기관명 : ㈜ 솔 지
위탁연구책임자 : 손영한 부소장

위탁연구기관명 : 한 국 철 도 공 사
위탁연구책임자 : 김진우 책임연구원

# 요 약 서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>12PRTD-B0<br>61487-02</td><td>해당단계<br>연구기간</td><td>2011.12.23.<br>~2014.12.25.</td><td>단계<br>구분</td><td>1단계/1단계</td></tr>
<tr><td>연구사업명</td><td colspan="5">철도기술연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>최상위 과제명</td><td colspan="4">철도 핵심부품 및 장치 기술개발</td></tr>
<tr><td>단위과제명</td><td colspan="4">고속열차용 감속기 모니터링시스템 기술개발</td></tr>
<tr><td>연구책임자</td><td>이동형</td><td>총연구기간<br>참여<br>연구원수</td><td>총 : 95명<br>내부 : 95명<br>외부 : 명</td><td>총연구비</td><td>정부 :1,603,280천원<br>기업 : 555,000천원<br>계 : 2,158,280천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및<br>소속부서명</td><td colspan="2">한국철도기술연구원<br>고속철도연구본부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">케이티엠엔지니어링(주)</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">해당없음</td></tr>
<tr><td rowspan="3">위탁연구</td><td colspan="5">연구기관명 : ㈜솔지 연구책임자 : 손영한</td></tr>
<tr><td colspan="5">연구기관명 : 동국대학교 연구책임자 : 곽문규</td></tr>
<tr><td colspan="5">연구기관명 : 한국철도공사 연구책임자 : 김진우</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서 면수</td><td>950</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 고속열차용 감속기 손상을 모니터링하고 진단할 수 있는 철도차량 감속기 전용의 모니터링 시스템을 세계 최초로 개발하였으며, 철도차량 감속기 베어링 이상과열 및 기어 파손, 베어링 결함, 윤활유 열화 등 감속기에 발생하는 주요 손상을 모니터링, 진단할 수 있음<br>○ 소형시험기 및 대형 실물시험기를 이용하여 기어의 마모 및 피팅, 절손 손상에 따른 진동특성 시험을 수행하고 분석함. 이를 통하여 해석적으로 수행하기 어려운 부분의 연구를 실험적으로 수행하여 기어의 손상에 따른 이상상태 영향분석 및 데이터베이스를 구축하였고, 이상상태 진단기준 설정의 기초 데이터로 활용함<br>○ 고속철도 감속기의 운행 중 진동특성을 분석하기 위하여 고속철도 차량(KTX, KTX-산천, 차세대 고속전철(HEMU)) 감속기의 실물시험 및 현차시험을 실시하였고, 속도별 및 구간별, 궤도조건별 등 운행 조건변화에 따른 감속기 진동특성의 변화를 분석하였음. 이 결과로부터 운행구간 및 선로조건 등을 고려한 감속기 이상상태 진단기준(안)을 수립함<br>○ 감속기 이상상태 모니터링 시스템 시제품을 제작하였고, 온도, 진동, 윤활유 이상상태 감시시스템의 실물시험기를 이용한 성능시험 및 KTX와 차세대 고속전철(HEMU) 감속기의 현차시험을 통한 성능 및 신뢰성시험 등을 수행함. 개발된 모니터링 시스템 시제품은 환경부하시험, 진동 및 내구성시험, 전자파시험, 실차시험(제3자 검증)을 통과하여 실용화에 필요한 신뢰성을 검증함</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색인어<br>(각 5개 이상)</td><td>한글</td><td colspan="4">감속기, 동력전달장치, 모니터링, 이상상태, 고속철도</td></tr>
<tr><td>영어</td><td colspan="4">Gearbox, Power transmission, Monitoring, Abnormal condition, High speed train</td></tr>
</table>

# 요 약 문

## Ⅰ. 제 목

고속열차용 감속기 모니터링시스템 기술개발

## Ⅱ. 연구개발과제 개요

○ 감속기에서 발생하는 신호(온도, 진동, 윤활유 상태)를 상시 모니터링하고 실시간 분석, 진단하여 이상발생시 기관사에게 즉시 통보되는 감속기 이상 상태 모니터링시스템 기술개발

- 베어링/기어/윤활유 손상별 이상상태 데이터베이스 구축
- 온도/진동/윤활유 이상상태 진단기준 정립
- 온도를 이용한 감속기 이상상태 감시 및 진단시스템 개발
  (샘플링 1 ㎐, 오차범위 ±1℃)
- 진동을 이용한 감속기 모니터링 및 진단시스템 개발
  (최고 샘플링 12 ㎑ 이상)(대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함)
- 윤활유 상태 분석을 통한 감속기 이상상태 감시 및 진단시스템 개발
- 최고속도 400 ㎞/h까지 적용 가능 (실차 검증속도 300 ㎞/h)
- 주요 고장에 대한 이상상태 모니터링 및 진단시스템 신뢰도 95% 이상

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

| 연 차 | 연구 내용 | 연구 결과 |
|---|---|---|
| 1차년도 | ■ 감속기 손상사례 및 원인 분석 (고속철도 및 전동차)<br>■ 감속기 손상모드 및 손상 메커니즘<br>■ 주요 손상사례별 이상상태 영향 분석<br>■ 감속기 이상상태 데이터베이스 구축 (I) (실물 시험기 및 소형 시험기 이용) | ■ 고속열차 및 전동차용 감속기 손상사례 및 원인 분석<br>■ 감속기 주요부품 (기어, 베어링) 손상모드 및 손상 메커니즘 분석<br>■ 이상상태 영향분석을 위한 기어 시험편 시험기 구축<br>■ 시험편 시험을 이용한 이상상태 영향분석 및 데이터베이스 구축(마모 및 기어 손상에 따른 진동특성 평가) |
| | ■ 감속기 온도상승 요인 분석<br>■ 계측센서의 사용 환경조건 분석 (측정범위/전원 · 통신방식/전송거리/빈도)<br>■ 온도진단 방법 결정<br>■ 온도 모니터링 시스템 기본설계<br>■ 계측센서의 기본 성능시험 | ■ 감속기 온도상승 요인 분석<br>– 오일온도 영향인자(손상모드별 온도영향 분석)<br>■ 계측센서의 사용 환경조건 분석<br>– 측정범위, 통신방식, 전송거리 등 분석<br>■ 온도진단 방법 결정 |

| | | |
|---|---|---|
| | | - 유지보수 용이성, 데이터선형성, 경제성 고려<br>■ 온도 모니터링 시스템 기본설계<br>- IC온도센서 기반 무선 송수신시스템 구성<br>■ 계측센서의 기본 성능시험<br>- 구성 시스템에 의한 기본 성능시험 (호남선/경부선) |
| | ■ 감속기 진동 증가 요인 분석<br>■ 감속기 실물/현차시험 및 진동특성 분석<br>■ 계측센서 부착위치 및 최적 센서 선정<br>■ 감속기 진동 모니터링 시스템 기본설계 (H/W, S/W) | ■ 베어링 및 기어 진동 증가 요인 분석<br>■ 전동차용 감속기 실물/현차시험 및 특성 분석<br>■ KTX/KTX-산천 감속기 현차시험 및 특성 분석<br>■ 센서 부착위치 및 종류 최적선정<br>■ 유사 온라인 모니터링 시스템 비교 분석<br>■ 최적 기술선정 및 모니터링시스템 기본설계 |
| | ■ 감속기 오일 열화 요인 분석<br>■ 감속기 오일 샘플채취 및 분석<br>■ 센서 취부방법 결정<br>■ 윤활유 열화감지를 위한 센서 기본 성능시험 및 선정<br>■ 윤활유 모니터링 시스템 기본설계 | ■ 윤활유 열화요인 및 진단방법<br>■ 고속철도 감속기 윤활유 검수기준 및 윤활유 샘플채취, 분석<br>■ 주유구 센서 취부방법 검토<br>■ 열화센서 성능시험 및 최적 선정<br>■ 윤활유 모니터링시스템 기본설계 |

| 연 차 | 연구 내용 | 연구 결과 |
|---|---|---|
| 2차년도 | ■ 감속기 손상모드 시험 및 손상모드별 이상상태 영향 분석<br>■ 감속기 이상상태 데이터베이스 구축 (II)<br>(실물 시험기 및 소형시험기 이용 시험, 검증) | ■ 고속철도(KTX) 감속기 손상사례 조사 및 분석 (계속)<br>■ 균열진전해석 및 균열 크기에 따른 진동특성 시험 및 평가<br>■ 기어 피팅시험 및 인공 피팅을 삽입한 시험편을 이용한 진동 특성 시험 및 평가<br>■ 마모시험 및 인공 마모시험편을 이용한 진동특성 시험 및 평가 |
| | ■ 온도 감시시스템 H/W 및 S/W 시제품 제작<br>■ 시제품 시스템 성능평가 (H/W 영향인자 평가, 신뢰성 저하 방지대책 수립)<br>■ 정상/이상상태 조건하 (무부하/부 | ■ 고속철도용 감속구동장치 무선 온도 감시시스템 H/W 및 S/W 시제작<br>■ 실물시험기를 이용환 시제작 시스템의 검증, 신뢰성 시험 및 KTX와 HEMU 현차 시험에 의한 성능 평가<br>■ 실물시험기를 이용한 정상/이상상태 |

| | | |
|---|---|---|
| | 하) 시험실 시험 | 조건하 시험실 시험 |
| | ■ 감속기 실물/현차시험 및 이상상태 진동특성 분석<br>■ 감속기 결함 및 이상상태 평가방법 정립<br>■ 감속기 이상상태진단 S/W (알고리즘 포함) 구축<br>■ 감속기 이상상태진단 H/W 구축 및 성능시험<br>■ 대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업용 S/W, H/W 구축 및 성능시험 | ■ 감속기 실물시험 및 진동 특성 분석<br>– KTX 1차, 2차 감속기 실물시험, 분석<br>■ 감속기 현차시험 및 진동 특성 분석<br>– KTX 감속기, HEMU 감속기 현차시험, 분석<br>■ 감속기 결함 진단방법/ 이상상태 평가기준 정립<br>■ 감속기 이상상태진단 S/W 구축<br>– 진동진단 파라미터 적용기준 정립<br>– 진단 S/W, 알고리즘, User interface 구축 및 성능시험<br>■ 감속기 이상상태진단 H/W 구축 및 성능시험<br>■ 대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업용 S/W, H/W 구축 및 성능시험 |
| | ■ 감속기 오일 샘플채취 및 분석, DB구축 (I)<br>■ 윤활유 열화감지 장치 시제품(S/W, H/W) 제작<br>■ 정상/이상상태 Lab Test (성능평가) | ■ 감속기 오일 샘플채취 및 분석, DB구축 (I)<br>– KTX 21편성/8편성 사용유 분석<br>■ 윤활유 열화감지 장치 시제품(S/W, H/W) 제작<br>■ 정상/이상상태 Lab Test (성능평가)<br>– 사용유의 분석치(산가,수분,철분)과 유 열화 센서의 측정치 비교<br>– ARU/MRU 감속기 설치용 센서 성능실험, 실물 감속기 실험 |

| 연 차 | 연구 내용 | 연구 결과 |
|---|---|---|
| 3차년도 | ■ 감시시스템의 현장 적용성 평가 및 업그레이드<br>■ 시험평가 데이터의 온도 이상상태 기준 설정 | ■ 온도 감시시스템 적용성 평가 (성능평가, 검증시험)<br>■ 온도감시시스템 이상상태 기준설정 |
| | ■ 감속기 결함 실물시험 및 진단방법 정립<br>■ 고속철도 감속기 진동 이상상태 기준 설정 및 정도향상<br>■ 진동 모니터링 시스템 S/W(알고리즘 포함), H/W 검증 및 보완 | ■ 감속기 결함시험 및 진단방법 정립 : 시험데이터 분석, 이상상태 진단 indicator 개발<br>■ 진동 이상상태 기준설정 : RMS, Kurtosis, NA6 진단 기준(안) 설정<br>■ 진동 모니터링시스템 검증 및 보완 : 진단 기준 (안) 적용 프로그램 구축, HEMU 실차 성능시험 |
| | ■ 통합시스템의 Input/Output 알고 | ■ 통합시스템 알고리즘 구축 : GUI/퍼 |

| | | |
|---|---|---|
| | 리즘 구축<br>■ 통합시스템 신뢰성 검증<br>■ 무선화 및 KTX-OBCS 연계방안 수립<br>■ 통합시스템 유지보수 매뉴얼 작성 | 포먼스 최적화<br>■ 통합시스템 신뢰성 검증: 환경부하시험, 진동, 충격시험, 전자파시험, 실차성능시험<br>■ 무선화 및 KTX-OBCS 연계방안 수립<br>■ 통합시스템 유지보수 매뉴얼 작성 |
| | ■ 감속기 오일 샘플 채취 및 분석, DB구축 (II)<br>■ 현차시험을 통한 데이터 처리시스템 검증 및 업그레이드<br>■ 감속기 윤활유 이상상태 기준 설정 | ■ 감속기 오일 샘플 채취 및 분석 : KTX 18편성, 23편성 사용유 분석, DB구축<br>■ 열화감지 시스템 성능시험: 감속기 다이나모 실물시험, 실차성능시험<br>■ 윤활유 이상상태 기준 설정 |

## Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

○ 학술지 게재 논문에 대한 최종 연구성과는 총 7건으로 목표치 3건의 230%를 달성함. 학술지별로는 한국철도학회에 1건, 한국소음진동공학회에 1건, 한국정밀공학회에 4건, 국외저널(Applied Mechanics and Materials) 1건을 게재함

○ 학술지 발표 논문에 대한 최종 연구성과는 총 23건으로 목표치 10건의 230%를 달성함. 총 학술지 23건 발표 중에 국내 학술대회의 경우 16건, 국제 학술대회에 7건을 발표함

○ 특허출원 및 등록에 대한 연구성과로는 총 4건의 특허를 출원하였으며, 목표치 3건과 비교하여 133%의 성과를 달성

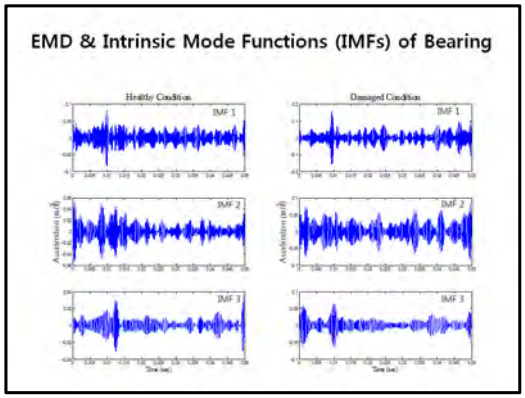
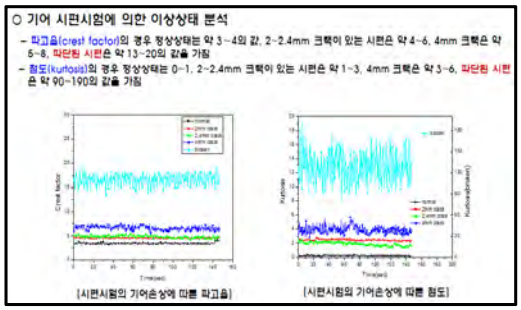
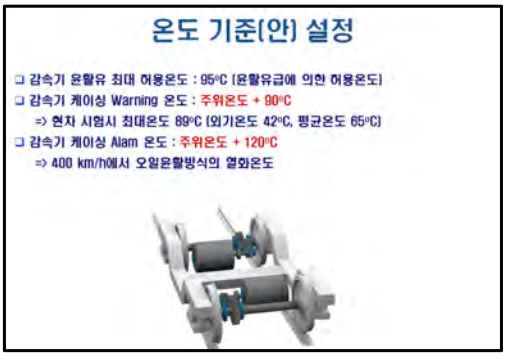
○ 소프트웨어 등록에 관한 연구성과로는 총 3건의 프로그램을 등록하였고, 계획 2건과 대비하여 150%의 성과를 달성함

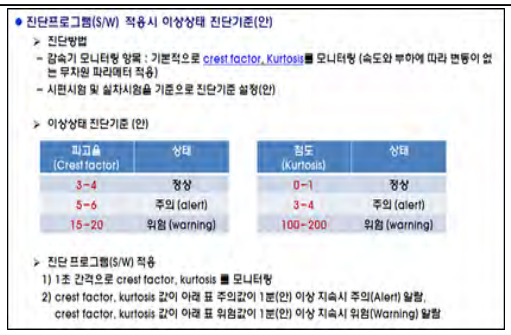
○ 고속열차용 감속기 모니터링시스템 기술개발을 통하여 감속기의 온도/진동/윤활유의 이상상태를 모니터링 하고 진단할 수 있는 시제품을 제작함

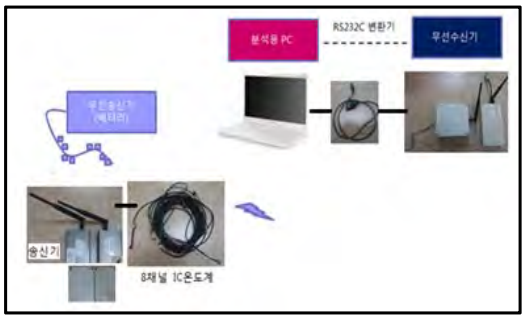
○ 본 과제 수행시 감속기 손상에 따른 진동특성 평가 및 감속기 결함 및 이상상태 평가를 위하여 KTX용 1차 및 2차 감속기, 전동차용 감속기 실물을 이용하여 무부하, 부하시험을 수행하였고, 총 12건의 대형 실물시험기 활용 연구성과를 달성함

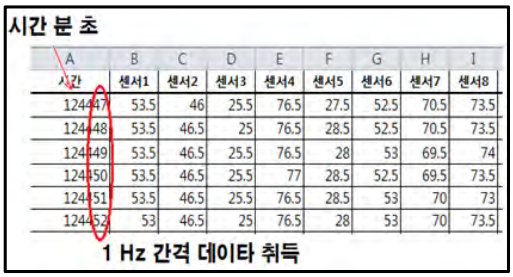
# Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

○ 연구목표 달성도

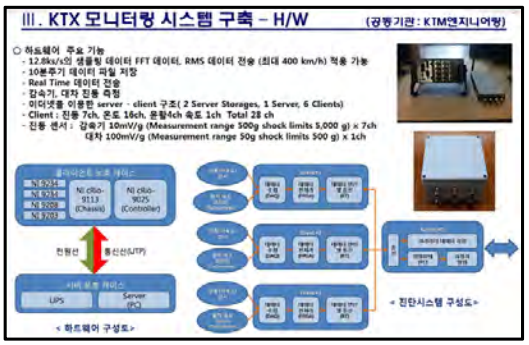
<table>
<tr><th>최종목표</th><th>세부목표</th><th>추진실적</th><th>달성율</th></tr>
<tr><td rowspan="2">감속기 이상상태 모니터링 시스템 기술개발</td><td>베어링/기어/윤활유 손상별 이상상태 데이터베이스 구축</td><td>•베어링 이상상태 데이터베이스 구축<br><br><br>•기어 이상상태 데이터베이스 구축<br><br><br>•윤활유 이상상태 데이터베이스 구축<br><br></td><td rowspan="2">100%</td></tr>
<tr><td>온도/진동/윤활유 이상상태 진단기준 정립</td><td>•온도 이상상태 진단기준 정립<br><br><br>•진동 이상상태 진단기준 정립</td><td>100%</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td></td><td>


•윤활유 이상상태 진단기준 정립</td><td></td></tr>
<tr><td>온도를 이용한 감속기 이상상태 감시 및 진단시스템 개발 (샘플링 1㎐, 오차범위 ±1℃)</td><td>
•온도 모니터링시스템 개발<br>


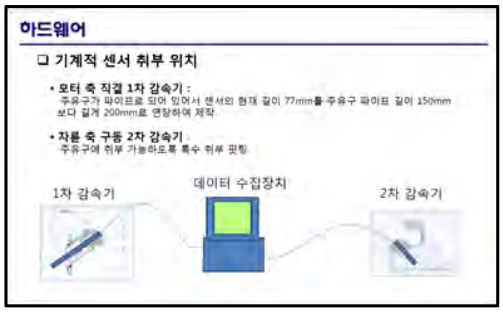
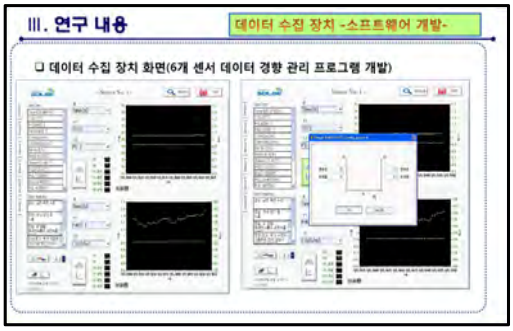
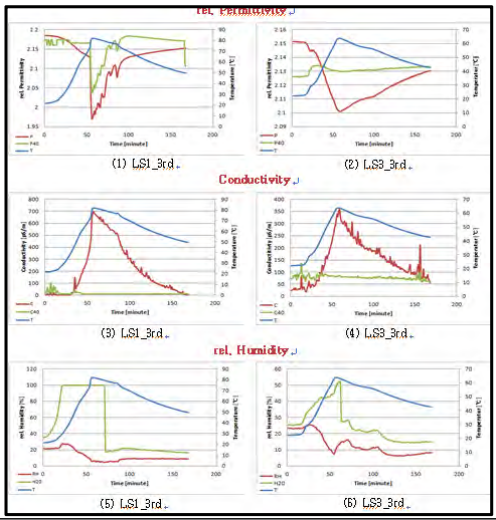
•온도 모니터링시스템 성능시험<br>

시간 분 초

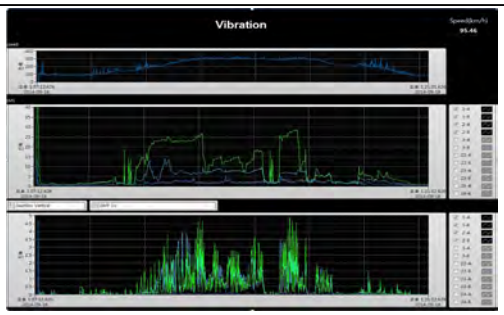
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 시간 | 센서1 | 센서2 | 센서3 | 센서4 | 센서5 | 센서6 | 센서7 | 센서8 |
| 1 | 124447 | 53.5 | 46 | 25.5 | 76.5 | 27.5 | 52.5 | 70.5 | 73.5 |
| 2 | 124448 | 53.5 | 46.5 | 25 | 76.5 | 28.5 | 52.5 | 70.5 | 73.5 |
| 3 | 124449 | 53.5 | 46.5 | 25.5 | 76.5 | 28 | 53 | 69.5 | 74 |
| 4 | 124450 | 53.5 | 46.5 | 25.5 | 77 | 28.5 | 52.5 | 69.5 | 73.5 |
| 5 | 124451 | 53.5 | 46.5 | 25.5 | 76.5 | 28.5 | 53 | 70 | 73 |
| 6 | 124452 | 53 | 46.5 | 25 | 76.5 | 28 | 53 | 70 | 73.5 |

1 Hz 간격 데이타 취득</td><td>100%</td></tr>
<tr><td>진동을 이용한 감속기 모니터링 및 진단시스템 개발(최고 샘플링 12㎑ 이상)(대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함)</td><td>
•진동 모니터링시스템 개발<br>




•진동 모니터링시스템 성능시험</td><td>100%</td></tr>
</table>

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | <br><Client 연산 FFT 데이터 그래프 검증 – 6,400Hz><br><br><수집된 웨이브 시간간격 출력 검증 – 1 ÷dt(0.000078125) = 12800(S/s)> | |
| | 윤활유 상태 분석을 통한 감속기 이상상태 감시 및 진단시스템 개발 | •윤활유 모니터링시스템 개발<br><br><br><br><br>•윤활유 모니터링시스템 성능시험<br><br> | 100% |
| | 최고속도 400㎞/h까지 적용 가능 (실차 | •실차 검증 300km/h | 100% |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 검증속도 300㎞/h) | <br>[실차 시험: 진동 데이터 취득 화면]<br><br>•최고속도 시험검증 : 최대 데이터 샘플링 검증 | |
| | 주요 고장에 대한 이상상태 모니터링 및 진단시스템 신뢰도 95% 이상 | •환경부하시험<br>•진동 및 내구성시험<br><br>•전자파시험<br>•실차시험(제3자 검증) | 100% |

○ 연구개발 성과의 파급효과

- 시편 및 실물시험기를 이용한 감속기 주요부품(기어, 베어링)의 주요 손상에 따른 이상상태 데이터베이스 구축결과는 주요부품의 손상 메커니즘 해석 및 수명평가 등에 기초 데이터가 될 수 있고, 진단 기준 설정 등에 근거 자료가 될 수 있으므로 모니터링 기술 분야에 매우 큰 기술적 도약을 가져올 것으로 기대됨
- 속도별 및 구간별, 궤도조건별 등 운행 조건변화에 따른 감속기 진동특성의 변화 데이터 및 분석결과는 감속기의 유지보수 및 철도의 고속화, 경량화 등의 기술발전에 중요한 자료가 될 것으로 판단됨
- 고속전철 감속기의 모니터링 시스템 개발을 통해 철도차량 이상상태 모니터링 및 진단기술과 관련된 기술을 선도해 나아갈 수 있을 것임
- 고속열차 고장에 의한 국민들의 불안 해소와 대형사고 미연 방지를 통하여 운행 정지 사고로 인한 경제적 손실(660억/년, 2건 기준)을 최소화 할 수 있는 기술로 철도의 안전성 확보에 일익을 담당할 수 있음

## Ⅵ. 연구성과 활용계획

- 고속철도, 일반철도, 도시철도 차량의 감속기 상태기반 유지보수(CBM) 계획수립에 활용
- 감속기 손상 메커니즘 분석 및 손상 영향 분석 결과는 감속기 손상 저감 및 유지보수 기초자료로 활용
- 감속기의 온도/진동/윤활 모니터링 데이터(대차 진동 데이터 포함)를 데이터베이스화하여 감속기 손상관련 연구의 기초 데이터로 활용할 수 있고, 모니터링 진단 기준 설정 및 기준 업데이트 자료로 활용
- 고속철도, 일반철도, 도시철도 차량의 감속기 모니터링에 적용하여 철도차량 안전운행에 기여
- 철도차량 관련 첨단 감지 시스템 구축으로 인한 관련 시스템의 해외시장 개척
- 고속 감속기, 변속기 등의 타 분야의 구동장치 모니터링 시스템에 응용
- 감속기의 온도/진동/윤활 모니터링 진단기술은 차축 베어링의 온도 모니터링 및 진단, 차축 및 대차, 차체의 진동 모니터링 진단기술에 활용

# S U M M A R Y

## Ⅰ. Title

Development of Condition Monitoring System for Reduction Unit of High Speed Trains

## Ⅱ. Scope and Objectives

The reduction unit or gearbox is equipment used for high speed railway vehicles to transmit motor' s torque to the wheelset, and is one of the major devices permitting the vehicle to run at high speed.
The load applied to the reduction unit during high speed train operation is very large, so the safety and durability of the gears and the reliability of each component are very important. If a fault occurs in the reduction unit, the vehicles must reduce their speed to a certain limit or must stop. Daily maintenance is thus required and the components of reduction unit must be completely disassembled every 3 years for repair to prevent accidents.

A safety system is installed in the high speed rail to warn of major equipment failure and provide data on the vehicle operating condition. However, there is no safety system concerning the reduction unit, so a risk of accidents always exists. Therefore, recently, a system to monitor abnormal conditions of reduction unit and bogie system in high-speed trains is under development.

This report presents the development of a condition monitoring system that monitors the operating conditions of a reduction unit, such as the bearing temperature, gearbox vibration, and gear oil deterioration, and notifies the operator of potential problems or abnormal conditions. A series of field tests on high-speed rail and conventional lines was performed to identify the characteristics of temperature rise and vibration levels on the reduction unit during operation. The monitoring system was designed based on the proper sensor selection, measurement method, and signal analysis to optimize the interface with the operating system of high-speed trains. Application of this monitoring system to high-speed trains will play an important role in their proper maintenance and safe operation.

The scope of this research are divided into several items as following.

- Database of abnormal condition of bearing, gear and oil
- Diagnosis criteria of abnormal condition of bearing, gear and oil
- Development of temperature monitoring system of gearbox
- Development of vibration monitoring and diagnosis system of gearbox
- Development of measuring and data backup system of bogie vibration
- Development of gearbox oil condition monitoring system
- Reliability and performance test of gearbox condition monitoring system

# CONTENTS


Chapter 1. Outline of the research ····· 1

Section 1. Objectives and necessity ····· 3

Section 2. Definition, scope and characteristics of research ····· 8

Section 3. State of the art in monitoring system development ····· 12

Section 4. Position of research results in related fields ····· 22

Chapter 2. Process and results of R&D ····· 23

Section 1. Analysis of damage mechanism of reduction unit ····· 25

Section 2. Development of temperature monitoring system ····· 51

Section 3. Vibration characteristics of damaged gear ····· 100

Section 4. Detection of fault and abnormal condition of reduction unit by vibration signal ····· 196

Section 5. Development a damage detection and monitoring algorithm for KTX gearbox system through analyzing the vibration signals ····· 328

Section 6. Development of lubricant oil monitoring system ····· 393

Section 7. Mode tests and field tests of KTX gearbox system ····· 472

Chapter 3. Results of research and application ····· 499

Section 1. Journal papers ····· 501

Section 2. Conference papers ····· 509

Section 3. Patent ····· 511

Section 4. Patent of Software ····· 519

Section 5. Prototype of monitoring system ····· 521

Section 6. Application of full-scale tester ····· 524

Section 7. NET(New Excellent Technology)application ····· 525

Chapter 4. Attainment of research goal and expected effects ····· 567

Section 1. Attainment of final goal of R&D ····· 569

Section 2. Technical effects of R&D result ····· 573

Section 3. Economic effects of R&D result ····· 576

Section 4. Policy effects of R&D result ····· 579

Chapter 5. Application of research result and recommendations for future work ····· 581
Section 1. Application plan of research result ····· 583
Section 2. Recommendations for future work ····· 586

References ····· 587

# 목 차


제1장 연구개발과제 개요 ····· 1

제1절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 3

1. 연구개발 개요 ····· 3

2. 연구개발의 중요성 ····· 5

3. 연구개발 필요성 ····· 7

제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 8

1. 연구개발 최종목표 ····· 8

2. 연차별 연구목표 및 내용 ····· 9

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 12

1. 국내 관련기술 ····· 12

2. 국외 관련기술 ····· 15

3. 특허동향 ····· 19

제4절 연구개발결과가 관련 분야에서 차지하는 위치 등 ····· 22

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 23

제1절 감속기 손상 메커니즘 분석 ····· 25

1. 감속기 손상모드 및 손상 메커니즘 ····· 25

2. 철도차량 감속기 손상사례 및 원인 분석 ····· 40

제2절 감속기 온도감시 시스템 개발 ····· 51

1. 감속구동장치 온도상승 요인과 진단기법 ····· 51

2. 감속기 온도감시시스템 기본설계 ····· 58

3. 온도모니터링 시스템의 기본 성능시험 ····· 64

4. 온도 감시시스템 시제품 제작 ····· 74

5. 온도 감시시스템 시제품 성능시험 ····· 81

6. 감속기 온도감시 시스템의 평가 기준 ····· 96

7. 소결론 ····· 99

제3절 감속기 손상에 따른 진동특성 평가 ····· 100

1. 감속기 진동 증가 요인 분석 ····· 100

2. 기어 시편 손상 모드 진동특성 시험 및 분석 ····· 113

3. 고속전철 감속기 기어 손상 모드 진동특성 시험 및 분석 ····· 166

제4절 진동에 의한 감속기 결함 및 이상상태 평가 ····· 196
1. 철도차량 감속기 현차시험 및 진동특성 분석 ····· 196
2. 감속기 결함 및 이상상태 평가 방법 ····· 285
제5절 감속기 진동진단 알고리즘 개발 (위탁: 동국대학교) ····· 328
1. 베어링 시스템 ····· 328
2. Wavelet을 이용한 베어링 결함신호의 분석결과 ····· 355
3. Empirical Mode Decomposition 해석결과 ····· 356
4. 웨이블(Wavelet)을 De-nosing을 통한 잡음 신호 저감 ····· 358
5. 기어 시스템의 실험모델 와선 및 결함 신호분석 ····· 368
6. 감속기 모델 신호의 손상 주기 강조를 위한 MED 변수 튜닝 ····· 374
7. 실물 감속기 시험 데이터의 MED를 통한 주기 분석 ····· 388
제6절 감속기 윤활유 모니터링 시스템 개발 (위탁: 솔지) ····· 393
1. 윤활유 열화요인 및 진단 방법 ····· 393
2. 윤활유 샘플채취 및 분석 ····· 399
3. 윤활유 모니터링시스템 기본설계 ····· 405
4. 윤활유 열화감지시스템 제작 ····· 424
5. 윤활유 열화감지 시스템 성능실험 ····· 427
6. 윤활유 열화 모니터링 관리기준 설정 ····· 443
7. 소결론 ····· 470
제7절 고속열차 감속기 모드시험 및 시험평가 (위탁: 한국철도공사) ····· 472
1. 감속기 구성부품 모드시험 ····· 472
2. 견인전동기 현차 진동시험 ····· 482
3. 차세대고속열차(HEMU-430X) 현차 진동시험 ····· 490
4. 모니터링시스템 고속열차 OBCS와의 연계성 ····· 495

**제3장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 499**

제1절 학술지 게재 논문 ····· 501
제2절 학술지 발표 논문 ····· 509
제3절 특허출원/등록 ····· 511
1. 전동열차의 진동 측정 시스템 ····· 511
2. 전동열차의 진동 측정 장치 ····· 514
3. 진동 센서에 의한 발광식 오작동 탐지 장치 ····· 516
4. 고속전동 열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템 ····· 517
제4절 S/W 등록 ····· 519

제5절 모니터링시스템 시제품 제작 ····· 521
제6절 대형 실물시험기 활용 ····· 524
제7절 신기술인증 ····· 525

**제4장 연구목표 달성 및 효과 ····· 567**
제1절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 569
1. 연구개발 최종목표 ····· 569
2. 연구개발 최종목표 달성도 ····· 569
제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 573
제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등) ····· 576
제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 579

**제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 581**
제1절 연구성과 향후 활용방안 ····· 583
1. 사업화 추진방안 (양산 및 판로 확보 계획) ····· 583
2. 기존 연구 및 타 연구와의 연계 ····· 585
제2절 추가연구 필요성 ····· 586

**참고문헌 ····· 587**

# <그림 차례>

그림 1.1.1 고속철도 감속기 구조 ····3
그림 1.1.2 고속열차 모터감속기 중간기어 축 이탈 손상 사례 ····4
그림 1.1.3 감속기 이상상태 모니터링 항목 및 검출 가능한 손상 ····6
그림 1.1.4 감속기 모니터링 기술개발 SWOT 분석 ····7
그림 1.2.1 연차별 연구목표 및 주요 연구내용 ····9
그림 1.3.1 FBG 센서를 활용한 전차선 모니터링 시스템 구성 ····13
그림 1.3.2 완전 자가발전 무선 온도센서 ····15
그림 1.3.3 철도차량 대차 모니터링 진단시스템 ····16
그림 1.3.4 Railway bogie condition monitoring 시스템 (SKF) ····16
그림 1.3.5 SAW 센서를 이용한 무선 온도 계측 시스템 ····17
그림 1.3.6 베어링 수명에 미치는 수분함유량의 영향 ····18
그림 1.3.7 통합형 기어박스 모니터링 시스템 ····18
그림 1.3.8 기존 chip detector 방식(좌)과 AH-64 ODM 센서 ····19
그림 1.3.9 온도 모니터링에 대한 특허출원현황 ····20
그림 2.1.1 기어의 고장유형과 고장원인 ····26
그림 2.1.2 유막 두께비와 온도와의 관계 ····28
그림 2.1.3 폴리싱 형태 ····28
그림 2.1.4 보통 마모와 과도 마모 ····29
그림 2.1.5 연삭마모 ····29
그림 2.1.6 이론적인 헤르츠안 응력 ····30
그림 2.1.7 접촉면에서의 발생하는 응력의 크기 ····30
그림 2.1.8 초기 피팅 ····31
그림 2.1.9 초기 피팅과 파괴적 피팅 ····31
그림 2.1.10 파괴적 피팅 ····32
그림 2.1.11 피팅과 스폴링 ····32
그림 2.1.12 웜기어에서의 스폴링 ····33
그림 2.1.13 기어의 굽힘 피로 파손 ····33
그림 2.1.14 굽힘피로 손상에 의한 Eye와 비치 마크 ····34
그림 2.1.15 (a) 과부하 파손과 (b) 경화층 파손 ····34
그림 2.1.16 베어링 손상 원인 [5] ····36
그림 2.1.17 베어링의 플레이킹 손상 ····37
그림 2.1.18 베어링 플레이킹 손상의 진행 ····37
그림 2.1.19 베어링 외륜의 연마 마모 손상 ····38
그림 2.1.20 베어링의 고착 마모 손상과 손상 메커니즘 ····38
그림 2.1.21 베어링의 습기 부식 ····39
그림 2.1.22 베어링의 마찰 부식(false brinelling) ····39
그림 2.1.23 모터감속기의 구성요소 ····40
그림 2.1.24 차축기어 감속기의 구성요소 ····40

그림 2.1.25 중간기어 이탈 ····43
그림 2.1.26 피니언 기어 축 절손 ····43
그림 2.1.27 기어손상 (피니언 기어 박리 및 균열) ····44
그림 2.1.28 감속기 오일 누유 ····44
그림 2.1.29 베어링 케이스 및 하우징 녹 발생 ····44
그림 2.1.30 베어링 파손 ····44
그림 2.1.31 핀 절손 ····44
그림 2.1.32 KTX용 대차에 조립된 트리포드(녹색부품) ····45
그림 2.1.33 그랜져형 트리포드의 형상 ····45
그림 2.1.34 그랜져형 트리포드의 구성요소 ····45
그림 2.1.35 동력전달축의 절손 사례 ····47
그림 2.1.36 수분유입 경로 및 윤활유 색상 ····48
그림 2.1.37 전동차용 감속기 외형 및 구조 ····48
그림 2.1.38 대치차 및 기어케이스 파손 ····49
그림 2.1.39 기어 치면 손상 ····49
그림 2.1.40 기어 케이스 누유 ····49
그림 2.1.41 감속기 피니언측 베어링 손상 ····50
그림 2.1.42 감속기 피니언측 베어링 케이지 손상 ····50
그림 2.2.1 구동장치의 온도상승 요인 ····53
그림 2.2.2 마모시 온도 영향 ····54
그림 2.2.3 Micropiting에 대한 온도 영향 ····55
그림 2.2.4 Scuffing에 대한 온도 영향 ····55
그림 2.2.5 Pitting에 대한 온도 영향 ····56
그림 2.2.6 반도체 IC(Integrated Circuit)온도 센서 (AD590) ····61
그림 2.2.7 AD590 온도 특성 ····62
그림 2.2.8 감속구동장치 온도모니터링 시스템 구성도 ····62
그림 2.2.9 감속구동장치 온도모니터링 시스템 ····63
그림 2.2.10 무선방식의 온도모니터링 시스템 구성도 ····63
그림 2.2.11 신호처리장치의 개요도 ····65
그림 2.2.12 온도 감시 프로그램 ····65
그림 2.2.13 감속기의 온도센서 부착위치 ····66
그림 2.2.14 시험장치 및 설치 모습 ····67
그림 2.2.15 부산지하철 감속기 온도 모니터링 ····67
그림 2.2.16 부산지하철 감속기 온도 측정 결과 ····68
그림 2.2.17 전라선 감속기 온도 측정 결과 ····70
그림 2.2.18 호남선 감속기 온도 측정 결과 ····72
그림 2.2.19 경부선 감속기 온도 측정 결과 ····73
그림 2.2.20 2차 시제품의 수정 ····74
그림 2.2.21 감속구동장치 온도 감시시스템의 구성도 ····75
그림 2.2.22 온도센서의 특성(TCN75 MSOP type) ····75
그림 2.2.23 온도센서 보드 구성 ····76

그림 2.2.24 온도 감시시스템의 전송방식 ····77
그림 2.2.25 기능 구성도(TCN75 MSOP type) ····77
그림 2.2.26 감속구동장치 온도모니터링 시스템 구성도 ····78
그림 2.2.27 온도 감시 시스템 프로그램 ····79
그림 2.2.28 온도 감시시스템 프로그램에 의한 온도 계측 ····80
그림 2.2.29 무선 방식의 온도모니터링 시스템 설치 및 구성도 ····81
그림 2.2.30 실물 감속구동장치 시험기의 온도센서 설치 ····83
그림 2.2.31 감속구동장치 온도감시 시스템의 검증시험 ····83
그림 2.2.32 온도 감시시스템 측정에 의한 감속구동장치의 온도상승 곡선 ····84
그림 2.2.33 감속구동장치 시험시 적외선 열화상 이미지-1 ····85
그림 2.2.34 감속구동장치 시험시 적외선 열화상 이미지-2 ····86
그림 2.2.35 감속구동장치 시험시 적외선 열화상 이미지-3 ····87
그림 2.2.36 감속기의 온도센서 부착위치 ····88
그림 2.2.37 KTX 감속구동장치의 온도모니터링 시험 센서 설치 ····89
그림 2.2.38 1차 시제작 온도감시 시스템에 의한 호남선 측정 ····90
그림 2.2.39 300km/h 주행시 온도 분포(서대전-천안아산) ····91
그림 2.2.40 호남선 ····92
그림 2.2.41 경부선 ····92
그림 2.2.42 HEMU 감속구동장치의 온도센서 부착 위치 ····93
그림 2.2.43 HEMU 감속구동장치의 온도모니터링 시험 센서 설치 ····94
그림 2.2.44 HEMU 경부선 ····95
그림 2.2.45 HEMU 경부선 ····95
그림 2.2.46 감속기 온도 측정 위치 ····96
그림 2.2.47 철도차량 베어링부 발열 위치와 감속기 온도 평가기준 ····97
그림 2.2.48 감속기 온도감시 시스템 교정성적서 ····98
그림 2.3.1 고속철도차량 감속기 구조 ····100
그림 2.3.2 베어링의 부하상태와 베어링의 위치 ····101
그림 2.3.3 베어링과 축의 상태 ····102
그림 2.3.4 베어링의 불량 ····102
그림 2.3.5 베어링의 비선형 스프링 특성 ····102
그림 2.3.6 베어링 표면의 굴국 ····102
그림 2.3.7 베어링에 발생하는 충격진동 ····103
그림 2.3.8 축에 편심이 있는 경우 ····103
그림 2.3.9 베어링 편심에 의한 진동파형 ····104
그림 2.3.10 내륜에 스팟 손상이 있는 경우 ····104
그림 2.3.11 내륜에 스팟 손상이 있는 경우 발생진동특성 ····104
그림 2.3.12 외륜에 스팟 손상이 있는 경우의 진동 및 파형 ····105
그림 2.3.13 베어링에 스팟 손상이 있는 경우 발생 진동특성 ····105
그림 2.3.14 베어링의 구조와 링킹응답파형 ····106
그림 2.3.15 베어링 이상상태의 진동파형 및 스펙트럼 ····107
그림 2.3.16 기어의 톱니에 전달되는 힘 ····108

그림 2.3.17 기어 마모현상에 의한 진동 ·····109
그림 2.3.18 진동의 도약현상 ·····110
그림 2.3.19 편심, 피치오차가 있는 기어에서 발생하는 진동 ·····110
그림 2.3.20 기어축에 미스얼라이먼트가 발생하는 경우의 진동 ·····110
그림 2.3.21 국부 이상인 기어에서 발생하는 진동 ·····110
그림 2.3.22 기어장치의 이상상태와 진동특성의 관계 ·····112
그림 2.3.23 시편 시험기 개략도 ·····113
그림 2.3.24 시험기 외관 및 프로그램 ·····113
그림 2.3.25 표면 피로에 의한 피팅 및 스폴링 ·····114
그림 2.3.26 굽힘 피로에 의한 기어 파손 ·····114
그림 2.3.27 기어 시험편 ·····115
그림 3.2.28 기어시험편 장착모습 및 진동센서 ·····115
그림 2.3.29 진동신호 획득을 위한 시험장비 ·····115
그림 2.3.30 싸이클에 따른 기어 표면의 상태 변화 ·····116
그림 2.3.31 싸이클에 따른 진동신호 변화 ·····117
그림 2.3.32 싸이클에 따른 주파수 분석 결과 ·····118
그림 2.3.33 15만 싸이클에서 오일 주입 시 주파수 분석 결과 ·····119
그림 2.3.34 15만 싸이클에서 오일 주입에 따른 주파수 분석 결과 비교 ·····119
그림 2.3.35 싸이클에 따른 주파수 분석 결과 비교 ·····119
그림 2.3.36 속도에 따른 RMS 크기 비교 ·····120
그림 2.3.37 인공 균열 삽입과 기어 이 파손 ·····121
그림 2.3.38 파손된 기어 이 ·····122
그림 2.3.39 손상이 없는 기어에서의 진동 ·····122
그림 2.3.40 기어에 균열이 있는 경우에서의 진동 ·····122
그림 2.3.41 기어 이의 파손에 따른 진동 ·····123
그림 2.3.42 손상에 따른 RMS 값의 크기 ·····123
그림 2.3.43 해석모델 ·····125
그림 2.3.44 하중 및 경계조건 ·····125
그림 2.3.45 하중부가상태에서 변형모습 ·····126
그림 2.3.46 하중부가 시 응력분포 ·····126
그림 2.3.47 이뿌리 끝단의 초기균열 모델링 ·····127
그림 2.3.48 초기균열 변형 및 응력분포 ·····127
그림 2.3.49 균열진전 해석결과 ·····128
그림 2.3.50 균열진전 후 변형 모습 ·····128
그림 2.3.51 Case1일 경우에 계산된 응력확대계수 KI, KII ·····129
그림 2.3.52 균열길이에 따른 응력확대계수 변화 ·····129
그림 2.3.53 인공균열 삽입된 시험편 ·····130
그림 2.3.54 진동센서 및 계측장비 ·····131
그림 2.3.55 시험편 1(정상상태)의 진동파형 ····· 133
그림 2.3.56 시험편 2(치폭 1/4 균역)의 진동파형 ····· 134
그림 2.3.57 시험편 3(치폭 2/4 균열)의 진동파형 ····· 135

그림 2.3.58 시험편 4(치폭 3/4 균열)의 진동파형 ····· 136
그림 2.3.59 시험편 5(기어 이 파손)의 진동파형 ····· 137
그림 2.3.60 rpm에 따른 RMS 크기 비교 ····· 138
그림 2.3.61 rpm에 따른 첨도(Kurtosis) 변화 ····· 139
그림 2.3.62 rpm에 따른 파고율(Crest factor) 변화 ····· 140
그림 2.3.63 헬리컬 기어 시편 종류 ····· 141
그림 2.3.64 Average acceleration of helical gear specimen test ····· 142
그림 2.3.65 Average crest factor of helical gear specimen test ····· 142
그림 2.3.66 Average kurtosis of helical gear specimen test ····· 143
그림 2.3.67 시험편에 발생한 pitting ····· 144
그림 2.3.68 시험편 1(정상 시험편)의 진동파형 ····· 145
그림 2.3.69 시험편 2(피팅조건 1)의 진동파형 ····· 146
그림 2.3.70 시험편 3(피팅조건 2)의 진동파형 ····· 147
그림 2.3.71 rpm에 따른 RMS 크기 비교 ····· 148
그림 2.3.72 rpm에 따른 첨도(Kurtosis) 변화 ····· 149
그림 2.3.73 rpm에 따른 파고율(Crest factor) 변화 ····· 150
그림 2.3.74 인공적인 피팅 형상 ····· 151
그림 2.3.75 시험편 2(피팅 2개)의 진동 파형 ····· 152
그림 2.3.76 시험편 3(피팅 4개)의 진동 파형 ····· 153
그림 2.3.77 시험편 4(피팅 6개)의 진동 파형 ····· 154
그림 2.3.78 rpm에 따른 RMS 크기 비교 ····· 155
그림 2.3.79 rpm에 따른 첨도(Kurtosis) 변화 ····· 156
그림 2.3.80 rpm에 따른 파고율(Crest factor) 변화 ····· 157
그림 2.3.81 인공 마모 형상 ····· 158
그림 2.3.82 정상기어의 진동 파형 ····· 160
그림 2.3.83 마모 기어 1의 진동 파형 ····· 161
그림 2.3.84 정상기어의 진동 파형 ····· 162
그림 2.3.85 rpm에 따른 RMS 크기 비교 ····· 163
그림 2.3.86 rpm에 따른 Kurtosis 크기 비교 ····· 164
그림 2.3.87 rpm에 따른 파고율(Crest factor) 크기 비교 ····· 165
그림 2.3.88 2차감속기 센서 부착위치 및 계측장비 사진 ····· 168
그림 2.3.89 1차감속기 부착위치 사진 ····· 168
그림 2.3.90 기어박스 및 베어링 부위 진동 비교 ····· 170
그림 2.3.91 기어박스 및 베어링 부위 주파수 분석 비교 ····· 170
그림 2.3.92 무부하시 정방향 및 역방향 운전에 따른 진동 비교 ····· 171
그림 2.3.93 토크 3,000N・m시 정방향 및 역방향 운전에 따른 진동 비교 ····· 171
그림 2.3.94 무부하시 기어박스 진동 오더 분석 ····· 172
그림 2.3.95 부하시 기어박스 진동 오더 분석 ····· 172
그림 2.3.96 속도 및 토크 변동에 따른 기어박스 상하진동 분석 ····· 173
그림 2.3.97 속도 및 토크 변동에 따른 기어박스 좌우진동 분석 ····· 173
그림 2.3.98 속도 및 토크 변동에 따른 브레이킹시 기어박스 상하진동 분석 ····· 174

그림 3.3.99 속도 및 토크 변동에 따른 브레이킹시 기어박스 좌우진동 분석 ·····174
그림 2.3.100 속도 및 토크변동에 따른 파고율 분석 ·····175
그림 2.3.101 속도 및 토크변동에 따른 첨도 분석 ·····176
그림 2.3.102 1차 감속기 무부하시 정방향 역방향 특성 비교(1회차) ·····176
그림 2.3.103 1차 감속기 부하시 정방향 역방향 특성 비교(1회차) ·····177
그림 2.3.104 1차 감속기(1회차) 무부하시 오더 분석 ·····177
그림 2.3.105 1차 감속기(1회차) 부하시 오더 분석 ·····178
그림 2.3.106 1차 감속기(1회차) 토크변동에 따른 파워링시 상하진동 비교 ·····178
그림 2.3.107 1차 감속기(1회차) 토크변동에 따른 파워링시 좌우진동 비교 ·····179
그림 2.3.108 1차 감속기(1회차) 상하진동에 대한 파고율 ·····179
그림 2.3.109 1차 감속기(1회차) 상하진동에 대한 첨도 ·····180
그림 2.3.110 1차감속기 무부하시 측정위치별 상하진동 ·····181
그림 2.3.111 1차감속기 무부하시 측정위치별 좌우진동 ·····181
그림 2.3.112 1차감속기 부하시 측정위치별 상하진동 ·····182
그림 2.3.113 1차감속기 부하시 측정위치별 좌우진동 ·····182
그림 2.3.114 1차감속기 부하시 측정위치별 주파수 분석좌우진동 ·····183
그림 2.3.115 1차 감속기(2회차) 무부하시 정 · 역방향 운전에 따른 상하진동 ·····183
그림 2.3.116 1차 감속기(2회차) 부하시 정 · 역방향 운전에 따른 상하진동 ·····184
그림 2.3.117 1차 감속기(2회차) 무부하시 오더 분석 ·····184
그림 2.3.118 1차 감속기(2회차) 부하시 오더 분석 ·····185
그림 2.3.119 1차 감속기(2회차) 토크변동에 따른 파워링시 상하진동 비교 ·····185
그림 2.3.120 1차 감속기(2회차) 토크변동에 따른 파워링시 좌우진동 비교 ·····186
그림 2.3.121 1차 감속기 토크변동에 따른 브레이킹시 상하진동 비교 ·····186
그림 2.3.122 1차 감속기 토크변동에 따른 브레이킹시 좌우진동 비교 ·····187
그림 2.3.123 1차 감속기(2회차) 상하진동에 대한 파고율 ·····187
그림 2.3.124 1차 감속기(2회차) 상하진동에 대한 첨도 ·····188
그림 2.3.125 감속기 이상상태 진동특성 파악을 위한 실험용 피니언 기어 ·····188
그림 2.3.126 Average acceleration at T 3,000N・m, speed 668rpm ·····189
그림 2.3.127 Average acceleration at T 3,000N・m, speed 1,967rpm ·····190
그림 2.3.128 Average acceleration at T 1,000N・m, speed 668rpm ·····190
그림 2.3.129 결함상태별 주파수 분석(토크 3,000N・m, 속도 1967rpm)－1 ·····191
그림 2.3.130 결함상태별 주파수 분석(토크 3,000N・m, 속도 1967rpm)－2 ·····191
그림 2.3.131 정상 상태에서의 주파수 그래프 ·····192
그림 2.3.132 피팅 상태에서의 주파수 그래프 ·····192
그림 2.3.133 반파 상태에서의 주파수 그래프 ·····192
그림 2.3.134 기어 이 한 개 절손 상태에서의 주파수 그래프 ·····193
그림 2.3.135 기어 이 두 개 절손 상태에서의 주파수 그래프 ·····193
그림 2.3.136 Average crest factor at T 3,000N・m, speed 668 rpm ·····194
그림 2.3.137 Average crest factor at T 3,000N・m, speed 1,967rpm ·····194
그림 2.3.138 Average crest factor at T 1,000N・m, speed 668rpm ·····194
그림 2.3.139 Average kurtosis at T 3,000N・m, speed 668rpm ·····195

그림 2.3.140 Average kurtosis at T 3,000N・m, speed 1,967rpm ·····195
그림 2.3.141 Average kurtosis at T 1,000N・m, speed 668rpm ·····195
그림 2.4.1 기어의 진동등급 ·····196
그림 2.4.2 대표적 기어장치의 진동 등급값 ·····197
그림 2.4.3 감속구동장치 센서 부착위치 ·····198
그림 2.4.4 센서 부착위치 및 계측장비 사진 ·····199
그림 2.4.5 Order 분석(0~647rpm(100km/h)) ·····200
그림 2.4.6 전동차용 감속구동장치 진동 등급 결과 ·····201
그림 2.4.7 전동차용 감속기 실차시험 부착위치 ·····202
그림 2.4.8 부산전동차 센서 부착위치 및 계측장비 사진 ·····203
그림 2.4.9 93년도 Gearbox 상하진동 ·····204
그림 2.4.10 84년도 Gearbox 상하진동 ·····204
그림 2.4.11 93년도 Gearbox Spectrum ·····205
그림 2.4.12 84년도 Gearbox Spectrum ·····205
그림 2.4.13 노포역-범어사 구간 93년도 감속기 상하진동 ·····205
그림 2.4.14 범내골-범일동 구간 93년도 감속기 상하진동 ·····205
그림 2.4.15 고속열차용 감속기 시험용 가속도 센서 부착 위치 ·····207
그림 2.4.16 고속열차용 감속기 센서 부착사진 ·····207
그림 2.4.17 광명역-대전역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(경부선) ·····209
그림 2.4.18 대전역-동대구역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(경부선) ·····209
그림 2.4.19 동대구역-울산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(경부선) ·····209
그림 2.4.20 울산역-부산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(경부선) ·····210
그림 2.4.21 용산역-광명역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선) ·····210
그림 2.4.22 광명역-천안아산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선) ·····210
그림 2.4.23 천안아산역-서대전역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선) ·····211
그림 2.4.24 서대전역-계룡역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선) ·····211
그림 2.4.25 계룡역-논산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선) ·····211
그림 2.4.26 논산역-익산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선) ·····212
그림 2.4.27 익산역-정읍역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선) ·····212
그림 2.4.28 정읍역-장성역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선) ·····212
그림 2.4.29 장성역-광주역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선) ·····213
그림 2.4.30 광명역-대전역 구간 KTX 1차 감속기 기어박스 주파수 분석 ·····213
그림 2.4.31 광명역-대전역 구간 KTX 1차 감속기 출력측 베어링부 주파수 분석 ·····214
그림 2.4.32 광명역-대전역 구간 KTX 2차 감속기 출력측 베어링부 주파수 분석 ·····214
그림 2.4.33 KTX 1차 감속기 주파수 분석(논산-익산 구간) ·····214
그림 2.4.34 논산역-익산역 구간 KTX 2차 감속기 출력측 베어링부 주파수 분석 ·····215
그림 2.4.35 KTX 감속기 가속도 센서 부착위치 ·····215
그림 2.4.36 KTX 감속기 센서부착 위치 ·····216
그림 2.4.37 광명역-대전역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····218
그림 2.4.38 대전역-김천구미역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····219
그림 2.4.39 울산역-부산역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····220

그림 2.4.40 부산역-울산역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····222
그림 2.4.41 동대구역-대전역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····223
그림 2.4.42 대전역-광명역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····224
그림 2.4.43 천안아산역-서대전역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····226
그림 2.4.44 서대전역-계룡역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····227
그림 2.4.45 계룡역-논산역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····228
그림 2.4.46 논산역-익산역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····229
그림 2.4.47 익산역-정읍역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····230
그림 2.4.48 정읍역-장성역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····231
그림 2.4.49 광주역-장성역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····232
그림 2.4.50 장성역-김제역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····233
그림 2.4.51 김제역-익산역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····234
그림 2.4.52 익산역-서대전역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····235
그림 2.4.53 서대전역-천안아산역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····236
그림 2.4.54 천안아산역-광명역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····237
그림 2.4.55 서대전-천안아산역 감속기 진동특성분석 ·····238
그림 2.4.56 천안아산-광명역 감속기 진동특성분석 ·····239
그림 2.4.57 KTX 부산-울산 구간 감속기 파고율 및 첨도 분석 ·····240
그림 2.4.58 KTX 익산-서대전 구간 감속기 진단기준 초과값 ·····240
그림 2.4.59 가속도센서 부착도면 ·····242
그림 2.4.60 가속도센서 및 속도센서 부착사진 ·····242
그림 2.4.61 고속열차(KTX-산천) 분석방법 ·····243
그림 2.4.62 서울역-광명역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석 ·····244
그림 2.4.63 서울역-광명역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석 ·····244
그림 2.4.64 광명역-대전역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석 ·····244
그림 2.4.65 광명역-대전역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석 ·····245
그림 2.4.66 대전역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석 ·····245
그림 2.4.67 대전역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석 ·····245
그림 2.4.68 동대구역-부산역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석 ·····246
그림 2.4.69 동대구역-부산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석 ·····246
그림 2.4.70 부산역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석 ·····246
그림 2.4.71 부산역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석 ·····247
그림 2.4.72 대전역-천안아산역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석 ·····247
그림 2.4.73 대전역-천안아산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석 ·····247
그림 2.4.74 1초 샘플링 시와 5초 샘플링 시 파고율 비교 ·····248
그림 2.4.75 1초 샘플링 시와 10초 샘플링 시 파고율 비교 ·····248
그림 2.4.76 1초 샘플링 시와 15초 샘플링 시 파고율 비교 ·····249
그림 2.4.77 1초 샘플링 시와 20초 샘플링 시 파고율 비교 ·····249
그림 2.4.78 15초 샘플링 시와 20초 샘플링 시 파고율 비교 ·····250
그림 2.4.79 서울역-광명역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석 ·····250
그림 2.4.80 서울역-광명역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석 ·····251

그림 2.4.81 광명역-대전역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석 ·····251
그림 2.4.82 광명역-대전역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석 ·····251
그림 2.4.83 대전역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석 ·····252
그림 2.4.84 대전역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석 ·····252
그림 2.4.85 동대구역-부산역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석 ·····252
그림 2.4.86 동대구역-부산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석 ·····253
그림 2.4.87 부산역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석 ·····253
그림 2.4.88 부산역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석 ·····253
그림 2.4.89 대전역-천안아산역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석 ·····254
그림 2.4.90 대전역-천안아산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석 ·····254
그림 2.4.91 서울역-광명역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석 ·····255
그림 2.4.92 서울역-광명역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석 ·····255
그림 2.4.93 광명역-대전역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석 ·····256
그림 2.4.94 광명역-대전역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석 ·····256
그림 2.4.95 대전역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석 ·····256
그림 2.4.96 대전역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석 ·····257
그림 2.4.97 동대구역-부산역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석 ·····257
그림 2.4.98 동대구역-부산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석 ·····257
그림 2.4.99 부산역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석 ·····258
그림 2.4.100 부산역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석 ·····258
그림 2.4.101 대전역-천안아산역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석 ·····258
그림 2.4.102 대전역-천안아산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석 ·····259
그림 2.4.103 광명역-대전역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 상하방향 진동레벨 ·····259
그림 2.4.104 광명역-대전역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 좌우방향 진동레벨 ·····260
그림 2.4.105 광명역-대전역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 전후방향 진동레벨 ·····260
그림 2.4.106 광명역-대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 상하방향 진동레벨 ·····260
그림 2.4.107 광명역~대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 좌우방향 진동레벨 ·····261
그림 2.4.108 광명역~대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 전후방향 진동레벨 ·····261
그림 2.4.109 광명역~대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 베어링 상하방향 진동레벨 ·····261
그림 2.4.110 광명역-대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 ·····262
그림 2.4.111 광명역~대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 ·····262
그림 2.4.112 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 상하방향 진동레벨 ··262
그림 2.4.113 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 좌우방향 진동레벨 ··263
그림 2.4.114 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 전후방향 진동레벨 ··263
그림 2.4.115 대전역~천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 상하방향 진동레벨 ··263
그림 2.4.116 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 좌우방향 진동레벨 ··264
그림 2.4.117 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 전후방향 진동레벨 ··264
그림 2.4.118 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 베어링 상하방향 진동레벨 ·····264
그림 2.4.119 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 베어링 좌우방향 진동레벨 ·····265
그림 2.4.120 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 베어링 전후방향 진동레벨 ·····265
그림 2.4.121 속도별 정속주행 시 1차 감속기 기어박스, 2차 감속기 기어박스, 2차 감속기 베어링

상하방향 진동레벨 ·····266
그림 2.4.122 속도별 정속주행 시 1차 감속기 기어박스, 2차 감속기 기어박스, 2차 감속기 베어링 좌우방향 진동레벨 ·····266
그림 2.4.123 속도별 정속주행 시 1차, 2차 감속기 기어박스, 2차 감속기 베어링 전후방향 진동레벨 ·····266
그림 2.4.124 터널구간 도상별 분석구간 ·····267
그림 2.4.125 1차 감속기 기어박스 상하방향 도상별 진동레벨분석 ·····268
그림 2.4.126 1차 감속기 기어박스 좌우방향 도상별 진동레벨분석 ·····268
그림 2.4.127 1차 감속기 기어박스 전후방향 도상별 진동레벨분석 ·····268
그림 2.4.128 2차 감속기 기어박스 상하방향 도상별 진동레벨분석 ·····269
그림 2.4.129 2차 감속기 기어박스 좌우방향 도상별 진동레벨분석 ·····269
그림 2.4.130 2차 감속기 기어박스 전후방향 도상별 진동레벨분석 ·····269
그림 2.4.131 2차 감속기 베어링 상하방향 도상별 진동레벨분석 ·····270
그림 2.4.132 2차 감속기 베어링 좌우방향 도상별 진동레벨분석 ·····270
그림 2.4.133 2차 감속기 베어링 전후방향 도상별 진동레벨분석 ·····270
그림 2.4.134 축상 상하방향 도상별 진동레벨분석 ·····271
그림 2.4.135 대차 상하방향 도상별 진동레벨분석 ·····271
그림 2.4.136 광명역-대전역 가속 시 rpm에 따른 속도 ·····272
그림 2.4.137 1차 감속기 기어박스 Order 분석결과 ·····272
그림 2.4.138 2차 감속기 기어박스 Order 분석결과 ·····273
그림 2.4.139 2차 감속기 베어링 Order 분석결과 ·····273
그림 2.4.140 160 km/h 정속주행 시 1차 감속기 기어박스 주파수 분석결과 ·····274
그림 2.4.141 160 km/h 정속주행 시 2차 감속기 기어박스 주파수 분석결과 ·····274
그림 2.4.142 160 km/h 정속주행 시 2차 감속기 베어링 주파수 분석결과 ·····275
그림 2.4.143 300 km/h 정속주행 시 1차 감속기 기어박스 주파수 분석결과 ·····275
그림 2.4.144 300 km/h 정속주행 시 2차 감속기 기어박스 주파수 분석결과 ·····276
그림 2.4.145 300 km/h 정속주행 시 2차 감속기 베어링 주파수 분석결과 ·····276
그림 2.4.146 KTX(산천) 서울-광명 구간 감속기 진단기준 초과값 ·····277
그림 2.4.147 KTX(산천) 광명-대전 구간 감속기 진단기준 초과값 ·····278
그림 2.4.148 HEMU 감속기 가속도센서 부착위치 ·····278
그림 2.4.149 HEMU 감속기 센서부착 위치 ·····279
그림 2.4.150 부산역-동대구역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····280
그림 2.4.151 동대구역-대전역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····281
그림 2.4.152 대전역-광명역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····282
그림 2.4.153 광명역-대전역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····283
그림 2.4.154 동대구역-부산역 감속기 시간영역 진동특성분석 ·····284
그림 2.4.155 지지부분과 축부분의 강성과 진동측정변수의 관계 ·····287
그림 2.4.156 설비진단을 위한 신호처리기술 ·····287
그림 2.4.157 평균가산법의 원리 ·····289
그림 2.4.158 포격선 처리한 진동파형과 스펙트럼 ·····290
그림 2.4.159 진동파형의 확률밀도함수 ·····291

그림 2.4.160 리사쥬 선도 ····293
그림 2.4.161 손상예방곡선 ····294
그림 2.4.162 베어링의 구조 ····295
그림 2.4.163 베어링 진단을 위한 신호처리 순서도 ····298
그림 2.4.164 베어링 진단을 위한 신호 전처리 ····298
그림 2.4.165 베어링 진단을 위한 신호처리 ····299
그림 2.4.166 기어의 맞물림 ····300
그림 2.4.167 기어진단을 위한 신호처리 순서도 ····301
그림 2.4.168 기어장치의 진동 주파수 스펙트럼 예 ····301
그림 2.4.169 Spectral kurtosis 계산 과정 ····302
그림 2.4.170 Acceleration enveloping - digital approach ····303
그림 2.4.171 Synchronous sampling - digital approach ····303
그림 2.4.172 인공 균열에 따른 FFT 분석 ····306
그림 2.4.173 인공 균열에 따른 Wavelet 분석 ····307
그림 2.4.174 균열을 모사한 기어 시편별 상세 주파수 분석 ····308
그림 2.4.175 피팅을 모사한 기어 시편별 상세 주파수 분석 ····309
그림 2.4.176 정상상태와 이상상태의 주파수 분석 비교 (Z축 방향) ····311
그림 2.4.177 정상상태와 이상상태의 주파수 분석 비교 (Y축 방향) ····311
그림 2.4.178 시간영역 분석 ····312
그림 2.4.179 정상상태와 이상상태의 회전주파수 분석 ····312
그림 2.4.180 정상상태와 이상상태의 주파수 상세 비교 (Z축 방향) ····313
그림 2.4.181 토크 3,000N・m, 속도 1,967rpm에서의 1차 맞물림 주파수의 SER ····314
그림 2.4.182 토크 3,000N・m, 속도 1,967rpm에서의 2차 맞물림 주파수의 SER ····315
그림 2.4.183 토크 3,000N・m, 속도 1,967rpm에서의 3차 맞물림 주파수의 SER ····315
그림 2.4.184 토크 3,000N・m, 속도 668rpm 1차 맞물림 주파수 SER ····316
그림 2.4.185 토크 3,000N・m, 속도 668rpm 2차 맞물림 주파수 SER ····316
그림 2.4.186 토크 3,000N・m, 속도 668rpm 3차 맞물림 주파수 SER ····317
그림 2.4.187 토크 1,000, 속도 668rpm 1차 맞물림 주파수 SER ····317
그림 2.4.188 토크 1,000, 속도 668rpm 2차 맞물림 주파수 SER ····318
그림 2.4.189 토크 1,000, 속도 668rpm 3차 맞물림 주파수 SER ····318
그림 2.4.190 시간동기평균에 의한 신호처리 과정 ····319
그림 2.4.191 토크 1,000 N・m, 속도 100km/h시 TSA 처리 전과 후의 첨도 비교 ····320
그림 2.4.192 실차시험시(속도 155 km/h) TSA 처리 전과 후의 첨도 비교 ····321
그림 2.4.193 residual(또는 difference)신호 처리 과정 ····322
그림 2.4.194 300 km/h에서의 손상상태에 따른 진단방법 비교 ····323
그림 2.4.195 100 km/h에서의 손상상태에 따른 진단방법 비교 ····324
그림 2.4.196 정상상태시 속도에 따른 진단방법 비교 ····324
그림 2.4.197 이상상태(1개 파손)시 속도에 따른 진단방법 비교 ····324
그림 2.4.198 시편시험에 의한 기어 손상에 따른 진동 수준 비교 ····325
그림 2.4.199 시편시험에 의한 기어 손상에 따른 첨도 비교 ····326
그림 2.4.200 실물시험에 의한 기어손상에 따른 NA6(TSA 처리 전후 비교) ····327

그림 2.5.1 SKF 사의 베어링 특성주파수 계산표 ·····329
그림 2.5.2 베어링 특성 주파수 측정을 위한 실험장치 Schamatic ·····330
그림 2.5.3 실험장치에 사용된 모터 제원 : 정격 12v, 최대 6000rpm ·····330
그림 2.5.4 PCB사의 가속도계 ·····330
그림 2.5.5 실험에 사용된 SKF 사의 NJ 202 ECP 타입의 베어링 제원 ·····331
그림 2.5.6 글라인더로 손상시킨 inner링을 A로 명칭하고 정상상태의 inner링을 B로 명칭 ·····331
그림 2.5.7 베어링 특성 주파수 측정을 위한 실험장치(Type.1) Hardware 사진 ·····331
그림 2.5.8 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 정상적인 베어링의 가속도 데이터 ·····333
그림 2.5.9 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터 ·····333
그림 2.5.10 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 정상적인 베어링의 가속도 데이터 FFT ··334
그림 2.5.11 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터 FFT ····334
그림 2.5.12 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 정상상태의 베어링의 가속도 데이터 ·335
그림 2.5.13 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터 ·····335
그림 2.5.14 수정 전 실험장치를 이용한 2400rpm에서의 정상상태의 베어링의 가속도 데이터 ·336
그림 2.2.15 수정 전 실험장치를 이용한 2400rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터 ·····336
그림 2.5.16 수정 전 실험장치를 이용한 3600rpm에서의 정성상태의 베어링의 가속도 데이터 ·337
그림 2.2.17 수정 전 실험장치를 이용한 3600rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터 ·····337
그림 2.5.18 수정된 실험장치의 실제 사진과 회전축의 얼라이먼트 정렬을 위한 플라이휠 ·····338
그림 2.5.19 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 정상적인 베어링의 가속도 데이터 ·····339
그림 2.5.20 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터 ·····339
그림 2.5.21 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 정상적인 베어링의 가속도 데이터 FFT ····340
그림 2.5.22 정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터 FFT ····340
그림 2.5.23 손상된 베어링 m2 타입과 m3 타입 ·····341
그림 2.5.24 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 ·342
그림 2.5.25 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터 ·342
그림 2.5.26 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 FFT 343
그림 2.5.27 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터 FFT 343
그림 2.5.28 감속기 이상 진단 알고리즘 흐름도 ·····344
그림 2.5.29 감속기 이상 진단 모니터링 및 경향분석 흐름도 ·····344
그림 2.5.30 PXI 장비 및 도식도 ·····345
그림 2.5.31 수정된 실험장비에 PXI를 이용하여 실험을 구성한 모습 ·····346
그림 2.5.32 PXI를 이용한 실험의 측정 신호의 흐름을 나타낸 다이어그램 ·····346
그림 2.5.33 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 정상적인 베어링의 가속도 데이터 : 샘플링속도 50 kHz ····347
그림 2.5.34 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 정상적인 베어링의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 50 kHz ····347
그림 2.5.35 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m1)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 50 kHz ·····348
그림 2.5.36 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m1)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 50 kHz 348
그림 2.5.37 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 50 kHz ·····349
그림 2.5.38 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 50 kHz 349
그림 2.5.39 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 50 kHz ·····350
그림 2.5.40 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 50 kHz 350
그림 2.5.41 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 정상적인 베어링의 가속도 데이터 : 샘플링속도 100 kHz ·····351

그림 2.5.42 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 정상적인 베어링의 가속도 데이터 FFT: 샘플링속도 100 kHz …351
그림 2.5.43 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(ml)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 100 kHz ……352
그림 2.5.44 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(ml)의 가속도 데이터 FFT: 샘플링속도 100 kHz 352
그림 2.5.45 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 100 kHz ……353
그림 2.5.46 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 100 kHz ……353
그림 2.5.47 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 100 kHz ……354
그림 2.5.48 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 100 kHz ……354
그림 2.5.49 베어링 결함 신호 : (a) 원신호 (b) wavelet을 이용한 고주파수 잡음 제거 ……355
그림 2.5.50 베어링 결함이 없는 경우: time-domain 데이터가 EMD로 분해된 IMF ……356
그림 2.5.51 베어링 결함이 존재하는 경우: time-domain 데이터가 EMD로 분해된 IMF ……357
그림 2.5.52 실험에 사용된 베어링 내륜 ……358
그림 2.5.53 (a) 비손상 베어링 신호 (b) 잡음이 제거된 비손상 베어링 신호 ……358
그림 2.5.54 (a) 손상 베어링 신호 (b) 잡음이 제거된 손상 베어링 신호 ……359
그림 2.5.55 베어링 결함 신호에 대해 : (위) MED 수행전 신호, (아래) MED 수행후 신호 ……360
그림 2.5.56 MED에서 iteration증가에 따른 신호의 kurtosis변화 ……361
그림 2.5.57 EMD 통해 분해된 IMF : (좌) 비손상 신호의 IMFs (우) 결함 신호의 IMFs ……362
그림 2.5.58 두 신호의 첫 번째 IMF의 공분산행렬로부터 얻은 POV ……363
그림 2.5.59 (a)결함이 없는 베어링 신호 (b)(c)(d)결함이 있는 베어링 신호 ……364
그림 2.5.60 (a)결함이 없는 베어링 신호(Healthy 1)와 그의 AR(200)으로 추정한 신호의 비교 (b)결함이 있는 베어링 신호(Damage 1)와 그의 AR(200)으로 추정한 신호의 비교 ……365
그림 2.5.61 각 신호들의 PCA-AR을 통한 분류 : ……366
그림 2.5.62 신호의 PCA-AR을 통한 분류 : 결함신호(Damage1)와 비결함 신호(Healthy1~6)의 분류 366
그림 2.5.63 비결함 신호들의 PCA-AR 분류 ……367
그림 2.5.64 결함 신호들의 PCA-AR 분류 ……367
그림 2.5.65 기어시스템 실험모델의 2D모양과 개략적인 크기 ……368
그림 2.5.66 Pro-E를 통해 설계한 기어시스템 실험모델의 3D모델 ……369
그림 2.5.67 (a)실험모델의 전체사진 (b)기어부 측면사진 (c)기어부 상부사진 ……369
그림 2.5.68 실험 장치의 개략도 ……370
그림 2.5.69 기어 결함 신호 분석을 위해 구성된 실험 장치 ……370
그림 2.5.70 실험 모델의 기어구성과 축 회전 속도의 전반적인 사항을 나타낸 개략도 ……371
그림 2.5.71 기어 SS2-30에 부착된 플라스틱 패치의 형상과 종류별 두께 ……371
그림 2.5.72 실험 모델의 20Hz(1200 rpm) 회전 입력 조건에서 측정된 가속도 신호 ……372
그림 2.5.73 <g0>와 <g5>의 신호 비교와 <g5>에 나타난 결함신호의 간격 ……373
그림 2.5.74 감속기 회전 요소 개략도 ……374
그림 2.5.75 등속 구간별 수집 신호 ……375
그림 2.5.76 MED(필터 길이 : 100) 적용 후 신호 변화 ……376
그림 2.5.77 윈도우을 적용하여 MED(필터 길이 : 100)를 수행 ……376
그림 2.5.78 MED 수행 전 · 후의 kurtosis 차이 ……377
그림 2.5.79 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과 ……378
그림 2.5.80 윈도우를 적용한 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과 …378
그림 2.5.81 데이터 길이 10,240개(0.5초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과 ……379

그림 2.5.82 윈도우를 적용한 데이터 길이 10,240개(0.5초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 ……379
그림 2.5.83 데이터 길이 5,120개(0.25초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과 ……380
그림 2.5.84 윈도우를 적용한 데이터 길이 5,120개(0.1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과 ··380
그림 2.5.85 데이터 길이 2,048개(0.1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과 ……381
그림 2.5.86 윈도우를 적용한 데이터 길이 2,048개(0.1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과 ··381
그림 2.5.87 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 50) 수행 결과 ……383
그림 2.5.88 윈도우를 적용한 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 50) 수행 결과 ····383
그림 2.5.89 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 30) 수행 결과 ……384
그림 2.5.90 윈도우를 적용한 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 30) 수행 결과 ····384
그림 2.5.91 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 10) 수행 결과 ……385
그림 2.5.92 윈도우를 적용한 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 10) 수행 결과 ····385
그림 2.5.93 상황별 주기적인 성분의 간격 ……386
그림 2.5.94 상정 운행속도가 300km/h, 출력토크 3,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 ……389
그림 2.5.95 MED가 적용된 상정 운행속도가 300km/h, 출력토크 3,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 ····389
그림 2.5.96 상정 운행속도가 100km/h, 출력토크 3,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 ……390
그림 2.5.97 MED가 적용된 상정 운행속도가 300km/h, 출력토크 3,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 390
그림 2.5.98 상정 운행속도가 100km/h, 출력토크 1,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 391
그림 2.5.99 MED가 적용된 상정 운행속도가 100km/h, 출력토크 1,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 391
그림 2.6.1 기계상태 진단을 위한 인-라인 오일 모니터링시스템(KIST) ……396
그림 2.6.2 Effect of water contamination on bearing life(Byington et al.) ……397
그림 2.6.3 광섬유 센서를 이용한 수분량 측정장치(충남대) ……397
그림 2.6.4 ODM(미국 BFGoogrich Aerospace & 캐나다 GasTOP) ……398
그림 2.6.5 KTX-산천 일반검수 사항 체계도 ……400
그림 2.6.6 감속기 유량 점검 절차 ……401
그림 2.6.7 모터감속기(좌측 모터감속기, 우측 차축감속기) 유량 점검창 ……401
그림 2.6.8 모터감속기(좌측) 및 차축감속기 주유 및 배유 장치 ……402
그림 2.6.9 KTX-산천 감속기 윤활유 성분 분석 절차서 ……404
그림 2.6.10 1차, 2차 감속기 센서 취부 공간 ……405
그림 2.6.11 열화 센서 종류 ……406
그림 2.6.12 실험 장비 ……412
그림 2.6.13 온도(점도)와 유전률, OQ의 상관성 ……412
그림 2.6.14 수분량과 유전률, OQ의 상관성 ……413
그림 2.6.15 산화시험결과 ……413
그림 2.6.16 하드웨어 기본 연결 배치 ……416
그림 2.6.17 Argo-Hytos 센서 개조 ……416
그림 2.6.18 주유구 개조 및 특수 와셔 ……416
그림 2.6.19 센서 전기 결선 ……417
그림 2.6.20 아날로그 출력 전류 결선도 ……417
그림 2.6.21 모니터링 데이터 관리 플로우 차트 ……420
그림 2.6.22 아날로그 인터페이스를 통한 순차적인 출력형태 ……421
그림 2.6.23 윤활유 상태 분석 시스템 기본 구성도 ……423

그림 2.6.24 센서 측정 화면 ····424
그림 2.6.25 오일 관리 기준 입력 ····425
그림 2.6.26 전기 연결 ····425
그림 2.6.27 센서 출력 전압 시퀜셜 형태 ····425
그림 2.6.28 감속기 센서 결합용 지그 ····426
그림 2.6.29 신유 학습 시험 ····427
그림 2.6.30 신유 학습 조건 ····428
그림 2.6.31 시료 수분함량과 센서 측정값의 상관관계 ····429
그림 2.6.32 산가와 전기 전도도의 변화 경향 ····431
그림 2.6.33 사용유에 대한 센서 측정 결과(상대유전율) ····434
그림 2.6.34 사용유에 대한 센서 측정 결과(전기전도도) ····435
그림 2.6.35 진동 충격 시험 지그 ····436
그림 2.6.36 진동충격시험결과서 1 ····437
그림 2.6.37 진동충격시험결과서 2 ····438
그림 2.6.38 진동충격시험결과서 3 ····439
그림 2.6.39 주행거리별 감속기유 성상 추이 ····444
그림 2.6.40 감속기 종류별 주행거리에 따른 기어유 산가 추이 ····444
그림 2.6.41 감속기 종류별 주행거리에 따른 기어유 점도 추이 ····445
그림 2.6.42 사용유의 산가 변화에 따른 파라미터 추이 ····450
그림 2.6.43 실물 감속기 시험 모드(1_1차) ····452
그림 2.6.44 실물 감속기 시험 모드(1_2차) ····453
그림 2.6.45 실물 감속기 시험에서 오일 파라미터 변화(열화 센서 LS2) ····454
그림 2.6.46 실물 감속기 시험에서 오일 파라미터 변화(열화 센서 LS3) ····455
그림 2.6.47 실물 감속기 시험 모드(1차) ····457
그림 2.6.48 실물감속기 시험모드(1차 계속) ····458
그림 2.6.49 실물 감속기 시험 모드(2차) ····459
그림 2.6.50 실물 감속기 시험 모드(3차) ····460
그림 2.6.51 실물 감속기 시험 결과, LS1 센서 1~2차 시험 ····461
그림 2.6.52 실물 감속기 시험결과, LS3 센서 1~2차 시험 ····462
그림 2.6.53 실물 감속기 시험 결과 LS1, LS2 센서 3차 시험 ····463
그림 2.6.54 KTX ARU에 장착한 센서(원내) ····464
그림 2.6.55 MRU 1의 오일 파라미터 측정결과 ····466
그림 2.6.56 MRU 2의 오일 파라미터 측정결과 ····467
그림 2.6.57 ARU 1의 오일 파라미터 측정결과 ····468
그림 2.6.58 ARU 2의 오일 파라미터 측정결과 ····469
그림 2.7.1 감속기 구성부품 별 측정위치 ····473
그림 2.7.2 구성부품 별 가진시험(견인전동기) ····473
그림 2.7.3 구성부품 별 가진시험(출력기어) ····473
그림 2.7.4 구성부품 별 가진시험(중간기어 축) ····474
그림 2.7.5 구성부품 별 가진시험(차축) ····474
그림 2.7.6 구성부품 별 가진시험(트리포드) ····474

그림 2.7.7 차량 조립조건에서의 진동 측정위치 ·····475
그림 2.7.8 진동시험용 계측장비 구성 ·····475
그림 2.7.9 고유진동수 분석결과(차축) ·····476
그림 2.7.10 구성부품 별 고유진동수 분석 결과 ·····476
그림 2.7.11 조립조건에서의 고유진동수 분석결과(모터감속기-Vertical) ·····477
그림 2.7.12 조립조건에서의 고유진동수 분석결과(차축-Vertical) ·····477
그림 2.7.13 조립조건에서의 고유진동수 분석결과(차륜-Horizontal) ·····478
그림 2.7.14 조립조건에서의 고유진동수 분석결과 (차축기어감속기-Vertical) ·····478
그림 2.7.15 모드해석 결과(697Hz) ·····479
그림 2.7.16 모드해석 결과(1045Hz) ·····480
그림 2.7.17 모드해석 결과(1835Hz) ·····480
그림 2.7.18 모드해석 결과_특정주파수 관련거동(750Hz) ·····480
그림 2.7.19 모드해석 결과_특정주파수 관련거동(910Hz) ·····481
그림 2.7.20 모드해석 결과_특정주파수 관련거동(1370Hz) ·····481
그림 2.7.21 KTX 견인전동기 진동신호 측정위치 ·····482
그림 2.7.22 견인전동기 시스템의 과도응답 ·····488
그림 2.7.23 모드해석 결과(1090Hz) ·····488
그림 2.7.24 모드해석 결과(697Hz) ·····489
그림 2.7.25 클라이언트 다이어그램 및 서버 네트워크 ·····490
그림 2.7.26 모니터링 장치 설치위치 ·····491
그림 2.7.27 모니터링 성능 시험화면 및 수집 데이터 ·····491
그림 2.7.28 RPM & RMS 비교[GMF1X(vertical)] ·····492
그림 2.7.29 RPM & RMS 비교[GMF1X(axial)] ·····492
그림 2.7.30 RPM & RMS 비교[BPFI7X] ·····493
그림 2.7.31 RPM & RMS 비교[Kurtosis] ·····493
그림 2.7.32 RPM & RMA 비교[Axle PRM 1X] ·····494
그림 2.7.33 RPM & RMA 비교[GMF1X 7X] ·····494
그림 2.7.34 차량 네트워크 구성도 ·····495
그림 2.7.35 OBCS 상태정보수집 장비 Setting ·····495
그림 2.7.36 KTX DEP-xp ·····496
그림 3.2.1 전동열차의 진동 측정 시스템 특허 출원 관련 청구 도면 ·····513
그림 3.2.2 전동열차의 진동측정 장치 청구도면 (2) ·····515
그림 3.2.3 발광식 계측장비 청구 도면 ·····516
그림 3.2.4 고속열차의 안전 예방을 위한 진동 측정 시스템 청구 도면(1) ·····518
그림 3.4.1 프로그램등록증 (감속기 이상상태 진단 표시기(NA6) 계산 프로그램) ·····519
그림 3.4.2 프로그램등록증 (TSA처리 전과 후의 첨도(kurtosis) 계산 프로그램) ·····520
그림 3.4.3 T-GMS(티-지엠에스) ·····520
그림 3.5.1 T-GMS 시스템 개요 ·····521

# <표 차례>

표 1.1.1 기계부품의 검출신호와 진단기술 ·····5
표 1.2.1 KTX 1차 감속구동장치에서 발생할 수 있는 주파수 성분 (Hz) ·····9
표 1.2.2 연차별 연구목표 및 내용 ·····10
표 2.1.1 AGMA에서 제시한 기어 고장 분류 ·····25
표 2.1.2 기어의 고장 원인 분포 ·····26
표 2.1.3 베어링 손상모드의 분류 ·····35
표 2.1.4 모터감속기 구성부품의 외관형상 ·····40
표 2.1.5 차축기어 감속기 구성부품의 외관형상 ·····41
표 2.1.6 감속기 불량으로 인한 장애 현황 ·····41
표 2.1.7 미끄럼 조인트 및 고정조인트 구성장치 ·····46
표 2.2.1 감속구동장치의 온도 한계 ·····58
표 2.2.2 감속구동장치의 온도모니터링을 위한 사용 조건 ·····59
표 2.2.3 온도센서의 특성 비교 ·····60
표 2.2.4 온도센서의 장단점 비교 ·····60
표 2.2.5 온도감시 시스템 수정 전후 ·····74
표 2.2.6 실물 감속구동장치 시험기의 시험조건 ·····82
표 2.3.1 면의 굴곡에 의한 진동 ·····103
표 2.3.2 내륜의 스팟 손상이 있는 경우의 발생주파수 ·····104
표 2.3.3 베어링에 스팟 손상이 있는 경우 ·····105
표 2.3.4 편심, 피치오차가 있는 기어에서 발생하는 주파수 ·····110
표 2.3.5 고속회전기어에서 발생하는 진동 ·····111
표 2.3.6 이상 시 기어진동의 특징 ·····111
표 2.3.7 하중조건 ·····125
표 2.3.8 시험편 조건 ·····130
표 2.3.9 시험에 사용된 측정 센서 ( Z : 상하 방향) ·····131
표 2.3.10 기어별 특성 ·····141
표 2.3.11 시험편조건 ·····144
표 2.3.12 인공 결함을 삽입한 시험편 조건 ·····151
표 2.3.13 인공 마모를 삽입한 시험편 조건 ·····158
표 2.3.14 시험개요 ·····167
표 2.3.15 실험장비 ·····167
표 2.3.16 시험 조건 ·····169
표 2.3.17 실험 조건 ·····189
표 2.4.1 대표적 기어장치의 등급 ·····197
표 2.4.2 시험 개요 ·····198
표 2.4.3 측정에 사용된 장비 ·····198
표 2.4.4 시험조건 ·····199
표 2.4.5 시험 개요 ·····202

표 2.4.6 70 km/h 및 80 km/h 시 물림 주파수 및 기어 회전 주파수 ·····204
표 2.4.7 시험 개요 ·····206
표 2.4.8 측정에 사용된 장비 ·····206
표 2.4.9 300 km/h 주행 시 1, 2차 감속기 물림 주파수 및 기어 회전 주파수 ·····208
표 2.4.10 측정에 사용된 장비제원 ·····216
표 2.4.11 측정위치 및 방향 ·····241
표 2.4.12 무차원 파라미터의 성질과 주요한 용도 ·····285
표 2.4.13 진동의 기본 통계량 계산법 ·····290
표 2.4.14 회전기계의 판정기준 ·····295
표 2.4.15 균열을 모사한 기어 시편 Sideband energy ratio 비교 분석 ·····309
표 2.4.16 피팅을 모사한 기어 시편 Sideband energy ratio 비교 분석 ·····310
표 2.4.17 최고 속도에서의 회전주파수 ·····313
표 2.4.18 Sideband energy ratio 비교 분석 ·····313
표 2.4.19 속도에 따른 맞물림 주파수와 측대역 간격 ·····314
표 2.4.20 RMS 이상상태 진단 기준 ·····325
표 2.4.21 첨도에 의한 이상상태 진단 기준 ·····326
표 2.4.22 NA6에 의한 이상상태 진단 기준 ·····327
표 2.5.1 SKF사의 베어링 특성 주파수에 대한 계산표 파라메타 ·····329
표 2.5.2 가속도 데이터 RMS 값 비교 ·····338
표 2.5.3 Power Spectral Density Curve 의 면적값 비교 ·····338
표 2.5.4 수정된 실험장치를 이용한 실험의 RMS 값 비교 ·····341
표 2.5.5 NI사의 PXI장비의 제원 ·····345
표 2.5.6 기어 모델의 신호 수집을 위한 실험 장치의 설정 ·····370
표 2.5.7 실험 모델에 사용된 기어의 백래쉬 정보 ·····373
표 2.5.8 감속기 요소별 회전속도 ·····374
표 2.5.9 샘플 갯수로 환산한 회전속도와 GMF ·····374
표 2.5.10 상황별 kurtosis비교 ·····375
표 2.5.11 실험을 기반으로 작성된 MED 파라미터 테이블 ·····387
표 2.5.12 실물 감속기 시험조건에 따른 분류 ·····388
표 2.5.13 MED후 드러난 손상 피크의 주기 ·····392
표 2.6.1 KTX 및 KTX-산천 검수 기준 ·····399
표 2.6.2 열화센서 제작사 ·····406
표 2.6.3 센서 사양 비교 ·····408
표 2.6.4 열화 센서 평가 기준 ·····409
표 2.6.5 열화 센서 성능 비교 ·····410
표 2.6.6 최종 센서 선정을 위한 상관성 계수 결과값 ·····414
표 2.6.7 센서 사양표 ·····415
표 2.6.8 공급전압의 함수로서 부하저항을 결정하기 ·····417
표 2.6.9 진동 시험조건 ·····418
표 2.6.10 충격 시험조건 ·····418
표 2.6.11 센서 매개변수 계산법 ·····421

표 2.6.12 전류 출력들의 출력 매개변수들의 숫자 부호 ·····422
표 2.6.13 센서 정보 및 데이터 ·····428
표 2.6.14 수분 측정 데이터 ·····429
표 2.6.15 산가와 측정 파라미터의 상관성 계수 ·····430
표 2.6.16 사용유 시료 정보 ·····432
표 2.6.17 센서 측정 조건 ·····432
표 2.6.18 사용유 분석결과 ·····433
표 2.6.19 오일 파라미터 측정 결과 ·····433
표 2.6.20 감속기 기어유 Engrenage 3470 사양 ·····440
표 2.6.21 21편성의 유 분석 결과 ·····441
표 2.6.22 KTX 8편성의 유 분석결과 ·····441
표 2.6.23 KTX 21편성의 센서 1 측정 ·····442
표 2.6.24 KTX 21 편성의 센서 2 측정결과 ·····442
표 2.6.25 KTX 8 편성 센서 1 측정결과 ·····442
표 2.6.26 KTX 8 편성 센서 2 측정결과 ·····443
표 2.6.27 감속기 사용유 시료 정보 ·····443
표 2.6.28 사용유 시료 정보 및 오일 성상 ·····447
표 2.6.29 기어유 성상 변화 ·····447
표 2.6.30 센서 측정 조건 ·····448
표 2.6.31 감속기 사용유 시료 정보 및 오일 파라미터(LS3 센서) ·····449
표 2.6.32 열화오일 상태 관리 기준 열화 센서의 관리 기준 ·····450
표 2.7.1 KTX 감속기 모드시험을 위한 계측장비 ·····472
표 2.7.2 KTX 견인전동기 현차시험을 위한 계측장비 ·····482
표 2.7.3 상용속도 구간에서 견인전동기 시스템의 결함주파수 ·····483
표 2.7.4 고유주파수 분석결과(견인전동기_Vertical) ·····484
표 2.7.5 고유주파수 분석결과(감속기_견인전동기_기어_Vertical) ·····484
표 2.7.6 고유주파수 분석결과(감속기_견인전동기_기어_Horizontal) ·····485
표 2.7.7 고유주파수 분석결과(견인전동기_Vertical) ·····485
표 2.7.7 고유주파수 분석결과(견인전동기_Horizontal) ·····486
표 2.7.9 고유주파수 분석결과(1차 감속기_Horizontal) ·····486
표 2.7.10 견인전동기 시스템 고유진동수 분석결과 ·····487
표 2.7.11 현차시험 운행 다이아 ·····489
표 2.7.12 BSS 보드 입/출력 상태확인(예) ·····496
표 2.7.13 TECA 시리얼데이터 점검 ·····497

# 제1장 연구개발과제 개요

# 제1절 연구개발의 목적 및 필요성

## 1. 연구개발 개요

고속철도에 사용되는 감속기(reduction unit)는 모터의 회전력을 차륜에 전달하는 장치이며, 고속으로 차량을 주행시키기 위한 주요장치 중 하나이다. 고속철도용 감속기는 그림 1.1.1과 같이 1차 감속장치(Motor Reduction Unit)와 2차 감속장치(Axle Gear Box Reduction Unit), 그리고 두 감속장치의 동력 전달 역할을 수행하는 동력전달축 (tripod joint shaft)으로 구성되어 있다.

고속철도 운행시 감속구동장치에 가해지는 부하가 매우 크기 때문에 기어의 안전성 및 내구성, 각 부품의 신뢰성 등은 매우 중요하다. 감속기에 결함이 발생 할 경우 차량 운행을 중지해야 하기 때문에, 감속기 결함에 의한 사고를 예방하기 위하여 매일 정비를 하고 있고, 3년 주기로 부품을 완전 분해하여 유지보수를 실시하고 있다.

고속철도의 경우 차량 운행 중 주요 장치의 고장 발생을 알려주고 차량의 상태를 시각적으로 제공하는 안전장치가 설치되어 있다. 그러나 모터의 동력을 전달하는 감속기에 대한 고장 및 동작 상황을 알려 주는 안전장치는 설치되어 있지 않아 사고의 위험이 존재한다. 2004년 4월 고속열차 개통 이후 1차 감속기 중간기어 축 이탈, 기어 표면의 접촉 피로손상, 견인 모터 축 절손 등 감속기의 손상이 지속적으로 발생하였으며, 그림 1.1.2는 중간기어의 축 이탈 손상에 의한 손상된 기어와 축의 사례를 나타낸다. 감속기 검사 주기 단축, 유지보수 방법 변경 등을 통하여 감속기의 손상을 예방하고자 노력하고 있으나, 감속기 구조상 분해하지 않고는 베어링, 기어 등의 손상을 사전에 파악하기 어려움이 있다.

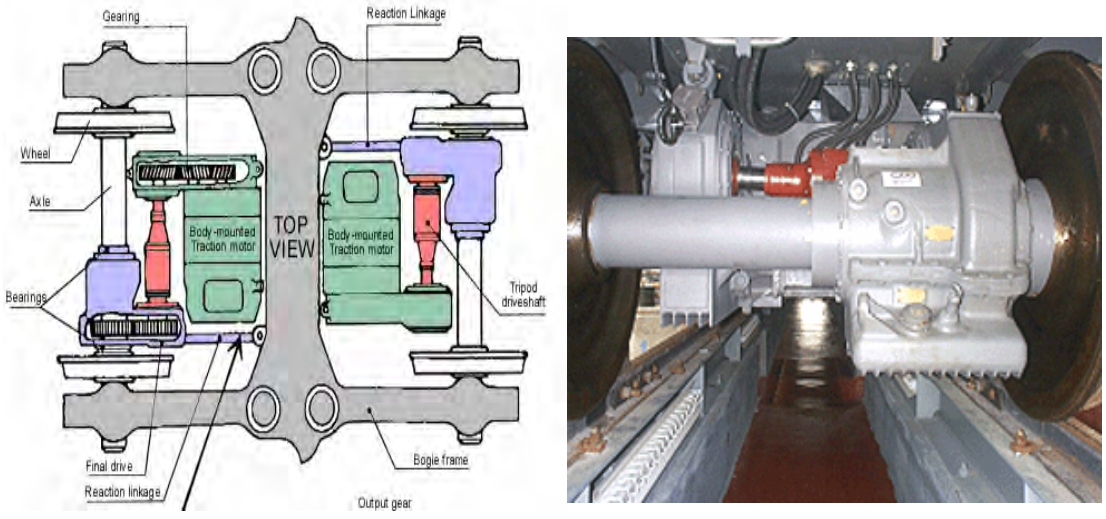



그림 1.1.1 고속철도 감속기 구조




중간기어 이탈



축 손상

그림 1.1.2 고속열차 모터감속기 중간기어 축 이탈 손상 사례

Multilog online systems[1]은 SKF사에서 풍력발전기에 적용된 모니터링 시스템을 기반으로 개발한 철도 차량 온라인 모니터링 시스템이다. 이 시스템은 철도 차량의 안전과 신뢰성을 향상시키고 유지보수비 절감을 목표로 하고 있다. 차축 베어링(wheelset bearing), 차륜(wheel), 모터, 감속기, 대차(bogie) 등의 손상발생 가능 항목에 대하여 모니터링하고 알람을 표시한다. COMORAN (Condition Monitoring for Railway Application, KNORR-BREMSE)[2]은 독일에서 개발된 대차 모니터링 진단시스템(Bogie monitoring and diagnostics)으로 제동시스템에 내장되어 있다. 이 시스템은 안전과 관련된 중요 항목인 차축 베어링의 손상, 불안정 주행 또는 탈선 등을 모니터링하고 진단할 수 있다. 이와 같은 모니터링 시스템은 대차에 설치되어 주행장치에 대하여 개략적인 모니터링이 가능하지만, 감속기에 대하여 상세한 모니터링 및 진단이 불가능한 단점이 있다.

본 연구는 고속철도의 안전한 운행을 위하여 감속기의 상태를 상시 모니터링하고 이상 발생 시 기관사에게 통보 하는 이상 상태 감시시스템 개발을 목표로 한다. 온도 및 진동을 이용한 기계부품의 상태 감시 및 진단은 산업체에서 많이 시행되고 있는 기술로서 기술적 타당성이 입증되었으나, 고속철도에 적용하기 위한 센서 선정, 측정방법, 신호 분석방법, 안전성 판별기준 등의 연구가 진행되어야 하고 고속철도 운영시스템과 인터페이스 되는 프로그램 및 하드웨어가 구축되어야 한다. 따라서 고속철도 감속기의 온도 및 진동 등의 특성을 파악하고, 진단기준 설정하였으며 이를 기반으로 고속철도 운영시스템에 적용 가능한 감속기 모니터링시스템 하드웨어 및 소프트웨어를 구축하였다.

## 2. 연구개발의 중요성

가. 기술적 측면

실시간 이상상태 상시 감시는 주기적 검사에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 실시간 감시는 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상의 감시에 효과적이며 주기적 검사 비용 및 서비스 중단에 따른 비용을 감소시킬 수 있다.

기계부품의 이상상태를 진단하는 기술은 표 1.1.1과 같이 적용되고 있으며, 상시 감시 시스템을 구축하기 위해서는 측정 물리량의 잡음 없는 원거리 전송이 가능하고 전기적인 외란의 영향을 받지 않고 내부식성, 내구성이 확보 될 수 있는 계측장비의 개발이 필요하다.

감속기에서 발생하는 주요 손상은 기어의 피로손상 또는 베어링 손상, 축 및 볼트의 손상, 윤활불량 등이 있으며, 이와 같은 손상은 이상 소음 및 진동, 온도상승, 누유 등의 이상상태를 나타낸다. 따라서 감속기의 이상상태를 모니터링하기 위한 검출항목은 그림 1.1.3과 같이 온도 및 진동, 오일상태 등이 가장 적절하다.

표 1.1.1 기계부품의 검출신호와 진단기술

| 검 출 계 | 검출기술명 | 응 용 진 단 기 술 예 |
|---|---|---|
| 진동음향신호계<br>(Vibration & Sonic Signature) | (1) 진 동 법<br>(2) 진동모드법<br>(3) 음 향 법 | (1) 진동에 의한 회전기계진단기술<br>(2) 진동에 의한 베어링진단기술<br>(3) 음향에 의한 기어진단기술 |
| 초음파신호계<br>(Ultra-Sonic Signature) | (1) 초음파법<br>(2) 대기중 초음파법<br>(3) 응력초음파(AE)법 | (1) 초음파에 의한 베어링진단기술<br>(2) 대기중 초음파에 의한 검출기술<br>(3) AE법에 의한 압력용기진단기술 |
| 열적신호계<br>(Thermal Signature) | (1) 온도계법<br>(2) 서보그래프법<br>(3) 열류계법 | (1) 측정온도에 의한 코일의 감시<br>(2) 서보그래프에 의한 굴뚝의 진단<br>(3) 열류계에 의한 진단 |
| 기계신호계<br>(Miscellaneous Mechanical Signature) | (1) 회전속도법<br>(2) 변 위 법<br>(3) 유 량 법 | (1) 각가속도에 의한 회전기의 진단<br>(2) 변위법에 의한 저속 베어링의 진단<br>(3) 유량법에 의한 파손의 진단 |

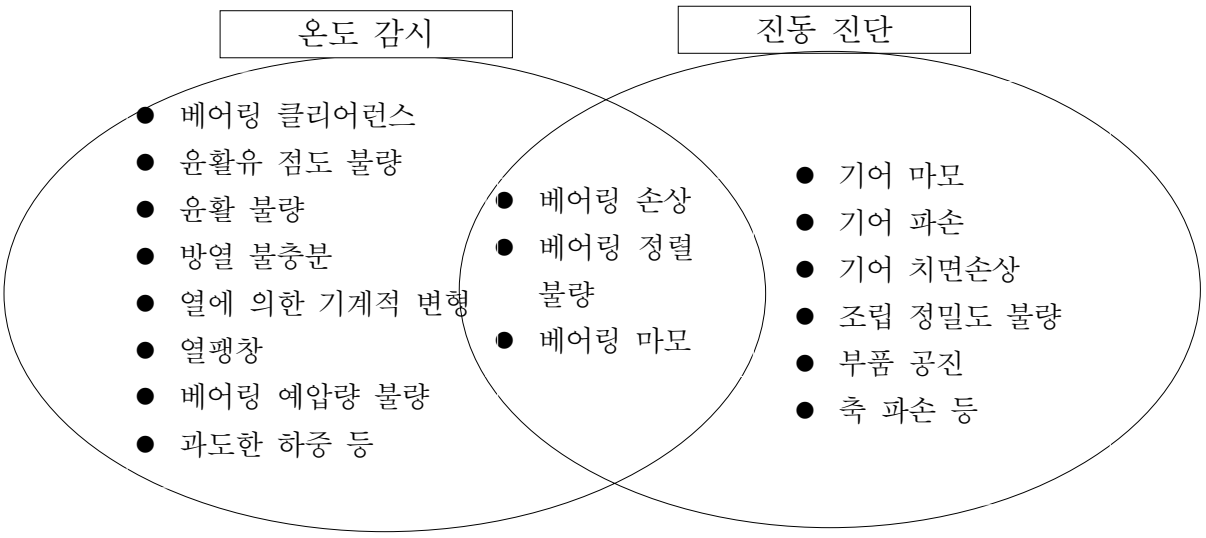



그림 1.1.3 감속기 이상상태 모니터링 항목 및 검출 가능한 손상

국내에서는 일반기계 및 설비류에 대한 모니터링 및 진단기술은 활발히 연구되고 실용화되고 있으나, 철도차량과 관련된 기술은 연구 및 실용화가 미흡한 실정이다. 반면, 해외에서는 진단기술의 발달로 인한 자동검사기술, 정밀측정 및 품질 균일관리 등을 통하여 차량부품 및 차량시스템을 최적상태로 관리하고 있다.

고속철도 차량의 감속기는 주행 안전성 확보 측면에서 중요한 역할을 하므로 정상적인 차량운행을 보장할 수 있는 모니터링 및 진단기술이 확보되어야 한다. 고속철도 차량의 감속기는 축의 회전속도가 광범위하고 차륜과 레일의 구름접촉에 의해 발생하는 진동 및 소음, 대차 및 차체의 진동 등이 복합적으로 전달되므로 일반 산업체의 진단 기술을 직접 적용하기는 매우 어렵다. 따라서 철도차량의 특성을 고려하여 감속기의 상태를 모니터링, 진단하는 기술의 연구는 모니터링 시스템 개발의 중요한 기술적 부분이다.

나. 경제 산업적 측면

최근에 부각되고 있는 이상상태 실시간 모니터링 기술을 철도에 적용하여 개발할 경우, 철도의 안전운행 및 효율적 유지보수, 쾌적성 향상 등에 크게 기여할 수 있는 등 많은 장점 및 가능성을 지니고 있다.

고속열차용 감속기 이상상태 감시시스템 기술 개발 연구 과제를 통하여 관련 기술을 국내 기술개발로 완성하게 되면 감속기와 대차의 이상상태를 실시간으로 감시하기 때문에 철도의 안전운행 및 효율적 유지보수, 쾌적성 향상 등에 크게 기여할 수 있는 기술개발이 될 것이다. 또한 고속열차용 감속기 이상상태 감시시스템 기술개발에 의하여 실시간으로 상태감시를 수행하기 때문에 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상 감시에 대단히 효과적이며 주기적 감시 및 서비스 중단에 따른 비용을 감소시킬 수 있는 효과가 있다. 뿐만 아니라, 감속기 이상상태 감시 시스템 기술을 통하여 철도차량의 공공 교통 수송수단으로써 신속, 정확하게 승객의 안전수송 역할을 충실하게 수행할 수 있다.

고속열차용 감속기 이상상태 감시시스템 기술 개발 수준은 KTX와 KTX-산천의 차량에 적용을 목표로 기술 개발하며, 완성된 기술을 통하여 전동차에도 적용하여 철도차량의 안전성을 한층 더 업그레이드 하는 기술을 개발할 수 있다. 또한, 상태감시 기반 정비 절차 도입으로 철도분야 유지보수 선진화에 기여하고 유지보수 비용 절감 기술 개발에 지속적으로 활용 가능 하다.

감속기 이상상태 감시시스템 기술은 KTX 고장에 의한 국민들의 불안 해소와 대형사고 미연 방

지를 통하여 운행정지 사고로 인한 경제적 손실(660억/년, 2건 기준)을 최소화 할 수 있는 기술로서 예측가능하고 철도를 믿고 신뢰할 수 있는 사회기반의 토대가 될 것이며 세계 최고 수준의 안전성 확보 기술구현이 가능할 것이다.

## 3. 연구개발 필요성

고속열차의 안전운행 및 고장예방을 위하여 철도선진국에서는 윤축 베어링 온도 모니터링, 대차 안정성 및 헌팅(hunting) 모니터링 등에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 일부 모니터링 제품은 적용단계에 있다. 국내의 경우 고속철도 운영 기간이 짧지만 그림 1.1.4와 같이 고속열차 감속기 성능시험에 관한 기술을 확보하고 있고, 감속기를 부하 시험할 수 있는 대형시험기를 보유하고 있으므로 감속기의 손상을 방지하기 위한 모니터링 기술 개발을 위한 사전준비는 되어 있다.

고속철도 감속기의 유지보수 및 관리가 상태 진단을 통한 체계적이고 과학적인 관리가 아닌 운전시간을 기초로 일정 주기로 보수하는 Time Based 보전이 이루어지고 있어 이의 보완이 매우 시급하다. 따라서 상태진단을 통한 감속기 유지보수 및 관리를 위하여 관련 기술의 개발이 시급히 요청되고 있다. 300 km/h 의 고속주행 시 감속기 손상으로 인한 대형 사고를 사전에 방지하기 위하여 감속기의 손상발생 가능 항목에 대하여 모니터링하고 알람을 표시할 수 있는 안전장치의 개발이 시급히 추진될 필요가 있다.

고속열차 운행 시 감속기의 정상 상태를 모니터링, 진단하기 위하여 최적의 위치에 센서를 설치하고 효율적으로 데이터를 취득하고 전송하는 H/W 기술의 개발이 필요하며, 이상상태를 진단하고 알람을 표시할 수 있는 연속 상태 진단 S/W 핵심기술을 개발하여야 한다.

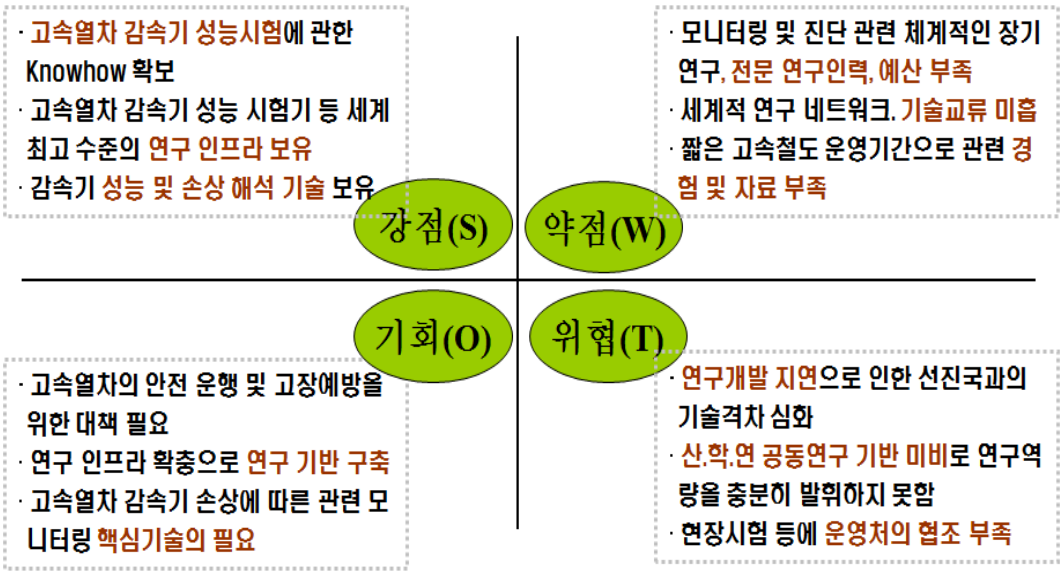



그림 1.1.4 감속기 모니터링 기술개발 SWOT 분석

# 제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

## 1. 연구개발 최종목표

### 가. 최종목표

○ 감속기에서 발생하는 신호(온도, 진동, 윤활유 상태)를 상시 모니터링하고 실시간 분석, 진단하여 이상발생 시 기관사에게 즉시 통보되는 감속기 이상 상태 모니터링시스템 기술개발
- 베어링/기어/윤활유 손상별 이상상태 데이터베이스 구축
- 온도/진동/윤활유 이상상태 진단기준 정립
- 온도를 이용한 이상상태 감시 및 진단시스템 개발(샘플링 1 ㎐, 오차범위 ±1℃)
- 진동을 이용한 감속기 모니터링 및 진단시스템 개발 (최고 샘플링 12 ㎑ 이상)
  (대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함)
- 윤활유 상태 분석을 통한 감속기 이상상태 감시 및 진단시스템 개발
- 최고속도 400㎞/h까지 적용 가능 (실차 검증속도 300 ㎞/h)
- 주요 고장에 대한 이상상태 모니터링 및 진단시스템 신뢰도 95% 이상

### 나. 최종목표의 성격 및 설정근거

○ 온도를 이용한 감속기 이상상태 감시시스템(샘플링 1 Hz, 오차범위 ±1℃)
- 일반적인 온도센서(T-type 열전대)의 허용오차가 보통 ±1℃ 이고, 고속열차 감속기의 무부하 온도상승 시험기준이 1차 감속기의 경우 “주위온도 +80℃”를 기준으로 하고 있으므로 이를 고려하여 샘플링 및 오차범위를 설정함
- 온도센서의 경우 실제 고속열차에 적용하기 위하여 정밀도를 과도하게 높이는 것 보다는 소형, 컴팩트한 구조에 안정적인 센서이어야 함

○ 진동을 이용한 감속기 모니터링 및 진단시스템 (최고 샘플링 12 kHz 이상)
- 고속철도 1차 감속기의 입력회전수 4,000 rpm에서 발생할 수 있는 주파수 성분은 표 1.2.1과 같이 1차 성분 최저 35 Hz 이고 3차 성분의 최고는 5,601 Hz 임
- 따라서 진동을 모니터링 하고 진단할 수 있는 시스템의 최고 샘플링은 최고 주파수 성분의 2배 이상인 12 kHz 이상으로 설정함 (차세대 고속열차 최고 5,679 Hz 고려)
- 대차 진동을 측정 및 저장하고 측정 데이터를 백업할 수 있는 기능 구축

표 1.2.1 KTX 1차 감속구동장치에서 발생할 수 있는 주파수 성분 (Hz)

| 주파수 성분 | 입력회전수 4000 rpm | | | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| | 1차성분 | 2차성분 | 3차성분 | |
| $f_m$ | 1800 | 3600 | 5,400 | $f_m$ : 기어의 물림 주파수<br>$f_r$ : 기어의 입력축 회전주파수<br>$f_{ro}$ : 기어의 출력축 회전주파수 |
| $f_m \pm nf_r$ | 1733,<br>1867 | 3533,<br>3667 | 5,199<br>5,601 | |
| $nf_r$ | 66.7 | 133.4 | 200.1 | |
| $nf_{ro}$ | 35.3 | 70.6 | 105.9 | |

2. 연차별 연구목표 및 내용

연차별 연구목표로는 아래 그림과 같이 1차년도에 시스템의 기본설계, 2차년도에 시제품 제작, 3차년도에 시제품 성능시험으로 설정하였으며, 연차별 주요 연구내용은 아래 표와 같다.




그림 1.2.1 연차별 연구목표 및 주요 연구내용

표 1.2.2 연차별 연구목표 및 내용

| 연 차 | 연구목표 | 주요 연구내용 |
|---|---|---|
| 1차년도 | ■ 감속기 손상 메커니즘 분석 | ■ 감속기 손상사례 및 원인 분석(고속철도 및 전동차)<br>■ 감속기 손상모드 및 손상 메커니즘<br>■ 주요 손상사례별 이상상태 영향 분석<br>■ 감속기 이상상태(온도, 진동) 데이터베이스 구축(I)<br>(실물 시험기 및 소형 시험기 이용) |
| | ■ 온도 감시시스템 기본 설계 | ■ 감속기 온도상승 요인 분석<br>■ 계측센서의 사용 환경조건 분석<br>(측정범위/전원,통신방식/전송거리/빈도)<br>■ 온도진단 방법 결정<br>■ 온도 모니터링 시스템 기본설계<br>■ 계측센서의 기본 성능 시험 |
| | ■ 감속기 진동특성 분석 및 모니터링 시스템 기본설계 | ■ 감속기 진동 증가 요인 분석 (감속기 결함 시나리오 분석)<br>■ 감속기 실물/현차시험<br>■ 진동특성 분석(시계열/주파수 분석)<br>■ 계측센서 부착위치 및 최적 센서 선정<br>■ 감속기 진동 모니터링 시스템<br>기본설계 (H/W, S/W) (대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함) |
| | ■ 윤활유 상태 분석 시스템 기본설계 | ■ 감속기 오일 열화 요인 분석<br>■ 감속기 오일 샘플채취 및 분석<br>■ 센서 취부방법 결정<br>■ 윤활유 열화감지를 위한 센서 기본 성능시험 및 선정<br>■ 윤활유 모니터링 시스템 기본설계<br>(H/W, S/W) |
| 2차년도 | ■ 감속기 손상모드 실물 시험 및 영향 분석 | ■ 감속기 손상모드 시험 및 손상모드별 이상상태 영향 분석<br>■ 감속기 이상상태 데이터베이스 구축 (II)<br>(실물 시험기 및 소형시험기 이용 시험, 검증) |
| | ■ 온도 감시시스템 제작 및 성능시험 | ■ 온도 감시시스템 H/W 및 S/W 시제품 제작<br>■ 시제품 시스템 성능평가 (H/W 영향인자 평가, |

| | | |
|---|---|---|
| | | 신뢰성 저하 방지대책 수립)<br>■ 정상/이상상태 조건하 (무부하/부하) 시험실 시험 |
| | ■ 진동에 의한 결함 및 이상상태 분석/평가 시스템 구축 | ■ 감속기 실물/현차시험 및 이상상태 진동특성 분석<br>■ 감속기 결함 및 이상상태 평가방법 정립<br>■ 감속기 이상상태진단 S/W (알고리즘 포함) 구축<br>■ 감속기 이상상태진단 H/W 구축 및 성능시험<br>■ 대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업용 S/W, H/W 구축 및 성능시험 |
| | ■ 윤활유 열화감지 시스템 제작 및 성능시험 | ■ 감속기 오일 샘플채취 및 분석, DB구축 (I)<br>■ 윤활유 열화감지 장치 시제품(S/W, H/W) 제작<br>■ 정상/이상상태 Lab Test (성능평가) |
| 3차년도 | ■ 온도 감시시스템 현장 적용 시험 및 적용성 평가 | ■ 감시시스템의 현장 적용성 평가 및 업그레이드<br>■ 시험평가 데이터의 온도 이상상태 기준 설정 |
| | ■ 진동에 의한 결함 및 이상상태 평가방법 정립/ 시스템 검증 및 보완 | ■ 감속기 결함 실물시험 및 진단방법 정립<br>■ 고속철도 감속기 진동 이상상태 기준 설정 및 정도향상<br>■ 진동 모니터링 시스템 S/W(알고리즘 포함), H/W 검증 및 보완 |
| | ■ 진동/윤활/온도 상태 Monitoring 통합 시스템 구축 | ■ 통합시스템의 Input/Output 알고리즘 구축<br>■ 통합시스템 신뢰성 검증<br>– 신뢰성 입증 시험방법 및 시험기준 정립<br>– 정상/이상상태 시험실 시험 검증<br>– 이상상태 중첩을 통한 실차시험 검증<br>■ 무선화 및 KTX-OBCS 연계방안 수립<br>■ 통합시스템 유지보수 매뉴얼 작성 |
| | ■ 윤활유 열화감지 시스템 현차 시험 및 DB 구축 | ■ 감속기 오일 샘플 채취 및 분석, DB구축 (II)<br>■ 현차시험을 통한 데이터 처리시스템 검증 및 업그레이드<br>■ 감속기 윤활유 이상상태 기준 설정 |

## 제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

현재 산업체에서 사용되고 있는 다양한 종류의 기계시스템에 대한 상태진단을 수행하기 위하여 사용되고 있는 방법은 진동법을 통한 회전기계 진단기술, 열화상 카메라를 이용한 열화상 측정, 기계 임피던스법에 의한 재질 및 결함 진단기술 등 매우 다양하다. 아래에 진단과 관련된 적용기술 사례 및 기술개발 현황에 대하여 조사하였다.

### 1. 국내 관련기술

#### 가. 온도를 이용한 모니터링 및 진단 기술

○ 무선/무전원SAW 센서를 이용한 철도차량 이상상태 실시간 모니터링 기술개발
- 철도시스템 건전성 모니터링 연구(2009, 한국철도기술연구원)의 세부과제로 진행
- 무선/무전원(SAW) 센서 요구조건 분석, 모니터링 시스템 구축
- KTX 차축 베어링 온도 실시간 모니터링을 위한 시험 분석

○ SAW 센서를 이용한 무선 RFID 태그 압력/온도 집적센서 개발(2007, 아주대)
- 무선 RF에너지를 이용 SAW를 생성하여 압력/온도 센서 개발
- 초소형 안테나 이용 440MHz에서 1m이상 감지거리와 2.4GHz 중심주파수에서 30cm 통신거리 확보

○ UHF 대역 수동형 온도 센서 태그(2008, 포항공대)
- 광범위한 UHF 대역 수동형 RFID 태그에 온도 센싱기능을 내장한 칩을 개발
- 20° C~100° C 사이의 온도를 측정한 결과, 0.64° C/LSB의 해상도를 나타내었으며 온도 센서 구동에 필요한 입력 전력은 −11 dBm, 온도 오차는 최대 0.5° C, 칩 면적은 1.1 x 0.34㎟, 동작주파수는 100kHz, 전력소모는 64㎼W, 변환율은 12.5 k−samples/sec이었음

○ 무선 전력 구동 센서 태그 내장형 온도센서의 설계(2007, 충북대)
- 무선 전력 구동 센서 태그 내장형 온도센서는 0.25 um CMOS 공정을 사용하였고 전원 전압은 1.5 V, 칩의 면적은 0.32 × 0.22 mm, 동작주파수는 2 MHz
- 시뮬레이션 결과 출력 비트 수가 증가하면 온도센서의 해상도가 증가하게 되는데 설계된 온도센서는 8 bit 출력에서 해상도가 평균 4 ° C/bit로 측정되었음.

○ MEMS/MOSFET 하이브리드 스위치를 이용한 자가전원 무선센서(2010, 중앙대)
- MEMS/MOSFET Hybrid 스위치를 이용하여 Energy Scavenging 기술로 획득한 에너지로 무선 온도 센서를 동작시키는 연구를 수행
- MEMS/MOSFET Hybrid 스위치를 사용하여 solar cell을 이용한 자가 전원 무선 온도 센서를 제작하고, 그 성능을 확인하기 위해 동일한 동작을 하는 MIT의 회로와 데이터 송신 비교 연구를 수행하였으며, 일반사무실 실내조명(300 lux)에서 7.542초 마다 20m 거리까지 데이터를 보낼 수 있었고 이는 MIT 회로 보다 송신 주기가 37% 향상됨

○ FBG 센서를 활용한 가공 전차선의 온도/스트레인 모니터링

- 온도/스트레인 변화에 대한 높은 민감도와 장거리 측정이 가능한 장점을 가진 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서를 활용한 가공 전차선 모니터링 시스템의 개발
- FBG 센서는 손쉽게 전차선로에 직렬 또는 병렬로 부착할 수 있고 전기적으로 절연되어 있으며 센서로부터 수십 km의 거리에서도 측정이 가능한 센서로 전차선의 신속한 모니터링과 실시간 측정 가능함

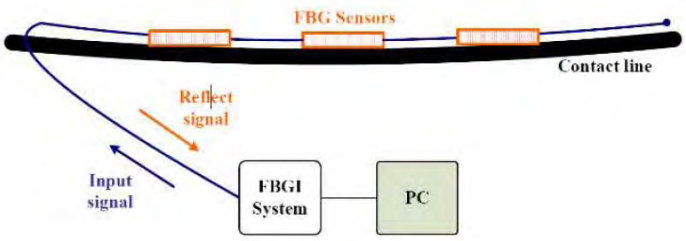



그림 1.3.1 FBG 센서를 활용한 전차선 모니터링 시스템 구성

나. 진동을 이용한 모니터링 및 진단 기술

○ 국내에서는 회전기계의 결함진단에 관한 연구가 많이 진행되면서 발전기, 모터 등과 같은 회전체에 대한 자동진단시스템이 개발되어 산업분야에서 다수 이용되고 있음

○ 회전기계의 결함진단을 원인과 증상에 대한 인과관계를 고려하여 한계치를 설정하지 않고 정확한 판별을 위해서 fuzzy이론을 도입한 이상 진단 시스템을 개발하였음

○ 한국원자력연구소에서는 원자로 내부 구조물의 손상 혹은 결함을 감지하기 위해서 진동데이터를 이용한 진동평가 프로그램(해석, 측정, 검사, 평가)을 이용하여 이상상태 감지 시스템을 개발함

○ 고가의 Gearbox vibration monitoring기법이 국내의 Power Plant에 도입되었으나 Vehicle 분야에는 비용문제와 편의성 문제로 본격적인 연구에 도입된 사례가 발견되지 않음

○ 국내자동차의 Gearbox에 관한 자료 중 “주파수 해석에 의한 기어의 고장 신호 해석”으로 자동차공학회에서 논문이 게재된 바 있으나 실용화에 대한 장점은 찾을 수 없음

다. 윤활유 이상상태 모니터링 및 진단 기술

○ 일반적으로 기계류의 원활한 작동을 위해 사용되는 윤활유는 기계장치의 사용에 따라 변화하는 다양한 내부 환경 변화를 포괄적으로 함유하기 때문에 윤활유 시료 채취를 통한 기계 장치 내부 변화 상태를 평가할 수 있음

○ 손쉬운 오일 열화 분석 방법은 오일의 색상변화를 보는 것으로 산업계 현장에서 오래전부터 사용되고 있는 방법이나 점검자의 주관적 판단에 의지하기 때문에 객관성 및 신뢰성이 떨어지고 추적관리가 어려움. 따라서 윤활유의 상태를 지속적으로 추적관리하고 문제 발생을 사전에 예방하기 위해서는 오일분석을 통한 모니터링 기법이 필요함. 주로 사용되고 있는 모니터링 기법은 광학식 센서를 이용한 방법, 화학적 분석을 현장 및 실험실에서 실시하는 방법과 전자기

적 신호를 이용한 방법 등이 있음

○ 윤활유 관리 기법을 통한 기계상태의 진단은 국·내외 산업계에서 활발히 진행되고는 있으나 타 진단기법에 비해 비교적 기술수준이 낙후된 이유는 오일시료 샘플링을 통한 분석이 비교적 고가의 실험실 장비를 이용하여 제한된 공간에서 수행될 뿐만 아니라 시료가 가지는 윤활유 상태의 대표성이 어느 정도로 신뢰성을 가지는가에 대한 부분임. 또한 시료 분석 자체도 시간이 소요되기 때문에 기계 상태의 적기 분석이 어렵다는 문제도 있어 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로서, KIST에서 오일상태 모니터링 연구를 수행한 바 있음

○ 통합 기계상태 모니터링 기반기술 개발 (1999-2003, KIST)과제에서는 대형 설비의 마모, 진동, 온도, 압력, 유량 등의 측정 기술들을 통합하여 측정하고, 상태 진단을 위해 각 측정 상호 변수들의 이상 발생에 따른 상호 상관관계를 규명하며, 통합적으로 기계시스템의 상태를 진단할 수 있는 통합 기계 진단 시스템 개발을 목표로 수행 하였으며 본 연구를 통하여 윤활유내의 오염도의 상태 모니터링 연구를 수행하였음

○ 이 연구에서는 윤활유의 오염을 정량적으로 측정하기 위하여 광센서를 이용한 광자기량 변화를 측정하는 방식 사용

○ 오일 오염은 인위적으로 오염된 오일을 하중부과장치의 저널베어링에 투입하고 모사 시험장치를 작동하여 일정시간 경과할 때마다 오일샘플링을 하여 분석하는 방식으로 수행

○ 이 연구를 통하여 오일 오염이 회전체 내부의 기계 요소 부품인 베어링, 축등의 파손에 영향을 미칠 가능성이 있다는 것이 예측 됨
- 오일에 수분이 혼합되어 기계요소부품 내부를 순환하게 되면 수분이 포함되지 않은 정상상태의 오일에 비해 점도 특성이 바뀌게 되어 기계의 정밀도 감소와 함께 기계요소 구성품을 녹슬게 하는 등 문제를 야기 할 수 있으므로 충남대에서는 광섬유 센서를 이용한 오일 내 수분량 모니터링 시스템에 대한 연구를 수행한 바 있음
- 호서대에서는 자동차용 엔진오일의 열화 메카니즘을 바탕으로 엔진오일의 열화상태를 측정하기 위해 엔진오일 열화 감지센서를 사용하여 엔진오일 품질모니터링 장치를 제작한바 있으나 상용화를 위해서는 측정 신뢰성을 높이는 연구가 계속적으로 진행되어야 할 부분임

## 2. 국외 관련기술

### 가. 온도를 이용한 이상상태 모니터링 기술

○ 자가발전 무선 온도센싱 시스템(Imec, 벨기에, 2010)
- 150~1000 Hz의 vibrational 와 piezoelectric energy harvester을 이용한 자가발전형 무선 온도센서 기술개발
- 자가발전 전력 85㎼W, 온도 센서의 소비전력: 1.5 mW±10㎼W
- base station까지 데이터 송수신은 15초

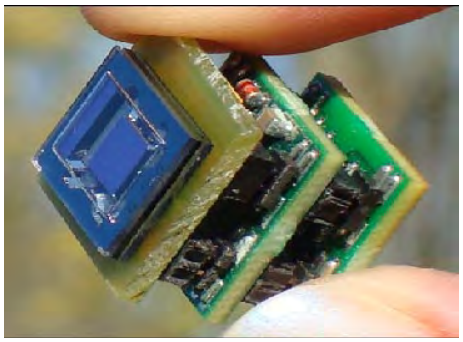


그림 1.3.2 완전 자가발전 무선 온도센서

○ 미국은 철강 생산설비 감속기(mill stand gear drive)의 베어링 온도를 모니터링 하기 위하여 온도 모니터링 시스템을 구축함(NUCOR Steel Arkansas, 2009)
- 최신 온도 모니터링 기술을 이용하여 온도 변화를 감지하고 과도한 하중 또는 속도에 의해 온도 한계를 초과하였을 때 경보하고 관계자에게 통보해 주는 시스템
- 계측된 데이터는 인터넷으로 전송되어 전문가가 설비의 속도와 하중이 적절한지를 판단하는 기초 자료로 활용
- 감속기에 열화상 감시 기술(thermal imaging technology)이 적용되어 온도 모니터링 시스템의 데이터를 확인하고, 윤활 및 냉각시스템의 오동작을 감시함
- 온도상태 모니터링 기술을 적용하여 생상설비의 성능과 신뢰성을 향상시켰으며, 고가($24 million)의 감속기 손상 위험을 감소시킴

○ COMORAN – Condition Monitoring for Railway Application (KNORR-BREMSE) [2]
- 철도차량 제동시스템에 포함된 대차 모니터링 진단시스템(Bogie monitoring and diagnostics)으로 안전과 관련된 중요 항목인 윤축 베어링의 손상, 불안정 주행 또는 탈선 등을 모니터링하고 진단할 수 있는 시스템임
- 대차에 센서를 설치하여 차륜의 속도, 온도, 가속도 등을 측정할 수 있고 실시간으로 계측, 분석하여 기관사에게 즉시 통보되는 On-board 시스템임
- 안전 관련 모니터링 기능은 차축 베어링(Hot axle box) 감시, 비회전 축(non-rotating axles) 감시, 탈선 감시, 대차 헌팅(bogie hunting)이 있으며 진단 기능으로는 윤축 베어링, 차륜 답면 찰상, 차륜 거동, 안정성, 동력전달임

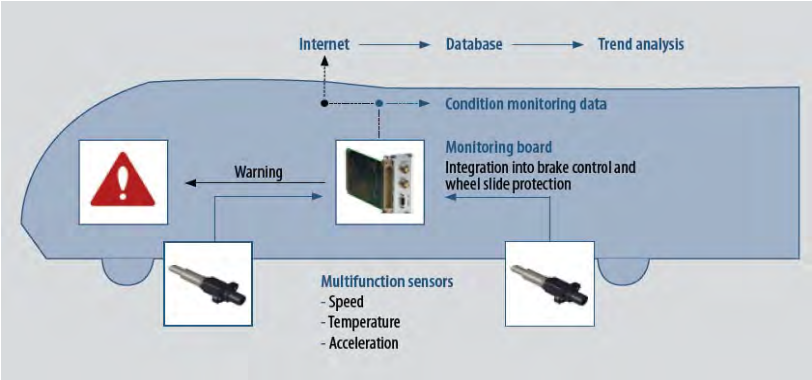



그림 1.3.3 철도차량 대차 모니터링 진단시스템

○ Axle box temperature & Derailment monitoring system on rail vehicles(이탈리아)

– 기존 선로변에 설치한 윤축 베어링 온도 감시 장치는 온도 감시가 연속적이지 못하고, 기관사에게 자동으로 알람을 전달하지 못하는 단점이 있음

– 기존 제품의 문제점을 개선하고자 윤축 베어링의 온도 및 윤축의 탈선 가능성을 실시간, 연속적으로 측정하고 과열 등이 발생할 경우 제어실에 알람 제공

– 윤축에 설치되어 베어링의 온도를 모니터링 하는 센서 유닛(WTS, Wheel Temperature Sensor unit)과 데이터의 취득 및 전송 역할을 하는 데이터 취득 유닛(DCT, Data Collection and Transmission unit)으로 구성됨

○ 윤축 베어링 모니터링 시스템 (SNCF, 프랑스)

– 접촉식 차량 onboard 모니터링 시스템으로서 온도센서(Temperature sensor) + 배터리& 무선모듈 (wireless module with battery)로 구성됨

– 윤축 베어링의 이상 발열 감지

– 열차 주행 중 실시간 검측가능, 전원 한계

○ Multilog online systems (SKF) [1]

– 철도차량의 안전과 신뢰성을 향상시키고 유지보수비 절감을 목표로 손상발생 가능 항목에 대하여 모니터링하고 알람을 표시함.

– 모니터링 항목 : 윤축 베어링 상태와 그리이스(grease) 수명, 차륜 찰상 및 형상, 대차 안정성 및 hunting, 탈선, 모터, 감속기, 동력전달축, 불평형 및 공진상태, 레일 상태

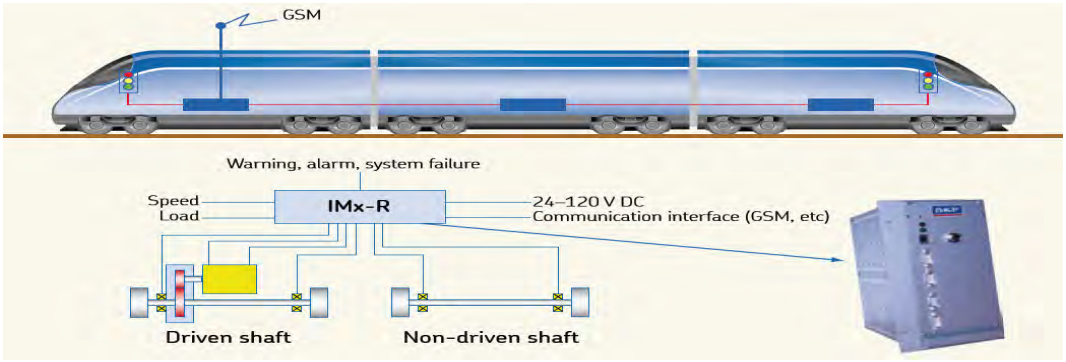



그림 1.3.4 Railway bogie condition monitoring 시스템 (SKF)

○ SAW (Surface Acoustic Waves) 센서를 이용한 무선 모니터링

- 기존 온도 모니터링 시스템은 센서 신호를 연속적으로 받기 위하여 케이블 연결이 필요하지만, 최근 이를 극복한 무선/무전원(SAW) 센서를 이용한 모니터링 기술이 개발됨
- 저가로서 SAW 생산원가 낮고 무전원 및 무선 계측이 가능함
- 응용분야
  - 항공기 : 제동장치, 내부 엔진, 로터 등의 온도 모니터링 적용
  - 고전압 변압기 온도 모니터링
  - 자동차 타이어 압력 모니터링
  - 송전선 온도 감시
  - 모터의 로터 온도 모니터링 등

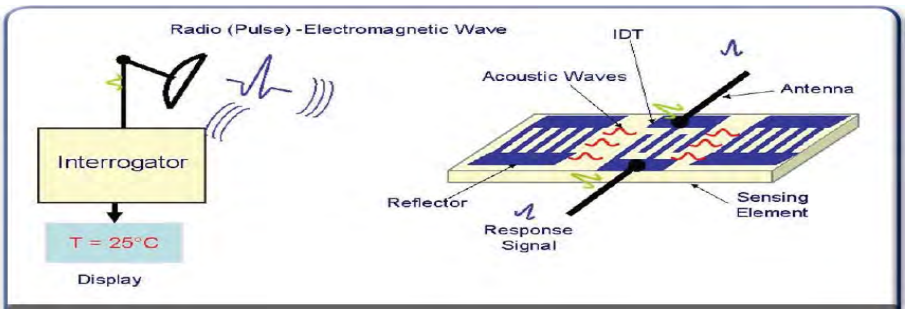



그림 1.3.5 SAW 센서를 이용한 무선 온도 계측 시스템

나. 진동을 이용한 이상상태 모니터링 기술

○ 일본 철도차량 분야에서는 차량의 주요부품을 해체하지 않는 상태에서 결함 및 이상상태를 진단하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 그 가운데에서도 진동을 이용한 이상상태를 감지하기 위한 시스템이 개발되고 있음

○ 일본 JR에서는 신간선 대차의 유지보수 및 검사를 위해서 진동을 이용한 결함 감지를 위한 두 개의 알고리즘을 개발하였음

○ 영국에서는 철도차량의 안전성과 유지보수의 시간과 비용을 절약하기 위해서 대차의 결함 및 이상상태 감지 시스템에 관한 연구를 수행하였음

○ 협력업체인 미국의 Emerson과의 전략적 제휴를 통해 기존 Power Plant에 적용하였던 PMMS(Plant Maintenance Management System)을 국내의 철도 Gearbox에 적극 도입하여 특장점인 Monitoring 기술 중 특정 Module만 Compact화하여 최적의 국산화하는 방법이 효과적인 Process로 사료됨

○ 고가의 Gearbox에 대해서 특수화 된 vibration monitoring기법, 특히, Alarm signal을 출력할 수 있는 정확한 알고리즘은 국제특허를 할 만큼 특수한 결과물이 될 수 있을 것으로 판단됨

다. 윤활유를 이용한 이상상태 모니터링 기술

○ 기어나 베어링과 같은 기계 요소부품은 정상 사용조건하에서도 재료의 기계적 강도 특성에 영향을 미치는 부식 등이 발생하면 초기 설계 수명보다 짧은 수준에서 파손이 발생하는 경우가 발생

○ 다음 그림은 수분 함유량이 베어링 수명에 미치는 영향(Carl Byington et al., 미국 Impact Technologies사 자료, "Gearbox corrosion prediction via oil condition sensing and model fusion")을 나타낸 그림으로 수분 함유량이 베어링 수명에 지배적인 영향을 미침

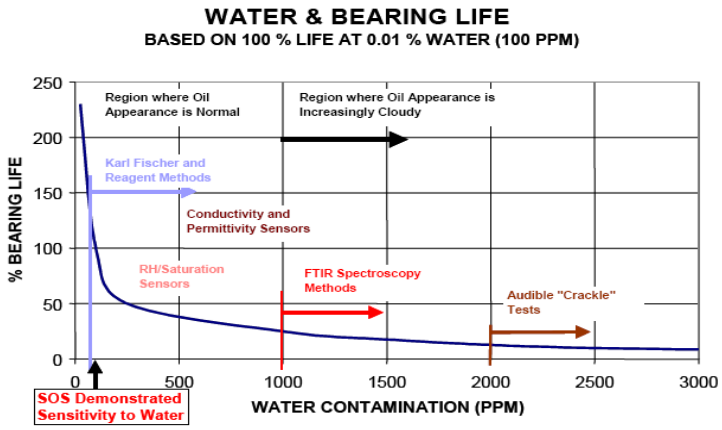



그림 1.3.6 베어링 수명에 미치는 수분함유량의 영향

– 따라서 Impact Technologies사에서는 다음 그림과 같은 지능형 오일센서와 진동패턴 분석 tool을 포함하는 진단기법을 개발하고 lab test를 거쳐 상시 모니터링 가능성을 선보였지만 아직 상용화 단계에 이르지는 못함

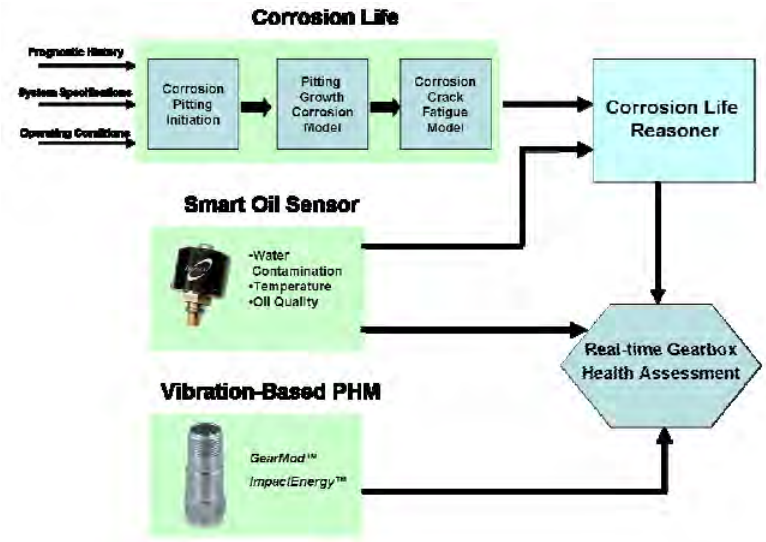



그림 1.3.7 통합형 기어박스 모니터링 시스템

○ 미국 BFGoogrich Aerospace사와 캐나다 GasTOP 사는 군용 헬리콥터(AH-64)의 기어박스에 사용되는 오일에 포함되는 마모물질을 모니터링하기 위한 시스템 연구를 수행하였고 본 연구에서 개발된 센서(ODM: Oil Debris Monitor)는 inductive measurement 방식을 사용. 기존의 magnetic chip detector를 1대 1로 대치하여 설치가 가능하므로 기어박스에 설치를 위한 별도의 홀 가공이 필요 없고 철금속뿐만 아니라 비철금속 마모 입자까지도 감지 가능한 장점이 있음. 개발된 센서는 McDonnell Douglas Helicopter 사에서 검증시험을 거친후 현재 AH-64 헬리콥터에 장착되어 시험 평가 중에 있음

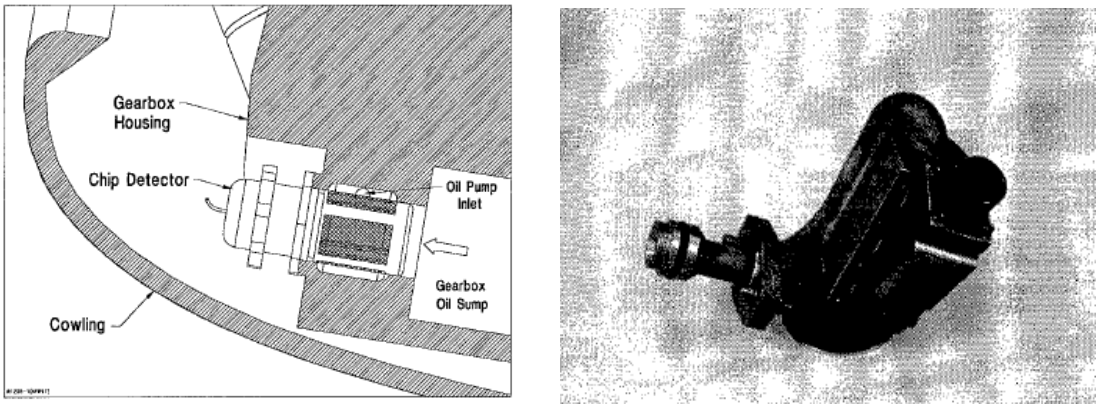



그림 1.3.8 기존 chip detector 방식(좌)과 AH-64 ODM 센서

○ Peng et al. [3]에 의하면 진동과 오일분석 부분은 기계상태의 진단에 매우 효과적인 기법으로 각각 독립적으로 사용할 경우는 두 가지 방식이 복합적으로 사용될 경우에 비해 30~40% 정도 밖에 상태를 진단하지 못하는 것으로 나타나 통합시스템이 중요하다는 것을 나타냄

## 3. 특허동향

가. 온도를 이용한 이상상태 모니터링 기술

○ 검색어(무선*무전원*온도)로 특허 검색한 결과, 산학연에서 다양하게 연구를 진행하고 있음

○ 무선방식의 온도 모니터링 시스템은 산업계 전반에서 적용중이나 운행 중인 철도차량의 감속기 온도 모니터링 시스템은 적용사례가 없음

○ 무선/배터리전원 방식의 온도 모니터링 시스템이 다양화되고 실용화 되어 있는 것에 비하여 무선/무전원 방식의 온도 모니터링은 MEMS의 발전으로 최근에 연구가 진행중에 있음

○ 특허 실용
- 자가 발전 무선 감지 장치 및 방법, (주)코아칩스, 2009
- 열전 변환 소자를 이용한 무전원 고로 표면 감시장치 및 방법, 포항산업과학연구원, 2008
- 표면 탄성파를 이용한 감지 장치 및 감지 방법, 오재근, 2006
- 무전원 알에프아이디 태그를 이용한 자동차 타이어 공기 압력 및 온도 측정장치, 정보통신연구진흥원, (주)하이칩스, 2005

- 타이어의 압력 및 온도 측정용 표면탄성파 센서, 현대차, 기아차, 2003
- 압전발전 및 무선전력전송을 이용한 표면탄성파 기반의 무전원 및 무선 센싱 시스템 주식회사 엠디티, 2005
- 에너지 포집형 표면탄성파 기반의 무전원/무선 센서, 주식회사 엠디티, 2004
- 무전원 전기에너지 발생장치, 오현택, 2005
- 전선용 무전원 온도측정장치, 주식회사 씨앤케이, 2004
- 광접속함체의 실시간 모니터링 시스템의 운용방법, 주식회사 씨티네트웍스, 2009
- WIRELESS HIGH-TEMPERATURE SENSOR, TOYO COMMUN EQUIP CO LTD, 1994
- DETECTING DEVICE OF CONCENTRATION OF UNBURNT COMPONENT OF BURNING APPLIANCE, HARMAN CO LTD, 1997
- WIRELESS MONITORING SYSTEM WITH NO POWER SUPPLY AND SLAVE STATION TO BE USED FOR THE SYSTEM, HITACHI CABLE LTD, 2008
- WIRELESS TEMPERATURE MEASURING SYSTEM, Changhuan Zhang, 2011
- Wireless temperature monitoring system, Zosimadis, 2000

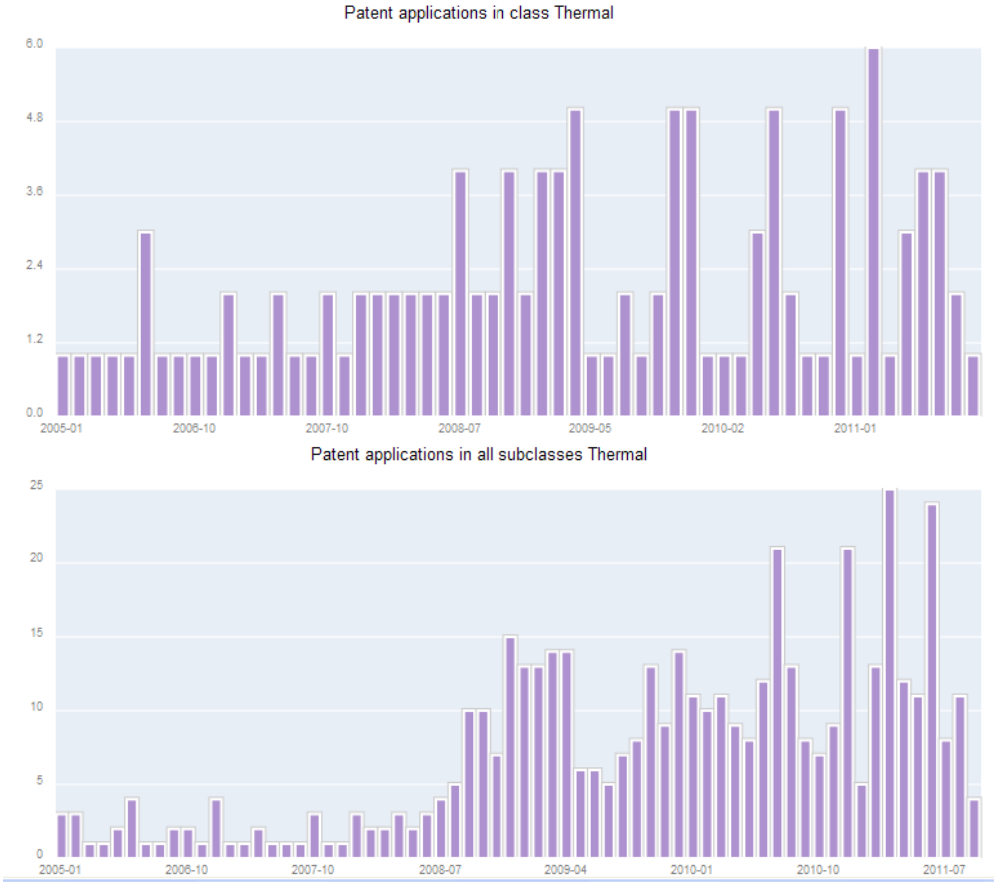



그림 1.3.9 온도 모니터링에 대한 특허출원현황

나. 진동을 이용한 모니터링 및 진단 기술

◯ 지능형 상태 감시 및 결함 진단시스템, 2008년
◯ 음향방출신호를 이용한 결함진단시스템 및 결함진단방법, 2009년
◯ 차량에서 발생할 수 있는 고장진단을 향상시키는 방법, 2008년

○ 진동신호 양자화에 의한 거동반응을 이용한 고장진단방법, 2007년
○ 차량 전자 시스템 조립체의 기능 결함 진단방법, 2005년
○ Bearing vibration diagnostic apparatuses and methods of detecting vibration of bearings, 2001
○ Method and device for the diagnosis of characteristic vibration in a mechatronic system. 2001
○ System for diagnosing facility apparatus managing apparatus and diagnostic apparatus, 2006
○ Diagnosis method of defects in a motor and diagnosis device, 2009
○ System and method of diagnosis through detection of mechanical waves refrigeration systems and/or household appliances, 2008
○ Method of diagnosing vibration of rotary machine, 1982
○ Vibration diagnosis method for rotary machine, 1984
○ Machine diagnostic system and method for vibration analysis, 2001
○ System and method for diagnosing jet engine conditions, 2003
○ Fault diagnosis method and apparatus, 2003
○ Alarm signal을 출력할 수 있는 정확한 알고리즘(Gear의 결함상태와 Critical상태와의 선형성)은 국제특허에 합당한 특수한 결과물이 될 수 있을 것으로 판단됨
○ 국내 특허 중 “Gear box, Vibration monitoring, 진단” 등에 의한 내용은 검색되지 않음

다. 윤활유 이상상태 모니터링 및 진단 기술

○ 통합형 인라인 오일 모니터링 장치
- 본 발명은 오일의 성능에 관련된 여러 파라메타들을 동시에 연속적으로 모니터링하는 통합형 오일모니터링 장치에 관련된 내용
- 오일을 수용하는 부재에 오일이 접촉하도록 장착되는 프로브 및 프로브와 인라인 연결된 분석모듈을 포함함
- 본 발명의 오일 모니터링 장치는 오일의 열화와 장비의 작동을 평가하기 위한 오일의 물성에 관련된 파라미터들이 동시에 연속적으로 모니터링 되며 최적 오일 교환시기 및 오일이 사용되는 장비의 작동을 적시에 예상할 수 있음

○ 윤활설비의 윤활유 상태 검사방법
- 본 발명은 윤활관리 항목 중 윤활유의 수분함량, 점도 및 오염도를 윤활 감시장치의 각 센서로부터 측정값을 입력받아 특정 알고리즘을 이용하여 사용 목적에 따른 관리기준에 맞추어 예측진단이 가능하여 이를 윤활설비의 관리 시스템에 사용하거나, 나아가 온라인상에서 윤활유 상태를 실시간으로 모니터링하는데 기초자료가 되는 윤활설비의 윤활유 검사방법에 관한 것임

- 윤활유 감지 센서에 대한 특허는 다수 출원([통합형 인라인 오일 모니터링 장치, 2009년], [윤활설비의 윤활유 상태 검사방법, 2008년] 등)되어 있으나 현재 과제로 개발을 하고자 하는 철도차량의 특정 부품 전용, 즉 고속 철도차량 감속기유의 열화 감지 시스템에 대한 특허는 아직까지 없는 것으로 파악됨

## 제4절 연구개발결과가 관련 분야에서 차지하는 위치 등

기계부품의 상태 모니터링은 타 산업계에서는 오래전부터 적용된 기술이다. 풍력 산업과 같은 타 산업의 경우, 유지보수 계획 수립에 상태 모니터링 시스템을 기초하고 있으나, 철도차량의 경우 일정시간 기준 유지보수를 수행하고 있다. 특히, 풍력 발전소 운영자들은 온라인 상태 모니터링 시스템을 통해 각각의 터빈과 기어박스 또는 전체 풍력발전 시스템을 모니터링함으로써 유지보수가 필요한 시점을 예상하고 있다[4]. 최근, 철도 차량의 경우에도 모니터링 시스템의 장점을 인식하고 상태기반 유지보수(Condition based maintenance)기술의 도입이 시도되고 있다[1-2].

철도차량에 적용되는 모니터링 기술로 고속철도 차량의 경우 운행 중 주요장치 고장 발생 시 차량의 상태를 시각적으로 제공하는 안전장치가 설치되어 있으며, 견인 및 모터블럭 고장, 회로차단기 및 기계적 전달고장, 차축 비회전 및 고착, 대차불안정 및 완해불량, 화재감지(동력실) 및 승객 알람(객실) 등 21종에 대하여 주요 고장(MF)에 대한 상태를 감시하고 있다. 또한, 지상에서는 차축 발열검지장치(Hot Box Detector, HBD)를 설치하여 비접촉 적외선 온도센서를 이용하여 열차 운행시 차축베어링의 온도를 모니터링 하고 있다.

유럽의 철도차량 기술사양인 TSI(European Technical Specification for Interoperability)에서는 철도차량에 대한 실시간 차상 모니터링 방안에 대해 규정하고 있다. 최근, 유럽의 고속열차제작사 및 부품 공급사는 TSI 규격을 만족하기 위하여 철도차량 결함의 조기 감지 및 중대 결함 방지, 보수교체 시기의 판단, 상태 기반 정비(CBM :Condition Based Maintenance) 관리체계의 입력자료 제공 등을 목적으로 차상 on-line상태 모니터링 시스템을 개발하고 있으며, 우선 대상으로 최고속도 250Km/h 이상의 고속열차의 차상 윤축베어링 온도 모니터링 시스템을 개발 중에 있다[5].

본 연구개발로 완성한 고속열차용 감속기 모니터링 시스템의 우수성 및 특징은 다음과 같다.

- 고속철도 감속기 모니터링 기술은 감속기의 상태를 실시간으로 모니터링 할 수 있다.
- 철도차량 감속기의 손상을 진단할 수 있는 세계 최초의 철도차량 감속기 전용 모니터링 시스템이다.
- 철도차량 감속기의 온도 및 진동, 오일의 상태를 감시하고 이상상태를 진단하여 기준을 초과할 경우 이상상태를 운영자에게 통보된다.
- 동적인 진동데이터를 실시간 주파수 분석을 통하여 베어링 및 기어의 상태를 구분할 수 있고 진단 가능하다.
- 감속기 이상상황을 진단하여 큰 고장이 발생하기 전에 통보하여 운용자들이 상태기반 유지보수를 수행할 수 있게 한다.
- 대차의 진동 측정, 저장 및 데이터 백업이 가능하다.
- 최고속도 400 km/h 까지 적용가능하다.

# 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

# 제1절 감속기 손상 메커니즘 분석

## 1. 감속기 손상모드 및 손상 메커니즘

### 가. 기어손상

#### (1) 기어의 손상 분류

기어의 파손은 AGMA(American Gear Manufactures Association)[1]에서 21개 모드로 정의되고 있으며, 표 2.1.1은 기어의 파손형태를 분류하여 정리한 것이다. 기어 고장유형은 표에서와 같이 접촉면에서의 표면손상과 기어 이의 파손으로 크게 분류 할 수 있다. 표면손상의 경우에는 마모, 소성변형, 피로손상 등으로 구분 할 수 있으며, 파손은 단독모드나 여러 가지 손상 모드가 복합적으로 나타나는 경우가 많다.

그림 2.1.1은 기어의 고장 유형 및 원인을 나타낸 것으로, 고장원인을 운전조건, 제작 및 설계, 윤활 등으로 분류하고 있으며 각각의 원인에 대하여도 다양한 형태의 고장 모드가 발생한다. 윤활제와 관련된 손상으로는 마모, 스커핑, 스코오링 등으로 형태로 나타난다. 표 2.1.2의 고장원인 분포를 살펴보면, 속도, 하중 등의 운전조건 문제가 가장 많고, 제작 및 설계 결함이 두 번째로 나타난다.

표 2.1.1 AGMA에서 제시한 기어 고장 분류

| 대분류 | 중분류 | 소분류 | 비고 |
|---|---|---|---|
| Surface Deterioration (표면손상) | Wear(마모) | Normal Wear<br>Abrasive Wear<br>Corrosive Wear<br>Scratching | 미세한 입자의 맞물림 |
| | Plastic Yielding (소성항복) | Rolling(Peening)<br>Ridging<br>Rippling<br>Rising | 소성흐름(Plastic Flow) |
| | Scuffing (Adhesive Wear, Scoring) | Slight Scoring<br>Severe Scoring | 금속접촉에 따른 마모 |
| | Surface Fatigue (표면피로) | Initial Pitting<br>Destructive Pitting<br>Spalling<br>Frosting | 면압피로 |
| | 그 외의 요인들 | Lubrication Failure | 설계능력 미달에 따른 기어 불량 |
| Breakage (파손) | | Bending fatigue Breakage<br>Overload Breakage<br>Case Crushing | 경화층 파손 |

| 고 장 원 인 | | 고장 유형 | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 파손/분리 | | | | | | 마멸 | | | | 변형 | |
| | | 기어이 | | 플랭크 | | | | | | | | | |
| | | 파손(파괴)—과하중 | 파손(파괴)—피로 | 균열* | 초기피팅 | 파괴피팅* | 스폴링* | 마모* | 스커핑* | 스코어링 | 부식 | 소성플로우* | 웜플로우* |
| 운전조건 제작 및 설계 | 제작결함 | | • | • | • | • | • | • | | | | • | |
| | Misalignment에 의한 과하중 | • | | | | | | | | | | | |
| | 빈번한 하중 사이클 | | • | | | | | | | | | | |
| | 피로 설계 | | • | | • | • | • | | | | | | |
| | 운전 조건 (속도, 하중) | | | | • | • | • | • | • | • | • | | |
| 윤활 | 점도 | | | | | | | • | • | • | • | | |
| | 질 | | | | | | | • | • | • | • | | |
| | 량 | | | | | | | • | • | • | | | • |
| | 오염 | | | | | | | • | • | • | • | | |

* 많은 경우 피로손상으로 진전됨.

그림 2.1.1 기어의 고장유형과 고장원인

표 2.1.2 기어의 고장 원인 분포

| 고장 원인 | 고장 원인의 분포, % |
|---|---|
| Vendor 결함 | 36.0 |
| 계획/설계 | 12.0 |
| 조립 | 9.0 |
| 제작 | 8.0 |
| 구성재료 | 7.0 |
| 운전상의 문제점 | 47.0 |
| 유지 | 24.0 |
| 수리 | 4.0 |
| Misalignment | 19.0 |
| 외적의 영향 | 17.0 |
| 이물질 | 8.0 |
| 구동/종동측의 교란 | 7.0 |
| 전원의 교란 | 2.0 |

(2) 대표적인 손상 모드 [2-3]

(가) 마모 (Wear)

기어 이의 마모는 접촉면의 표면재료가 운전 중에 닳아 없어지는 것으로 일반적인 마모의 원인은 불충분한 윤활 유막에 의해 금속과의 접촉, 연마입자에 의해서 발생한다. 진행 중인 마모의 형태는 다음 사항으로 평가하여 결정할 수 있다.

1. 외형, 2. 유막두께, 3 오일내 입자크기, 4. 기어 이의 표면 경도

정상적으로 윤활이 이루어지는 경우에 작동이 시작될 때와 끝날 때를 제외하고, 접촉이의 표면이 완전히 분리되도록 충분한 윤활막이 형성되어 마모가 생기지 않을 것이다. 그러나, 일반적인 마모 상황과 같이 재료의 특성과 환경적 조건들에 의해 기어에 마모가 생길 수 있다.
일반적으로 기어에 발생하는 마모 형태는 정상마모(Normal wear)와 연삭마모(Abrasive wear)가 대표적이다.

① 정상마모

정상마모는 반드시 발생하는 것으로 예기된 수명시간 내에 기어가 정상적으로 작동할 수 없을 정도는 아니기 때문에 일반적으로 손상으로 보지 않으며, 그림 2.1.2와 같이 유막두께와 관계가 되며 윤활 형태에 따라서 3가지로 구분할 수 있다.

- 유체윤활(hydrodynamic lubrication)
  - · 유막두께(h) = 8$\mu$m~20$\mu$m
  - · 마찰계수 = 0.002~0.01
  - · 전 영역에서 두 표면을 언제나 분리하고 있으며 윤활성능을 결정하는 유체 성질은 유체의 점도임
- 혼합윤활(mixed-film lubrication)
  - · 마찰계수 = 0.004~0.1
  - · 접촉표면의 약간의 마모 발생
- 경계윤활(boundary lubrication)
  - · 마찰계수 = 0.05~0.2
  - · 유막이 매우 얇아서, 마모수준은 매우 높게 나타남

정상적인 마모는 일반적으로 폴리싱, 보통 마모, 과도 마모의 3가지로 구분 할 수 있다.

- 폴리싱

폴리싱이란 일반적으로 마모율이 낮음을 의미하며 양호한 윤활 상태에서 장시간 운전된 기어에서 나타난다. 마모는 그림의 유막두께와 관련되며 일반적으로 혼합 두께 위쪽에 있으면 폴리싱 상태를 나타내며, 기어는 설계가 잘 되었고, 조립 및 정비가 정확하게 수행되었음을 의미한다.

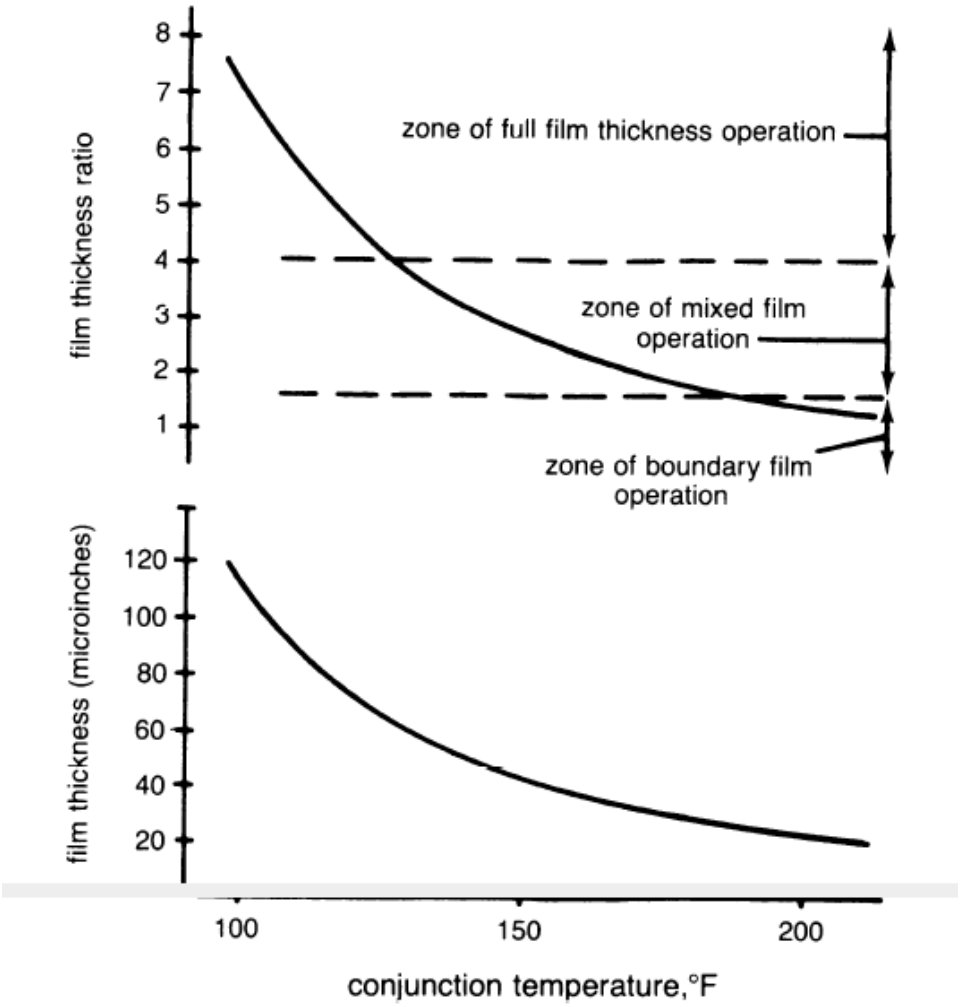



그림 2.1.2 유막 두께비와 온도와의 관계

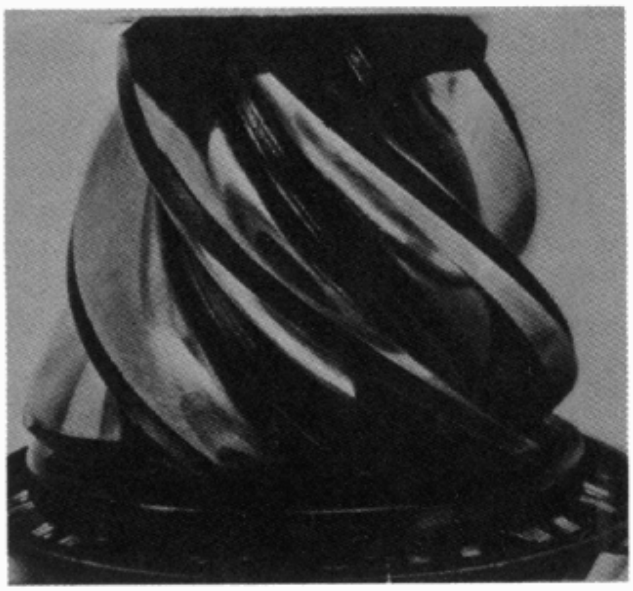


그림 2.1.3 폴리싱 형태

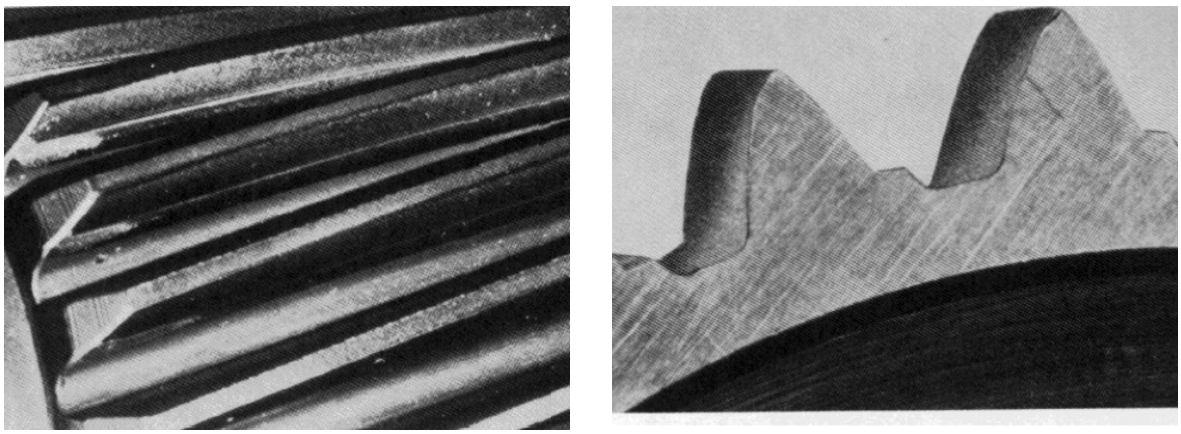


그림 2.1.4 보통 마모와 과도 마모

– 보통마모

유막이 충분히 두껍지 않으면 폴리싱보다 다소 큰 비율의 마모가 발생한다. 운전 피치선에 홈이 발생하며, 상대적인 미끄럼이 있는 곳인 이 끝이나 이뿌리 영역에서 금속이 마모된다.

– 과도마모

유막 두께비가 1이하의 경계윤활의 형태에서 발생한다. 마모율이 상당히 높으며 불균일한 마모에 의한 기어 이의 두께가 감소된다.

② 연삭마모

연삭마모의 생성원인 중의 하나는 윤활시스템 내에 남아 있는 기어표면 마모의 파편이다. 즉, 이물질로 기어장치와 윤활시스템이 오염되었을 때 오염입자의 크기가 윤활막의 두께보다 크면 연삭마모가 발생한다. 오염은 기어의 이나 베어링에서 떨어진 금속, 조립 전에 충분히 제거되지 않은 래핑제, 주물로부터의 모래나 스케일, 혹은 기름이나 대기 중의 불순물 등의 다양한 원인으로 발생한다.

연삭마모가 발생하면 반경방향의 긁힌 상처가 나타나는데, 입자가 상당히 미세할 때는 그 흔적이 선으로 나타나지 않는다. 연삭마모를 줄이는 방법에는 오일의 점도를 높이고, 극압 오일의 사용, 표면 처리 상태의 개선, 오일 온도 및 미끄럼 속도의 감소 그리고 기어의 형상변화 등이 있다.

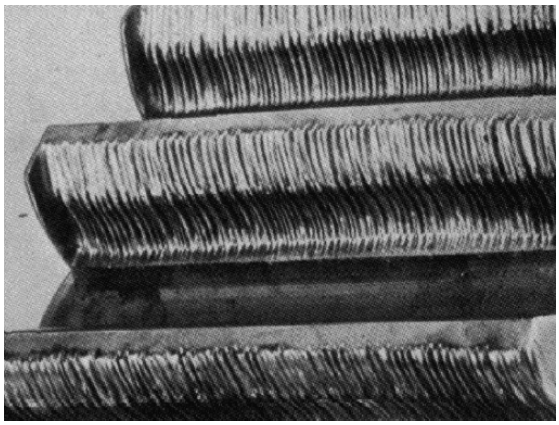


그림 2.1.5 연삭마모

(나) 표면 피로(Surface fatigue)

표면피로는 반복적인 하중에 의하여 표면 또는 표면 밑의 응력이 재료의 피로한도를 넘어서면서 발생하는 피로파괴 현상이다. 그림 2.1.6은 기어에 접촉하중이 작용하였을 때 발생하는 이론적인 헤르츠안 응력이며, 그림 2.1.7은 응력의 크기를 도식적으로 나타내고 있다. 하중이 충분히 높고 응력 주기가 크면 표면에서 작은 입자가 피로한도를 넘어 떨어져 나감으로 접촉면에 작은 홈이나 공동이 생성되며, 이를 일반적으로 피팅이라 한다. 표면 손상의 심각성에 따라 (a)초기 피팅(initial pitting), (b)파괴적 피팅(destructive pitting), (c)스폴링(spalling, 쪼갬, 깸) 등의 몇 가지 종류의 단계로 분류한다.

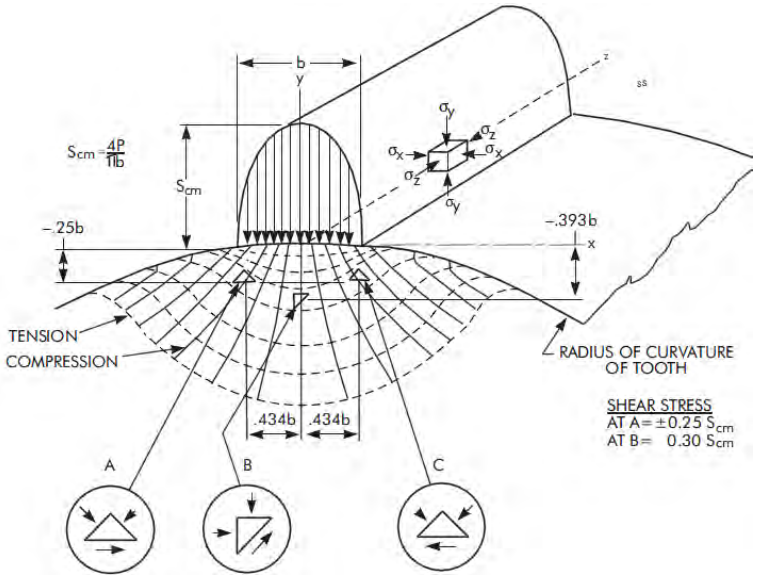



그림 2.1.6 이론적인 헤르츠안 응력

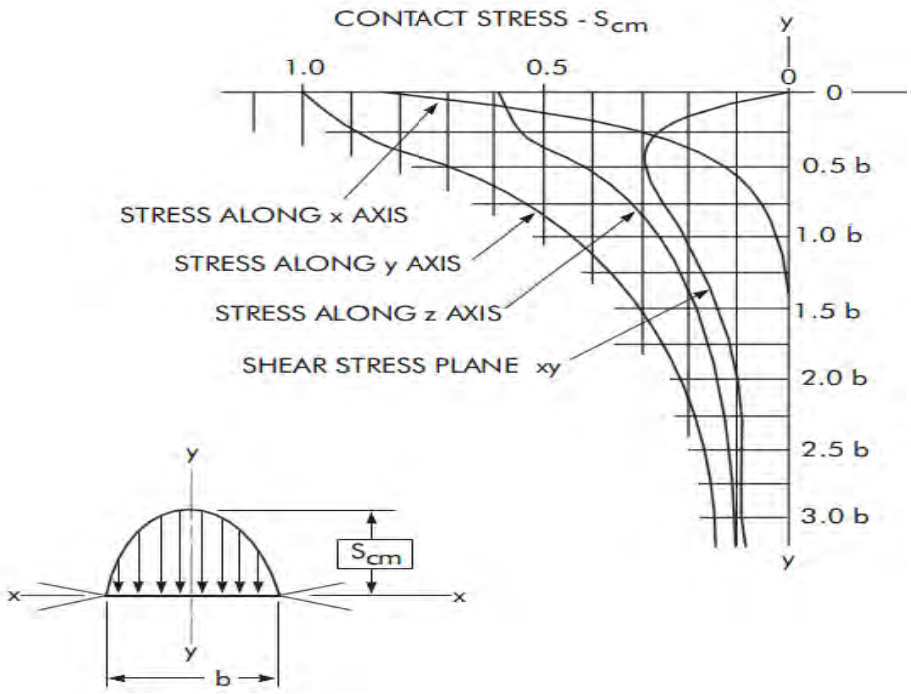



그림 2.1.7 접촉면에서의 발생하는 응력의 크기

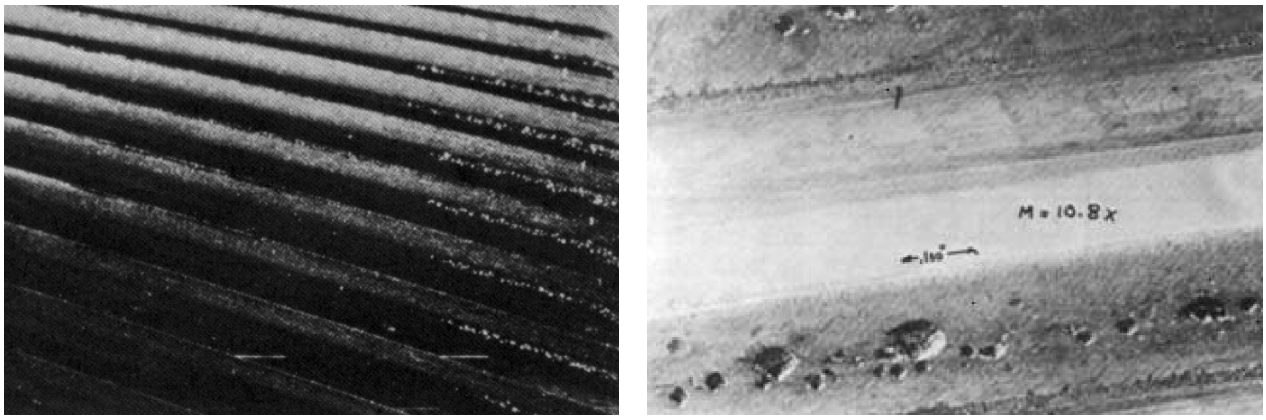



그림 2.1.8 초기 피팅

① 초기 피팅 (initial pitting)

초기 피팅은 기어가 사용되기 시작했을 때에 발생되기 시작해 해당 면적이 하중을 전달하는데 충분한 단계까지 계속된다. 초기 피팅은 기어 이 중에서 균등하지 않은 표면에 의하여 높은 응력이 발생한 부분에서 발생한다. 이러한 피팅은 상대적으로 짧은 시간에 발생하지만 심각한 상태로 발전하지는 않는다.

② 파괴적 피팅 (Destructive pitting)

파괴적 피팅은 일반적으로 피치라인 아래에서 시작하며, 피트의 수와 크기가 급진적으로 증가한다. 그림 2.1.9는 싸이클에 따른 초기 피팅과 파괴적 피팅의 차이를 보여주고 있다. 파괴적 피팅은 표면에 과하중이 작용할 때 발생하며, 일반적으로 표면의 경도가 기준값을 만족하여도 이러한 피팅이 발생한다면 일반적으로 기어시스템에 과하중이 작용한다는 증거이다.

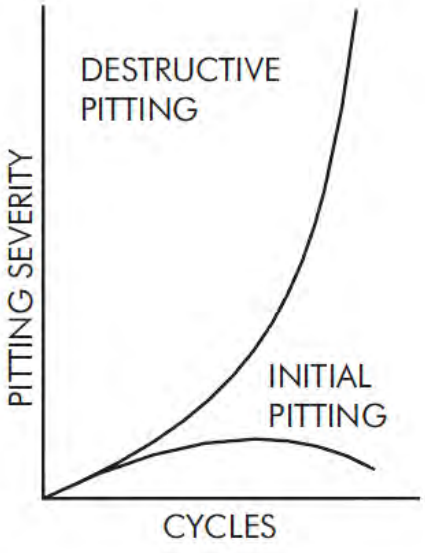



그림 2.1.9 초기 피팅과 파괴적 피팅

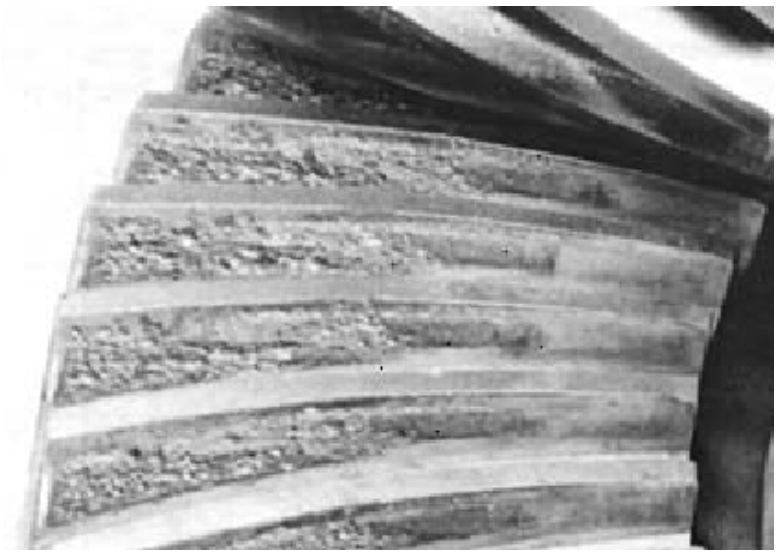


그림 2.1.10 파괴적 피팅

③ 스폴링(Spalling)

스폴링은 접촉면에서 보다 광범위한 형태의 면이 떨어져 나가는 형태를 말한다. 그림 2.1.11은 피팅과 스폴링의 차이를 설명하는 것으로 피팅은 깊이가 10um 이내의 경화층에서 발생하며, 스폴링은 깊이가 20~100um의 깊이까지의 조각이 떨어져 나가는 현상이다. 스폴링의 진행 단계는 균열이 발생한 후, 시작점으로부터 재료의 파편이 표면으로부터 떨어져나가면서 미끄럼 방향으로 퍼져나간다. 스폴링은 과도한 접촉응력이 원인이며, 표면경화기어, 표면 및 표면하의 결함 또는 부적합한 열처리로부터 과도한 내부응력이 생성된 부분에서 주로 발생한다.

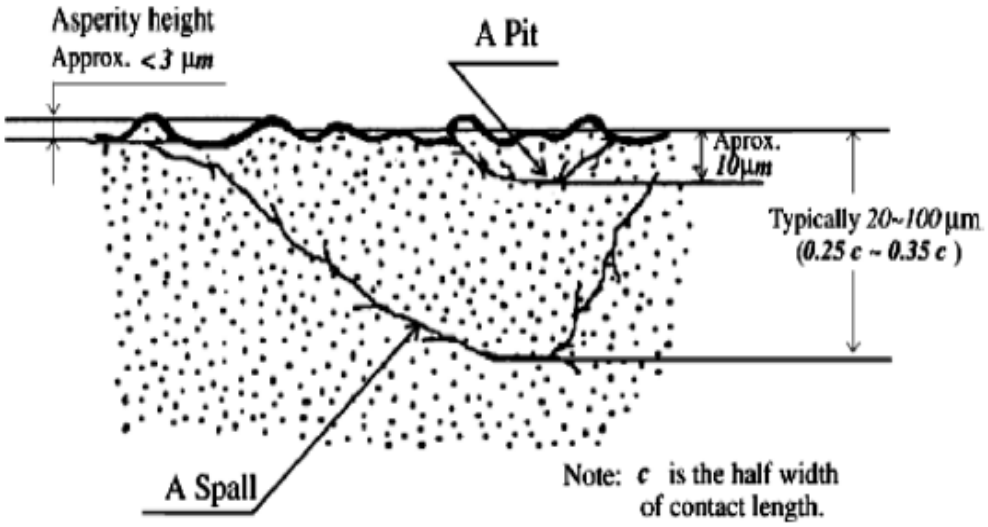



그림 2.1.11 피팅과 스폴링

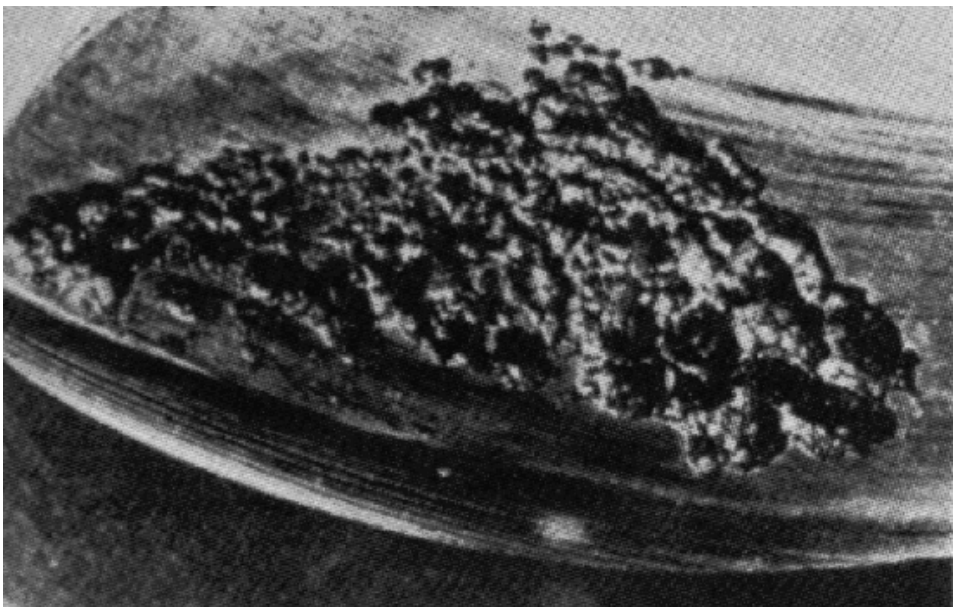


그림 2.1.12 웜기어에서의 스폴링

(다) 기어의 파손

① 굽힘 피로파손(Bending fatigue breakage)

기어의 굽힘 피로파손은 가장 전형적인 사례로써 균열은 기어의 최대 굽힘응력지점인 이뿌리 필렛부분에서 반복적인 굽힙응력에 의해서 발생 및 진전하여 최종적으로 파단에 이르는 피로현상이다. 그림 2.1.13은 전형적인 굽힘 피로에 의한 파손된 모습을 나타내고 있다. 이러한 손상은 국부응력이 재료의 피로강도를 넘어서 발생하며, 필렛 부분의 노치, 게재물, 열처리와 그라인딩 균열 및 잔류응력이 균열의 발생을 촉진한다. 이 파손에서는 "눈(eye)", "해변무늬(beach mark)" 와 같은 피로절손의 특징을 명확하게 볼 수 있다.

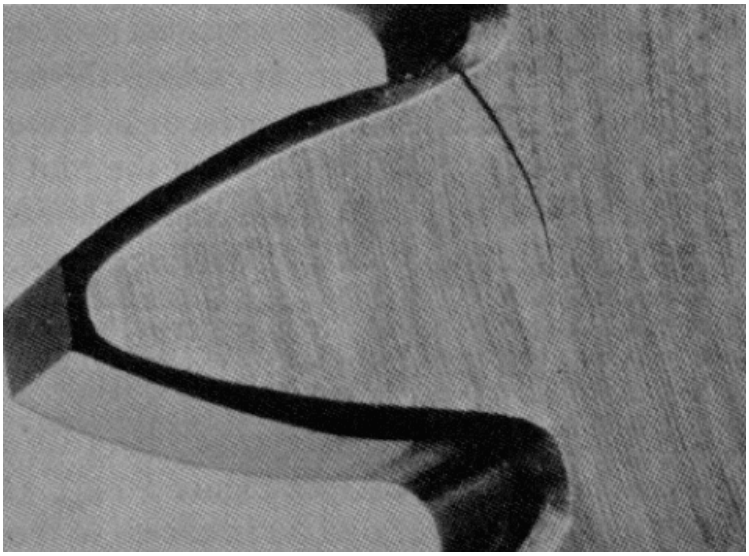


그림 2.1.13 기어의 굽힘 피로 파손

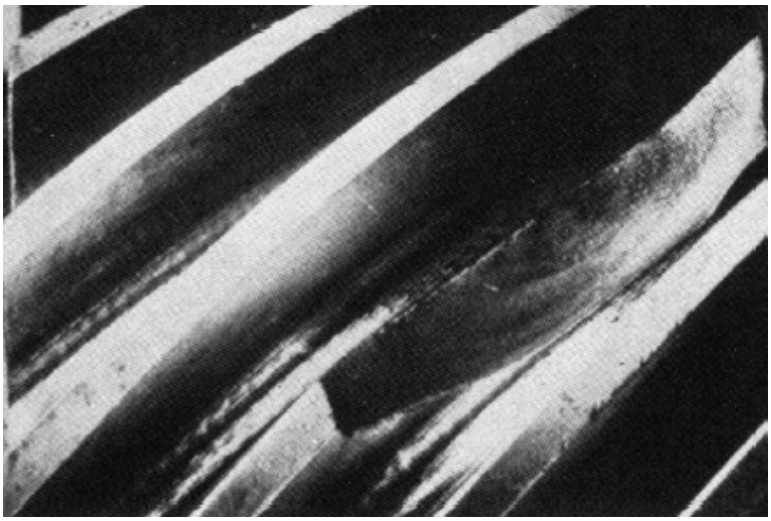


그림 2.1.14 굽힘피로 손상에 의한 Eye와 비치 마크

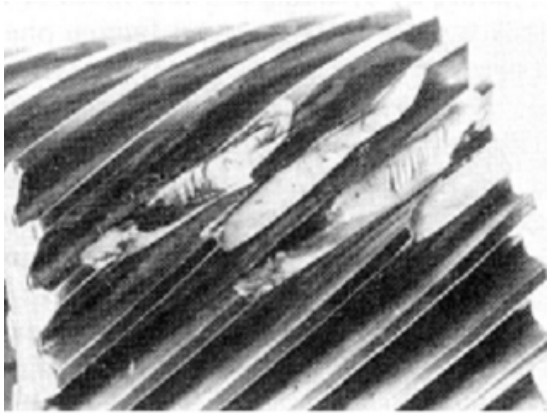
② 과부하 파손 (Overload breakage)

과부하 파손은 기어에 결합된 다른 기계가 갑작스럽게 정지했을 때와 같이 예기치 못한 충격하중의 직접적인 결과이며, 피로손상과 관련된 비치마크 등이 나타나지 않는다. 그러나 이는 기어의 설계, 적용 혹은 제작이 부적당했기 때문에 발생되는 것은 아니라고 설명된다. 그림 2.1.15 (a)는 과부하절손에 의하여 파손된 침탄 열처리한 헬리컬 피니언의 일례이다.

③ 경화층 파손(Case breakage)

경화층 파손은 그림 2.1.15 (b) 일례처럼 재질의 내구한도를 초과 했을 때 표면아래에서 발생하는 것으로서 경화층과 심부 접합층 근처가 시작점이 된다. 이 성질의 파손은 표면의 접촉응력, 깊이에 따른 재질 강도, 경화층이 심부보다 극히 단단할 때, 그리고 응력 사이클의 수에 관계된다.

(a)



(b)

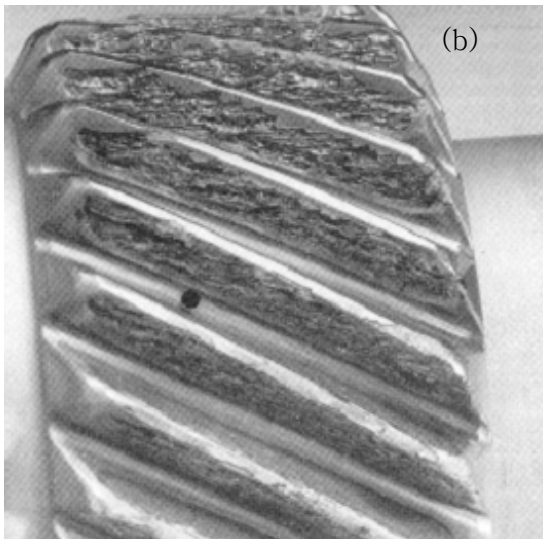


그림 2.1.15 (a) 과부하 파손과 (b) 경화층 파손

나. 베어링 손상

(1) 베어링 손상의 분류

베어링은 기계 부품의 가장 중요한 요소 중 하나이며, 다른 기계 요소들이 가지는 허용 공차의 1/10 정도를 가지는 기계로서 가장 정밀한 기계 구성요소 중 하나이다. 베어링에 발생하는 손상은 ISO 손상 모드 분류[4]에 따르면 표 2.1.3과 같이 피로 및 마모, 부식, 전식, 소성변형, 파괴 등으로 구분된다. 베어링에 발생하는 손상의 형태는 기어에 발생하는 손상과 비슷하지만, 손상 메커니즘은 약간 다르다. 베어링의 설계 수명 전체를 사용하는 경우는 여러 가지 요인 때문에 10~20% 정도밖에 안 된다.

베어링의 수명을 단축시키는 기본적인 원인은 불충분한 윤활제, 부적절한 윤활제의 적용, 먼지 등 다른 이물질의 오염, 습기의 침투, 포장과 관련된 잘못된 저장 및 운반, 저장, 교체 작업 중 잘못된 베어링의 적용, 부적절한 설치 등을 들 수 있다. 그 중에서 대표적인 베어링 손상 원인으로는 그림 2.1.16과 같이 불충분한 윤활 및 윤활제 오염이며, 전체 손상원인의 50% 이상을 차지하고 있다. 여기에서는 피로, 마모, 부식 등 대표적인 베어링의 손상 모드와 메커니즘, 특징에 대하여 정리하였다[4-5].

표 2.1.3 베어링 손상모드의 분류

| 손상 모드 | 분류 | 세부 분류 |
|---|---|---|
| 1. 피로<br>(fatigue) | 1.1 표면하 피로<br>(subsurface fatigue) | |
| | 1.2 표면 피로<br>(surface initiated fatigue) | |
| 2. 마모<br>(wear) | 2.1 연마 마모<br>(abrasive wear) | |
| | 2.2 고착 마모<br>(adhesive wear) | |
| 3. 부식<br>(corrosion) | 3.1 습기 부식<br>(moisture corrosion) | |
| | 3.2 마찰 부식<br>(frictional corrosion) | 3.2.1 프레팅 부식<br>(fretting corrosion)<br>3.2.2 False brinelling |
| 4. 전식<br>(electrical erosion) | 4.1 과전압<br>(excessive voltage) | |
| | 4.2 누설전류<br>(current leakage) | |
| 5. 소성변형<br>(plastic deformation) | 5.1 과부하<br>(overload) | |
| | 5.2 압흔<br>(indentation) | 5.2.1 이물질에 의한<br>압흔(Indents from debris)<br>5.2.2 취급상에 의한<br>압흔(Indentation by handling) |
| 6. 파괴<br>(fracture) | 6.1 강제 파괴<br>(forced fracture) | |
| | 6.2 피로 파괴<br>(fatigue fracture) | |
| | 6.3 열균열<br>(thermal cracking) | |

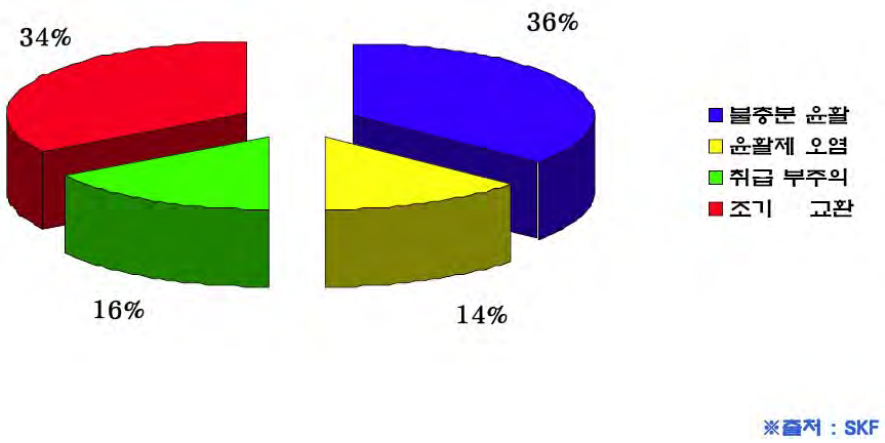



그림 2.1.16 베어링 손상 원인 [5]

(2) 대표적인 손상모드 및 메커니즘

(가) 피로

베어링의 표면 피로를 일으키는 메커니즘은 반복적인 부하의 작용 및 제거에 의한 것이라는 점에서 기어의 피로와 같다. 베어링에 하중이 부가되면 회전부위와 레이스 사이의 접촉면에서 탄성변형이 발생한다. 이 때 접촉표면 바로 아래에는 높은 응력이 발생한다. 베어링의 회전으로 전단 응력이 반복적으로 가해지면 결국에는 피로균열이 시작되고 분리된 금속 베어링 조각들이 피팅(pitting)이나 플레이킹(flaking)이라 불리는 손상이 발생하기 시작한다. 즉 베어링의 피로발생 메커니즘은 베어링에 작용하는 힘이 베어링이 견딜 수 있는 한계 응력(threshold limit)을 초과할 경우 손상이 발생하며, 기계적 또는 열적 응력이 크면 클수록 손상은 더 빨리 발생한다. 피로손상의 초기 단계에서는 격리되어 있는 균열의 형태로 나타나며, 피로손상이 좀 더 진행된 상태에서는 균열이 접촉면 부근까지 진행되어 접촉면에 평행한 방향으로 진전되면서 손상된 재질이 떨어져 나가게 된다.

피로 손상은 대표적으로 표면하 피로(subsurface fatigue)와 표면 피로(surface initiated fatigue)로 구분된다. 표면하 피로의 경우 반복적인 응력변화에 의해 재질의 조직변화가 발생하고 표면 아래에서 미세한 균열이 발생하여 진전하는 손상이며, 플레이킹(flaking) 및 필링(Peeling) 손상으로 구분된다. 플레이킹은 스폴링(spalling) 손상이라고도 하며 그림 2.1.17과 같이 베어링의 내륜, 외륜의 레이스웨이 또는 전동체의 전동면이 구름접촉 피로에 의해 비늘 모양으로 떨어지는 현상이며, 그림 2.1.18은 플레이킹 진행 상태를 나타낸 그림이다. 표면 피로의 경우 불충분한 혹은 부적당한 윤활이 주요 원인이며 표면에서 미세한 균열이 발생한 후 손상이 진전된다.

베어링의 피로손상을 일으킬 수 있는 몇 가지 파라미터는 다음과 같다.

○ 부하와 속도 : 피로손상이 발생할 확률은 최대응력과 최소응력의 차이가 커지고, 응력 사이클의 주파수가 증가할수록 더 많아진다.

○ 온도 : 표면온도가 증가하면 재질의 물리적 특성이 나빠지게 되어 피로손상이 증가한다.

○ 경도와 두께 : 피로손상은 경도에 반비례하고, 재질의 두께에는 비례하여 발생한다.

○ 반복적인 열 : 반복되는 가열과 냉각 시에 생기는 열응력은 베어링 합금에 균열을 발생시킨다. 비교적 작은 열적 사이클 하중 후에는 접촉면 근처의 재질에 균열이 미세하게 발생하고 열적 사이클 하중 수가 증가함에 따라 더 뚜렷해진다.



그림 2.1.17 베어링의 플레이킹 손상

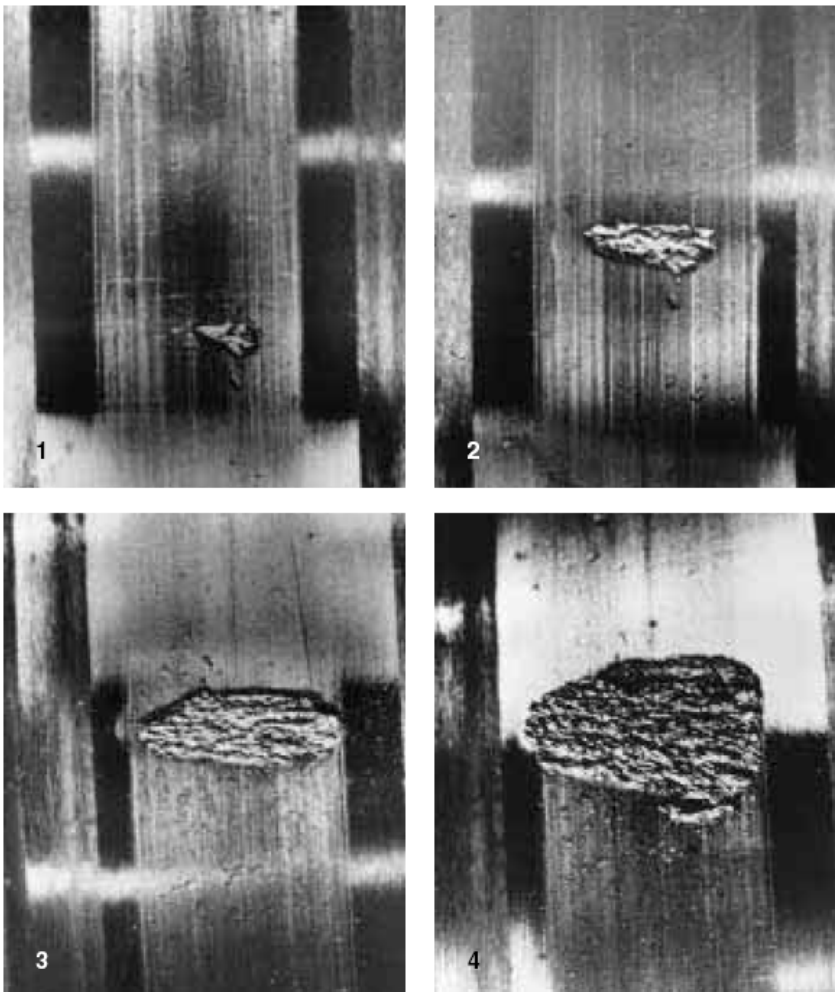



그림 2.1.18 베어링 플레이킹 손상의 진행



그림 2.1.19 베어링 외륜의 연마
마모 손상

(나) 마모

베어링은 기본적으로 미끄럼 접촉보다는 구름접촉에 근거하여 설계되어서 마찰 효과는 낮긴 하지만 무시할 정도는 아니고 윤활이 필수적이다. 베어링을 적절히 그리고 정확하게 윤활 시켜 준다면 마모는 발생하지 않아야 한다. 그러나 실제로는 먼지나 딱딱한 물질이나 부식성 액체의 유입으로 마모가 시작되며 베어링의 여러 부분에서 간극(틈, 간격)이 증가하는 원인이 되고 작동 중의 소음을 발생시키고 조기 고장을 초래한다.

이런 형태의 손상은 윤활유 안에 마모 잔해 물질이 있거나 레이스웨이나 전동 요소의 접촉면에 마모의 증거가 있다는 특징이 있다. 일반적으로 접촉 표면은 천천히 손상되므로 상당한 마모가 진행되고 나서야 작동 불능 상태가 된다. 마모 손상은 부품에 대한 치수 측정이나 중량 측정, 접촉면에서 떨어져 나온 마모 입자를 관찰하거나 마모 입자에 대한 윤활제의 분광 분석에 의해서 평가할 수 있다.

마모 손상은 연마 마모(abrasive wear)와 고착 마모(adhesive wear)로 구분된다. 연마 마모의 경우 얇은 유막 혹은 오염된 윤활유에 의하여 발생될 수 있으며 그림 2.1.19와 같이 접촉면이 유리면과 같이 매끈해 지거나 마모 입자가 지나간 흔적이 있다. 고착 마모는 그림 2.1.20과 같이 불충분한 윤활 상태에서 미끄럼이 발생할 때 한쪽 접촉면에서 다른 면으로 소재(material)가 이동되어 상호 융착하는 현상이며, smearing이라고도 한다. 이 손상이 발생할 경우 베어링 재질은 온도가 상승하여 재경화(rehardening)가 발생하며, 그 후 균열이나 플레이킹 손상으로 발전한다.

마모를 직접 혹은 간접적으로 발생시킬 수 있는 요소는 다음과 같다.

- 오염된 윤활유
- 오염된 주변 대기환경
- 부적절한 시일(seal)
- 너무 얇은 최소 유막 두께
- 거친 저널이나 회전체 표면




그림 2.1.20 베어링의 고착 마모 손상과 손상 메커니즘

(다) 부식

베어링의 부식은 수분 혹은 다른 액체의 유입, 윤활제의 손상에 의하여 발생될 수 있으며, 반응제에 의해 금속표면에서 발생되는 화학적 반응이다. 부식의 진행은 갑작스러울 수도 있고, 점진적으로 진행될 수도 있으며, 부식이 진행되기 위해서는 압력, 온도, 베어링의 전단응력 등 어떤 특수한 상황이 복합적으로 작용되어야 한다. 부식은 크게 물과 오일의 혼합에 의한 부식인 습기 부식(moisture corrosion)과 접촉면 사이의 미세한 이동에 의해 발생하는 마찰 부식(frictional corrosion)으로 구분된다.

습기 부식의 경우 멈추어 있는 베어링에서 발생할 수 있으며, 그림 2.1.21과 같이 롤러와 레이스 웨이 사이에 윤활유 틈새로 물이 침투 할 경우 발생될 수 있다. 마찰 부식의 경우 프레팅 부식(fretting corrosion)과 false brinelling으로 구분되며, 프레팅 부식은 접촉면 사이에 미세한 미끄럼이 발생하여 부식이 발생되는 현상이며, 하중이 전달되는 끼워 맞춤 면에서도 발생된다. false brinelling 은 베어링 정지중의 하중, 진폭이 작은 요동 운동에 의해 전동체와 레이스 웨이의 미세 이동 또는 소성변형에 의해 부식 및 마모가 발생하는 손상이다. 부식 손상을 일으킬 수 있는 요인들은 다음과 같다.

- 부주의로 인한 오염이나 윤활 첨가제에 의해 생긴 황화합물
- 연료중의 경질 탄화수소의 산화에 의해 생기는 유기산
- 윤활유내의 수분(water)
- 계통 안으로 흘러 들어올 수 있는 외부 부식성 물질

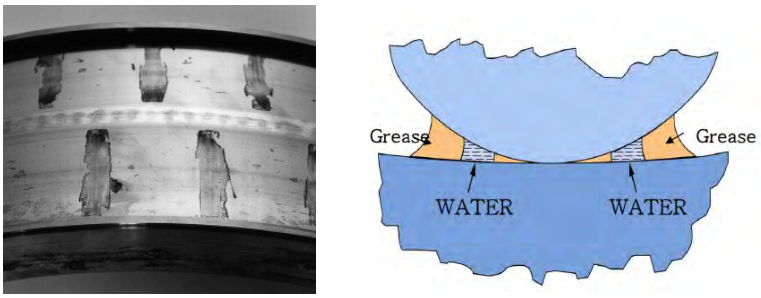



그림 2.1.21 베어링의 습기 부식

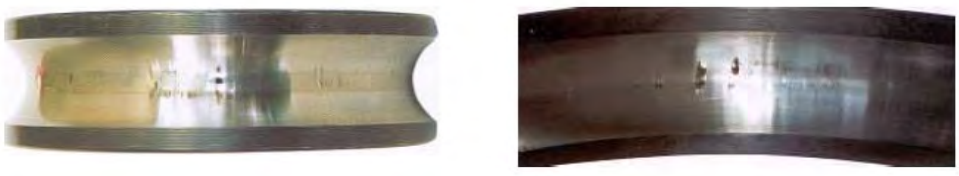


그림 2.1.22 베어링의 마찰 부식(false brinelling)

## 2. 철도차량 감속기 손상사례 및 원인 분석

가. 고속철도용 감속기

고속철도용 감속기는 고속차량 1편성 당 12세트가 설치되어 있으며 케이싱, 모터피니언, 중간기어, 출력기어, 속도센서 등으로 구성된다. 감속비의 경우 기어 치차수에 의해 결정되는데 최대 견인력을 확보하는데 중요한 역할을 하게 되며 고속열차 모터감속기의 경우 감속비는 1.89수준(잇수비 51/41×41/27)을 유지한다. 모터감속기 기어열의 윤활은 중간기어에 의한 윤활유의 튀김방식에 의하여 이루어지게 되며, TBO주기는 1,800,000km이다. 그림 2.1.23은 모터감속기의 구성요소를 나타내며, 표 2.1.4는 구성부품에 대한 형상을 보여준다.

차축기어 감속기는 트리포드(Tripod)에서 전달받은 회전력을 기어장치를 통해 감속시킨 후 동력을 차축에 전달하는 역할을 수행하게 되며 케이싱, 입력기어, 차축기어, 배유플러그, 급유플러그, 유량게이지 등으로 구성된다. 입력기어와 차축기어로 기어열을 형성하며 감속비는 1.16수준(잇수비 51/44)을 유지한다. 그림 2.1.24는 차축기어 감속기의 구성요소를 나타내며, 표 2.1.5는 구성부품에 대한 형상을 보여준다.




그림 2.1.23 모터감속기의 구성요소

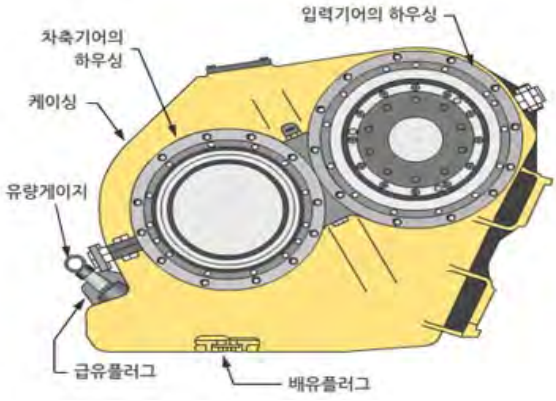



그림 2.1.24 차축기어 감속기의 구성요소

표 2.1.4 모터감속기 구성부품의 외관형상

| 출력기어 | 중간기어 | 모터피니언 | 속도감지 센서 |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| **재질** : 형단조 경화강<br>**잇수** : 51개<br>**헬리컬각도** : 우측15<br>**역할** : 차축기어 감속장치에 동력 전달 | **재질** : 형단조 경화강<br>**잇수** : 41개<br>**헬리컬각도** : 좌측15<br>**역할** : 피니언기어와 출력기어를 안정된 상태로 연결 | **재질** : 형단조 경화강<br>**잇수** : 27개<br>**헬리컬각도** : 우측15<br>**역할** : 견인전동기의 회전력을 모터감속기로 전달 | **조립위치** : 출력기어 상부<br>**역할** : 속도감지 |

표 2.1.5 차축기어 감속기 구성부품의 외관형상

| 입력기어 | 차축기어 |
|---|---|
|  |  |
| **재질** : 형단조 경화강<br>**잇수** : 44개<br>**치차** : 평기어로 구성 | **재질** : 형단조 경화강<br>**잇수** : 51개<br>**치차** : 평기어로 구성 |

감속기는 차량운행에 있어 가장 중요한 역할을 담당하는 구성부품에 해당하므로 주기적인 유지보수가 반드시 필요한 부품이라 할 수 있다. 본 절에서는 고속철도 개통이후 발생한 감속기 불량으로 인한 장애와 각 구성부품의 손상사례 일부를 조사하여 소개하였다. 표 2.1.6은 감속기 불량으로 인한 장애발생 현황을 정리한 내용이며, 그림 2.1.25~2.1.31은 감속기의 각 구성부품에 대한 불량사례를 보여준다.

표 2.1.6 감속기 불량으로 인한 장애 현황

| No | 발생일시 | 편성 | 위치 | 장애내용 | 조치사항 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2004.04.24 | 16 | 21A | 누유/과열 | 환승 |
| 2 | 2005.08.29 | 2 | 2A | 누유/과열 | 환승 |
| 3 | 2006.03.17 | 2 | 22B | 과열 | 충당변경 |
| 4 | 2006.04.09 | 1 | 22B | 과열 | 환승 |
| 5 | 2006.11.04 | 18 | 1B | 누유 | 충당변경 |
| 6 | 2007.01.09 | 22 | 22B | 과열 | 충당변경 |
| 7 | 2007.03.26 | 33 | 3B | 누유 | 충당변경 |
| 8 | 2007.06.23 | 25 | 21A | 누유 | 충당변경 |
| 9 | 2008.04.28 | 37 | 1B | 과열 | 환승 |
| 10 | 2008.10.02 | 27 | 23B | 이상소음 | 환승 |
| 11 | 2008.10.19 | 5 | 21B | 이상소음 | 환승 |
| 12 | 2009.02.15 | 5 | 23B | 속도센서 치차접촉, 소음 | 환승 |
| 13 | 2010.09.21 | 06 | 01B | 중간기어 이탈 | |
| 14 | 2010.11.29 | 28 | 03A | 중간기어 이탈 | |
| 15 | 2012.03.02 | 05 | 01B | 중간기어 이탈 | |
| 16 | 2012.07.14 | 26 | 23A | 중간기어 이탈/기어손상 | |
| 17 | 2012.11.14 | 11 | 22A | 중간기어 이탈/기어손상 | |
| 18 | 2012.12.17 | 29 | 23A | 중간기어 이탈/중간 축 절손 | |
| 19 | 2013.06.11 | 03 | 01B | 중간기어 이탈 | |
| 20 | 2013.07.11 | 11 | 01B | 중간기어 이탈/중간 축 절손 | |

**<구성부품 주요 손상 사례>**

(1) 중간기어 이탈

- 중간기어 축은 기어와 열간 압입되어 있는 구조(기어 100℃가열, 축 -160℃냉각방식을 적용하여 조립(압입길이 1.4~1.7mm))로 차량 운행 중 축과 기어가 분리되는 손상이 발생함
- 손상된 축의 접촉 표면은 높은 접촉응력에 의해 발생하는 접촉피로손상(pitting, spalling) 특성을 나타내었고, 기어와 분리되어 기어 내륜과의 접촉에 의한 축 표면 마모 발생
- 1차감속장치 분해 정비결과 중간기어의 접촉 피로손상(pitting)이 많이 발생하고 있음
- 축과 중간기어의 접촉면적이 전체 면적의 75%이상 유지되지 않을 경우 발생되는 것으로 추정
- 열간압입 과정 중 축과 기어의 냉각(가열) 부족, 기어의 치수공차 과재, 측정 오차 등이 발생 시 기어와 축이 정확하게 압입되지 않아 기어와 축간 체결력 부족으로 분리현상 발생됨
  - ☞ 중간기어 이탈 건수 : 16건(2005.2~2013.7)
  - ☞ 기어손상 건수 : 67건(2004.4~2009.12)

(2) 피니언 기어 박리 및 균열

- 모터 감속기 분해정비 시 교환된 감속기 기어별 교환율은 피니언 기어 32%, 중간기어 58%, 출력기어 16% 수준이며 피팅(pitting), 스폴링(spalling)등의 치면 피로손상이 발생함
- 기어 치면손상의 경우 열처리 및 재질의 물리적 특성은 기준을 만족하고 있으며 구름접촉 피로에 의한 손상임
- 견인 모터 축 절손의 경우 진동과 견인전동기 및 감속기와의 Misalignment에 의해 발생한 것으로 추정됨
- 모터 감속기와 견인모터를 체결하는 결합부 볼트 이완 등 구조적 원인과 재질불량에 기인
  - ☞ 불량롯트 발생건수 : 10건(2004.4~2009.12)

(3) 오일 누유

- MRU의 경우 점검구 및 래비린스에서 누유
- ARU의 경우 래비린스에서 누유
  - ☞ 감속기 구성부품 간 진동으로 인한 미세틈새 발생으로 누유되는 것으로 추정

(4) 녹 발생(베어링 케이스 및 하우징)

- 베어링 케이스의 휨 발생 및 수분유입에 의한 문제로 판단
- 배유플러그 마그네틱의 경우 미세 금속분말이 일정량 잔재

(5) 베어링 파손

- 테이퍼 롤러베어링 휠측 베어링 케이지 절손으로 인한 볼 이탈
- 베어링 불량 건수 : 8건(2004.4~2009.12)

(6) 핀 절손

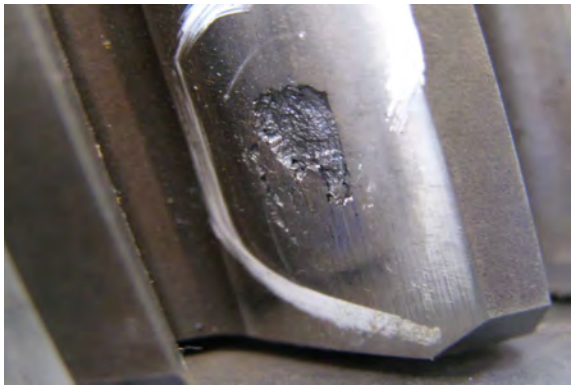
- 견인전동기 및 감속기와의 Misalignment
- 견인전동기, 감속기의 내부진동 흡수율이 낮을 경우 발생



손상된 중간기어 축 표면 1



손상된 중간기어 축 표면 2



중간기어 표면의 접촉 피로손상



중간기어 이탈 감속기 케이스 열화손상

그림 2.1.25 중간기어 이탈




그림 2.1.26 피니언 기어 축 절손



그림 2.1.27 기어손상 (피니언 기어 박리 및 균열)




그림 2.1.28 감속기 오일 누유



그림 2.1.29 베어링 케이스 및 하우징 녹 발생



그림 2.1.30 베어링 파손



그림 2.1.31 핀 절손

(7) 동력절달 축(트리포드) 절손

트리포드 시스템은 감속기와 차축기어 감속장치 사이에 위치하여 차체와 대차 사이의 상대운동(수직, 수평 및 회전운동)을 허용하면서 차체에 장착된 모터감속기 조립체의 구동력을 차축의 차축기어 감속장치로 전달하는 역할을 수행한다. 그림 1.2.32는 대차에 조립된 구조의 트리포드이며, 그림 1.2.33~1.2.34는 트리포드의 외관 및 구성요소를 나타낸다.

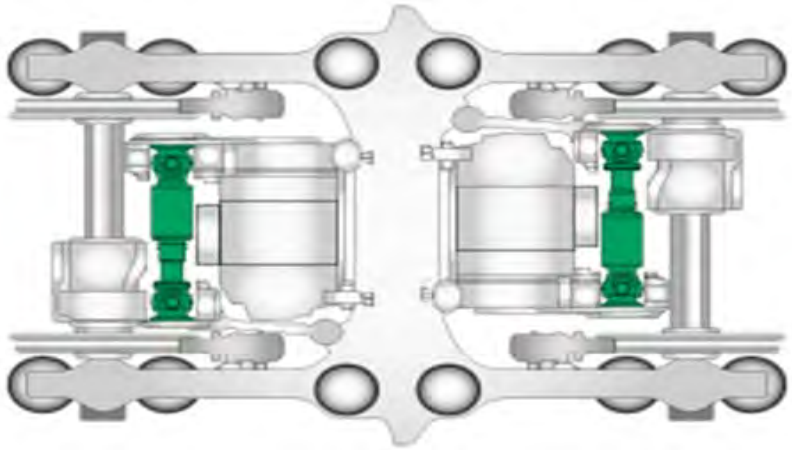


그림 2.1.32 KTX용 대차에 조립된 트리포드(녹색부품)

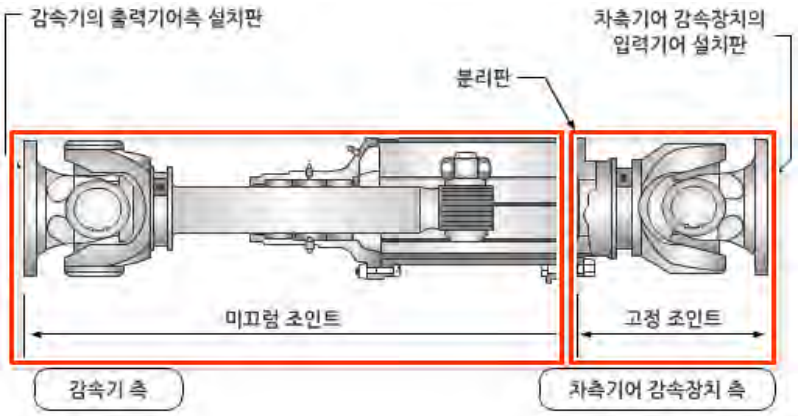



그림 2.1.33 그랜져형 트리포드의 형상

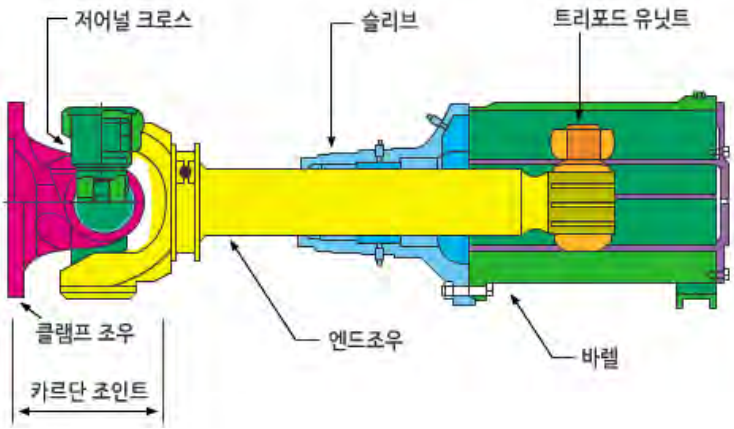
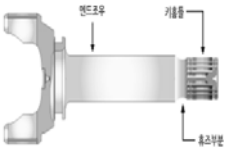
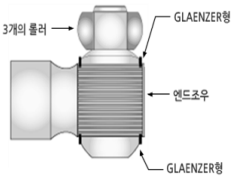
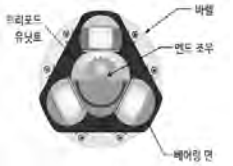
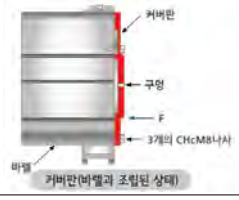
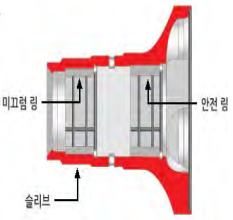
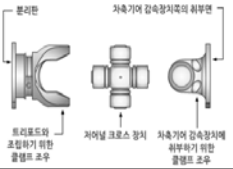
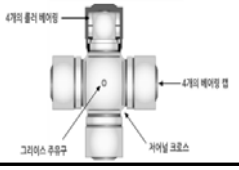



그림 2.1.34 그랜져형 트리포드의 구성요소

미끄럼 조인트는 감속기의 출력기어에 취부되며, 고정조인트는 감속장치의 입력기어에 취부된다. 표 2.1.7은 미끄럼 조인트와 고정조인트를 구성하는 각 장치 별 기능을 나타낸다.

표 2.1.7 미끄럼 조인트 및 고정조인트 구성장치

| 구분 | 구성장치 | 형상 | 기능 |
|---|---|---|---|
| 미끄럼 조인트 | 엔드조우 |  | •과도한 부하 작용 시 이 부분이 절단되어 선로의 불통을 유발하지 않으면서도 열차를 제한속도 이내로 움직이도록 함 |
| | 트리포드 유닛트 |  | •엔드조우의 키홈들 위에 억지끼워맞춤 되어 있으며 2개의 스프링 링에 의해서 유지 |
| | 바렐 |  | •트리포드 장치의 롤러는 바렐에 가공된 3개의 구형 베어링 면속을 미끄럼 운동을 함 |
| | 커버판 |  | •커버판은 3개의 CHc M8 나사에 의해 고정되며 분리판을 덮고 있음 |
| | 슬리브 |  | •2개의 청동링 설치<br>– 엔드 조우를 안내하는 미끄럼 링(Slide Ling)<br>– 엔드 조우의 축이 휴즈 부분에서 절단된 경우 슬리브를 안내하고 지지하는 안전링(Safety Ring) |
| | 카르단 조인트 |  | •엔드조우, 1개의 감속기에 취부하기 위한 클램프 조인트, 1개의 저어널 크로스 장치, 4개의 스프링 링으로 구성 |
| 고정 조인트 | 클램프조우 |  | •하나의 클램프 조우는 트리포드를 차축기어 감속장치에 취부하는 데 사용되며 다른 하나는 분리판에서 미끄럼 조인트에 취부하기 위해 사용 |
| | 저어널 크로스 장치 |  | •1개의 저어널 크로스, 4개의 베어링 캡, 4개의 롤러 베어링, 1개의 그리스 주유구로 구성 |

운행중 발생되고 있는 Tripod의 절손양상은 그림 2.1.35와 같이 Tripod의 End Jaw와 Fuse부 사이, 즉, Spline Gear 치저부위에서 절손되며, 또한 파단면의 형태도 별모양(Starry, Star-like)으로 파단되는 공통적 특징을 보인다[6-7]. Spline치저 홈 부위에 과도한 응력집중현상이 야기되는 설계상의 형상이나 가공부분의 문제와 함께 사용재료의 강도부족 현상 등의 문제가 복합적 요인으로 작용하여 Tripod의 조기파손을 야기하게 된 원인으로 추정하며, 2006년 1월부터 Spline 치차수를 21개에서 29개로 늘리는 등 설계 개선품 적용하고 있다.

(8) 수분 유입

감속기 수분유입 현상에 대한 원인은 그림 2.1.36과 같이 혹한기 시 감속기 케이스 외부에 쌓여 있는 눈이 녹아 케이스 내외부 압력차이에 의해 수분이 케이스 안쪽(라비린스 씰링 구조)으로 유입되는 것으로 추정 된다. 차축 감속기(ARU)와 모터측 감속기(MRU)발생빈도는 8:2 비율로 나타나며, 수분 유입 시 윤활유 색상이 암갈색에서 우유빛으로 변색된다.

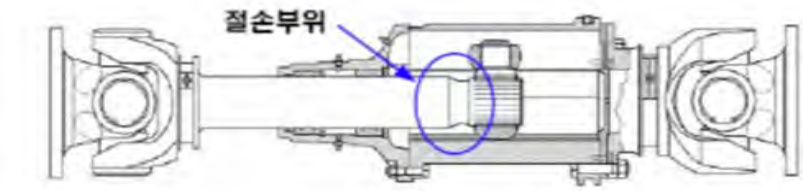






그림 2.1.35 동력전달축의 절손 사례

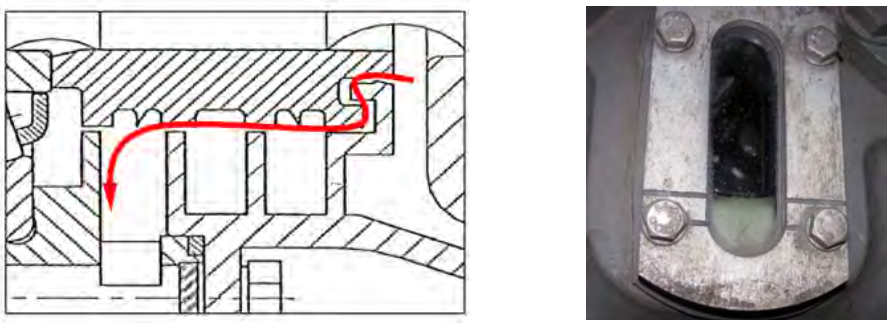


그림 2.1.36 수분유입 경로 및 윤활유 색상

나. 전동차용 감속기

전동차용 감속기는 전동기를 대차에 설치하고 전동기와 피니언의 연결을 플렉시블 커플링을 사용하는 방식이며 카르단 구동장치라고도 한다. 그림 2.1.37과 같이 플렉시블 커플링으로 기어커플링을 사용하는 구동장치가 현재 가장 많이 사용되고 있는 전동차용 감속기이며, WN (Westinghouse Nuttal gear) 감속기라고도 하고, 일본의 고속열차에 적용하고 있는 방식이다. 피니언 및 기어는 고속 및 고부하를 고려하여 고주파 열처리 또는 침탄 열처리를 수행하고 있으며, 조립 및 기어의 오차 때문에 치면 손상이 발생하는 경우도 있다. 고속열차에 적용할 경우 기어박스 재료를 종래의 주강(鑄鋼)에서 알루미늄 합금으로 바꿔서 경량화를 도모하고 있다. 전동차용 감속기는 오랜 기간 동안 사용하면서 문제점 등을 개선하였기 때문에 현재 큰 손상이 발생하지 않고 있지만, 대표적인 손상으로는 기어 및 베어링의 손상이 있으며 다음과 같다.

(1) 대치차 및 기어케이스 파손 (그림 2.1.38)

- 기어케이스 하부 파손으로 오일 유출되고 베어링 및 기어가 파손됨
- 기어케이스 내 수분 유입으로 오일윤활 성능 저하되고 이로 인한 베어링 과열로 인해 리테이너 링 파손이 발생하였으며 이 파손품이 기어와 기어케이스 사이에 밀착되면서 기어 및 기어케이스가 파손됨

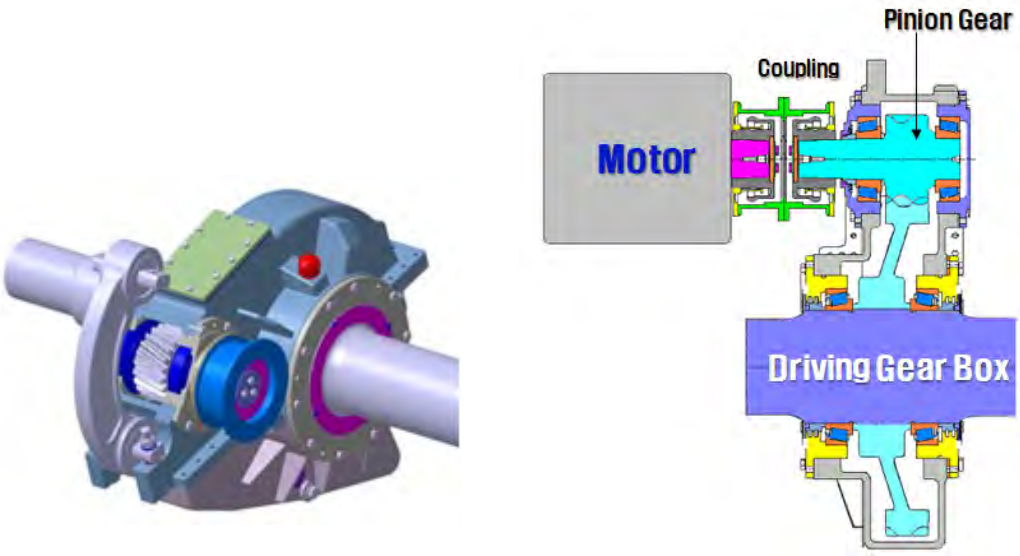



그림 2.1.37 전동차용 감속기 외형 및 구조

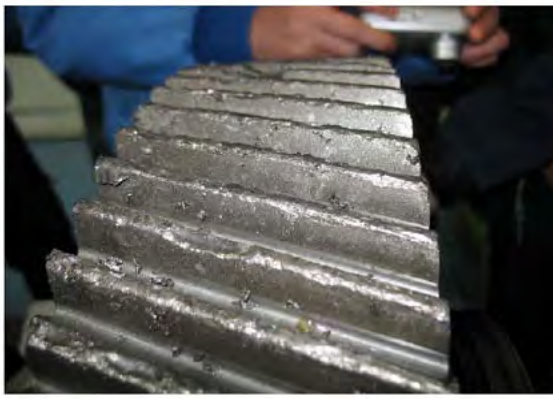



그림 2.1.38 대치차 및 기어케이스 파손

(2) 기어 치면 손상 (그림 2.1.39)

- 기어의 표면에 부분적으로 크랙과 함께 뜯겨져 나간 현상 발생
- 기어 연마 가공 시 열처리 후 변형이 심한 부분에서 발열이 크게 발생하여 기준 경도 이상으로 경화되어 취성화 되고 이 부분이 사용하면서 파손되는 현상으로 추정

(3) 누유 (그림 2.1.40)

- 베어링 하우징 조립부에서 누유발생
- 베어링 하우징과 기어케이스 조립부의 볼트 자리에서 누유가 발생하였으며 하우징과 기어케이스의 밀착성이 좋지 않아 누유가 발생한 것으로 추정

(4) 베어링 손상 (그림 2.1.41)

- 한 쪽 방향 감속기의 베어링만 손상 발생
- 베어링 케이스 열화 및 베어링 외륜, 롤러 변형 발생
- 차량 견인 시 과속으로 인하여 발생했던 문제인 것으로 추정



그림 2.1.39 기어 치면 손상



그림 2.1.40 기어 케이스 누유

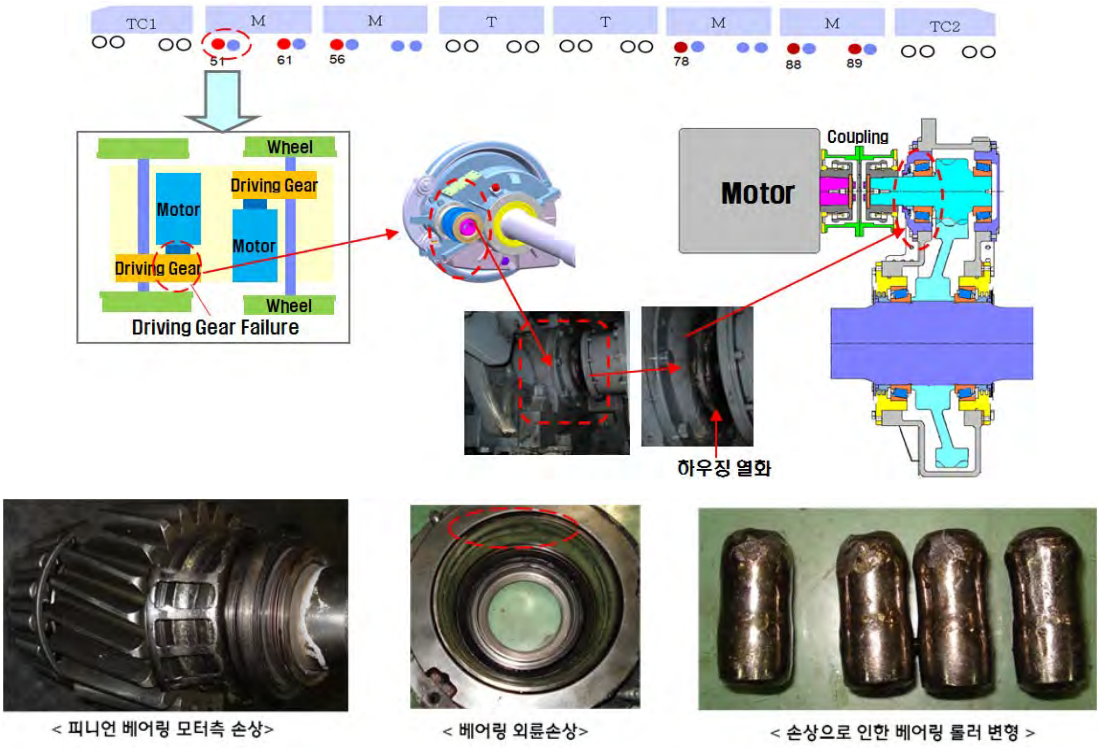



그림 2.1.41 감속기 피니언측 베어링 손상

(5) 베어링 케이지 손상 (그림 2.1.42)

- 피니언 측(모터 측) 베어링 케이지(cage) 손상
- 베어링 케이지가 마모되어 철분 검출
- 운행 시 충격에 의하여 베어링과 케이지가 원활하게 구동되지 못한 것으로 추정되며, 설계 변경 제품 적용




그림 2.1.42 감속기 피니언측 베어링 케이지 손상

# 제2절 감속기 온도감시 시스템 개발

## 1. 감속구동장치 온도상승 요인과 진단기법

### 가. 서론

철도 산업이 안전하고 편리한 친환경 교통수단으로 관심을 모으면서 고속 철도의 서비스 수혜지역이 대폭 확대되고 있다. 또한 철도 차량의 고속화와 서비스 지역의 확대라는 철도 산업의 발전은 시간적, 경제적 효과뿐만 아니라 주변지역의 경제를 활성화하는 등의 이점을 가지고 있다. 반면에 고속철도 신선 건설에 소요되는 기간과 막대한 비용 때문에 고속선로 보다는 기존선로를 활용하는 비율이 높아졌고, 고속선로에 비해 기존선로의 최소 곡선반경의 큰 차이와 25~50m 간격으로 부설된 이음매 구간은 고속선로 주행을 목적으로 설계된 고속철도차량의 감속기에 예기치 않은 문제들을 야기한다[1-2]. 이러한 영향에 기인하여 감속기의 충격하중 및 반복적인 피로는 장기간에 걸쳐서 제조 공정시 발생할 수 있는 이물질 혼입, 조립불량 등의 문제와 복합적으로 기어, 베어링, 기어박스 등과 같은 감속기의 부품에 경년열화 및 마모나 미세균열 등의 원인이 된다. 이로 인한 감속기의 고장은 차량 운행 정지나 지연을 야기한다. 이와 같이 감속기의 고장 문제로 야기된 사고는 차량 운행 안정성과 밀접한 관계를 갖기 때문에 감속기의 온도 상태 모니터링은 중요하다.

### 나. 감속구동장치의 온도 상승요인

기어 구동장치에서 열이 감속기에 미치는 영향은 열의 발생이 증가함에 따라(감속기내 오일의 온도가 올라감에 따라) 오일의 산화율을 증가 시키고, 오일의 점도를 감소시킨다. 따라서 감속기내의 온도가 고려치 이상 올라가는 경우, 산화율의 증가와 점도의 감소에 의해 기어와 베어링의 pitting과 scoring에 대한 저항성을 감소시키고, 밀폐 씰의 수명을 감소시킨다. 이러한 이유 때문에 감속기 구동장치에서는 이러한 열에 의해 감속기에 무리가 가는 것을 방지하기 위해서 열정격 용량이라는 사용 한계 동력을 규정하고 있기 때문이다.

감속기내의 온도의 증가는 1차적으로 감속기내 윤활용 오일의 산화율 증가에 따른 수명의 감소와 윤활유의 점도의 감소를 가져오며 이에 의해서 2차적으로 점도의 감소에 의한 초기 설계시 고려한 점도를 확보하지 못해 기어와 베어링의 pitting과 scoring에 저항성을 감소시켜서 이러한 주요 감속기 부품의 수명을 감소시키고 또는 치명적 파괴의 원인된다.

감속기의 열정격 용량은 감속기의 단수에 따라 많은 차이점을 가지고 있다. 이 차이점은 감속기 케이스 표면의 발산면적과 감소기 내부 공간에 대한 기어류가 차지하는 공간의 비해 의한 것으로 주로 1단 감속기에서 많은 차이점이 나타난다. 이러한 차이의 원인은 앞에서 기술한 바 와 같이 감속기 내부 공간에 비해 기어류가 차지하는 공간이 많기 때문에 발생하는 것으로 감속기를 무부하로 시운전시에도 1단 감속기는 다른 다단감속기에 비해 감속기의 표면 온도가 높다.

감속기는 운전시 기어접촉 마찰열, 윤활용 오일과 기어의 마찰열, 오일 교반시 발생하는 열, 오일씰과 축과의 마찰열 등에 의해 열이 발생 하며 일부의 열은 케이스 외부로 발산된다. 발생열과 발산열의 차이로 감속기내 열이 올라가며, 이 열은 감속기내의 손실 동력과 함수 관계를 이루며 다시 이것은 감속기에 사용되는 동력의 함수로 나타 낼 수 있다[3]. 이러한 발생열과 동력의 함수관계를 이용해서 운전시 감속기내에서 일정한 온도이상 올라가지 않는 동력을 규정하며 이 동력을 그 감속기의 열정격 동력이라 한다. 즉 열정격 동력 이하의 동력에서 감속기가 운전시에는 감속기가 열에 의한 파손이 발생하지 않는다 할 수 있다. 열정격 용량은 감속기가 기내 오일의 온도가 95° C 를 초과 하지 않고 지속적으로 전달 할 수 있는 동력의 크기로 규정한다. 열정격 용량의 계산시 주위

온도는 40° C 라 가정하고 계산한다.(주위 온도는 감속기 근접부위 온도를 뜻함) 열정격 용량은 순수히 전달되는 동력만을 고려하며, 열정격 용량은 윤활에서 감속기 케이스 외부로 발산하는 열량에 대한 고려값이며 강제 윤활시에는 적용되지 않는다. 열정격 용량은 대부분의 유욕식 윤활 감속기에 대한 대략적인 용량값을 제시해 주며 정확한 열정격 용량은 아래 나열된 요소에 영향을 받는다.

- 기어의 type
- Bearing의 type
- Seal의 type
- 오일의 점도
- 기어가 오일에 잠긴 정도
- 케이스 모양 등

열용량 계산시 열용량의 값은 아래 나열된 조건에 영향을 받는다. 감속기가 간헐적으로 작동하고, 오일 탱크(감속기내 오일이 고여 있는 곳)의 온도가 95° C 가 넘지 않는 경우, 감속기 열용량은 제작시 고려했던 값보다 커질 수 있다.

감속기의 열용량을 감소시키는 요인은 다음과 같다.

- 폐쇄된 공간에서 감속기가 적동 하는 경우
- 감속기 주위를 다른 물체가 덮고 있어 열의 발산을 방해 하는 경우
- 주위 온도가 40° C 이상인 경우
- 높은 고도에서 작동 하는 경우
- 태양의 직사광선을 바로 받으며 작동 하는 경우

감속기의 열용량을 증가 시키는 요인은 다음과 같다.

- 강제로 유입되는 냉각용 공기가 있는 경우
- 주위 온도가 40° C 미만인 경우
- 무부하시 교반 손실을 줄일 수 있게 윤활 시스템이 구성 되어 있는 경우
- 고려 작동시간 보다 적은 시간 작동 하는 경우

베어링 하우징에서 측정된 감속기의 운전 중 최대 허용온도는 일반적으로 +90° C 이다. 특별한 경우에는 최대온도를 +100° C까지 허용한다. 만약 오일 냉각을 위한 장치가 설치되어 있지 않고 감속기와 연결된 application 을 구동시키는데 필요한 운전부하가(running load) 감속기가 견딜 수 있는 열 동력(thermal rating)보다 높으면 감속기 내부 오일온도는 +90° C, +100° C를 초과할 수 있다.

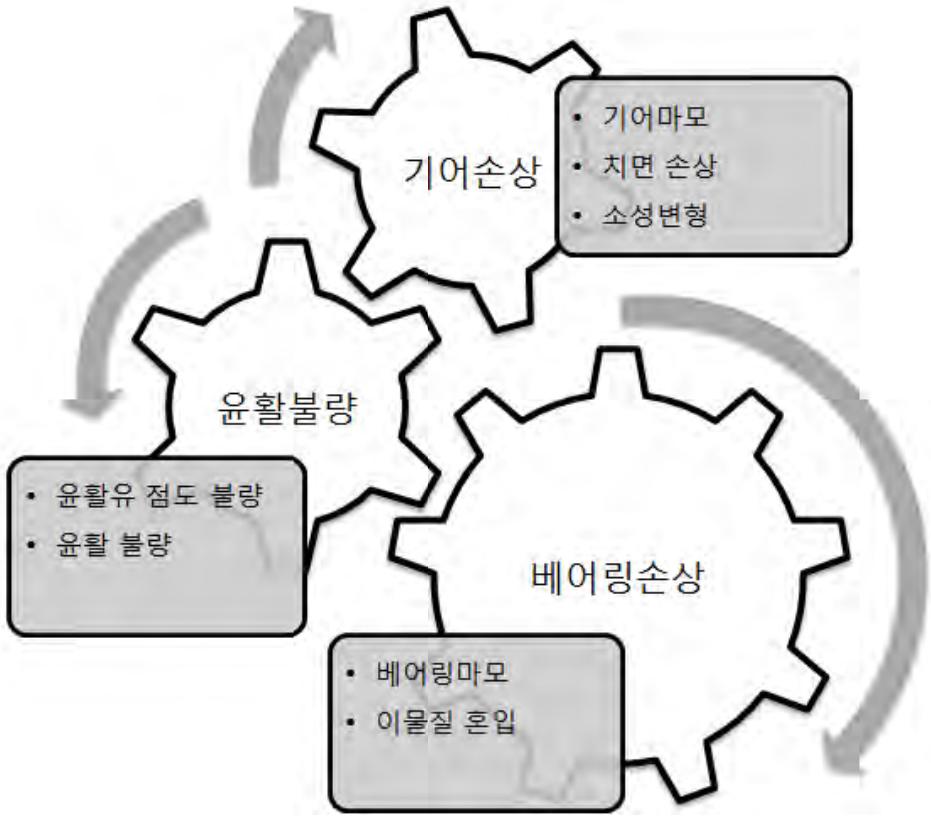



그림 2.2.1 구동장치의 온도상승 요인

다. 감속구동장치의 손상에 따른 온도의 영향

독일 뮌헨대학의 기어연구센터(FZG)의 기어 손상시 온도의 영향에 대한 논문 보고에 따르면 오일 온도에 의해 영향 받는 기어손상은 마모(wear), scuffing, micropitting, pitting이 있다[4]. 이러한 기어 손상모드에서의 온도에 대한 정의가 필요하며 오일 박스에서의 오일 전체 온도, 기어표면에서의 기어 온도, 기어표면 접촉온도, 접촉면 마찰로 인한 온도상승으로 구분할 수 있다.

기어에서 마모는 상호간 접촉에 의해 형성된 윤활막이 얇게 되는 손상모드이다. 이것은 하중 사이클이 진행됨에 따라 기어 표면에서 재료를 떨어져 나가게 하는 손상이 발생한다. 그림 2.2.2는 마모시 온도의 영향을 보여준다. 마모량이 증가함에 따라 오일 온도가 증가하게 된다[4].

그림 2.2.3은 micropitting에 대한 온도 영향을 나타낸 것이다. Micropitting은 기어표면에서 미끄럼으로 인한 미세균열로서 기어에서 발생하는 피로손상 중의 하나이다. Micropitting은 표면조도에 대한 막두께, 작동오일의 점도, 첨가제와 밀접한 영향이 있다. 접촉압력이 높아지면서 발생된 micropitting에 의해 오일 온도가 상승하며 윤활제의 종류에 따라 오일 온도는 각각 다르게 나타난다[4].

Scuffing은 기어 표면에서 어떠한 보호막 없이 고중속도 조건하 끌림이 나타나는 손상모드이다. 그림 2.2.4에 scuffing에 대한 온도영향을 보여준다. 첨가제(EP) 없는 오일 조건하에서 오일 온도가 증가하면서 scuffing이 감소되고 있다[4].

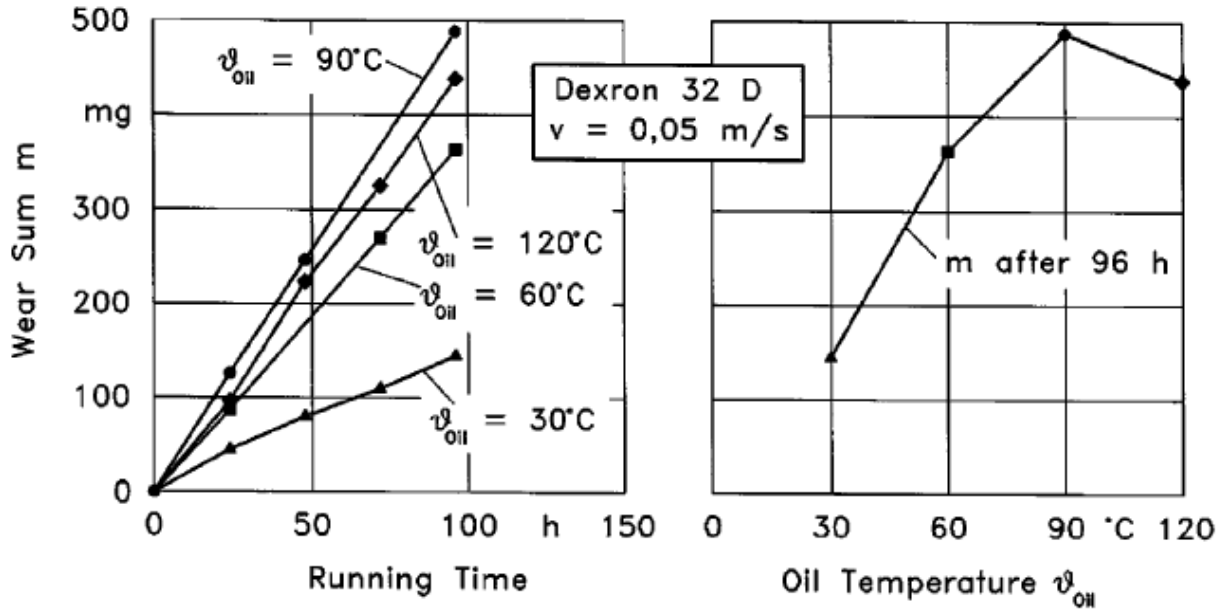



그림 2.2.2 마모시 온도 영향

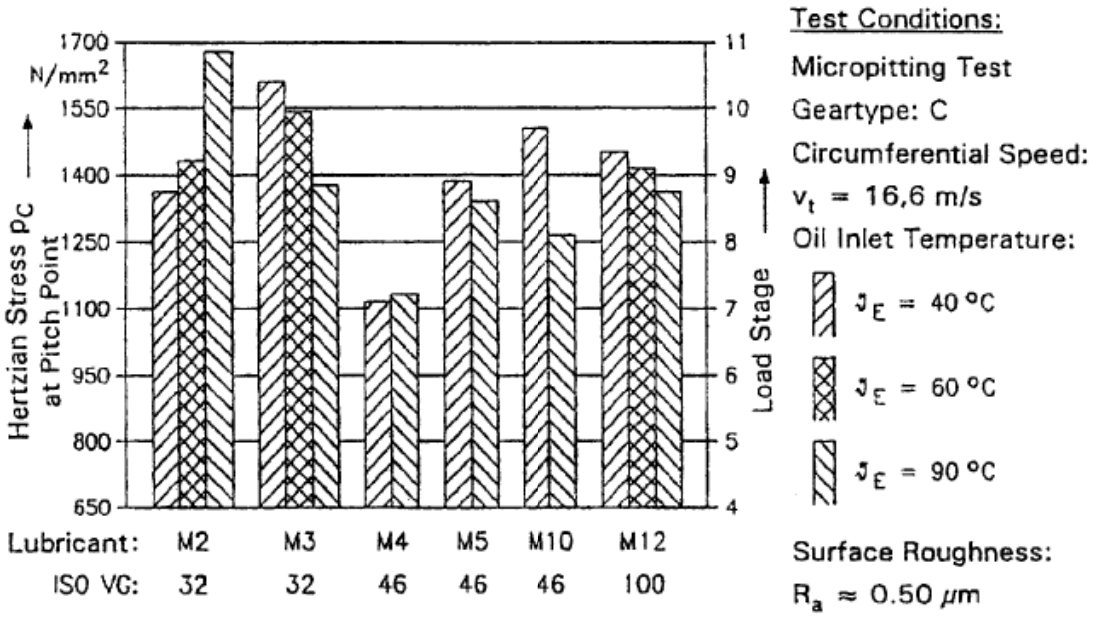



그림 2.2.3 Micropiting에 대한 온도 영향

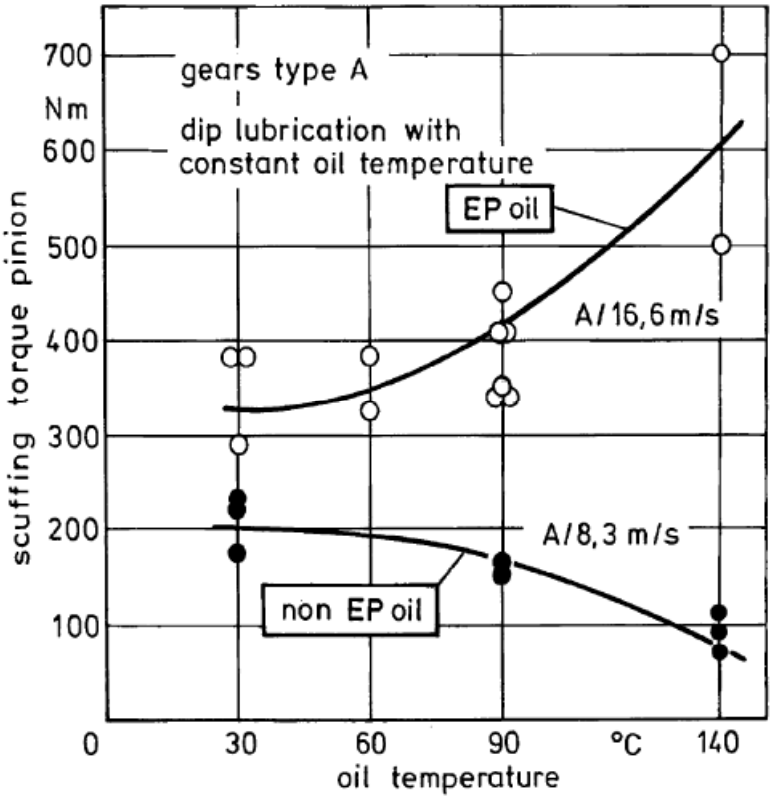



그림 2.2.4 Scuffing에 대한 온도 영향

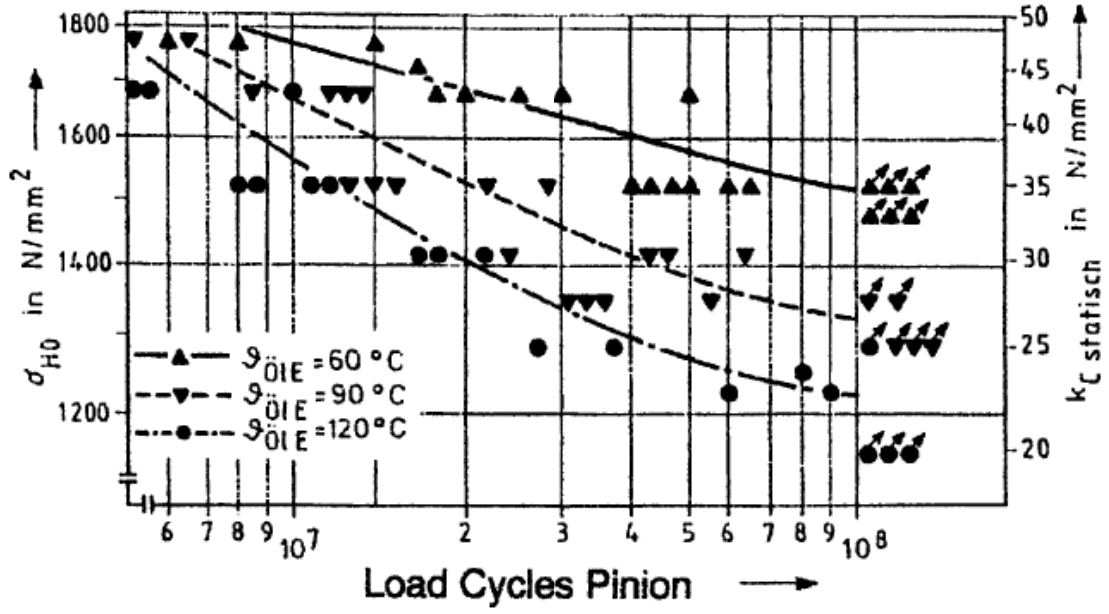



그림 2.2.5 Pitting에 대한 온도 영향

Pitting은 전단응력에 의해 표면균열이 발생하는 피로손상이다. 이러한 pitting은 hertzian 접촉응력에 강한 영향을 받으며 전단응력과 윤활필름 형성에 의해 영향을 받는다. 그림2.2.5에서 보다 낮은 오일 온도에서 pitting 수명이 증가함을 보여주고 있다[4].

따라서, 기어 손상에 대한 온도의 영향은 온도가 상승하게 되면 윤활점도가 저하되고 오일막의 두께가 얇아지게 된다. 또한 화학적 영향을 쉽게 받게 된다. 이러한 온도 영향에 따라 감속구동장치에서 온도를 지속적으로 모니터링하게 되면 기어 손상에 따른 위험요소를 사전에 인지할 수 있고 사고를 미연에 방지할 수 있다.

라. 온도 모니터링 진단 기법

(1) 자가 진단

철도차량에 배치된 센서나 전송 수단의 이상을 감지하여 시스템 및 사용자에게 시스템의 정비가 필요함 알리는 기법이다. 감속기의 고장이 아닌 센서 혹은 전기적인 부분의 고장을 말하며 크게 단선, 단락, 누전으로 나눌 수 있다. 내 · 외부적인 영향에 의해 발생한 이상은 시스템에 연결된 각종 입출력 센서들의 출력 전압을 기준 전압과 비교하여 고장 여부를 판단한다.

단선은 시스템의 입력부터 출력까지의 폐루프 회로구간 중에서 임의 구간에서 도선이 끊어지며 오픈회로($\infty\Omega$)를 이루는 것으로 센서의 출력전압이 기준 전압(임계전압)이하 경우 단선으로 판단한다. 단락은 폐루프의 회로 구간 중에서 임의 구간에서 도선이 연결되어 쇼트회로($0\Omega$)를 이루는 것으로 센서의 출력전압이 기준 전압(임계전압)이상 경우 단락으로 판단한다. 누전은 전류가 흘러야 할 정상적인 도선에서 새어나와 전기가 흐를 수 있는 감속기나 차체 등으로 흘러가는 것으로 입 · 출력 도선의 전류차이가 기준 전류(임계전류, 30mA) 이상이면 누전으로 판단한다. 센서와 연결 상태에는 이상이 없지만 센서의 출력 신호의 움직임이 둔화되거나 정상 범위 내에서 일정 값으로 고정되어 나오는 경우, 2set의 감속기의 동일 위치에 센서를 배치하고 두 센서의 신호 변화를 비교한다. 이와 같은 방법을 사용함으로써 온도 감시 장치의 오동작을 사전에 방지할 수 있다.

(2) 제한온도 모니터링 기법

가장 일반적인 온도 모니터링 기법으로 온도 센서의 측정온도를 감속기의 한계기준온도와 비교를 통해 이상 상태를 판단하는 기법이다. 철도차량의 감속기의 시험 기준에서는 부하 상태의 회전 시험시 1차 감속기의 한계 기준온도는 주위 온도(Ta, ambient temperature)+95℃ 이하로 규정하고 있으며, 2차 감속기의 경우에는 주위 온도 +90℃ 이하로 규정하고 있다. 따라서 각 베어링 근처의 커버에 설치된 온도센서로 부터 측정된 온도(Tm, measured temperature)가 상술한 기준온도를 초과하는 경우 감속기의 기능 이상이 있는 것으로 판단한다.

기준온도(Ta +95° C) < Tm ; 1차감속기 경우
기준온도(Ta +90° C) < Tm ; 2차감속기 경우 ---------- (2.2.1)

(3) 시작운행 모니터링 기법

철도 차량이 운행을 끝마치고 정비고 혹은 유치선에 대기할 때 일정시간 동안 정지하게 된다. 이때 철도 차량이 다시 운행을 시작하기 전까지는 감속기는 동작하지 않으므로 베어링 케이스 부분에서의 온도 변화는 일어나지 않으며, 차량 상태와 환경적 영향에 따라 감속기의 온도는 주위 온도와 충분히 비슷한 상태다 된다. 이것을 소킹($T_s$, soaking temperature)상태라 말하고, 이러한 소킹 상태에서 일정 속도 이하로 운행을 시작할 때 설정한 임계온도를 초과할 때까지의 소요된 시간을 측정하여 일정 시간 이내에 감속기의 온도 변화가 발생하지 않는다면 센서 혹은 시스템에 이상이 있는 것으로 판단한다.

즉, 첫 운행을 위해 정비고 혹은 유치선에서 출발역으로 약 40km/h 이하의 속도로 이동시 감속기가 충분히 소킹된 상태에서의 현재의 온도($T_p$, present temperature)가 임계 온도($T_r$, reference temperature) 보다 크게 변화할 때까지 소요된 시간(f(t))을 측정하여 일정 시간 안에 온도 변화가 일정 수준 미만일 경우 센서의 기능 이상이 있는 것으로 판단한다.

$$f((T_s - T_p) > (T_r)) < f(t_{constant}) \quad \text{----------} \quad (2.2.2)$$

(4) 변화량 모니터링 기법

감속기의 온도는 철도차량의 운전속도에 따라 달라진다. 철도차량의 최대 운용속도인 300km/h의 속도로 운행할 때 차량의 가속 성능은 최초 100km/h 까지는 약 10.44m/s$^2$, 200km/h까지 도달할 때는 약 0.22m/s$^2$, 그리고 최종 속도에 도달했을 때에는 약 0.073m/s$^2$의 가속도를 갖는다. 또한 철도차량이 정지상태에서 출발하여 200km/h까지 도달시간은 직선 평단구간에서 160sec의 시간이 필요하고, 300km/h까지 도달시간은 약 365sec의 시간이 필요하다. 이와 같은 내용을 기준으로 베어링 케이스 주변 온도($T_p$, present temperature)를 운전 속도에 따라 미분(철도 차량의 가속도 데이터)하고 기준 온도와 비교하여 기준 온도보다 크게 변화하면 기능 이상 있는 것으로 판단한다. 차량의 속도($V_p$, present velocity) 변화 간격(⊿x)는 계절적 영향과 선로 상태 등의 주변 환경을 고려하여 선정하고, 감속기 온도 측정의 간격은 속도의 변화량과 동일한 값으로 선정한다.

$$\frac{|T_p - T_{(p-\triangle x)}|}{|V_p - V_{(p-\triangle x)}|} > T_r \quad \text{----------} \quad (2.2.3)$$

## 2. 감속구동장치 온도감시시스템 기본설계

가. 사용 환경조건 분석

감속기의 온도는 치면의 마찰손실, 기름의 교반, 베어링 손실 등으로 상승한 윤활유 온도가 상승하면 점도가 내려가고, 윤활유의 수명이 짧아진다. 온도가 상승하면 각부가 열팽창하여 변형을 일으킴으로써 치면 접촉이 악화될 수 있다. 기어박스는 되도록 열발산이 잘 이루어지도록 하여 온도상승을 막아야 하는데, 표 2.2.1은 윤활유의 온도 한계를 표시한 것이다. 근소한 온도상승 밖에 허용하지 않은 것도 있지만 AGMA, BS등의 규격에서는 비교적 높은 온도를 허용하고 있다.

표 2.2.1 감속구동장치의 온도 한계

| 기어 종류 | 최고온도 (℃) | 최대 상승 온도량(℃) | 비고 |
|---|---|---|---|
| 헬리컬기어,스퍼기어 | 82 | | BSS-436 |
| 베벨기어 | 93 | | BSS-545 |
| 고속헬리컬기어 및 | 85 | | AGMA 421 |
| 헬링보운기어 | | 55 | AGMA 460 |
| 워엄기어 | 93 | 55 | BSS-721<br>AGMA 440,441 |
| 스퍼어,헬리컬, | 66 | 28 | 스탠더드 바큠 |
| 베벨기어 | | 10 | |
| 워엄기어 | 88 | 50 | 스탠더드 바큠 |
| | | 30 | |

아래에 기어박스의 운전 온도를 추정하는 계산식을 든다.

$$Q = 856.9 \cdot (1-\eta)N$$
$$\Delta t = (Q)/(AK) = (856.9 \cdot (1-\eta)N)/(AK)$$
$\Delta t$ = 기어박스의 온도-주위온도(℃)

여기에서, $\eta$는 기어장치의 효율, N은 기어장치의 마력, A는 기어박스의 방열면적(바닥면제외) ㎡, K는 열통과계수㎉/h · ㎡ · ℃이다.

표 2.2.2은 감속구동장치의 온도모니터링을 위한 사용 조건을 나타낸 것이다. 감속구동장치의 온도모니터링 시스템은 고속도로 주행하는 열차와 유지보수의 용이성을 위하여 무선방식과 배터리 전원을 사용하는 방식으로 시스템을 구성하였다.

표 2.2.2 감속구동장치의 온도모니터링을 위한 사용 조건

| | | |
|---|---|---|
| 측정범위 | 상태 | · 최대 측정온도 범위: 주위온도 + 95° C |
| | 해결책 | · −55~+150° C 센서 적용 |
| 온도 모니터링 시스템의 전원 | 문제점 | · KTX 동력차량의 하부에 전원장치 없음<br>· 고출력의 모터로 인하여 노이즈 발생 |
| | 해결책 | · 독립 전원 사용 - 리튬 폴리머(LI−Po) 베터리 2000mA/h |
| 통신방식 | 문제점 | · 차량하부에서 차폐된 운전석 유선으로 보내기 어려울 뿐만 아니라 사용 중인 기존 신호선 모듈과 함께 사용키 어려움 |
| | 해결책 | · 송수신 무선 장치 사용 - 2.4Ghz Transceiver RF Module, 송수신 모듈 |
| 전송거리 | 상태 | · 동력차의 길이 22,607mm |
| | 해결책 | · 송수신 모듈출력 범위 − 직선거리 30m<br>(출력전압10mW) |
| 빈도 | 상태 | · KTX가속도:1.69km/h/s<br>· 300km/h 도달시간(평탄직선구간): 365s, (20km구간) |
| | 해결책 | · 감속기 온도변화의 구배를 고려하여 초당 1번 데이터 취득 |

나. 온도 진단방법의 결정

감속구동장치 온도모니터링 시스템의 핵심인 온도센서의 결정을 위하여 현재 적용되고 있는 온도센서를 검토하였다.

RTD 온도 센서는 고가이며 IC센서와 달리 내구성이 저하된다. 내구성의 극대화를 위해 철저한 테스트가 필요하다. IC센서와 비교하여 리드 보정할 수 있는 추가회로가 필요하다. Thermocouple은 성능검증을 위하여 제어된 조건으로 테스트해야 하며 IC센서는 사전에 테스트할 필요 없이 곧바로 이용할 수 있다. 제어장비에 혹업하기 위해 서모커플 연장 와이어를 이용해야 하며 주위온도가 변화할 때 오차가 발생할 수 있도 IC 온도 센서는 이러한 오차가 발생하지 않는다.

Thermistor는 IC센서와 달리 비선형적이며 추가 선형화 회로를 필요로 한다. IC센서와 비교하여 온도범위가 제한적으로 동작한다. 산업표준이 확립되지 않아서 서미스터를 교체하기 어려우며 업체가 다른 경우 다른 센서 출력을 적용해야하는 난점이 있다.

표 2.2.3과 표 2.2.4은 이러한 온도 센서의 특성과 장단점을 비교하여 나타낸 것이다. 표에서 나타낸 바와 같이 각각의 온도 센서에는 적용 분야에 따른 특성을 가지고 있으며 본 연구에서는 고속철도용 감속구동장치의 온도 모니터링을 위하여 가격대비 온도센싱 성능과 유지보수성이 타 온도센서와 비해 우수하여 센서로 선정하여 시스템을 구성하였다.

표 2.2.3 온도 센서의 특성 비교

| 특징 | IC센서 | RTD | 서미스터 | 서모커플 |
|---|---|---|---|---|
| 활성물질 | 실리콘 | 백금 | 금속산화세라믹 | 2가지 상이금속 |
| 변동파라미터 | 전압 | 저항 | 저항 | 전압 |
| 센서가격 | 낮음 | 중간~낮음 | 중간~낮음 | 낮음 |
| 시스템가격 | 낮음 | 중간~낮음 | 중간~낮음 | 높음 |
| 추가회로 | 없음 | 리드보정 | 선형화 | 레퍼런스 접합 |
| 온도범위 | −55℃~<br>+150℃ | −200℃~<br>+850℃ | −100℃~<br>+500℃ | −270℃~<br>+1800℃ |
| 호환성 | 1%,3℃ | 0.06~0.1%<br>0.3~0.2℃ | 10%,2℃ | 0.5%, 2℃ |
| 안정성 | 중간 | 우수함 | 중간 | 낮음 |
| 감도 | 10mV/℃ | 0.39%/℃ | −4%/℃ | 40V/℃ |
| 상대감도 | 중간 | 중간 | 우수 | 낮음 |
| 선형성 | 중간 | 우수함 | Log/낮음 | 중간 |
| 기울기 | 플러스 | 플러스 | 마이너스 | 플러스 |
| 잡음취약성 | 낮음 | 낮음 | 낮음 | 높음 |

표 2.2.4 온도센서의 장단점 비교

| 센서 | 장점 | 단점 |
|---|---|---|
| IC센서 | – 우수한 선형성<br>– 낮은 가격<br>– output값이 온도 비례하여 추가회로 불필요<br>– 어드레싱 가능, 데이터 스토리지, 검색가능<br>– 내구성, 소형패키지 | – 온도범위 제한적 |
| RTD | – 높은 정확도<br>– 높은 안정성<br>– 온도범위 중간 | – 고비용(서모커플의 4~10배)<br>– 고진동 환경 부적합 |
| 서미스터 | – 분해능 우수, 저항대 온도 특성 높음<br>– 저항이 높아 리드 와이어보정<br>– 소형패키지<br>– 온도변화에 신속반응<br>– 저렴한 가격 | – 저항 대 온도특성 비선형적, 추가회로 필요<br>– 온도범위 제한적<br>– 서미스터 교체 어려움 |
| 서모커플 | – 넓은 온도범위 측정<br>– 내구성 | – 안정성 중간<br>– 제어된 조건에서 테스트<br>– 장비 혹업을 위해 서모커플 연장<br>– 와이어 이용에 의해 온도변화에 따라 오차발생 |

다. 온도감시시스템 기본설계

(1) 온도 센서

온도 모니터링은 시스템의 이상상태를 평가하기 위해 가장 일반적으로 사용된다. 온도 센싱 기술에는 RTD, 써모커플, 써미스터, IC센서 등의 다양한 센서가 사용된다. 온도 모니터링은 시스템의 설계를 변경하지 않아도 쉽게 설치가 가능하며, 시스템의 상태를 실시간으로 확인할 수 있다. 그러나 온도 모니터링 시스템은 센서의 특성과 취부 위치에 의해 응답성이 떨어질 수 있다. 그럼에도 불구하고 온도 모니터링은 시스템의 신뢰성을 높이는데 많은 도움을 주고 있다. 이들 중 그림 2.2.6은 실험에 사용된 온도 센서는 IC-type의 AD590 (Analog Device. 社)으로, 크기는 6.35×2.36mm의 크기를 갖는다. 온도 특성은 그림 2.2.7과 같다.

AD590은 IC type(semiconductor integrated-circuit sensors)의 소형 세라믹 온도 센서로써 절대온도에 비례하여 전류를 출력한다. AD590은 1K당 1㎂의 전류를 출력하고, 실용 온도범위는 -55℃에서 150℃까지 이며 RTD나 써머커플과 비교했을 때 그 사용 범위가 좁으며, 이때 4~30V의 전원이 필요하다. 그러나 소형이며, 저가이고, 정확하며, 다른 시스템과 인터페이스가 쉬운 여러 가지 장점을 가지고 있어 범용으로 사용된다. 선형 회로나 온도 접합의 보정이 필요하지 않다.

적용 온도센서인 AD590 (Analog Devices 社)의 일반적인 특징은 다음과 같다.

- 전류 출력형 IC 온도 센서 : 1 ㎂/K
- 1k(캘빈온도) 변화에 1㎂의 전류를 출력
- 광대역 온도 측정: -55 ° C ~ +150° C
- 소형 세라믹 센서(W*L*D, 2.36*6.35*1.27mm )
- 2-terminal 장치: 전압 입력/ 전류 출력
- 측정범위내의 온도 비선형 오차: ±0.8° C (AD590M)
- 광대역 입력 전압: DC 4 V ~ 30 V
- 케이스 분리형 센서



그림 2.2.6 반도체 IC(Integrated Circuit)온도 센서 (AD590)

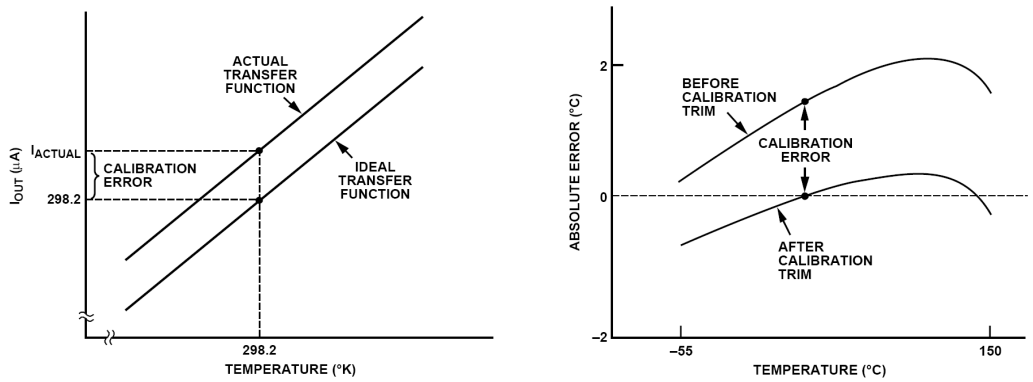



그림 2.2.7 AD590 온도 특성

(2) 신호처리장치 및 소프트웨어

그림 2.2.8은 그림 2.2.6에서 보인 AD590 온도센서 출력단 이후의 신호처리 장치의 개요도이다. 신호처리장치는 전류전압 변환기, Analog to digital Converter(이하 ADC), $\mu$-processor, 송신부, 수신부, USB인터페이스장치, 디스플레이 장치로 구성된다.

Device의 Main전원이 공급이 없더라도 현재의 시간을 알 수 있게 해주며 온도센서(16채널)에서 전류신호 출력 후 Amplifier에서 전압 값으로 변환 증폭한 다음 속도 센서에서의 속도신호를 ADC(10Bit)로 변환 후 Serial 통신으로 PC로 전송한다.

AVR에서 전압 값(0~5V)을 ADC(10Bit)로 입력 받고, 전압 값을 온도 값으로 변환 연산하여 연산된 온도값 (현재시각, 속도, 온도)은 Serial 통신을 통해 SD카드에 저장하고 연산된 온도값은 RS-232를 통해 PC로 전송후 실시간으로 모니터링 하게 되는 시스템이다.

그림 2.2.9는 구성된 온도모니터링 시스템이며 구성된 시스템의 기본 성능 시험을 위하여 그림 2.2.10과 같이 무선방식으로 온도 모니터링 시스템의 기본 성능 시험을 실시하였다.

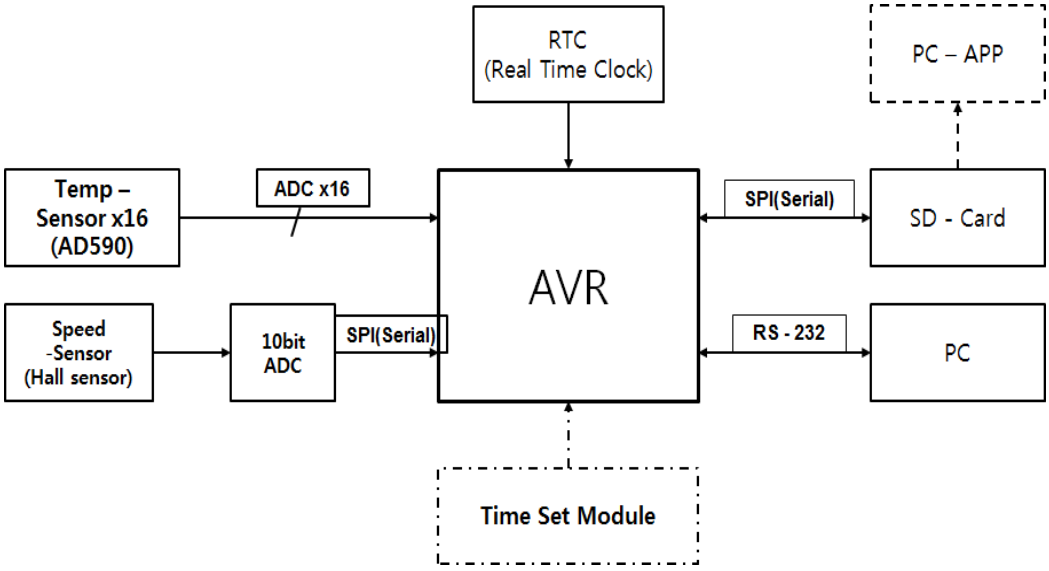



그림 2.2.8 감속구동장치 온도모니터링 시스템 구성도



그림 2.2.9 감속구동장치 온도모니터링 시스템

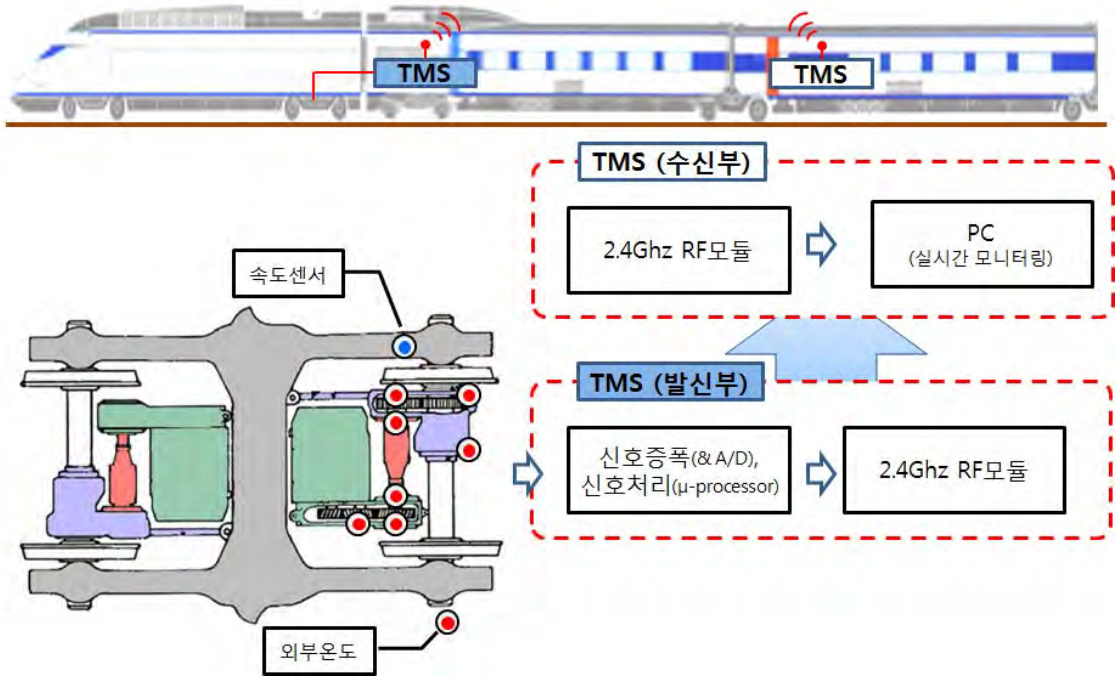



그림 2.2.10 무선방식의 온도모니터링 시스템 구성도

## 3. 온도모니터링 시스템의 기본 성능시험

### 가. 서론

G7 고속철도 기술개발 연구과제에서 감속구동장치의 성능시험을 위하여 2000년 이래 감속구동장치의 발생 온도시험을 실시하였으며 이때 고속철도 운행에 적합한 감속기 개발에 필요한 시험·성능평가 기술을 연구한 바 있다.

감속기어 장치의 무부하 조건에서 윤활유와 온도, 진동 및 소음 등의 측정을 통해 성능평가 하였으나 실제 차량 운행 시에는 감속기의 이상 여부를 확인할 수 있는 모니터링 시스템이나 관련 연구는 부족한 상태이다.

고속철도차량의 감속기의 이상상태 모니터링을 위하여 (1) 실시간으로 감속기의 이상상태를 검출할 수 있으며, (2) 검출 온도의 오차 범위를 고도화 할 수 있는 시스템의 개발이 강력히 요구되고 있다.

본 연구에서는 상술한 문제를 해결하기 위하여, 감속기뿐만 아니라 다른 대상체의 이상상태 진단을 위해 일반적으로 사용되는 온도 모니터링 기술을 적용하였다. 선형적 온도 특성을 갖는 반도체 온도센서 및 마이크로프로세서를 적용한 신호처리 장치를 이용하여 감속기의 이상 상태의 감지를 위한 각 부분별 온도 변화를 검토하고, 실제 감속기에 배치된 센서들을 통해 차량 운행 시 발생할 수 있는 감속기의 이상 여부를 운전실에 보고할 수 있는 이상 검출 기법을 제안하였다.

특히, 본 연구에서는 상술한 시스템으로부터 출력되는 온도 신호를 제안한 검출 기법에 의해 감속기의 이상상태를 실시간으로 출력하고, 실제 운행되고 있는 각 노선별로 고속철도 차량에 상술한 시스템을 적용하여 그 유용성을 확인할 수 있었다.

### 나. 시스템 구성과 원리

그림 2.2.11에 온도 모니터링 시스템의 신호처리 개요도를 나타낸다. 감속기의 베어링 커버에 설치된 온도 센서는 일정 시간(1sec)마다 감속기의 온도변화에 따라 선형적으로 전류신호를 출력한다. 이 아날로그 신호는 전류 전압 변환기에 의해 전압신호로 변환 증폭된다. 증폭된 신호는 $\mu$-processor (Atmega128)에 내장된 ADC에 의해 10bit의 디지털 신호로 변환되고, u-processor는 수식(2.2.4)에 의해 디지털 신호를 온도 데이터로 변환 계산한다.

$$℃ = \frac{5}{9}(°F - 32) K = ℃ + 273.15 \quad \text{----------(2.2.4)}$$

변환된 온도 데이터는 2.4Ghz Transceiver RF Module을 통해 차량 하부에서 무선으로 차량 내부의 수신부로 송신된다. 수신된 온도 데이터는 USB통신을 통해 PC로 전송된다. 그림 2.2.12와 같은 컴퓨터에 설치된 온도 감시 프로그램에 의해 실시간으로 감속기의 이상상태를 진단하고 결과 데이터를 저장한다.

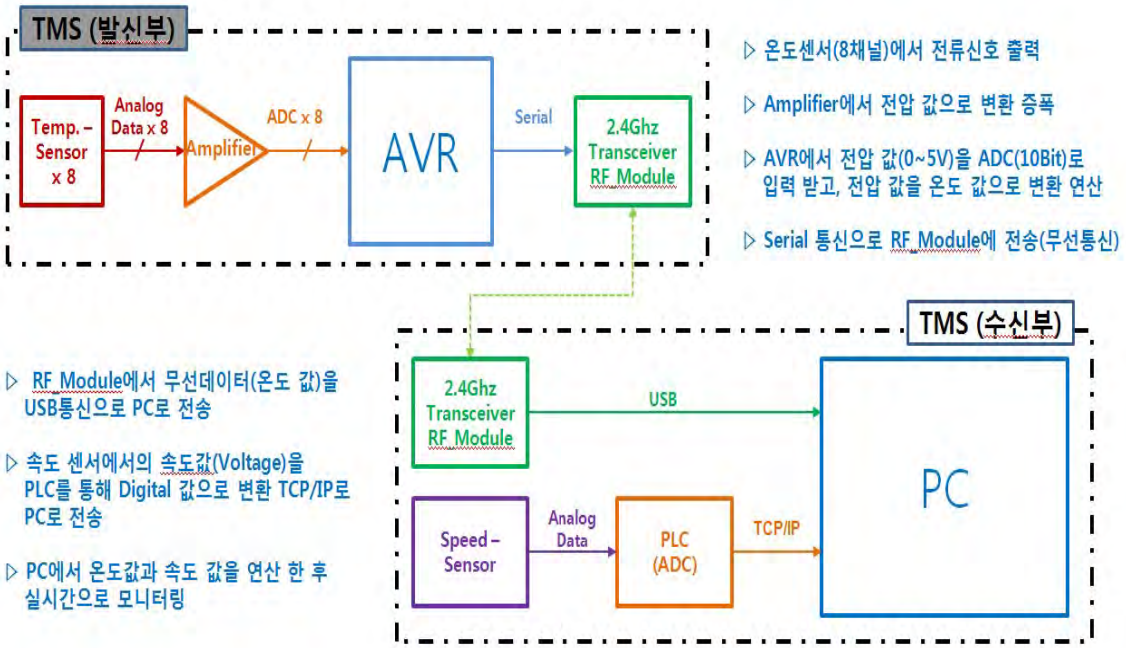



그림 2.2.11 신호처리장치의 개요도

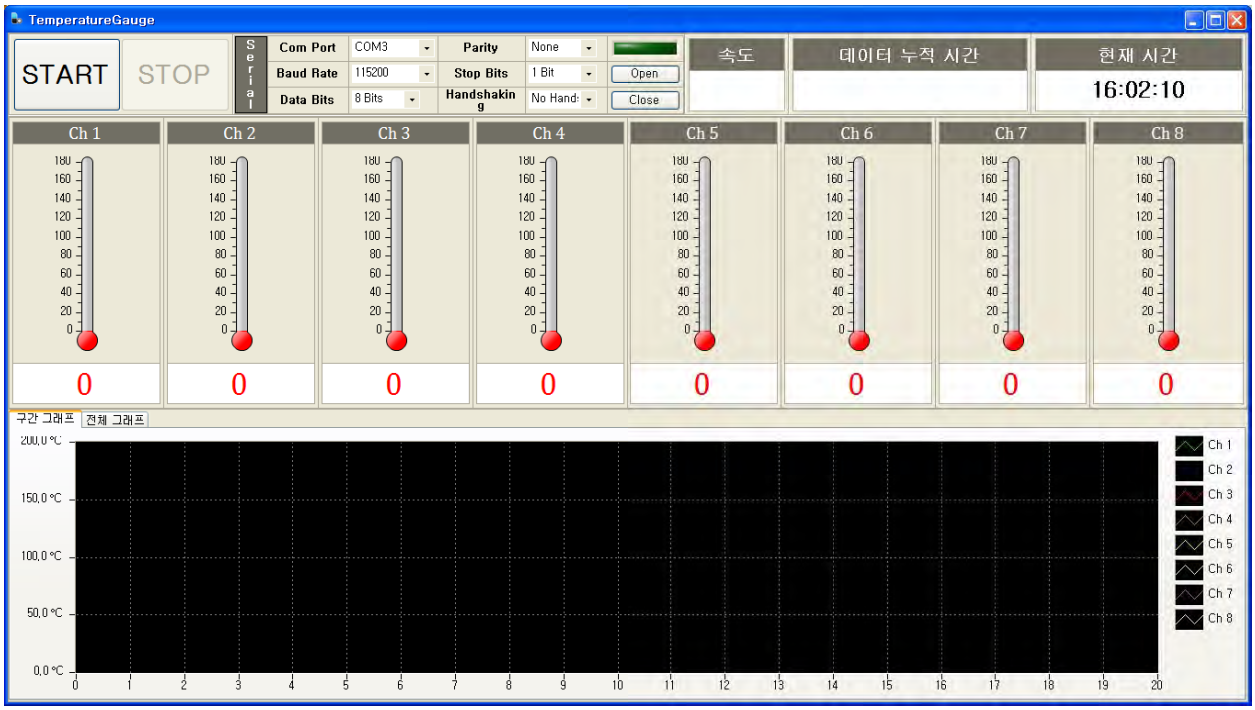



그림 2.2.12 온도 감시 프로그램

다. 감속구동장치의 온도모니터링 시스템 기본성능 시험 및 시험결과 고찰

(1) 시험장치

KTX와 KTX산천의 감속기는 단일 차축당 단일 견인 전동기로 구성된 동력집중식 구동시스템으로써, 견인전동기와 연결된 1차 감속기, 차축과 연결된 2차 감속기, 그리고 두 감속기를 연결하는 트리포드로 구성된다. 고속철도 차량의 감속기 기어박스는 헬리컬기어와 평기어(스피어기어)가 다단으로 배열된다.

접촉식인 온도센서(AD590)는 그림 2.2.13과 같이 고속철도차량의 1, 2차 감속기의 베어링 커버 주변에 온도 센서의 부착 위치를 선정하였다. 1차 감속장치의 중간 기어(Intermediate Gear), 출력기어(Output Gear)와 2차 감속장치의 입력기어(Input Gear), 차축과 결합되는 차축기어(Axle Gear)의 베어링과 가장 가까운 커버에 배치하였다. 또한 차량의 진행방향과 반대방향에 상기 상술한 같은 위치에 한쌍의 센서를 설치하였다.

온도센서의 입력 전압은 5V이고, 철도 차량이 운행(최고 300km/h)하는 동안 1sec 간격으로 데이터를 획득하였다. 얻어진 온도 데이터는 무선 통신을 통해 컴퓨터에 입력되고, 메모리에 저장된다. 그림 2.2.14 (a),(b)는 실제 실험 장치의 센서부 모듈, 신호 처리부와 수신 무선 모듈을 나타내며, 그림 2.2.14 (c),(d)는 1차와 2차 감속기에 실제 센서를 설치한 모습을 나타낸다.

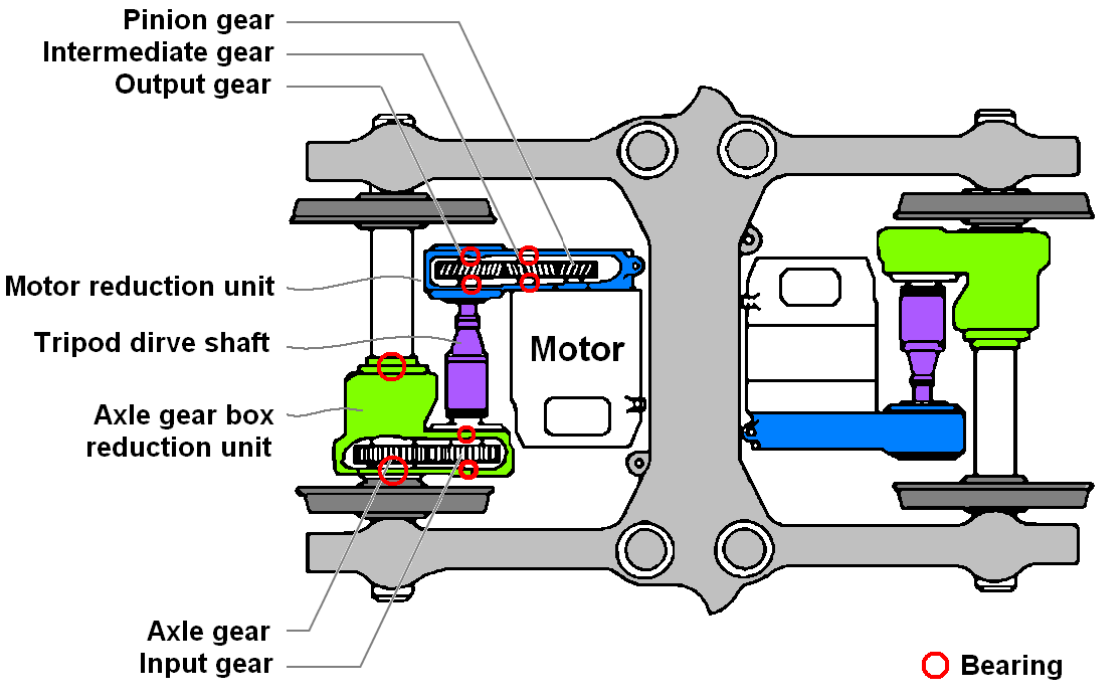
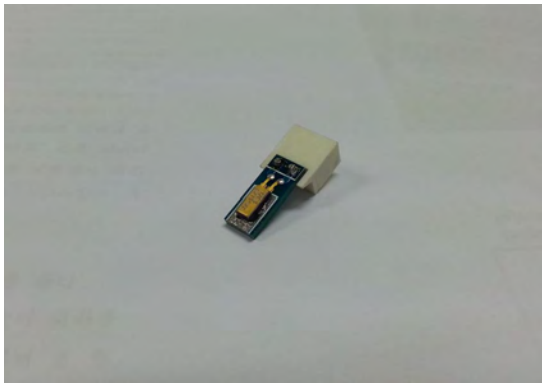



그림 2.2.13 감속기의 온도센서 부착위치



(a) AD590 센서모듈



(b) 신호처리장치 및 무선모듈



(c) 1차 감속기의 센서부착 위치



(d) 2차 감속기의 센서부착 위치

그림 2.2.14 시험장치 및 설치 모습

(2) 온도모니터링 기본 성능 시험 결과

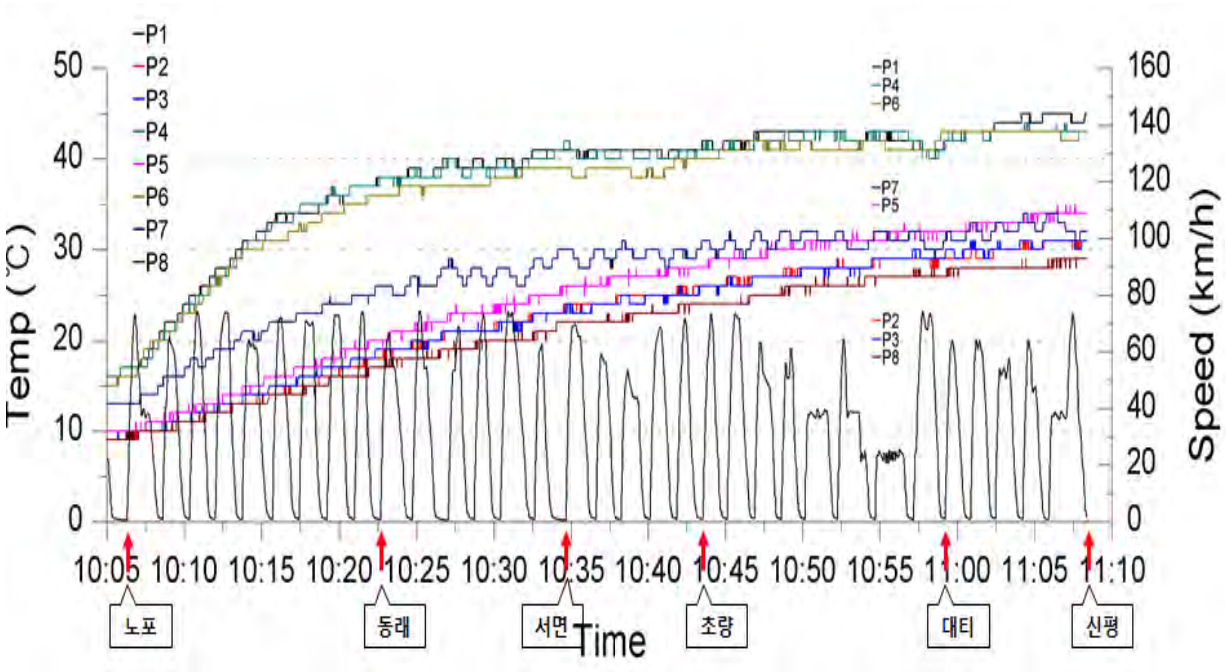
(가) 도시철도 감속구동장치의 온도 모니터링 시험

기본 설계된 감속구동장치 온도모니터링 시스템의 기본 성능확인 시험을 위하여 부산교통공사 1호선 전동차에 시스템을 그림 2.2.15와 같이 설치하고 현차 시험을 실시하였다. 부산 1호선의 노포-신평역 구간을 1회 왕복 운행 하면서 감속구동장치의 감속기를 대상으로 얻어진 온도 데이터를 그림 2.2.16에 나타낸다. 그림 2.2.16에서 볼 수 있듯이 운행속도 90 km/h 이내에서 50℃ 온도를 나타내었으며 설치된 온도모니터링 시스템이 운행구간 내에서 온도데이터를 계속적으로 모니터링할 수 있음을 알 수 있었다.

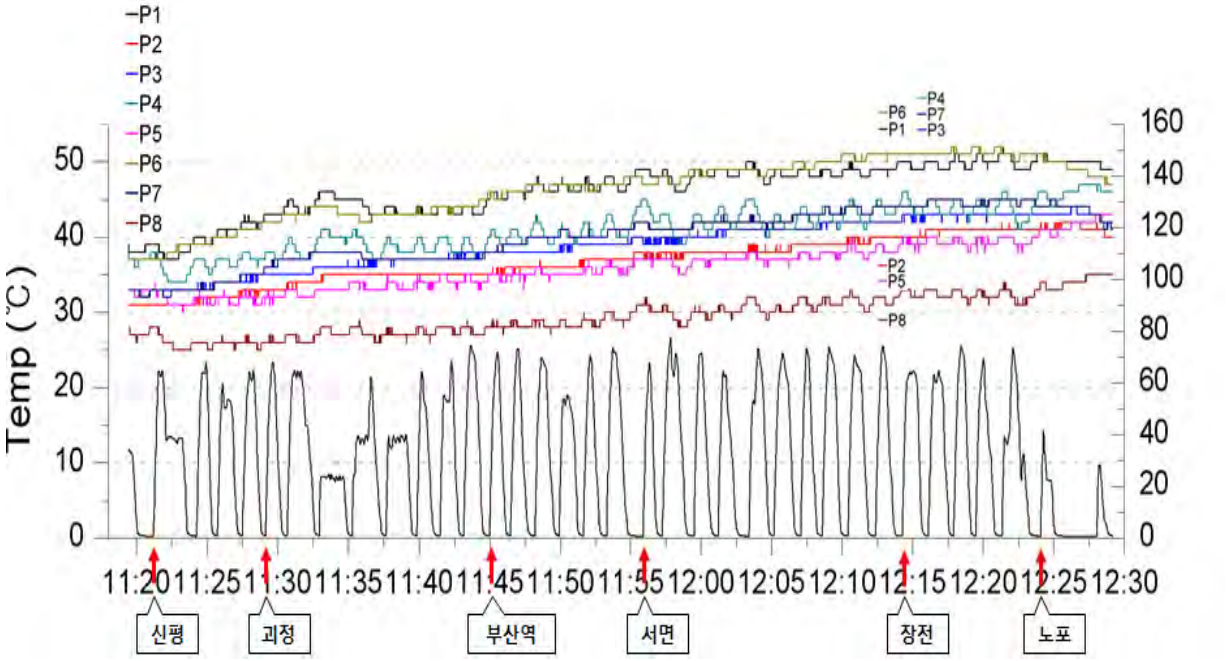




그림 2.2.15 부산지하철 감속기 온도 모니터링




(a) 노포~신평 구간




(b) 신평~노포 구간

그림 2.2.16 부산지하철 감속기 온도 측정 결과

(나) 고속철도 감속구동장치 온도 모니터링 시험

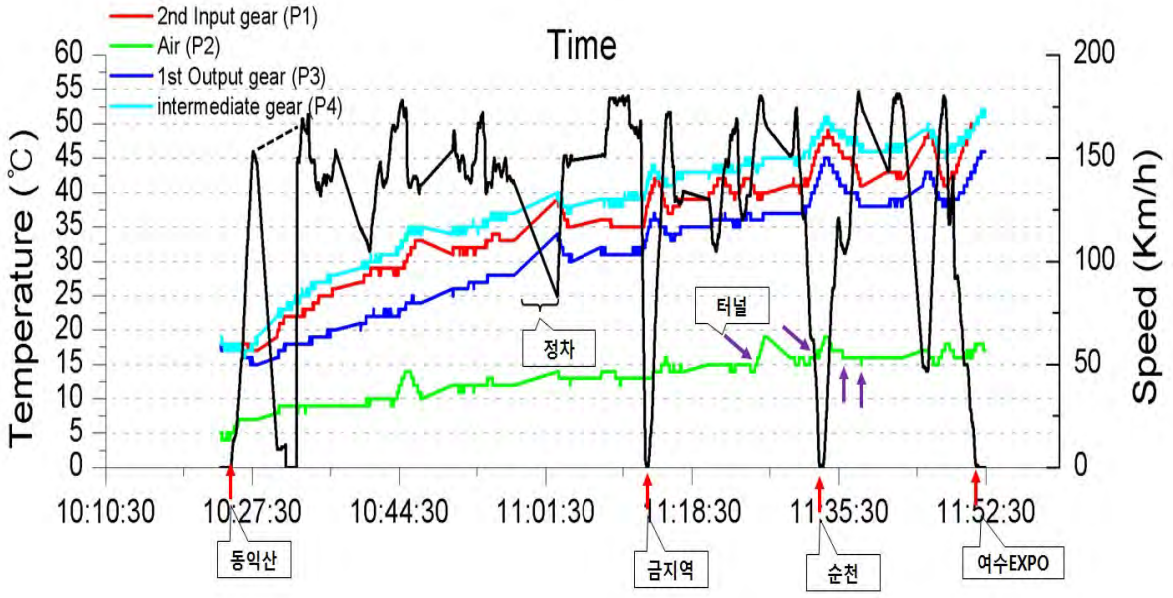
전동차를 대상으로 한 온도모니터링 시스템의 기본 성능확인 시험을 실시하여 성능을 확인하였으며 이에 따라 고속철도 감속구동장치를 대상으로 본 연구의 온도모니터링 시스템을 설치하여 기본 성능시험을 실시하였다.

그림 2.2.17은 전라선의 동익산역에서 여수엑스포역까지를 1회 왕복 운행 하면서 KTX산천 동력차의 견인 전동기에 연결된 감속기를 대상으로 얻어진 온도 데이터를 나타낸다. 그림 2.2.17 (a)에서 볼 수 있듯이 운행 속도가 증가함에 따라 각 부분의 온도도 모두 상승하였다. 그림에서 검정색 실선은 철도 차량의 실제 속도를 나타낸다. 감속기가 일정 온도(25℃, 10시30분 구간)에 도달하기 전에는 차량이 잠시 정차 하더라도 감속기의 온도(하늘색 실선)는 계속해서 상승하였고, 이후 일정 온도에 도달한 감속기는 차량이 정차할 때 감속기의 온도가 급격히 상승하였다.

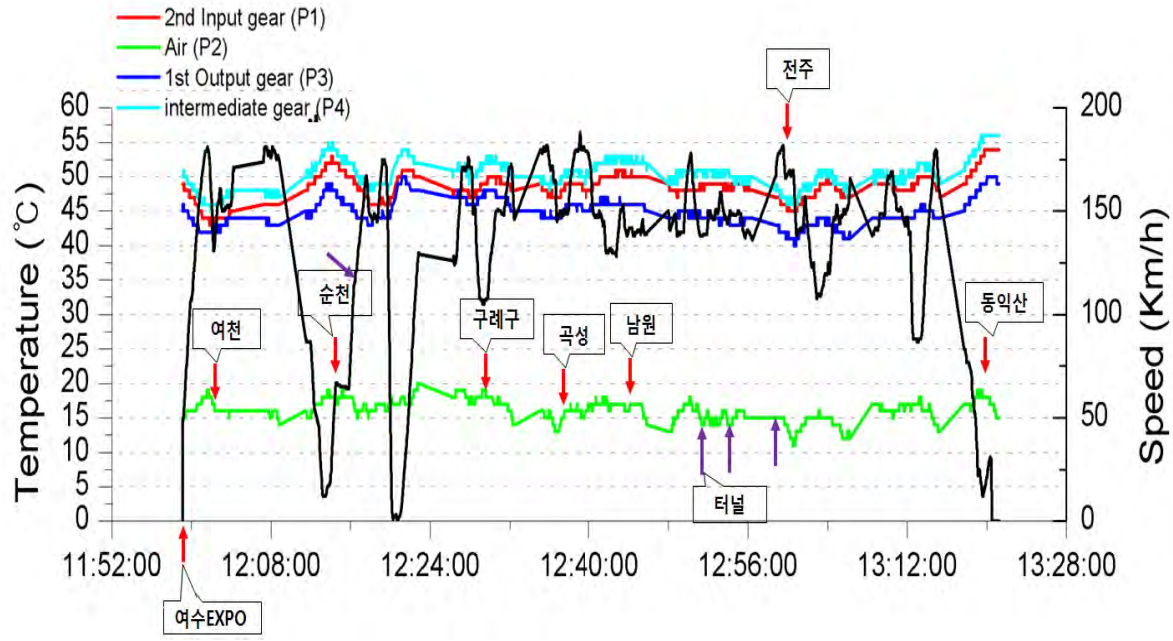
실제로 KTX 감속기는 오일 순환 방식과 자연 통풍 방식의 냉각방식을 채택하고 있다. 이러한 이유에 기인하여 차량이 정차할 경우 자연 통풍에 의한 냉각이 이루어지지 않을 뿐만 아니라 견인 전동기 및 각종 구성품에서 나오는 열기가 차량 하부를 맴돌게 되어 더욱 빠르게 감속기의 온도는 상승한다. 반면에 다시 차량이 출발할 경우 감속기의 온도는 다시 떨어지게 되고 이와 동시에 차량의 속도 증가에 따른 감속기에서 발생하는 열과 상충되지만 수렴되어 다시 온도가 상승하는 모습을 나타낸다.

한편, 터널 구간(11시25분 구간)을 지날 때에는 외기 온도(outdoor temperature, 녹색실선)가 상승하였다. 이것은 터널 안쪽의 온도가 바깥 온도보다 높은 것으로 시험이 3월 중순경에 실시되어 나타난 계절적 요인으로 판단된다.

그림 2.2.17 (b)에서 외기 온도를 측정하기 위해 감속기 주변 공간 설치한 센서의 위치 때문에 차량 하부의 열기에 노출되어 온도의 분포가 불규칙하였다. 차량의 최대 속도가 200km/h 부근에 이르렀을 때 1차 감속장치의 중간 기어는 55℃, 출력 기어는 45℃를 나타냈으며, 2차 감속장치의 입력 기어는 47℃를 나타냈다. 이때 외기 온도는 약 17℃ 정도를 나타내어 제한온도 모니터링 기법에 만족하는 결과를 보였다.




(a) 동익산~여수엑스포 구간




(b) 여수엑스포~동익산 구간

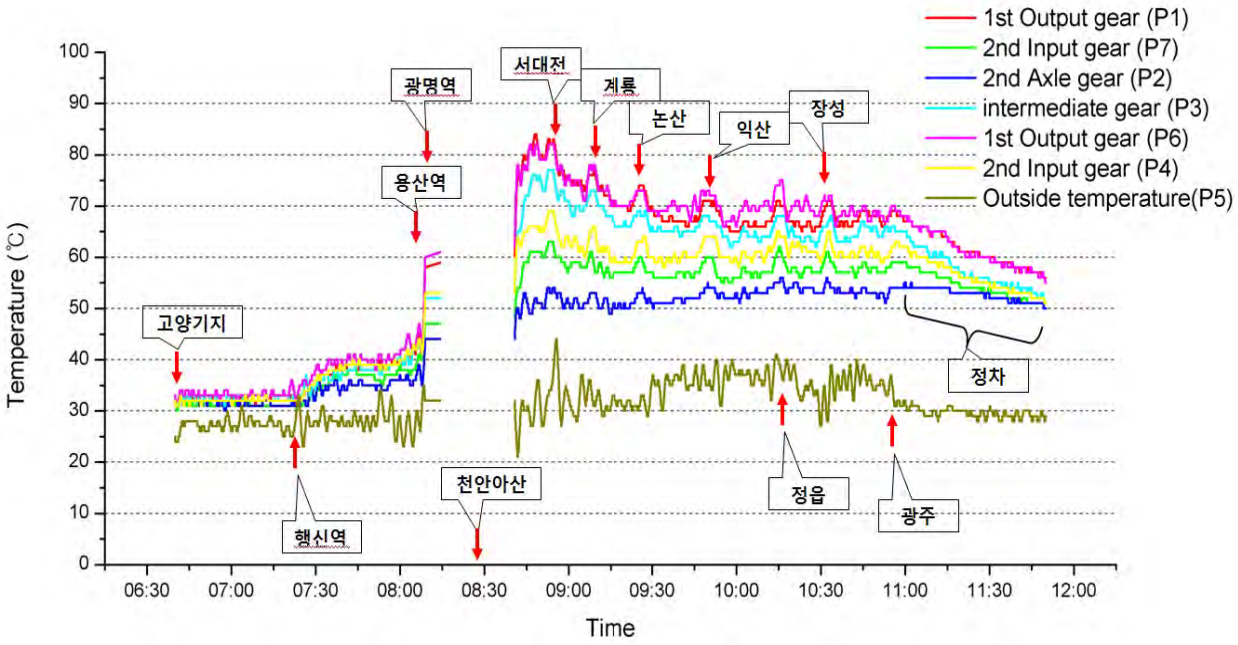
그림 2.2.17 전라선 감속기 온도 측정 결과

그림 2.2.18은 호남선의 행신역을 출발하여 광주역까지를 1회 왕복 운행 하면서 KTX 동력차의 견인 전동기에 연결된 감속기를 대상으로 얻어진 온도 데이터를 나타낸다. 차량의 진행 방향쪽 감속기의 1차 감속장치의 중간 기어에 P3번, 출력 기어에 P6번, 2차 감속장치의 입력 기어에 P4번 센서를 각각 부착하였고, 진행과 반대의 감속기에는 1차 감속장치의 출력 기어에 P1번, 2차 감속장치의 입력 기어에 P7번, 차축 기어에 P2번 센서를 설치하였다. 그림 2.2.18 (a)에서 볼 수 있듯이 초기 철도 차량이 차량기지인 고양기지를 출발하여 출발역인 행신역까지 약 40km/h 이하 속도로 이동할 때 제안한 시작운행 모니터링 기법을 적용하였다. 하지만 감속기의 온도는 거의 변화를 나타나지 않았으며, 이것은 감속기 내부에서 발생하는 열보다 자연 통풍의 냉각이 더 잘 이루어져 나타난 현상으로 보인다.

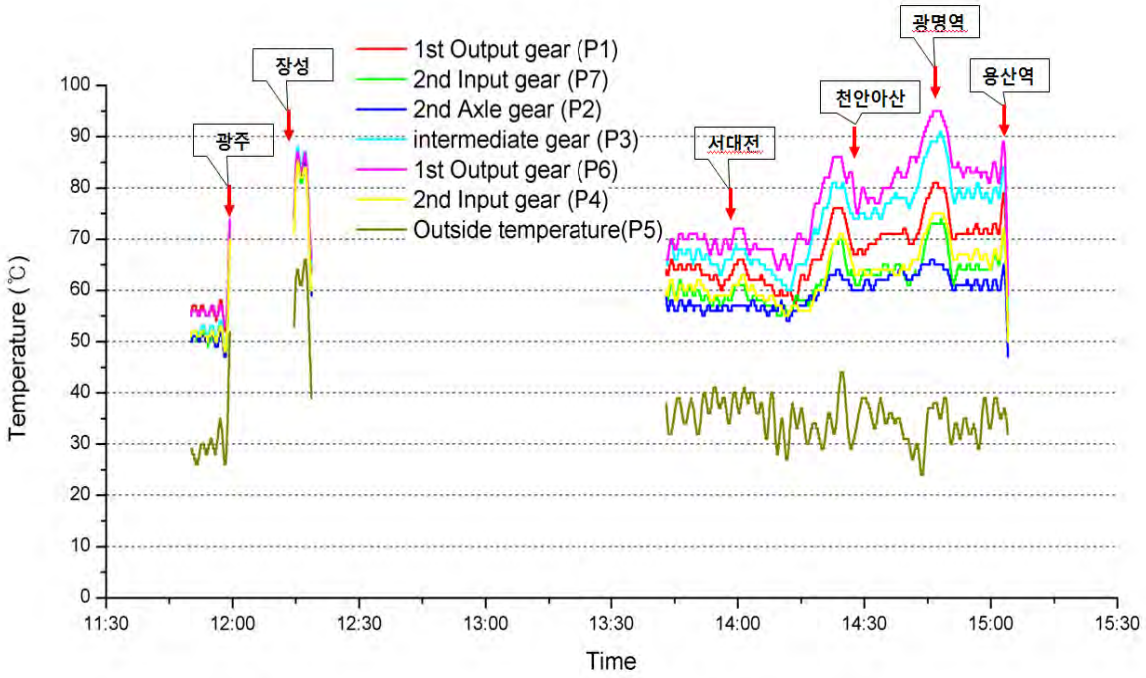
전라선 시험과 마찬가지로 운행 속도가 증가함에 따라 각 부분의 온도도 모두 상승하였다. 6월 중순에 실시된 호남선 시험은 전체적으로 3월에 실시하였던 전라선 시험보다 높은 온도 분포를 나타냈고, 천안 아산의 고속구간에서는 1차 감속장치의 중간 기어는 90℃, 출력 기어는 95℃를 나타냈으며, 2차 감속장치의 입력 기어는 75℃, 차축 기어는 65℃를 나타냈다. 이때 외기 온도를 측정하는 센서의 위치가 너무 bogie쪽에 가까워 외기 온도는 약 40℃ 정도를 나타냈지만 제한온도 모니터링 기법에 만족하는 결과를 보였다.

그림 2.2.19는 경부선의 서울역을 출발하여 부산역까지를 1회 왕복 운행 하면서 KTX산천 동력차의 견인 전동기에 연결된 감속기를 대상으로 얻어진 온도 데이터를 나타낸다. 그림 2.2.19 (a)에서 볼 수 있듯이 광명역에서 출발 후 철도 차량이 약 300km/h의 속도로 운행할 때 감속기의 온도 변화는 즉각적으로 이루어지지 않고 약 3분 정도 늦게 온도 변화를 나타냈다. 그림 2.2.19 (a)에서 도착역을 부산역으로 하는 하행선의 경우, 철도차량이 최고 속도에 도달했을 때 차량의 진행 방향쪽 감속기의 1차 감속장치의 중간 기어(P1)는 78℃, 출력 기어(P4)는 83℃를 나타냈으며, 2차 감속장치의 입력 기어(P2)는 76℃를 나타냈다. 반면 도착역을 광명역으로 하는 상행선의 경우 다른 편 감속기에 설치된 온도 센서에서 높은 온도 분포를 나타냈다. 1차 감속장치의 중간 기어(P7)에서 76℃, 출력 기어(P8)에서 84℃를 나타냈으며, 2차 감속장치의 입력 기어(P6)는 76℃를 그리고 차축 기어(P3)에서는 65℃를 나타냈다. 이때 외기 온도(P5)는 약 30℃ 정도를 나타냈으며, 제한 온도 모니터링 기법에 만족하는 결과를 보였다.

따라서 본 연구에서 제시하는 고속철도 차량의 감속기의 이상상태 온도 모니터링 기술은 차량의 감속기에서 발생하기 이전 단계에서 손상 거동을 파악할 수 있는 수단을 제공할 수 있다.

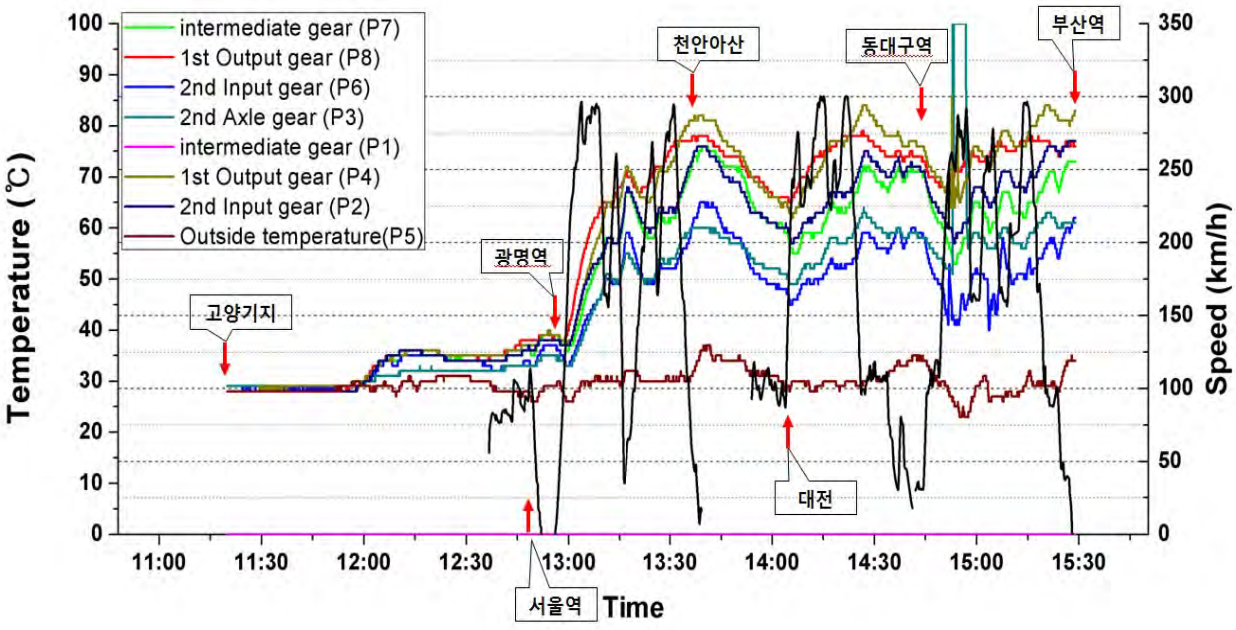



(a) 고양기지~광주 구간

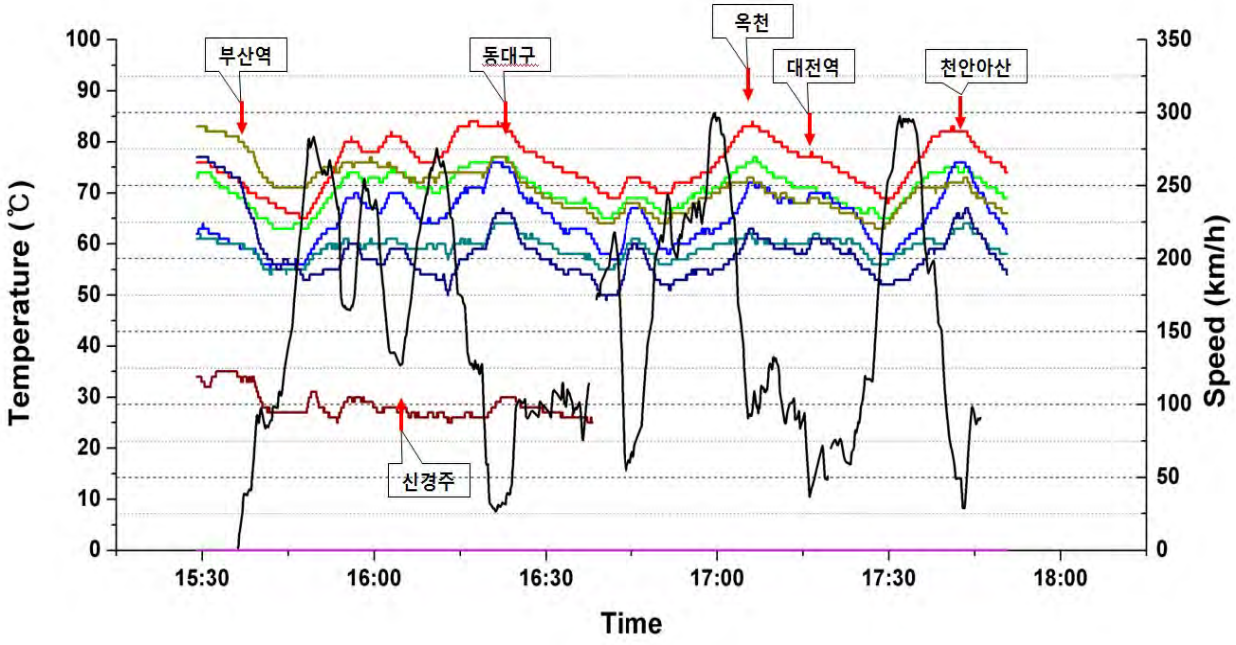



(b) 광주~용산 구간

그림 2.2.18 호남선 감속기 온도 측정 결과




(a) 고양기지~부산 구간




(b) 부산~광명 구간

그림 2.2.19 경부선 감속기 온도 측정 결과

## 4. 온도감시 시스템 시제품 제작

가. 온도감시 시스템의 하드웨어 구성

1차 년도에 운행 고속차량 감속구동장치의 온도감시 시스템에 IC온도센서를 적용, 무선송수신 방식으로 제작하였다. 전동차와 고속차량 구동장치에 1차년도 시제작 시스템을 적용하여 현차 시험을 실시한 결과 운행 중 감속구동장치의 온도상태를 감시할 수 있는 만족할 만한 성과를 얻었다.

2차 년도에는 1차 온도감시 시제작 시스템에서 발생한 문제점을 수정 보완하고자 표 2.2.5와 같이 시스템을 수정하여 제작하였다. 온도센서의 측정범위는 1차와 동일하게 150℃까지 측정할 수 있도록 하고 센싱의 정확도는 0.5℃로 향상시켰다. 또한 센서에서 송신기까지 연결되는 채널의 단순화를 위하여 1차에서 병렬출력이었던 포트를 직력포트로 구성하여 연결선을 단순화하였다.

표 2.2.5 온도감시 시스템 수정 전후

| 항목 | 수정 전 | 수정 후 |
|---|---|---|
| Typical Accuracy (℃) | ±0.8 | ±0.5 |
| Temp. Range (℃) | −55 ~ +150 | −40 ~ +150 |
| Operating Voltage Range (V) | 4 ~ 30 | 2.7 ~ 5.5 |
| Device Description | Parallel Output | Serial Output |



(a) 온도센서 (b) 콘트롤 박스

그림 2.2.20 2차 시제품의 수정

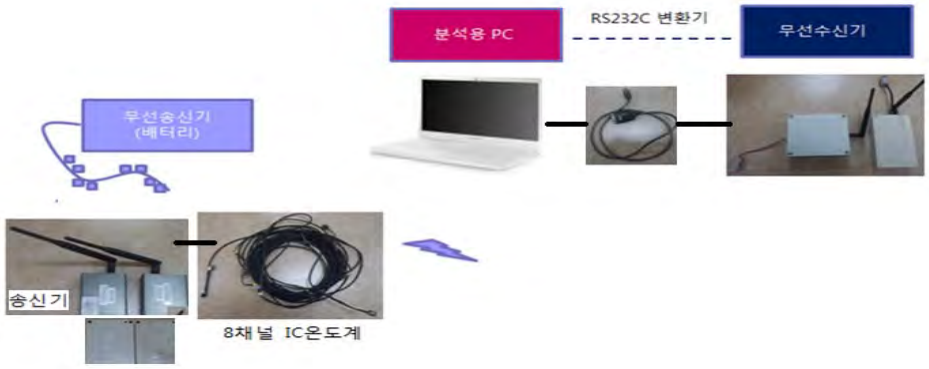



그림 2.2.21 감속구동장치 온도 감시시스템의 구성도

그림 2.2.21에 감속구동장치 온도감시 시스템의 구성도를 나타낸다. 8채널 온도센서를 구동장치의 베어링부 또는 핫존(hot zone)에 설치하고 배터리가 부착되어 있는 송신기와 연결하여 차량에 설치된 온도 모니터링PC에 무선으로 데이터를 송신하는 시스템으로 구성되어 있다.

(1) 온도센서

온도 측정 범위는 -65 ~ 150℃, 작동 환경 온도는 -55 ~ 125℃, 온도 정밀도는 0.5℃, 동작 전압 범위는: 2.7V ~ 5.5V이다. 인터페이스 방식은 I2C이며 온도센서보드는 센서를 기판에 부착하고 기판위의 부품과 커넥터를 몰딩하여 환경에 영향이 없게 제작하였다.

그림 2.2.22에 나타낸 시스템에 사용된 온도 센서는 Microchip Technology Inc. 社의 TCN75로 IC type (semiconductor integrated-circuit sensors)의 소형 세라믹 온도 센서다. 크기는 6.35×2.36mm로 절대온도에 비례하여 전류를 출력한다. AD590은 1K당 1㎂의 전류를 출력하고, 실용 온도범위는 -55℃에서 150℃까지이며 RTD나 서머커플과 비교했을 때 그 사용 범위가 좁으며, 이때 4 ~ 30V의 전원이 필요하다. 선형 회로나 온도 접합의 보정이 필요하지 않을 뿐만 아니라 소형이며, 저가이고, 정확하며, 다른 시스템과 인터페이스가 쉬운 여러 가지 장점을 가지고 있어 적용하였다.

- 고체상태 온도 감지: 0.5° C 정확도
- 온도 측정 범위: -55 ° C ~ +125° C
- 센서의 크기: (W*L*D, 5*3.1*1.1mm )
- 동작 전원:2.7V~5.5V
- 온도 정확도:-55° C~125° C(±3° C)/25° C~100° C (±0.5° C)
- A/D변환기: 8비트

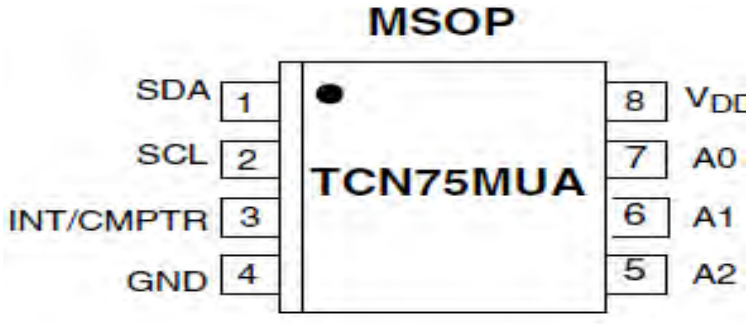
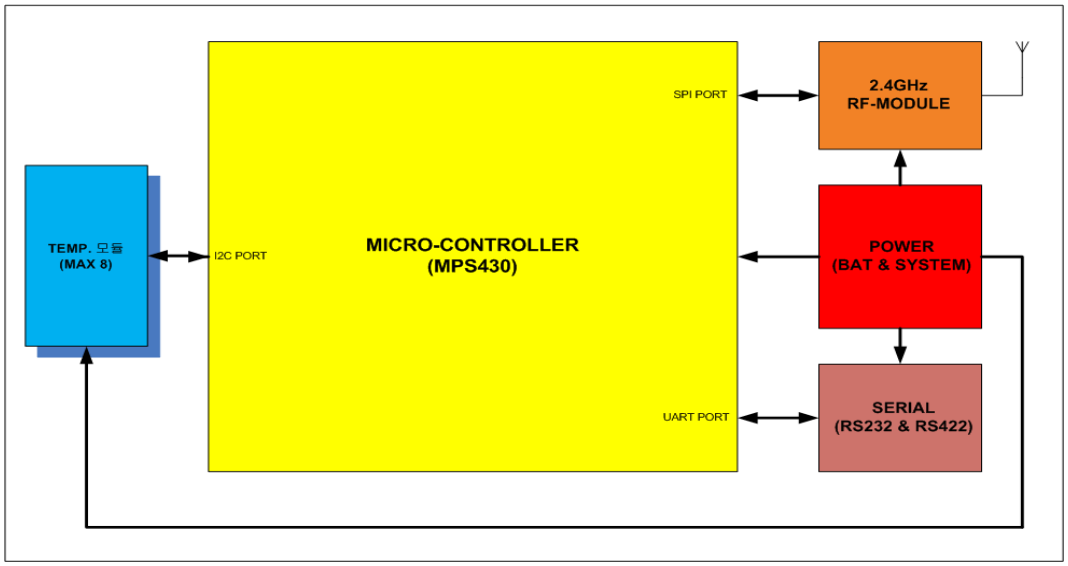



그림 2.2.22 온도센서의 특성(TCN75 MSOP type)

온도센서 보드는 1개의 SUB-SYSTEM 컨트롤러에 최대 8개까지 연결가능하고 데이터 전송 형식은 다음과 같다.

- Data Format : HEAD +ID + MODE + DATA(1~2) + BCC
- HEAD : Header(STX (0x01))
- ID : 온도센서 Address(0x30 ~ 0x37)
- MODE : Command Write(0x30 ~ 0x34), TEMP Read(0x38)
- DATA : Command Writ값, TEMP Read값 -> 전부 ASCII CODE로 변환된 값
- BCC : Checksum( not (ID +MODE +DATA) 에 하위 8비트만 취함)
- 전송 CLK Rate : 100 kHz, 400 kHz 선택 가능
- 온도센서 소모 전류량 : Active - 250 uA, Shutdown Mode - 1 uA
- 모듈 사이즈 : 20 mm × 50 mm
- 온도센서 변환 시간 : 60 msec

**SUB CONTROL 블록도**




전체 블록도

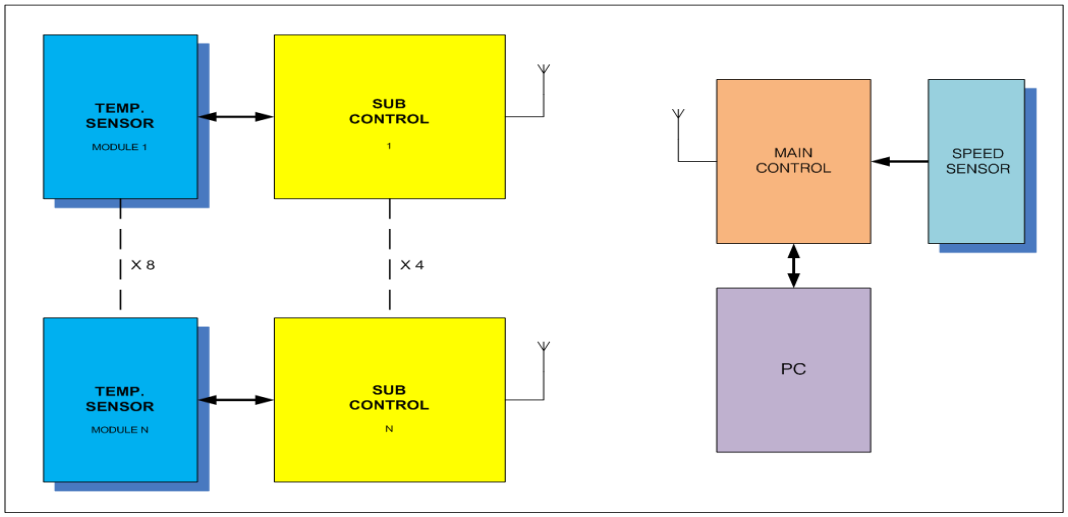



그림 2.2.23 온도센서 보드 구성

(2) 신호처리부

온도 감시 시스템과 같이 마이크로프로세서를 이용한 시스템은 주변장치의 추가를 통해 다른 시스템과 정보를 교환할 수 있다. 대표적인 직렬 통신 방식인 RS232 방식은 데이터를 1개씩 비트단위로 외부로 송수신 하는 방식으로써 구현하기가 쉽고, 멀리 갈 수 있으며 기존의 통신선로(전화선) 등을 활용할 수 있어 비용절감이 크다는 장점을 갖고 있다. 직렬 통신 방식은 비동기식 방식과 동기식 방식 크게 2가지 방식으로 구분할 수 있다. 동기식 방식의 경우, 2개의 디바이스 사이에서 동기를 취하고 그 타이밍에 따라 데이터를 송수신한다. PC의 시리얼 포트(RS232 등)와 같은 비동기식 방식은 데이터 교환시에만 제어용 신호를 발생하고, 이 신호를 감지하여 데이터를 입력받는 반대 형태의 신호 흐름을 갖는다. 동작 모드에서 비동기식 방식은 Single-ended 와 Differential 이라고 하는 신호 처리기법을 이용하여 시스템간의 데이터 전송을 하게 되는데, RS232와 RS423은 각각의 라인에 기준전압을 스윙하는 시그널을 실어서 전송하고, RS485와 RS422는 두 라인을 하나의 쌍으로 하여 시그널을 전압차로 만들어서 전송하는 방식이다. 또한 Full duplex 방식은 송신과 수식이 독립적으로 구성되어 동시에 기능을 수행할 수 있는 방식이며 Half duplex 방식은 송수신 라인을 공유하여 타이밍상 송수신이 동시에 이루어 질수는 없는 방식이다. 케이블 길이는 RS232의 경우 케이블의 길이는 약 15m로 되어 있다. 실드가 불안한 케이블의 경우, 외부 환경이 크게 영향을 주며 전기적인 노이즈가 발생하기 쉬운 환경에서는 짧은 케이블을 이용해도 노이즈에 영향을 받는다.

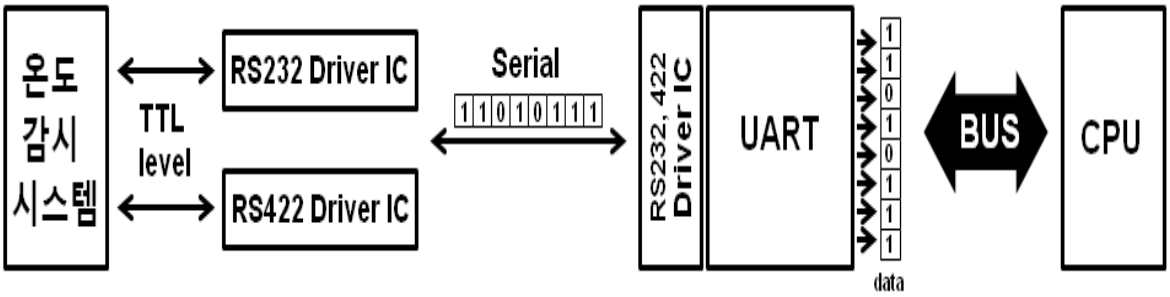



그림 2.2.24 온도 감시시스템의 전송방식

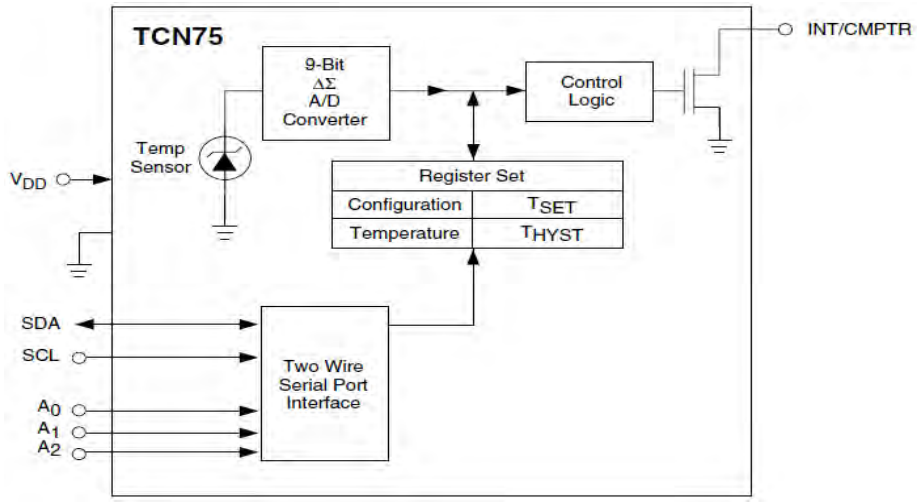



그림 2.2.25 기능 구성도(TCN75 MSOP type)

그림 2.2.25에 나타낸 온도 센서 이후의 신호처리 장치로써, AD변환기, 마이크로프로세서, 송신부 장치로 구성된다. 신호처리장치는 온도 센서(8채널)에서 획득된 전압값을 AD변환기에 의해 디지털 신호로 변환된 온도 신호는 Serial 통신으로 PC로 전송한다. 온도 감시 시스템의 무선 통신에서는 2400~2483.5MHz의 주파수 대역을 사용하고, 디지털 신호를 그대로 아날로그 신호로 변조하면 주파수 대역이 무한히 넓어지므로 필터에 신호를 보내 방지할 필요가 있다. 따라서 변조는 GFSK(Gaussian Frequency Shift Keying)를 사용한다. 전송 방식은 사용주파수 대역 내에서 주파수 호핑 방식을 사용한다. 송신 출력 전력은 0 dBm, 수신 감도는 -80 dBm이다. AD 변환기, DA 변환기는 48MBps/ 10bit 의 형식을 만족하고, 전류 소모는 20mA 이하를 목표로 제작하였다.

그림 2.2.26에서 보인 AD590 온도센서 출력단 이후의 신호처리 장치의 개요도이다. 신호처리장치는 전류전압 변환기, Analog to digital Converter(이하 ADC), $\mu$-processor, 송신부, 수신부, USB인터페이스장치, 디스플레이 장치로 구성된다.

Device의 Main전원이 공급이 없더라도 현재의 시간을 알 수 있게 해주며 온도센서(16채널)에서 전류신호 출력 후 Amplifier에서 전압 값으로 변환 증폭한 다음 속도 센서에서의 속도신호를 ADC(10Bit)로 변환 후 Serial 통신으로 PC로 전송한다. AVR에서 전압 값(0~5V)을 ADC(10Bit)로 입력 받고, 전압 값을 온도 값으로 변환 연산하여 연산된 온도값 (현재시각, 속도, 온도)은 Serial 통신을 통해 SD카드에 저장하고 연산된 온도값은 RS-232를 통해 PC로 전송후 실시간으로 모니터링 하게 되는 시스템이다.

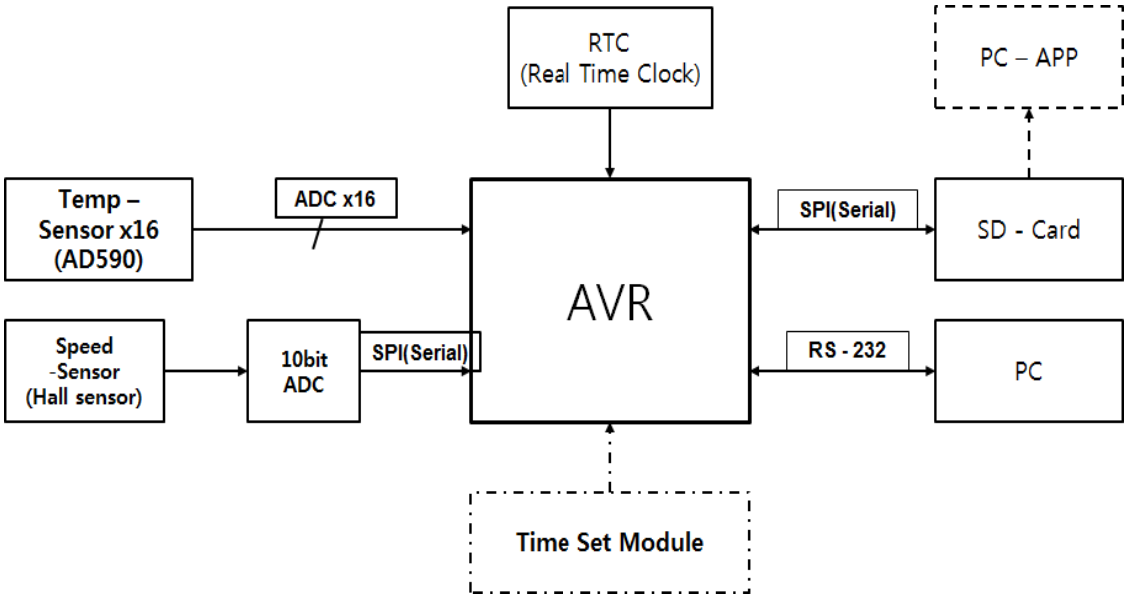



그림 2.2.26 감속구동장치 온도모니터링 시스템 구성도

나. 온도감시시스템의 프로그램 구성

그림 2.2.27에 나타낸 온도 감시 프로그램은 C++빌더로 작성되었으며, 1차년도 보고서에 기술한 (1) 자가진단, (2) 제한온도 모니터링, (3) 시작운행 모니터링, (4) 온도변화량 모니터링 진단기법을 적용하여 실시간 모니터링 및 데이터 저장이 가능하다.

감속구동장치의 온도는 철도차량의 운전속도에 따라 달라진다. 철도차량의 최대 운용속도인 300km/h의 속도로 운행할 때 차량의 가속 성능은 최초 100km/h 까지는 약 10.44㎧, 200km/h까지 도달할 때는 약 0.22㎧, 그리고 최종 속도에 도달했을 때에는 약 0.073㎧의 가속도를 갖는다. 또한 철도차량이 정지 상태에서 출발하여 200km/h까지 도달시간은 직선 평단구간에서 160sec의 시간이 필요하고, 300km/h까지 도달시간은 약 365sec의 시간이 필요하다. 이와 같은 내용을 기준으로 베어링 케이스 주변 온도(Tp, present temperature)를 운전 속도에 따라 미분(철도 차량의 가속도 데이터)하고 기준 온도와 비교하여 기준 온도보다 크게 변화하면 기능 이상 있는 것으로 판단한다. 차량의 속도(Vp, present velocity) 변화 간격(⊿x)는 계절적 영향과 선로 상태 등의 주변 환경을 고려하여 선정하고, 감속구동장치 온도 측정의 간격은 속도의 변화량과 동일한 값으로 선정한다.

$$\frac{|T_p - T_{(p-\Delta x)}|}{|V_p - V_{(p-\Delta x)}|} > T_r \quad \text{----------} \quad (2.2.5)$$

본 프로그램의 상세 구성 및 주요기능은 다음과 같다.

- Window 기반의 C++ 빌더
- National Instruments社의 A/D Board 사용
- 자체개발한 무선 온도수집 장치사용
- Interface 기능 : 무선 장치 연결, A/D 보드 연결
- 데이터 모니터링 기능 : 온도 데이터, 속도 데이터
- Display 기능 : 채널별, 구간별, 전체 Display 기능
- 무선데이터 취득 간격 : 1초
- 데이터 저장방식 : 텍스트



그림 2.2.27 온도 감시 시스템 프로그램



그림 2.2.28 온도 감시시스템 프로그램에 의한 온도 계측

## 5. 온도감시 시스템 시제품 성능시험

### 가. 시스템 및 시험방법

본 연구에서는 시제작한 시스템으로부터 출력되는 온도 신호를 제안한 검출 기법에 의해 감속기의 이상상태를 실시간으로 출력하고, 실제 운행되고 있는 각 노선별로 고속철도 차량에 상술한 시스템을 적용하여 그 유용성을 확인할 수 있었다. 감속기의 베어링 커버에 설치된 온도 센서는 일정시간(1sec)마다 감속기의 온도변화에 따라 선형적으로 전류신호를 출력한다. 이 아날로그 신호는 전류 전압 변환기에 의해 전압신호로 변환 증폭된다. 증폭된 신호는 $\mu$-processor (Atmega128)에 내장된 ADC에 의해 10bit의 디지털 신호로 변환되고, u-processor는 수식 (2.2.6)에 의해 디지털 신호를 온도 데이터로 변환 계산한다.

$$℃ = \frac{5}{9}(°F - 32)K = ℃ + 273.15 \quad ----------(2.2.6)$$

변환된 온도 데이터는 2.4Ghz Transceiver RF Module을 통해 차량 하부에서 무선으로 차량 내부의 수신부로 송신된다. 수신된 온도 데이터는 USB통신을 통해 PC로 전송된다. 그림 2.2.29와 같은 컴퓨터에 설치된 온도 감시 프로그램에 의해 실시간으로 감속기의 이상상태를 진단하고 결과 데이터를 저장한다.

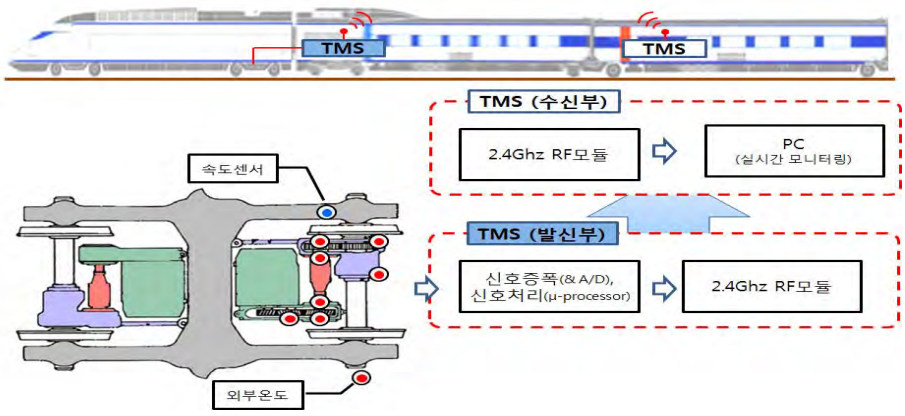






그림 2.2.29 무선 방식의 온도모니터링 시스템 설치 및 구성도

나. 실물시험기를 활용한 온도감시 시스템의 검증시험

시제작한 온도감시 시스템의 검증을 위하여 실물 감속구동장치 시험기에서 본 시스템의 온도 센서를 그림 2.2.30과 같이 구동장치의 베어링부 4곳에 부착하고 적외선 열화상 카메라를 그림 2.2.31와 같이 설치하여 검증시험을 실시하였다. 표 2.2.6에 나타낸바와 같이 시험조건은 800 rpm과 2900 rpm으로 각각 15분간 구동시켜 감속구동장치 베어링의 온도분포를 적외선 열화상장치와 비교하여 검증하였다.

그림 2.2.32에 감속구동장치 온도감시 시스템에 의한 온도분포를 나타낸다. 센서를 부착한 4곳의 온도가 시간에 따라 상승하고 있음을 알 수 있다. 나머지 4개 센서는 30℃부근의 온도분포를 보이고 있는 데 이는 외기온도를 나타낸다.

적외선 열화상 카메라로 얻은 온도분포의 이미지를 그림 2.2.33 ~ 2.2.35에 보여준다. 온도감시 시스템 센서와 동시에 적외선 열화상 카메라를 설치하여 시험기 구동 동안 실물 감속구동장치의 온도분포를 측정하였다. 그림 2.2.32와 그림 2.2.33에서 800rpm과 2900rpm으로 구동시 초기의 온도분포가 유사하게 26℃~45℃로 분포하고 있으며 그림 2.2.32와 그림 2.2.34에서 최대 온도분포가 57℃~70℃를 나타내고 있다. 이러한 시험 결과는 적외선 열화상 카메라의 온도분포와 본 연구개발 온도감시 시스템의 온도분포가 일치하고 있음을 보여준다.

표 2.2.6 실물 감속구동장치 시험기의 시험조건

| Unit Items | | Motor Reduction Units | Axle Gear Reduction Unit | Remarks |
|---|---|---|---|---|
| 시험범위 | 1st | - rpm : 800(motor) (60km/h)<br>- time : 15min | - rpm : 360(motor) (60km/h)<br>- time : 15min | 정, 역방향 |
| | 2nd | - rpm : 2900(motor) (220km/h)<br>- time : 15min | - rpm : 1320(motor) (220km/h)<br>- time : 15min | 상동 |
| | 3rd | - rpm : 4000(motor) (300km/h)<br>- time : 90min | - rpm : 1800(motor) (300km/h)<br>- time : 90min | 상동 |
| 시험범위 | Check Point | - Transmission gear wheel rolling bearing<br>- Output gear rolling bearings | - rpm : 1320(motor) (220km/h)<br>- time : 15min | |
| | Max | 주위온도 +80℃ | 주위온도 +75℃ | |

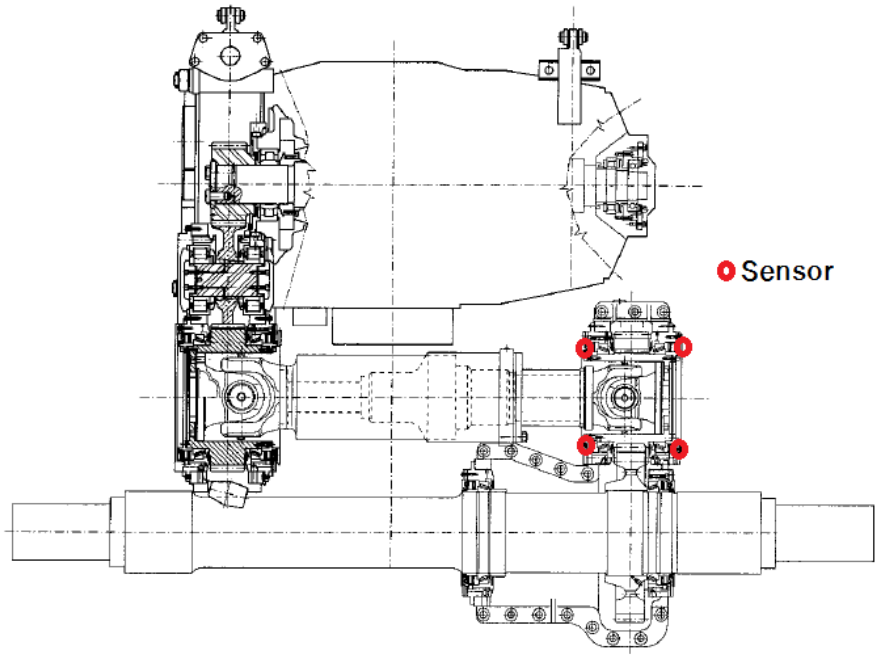
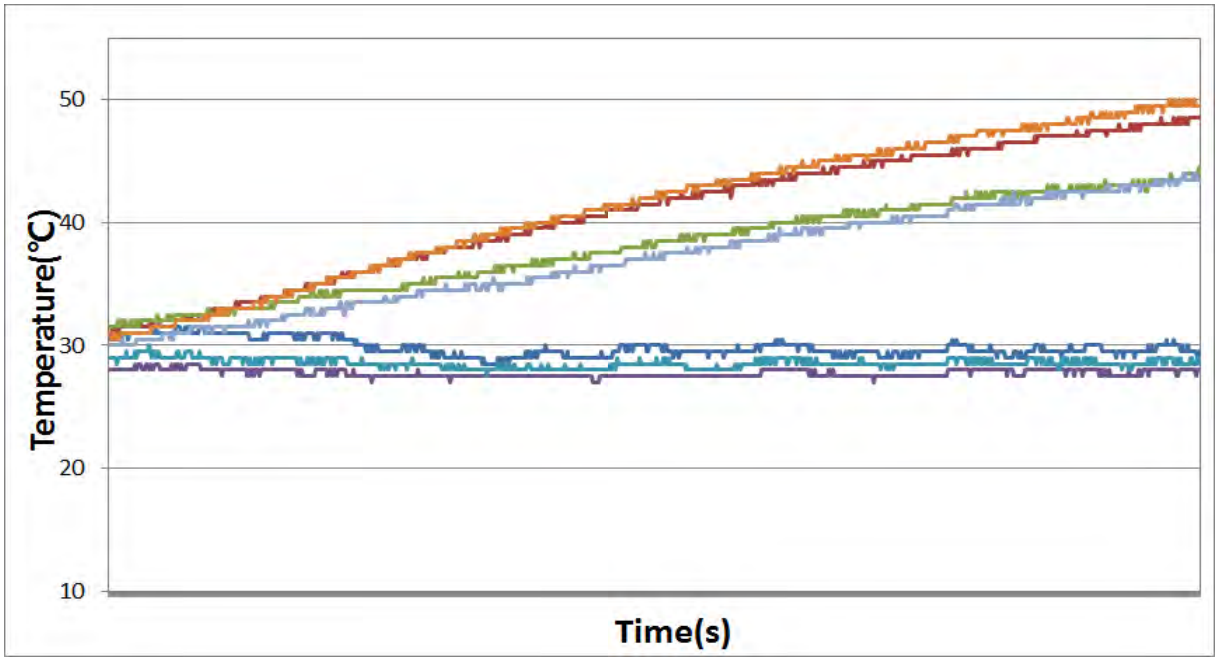


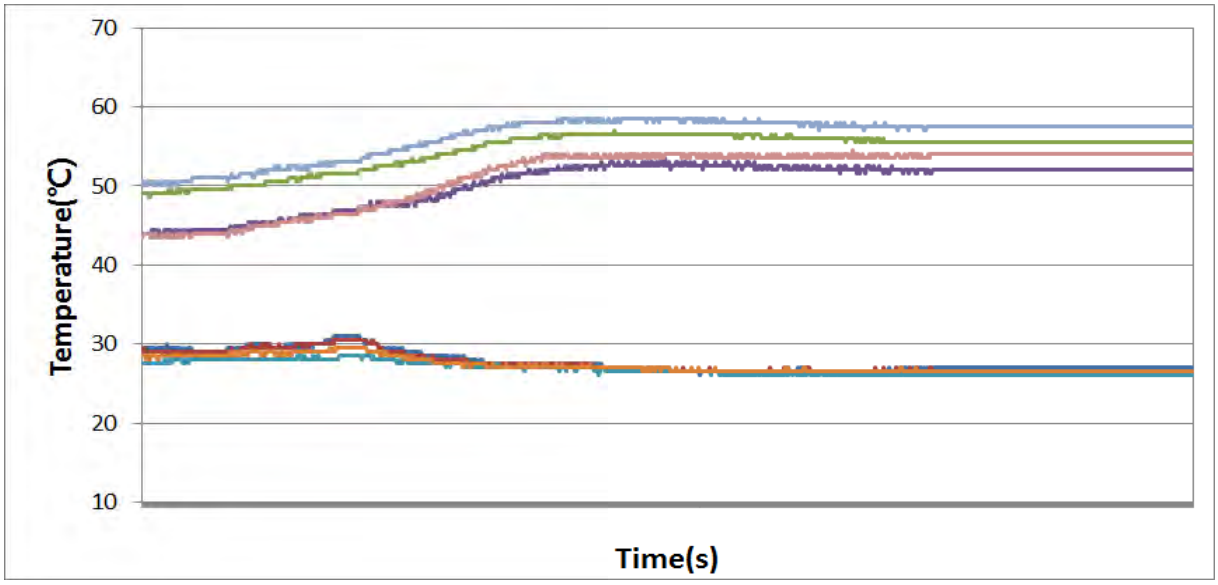

그림 2.2.30 실물 감속구동장치 시험기의 온도센서 설치



그림 2.2.31 감속구동장치 온도감시 시스템의 검증시험

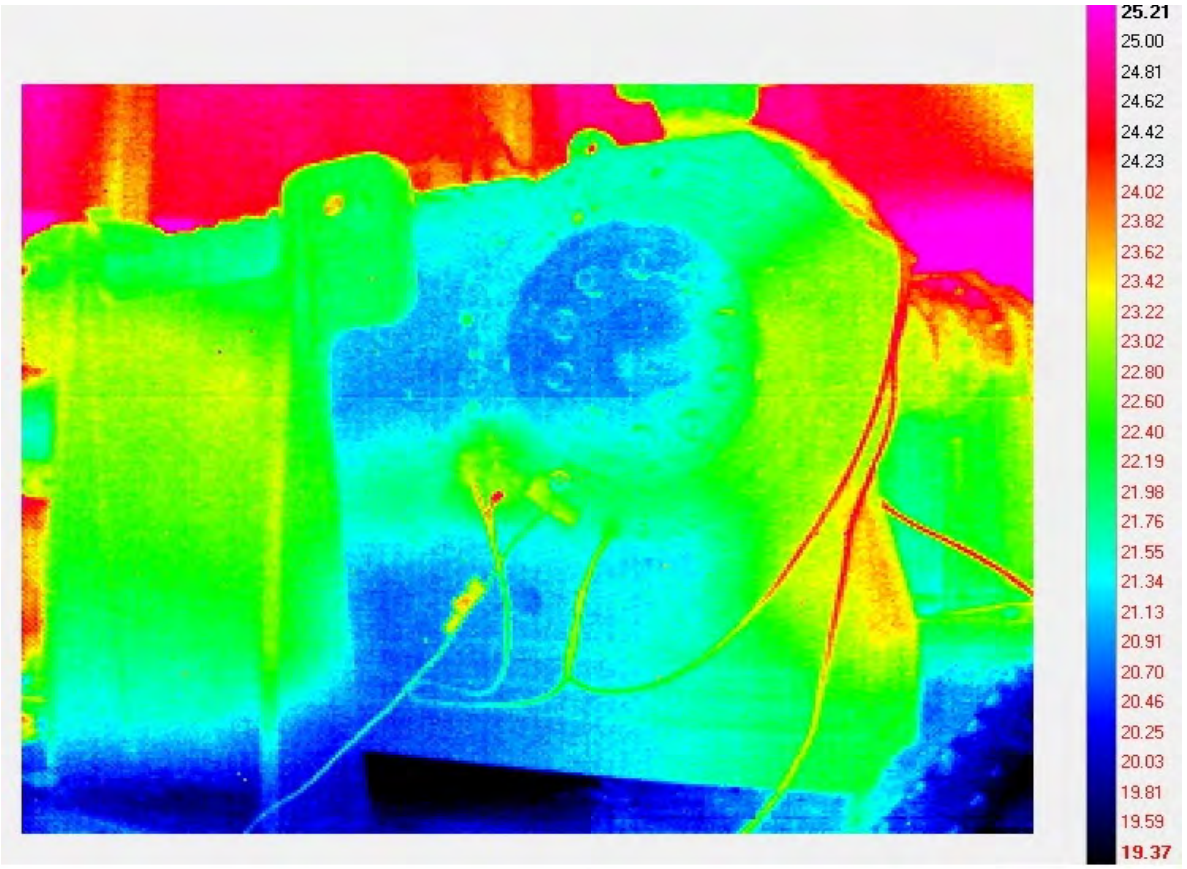



(a) 800rpm




(b) 2900rpm

그림 2.2.32 온도 감시시스템 측정에 의한 감속구동장치의 온도상승 곡선



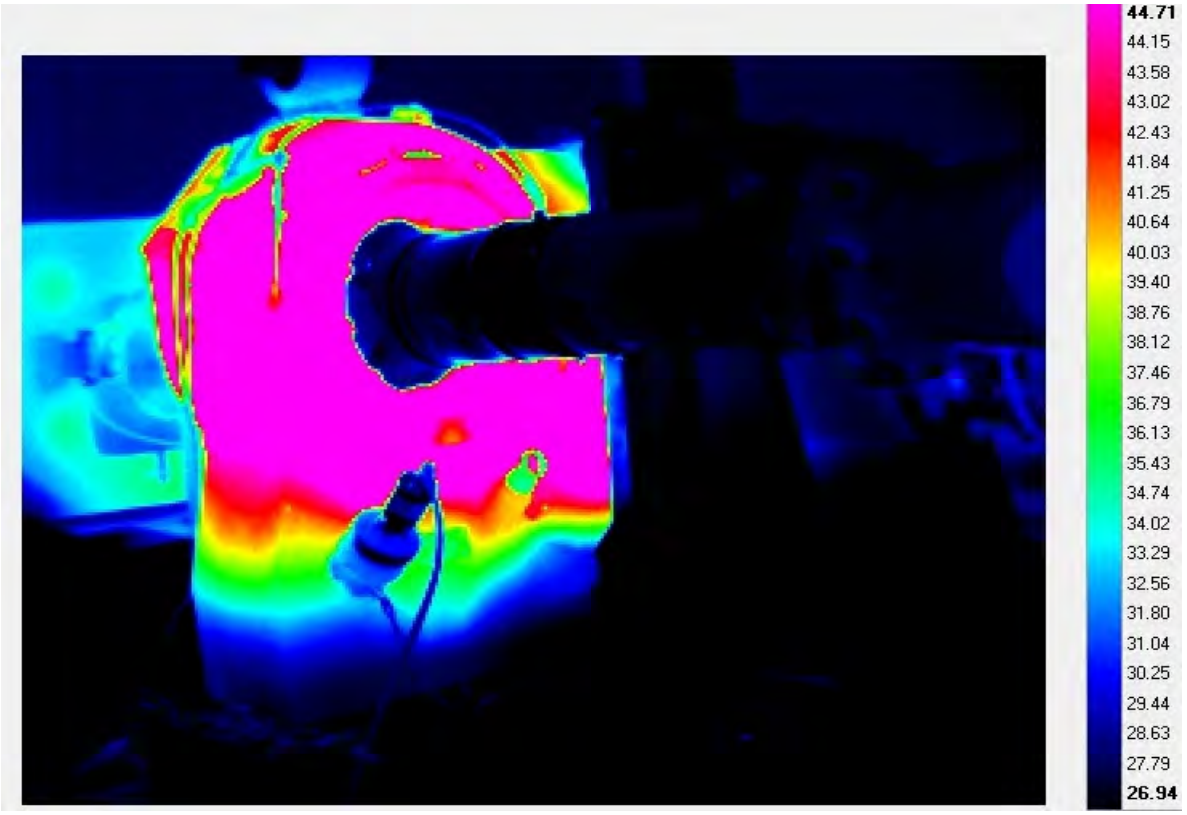
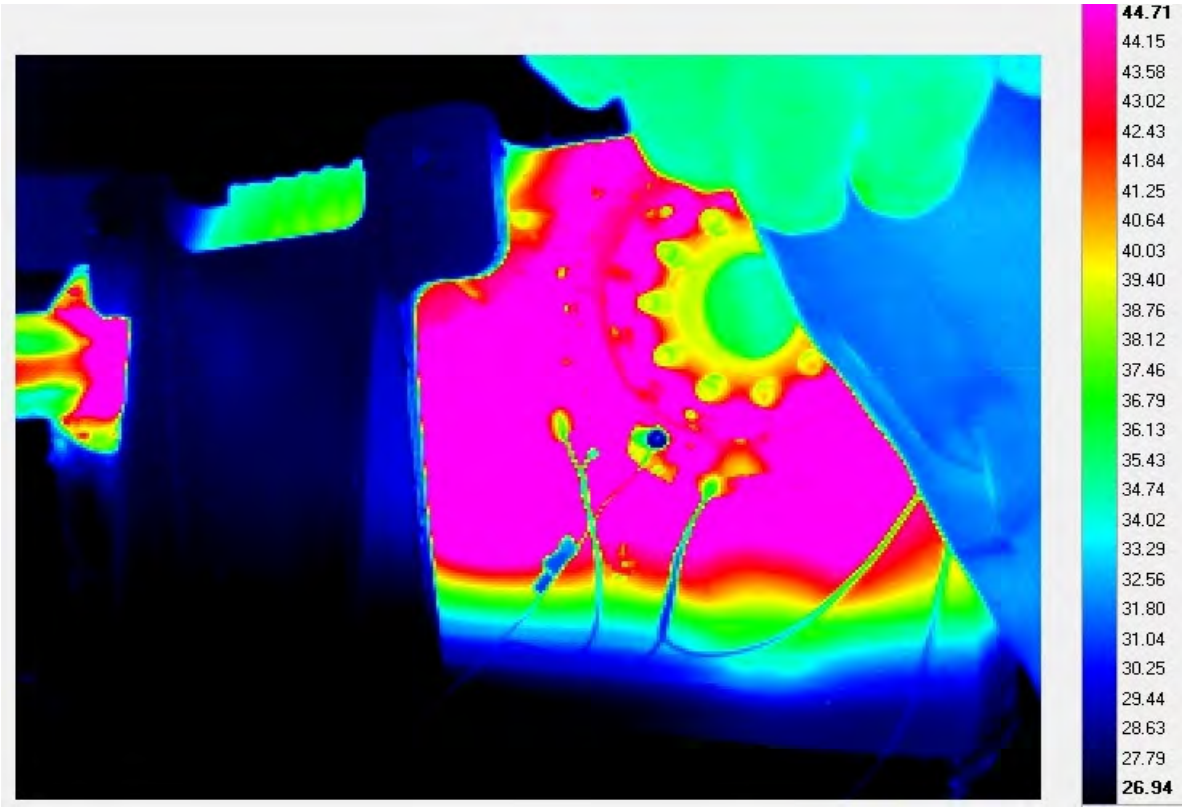




그림 2.2.33 감속구동장치 시험시 적외선 열화상 이미지-1



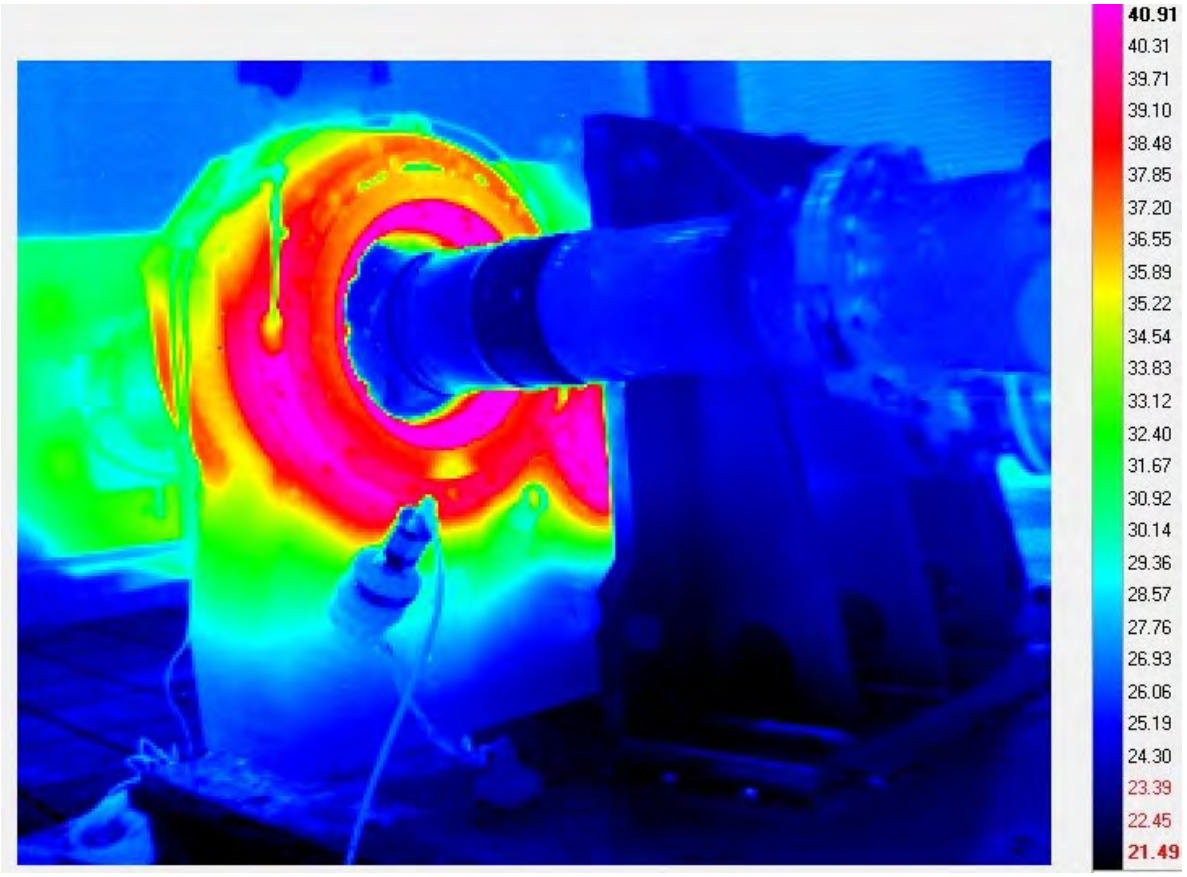




그림 2.2.34 감속구동장치 시험시 적외선 열화상 이미지-2

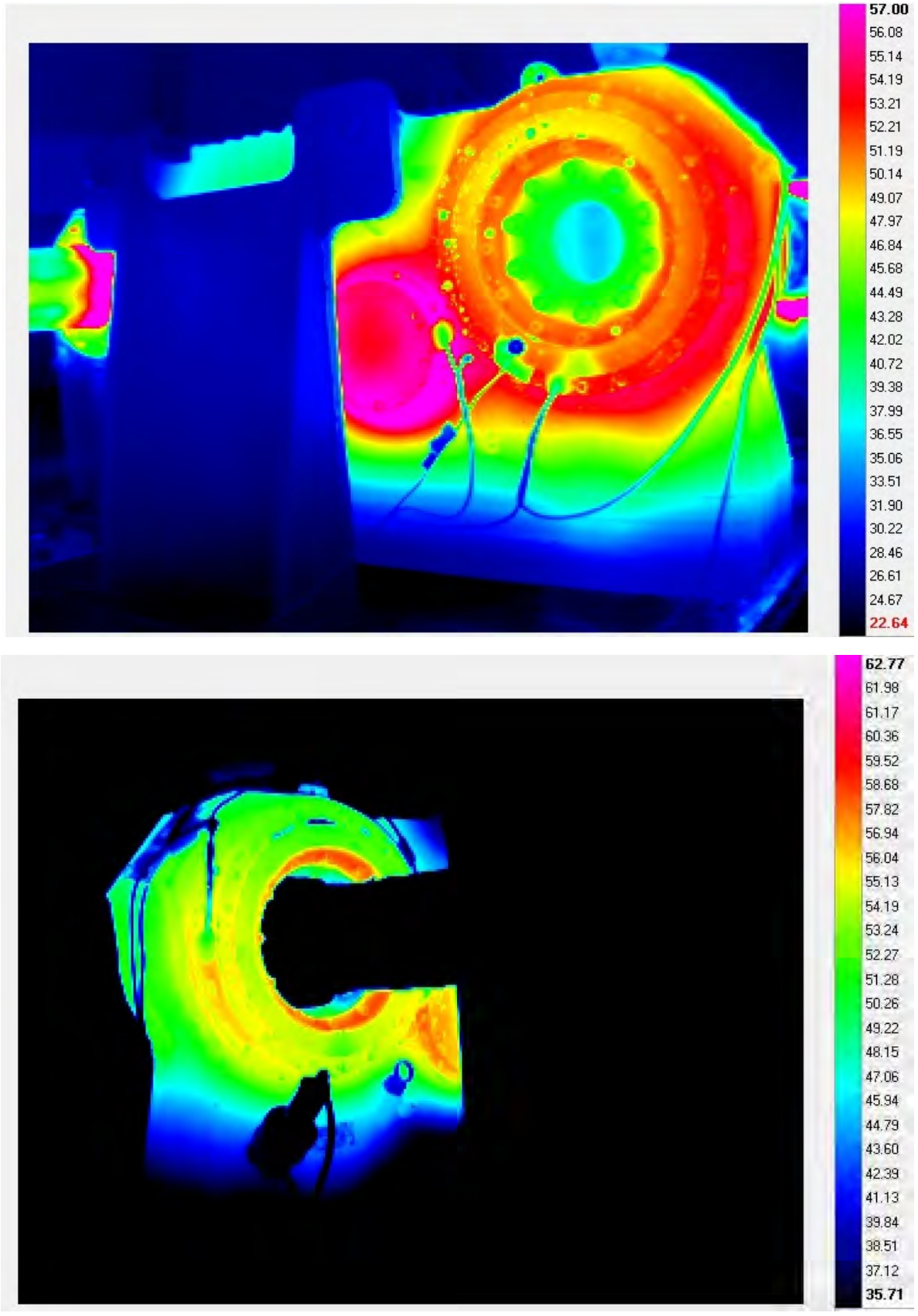



그림 2.2.35 감속구동장치 시험시 적외선 열화상 이미지-3

다. 온도감시 시스템에 의한 고속차량 감속구동장치 온도 모니터링 시험

(1) KTX 감속구동장치 현차 시험

KTX와 KTX산천의 감속기는 단일 차축당 단일 견인 전동기로 구성된 동력집중식 구동시스템으로써, 견인전동기와 연결된 1차 감속기, 차축과 연결된 2차 감속기, 그리고 두 감속기를 연결하는 트리포드로 구성된다. 고속철도 차량의 감속기 기어박스는 헬리컬기어와 평기어(스피어기어)가 다단으로 배열된다.

접촉식인 온도센서는 그림 2.2.36과 같이 고속철도차량의 1, 2차 감속기의 베어링 커버 주변에 온도 센서의 부착 위치를 선정하였다. 1차 감속장치의 중간 기어(Intermediate Gear), 출력기어(Output Gear)와 2차 감속장치의 입력기어(Input Gear), 차축과 결합되는 차축기어(Axle Gear)의 베어링과 가장 가까운 커버에 배치하였다. 또한 차량의 진행방향과 반대방향에 상기 상술한 같은 위치에 한쌍의 센서를 설치하였다.

고속 차량이 운행(최고 300km/h)하는 동안 1sec 간격으로 데이터를 획득하였다. 얻어진 온도 데이터는 무선 통신을 통해 컴퓨터에 입력되고, 메모리에 저장된다.

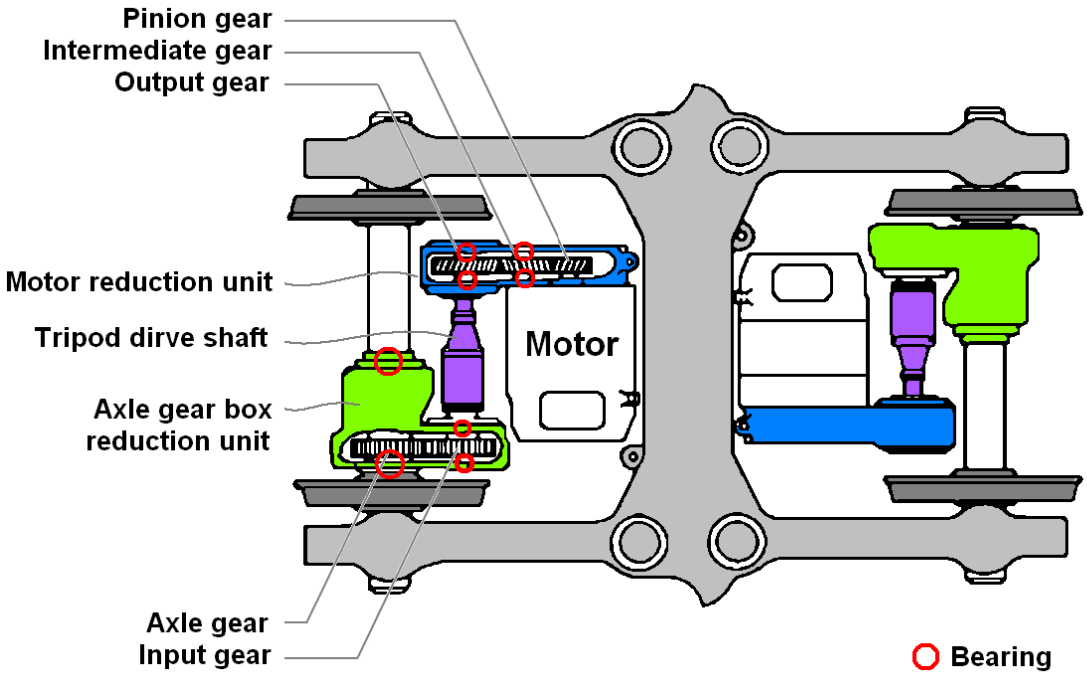



그림 2.2.36 감속기의 온도센서 부착위치



그림 2.2.37 KTX 감속구동장치의 온도모니터링 시험 센서 설치

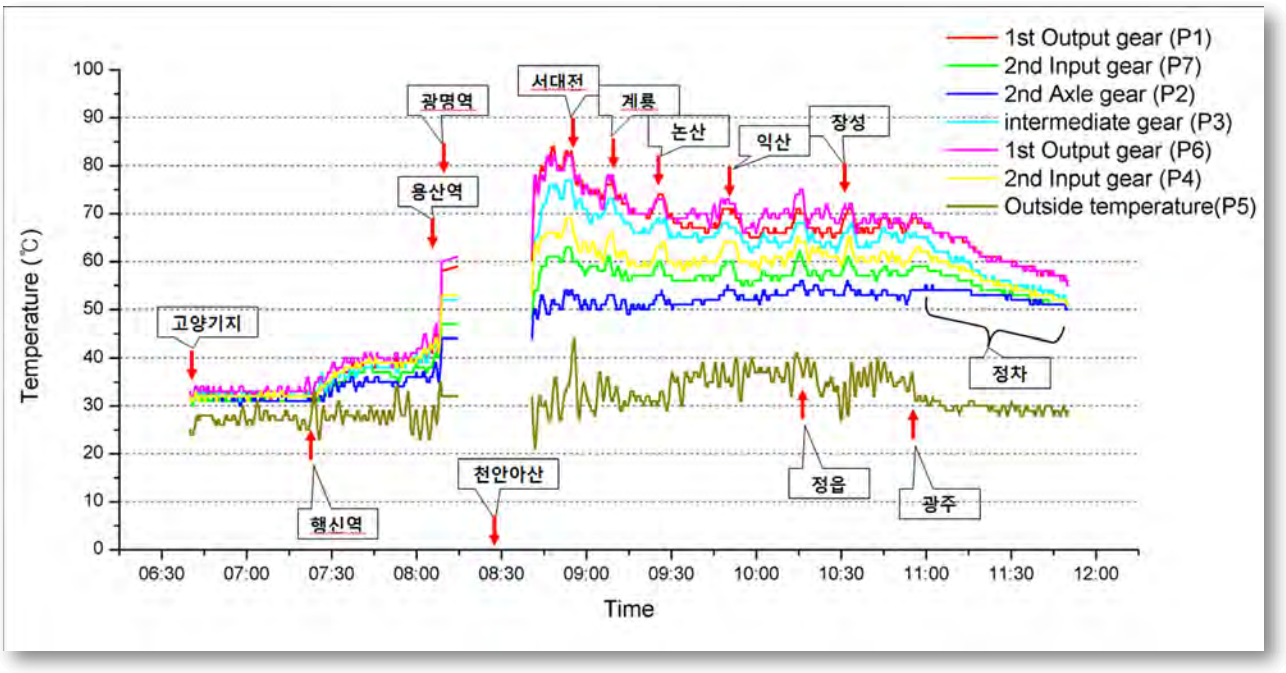



그림 2.2.38 1차 시제작 온도감시 시스템에 의한 호남선 측정

그림 2.2.38은 1차 시제작 온도감시 시스템에 의한 호남선 측정결과를 나타낸 것으로 그림에서 볼 수 있듯이 고속 운행 중 데이터의 무선 송수신에 문제점이 발생하였다. 2차 시제작 시스템에서는 이러한 문제점을 해결하여 그림 2.2.39~그림 2.2.40과 같이 호남선과 경부선에서 측정한 결과 고속운행 중에도 무선 송수신에 서 문제점이 발생하지 않았다.

그림 2.2.39는 300 km/h 주행시 KTX 동력차의 견인 전동기에 연결된 감속기를 대상으로 얻어진 온도 데이터를 나타낸다. 그림 2.2.39에서 볼 수 있듯이 운행 속도가 증가함에 따라 각 부분의 온도도 모두 상승하였다. 감속기가 일정 온도에 도달하기 전에는 차량이 잠시 정차 하더라도 감속기의 온도는 계속해서 상승하였고, 이후 일정 온도에 도달한 감속기는 차량이 정차할 때 감속기의 온도가 급격히 상승하였다.

실제로 KTX 감속기는 오일 순환 방식과 자연 통풍 방식의 냉각방식을 채택하고 있다. 이러한 이유에 기인하여 차량이 정차할 경우 자연 통풍에 의한 냉각이 이루어지지 않을 뿐만 아니라 견인 전동기 및 각종 구성품에서 나오는 열기가 차량 하부를 맴돌게 되어 더욱 빠르게 감속기의 온도는 상승한다. 반면에 다시 차량이 출발할 경우 감속기의 온도는 다시 떨어지게 되고 이와 동시에 차량의 속도 증가에 따른 감속기에서 발생하는 열과 상충되지만 수렴되어 다시 온도가 상승하는 모습을 나타낸다.

그림 2.2.40에서 차량의 최대 속도가 300 km/h 부근에 이르렀을 때 1차 감속장치의 중간 기어는 65℃, 출력 기어는 55℃를 나타냈으며, 2차 감속장치의 입력기어는 50℃를 나타냈다. 이때 외기 온도는 약 17℃ 정도를 나타내었다. 그림 2.2.41은 경부선에서 감속구동장치의 온도분포를 나타낸 것으로 외기 온도는 평균 26℃, 1차 감속장치의 중간 기어는 89℃, 출력 기어는 60℃를 나타냈으며, 2차 감속장치의 입력 기어는 55℃를 나타냈다.

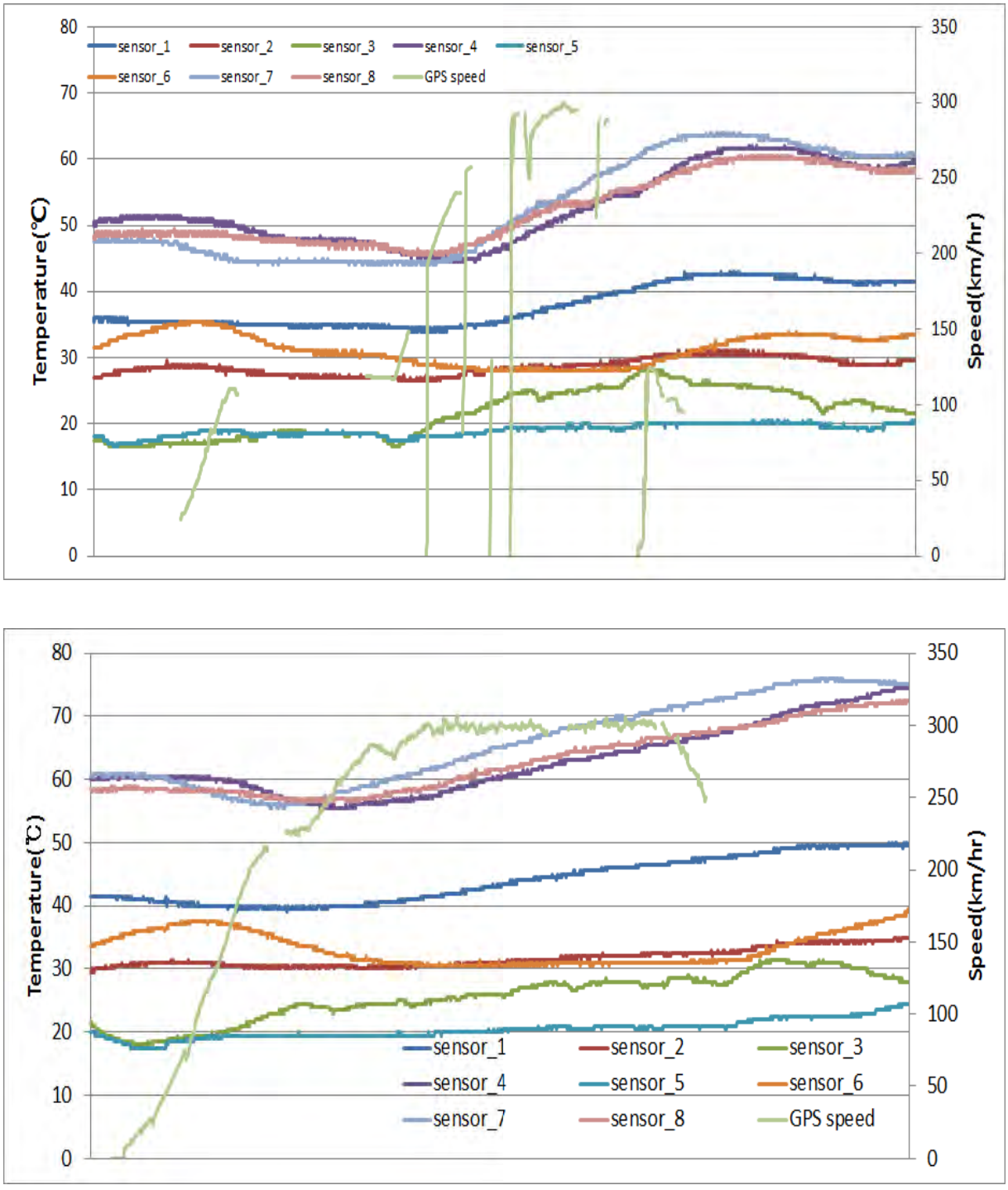



그림 2.2.39 300km/h 주행시 온도 분포(서대전-천안아산)

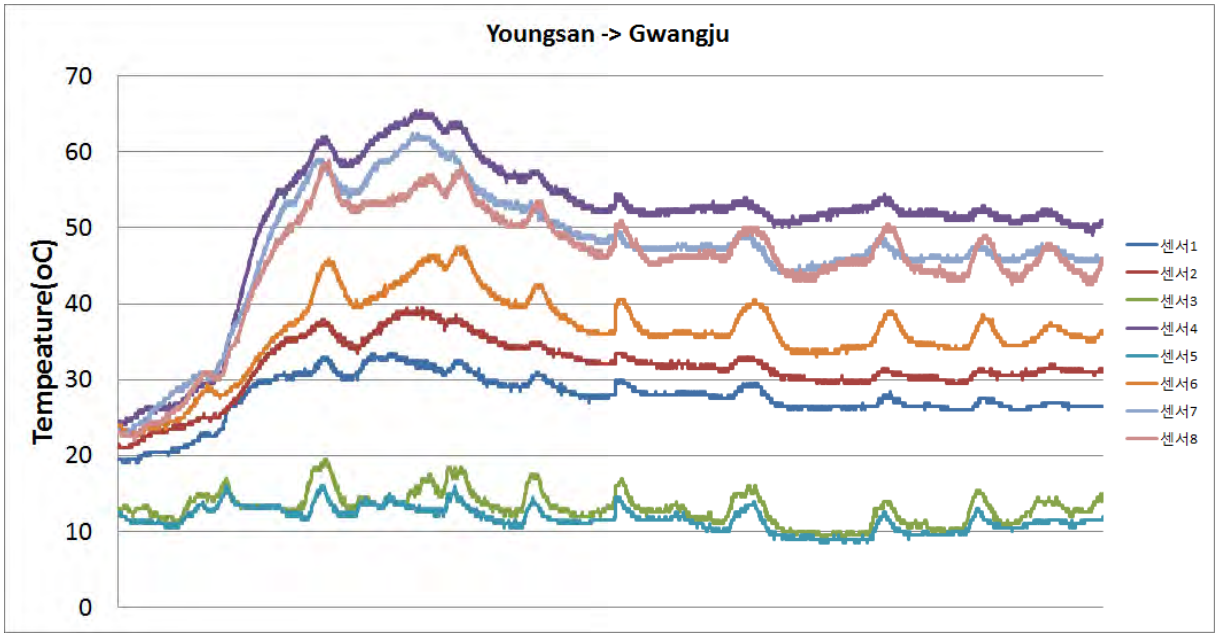



그림 2.2.40 호남선

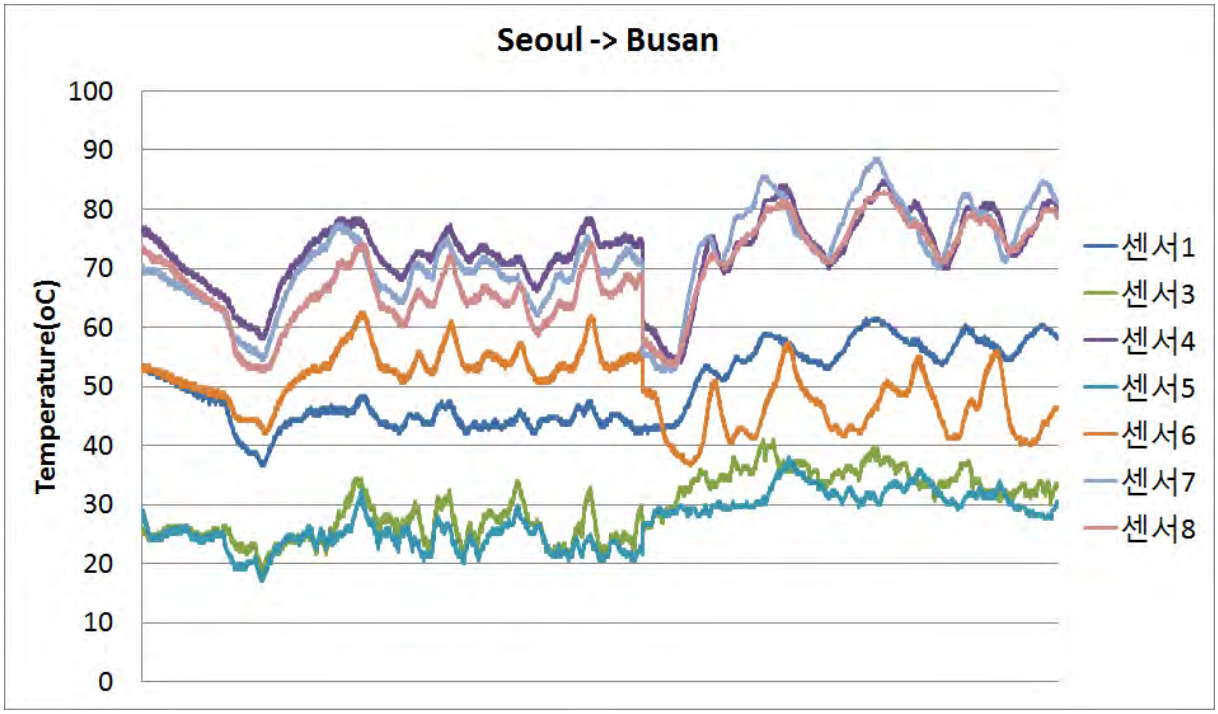



그림 2.2.41 경부선

(2) HEMU-430x 감속구동장치 현차 시험

그림 2.2.42 ~ 2.2.43은 HEMU-430x 고속차량의 감속구동장치에 온도감시 시스템의 온도센서를 부착한 모습이다. HEMU 고속열차의 경우에는 감속구동장치가 있는 3위 대차와 7위 대차에 온도센서를 설치하였다.

그림 2.2.43에서 나타낸 바와 같이 차량 진행 방향쪽 감속기의 입력 기어, 아이들 기어, 출력 기어의 베어링부의 양쪽 6곳에 온도센서를 부착하고 2곳의 온도센서에 외기온도를 측정하였다.

그림 2.2.44는 경부선의 서울역을 출발하여 부산역까지를 1회 왕복 운행 하면서 감속구동장치를 대상으로 얻어진 온도 데이터를 나타낸다. 그림 2.2.44에서 볼 수 있듯이 광명역에서 출발후 철도차량이 약 300 km/h의 속도로 운행할 때 감속기의 온도변화는 즉각적으로 이루어지지 않고 서서히 상승하며 급격한 온도 변화는 나타나지 않았다.

그림 2.2.44 ~ 2.2.45에서 볼 수 있듯이 초기 차량이 구동할 때 감속구동장치의 온도는 거의 변화를 나타나지 않았으며, KTX 시험과 마찬가지로 운행 속도가 증가함에 따라 각 부분의 온도가 상승하였다. 9월 말에 실시된 HEMU의 경부선 시험은 전체적으로 KTX 감속구동장치 보다 낮은 온도 분포를 나타냈고, 최대 67℃를 나타냈다. 이는 HEMU의 감속구동장치가 강제윤활 냉각방식 시스템으로 구동되기 때문인 것으로 생각된다. 1차, 2차 시제품 시제작과 현차 시험의 결과에서와 같이 본 연구에서 제시하는 고속철도 차량의 감속기의 이상상태 온도 모니터링 기술은 차량의 감속구동장치에서 발생하는 손상을 고장 이전 단계에서 검지할 수 있다.

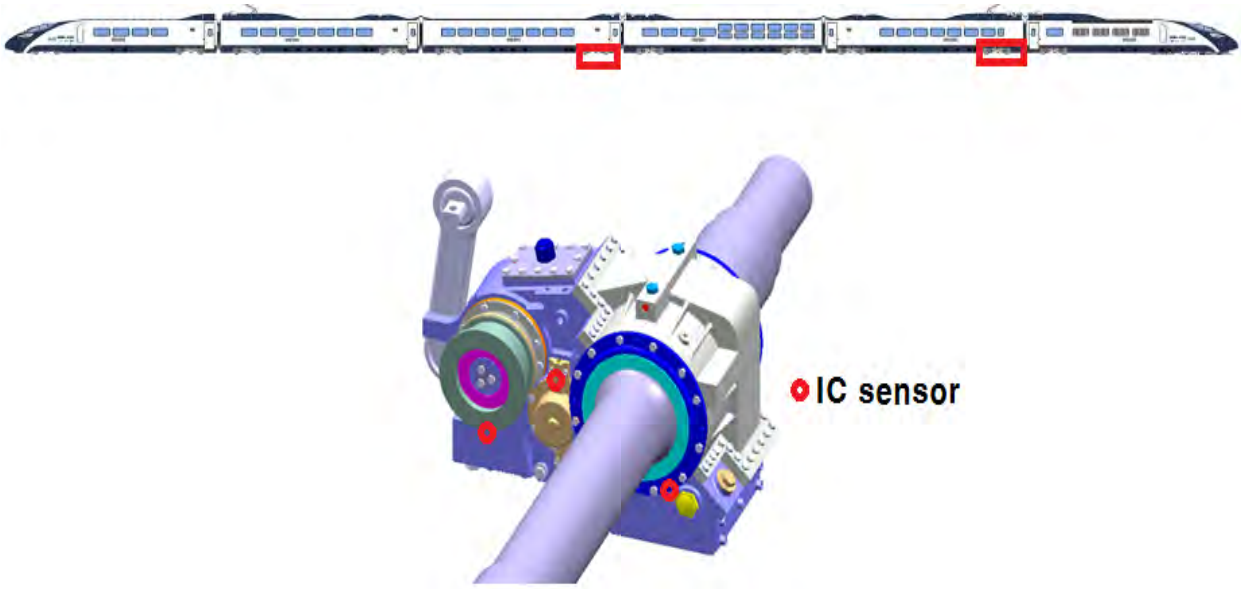



그림 2.2.42 HEMU 감속구동장치의 온도센서 부착 위치



그림 2.2.43 HEMU 감속구동장치의 온도모니터링 시험 센서 설치

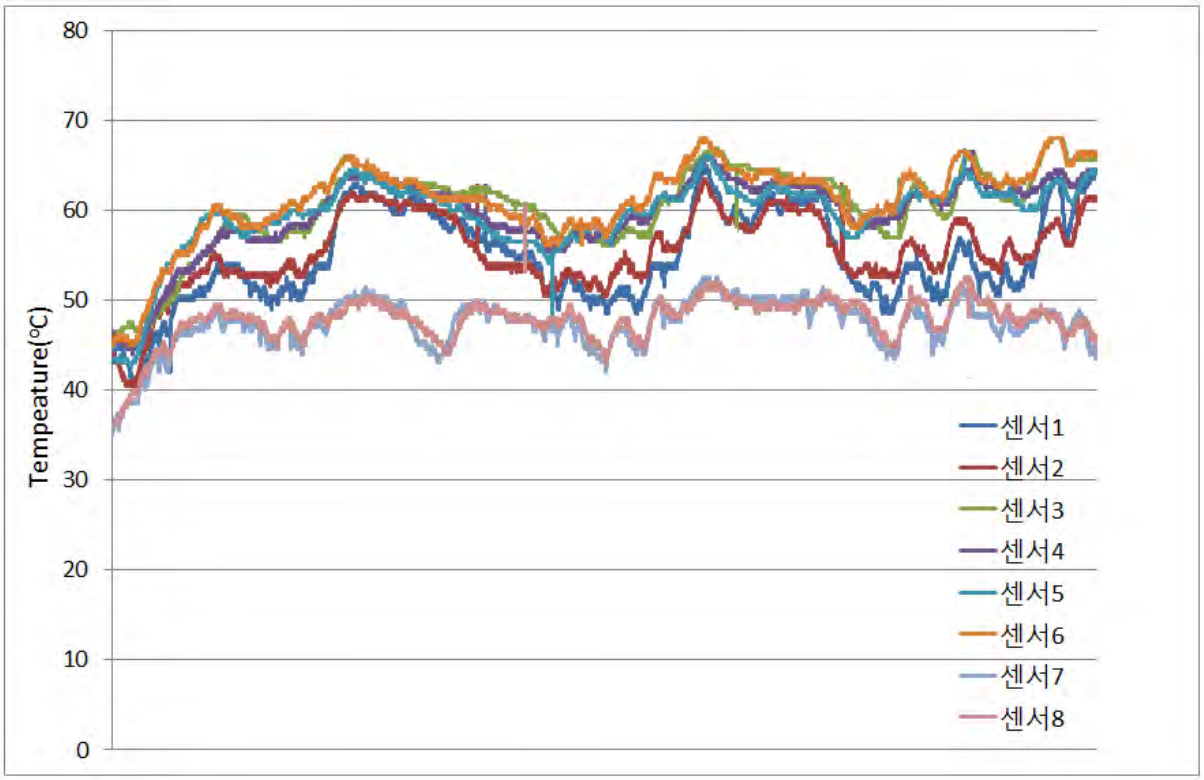



그림 2.2.44 HEMU 경부선

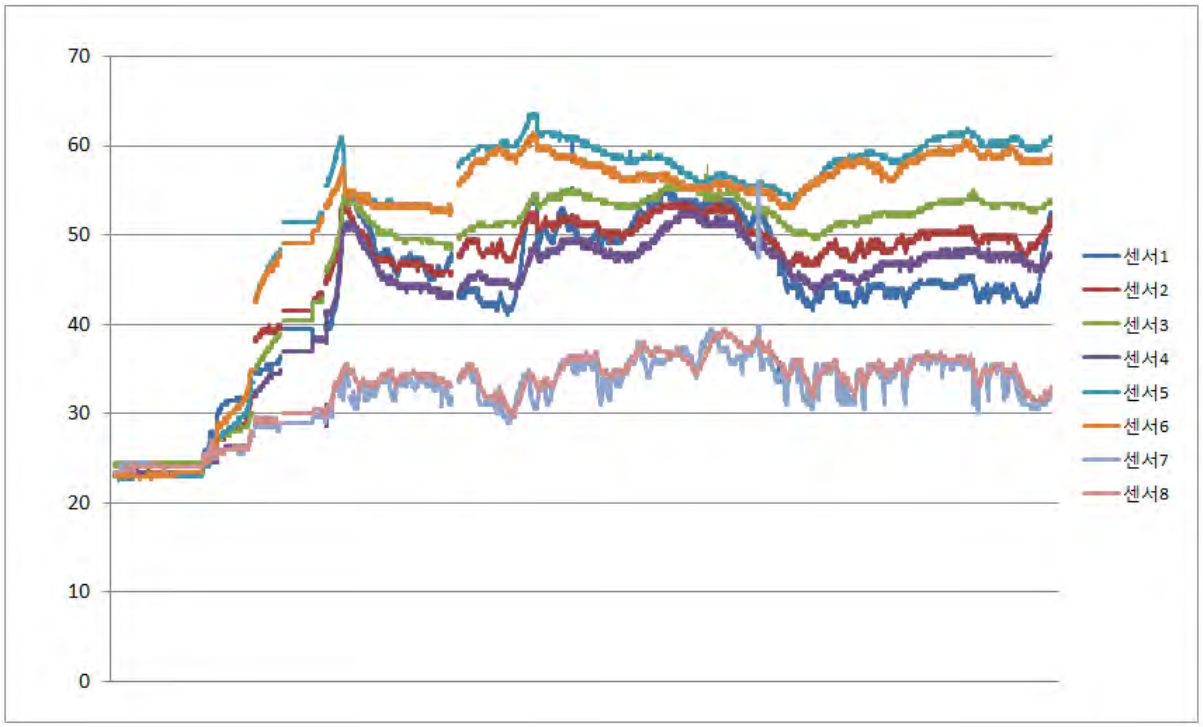



그림 2.2.45 HEMU 경부선

## 6. 감속기 온도감시 시스템의 평가 기준

고속차량의 경우 최고 속도에 근접하여 운행하기 때문에 구동장치에 사용되는 오일온도는 연속적으로 고온이 되면서 베어링 또는 케이싱에 전달되게 된다. 실제 감속기의 온도는 감속기어의 오일온도에 의한 영향을 받게 된다.  본 절에서는 감속기 온도감시 시스템의 온도 평가 기준을 설정하기 위하여 감속기 오일사용조건 및 온도기준을 조사하였으며 실제 현차 시험에서의 고속차량 감속기의 온도 변화를 분석하여 평가기준을 설정하였다.

고속화에 의해 기어오일의 사용 조건은 어느 정도 변화하게 되는 가를 일본 RTRI에서 대형 실물 시험장치에서 실제 대차를 이용하여 시험한 결과, 구동장치의 주변의 온도는 300 km/h에서 80℃까지 상승하였다, 이러한 결과는 주행 풍에 의한 주변온도가 냉각 영향을 받지 않는 상태에서의 시험결과이기 때문에 실제 운행조건보다는 가혹한 결과이다. 이러한 시험 결과에서 추정하면 혹서기에 400 km/h의 고속으로 주행하는 경우 기어오일의 온도는 일시적으로 최고 150℃까지 상승할 수 있다고 보고하고 있다[5].

대부분 중공업기기나 배에서 사용되는 감속 기어 윤활유의 정상 온도는 48℃와 54℃ 사이이다. 장치가 완전 작동시 오일의 온도는 60℃와 65℃ 사이이며, 모든 동작 조건 하에서 모든 기어나 베어링 오일의 최대 상승온도 범위가 10℃를 초과하지 않아야 하며 오일의 최종 온도는 82℃를 초과하지 않도록 되어 있다.

그림 2.2.46은 감속기의 성능시험시 온도측정 위치를 나타낸 것이다. 감속기의 베어링부의 온도를 측정하여 상승온도(측정온도−대기온도)는 90℃이하 이어야 한다고 규정하고 있다[6].

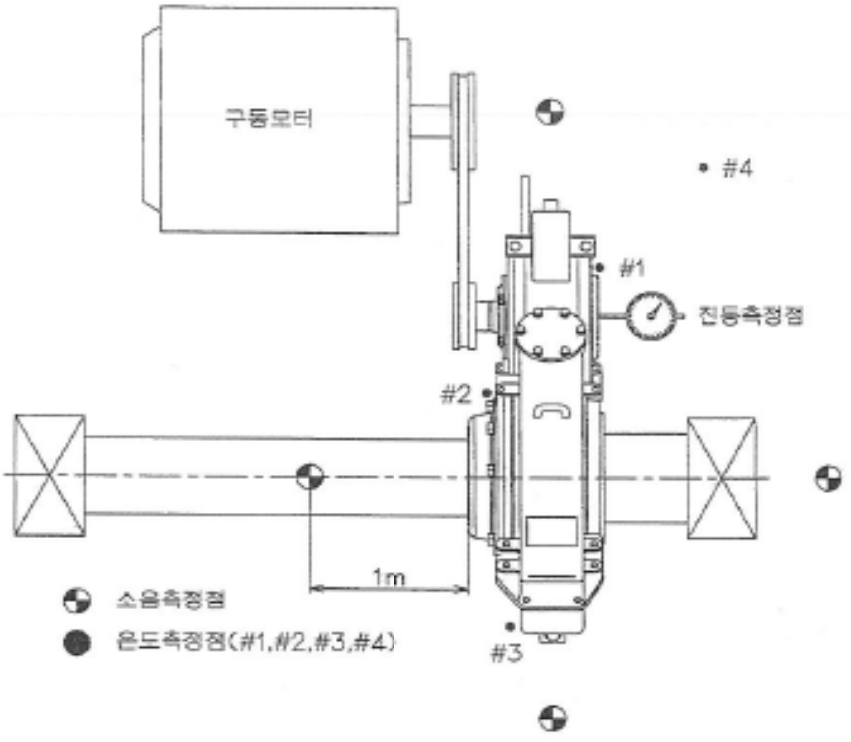
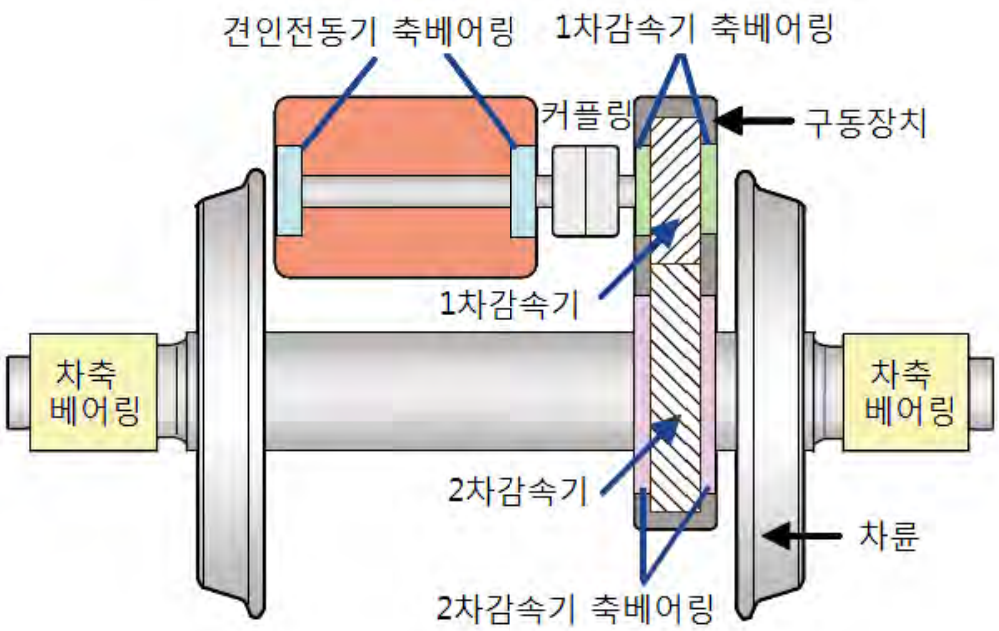



그림 2.2.46 감속기 온도 측정 위치

감속기 온도감시시스템의 온도 평가기준은 감속기 윤활유급에 의한 허용온도를 참조하여 윤활유의 최대허용온도를 95℃로 설정하였다. 현차 시험시 감속기 케이싱의 최대온도가 89℃(외기온도 42℃, 평균온도 65℃)로 측정되었으며 이에 따라 감속기 케이싱의 warning 온도는 주위온도+90℃로 설정하였다. 일본 RTRI의 실물 대차시험에서 400 km/h시 오일윤활방식의 열화온도는 150℃까지 상승할 것으로 추정된다고 보고하고 있지만, 그림 2.2.2와 그림 2.2.5에서와 같이 윤활유의 열화에 의한 기어마모와 손상에 영향을 미치는 온도는 90℃이상이므로 감속기 케이싱 Alarm온도는 그림 2.2.47과 같이 주위온도+100℃로 설정하였다. 또한 그림 2.2.48에 감속기 온도감시 시스템에 대한 교정 성적서를 나타낸다.




| | |
|---|---|
| 감속기 윤활유 최대허용온도 | 95℃ |
| 감속기 케이싱 Warning온도 | 주위온도 + 90℃ |
| 감속기 케이싱 Alarm온도 | 주위온도 + 100℃ |

그림 2.2.47 철도차량 베어링부 발열 위치와 감속기 온도 평가기준



# 교 정 성 적 서
## CALIBRATION CERTIFICATE

성 적 서 번 호 : 130422Y232
(Certificate No)
관 리 번 호 : BBZ1-Y02229
(Control No)

경기도 화성시 동탄면 영천로 133
Tel:031-379-5114, Fax:031-379-5115



1. 의 뢰 자 ( Client )
   기 관 명 ( Name ) : 한국철도기술연구원
   주 소 ( Address ) : 경기 의왕시 월암동 360-1
2. 측 정 기 ( Calibration Subject )
   기 기 명 ( Description ) : IC무선온도계
   제작회사 및 형식 ( Manufacture & Model Name ) : (주)주원 / JWIC2 - 4
   기기번호 ( Serial Number ) : JW130422
   (인정항목 : 50109 기타 온도계; 수정/반도체/광섬유 온도계 등 (Others; quartz, semiconductivity, optical fiber etc.))
3. 교정일자 ( Date of Calibration ) : 2013. 05. 02
4. 교정환경 ( Environment Conditions )
   온 도 (Temperature) : ( 23.1 ± 0.3 ) ℃ 습도(Humidity) : ( 51 ± 3 ) % R.H.
   교정장소 ( Location ) : ■ 고정표준실(Perm. Lab.) □ 이동교정(Mobile Lab.) □ 현장교정(On Site Calibration)
5. 측정표준의 소급성 ( Traceability )
   교정방법 및 소급성 서술 ( Calibration method and /or brief description )
   상기 기기는 저항식 온도계; 백금저항온도계, 측온저항체, 써미스터의 교정절차서(SICT-T100-50104)에 따라
   국가측정표준기관으로부터 측정의 소급성이 확보된 아래의 표준장비를 이용하여 교정되었음.

교정에 사용된 표준장비 명세 ( List of used standards/specifications )

| 기기명 Description | 제작회사 및 형식 Manufacture and Model | 기기번호 Serial Number | 차기교정예정일자 The due date of next Cal. | 교정기관 Calibration Lab. |
|---|---|---|---|---|
| TEMPERATURE & HUMIDITY CHAMBER | JEIO TECH / TH-GA-800 | R110344 | 2013. 11. 03 | SICT |
| PRTD | ISOTECH / 935-14-72 | 24202 | 2014. 01. 02 | SICT |
| PRECISION THERMOMETER | ASL / F200 | 20111214-001 | 2013. 06. 15 | SICT |

6. 교정결과 ( Calibration Results ) : 교정결과 참조 (Refer attached file)
7. 측정불확도 ( Measurement Uncertainty ) : 교정결과 참조 (Refer attached file)

| 확 인 (Affirmation) | 작성자 (Measurements performed by) | 승 인 자 (Approved by) |
|---|---|---|
| | 연락처 (Tel No.) : 031-379-5166 | 직 위 (Title) : 기술책임자(정) |
| | 성 명 (Name) : 김진득 | 성 명 (Name) : 김남호 |

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement) 에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야의 교정결과입니다.
( The above calibration certificate is the accredited calibration items by Korea Laboratory Accreditation Scheme, which signed the ILAC-MRA )

2013년 05월 03일

한국인정기구 인정
Accredited by KOLAS, Republic of Korea

교정기술원㈜ 대표이사 (인)
Institute of Calibration & Technology Co., Ltd.

(Note) If any significant instability or other adverse factor(overload,temperature,humidity etc.) manifests itself before, during or after calibration, it is likely to affect the validity of the calibration.

SICT-E110-K1-1

Institute of Calibration & Technology Co.,Ltd.

그림 2.2.48 감속기 온도감시 시스템 교정성적서

## 7. 소결론

본 연구는 1차 온도감시 시스템에서 발생하였던 무선송수신과 병렬방식포트의 문제점을 수정하여 2차 온도감시 시스템을 제작하여 운행 중인 고속철도차량 감속구동장치의 온도 변화를 실시간으로 모니터링하는 방법을 제안하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 온도 센서의 전원 공급형태의 개선 및 신호처리 회로의 개발을 통해 집적화된 시스템을 구축하였으며 이상 상태 온도 모니터링의 진단 알고리즘에 의하여, 다양한 환경조건과 운행 조건에서 감속기의 이상 상태를 고속으로 진단할 수 있는 시스템을 제작하였다.
2) 온도 진단 능력의 향상을 위하여 보다 실운행조건의 현차 시험을 실시하였으며 실물감속구동장치 시험기를 통해 시제작된 시스템의 성능을 비교 검증한 결과 신뢰성을 확보하였다.
3) 변화량 모니터링 기법들을 통해 감속기의 온도 변화를 분석함으로써 기능 이상 여부를 판단할 수 있으며, 일상 정비와 완전 분해점검시 유지보수의 효율성을 제공할 수 있다.
4) 개발된 감속구동장치 온도 모니터링 시스템을 이용하여 지속적인 데이터 축적 및 측정 데이터의 분석을 통해 이상 상태의 기준을 마련하였다.

# 제3절 감속기 손상에 따른 진동특성 평가

## 1. 감속기 진동 증가 요인 분석

고속철도용 감속기는 구동모터의 회전력을 차륜에 전달하는 장치이며, 차량을 주행시키기 위하여 고속회전을 해야 하는 차량의 핵심장치로서, 1차 감속장치(Motor Reduction Unit)와 2차 감속장치(Axle Gear Box Reduction Unit), 그리고 두 감속장치의 동력 전달 역할을 수행하는 동력전달축 (tripod joint shaft)으로 구성되어 있다. 차량 운행 시 감속구동장치에 가해지는 부하가 매우 크기 때문에 기어 및 베어링에 대한 안전성 및 내구성 등이 매우 중요하다.

고속차량용 감속기의 대표적 사고사례는 1차 감속기 중간기어 축 이탈, 기어 표면의 접촉 피로손상, 견인 모터 축 절손 등 감속기의 손상이 지속적으로 발생하면, 감속기뿐만 아니라 대차의 진동이 증가하여 결국에는 감속기에 의한 사고를 유발하기 때문에 이상진동이 발생하면 원인을 파악하여 해결해야만 한다. 이러한 진동가운데 감속기에 의한 진동은 크게 기어와 베어링으로 구분하여 기어의 마모, 파손, 치면손상, 조립 정밀도 불량 및 부품에 공진 등이며, 베어링에서는 베어링의 손상, 정렬 불량, 마모 및 이물질 혼입 등에 의해서 발생하게 된다.

### 가. 베어링의 진동 증가 요인

#### (1) 베어링의 고유진동수

베어링에서는 베어링이 내륜 혹은 외륜과 충돌에 의해서 진동이 발생한다. 이 진동은 충격성 진동이며, 이때 발생하는 주파수는 축의 각부의 고유진동수이다. 고유진동수의 값은 축의 부착상태에 따라서 영향을 받는다. 고유진동수로 가장 현저하게 나타나는 것은 외륜의 진동이지만, 내륜 혹은 외륜의 고유진동수는 이것들을 장방형의 원형으로 가정하여, 근사적으로 다음 식 (2.3.1)과 같이 구해진다.

$$f_n = \frac{n(n^2-1)}{2\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2\sqrt{n^2+1}}\sqrt{\frac{EIg}{\gamma A}}\ (Hz) \quad \text{----------} \quad (2.3.1)$$

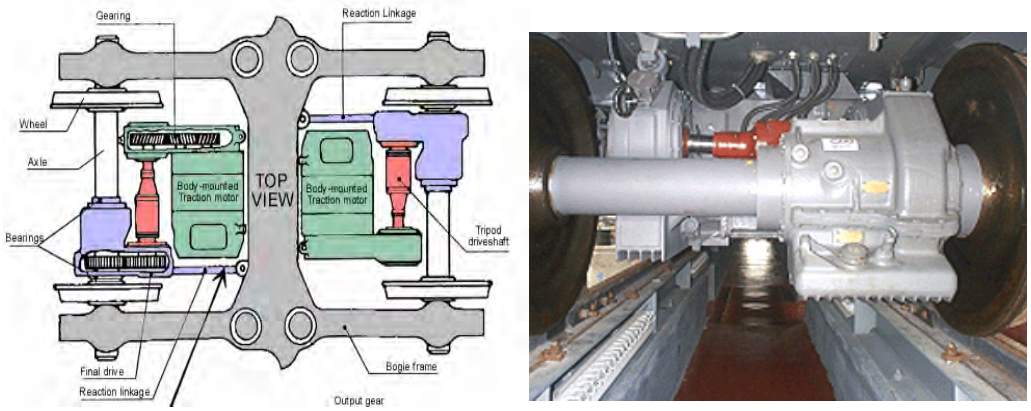



그림 2.3.1 고속철도차량 감속기 구조

여기서, $E$ : 재료의 종탄성계수[kgf/mm$^2$], $I$ : 원형의 중립축에 대한 단면 2차 모멘트[mm$^4$], $g$ : 중력 가속도, $\gamma$ : 재료의 비중량[kg$_f$/mm$^2$], $A$ : 원형 단면적, $D$ : 원형 중립축의 직경, $n$ : 절선(변형파)의 수를 나타낸다.

구름베어링의 재료로서 동($E=2.1\times10^4\,[kgf/mm^2], \gamma=7.86\times10^{-6}[kgf/mm^3]$)을 이용한 경우에는 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$\sqrt{\frac{EIg}{\gamma A}} \simeq 1.48\times10^6\times h\,[mm^2/s] \quad \text{----------} \quad (2.3.2)$$

여기서, $h$는 원의 두께[mm]를 나타내며, 식 (2.3.2)를 식 (2.3.1)에 적용하면 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$f_n = 9.40\times10^5\times\frac{h}{D^2}\times\frac{n(n^2-1)}{\sqrt{n^2+1}}\,(Hz) \quad \text{----------} \quad (2.3.3)$$

여러 값($h/D^2$)에 대한 내륜과 외륜의 고유진동수를 식 (2.3.3)에 나타내었다. 위의 식에 의해서 구해지는 고유진동수 값은 굽힘방향의 진동의 주파수로서, 베어링에는 내외륜의 반경방향, 비틀림방향의 고유진동수, 베어링의 고유진동수도 존재한다.

(2) 베어링의 구조에 의해서 기인되는 진동

베어링에 일정의 부하가 걸리는 경우, 회전축 중심(축심)은 그림 2.3.2 ~ 2.3.4와 같이 베어링의 위치에 의해서 변동한다. 이것은 부하에 의해서 내외륜과 베어링이 탄성변형하기 때문이며, 이러한 축의 중심의 변동에 의해서 진동이 발생한다. 이경우의 진동을 베어링의 통과 진동이라고 부른다. 베어링의 통과주파수는 베어링의 공전에 의해서 발생하기 때문에 이 진동의 주요한 주파수 성분은 $zf_c$($z$ : 베어링 수, $f_c$ : 베어링 주파수)이다. 또한, 그림 2.3.2와 같이 베어링의 직경이 언밸런스일 경우, 1개의 베어링의 직경이 다른 베어링보다 클 경우에는 베어링의 공전주기 $f_c$에 의해서 축 중심이 변동하거나, $f_c$에서 축방향의 강성에 차가 발생하기 때문에 $f_c$ 혹은 $nf_c \pm f_o$의 2종류의 주파수성분을 포함한 진동이 발생한다. 이러한 진동의 주파수 성분은 일반적으로 1 kHz이하로서 고유진동수와 같이 높은 주파수성분이 아니다.

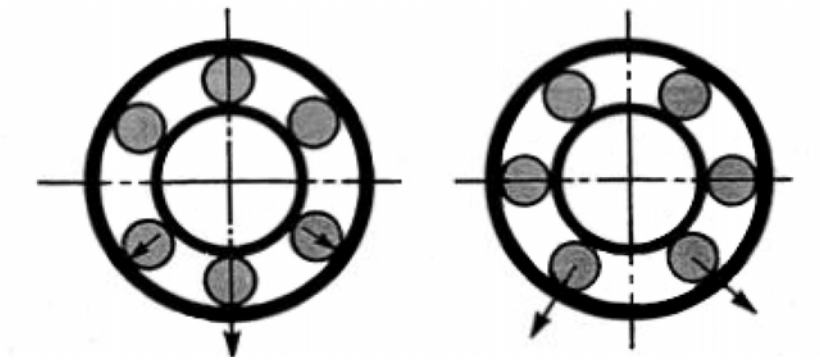


그림 2.3.2 베어링의 부하상태와 베어링의 위치

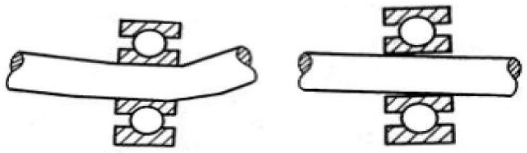


그림 2.3.3 베어링과 축의 상태

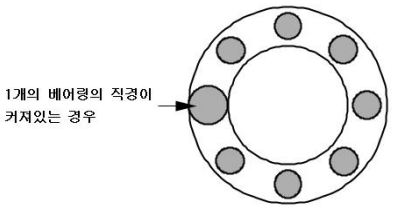



그림 2.3.4 베어링의 불량

(3) 베어링의 비선형에 의한 진동

베어링은 궤도륜과 베어링의 탄성접촉에 의해서 하중을 받기 때문에, 스프링과 같은 성질을 갖고 있다. 이 스프링은 상당히 강성이 높고, 축과의 윤활상태가 나빠지면 비선형 스프링의 성질을 나타내며, 이것 때문에 진동이 발생한다. 예를 들면, 그리스의 윤활성능이 나빠지는 경우에는 축방향의 스프링특성에 그림 2.3.5와 같은 비선형성이 발생, 트러스트방향에 이상 진동을 발생시킬 수 있다. 이경우의 주파수는 축의 회전주파수($f_o$) 및 그의 조화성분($2f_o$, $3f_o$, ..., $1/2f_o$, $1/3f_o$....)으로 나타난다.

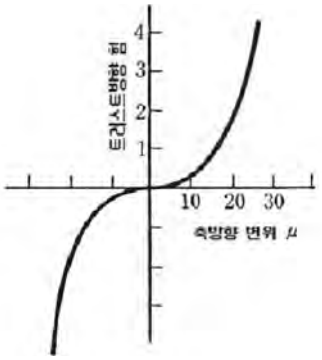



그림 2.3.5 베어링의 비선형 스프링 특성

(4) 베어링 표면 굴곡에 의한 진동

그림 2.3.6과 같이 베어링 제작 시 궤도륜 혹은 베어링 표면에 굴곡이 발생하면, 굴곡의 피크 수가 어느 정도 수가 되면 특유의 진동이 발생한다. 이 진동의 발생조건(굴곡의 피크 수)과 발생하는 주파수를 표 2.3.1에 나타내고 있다. 이 표는 Gastafson에 의해서 증명되었으며, 굴곡의 형태에 따라서 표에 나타낸 주파수이외의 진동이 발생할 수 있는 가능성도 있다. 또한 이 표는 반경방향에 틈새가 있는 베어링에 이 방향에 하중이 걸리면 적용할 수 없는 경우도 많다. 표면의 굴곡에 의한 진동은 삑삑거리는 음으로 들린다.

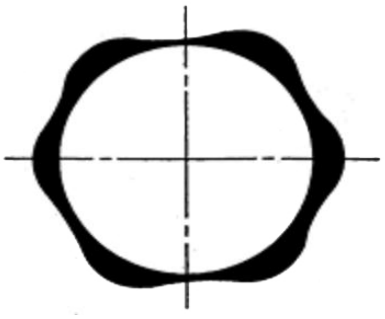


그림 2.3.6 베어링 표면의 굴국

표 2.3.1 면의 굴곡에 의한 진동

| 굴 곡 | 굴곡의 피크 수 | 발생하는 주파수 |
|---|---|---|
| 내 륜 | $nz \pm 1$ | $nzf_i \pm f_o$ |
| 외 륜 | $nz \pm 1$ | $nzf_c$ |
| 베어링 | $2n$ | $2nzf_b \pm f_c$ |

(5) 베어링 손상에 의한 진동

베어링에 이상이 발생하면 그림 2.3.7과 같이 충격진동이 발생한다. 이 진동의 주파수는 축의 고유진동수와 그의 고주파성분이지만, 베어링을 진단하는 경우에 이것뿐만 아니라, 베어링의 회전(공전, 자전)에 의해서 발생하는 주파수도 필요하다.

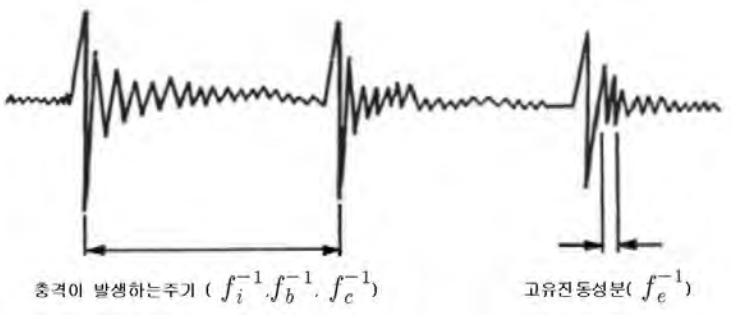



그림 2.3.7 베어링에 발생하는 충격진동

(6) 축에 편심이 있는 경우의 진동

그림 2.3.8과 같이 축에 편심이 있는 경우 예를 들면 내륜에 마모가 있는 경우에는 축심(내륜 중심)o' 는 외륜 중심 o를 중심으로 회전하면서 진동한다. 이때 발생하는 진동의 형태는 그림 2.3.9와 같다. 진동의 주파수는 $nf_o$($f_o$:회전주파수 $n$=1,2,3...)이다. 여기서 $n$은 축 1회전당 진동이 굴곡의 피크 수에 상당하고, 커다란 $n$의 값의 주파수까지 존재하는 경우에는 축에 중대한 이상이 발생한 것으로 생각할 수 있다.

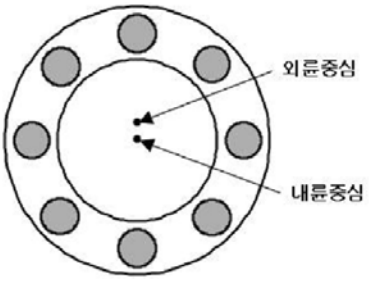



그림 2.3.8 축에 편심이 있는 경우




그림 2.3.9 베어링 편심에 의한 진동파형

(7) 내륜에 스팟 손상이 있는 경우의 진동

축에는 통상 반경방향에 틈새가 존재하기 때문에 스팟 손상이 있는 베어링과 충격하는 위치에 따라서 진동의 진폭에 변화가 발생하며 회전주파수 혹은 베어링의 공전 주파수에서 진폭변조가 생기는 경우가 많다. 그림 2.3.10에 나타낸 것과 같이 flaking, 깨짐, 압흔과 같은 스팟이 내륜에 발생한 경우에는 그림 2.3.11과 같은 진동이 발생한다.

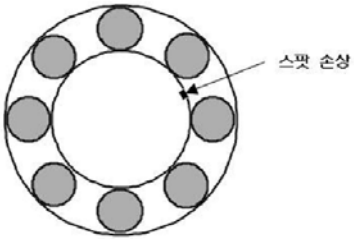



그림 2.3.10 내륜에 스팟 손상이 있는 경우

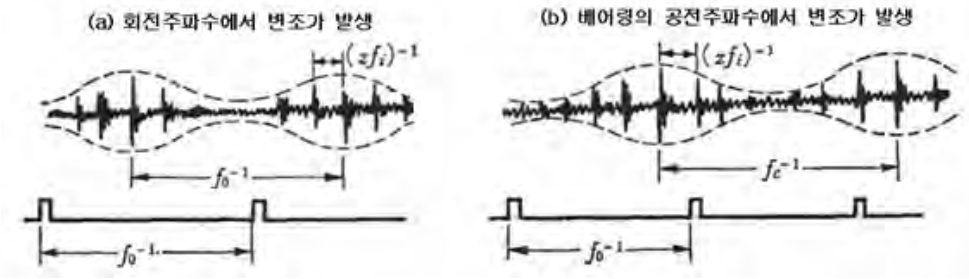



그림 2.3.11 내륜에 스팟 손상이 있는 경우 발생진동특성

표 2.3.2 내륜의 스팟 손상이 있는 경우의 발생주파수

| | 발생주파수 |
|---|---|
| 일반적인 반경방향 틈새가 있는 경우 | $nzf_i \pm f_o, nzf_i \pm f_c$ |
| 틈새가 없고, 내륜과 베어링이 항상 동일하게 접촉하는 경우 | $nzf_i$ |

(8) 외륜에 스팟 손상이 있는 경우의 진동

그림 2.3.12 (a)와 같이 외륜에 스팟 손상이 발생하는 경우에는 그림 2.3.12 (b)와 같은 진동이 발생한다. 그리고 그의 해당하는 주파수는 외륜의 1점이 베어링과 접촉하는 기본주파수($f_c$)와 베어링의 수($z$)의 비($zf_c$) 및 그의 고주파 성분 $nzf_c$으로 나타난다. 외륜에 결함이 있는 경우에는 결함의 위치와 하중방향과의 위치관계가 항상 일정하기 때문에 진폭변조가 없다.

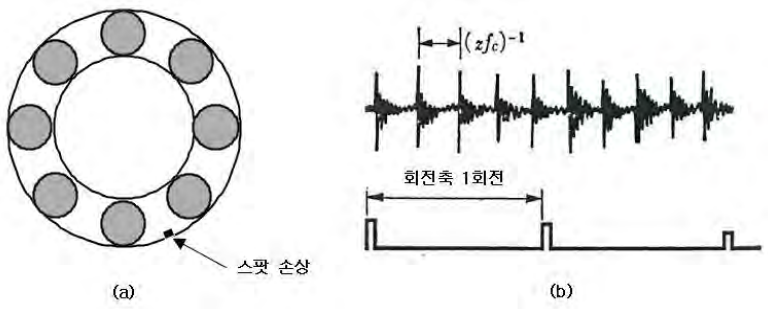



그림 2.3.12 외륜에 스팟 손상이 있는 경우의 진동 및 파형

(9) 베어링에 스팟 손상이 있는 경우의 진동

베어링에 스팟 손상이 있는 경우의 진동 및 그의 고주파수 성분은 그림 2.3.13과 같다. 이 경우에도 내륙과 동일하게 축에는 통상 레디알 틈새가 존재하기 때문에 스팟 손상이 있는 베어링과 충격하는 위치에 따라서, 진동의 진폭에 변화가 발생하며, 베어링의 공전 주파수에서 진폭변조가 생긴다.

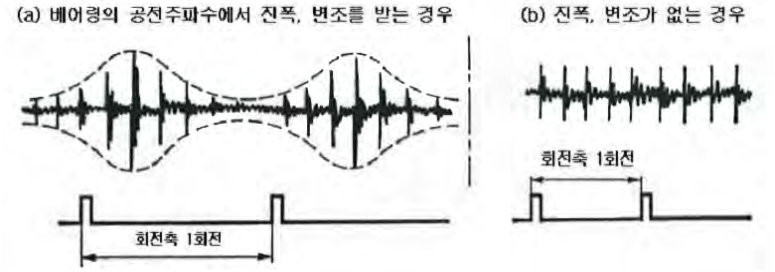



그림 2.3.13 베어링에 스팟 손상이 있는 경우 발생 진동특성

표 2.3.3 베어링에 스팟 손상이 있는 경우

| | 발생 주파수 |
|---|---|
| 일반적인 반경방향 틈새가 있는 경우 | $2nf_b \pm f_c$ |
| 틈새가 없고, 내륜과 베어링이 항상 동일하게 접촉하는 경우 | $2nf_b$ |

(10) 베어링 손상에 의한 진동 주파수 (링킹주파수와 통과주파수)

일반적으로 베어링은 그림 2.3.14(a)와 같이 내륜, 외륜, 베어링, 가이드장치 및 실외에도 작은 부품으로 구성되어있다. 이러한 부품의 결함이 생기면 베어링과 결함이 주기적으로 충돌하기 때문에 외륜의 고유진동수에 가까운 주파수의 충격펄스를 발생시킨다. 축 내부에 국부결함(스팟 손상)이 존재하면 국부결함과 베어링이 충돌해서 그림 2.3.14(b)와 같은 감쇠충격진동이 발생한다. 이러한 진동의 주파수는 축의 외륜을 원통으로 가정할 때의 고유진동수로서 링킹주파수($f_r$)라고 부른다. 링킹주파수는 외륜의 제원으로부터 계산할 수 있다. 축에 결함이 생길 경우 가장 민감하게 응답하는 것은 링킹주파수 부근의 주파수성분이다. 따라서 진단을 하기 위해서는 링킹주파수의 근사값을 모노그램으로 파악하여 밴드패스필터로 그 성분을 검출한다. 통과주파수($f_p$)는 각부품의 접촉주

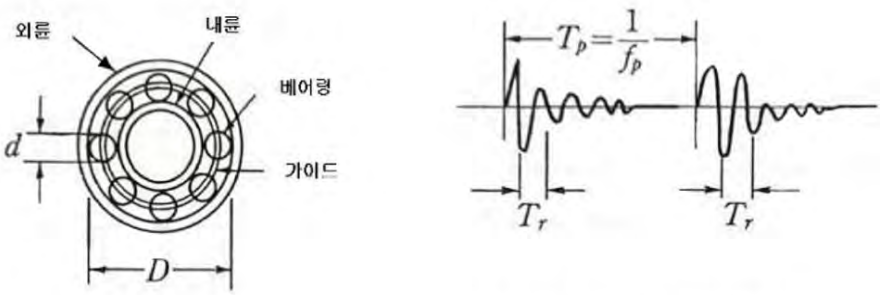
파수 $f_i$, $f_c$, $f_b$에 베어링에 개수 $Z$를 곱하면, 다음과 같이 구할 수 있다.

- 내륜에 손상이 있는 경우

$$f_{in} = Z \times \frac{1}{2} f_o \left(1 + \frac{d}{D} cos\alpha\right)(Hz) \quad \text{----------} (2.3.4)$$

- 외륜에 손상이 있는 경우

$$f_{out} = Z \times \frac{1}{2} f_o \left(1 - \frac{d}{D} cos\alpha\right)(Hz) \quad \text{----------} (2.3.5)$$




(a) 베어링의 구조 (b) 링킹 주파수와 통과주파수

그림 2.3.14 베어링의 구조와 링킹응답파형

- 회전체(베어링)에 손상이 있는 경우

$$f_b = f_o \times \frac{D}{d}\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2\alpha\right](Hz) \quad \text{----------} (2.3.6)$$

- 가이드 장치에 손상이 있는 경우

$$f_c = \frac{f_o}{2}\left[1 - \frac{d}{D} cos\alpha\right](Hz) \quad \text{----------} (2.3.7)$$

여기서, $f_o$ :축(내륜)의 회전주파수, $D$ : 베어링의 피치원직경, $Z$ : 베어링의 수, $d$ : 베어링의 베어링직경, $\alpha$ : 접촉각을 나타낸다. 통과 주파수의 계산은 컴퓨터로 계산해서 진단 시 검색해서 사용하면 된다. 만약 $D$, $d$ 등과 같은 제원을 알지 못하는 경우에는 다음과 같은 근사식을 이용할 수 있다.

- 내륜 결함의 통과 주파수

$$f_{in} = 0.6 Z f_o \quad \text{----------} (2.3.8)$$

– 외륜 결함의 통과 주파수

$$f_{out} = 0.42 Z f_o \quad \text{----------(2.3.9)}$$

– 베어링 결함의 통과 주파수

$$f_b = (4 \sim 6) f_o \quad \text{----------(2.3.10)}$$

– 가이드 장치 결함의 통과 주파수

$$f_c = 0.4 f_o \quad \text{----------(2.3.11)}$$

축 내륜에 결함이 있을 경우 축의 1회전에 충격 펄스가 $0.6 \times Z$개 발생하며 외륜에 결함이 있을 경우 축의 1회전에 충격 펄스가 $0.4 \times Z$개 발생한다. 1개의 베어링에 결함이 있는 경우 베어링의 개수에 무관계하며, 항상 4~6개의 충격 펄스가 발생한다. 또한, 가이드 장치에 결함이 있으면 축의 1회전에 진폭이 증감한다. 축의 1회전에 발생하는 충격진동의 개수로부터 결함이 존재하는 위치를 추정할 수 있다. 그림 2.3.15는 베어링의 결함에 따른 진동 증가 형태를 나타내고 있다.

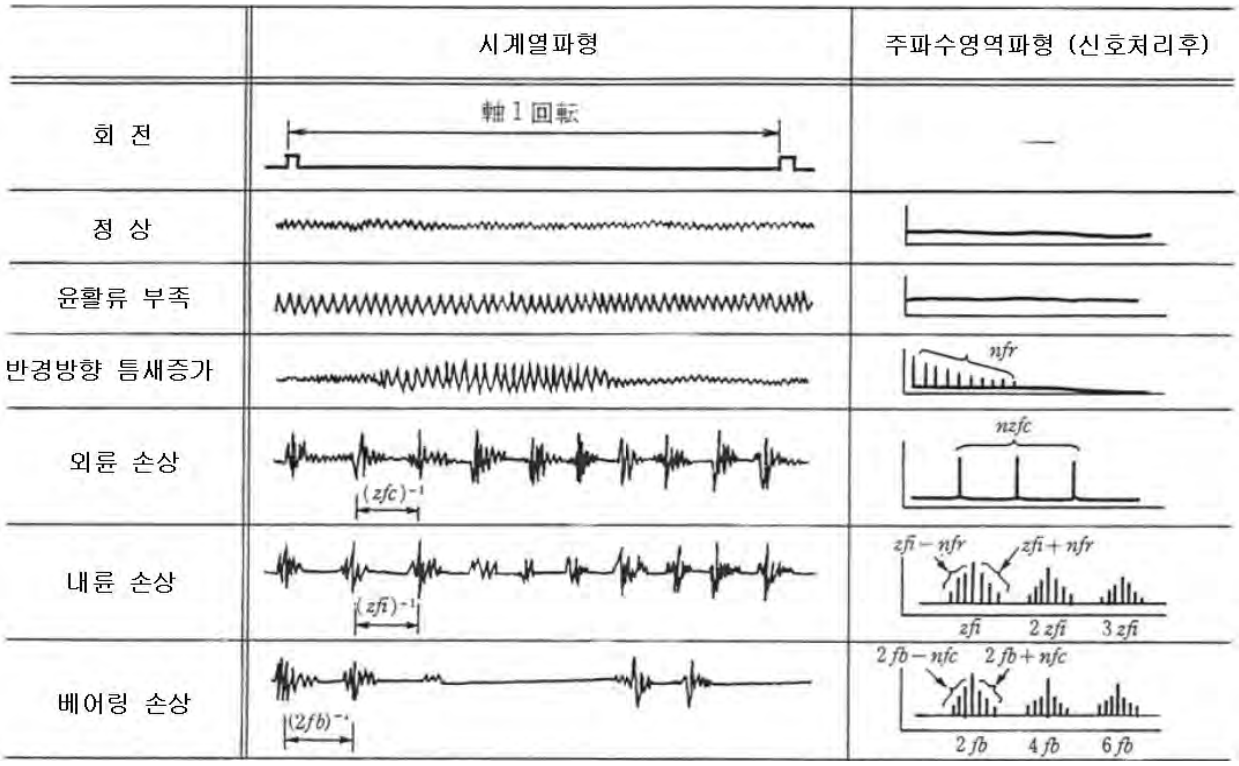



그림 2.3.15 베어링 이상상태의 진동파형 및 스펙트럼

나. 기어의 진동증가 요인

(1) 기어에 발생하는 진동의 원리

기어는 힘을 전달하는 기계요소로 치면에는 전달력이 가해진다. 치면에 이러한 전달력이 가해지면 톱니를 일종의 외팔보로 고려할 수 있기 때문에, 마이크로단위로 처짐이 발생한다. 그림 2.3.16은 기어의 이러한 원리를 나타내고 있다. 톱니의 처짐량 $\delta$는 굽힘, 전단, 반경방향의 압력에 의해서 치면법선 방향의 처짐을 $\delta_1$, 톱니의 기저부의 처짐을 $\delta_2$라고 하면, 다음 식으로 표시된다.

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad \text{----------} \quad (2.3.12)$$

또한 각각의 기어에는 $\delta$이외에 기어 상호간의 접촉에 의해서 발생하는 접촉응력에 의한 $\delta_c$도 발생한다.

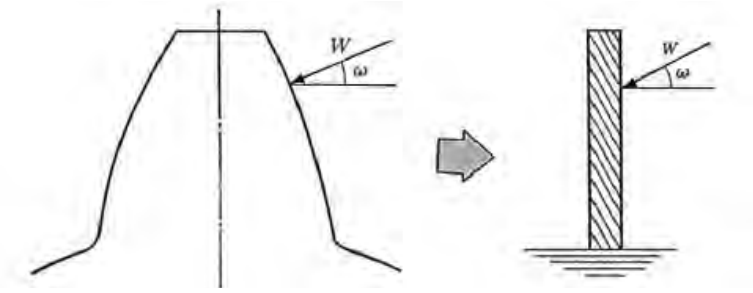



그림 2.3.16 기어의 톱니에 전달되는 힘

기어를 자세히 관찰하면, 어느 순간에서 1쌍의 톱니가 맞물리는 경우도 있고, 2쌍의 기어가 맞물리는 경우도 있다. 1개의 기어 전체에 가해지는 전달력이 항상 일정하다면, 1쌍의 톱니에 전달되는 힘을 생각하는 경우, 힘이 1이 가해질 때도 있고, 1/2의 힘이 가해지는 경우도 있다. 따라서, 위의 모든 처짐을 고려한 전체 처짐량도 이것과 함께 변화한다. 이러한 것은 기어 전체의 스프링 상수가 변화하는 것으로 생각할 수 있다. 이처럼 기어 회전중의 1쌍에 가해지는 전달력은 주기적으로 변화하며, 또한 그의 변화는 충격적이기 때문에 톱니가 진동을 발생한다. 이때 발생하는 진동(감쇠 있음)은 자유진동으로, 기어에 발생하는 진동의 기본원리이다.

(2) 기어의 고유진동수에 의한 진동증가

기어의 맞물림에 의해서 발생하는 진동은 충격적인 톱니의 자유진동이다. 실제 진동은 감쇠를 갖는 진동이지만 여기서는 간단하게 감쇠가 없는 톱니의 고유진동에 대해서 생각해 보자. 고유진동은 기어의 정상, 이상에 상관없이 발생하지만 발생 형태에 따라 기어의 진단이 가능하기 때문에 고유진동의 주파수를 파악하는 것이 기어의 진동 증가 시 이상유무 진단에서 필수적이다. 고유진동수를 구하는 방법은 여러 가지가 있지만, 1쌍의 기어의 고유진동수 $f_e$는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_e = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{m}} \quad \text{----------} \quad (2.3.13)$$

여기서, $m$과 $K$는 기어의 등가질량, 스프링정수이며, 기어(톱니)의 고유진동수 1~10 kHz까지

높은 주파수 성분이 많지만 그 진동은 기어박스 등에 전달되면서 감쇠되어, 기어의 맞물림 주파수 성분만 측정되는 경우가 많다.

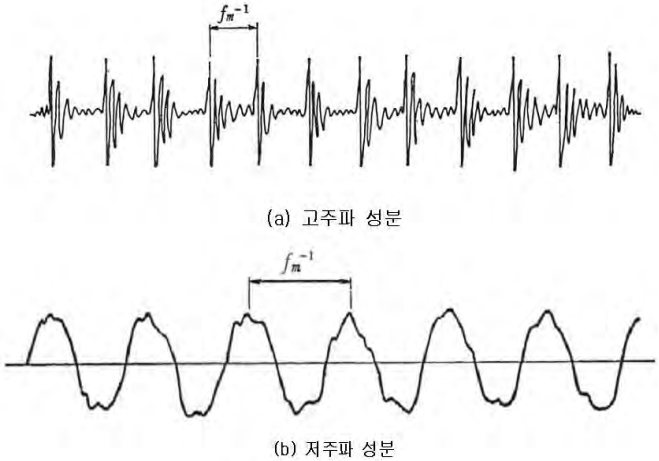
(3) 기어 이상에 의한 진동

기어에는 결함 유무에 관계없이 톱니가 맞물리면서 충격적인 진동이 발생한다. 그러나 기어의 상태에 따라 그 충격의 크기가 변화하기 때문에 이 변화를 감지하면 기어에 발생하는 이상의 원인을 조사할 수 있다. 톱니가 기어주위에 걸쳐서 균등하게 마모하여 백래쉬가 증가하기도 하고, 편심, 단면의 스크링, 피칭, 스포링 등의 손상이 발생하면 그림 2.3.17 (a)와 같이 기어 맞물림에 의한 충격진동의 진폭(고유진동성분)이 타 진동성분에 비교해서 매우 커진다. 그리고 충격진동의 폭은 거의 동일한 레벨을 나타낸다. 이때 발생하는 충격진동의 주파수는 1 kHz이상의 고주파성분이다. 또한 이것과 함께 정현파적인 저주파 성분인 맞물림 주파수성분도 커진다. 그리고 마모가 진행함에 따라 톱니의 강성(스프링 상수)에 비선형적인 특징이 나타나 그림 2.3.17 (b)와 같이 변화하여 진동파형의 주파수 성분으로 맞물림 성분의 2배, 3배, ... 고주파 성분, 혹은 1/2배, 1/3배, ...성분이 발생하기도 한다. 더욱이 기어의 가감속 시에는 그림 2.3.18과 같은 비선형 진동의 특징인 도약현상이 발생하기도 한다.

기어에 편심 혹은 피치오차가 있는 경우 고주파 영역의 진동파형은 그림 2.3.19와 같이 맞물림 충격진동의 진폭이 편심 혹은 피치오차가 있는 기어의 회전주파수에 따라 변조를 받은 파형이 된다. 따라서 고주파 진동의 절대치 처리파형에서는 회전주파수의 1차($f_o$)와 고주파 성분($nf_o$), 및 맞물림 주파수($f_z$)성분과 그의 측대역 주파수($f_z \pm nf_o$)이 포함된다. 이러한 현상은 저주파영역에 대한 맞물림 주파수성분에 대해서도 동일하며, 진동의 파형에 회전주파수성분, 맞물림 주파수성분 및 그의 측대역 주파수가 포함된다.

기어축에 미스얼라이먼트가 있는 경우에는 저주파와 고주파영역에서 맞물림 주파수성분, 및 그의 측대역 주파수가 발생한다. 그림 2.3.20은 저주파영역에 대한 진동파형을 나타내고 있다.

기어 톱니 절손, 국부적인 기어마모 등 국부적인 이상이 있는 경우에는 그림 2.3.21과 같이 고주파영역에서 진동이 발생한다. 이와 같이 기어에서는 저주파성분, 고주파성분의 진동이 발생하여 기어가 이상이 생기면, 저주파 혹은 고주파영역에 변화가 나타난다.




(a) 고주파 성분

(b) 저주파 성분

그림 2.3.17 기어 마모현상에 의한 진동

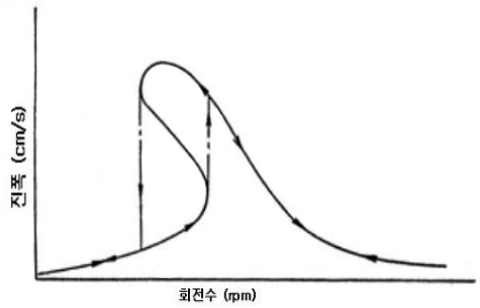



그림 2.3.18 진동의 도약현상



그림 2.3.19 편심, 피치오차가 있는 기어에서 발생하는 진동

표 2.3.4 편심, 피치오차가 있는 기어에서 발생하는 주파수

| 발생 주파수 | 내 용 |
|---|---|
| $f_z \pm nf_0$ (파형처리후) | 맞물림 주파수성분이 편심 혹은 피치오차가 있는 기어의 회전주파수에 의한 변조를 받는다. |
| $f_0$ (파형처리후) | 피치오차가 있는 회전가속도에 변화가 발생하여 기어를 두드리는 것 같은 현상이 발생한다. |

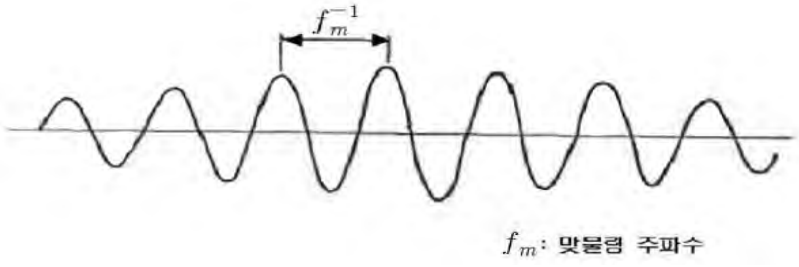



그림 2.3.20 기어축에 미스얼라이먼트가 발생하는 경우의 진동

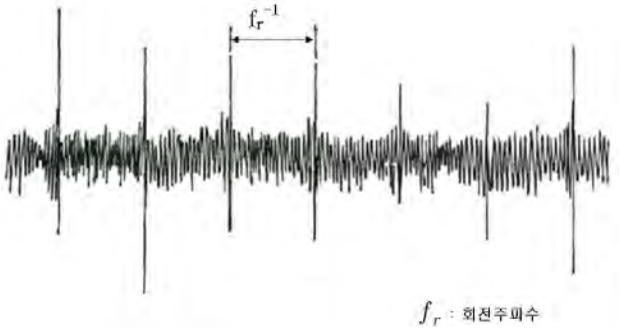



그림 2.3.21 국부 이상인 기어에서 발생하는 진동

(4) 고속회전기어에서 발생하는 진동

고속터빈 등에 이용되는 증속기중의 기어는 맞물림 주파수성분이 5 kHz 혹은 그 이상의 매우 높은 주파수영역에서 나타나며, 경우에 따라서는 톱니의 고유진동수보다 높은 것도 있다. 일반적으로 회전수의 기어에서 발생하는 진동에는 표 2.3.5와 같이 충격적인 고유진동수 성분과 정현파적인 맞물림 주파수성분이 섞여서 나타난다. 그러나 맞물림 주파수가 톱니의 고유진동수보다 높은 경우에는 고유진동수 성분은 존재하지 않고 맞물림 주파수성분만 발생한다. 따라서 발생하는 진동의 주파수 영역으로서는 고주파 영역이지만 진동은 충격적이지 않고 부드러운 맞물림 주파수의 정현파적인 진동이다. 고속회전기어에 이상이 생기면 진동파형의 변화는 일반적으로 회전기어의 저주파 영역에 대한 파형의 변화도 동일한 형태를 나타낸다.

표 2.3.5 고속회전기어에서 발생하는 진동

| | 진동파형 | 내 용 |
|---|---|---|
| $f_m \leq f_e$ |  | 고유진동수 성분과 맞물림 주파수가 섞여서 발생 |
| $f_m \geq f_e$ |  | 고유진동수 성분은 존재하지 않음 |

$f_m$ : 맞물림 주파수, $f_e$ : 맞물림 주파수

(5) 기어 결함에 의한 진동 주파수 성분

기어장치의 진동은 맞물림 주파수 부근의 저주파수 영역의 진동과 기어의 톱니의 고유진동수 부근의 고주파수 영역의 진동으로 나타난다. 기어 결함 시 저주파영역에서는 회전주파수 $f_r$ 및 그의 고조파 성분 $nf_r$과 맞물림 주파수 $Zf_r$ 및 그의 고조파 성분 $nZf_r$과 사이드밴드 $Zf_r + nf_r$의 변화로 나타난다. 표 2.3.6에 기어의 결함과 주파수성분의 관계를 나타내고 있다.

고주파영역에서는 기어 톱니의 고유진동수 $f_e$에서 진폭이 증가하기 때문에 이 주파수를 중심주파수로 밴드패스필터에 통과시켜 분석한다. 아래 그림 2.3.22는 기어 결함에 대한 진동특성의 관계를 나타내고 있다.

표 2.3.6 이상 시 기어진동의 특징

| 결 함 | 발생 주파수 | 평균응답결과 |
|---|---|---|
| 기어의 전체적 마모, 치형오차 | $f_m$ | 기어의 맞물림 주파수성분이 커진다. |
| 기어의 피치오차, 편심 | $nf_r$ 및 $f_m \pm nf_r$ | 이상기어의 회전에 의한 맞물림 주파수 성분이 진폭변조를 받는다. |
| 기어의 국부적이상에 의한 충격 | $nf_r$ | 기어 이상 맞물림 부분만 진폭이 커진다. |

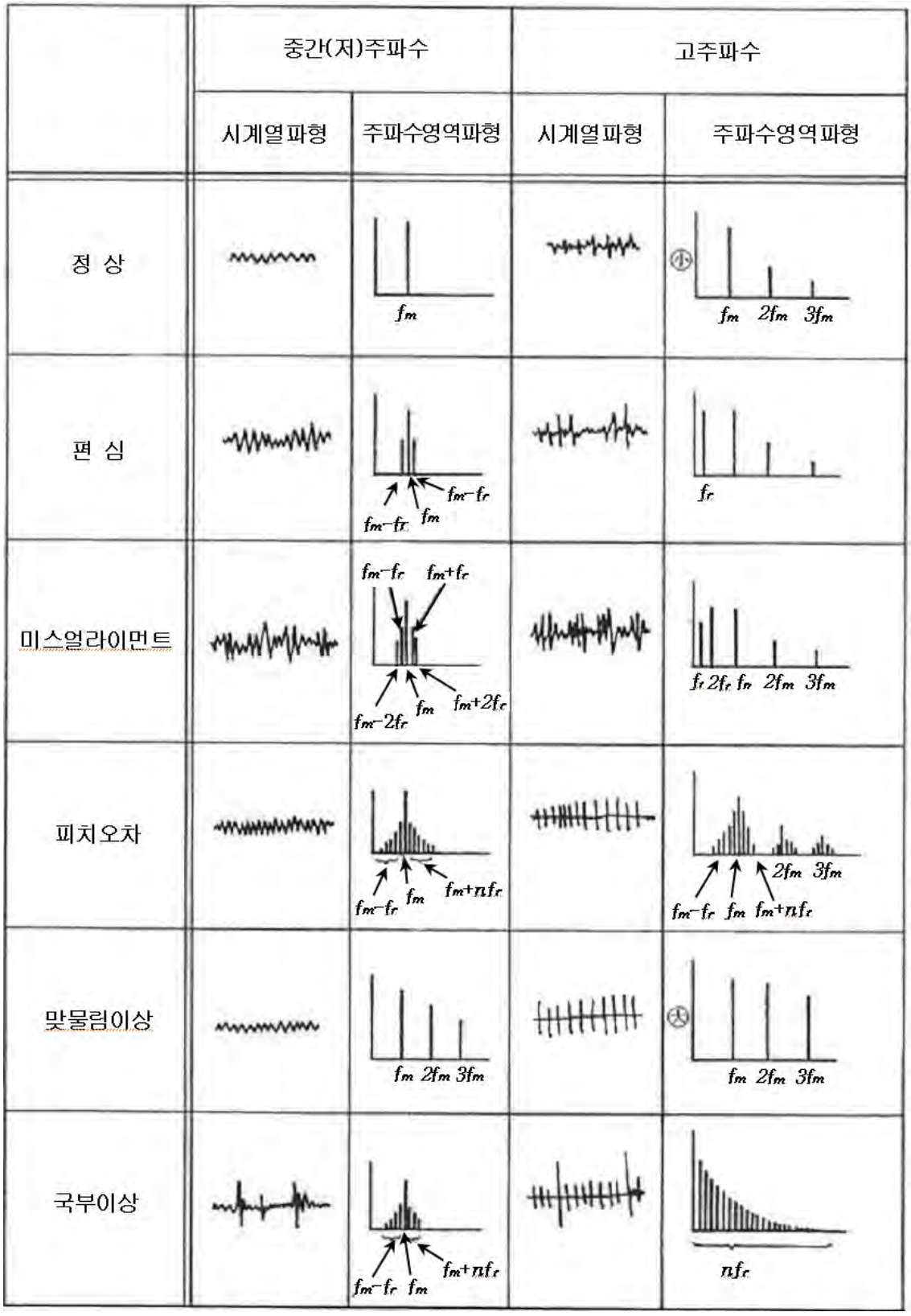



그림 2.3.22 기어장치의 이상상태와 진동특성의 관계

## 2. 기어 시편 손상 모드 진동특성 시험 및 분석

### 가. 기어 시편 시험기 구축

감속기의 이상상태에 대한 진동의 영향을 분석하기 위해서는 손상된 감속기를 장착하여 실물시험을 통하여 측정하여야 한다. 그러나 실제 운행 차량에 손상된 감속기를 장착하여 운행하는 것은 불가능하기 때문에 시험편 시험기를 이용하여 이를 평가하고자 한다.

기어 시험편 시험을 위해서는 시험기가 구축되어야 한다. 이를 위하여 연구원에 보유하고 있는 마모시험기를 개조하여 기어 시험편 시험기를 구축하였다. 기어 시험을 위해서는 시험편에 토크를 부과하여야 하며, 시험편 장착을 위한 지그가 필요하다. 그림 2.3.23은 기어 시험기의 개략도를 보여주고 있으며 토크제어를 위하여 두 개의 모터가 장착되어 있고, 기어 간의 간격을 유지하도록 되어 있다. 토크를 시험편에 부가하기 위하여 한쪽 모터에서는 토크 제어를 하도록 하였고, 다른 한쪽 모터는 속도(rpm) 제어를 하도록 프로그램을 구축하였다. 그림 2.3.24는 기어 시험기 외관 및 기어시험기 제어를 위한 프로그램을 보여주고 있다.

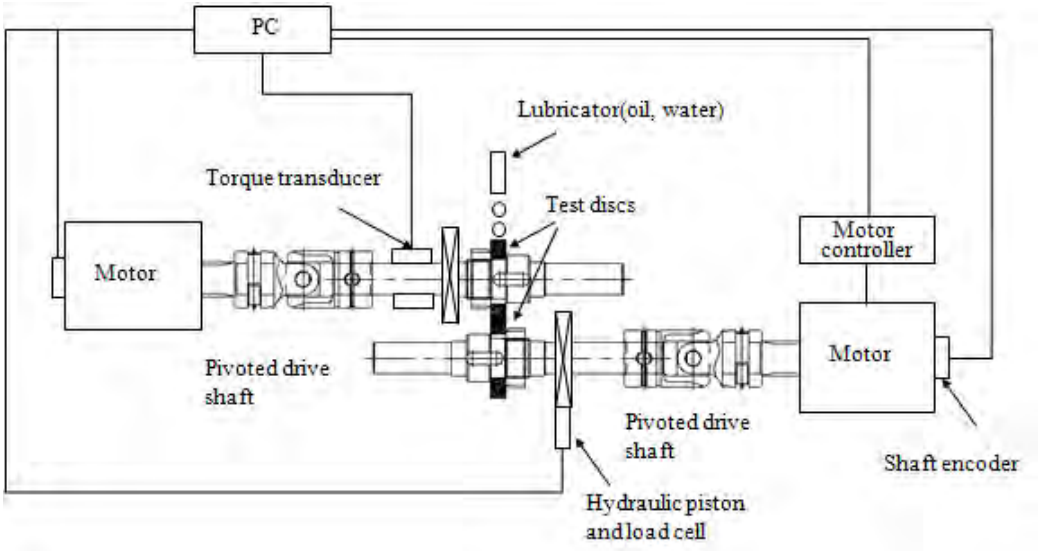



그림 2.3.23 시편 시험기 개략도

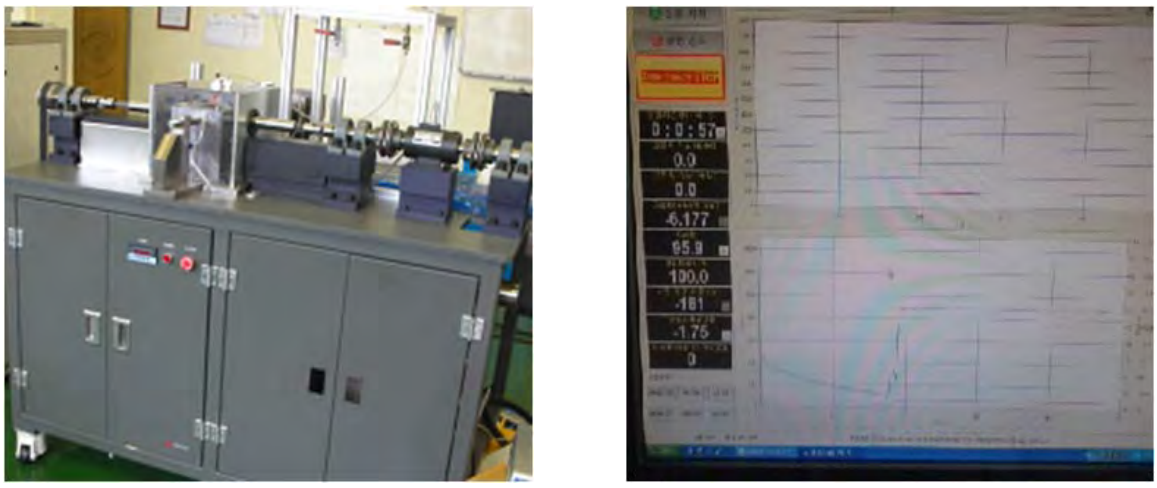


그림 2.3.24 시험기 외관 및 프로그램

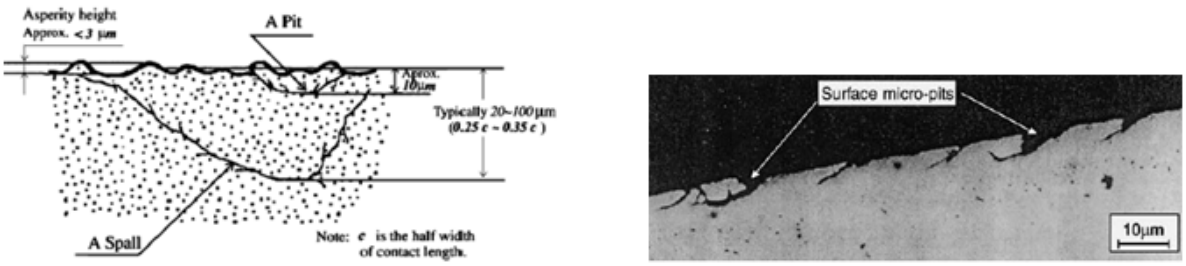



그림 2.3.25 표면 피로에 의한 피팅 및 스폴링

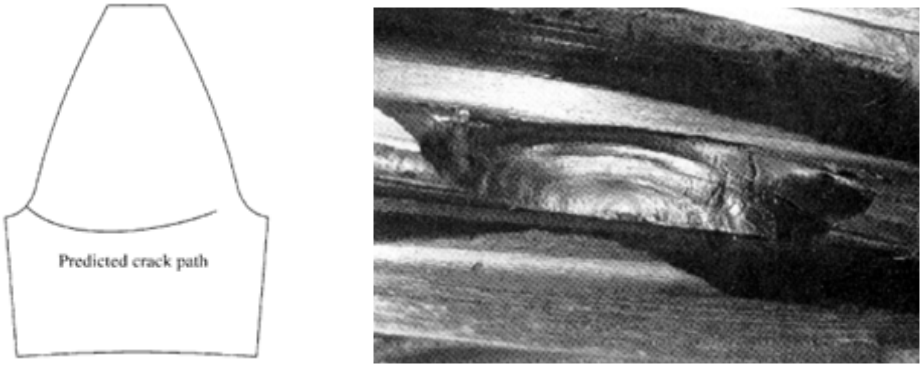



그림 2.3.26 굽힘 피로에 의한 기어 파손

나. 예비 시험

(1) 시험조건

감속기 기어의 파손사례 및 메카니즘 분석으로부터 가장 손상이 많이 발생하고 치명적인 상태 2가지를 선정하였다. 첫 번째가 반복적인 접촉하중에 의해서 기어 이의 표면에서 발생하는 피팅 및 스폴링이고, 두 번째가 굽힘피로에서 의한 기어 이의 파손이다. 이러한 2가지 조건에 대하여 시험을 실시하여 진동 변화를 조사하였다.

(2) 기어 시험편 및 시험방법

기어 시험기를 이용하여 시험을 실시하기 위하여 시험편을 제작하였다. 기어 시험기의 토크 용량과 시험기 장착을 위한 지그를 고려하여 그림 2.3.27과 같이 2 가지 종류의 기어 시험편을 제작하였다. 첫 번째로 모듈 1.5인 시험편을 이용하여 시험을 실시하였으나 접촉 표면이 너무 작아 손상 관찰이 어렵기 때문에, 두 번째인 모듈 3, 잇수 23의 기어시험편을 이용하여 시험을 실시하였다. 그림 2.3.28은 기어 시험기에 시험편을 장착한 모습을 보여주고 있으며, 기어축 윗면에 진동센서를 각각 1개씩 설치하였다. 그림 2.3.29는 시험 중 진동신호를 획득하기 위한 DAQ 장비이다.

피팅 및 스폴링에 대한 시험방법은 정상적인 시험편을 시험기에 장착 후, 주기적으로 시험편을 관찰하고 기어 이의 상태에 따라서 진동신호를 측정하였다. 굽힘 피로에 의한 기어 파손을 위한 시험은 하나의 기어 이에 인공적인 균열을 삽입하여 시험 중에 기어 이가 파손이 되도록 하였으며, 이때는 연속적으로 진동신호를 측정하였다. 이때 시험속도는 500 rpm이고 토크는 5 $kg_f \cdot m$ 이다. 측정된 진동신호는 주파수 분석 및 진동신호 크기 평가를 위한 RMS 등 방법을 이용하여 분석하여, 각각의 상태에서의 신호를 비교하였다.



그림 2.3.27 기어 시험편



그림 3.2.28 기어시험편 장착모습 및 진동센서



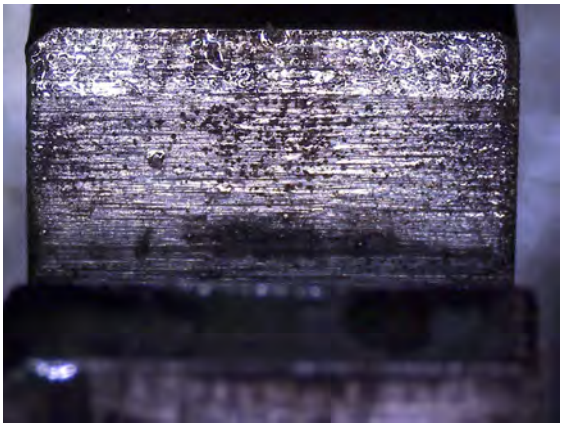
그림 2.3.29 진동신호 획득을 위한 시험장비

(3) 마모 및 기어 손상에 따른 진동특성 평가

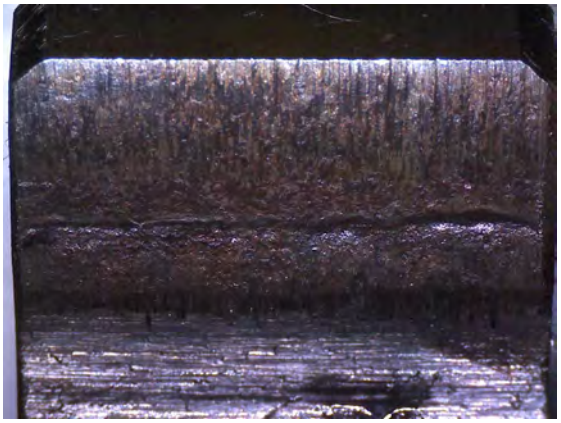
기어시험편을 이용하여 시험을 실시하였으며, 그림 2.3.30은 각각의 싸이클에 따른 기어 표면 상태를 나타내고 있다. 초기상태에서 5만 싸이클까지 표면 상태는 기어 치면에서 홈이 발생하고 있으며, 끝단에서 마모가 많이 발생하고 있다. 10만 싸이클의 표면상태에서도 치면에 홈의 깊이가 더 깊어지고 끝단에서 더 많은 마모가 발생하고 있다. 15만 싸이클에서는 끝단에서 손상이 발생하여 일부분이 떨어져 나간 형태를 보이고 있다.

그림 2.3.31은 초기 상태부터 싸이클에 따른 진동 파형을 보이고 있다. 초기상태에서는 진동의 크기가 최대 3.5 g 까지 발생하고 있으며, 마모가 발생한 5만 싸이클에서는 진동의 크기가 증가하여 10 g 까지 발생하고 있다. 15만 싸이클에서는 기어 이가 연속적으로 3개가 끝단이 파손된 상태이므로 주기적으로 큰 진동신호가 발생하고 있으며 크기는 최대 16 g까지 발생하고 있다. 그림 2.3.32는 주파수 분석결과로서 a)는 초기 상태에서의 결과이다. 기어의 맞물림 주파수 성분이 주기적으로 발생하고 있다. b)는 마모가 발생한 상태에서의 주파수 분석 결과로써 맞물림 주파수 성분 중에서 576 Hz가 크게 발생하고 있다. 기어 끝부분이 파손된 상태인 c)에서는 380 Hz의 주파수 성분이 크게 발생하고 있다. 그림 2.3.33은 15 만 싸이클에서 오일을 주입했을 경우의 주파수 분석 결과로써 전반적인 경향이 동일하나 그 크기가 차이가 발생하고 있다. 이는 오일의 주입으로 진동의 크기가 작아졌음을 알 수 있으며, 그림 2.3.34는 이를 비교한 것으로 크기 차이가 많이 발생함

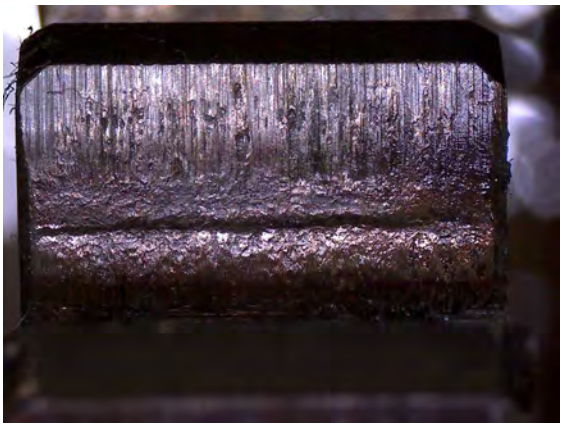
을 알 수 있다. 그림 2.3.35는 각각의 싸이클에서 주파수 분석결과를 비교한 것으로 크기(rms power)가 차이가 많이 발생하며, 5만 싸이클과 15만 싸이클을 비교하였을 경우에 각각 0.08, 0.21로써 약 3배 차이가 발생하고 있다. 그림 2.3.36은 각각의 속도에 따른 rms 크기를 비교한 것이다. a) 100 rpm에서 싸이클에 따른 rms 크기를 비교한 것으로, 싸이클이 증가함에 따라서 크기가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 초기상태에서는 0.22 g이고, 5만 싸이클에서는 0.25 g, 15싸이클에서는 0.33 g가 발생하였다. b)는 300 rpm에서의 결과로써 초기상태에서 0.61 g, 5만 싸이클에서는 0.68 g, 15싸이클에서는 1.73 g이 발생하였다. c)는 500 rpm에서의 결과로써 초기에서 0.74 g, 5만 싸이클에서 1.4 8g, 15만 싸이클에서 2.89 g이며, 오일을 주입하였을 경우에는 0.75 g으로써 크기가 급격히 작아짐을 알 수 있다. 그러나 2번째 센서에서는 15만 싸이클일 경우에 1.67 g로써 1번째 센서와의 차이가 크게 발생하고 있다. 이는 기어 이가 손상된 부위의 센서에서 큰 진동신호를 얻음을 알 수 있으며, 진동 측정 시에 위치가 중요함을 알 수 있다.



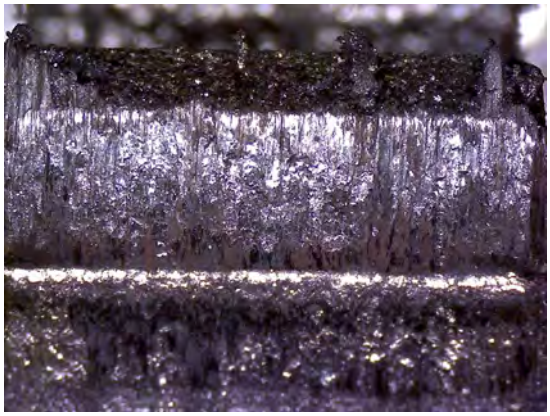
a) 초기 조건



b) 5만 싸이클

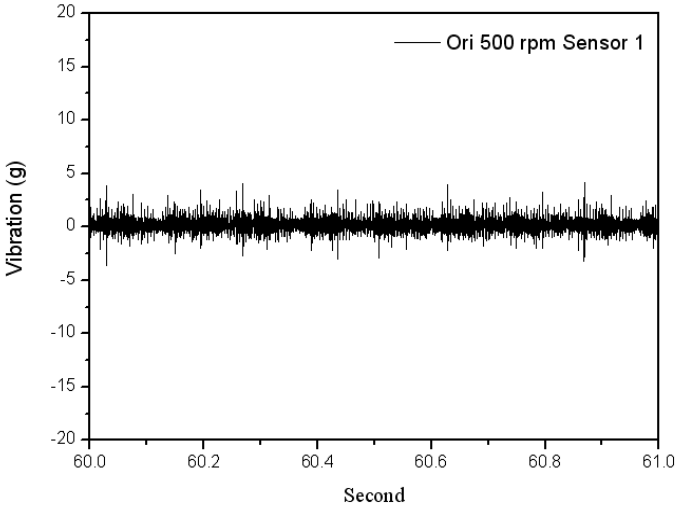


c) 10만 싸이클

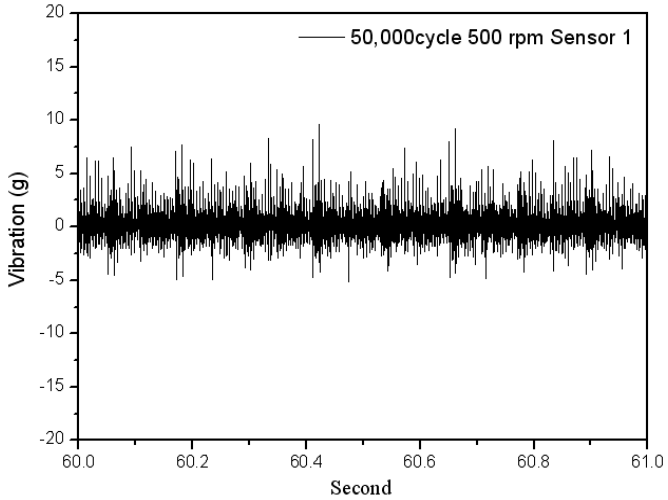


d) 15만 싸이클

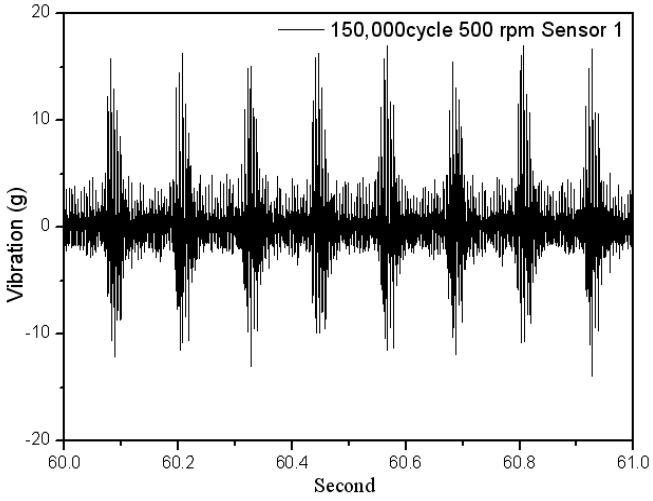
그림 2.3.30 싸이클에 따른 기어 표면의 상태 변화




a) 초기 상태

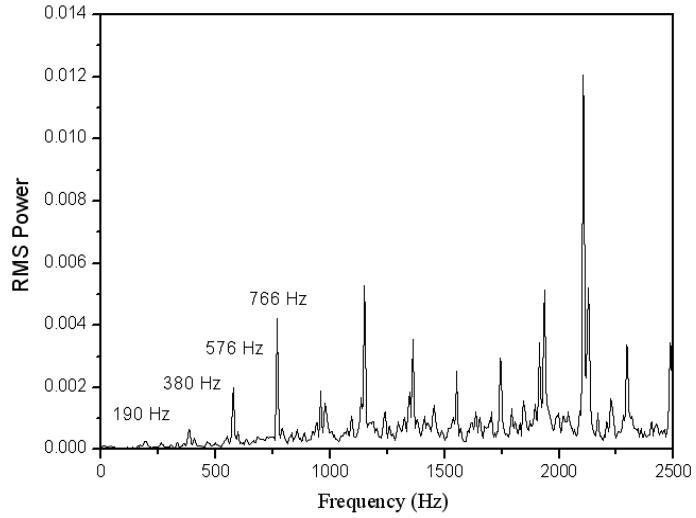



b) 5만 싸이클

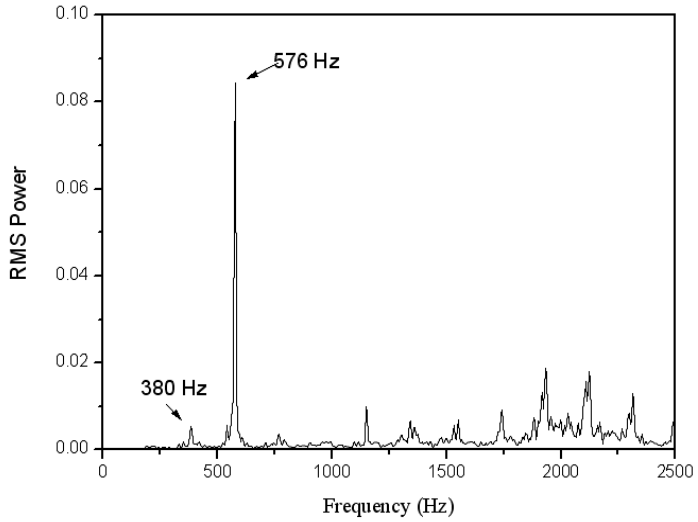



c) 15만 싸이클

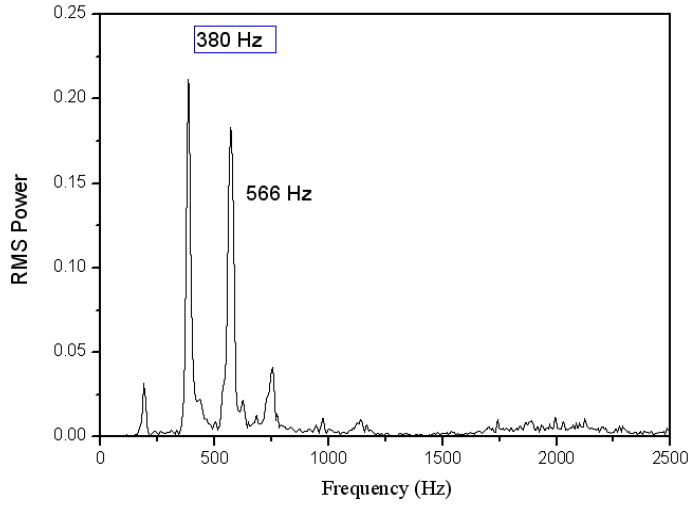
그림 2.3.31 싸이클에 따른 진동신호 변화




a) 초기 상태




b) 5만 싸이클




c) 15만 싸이클

그림 2.3.32 싸이클에 따른 주파수 분석 결과

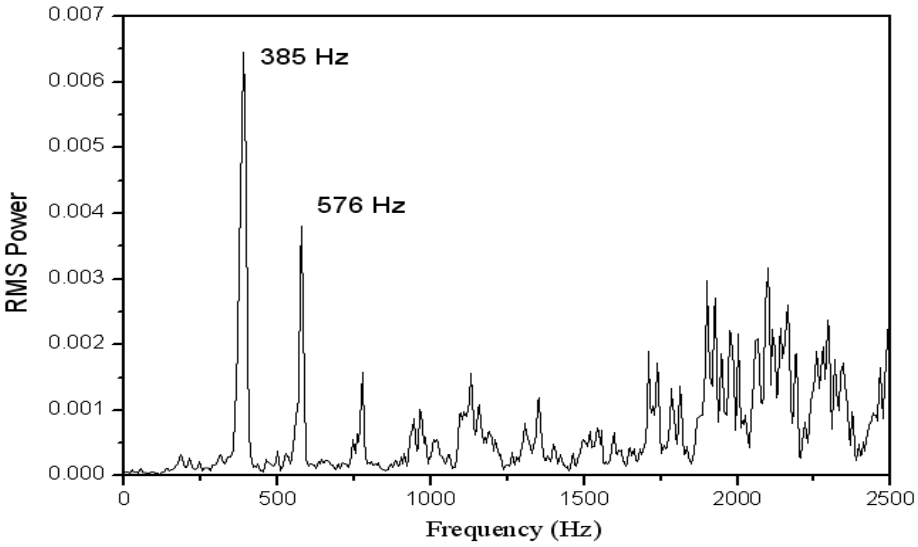



그림 2.3.33 15만 싸이클에서 오일 주입 시 주파수 분석 결과

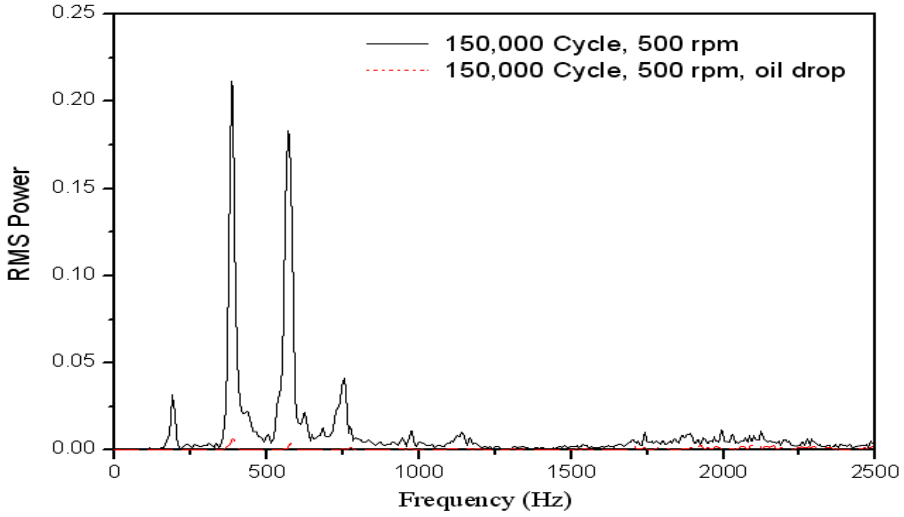



그림 2.3.34 15만 싸이클에서 오일 주입에 따른 주파수 분석 결과 비교

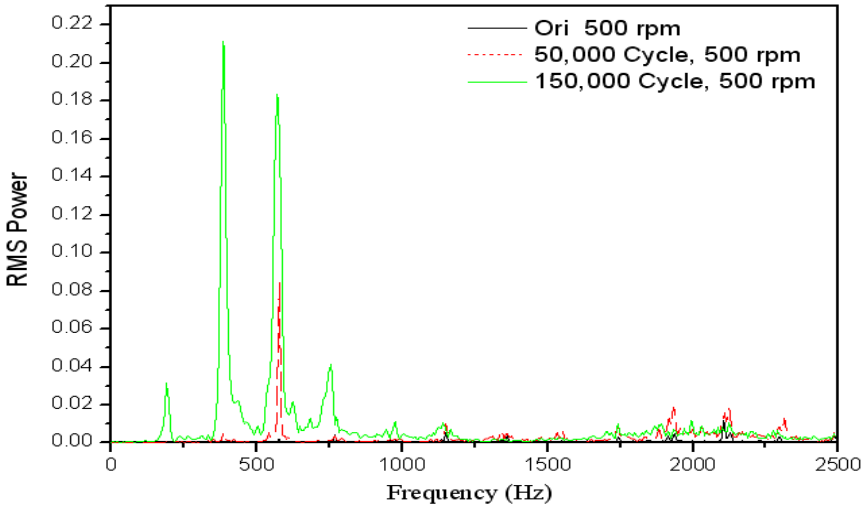
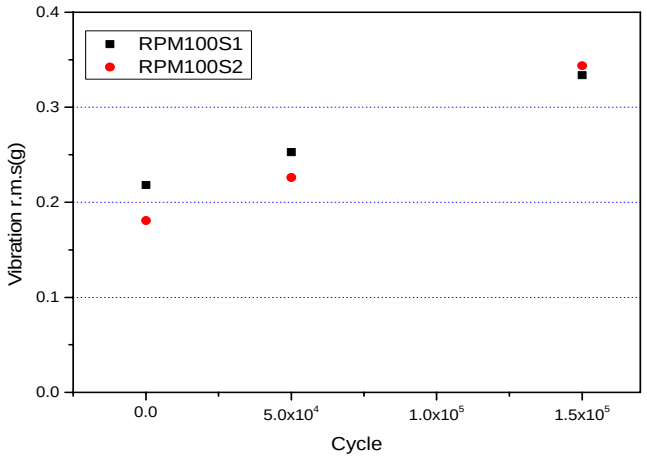
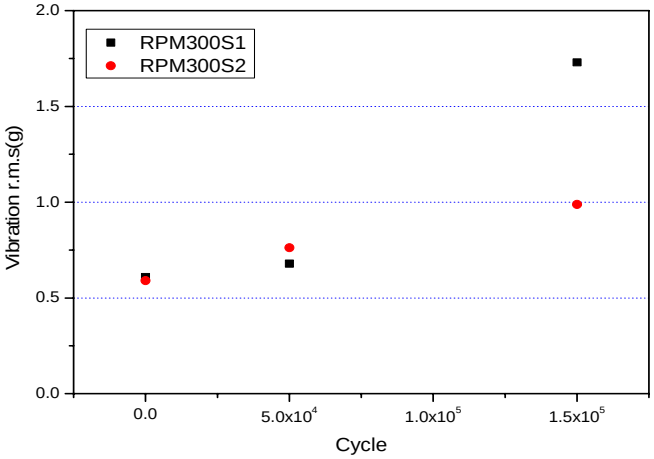


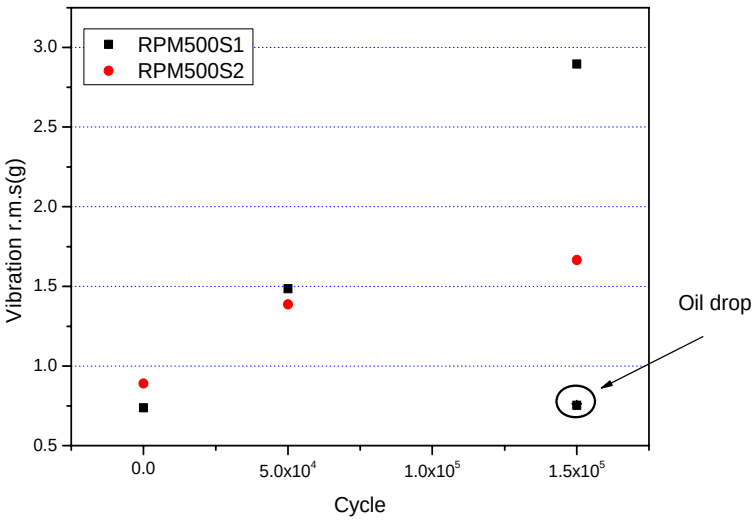

그림 2.3.35 싸이클에 따른 주파수 분석 결과 비교




a) 속도 100 rpm




b) 속도 300 rpm




c) 속도 500 rpm

그림 2.3.36 속도에 따른 RMS 크기 비교

(4) 기어 파손에 따른 변화

기어 손상의 대표적인 사례의 하나인 기어 파손(Tooth breakage)에 따른 진동 신호의 변화를 조사하였다. 실험실 조건에서 기어의 파손을 모사하기 위하여 기어 이뿌리 부근에 인공균열을 삽입하였으며 그림 2.3.37과 같다. 균열을 발생시킨 지점의 폭은 5 mm이고 균열길이는 3.2 mm이다. 이러한 인공균열이 삽입된 상태에서의 진동 신호를 측정하였고 측정이 끝난 후에 균열이 삽입된 기어 이를 물리적으로 파손 시켰다. 그림 2.3.38은 기어가 파손된 상태를 보여주고 있으며, 그림 2.3.38은 파손된 기어의 파단면을 보여주고 있으며, 그림에서와 같이 균열이 조금 진전한 것을 보여주고 있다.

본 실험에서는 기어의 손상이 없는 초기상태, 인공균열을 3.2 mm가 삽입된 상태, 마지막으로 기어이가 파단된 상태 등 3가지의 진동신호를 비교 평가하였다.

그림 2.3.39는 손상이 없는 상태에서의 진동 특성을 보여주고 있다. 진동신호는 작게 발생하고 있으며 최대 크기는 4 g 정도이다. 그림 2.3.40은 기어에 인공균열이 삽입된 상태에서의 진동신호이다. 그림에서와 같이 주기적으로 큰 신호가 발생하고 있으며, 이는 인공균열 삽입으로 기어 이의 강성이 작아졌기 때문에 인공균열이 삽입된 기어 이의 통과 시 큰 진동 신호가 발생하고 있다. 이때의 진동신호의 크기는 8g 정도가 발생하고 있다. 그림 2.3.41은 기어 이의 파손에 따른 진동 신호를 보여주고 있으며 마찬가지로 주기적으로 큰 신호가 발생하고 있다. 주기적으로 발생하는 진동신호의 크기가 일정하지가 않고 있으며 하나의 기어 이의 파손에 따른 맞물림 상태가 달라지기 때문일 것으로 판단되며, 최대 진동신호의 크기는 50 g이다.

그림 2.3.42는 손상에 따른 RMS의 크기 신호를 보여주고 있다. 손상이 발생하지 않은 상태와 균열이 있는 경우에는 RMS의 크기의 차이가 거의 없음을 보여주고 있다. 그러나 기어가 파단이 발생한 경우에는 RMS의 크기는 급격히 증가하고 있다.

이로부터 기어 이에 균열이 발생하여 진전하는 경우에는 주기적으로 큰 진동 신호가 발생하였으나, RMS 신호는 크게 차이가 발생하지 않고 있으므로 균열 진전에 의한 진동신호는 다른 진동 평가 방법이 필요하다. 그러나 기어 이가 파단이 발생 할 경우에는 주기적으로 큰 진동신호 뿐만 아니라 RMS 값도 큰 차이가 발생함으로써 이러한 방법으로 기어 이의 파단은 평가될 것으로 판단된다.

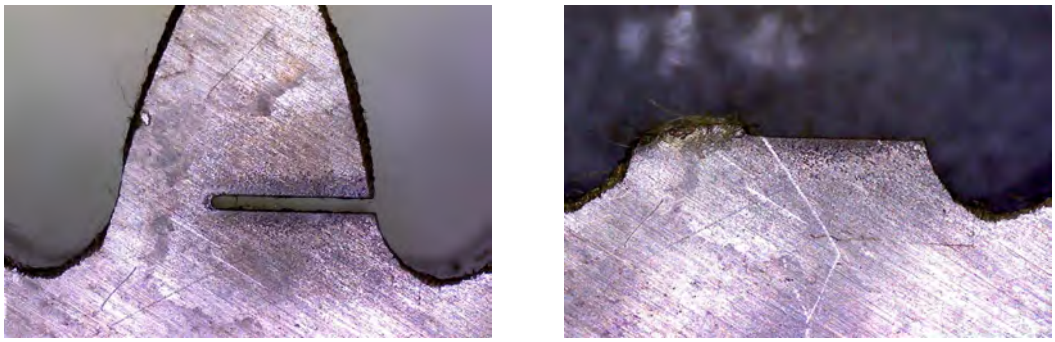


그림 2.3.37 인공 균열 삽입과 기어 이 파손

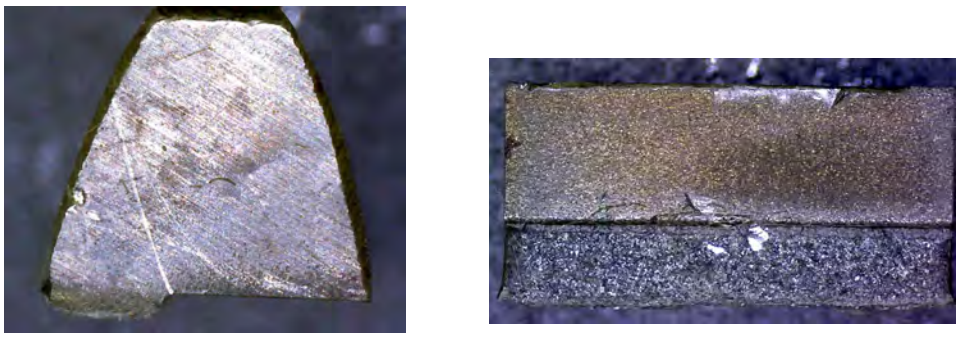


그림 2.3.38 파손된 기어 이

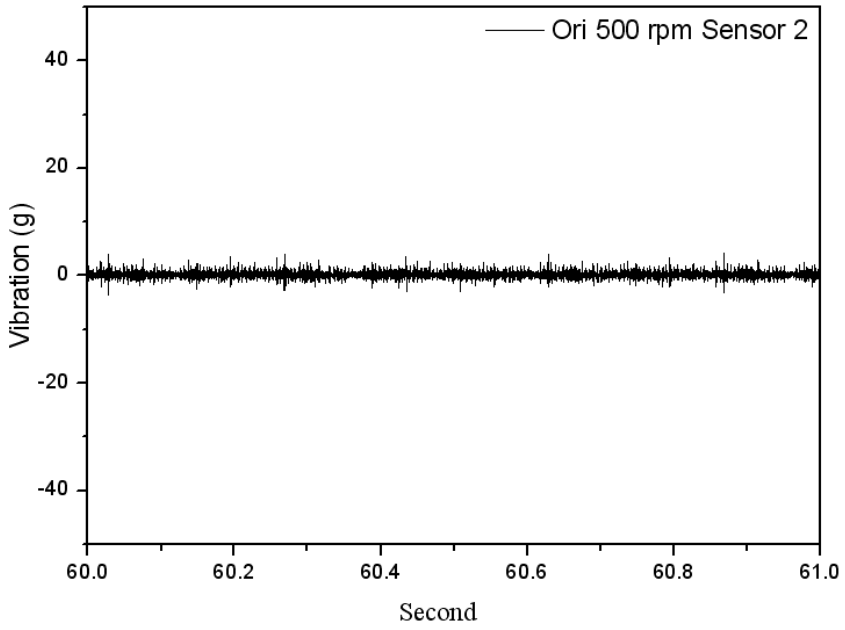



그림 2.3.39 손상이 없는 기어에서의 진동

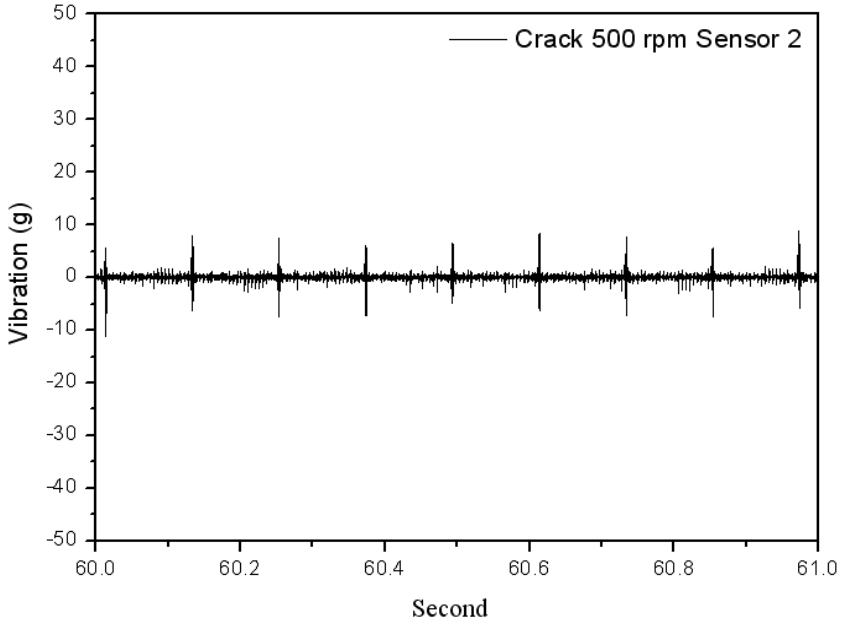



그림 2.3.40 기어에 균열이 있는 경우에서의 진동

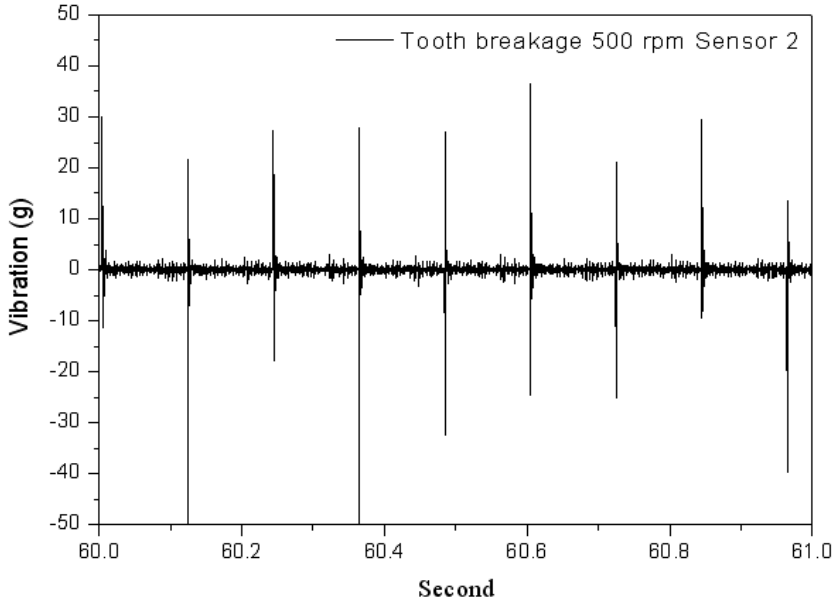



그림 2.3.41 기어 이의 파손에 따른 진동

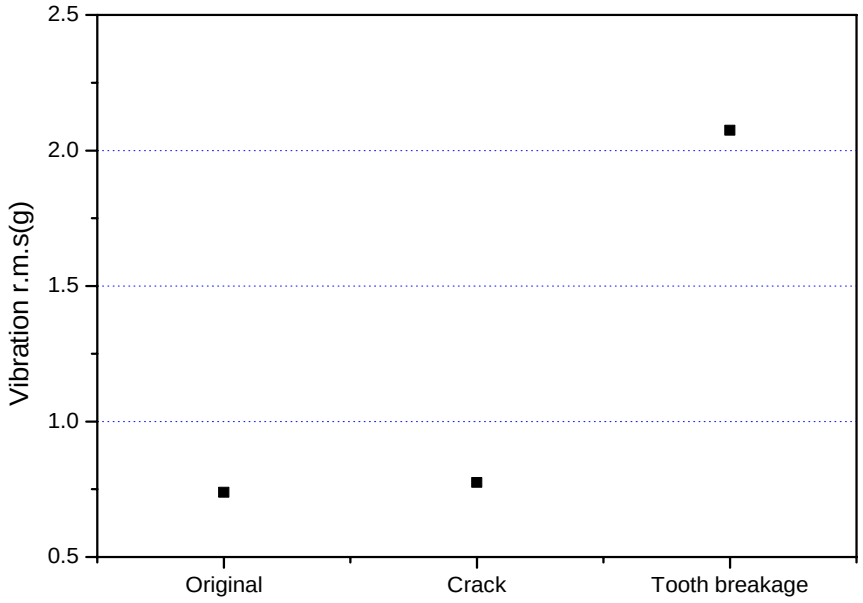



그림 2.3.42 손상에 따른 RMS 값의 크기

다. 평기어 균열 및 파손 모드

(1) 기어 임계균열 길이 해석

(가) 개요

기어 손상의 대표적인 형태로는 굽힘피로에 의한 기어 이의 파손과 반복적인 접촉하중에 의한 기어 이의 표면에 발생하는 피팅과 스폴링이다. 굽힘피로에 의한 기어 이의 손상은 감속기 등의 부품으로 사용 될 경우에 치명적이기 때문에 진동 등으로 이의 손상 여부를 판단하게 된다.

기어의 굽힘피로에 의한 손상은 기어에 발생하는 균열이 진전되어 최종적으로 급속하게 파괴되는 형태로 진행하게 된다. 기어의 파손에 의한 감속기 등의 이상상태를 판단하기 위하여 기어 이에서 발생하는 균열이 성장하여 급속하게 파괴되는 임계균열길이가 결정되어야 한다. 이때의 진동신호를 모니터링하여 기어의 파손을 방지하여야 한다.

따라서 시험편 시험에 이용되는 기어의 굽힘하중에 의한 균열진전을 해석하여 기어 이의 임계균열길이를 결정하였다.

(나) 해석모델

그림 2.3.43은 시험편 형상을 나타내고 있다. 시험편의 기어 이(齒)의 개수는 23개이고, 모듈은 3이다. 기어 이의 굽힘 피로해석은 하중조건이 기어 이 하나에 작용하는 상태이므로 전체 기어에서 3개의 기어 이를 해석모델로 사용하였다. 기어의 굽힘하중은 기어의 피치원에서 작용하고 가장 큰 응력이 발생하는 부위는 기어 이뿌리 부위이다. 따라서 기어 이 뿌리부분에서 요소를 세밀하게 모델링하였다. 해석에 사용된 요소는 8절점 Plain strain element(CPS8R)이고 요소수는 1,253개이고, 절점수는 3,904개 이다.

(다) 하중 및 경계조건

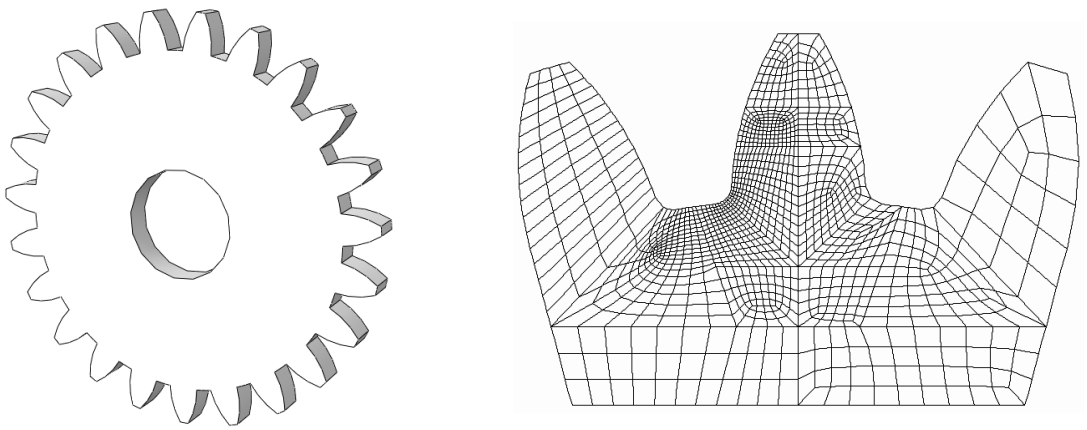
그림 2.3.44는 하중 및 경계조건을 나타내고 있다. 경계조건으로는 기어의 절단된 면에 대해서 모든 방향으로 구속시켰으며, 하중은 하나의 이가 접촉하는 조건으로 가장 바깥쪽에서 하중을 주었으며, 이때 하중각도는 20° 이다. 하중은 시험기에서 작용하는 토크를 크기에 따라서 하중으로 환산하여 부가하였으며 하중조건은 표 2.3.7과 같다.

하중은 크기에 따라서 4가지 조건으로 선정하였으며 집중하중으로 x-방향과 y-방향으로 구분하여 부가하였다.

(라) 응력해석 결과

균열진전해석을 위하여 최대 응력이 발생한 부위를 평가하여야 한다. 따라서 균열이 존재하지 않은 상태에서 응력해석을 수행하였다. 그림 2.3.45은 하중 부과 후에 변형된 모습을 나타내고 있다. 그림 2.3.45와 같이 굽힘하중이 이의 끝단에서 작용하기 때문에 하중 반대방향으로 변형된 모습을 나타내고 있다.

그림 2.3.46은 굽힘하중 시에 응력분포를 나타내고 있다. 최대 응력이 발생한 부위는 이 뿌리에서 최대응력이 발생하였으며, 194 MPa이 발생하고 있다. 따라서 최대응력이 발생한 부위에서 균열이 발생할 것으로 판단된다.



a) 시험편 형상 b) 해석모델

그림 2.3.43 해석모델

표 2.3.7 하중조건

| Load Case | Torque(N · m) | Fx(N) | Fy(N) |
|---|---|---|---|
| Case 1 | 49.05 | 1317 | 479 |
| Case 2 | 68.67 | 1844 | 671 |
| Case 3 | 88.29 | 2370 | 863 |
| Case 4 | 107.91 | 2897 | 1054 |

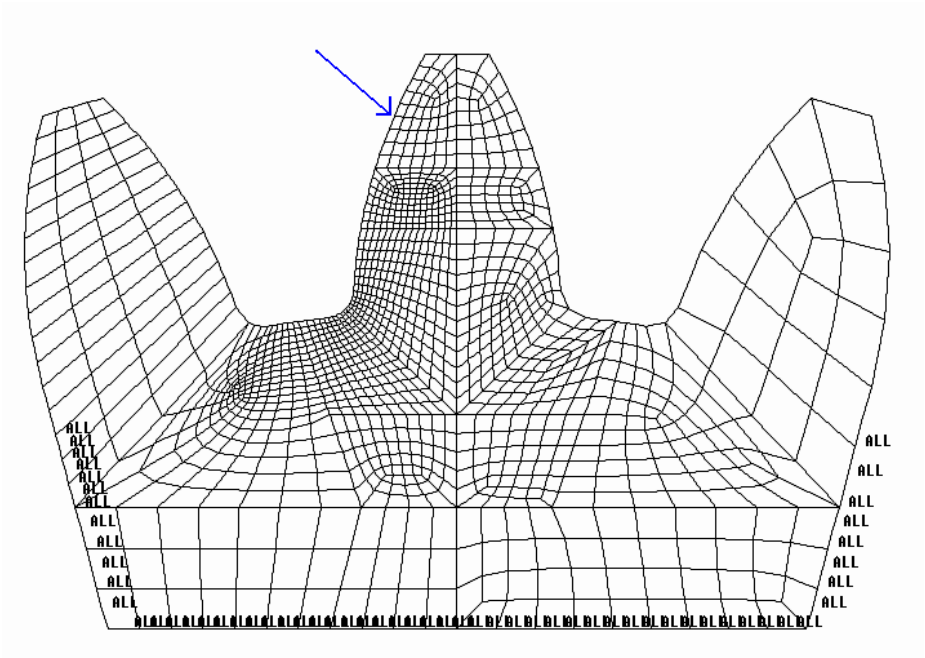



그림 2.3.44 하중 및 경계조건

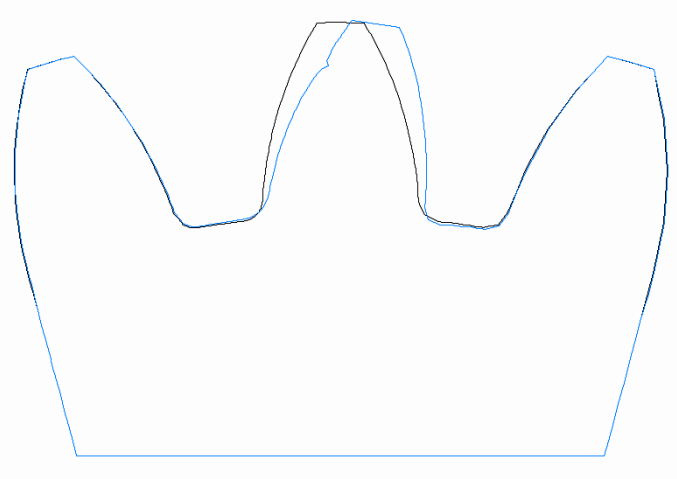


그림 2.3.45 하중부가상태에서 변형모습

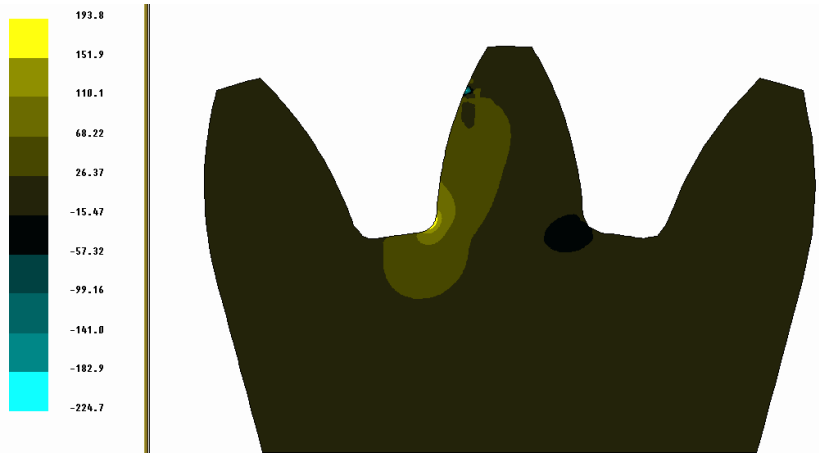



그림 2.3.46 하중부가 시 응력분포

(마) 균열진전해석

균열진전해석을 위하여 균열선단에서의 응력과 변형률 분포를 알아야 하며 이로부터 응력확대계수(K)을 계산하여야 한다. 이를 위하여 유한요소해석 코드인 Franc2d를 이용하였다. 이용된 유한요소해석 코드는 균열선단의 변위를 이용하여 K를 계산하며, 균열진전해석을 위하여 균열선단의 요소를 자동으로 생성하는 장점을 가지고 있다. 하중에 따라서 균열이 진전되는 균열진전 방향을 결정하여야 한다. 균열진전방향의 결정은 Maximum tangential stress criterion(MTS)를 이용하였다.

균열진전해석을 위해 초기균열의 위치를 결정하여야 한다. 초기균열의 위치는 균열이 없는 상태에서의 응력해석 결과로부터 최대 응력이 발생한 위치로 결정하였다. 초기균열의 크기는 0.2 mm로 표면에서 수직방향으로 하였다. 그림 2.3.47은 초기균열길이를 기어의 이뿌리 끝단에서 모델링한 모습이다. 그림 2.3.48은 초기균열이 존재하는 상태에서 하중을 부가한 후 변형 및 응력분포를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 하중부가에 따라서 균열이 열리는 현상을 나타내고 있다. 응력분포는 전단응력으로써 균열이 존재 할 때 전형적인 분포를 나타내고 있다.

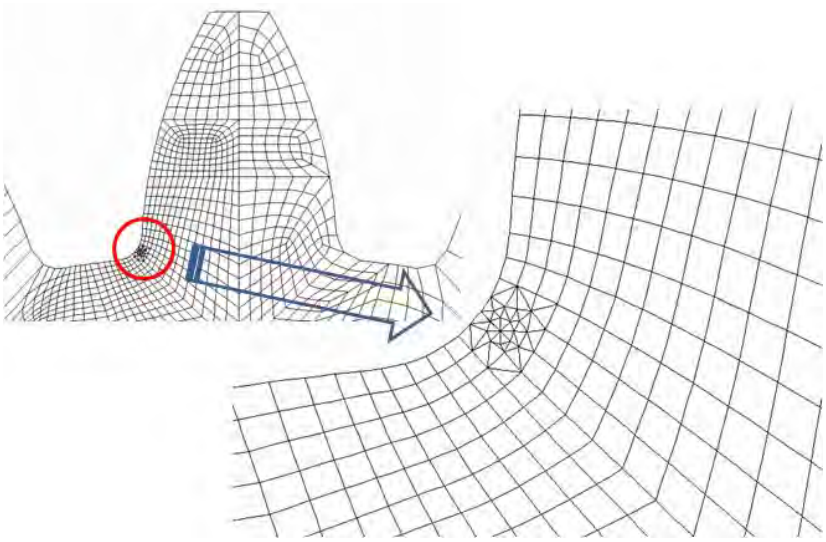
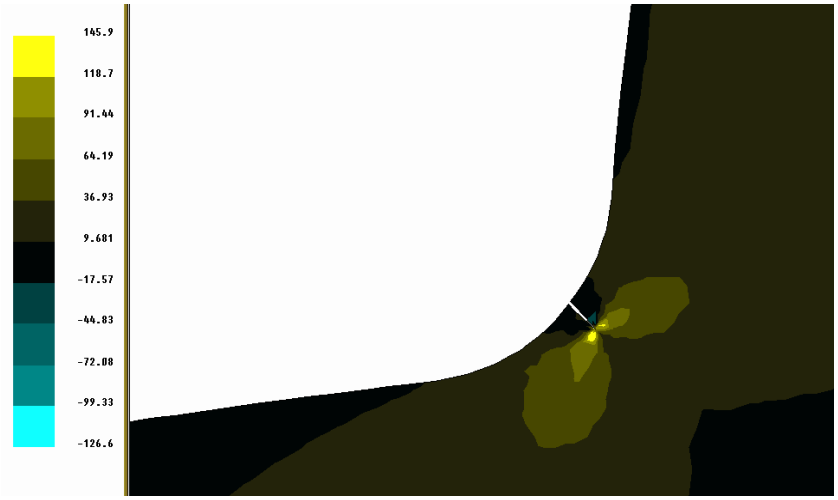
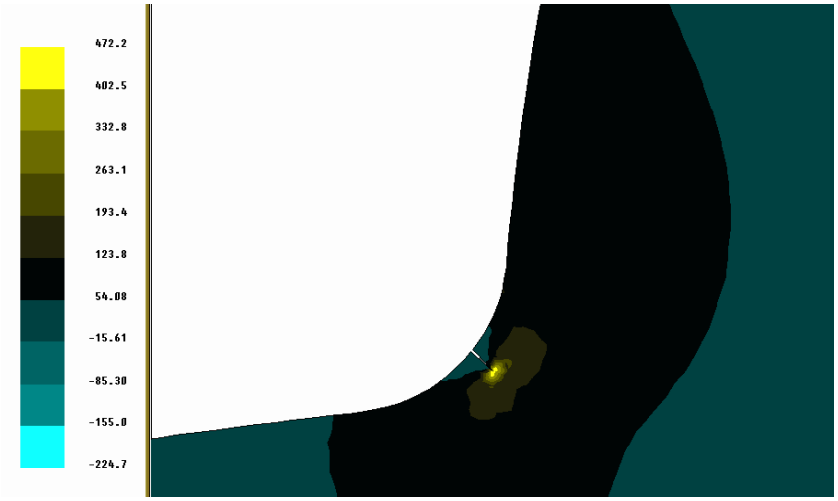


그림 2.3.47 이뿌리 끝단의 초기균열 모델링




a) Shear stress




b) Principle stess

그림 2.3.48 초기균열 변형 및 응력분포

(바) 균열진전해석 결과

균열진전해석을 위해 초기균열부터 균열진전량(⊿a)을 설정하여야 한다. 본 해석에서는 균열진전량을 0.2 mm로 설정하였다. 그림 2.3.49는 초기 균열에서 균열이 진전한 상태를 보여주고 있다. 그림 2.3.50은 균열이 진전하면서 하중이 부가한 상태에서 변형모습을 나타내고 있다. 변형된 모습은 균열이 진전하여 균열이 열린 상태를 잘 보여주고 있다. 균열진전방향은 초기에는 아랫방향으로 진전한 후 기어이의 중간부터는 다시 위쪽으로 진전하고 있다. 이러한 형태는 타 연구자의 시험 및 해석결과와 잘 일치하고 있다.

그림 2.3.51은 균열진전에 따른 균열선단에서의 응력확대계수 ($K_I$, $K_{II}$)를 나타내고 있다. 균열이 진전함에 따라서 $K_I$은 서서히 증가하다가 일정 크기 이후에는 급격히 증가하고 있음을 보여주고 있으며, $K_{II}$는 거의 발생하고 있지 않다. 따라서 굽힘하중에서의 균열진전인 Mode I에 지배적인 영향을 받고 있음을 보여주고 있다.

그림 2.3.52는 하중크기에 따른 응력확대계수 변화를 보여주고 있다. 하중의 크기에 따라서 $K_I$의 크기는 다르게 발생하지만 전반적인 경향은 유사하게 발생하고 있다. 균열이 진전함에 따라서 $K_I$의 크기가 커지고 있으며, 급격하게 변화하는 균열길이 크기도 짧아지고 있다. 해석에 사용된 기어의 재질인 SC45C의 파괴인성치( $K_{IC}$)는 그림에서와 같이 1,580 이므로 여기에 해당하는 길이까지 균열이 진전할 경우에는 급속한 파괴가 발생한다. 따라서 임계균열길이(ac)는 하중의 크기에 변화하며, Case 1 = 9.49 mm, Case 2 = 8.86 mm, Case 3= 8.32 mm, Case 4= 7.78 mm 이다. 임계균열 길이는 기어 치폭 3/4정도의 균열이 발생 하였을 경우이다. 따라서 굽힘하중에 의한 기어이의 급속 파괴를 모니터링하기 위하여 임계균열길이까지 진전하기 전에 진동크기를 측정하여야 할 것으로 판단된다.

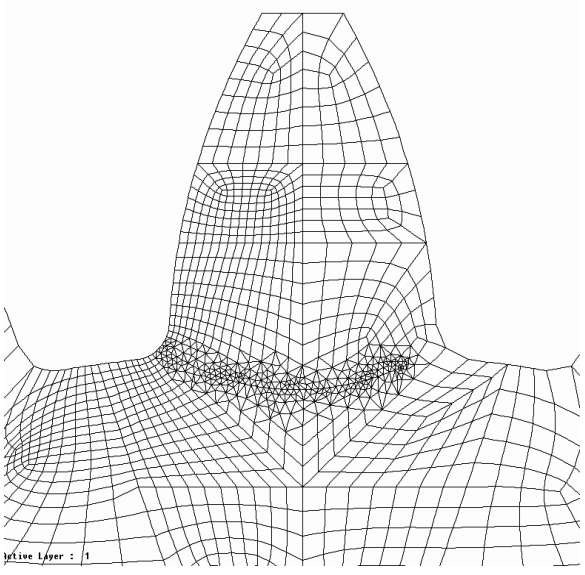


그림 2.3.49 균열진전 해석결과

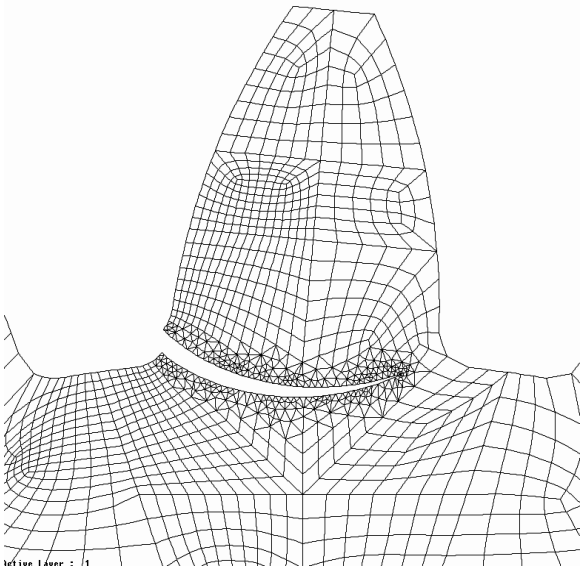


그림 2.3.50 균열진전 후 변형 모습

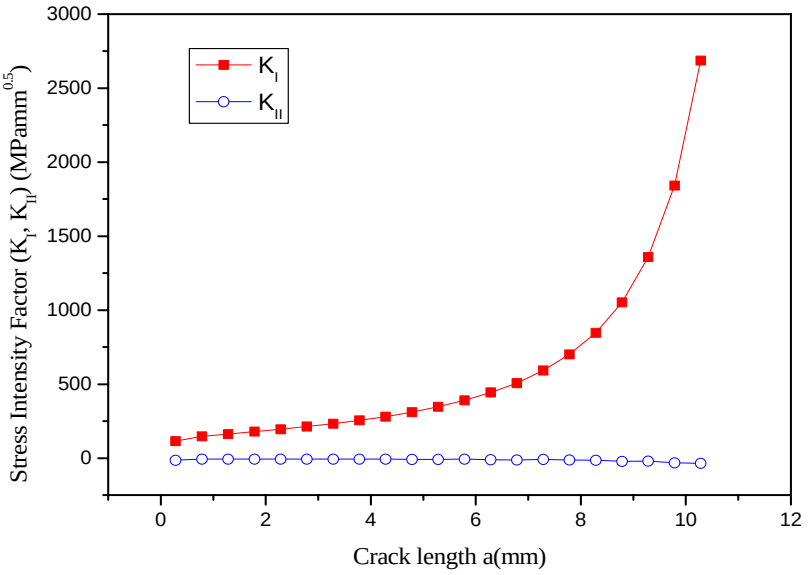



그림 2.3.51 Case1일 경우에 계산된 응력확대계수 $K_I$, $K_{II}$

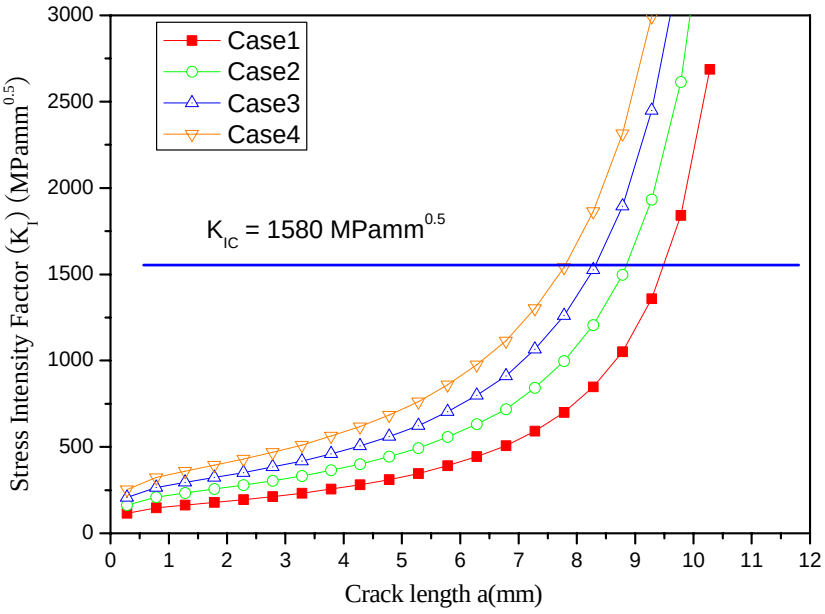



그림 2.3.52 균열길이에 따른 응력확대계수 변화

(2) 평기어 파손 모드 실험

(가) 시험편 및 시험장비

기어 손상의 대표적인 손상사례의 하나인 기어 이 파손(Tooth breakage)에 대한 진동특성을 조사하기 위하여 시험편을 제작하였다. 기어 이 파손 상태에 따른 진동신호를 모니터링하기 위해서는 균열 발생부터 진전까지 균열진전길이에 따라서 진동신호 상태를 조사하여야 한다. 그러나 이러한 시험조건을 맞추기가 어렵고 많은 시간이 소요되기 때문에 시험편에 각각의 균열길이에 대하여 인공균열을 삽입하였다.

표 2.3.8은 기어 균열길이에 따른 시험편 조건을 나타내고 있다. 총 5가지 조건으로 정상조건, 치폭의 1/4 균열, 치폭의 2/4 균열, 치폭의 3/4 균열 및 기어 파손 시험편을 제작하였다. 해석결과 대략적으로 치폭의 3/4 균열이 임계균열이므로 이때의 진동상태가 중요하다. 그림 2.3.53은 시험조건에 따른 시험편 형상을 보여주고 있다. 그림에서 균열 발생위치는 일반적으로 기어 이에 발생하는 균열발생위치와 균열진전형태는 아니다. 이는 시험편에 인공균열을 삽입시 가공의 어려움에 의해서 그림과 같이 제작되었지만 기어 균열 발생 시 진동 특성에는 큰 차이가 없을 것으로 판단하였다.

표 2.3.8 시험편 조건

| 시험편 번호 | 시험편조건 | 비고 |
|---|---|---|
| 1 | 정상기어 | |
| 2 | 치폭의 1/4 균열 | |
| 3 | 치폭의 2/4 균열 | |
| 4 | 치폭의 3/4 균열 | |
| 5 | 기어 이 한개 파손 | |



a) 치폭 2/4 균열 기어



b) 파손된 기어

그림 2.3.53 인공균열 삽입된 시험편

표 2.3.9 시험에 사용된 측정 센서 ( Z : 상하 방향)

| Instrument | Maker & Model | Note |
|---|---|---|
| Accelerometer (Charge Type) | B & K, Type 4384 | Max. operational shock(±peak) : 200kms$^{-2}$<br>Max. continuous sinusodial : 60kms$^{-2}$ |
| 측정 및 분석장비 | LMS Test Lab | - |

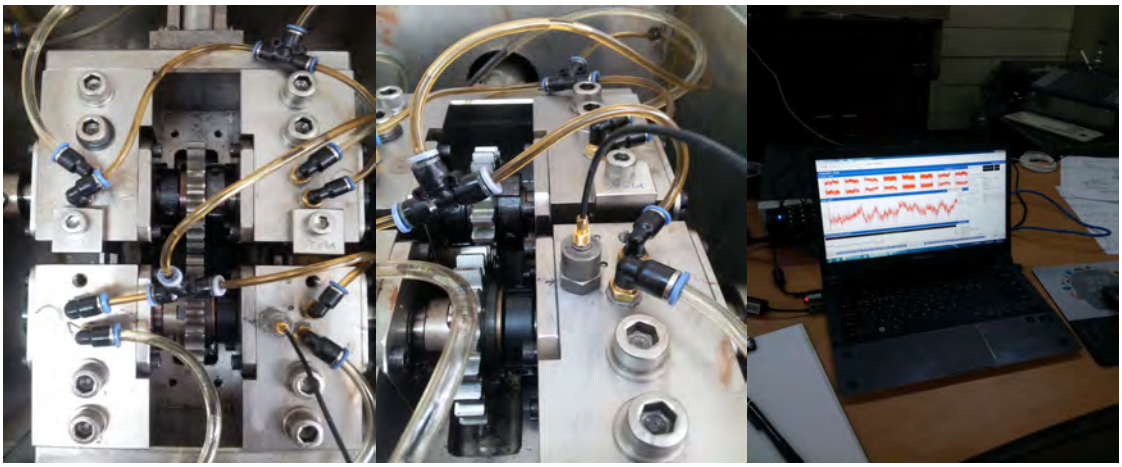


그림 2.3.54 진동센서 및 계측장비

(나) 시험방법

기어의 진동에 영향을 미치는 인자로는 속도와 작용하중이다. 시험기에서 발생시킬 수 있는 최대 토크는 5 $kg_f$.m 이기 때문에, 최대토크는 고정시켰으며 시험속도인 rpm의 변화에 따라서 각각의 진동신호를 계측하였다. RPM의 변화는 100, 300, 500 rpm으로 하였다. 이때 기어에 수동적으로 윤활을 하였다.

그림 2.3.54는 시험기에 시험편이 장착된 모습과 계측장비이다. 진동센서는 토크의 입력 및 출력축에 부착하였다. 표 2.3.9는 시험에 사용된 측정센서 및 시험장비 사양을 나타내고 있다.

(다) 시험결과

진동특성을 분석하는 방법은 여러 가지가 있지만, 1차년도 시험결과에 따라서 기어의 파손 특성을 가장 잘 나타내는 파고율(Crest factor), 첨도(Kurtosis)를 사용하여 분석하였다.

그림 2.3.55 ~ 2.3.59는 시험편 종류에 따른 진동파형을 나타내고 있다. 그림 2.3.55는 시험편 번호 1번인 정상상태의 기어에서 발생하는 진동파형이다. 그림에서 윗부분은 입력축의 진동신호를, 아래쪽은 출력측의 진동신호를 나타낸다. 전반적으로 출력측의 진동신호가 크게 발생하고 있으며, 500 rpm에서는 그 차이가 확연히 구별된다. 출력측의 진동크기는 100 rpm에서는 0.15g, 300 rpm에서는 0.5g, 500 rpm에서는 1.0 g로써 rpm이 증가 할수록 진동크기가 증가하고 있다.

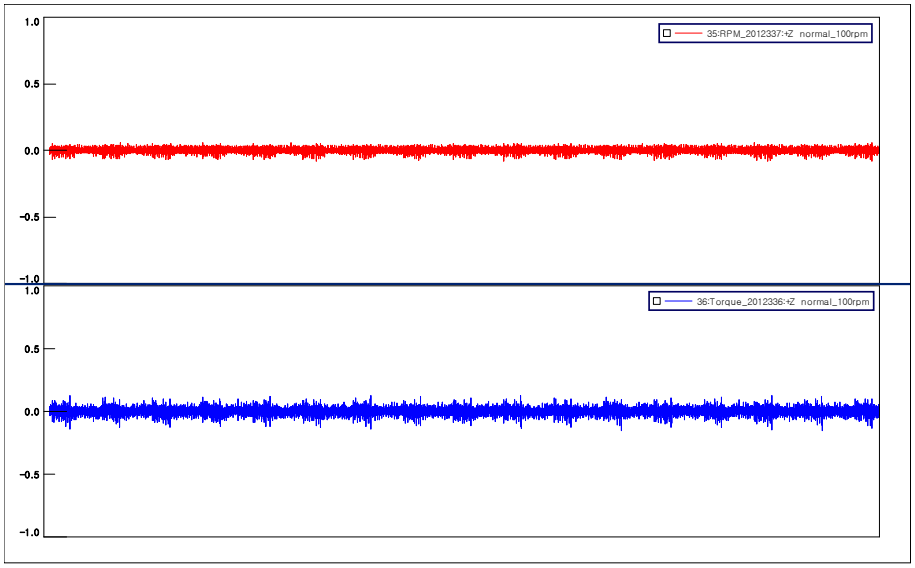
그림 2.3.56은 시험편 번호 2번인 치폭의 1/4 균열이 발생한 경우로 정상상태의 기어와 유사한 경향을 가지고 있다. 그림 2.3.57 및 2.3.58은 시험편 번호 3과 4로써 파형의 크기가 약간 증가하였지만 전반적인 경향은 정상상태 기어와 유사함을 알 수 있다. 그러나 그림 2.3.59는 시험편 번호 5번으로 기어 이 하나가 파손된 상태로써 진동파형이 다른 시험편과 전반적으로 다른 경향을 보이

고 있다. 기어 이 하나가 파손됨으로써 일정한 간격으로 큰 파형의 진동신호가 발생하고 있다. 진동신호 크기 또한 100 rpm에서 1.5g, 300 rpm에서 5.0g, 500 rpm에서 7.5g가 발생하여 균열이 있는 시험편과 비교하여 큰 크기의 진동신호가 발생하고 있다.

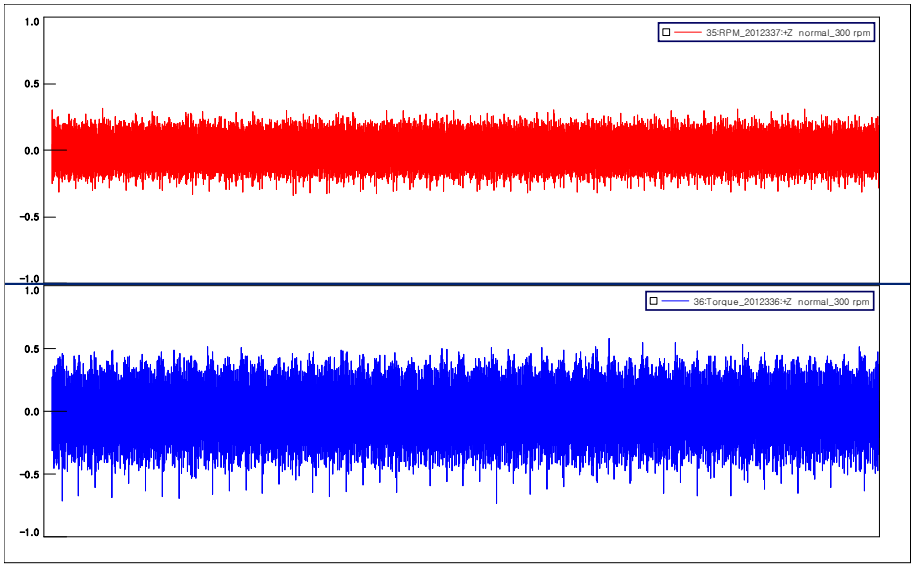
그림 2.3.60은 각각의 시험편에 대해서 rpm에 따른 RMS 크기 변화를 보여준다. 100 rpm 저속에서는 모든 시험편의 RMS의 크기가 비슷하게 발생하고 있고, 500 rpm에서는 균열길이에 따라서 약간씩 증가하고 있다. 따라서 저속에서는 RMS를 이용하여 기어의 파손을 평가하는 어려울 것으로 판단된다.

그림 2.3.61은 rpm에 따른 첨도(Kurtosis)크기 변화를 보여준다. 100 rpm에서 첨도는 파손된 기어에서 급작스럽게 증가함을 알 수 있다. 그러나 균열의 크기에 따라서는 비례적으로 증가하지 않고 있다. 300 rpm 및 500 rpm 역시 유사한 경향으로 균열길이에 따라서는 큰 차이가 없으며 파손된 경우에만 급격히 증가한다.

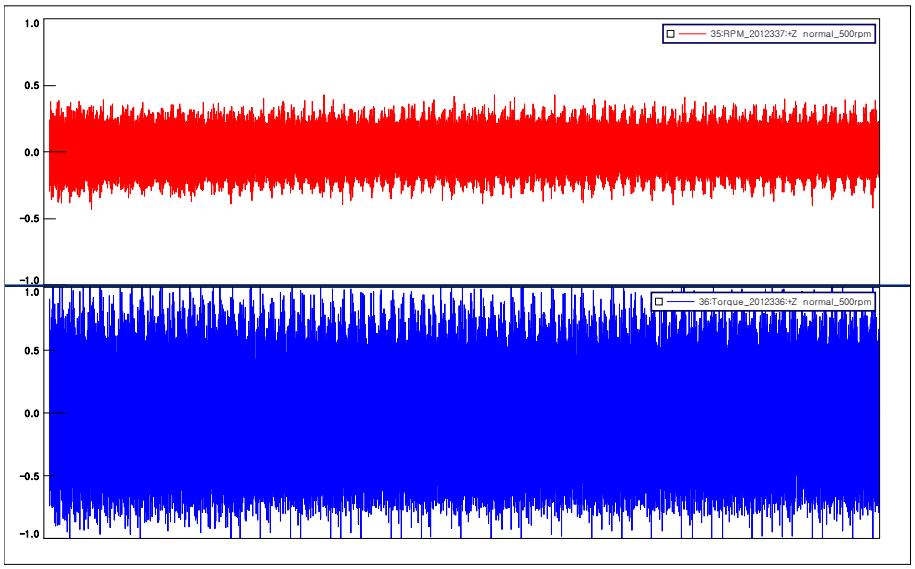
그림 2.3.62는 rpm에 따른 파고율(Crest factor)크기 변화를 보여준다. 100 rpm에서는 파고율이 출력축의 경우에는 균열크기에 따라서 증가하고 파손된 기어에서는 급작스럽게 증가함을 알 수 있다. 그러나 입력측의 경우에는 균열길이에 따라서 크기가 비례하지 않고 정상적인 값인 3.0~4.0을 벗어나고 있다. 100 rpm에서는 시험기 상태의 영향이 크게 작용하여 비정상적인 결과가 도출되었을 것으로 판단된다. 300 rpm에서는 파고율이 기어의 파손뿐만 아니라 균열 길이의 증가에도 크기가 비례해서 증가하고 있다. 특히 출력측에서는 균열이 증가함에 따라서 파고율의 변화를 명확히 관찰 할 수 있다. 500 rpm에서는 출력측 뿐만 아니라 입력측에서도 균열의 크기에 따라서 비례적으로 증가하고 있으며 기어 손상시에는 급격히 증가하고 있다. 따라서 기어의 손상에 따른 진동신호 모니터링은 파고율로써 균열길이 및 파손을 진단 할 수 있을 것으로 판단된다. 이 실험 결과로부터 파고율이 5이상일 경우에는 기어의 임계균열길이에 도달 한 것으로 판단 할 수 있다.




a) 100rpm

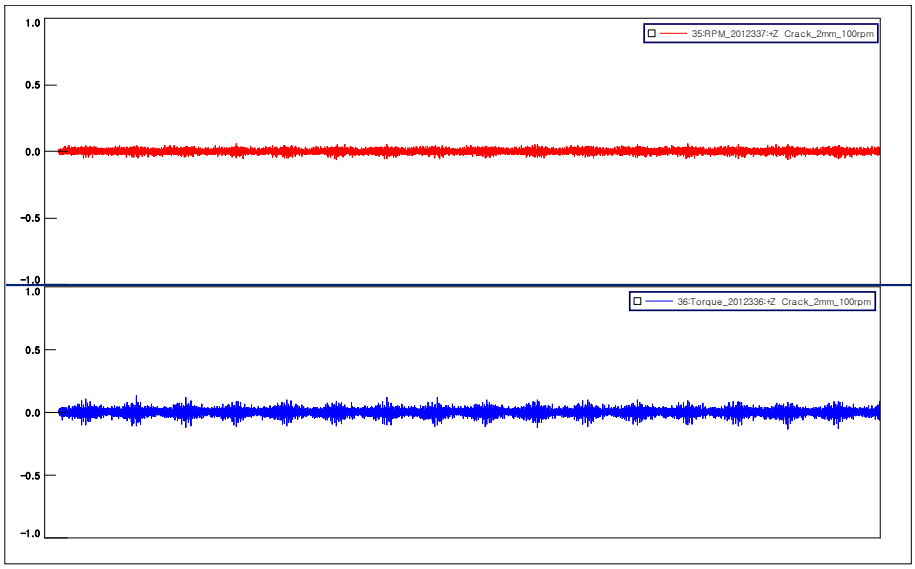



b) 300rpm

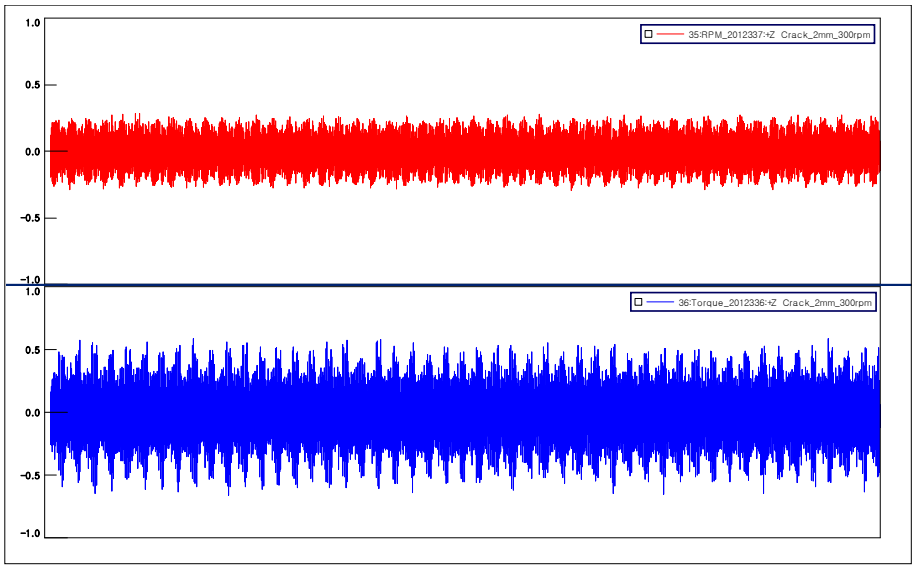



c) 500rpm

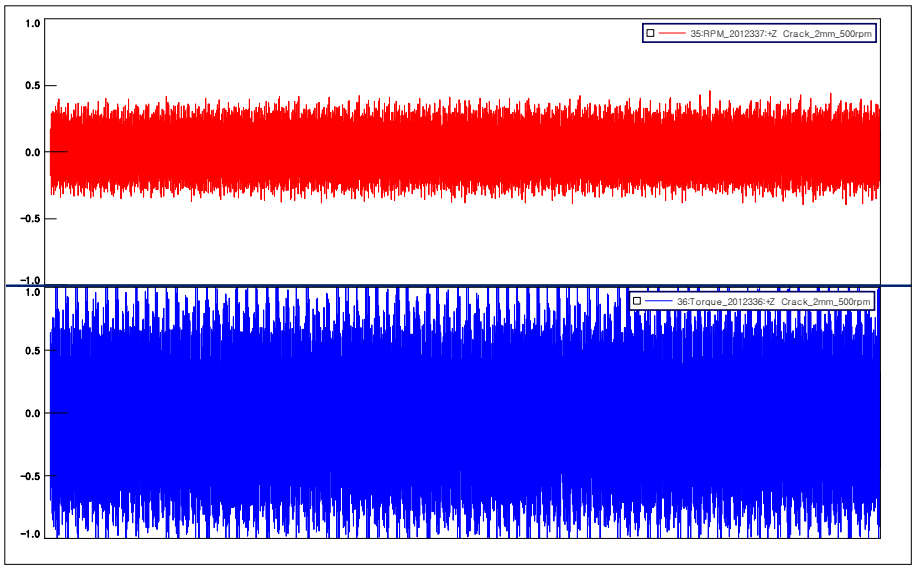
그림 2.3.55 시험편 1(정상상태)의 진동파형




a) 100rpm

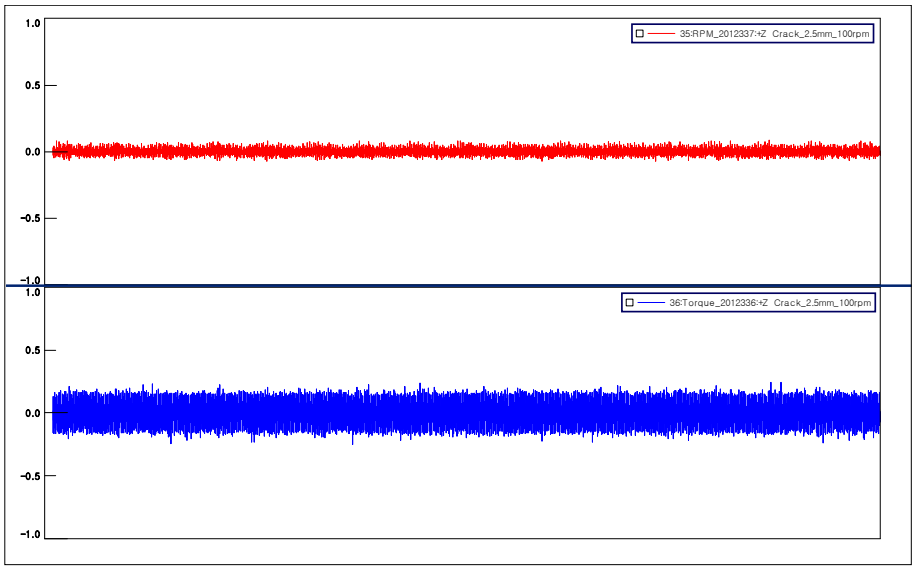



b) 300rpm

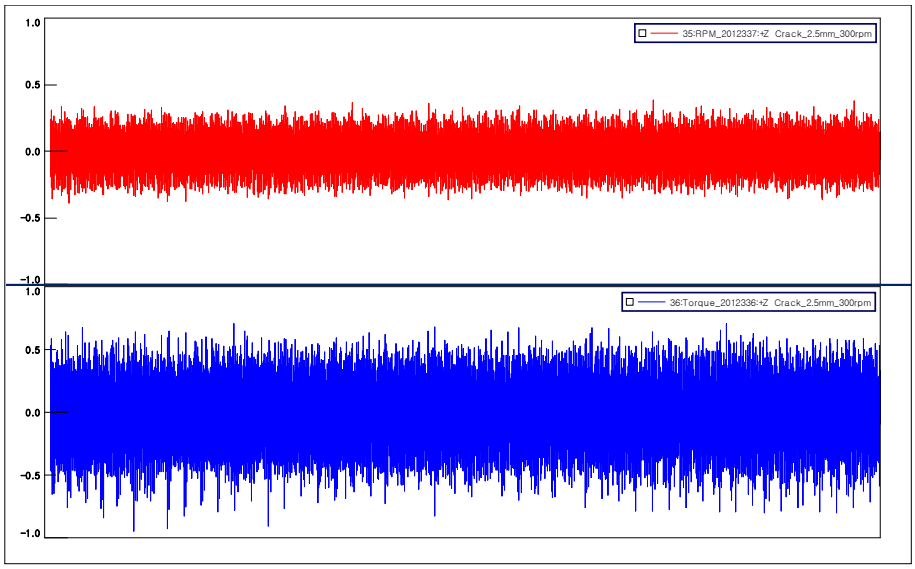



c) 500rpm

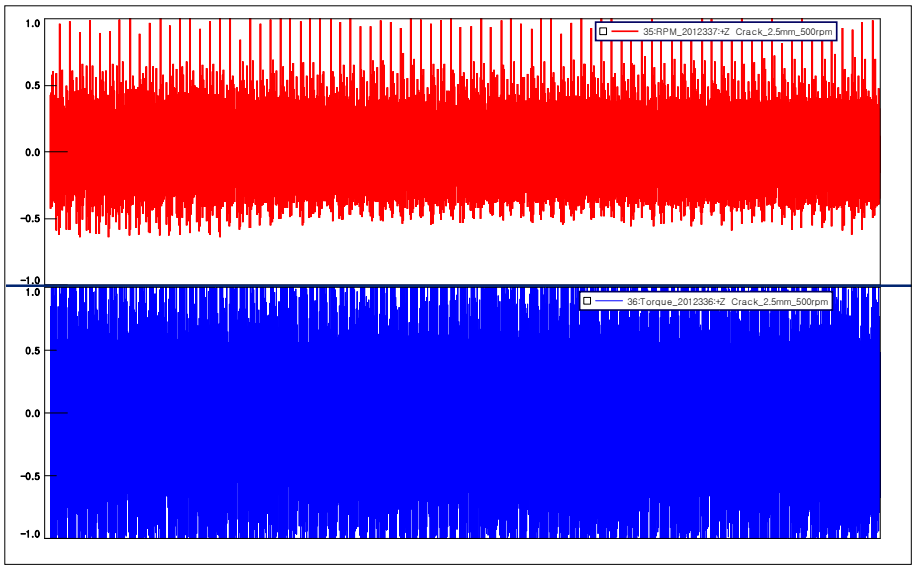
그림 2.3.56 시험편 2(치폭 1/4 균열)의 진동파형




a) 100rpm

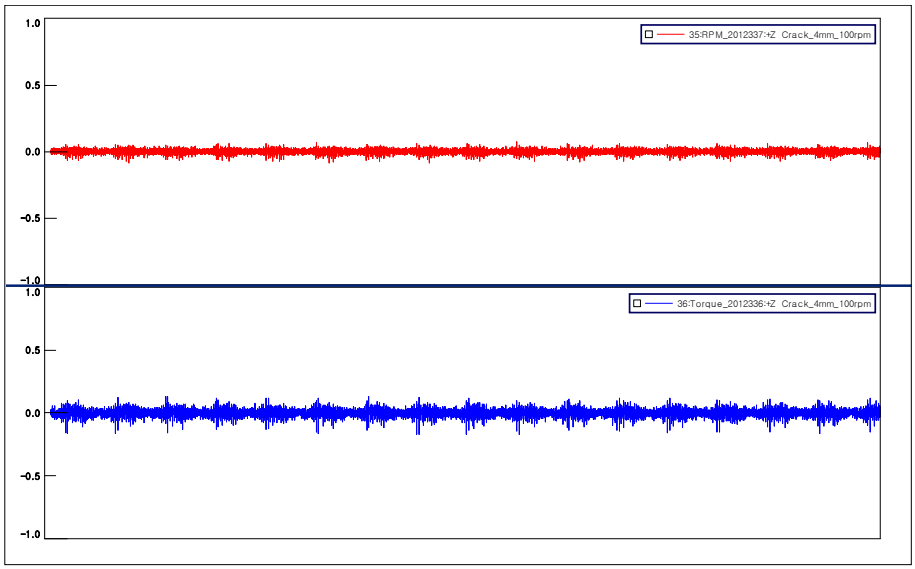



b) 300rpm

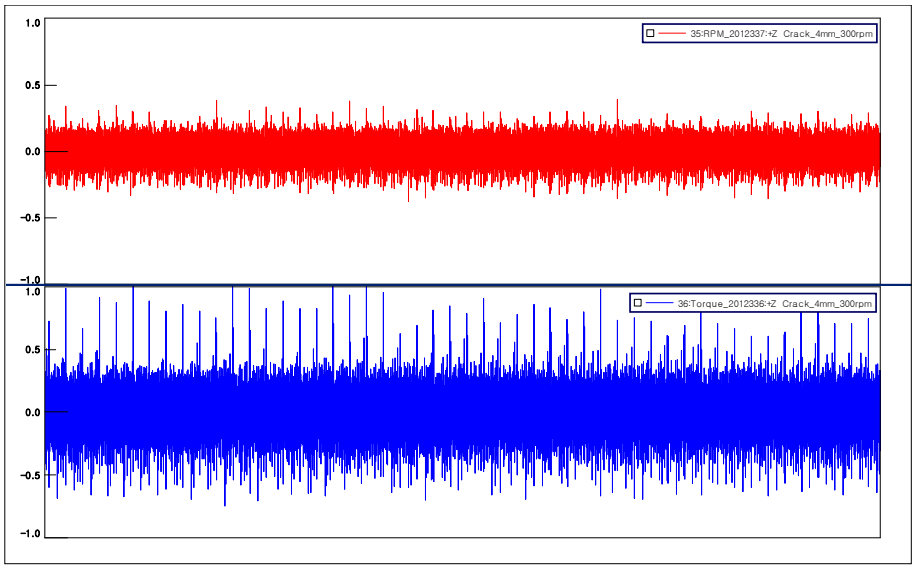



c) 500rpm

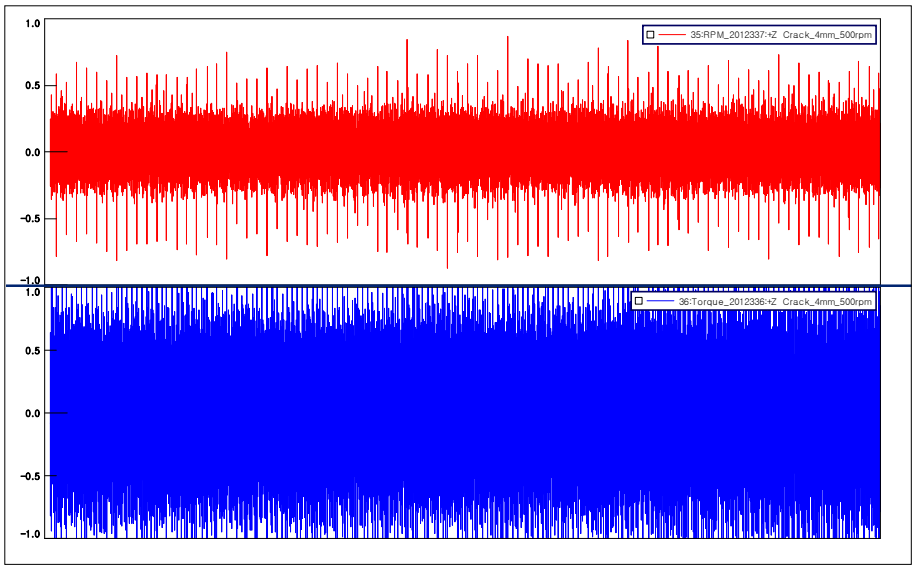
그림 2.3.57 시험편 3(치폭 2/4 균열)의 진동파형




a) 100rpm

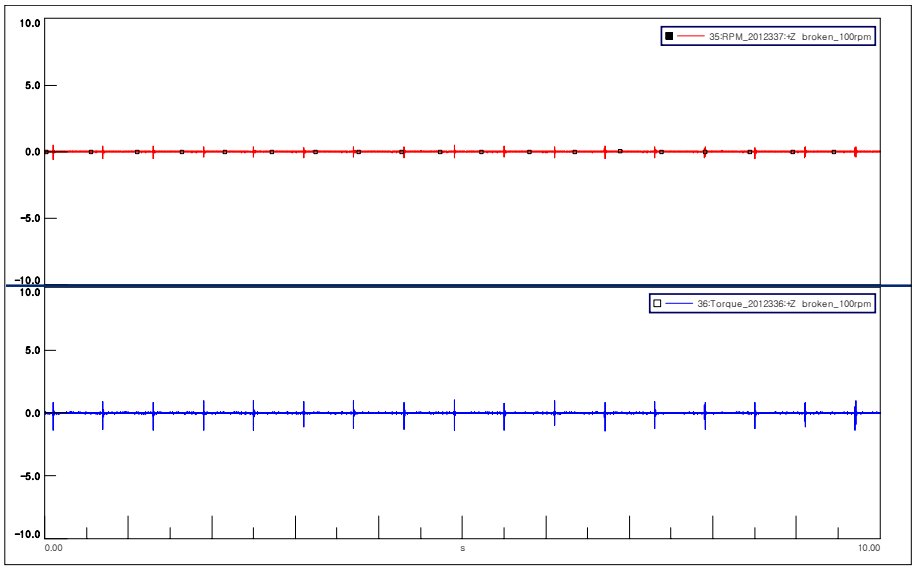



b) 300rpm

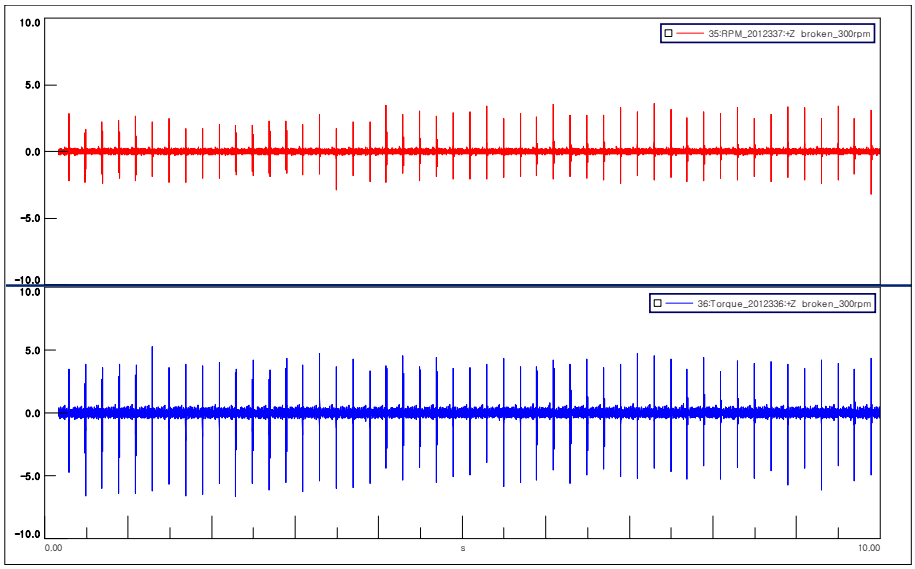



c) 500rpm

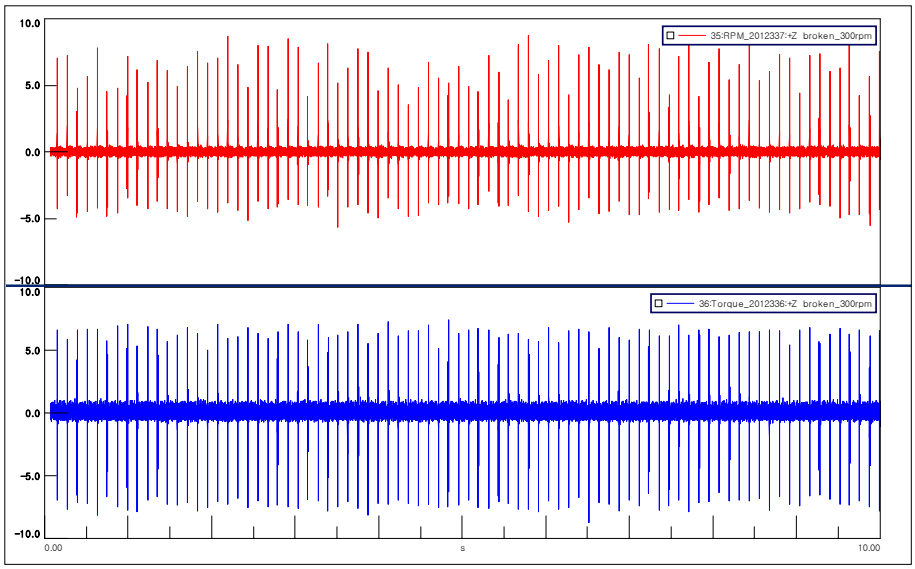
그림 2.3.58 시험편 4(치폭 3/4 균열)의 진동파형




a) 100rpm

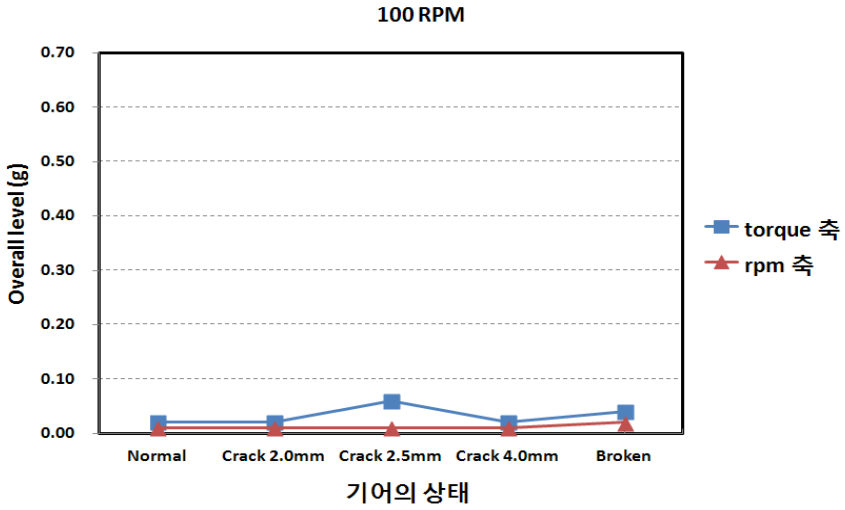



b) 300rpm

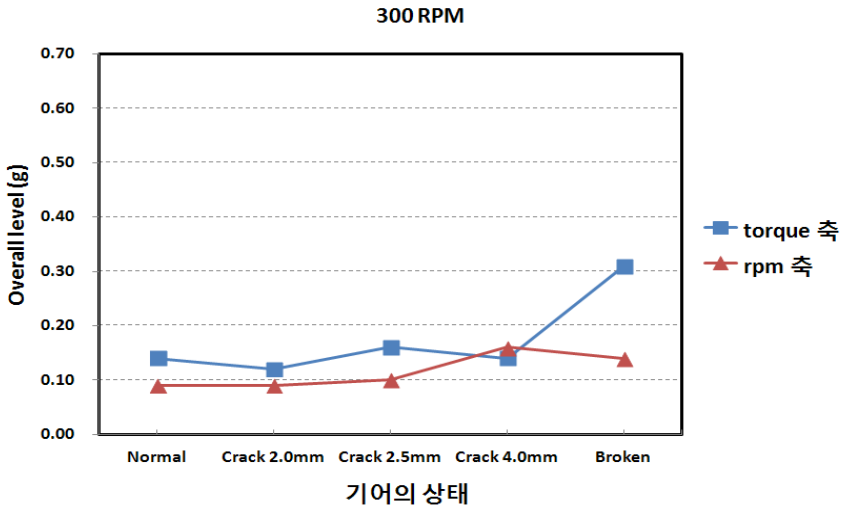



c) 500rpm

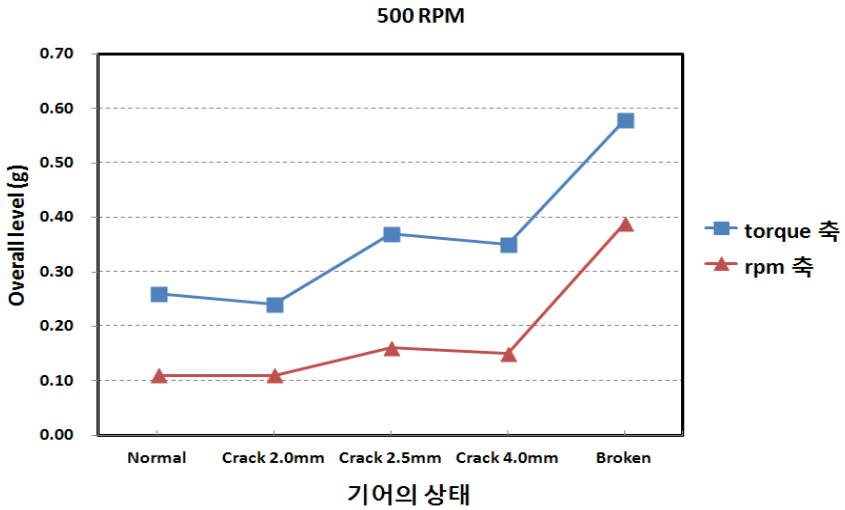
그림 2.3.59 시험편 5(기어 이 파손)의 진동파형




a) 100rpm

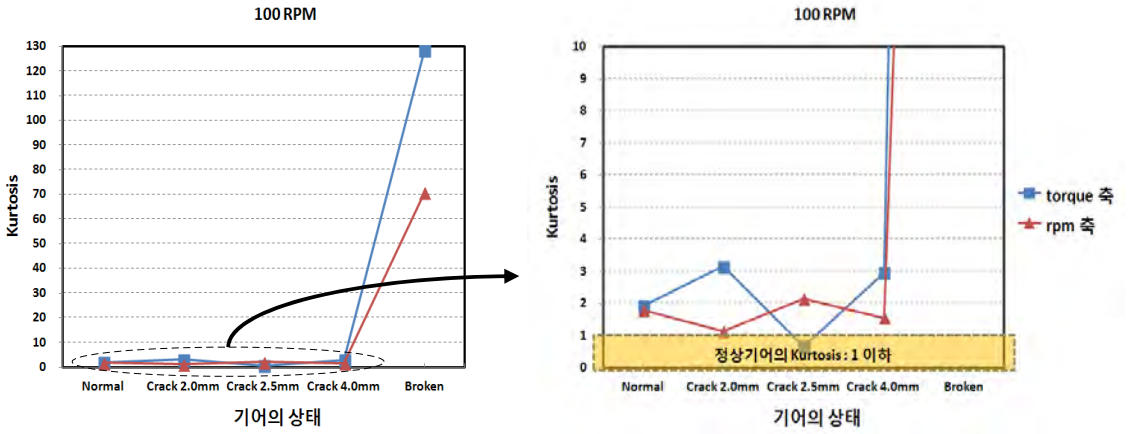



b) 300rpm

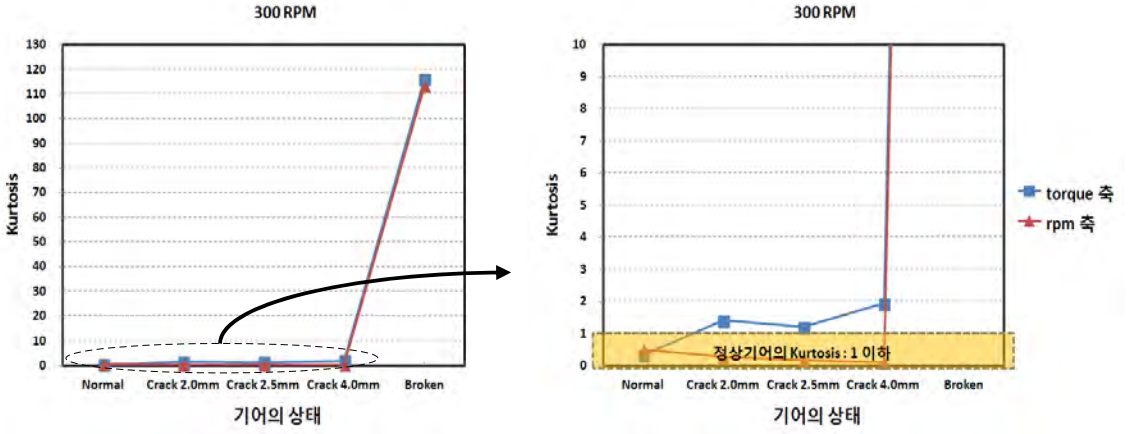



c) 500rpm

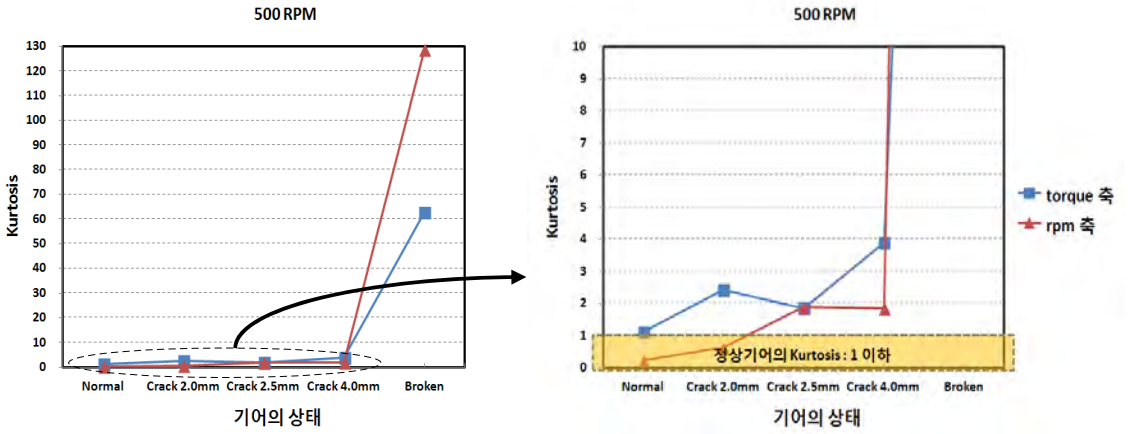
그림 2.3.60 rpm에 따른 RMS 크기 비교




a) 100rpm

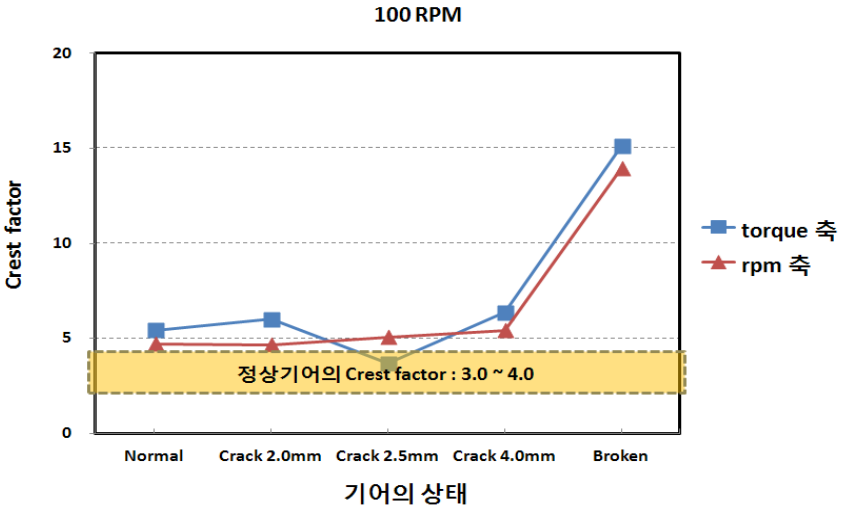



b) 300rpm

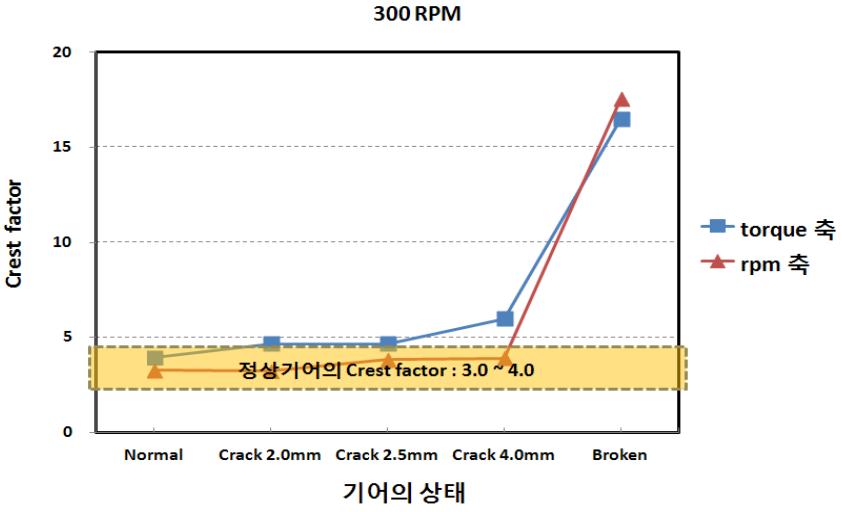



c) 500rpm

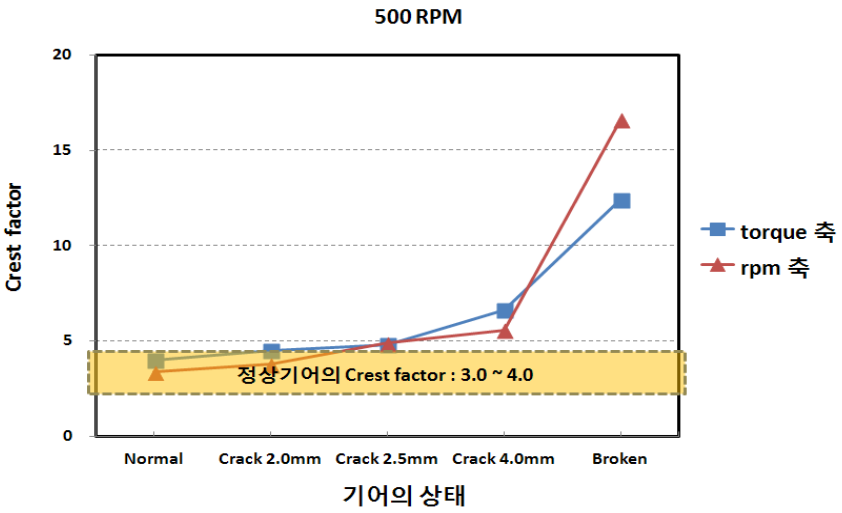
그림 2.3.61 rpm에 따른 첨도(Kurtosis) 변화




a) 100rpm




b) 300rpm




c) 500rpm

그림 2.3.62 rpm에 따른 파고율(Crest factor) 변화

라. 헬리컬 기어 파손 모드

(1) 시험 조건 및 방법

1차 감속기의 기어는 헬리컬 기어이다. 헬리컬 기어 시편 실험을 통하여 1차 감속기 이상상태를 모사하고자 한다.

실험 조건은 평기어 시편 시험처럼 속도 500 rpm, 토크 5 $kg_f \cdot m$이다. 헬리컬 기어 시편은 정상, 기어 이 한 개 50% 파손 및 80% 파손, 그리고 기어 이 한 개 절손이며 그림 2.3.63과 같다. 그리고 표 2.3.10은 각 기어의 스펙을 나타내었다.

(2) 시험 결과

그림 2.3.64는 결함 정도에 따른 평균 진동 값을 나타낸 것이다. 평기어 시편 실험 결과처럼 기어 이가 완전히 부러지지 않는 한 평균 진동 값은 크게 변화하지 않는다. 하지만 측정된 진동 레벨이 평기어 결과와 차이를 보인다. 평기어 실험에서 0.1 g~약 0.7 g의 진동값을 나타났듯이 본 실험에서도 약 0.22 g에서 약 0.5 g의 진동값을 보인다. 평균 진동레벨에서 많은 차이를 보이지 않는다.

그림 2.3.65는 결함 정도에 따른 평균 crest factor를 나타낸 것이다. 평균 crest factor 역시 acceleration 분석과 같은 결과를 보인다. 기어 이가 완전히 부러지지 않는 이상 평균 crest factor가 증가하지 않는다. 이것 역시 평기어 시편 실험 결과와 일치한다.

헬리컬 기어 시편 결과를 감속기 실물 실험 결과와 비교 시 손상에 따른 경향이 일치하지 않는다. 기어 시편 결과는 정상 기어와 파단 기어의 명확한 구분을 지을 수 있지만 실물 실험 결과는 평균 crest factor가 3~4의 값을 나타내어서 결함 유무를 구분할 수 없다.

그림 2.3.66은 평균 kurtosis를 보여준다. acceleration, crest factor 와 마찬가지로 기어 이가 완전히 부러지지 않는 이상 평균 kurtosis는 증가하지 않는다. 이 분석 역시 평기어 실험 결과와 일치한다.


(a) 정상 기어


(b) 50% 절손 기어


(c) 80% 절손 기어


(d) 완전 절손 기어

그림 2.3.63 헬리컬 기어 시편 종류

표 2.3.10 기어별 특성

| | 평기어 시편 | 헬리컬 기어 시편 | 모터 피니언 |
|---|---|---|---|
| 기어 잇수 | 23 | 22 | 27 |
| 헬리컬 각도 | – | 15° | 우측 15° |
| 물림율 | 1.6 | 1.78 | 2.7 |

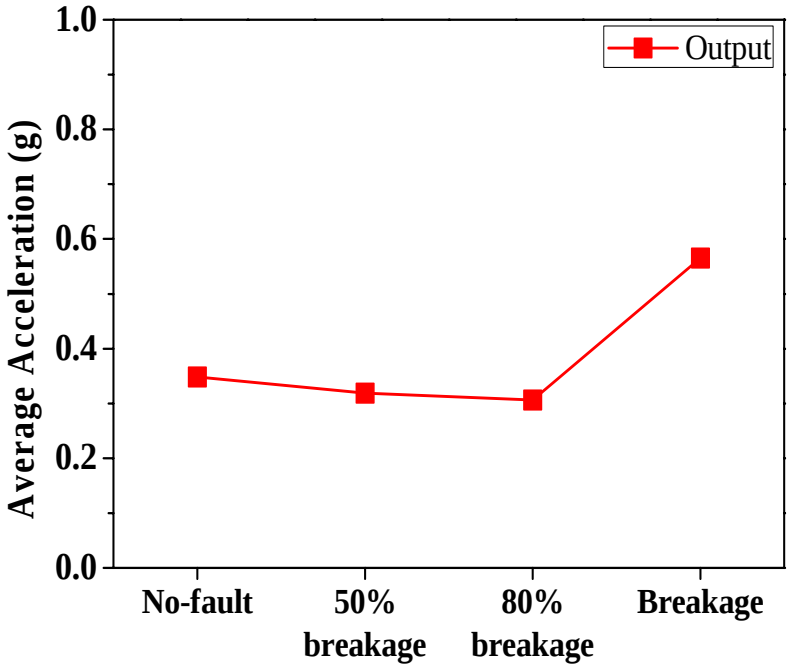



그림 2.3.64 Average acceleration of helical gear specimen test

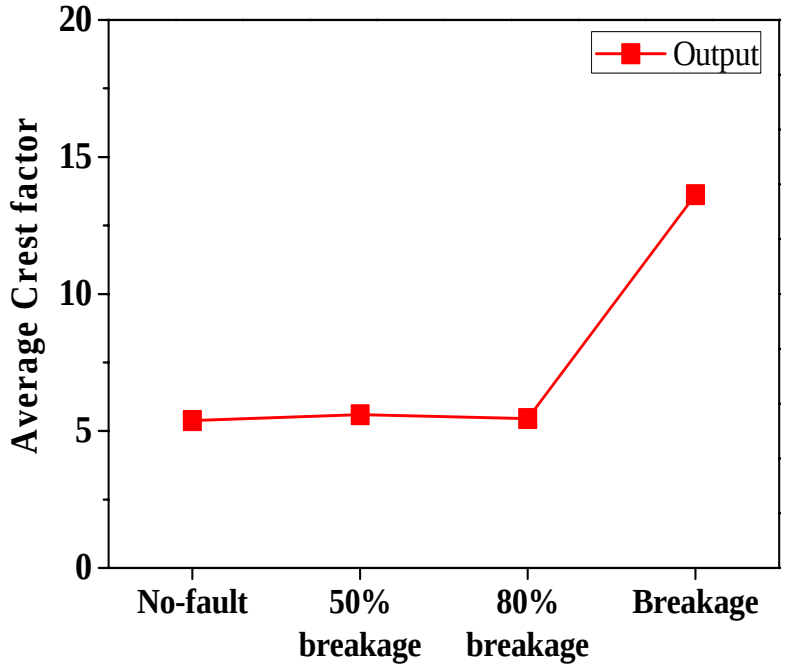



그림 2.3.65 Average crest factor of helical gear specimen test

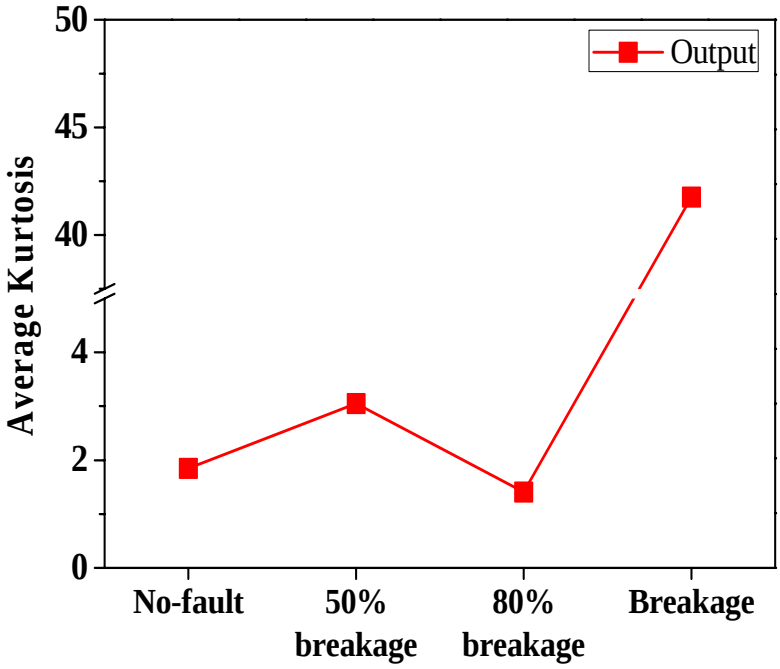



그림 2.3.66 Average kurtosis of helical gear specimen test

마. 평기어 치면 손상 모드

(1) 시험 조건 및 방법

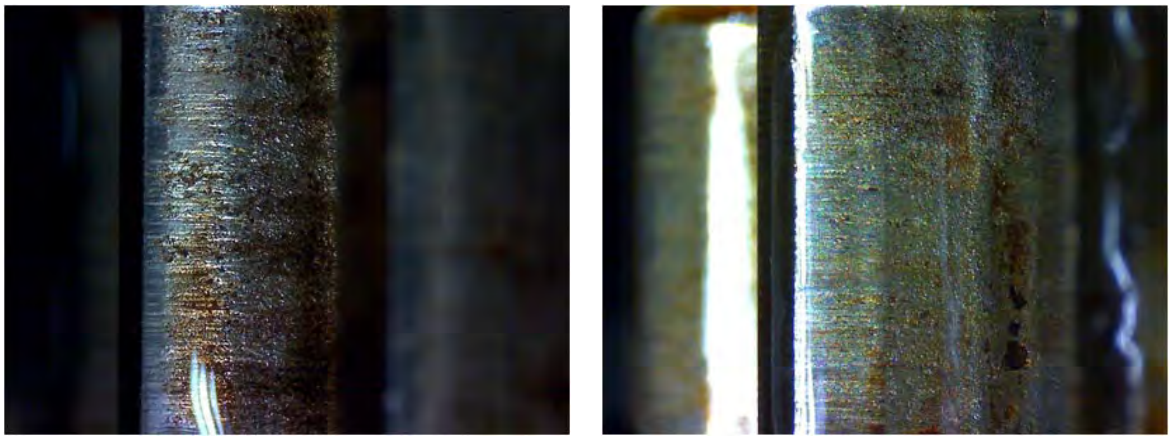
기어에 발생하는 주요한 손상 중 하나는 접촉피로하중에 의해 치면에 발생하는 피팅(Pitting)이다. 피팅은 기어의 파손과는 달리 접촉표면에 균열이 발생 및 진전하여 작은 조각이 떨어져 나감으로써 접촉면에 작은 홈이나 공동이 발생한다. 피팅을 생성하기 위해서는 반복적인 피로하중을 주어야 하고, 표면에 발생하는 마모와도 관련되기 때문에 원하는 피팅을 생성하기는 어렵다. 본 시험에서는 피팅을 생성하기 위하여 반복적인 하중을 부가한 후 주기적으로 현미경을 통하여 관찰하였다. 그림 2.3.67은 시험편 표면에 발생한 피팅을 보여주고 있다. 그림 2.3.67 a)는 8만 싸이클 시험 후 표면에 미세한 피팅이 발생한 상태이고, 그림 2.3.67 b)는 300 만 싸이클 시험 후 표면에 발생한 피팅 상태를 나타낸다.

(2) 시험 결과

그림 2.3.68 ~ 2.3.70은 시험편 조건에 따라서 발생한 진동 파형이다. 그림 2.3.68은 정상상태에서 발생한 진동 파형으로써, 입력측과 출력측의 진동크기가 차이를 보이고 있다. 100 rpm에서는 입력측의 진동크기는 0.05 g가 발생하였고, 출력측의 진동크기는 0.12 g이다. 속도가 증가함으로써 진동크기가 크게 발생하고 있으며, 300 rpm에서 출력측의 진동 크기는 0.5 g, 500 rpm에서 진동크기는 1.0 g가 발생하였다. 그림 2.3.69 및 2.3.70은 시험편 2(피팅조건 2)와 시험편 3(피팅조건 3)에서 발생한 진동파형으로써, 전반적인 크기와 경향이 유사하게 발생하고 있고, 속도가 증가 할수록 진폭이 크게 발생하였다.

표 2.3.11 시험편조건

| 시험편번호 | 시험편 조건 | Cycle |
|---|---|---|
| 1 | 정상조건 | x |
| 2 | 피팅조건 1 | 8만 |
| 3 | 피팅조건 2 | 300만 |



a) 피팅 조건 1　　b) 피팅 조건 2

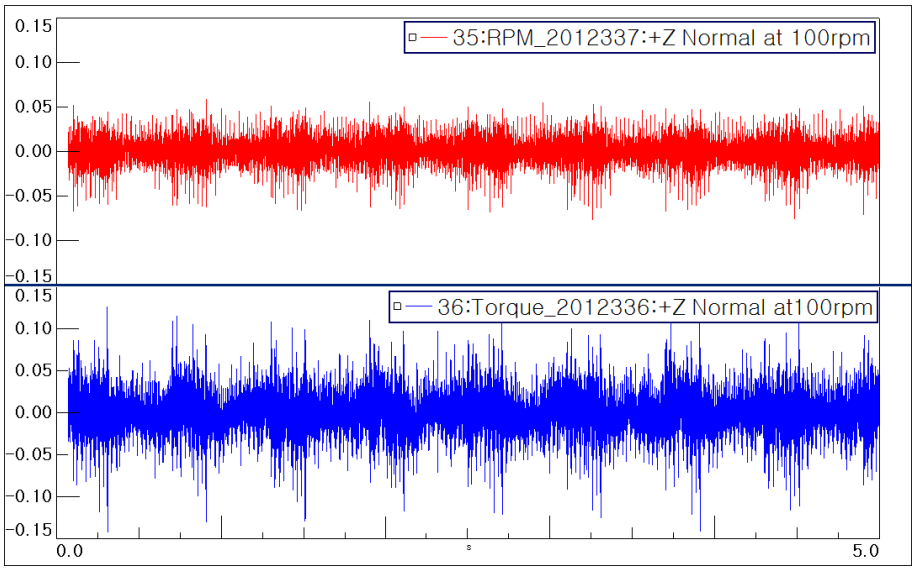
그림 2.3.67 시험편에 발생한 pitting

그림 2.3.71은 각각의 시험편에 대해서 rpm에 따른 RMS의 크기 변화이다. 100 rpm에서는 RMS의 크기가 0.05g 이하가 발생하였고, 피팅조건에 따라서 크기변화가 미미하였다. 300 rpm 및 500 rpm 역시 전반적인 RMS 크기는 증가하였으나, 피팅조건에 따른 차이를 발견하기는 어렵다.

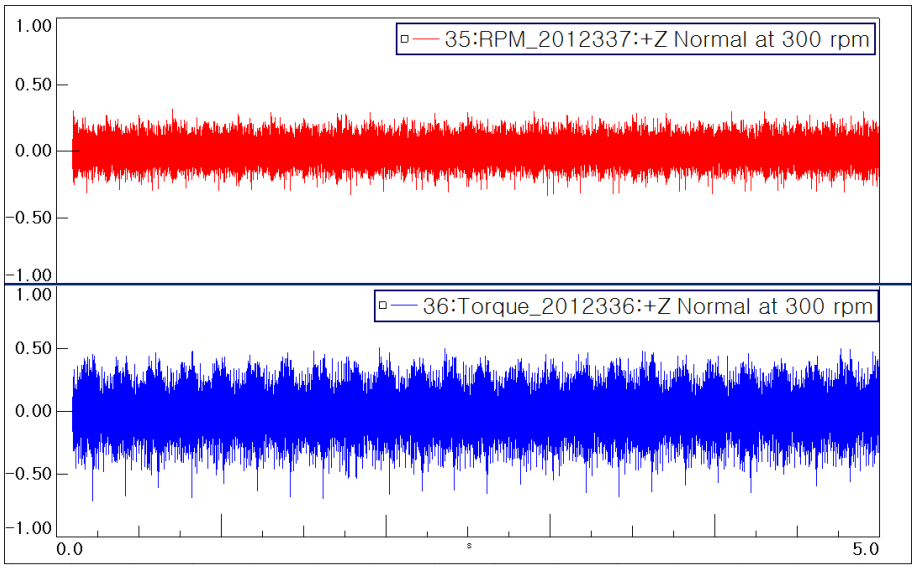
그림 2.3.72는 rpm에 따른 첨도변화이다. rpm 100에서는 정상상태가 가장 작게 발생하고, 피팅 1이 가장 크게 발생하고 있다. rpm 300에서는 정상상태가 가장 크게 발생하고 피팅이 있을 경우에 작게 발생하고 있으며, rpm 500에서도 정상상태 및 피팅상태에 따른 차이를 발견하기는 어렵다.

그림 2.3.73은 rpm에 따른 파고율 변화이다. rpm 100에서는 정상상태와 피팅상태의 파고율의 크기 변화가 크기 않아서 차이를 구별하기 어렵다. rpm 300 및 500 역시 시험편의 종류와 상관없이 전반적인 크기 변화가 크기 않기 때문에 차이를 구별하기가 어렵다.

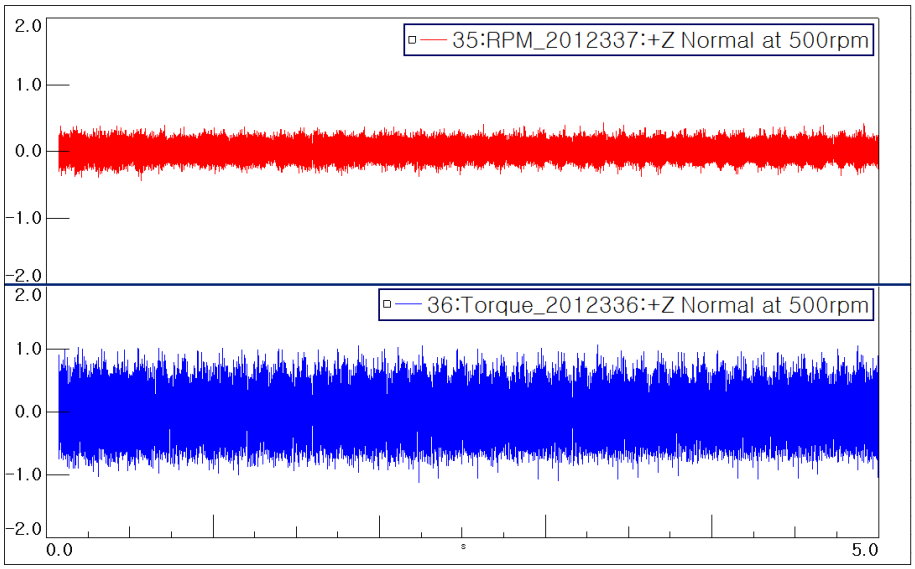
반복적인 피로하중에 의하여 피팅을 발생시켜서 진동시험한 결과, 시험편 종류에 상관없이 전반적인 진동신호의 차이를 발견하기가 어려웠다. 피로시험을 통하여 원하는 피팅을 발생시키는 것은 어려웠고, 발생된 피팅 크기가 진동에 영향을 줄 만큼의 크기가 아니기 때문이다.




a) 100rpm

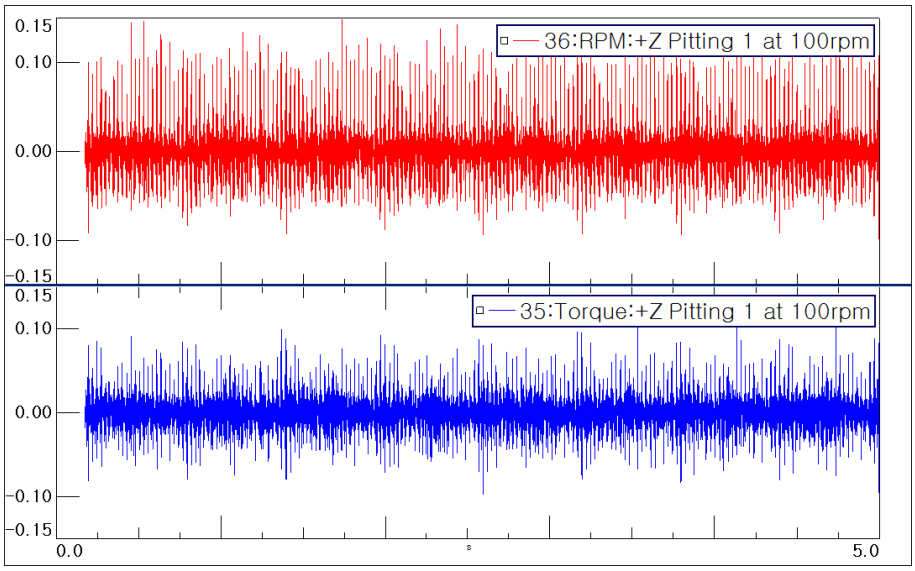



b) 300rpm

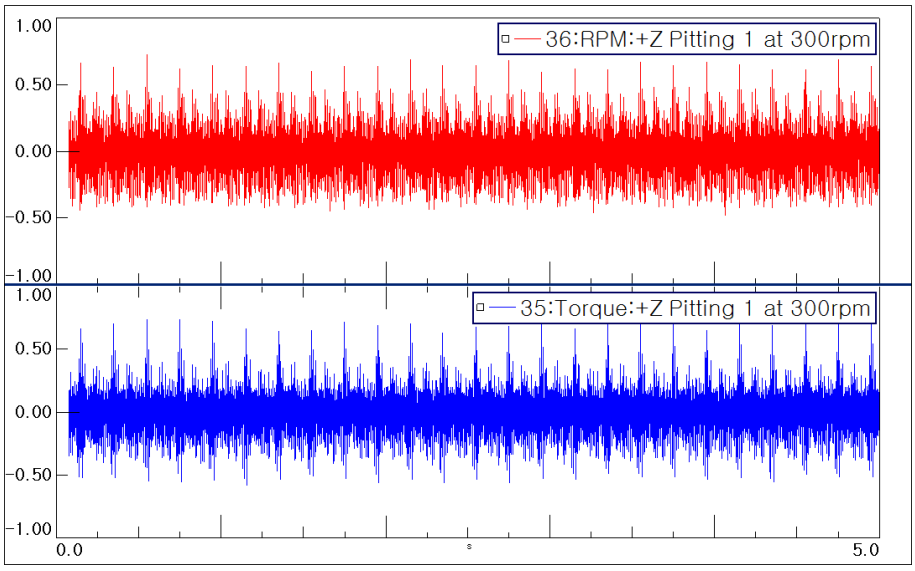



c) 500rpm

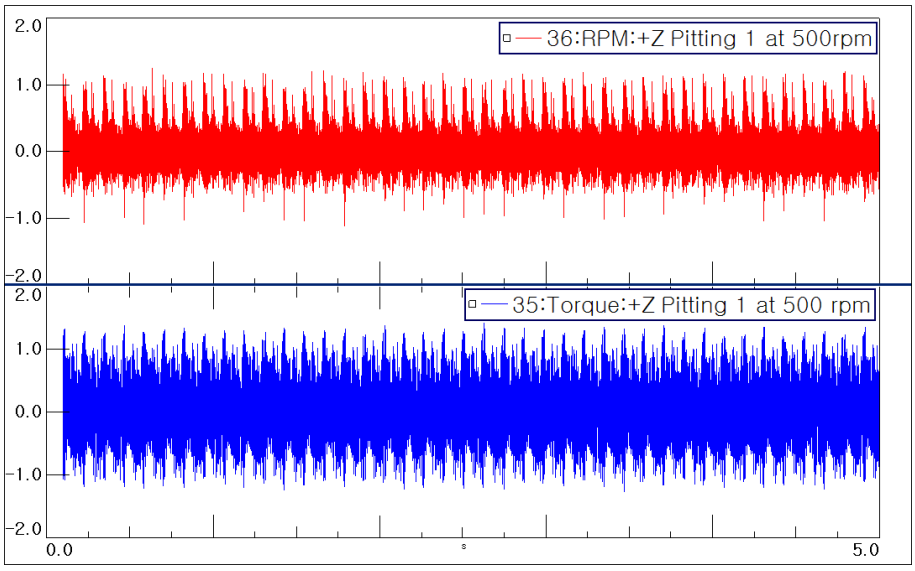
그림 2.3.68 시험편 1(정상 시험편)의 진동파형




a) 100rpm

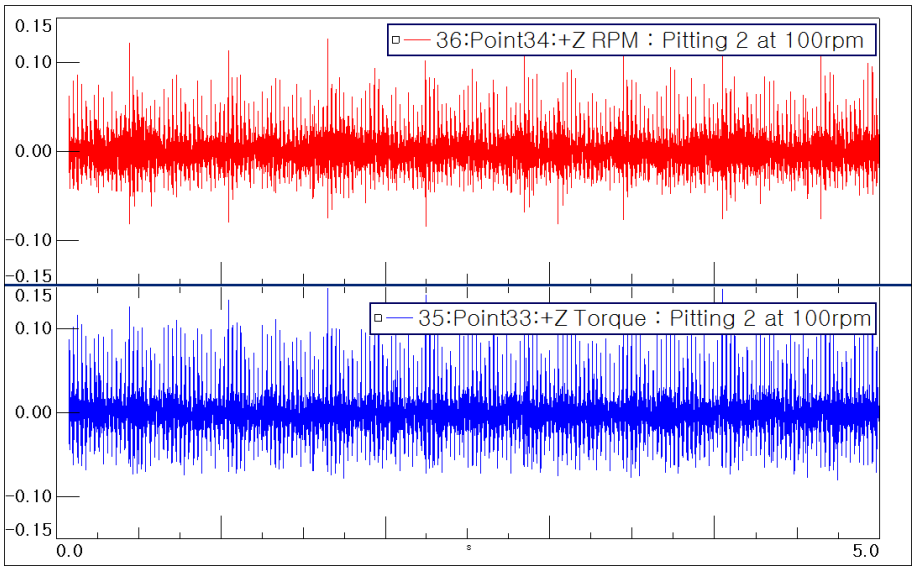



b) 300rpm

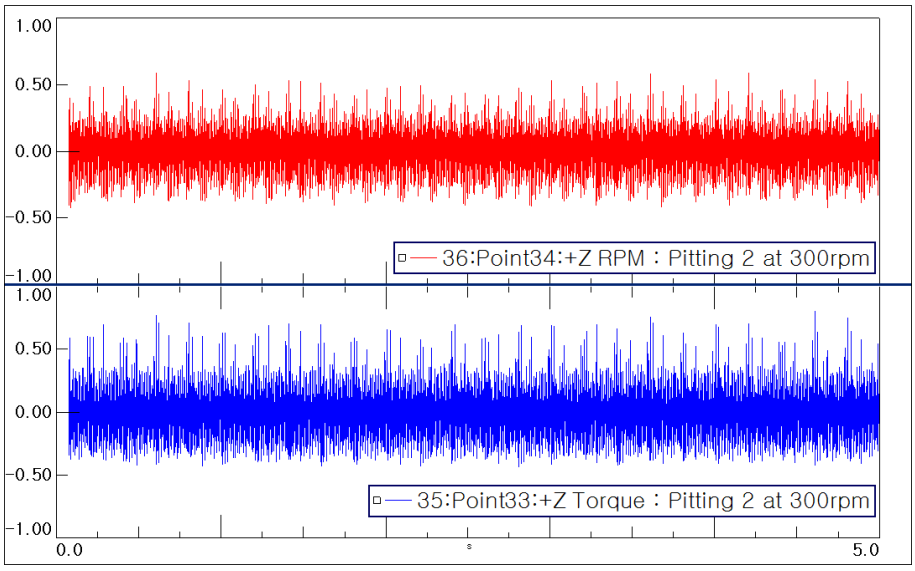



c) 500rpm

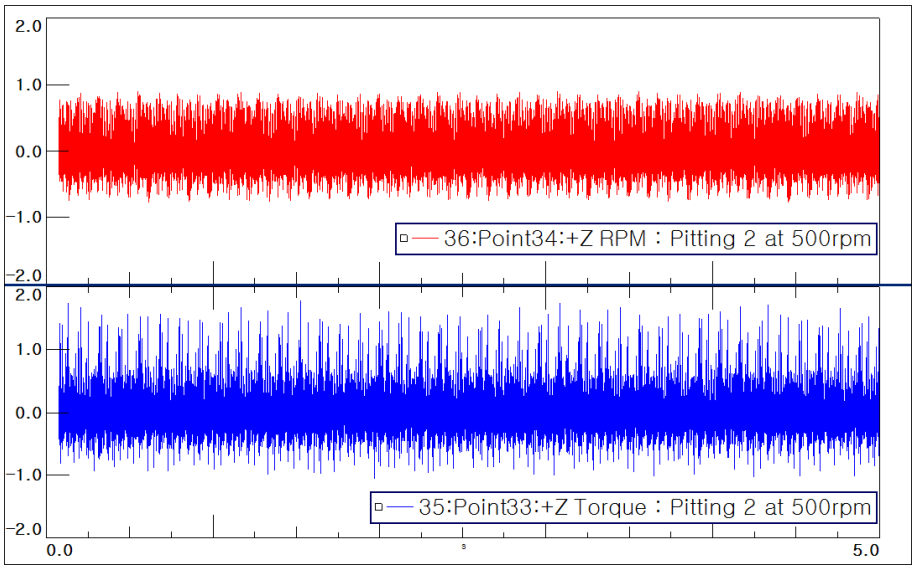
그림 2.3.69 시험편 2(피팅조건 1)의 진동파형




a) 100rpm

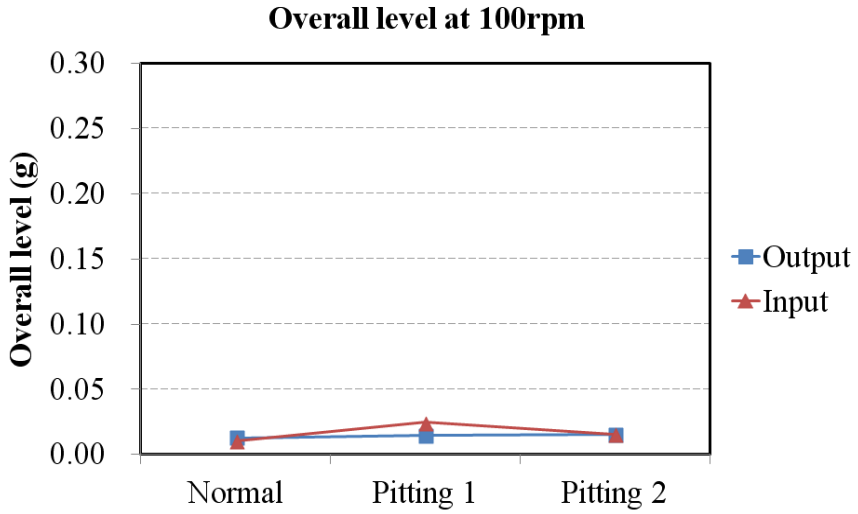



b) 300rpm

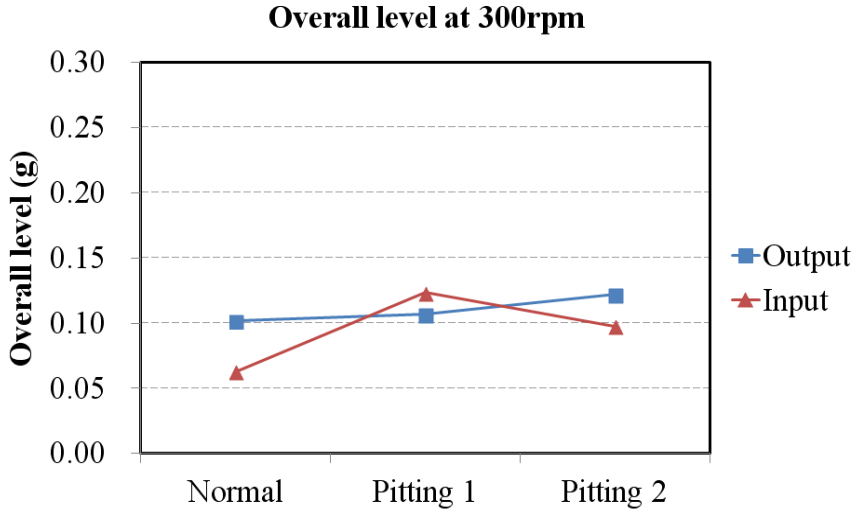



c) 500rpm

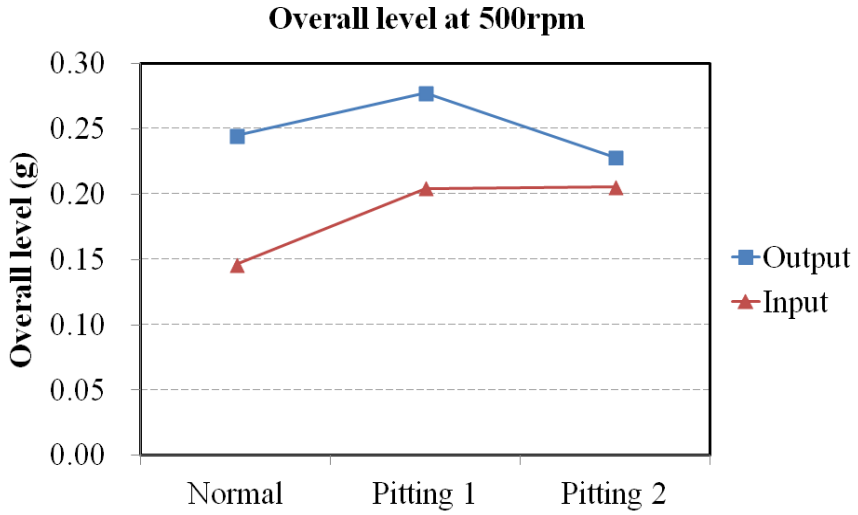
그림 2.3.70 시험편 3(피팅조건 2)의 진동파형




a) 100rpm

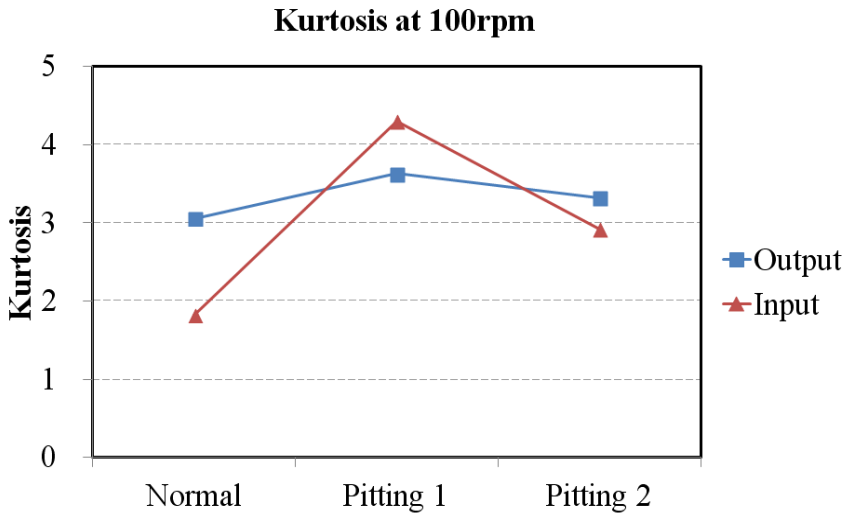



b) 300rpm

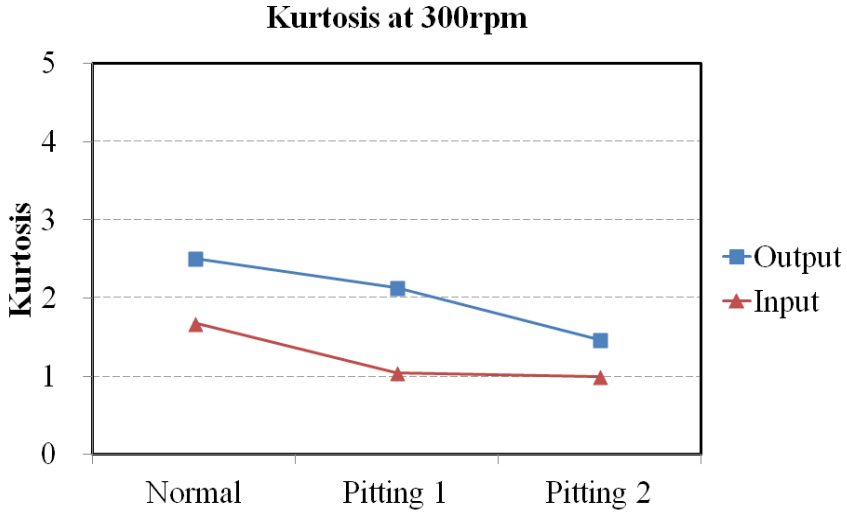



c) 500rpm

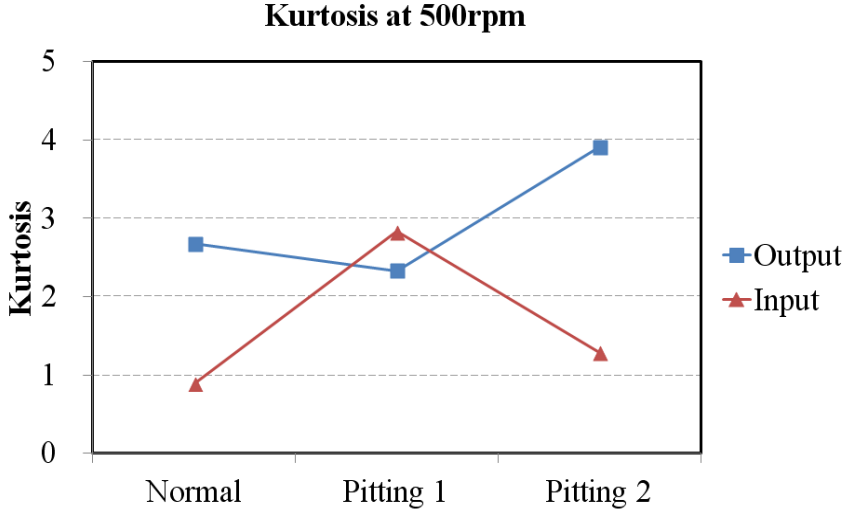
그림 2.3.71 rpm에 따른 RMS 크기 비교




a) 100rpm

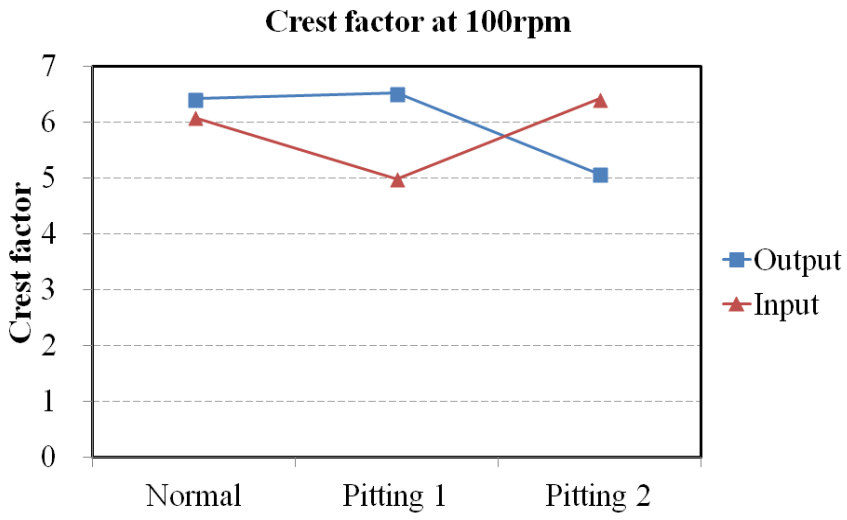



b) 300rpm

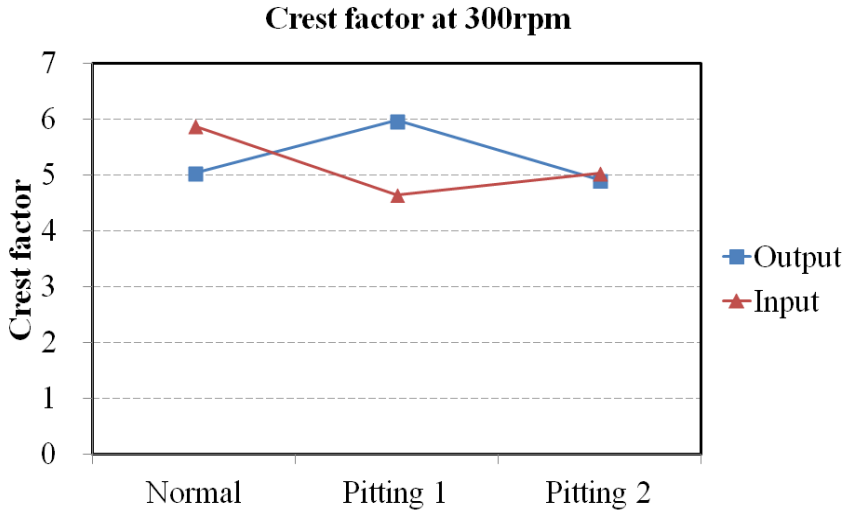



c) 500rpm

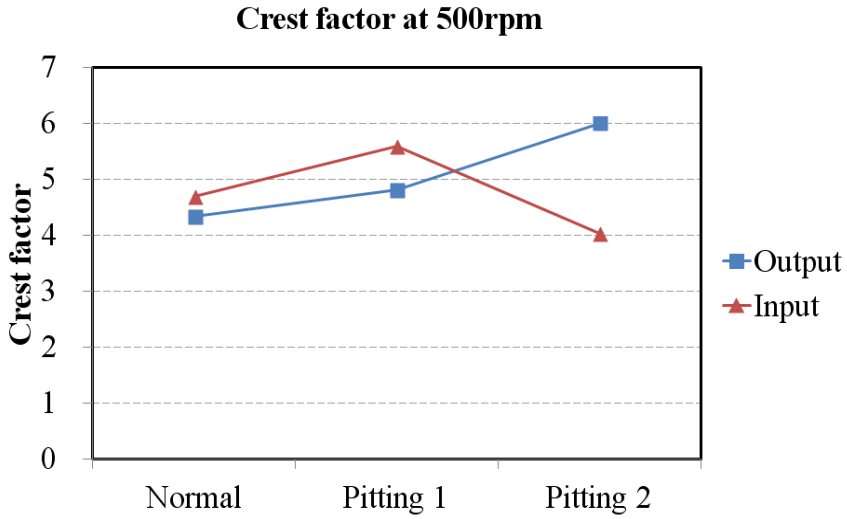
그림 2.3.72 rpm에 따른 첨도(Kurtosis) 변화




a) 100rpm




b) 300rpm




c) 500rpm

그림 2.3.73 rpm에 따른 파고율(Crest factor) 변화

바. 평기어 인공 피팅 손상 모드

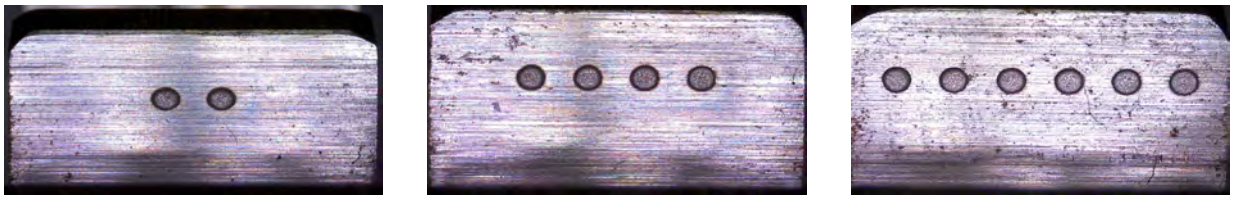
(1) 시험편 가공

반복적인 피로시험을 통하여 원하는 피팅조건을 발생시키기 어렵기 때문에 접촉표면에 인공적으로 피팅을 발생 시켰다. 피팅은 표면을 인공적으로 부식 시켰으며, 3가지 종류로 제작하였다. 표 2.3.12는 시험편 종류 및 조건을 나타내고 있다.

그림 2.3.74는 인공적인 피팅을 삽입한 시험편 형상을 보여주고 있다. 피팅은 2개, 4개 및 6개를 각각의 시험편에 삽입하였다.

표 2.3.12 인공 결함을 삽입한 시험편 조건

| 시험편번호 | 시험편 조건 | 비고 |
|---|---|---|
| 1 | 정상조건 | |
| 2 | 피팅 2개 | A.P 2 |
| 3 | 피팅 4개 | A.P 4 |
| 4 | 피팅 6개 | A.P 6 |



a) 시험편 2 (피팅2개) b) 시험편 3 (피팅4개) c) 시험편 4 (피팅6개)

그림 2.3.74 인공적인 피팅 형상

(2) 시험결과

그림 2.3.75 ~ 2.3.77 은 시험편 조건에 따라서 발생한 진동 파형이다. 피팅 상태에 상관없이 300 rpm과 500 rpm을 제외하고 100 rpm에서 입력축이 출력축보다 큰 진동을 보이고 있다.

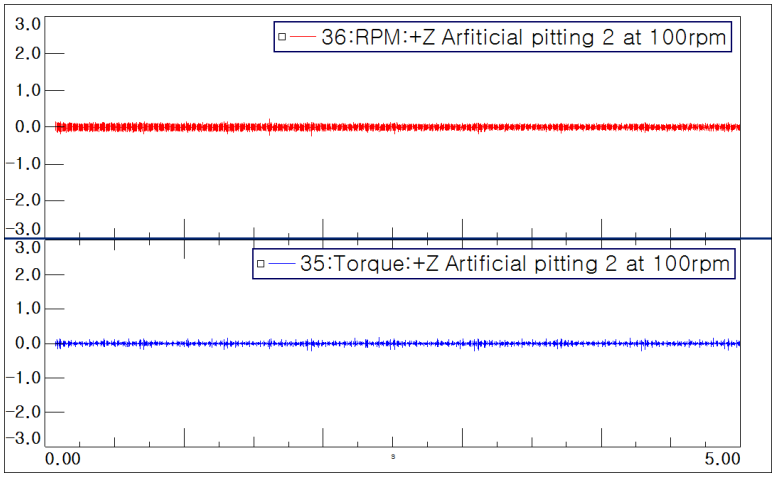
그림 2.3.78은 각각의 시험편에 대해서 rpm에 따른 RMS의 크기 변화이다. 100 rpm에서는 RMS의 크기가 0.1g 이하가 발생하였고 피팅 조건에 따라서 크기 변화가 미미하였다. 그리고 입력측이 출력측보다 RMS가 크게 나타났으나 300 rpm과 500 rpm에서는 출력측이 입력측보다 크게 나타났다. 300 rpm 및 500 rpm 역시 전반적인 RMS 크기는 증가하였으나 500 rpm의 결과를 제외하면 피팅 조건에 따른 차이를 발견하기는 어렵다.

그림 2.3.79는 rpm에 따른 첨도 변화이다. 100 rpm에서 피팅 상태에 따라서 그 크기가 증가하고 있다. 300 rpm에서는 피팅 개수가 적은 것이 가장 크게 발생하였다. 500 rpm에서는 피팅 상태에 따른 차이를 발견하기는 어렵다.

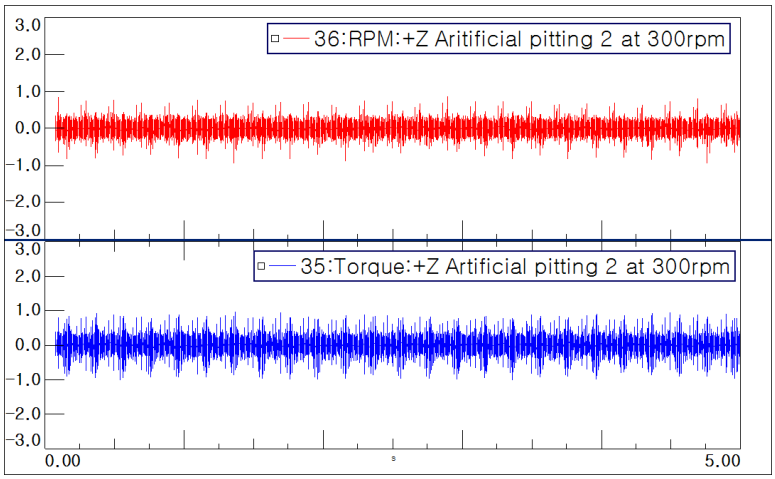
그림 2.3.80은 rpm에 따른 파고율 변화이다. 100 rpm에서는 첨도 변화처럼 피팅 상태에 따라 그 크기가 증가하였다. 하지만 300 rpm 및 500 rpm에서는 피팅 상태 변화와 상관없이 전반적인 크기 변화가 크지 않기 때문에 차이를 구별하기가 어렵다.

인공적인 피팅을 발생시켜서 진동 시험한 결과 기어 시편 상태와 상관없이 rpm이 증가할수록 RMS의 크기는 증가하였지만 첨도와 파고율은 낮아지는 경향을 보였다. 즉, 정상 상태에서 나타나

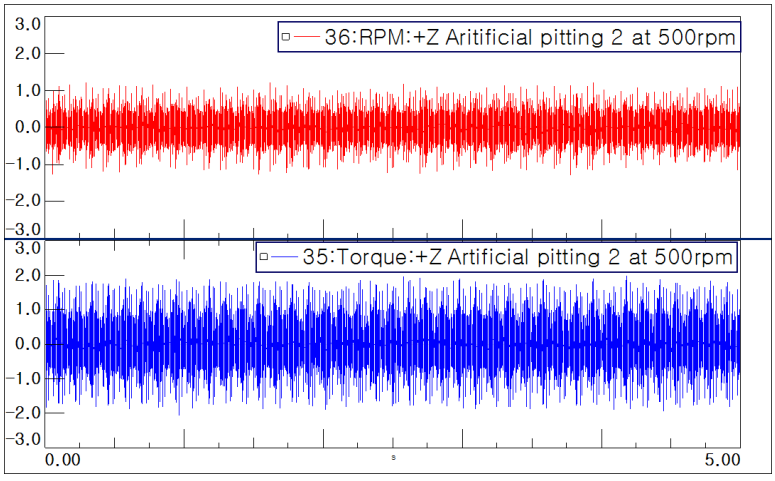
는 첨도는 1이하, 파고율은 3~6의 값을 보였다. 따라서 시험편 종류에 상관없이 전반적인 진동신호의 차이를 발견하기 어려웠다. 이러한 결과가 나타난 것은 보통 피팅은 피치선 아래에서 발생하는 데 본 실험에서 인공적으로 발생시킨 피팅이 피치선보다 위쪽에 형성되어 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다. 또한, 기어의 피팅에 의한 진동의 영향이 작아서 시험기에서 발생하는 진동이 기어의 피팅에 의해 발생되는 진동보다 크기 때문에 피팅에 의한 진동의 영향의 차이를 발견하기 어려운 것으로 판단된다.




a) 100rpm

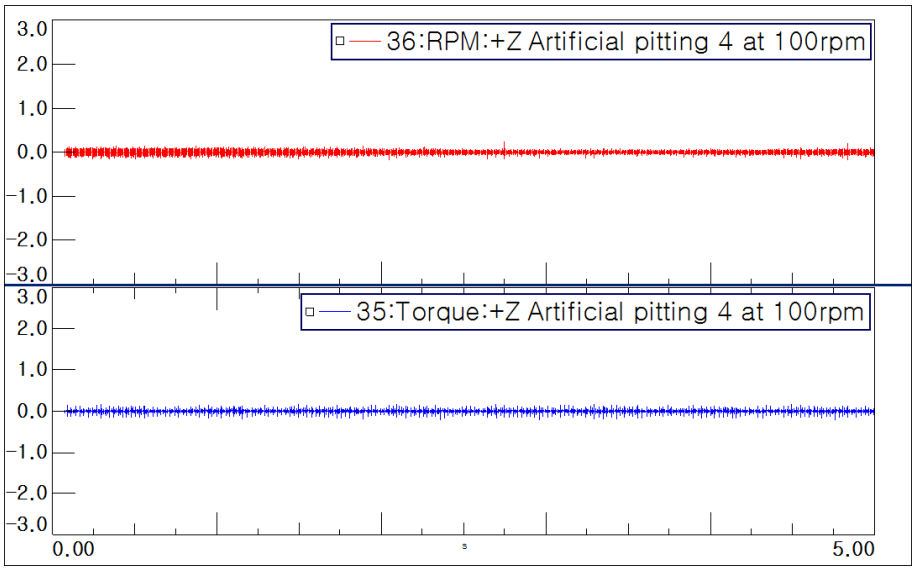



b) 300rpm

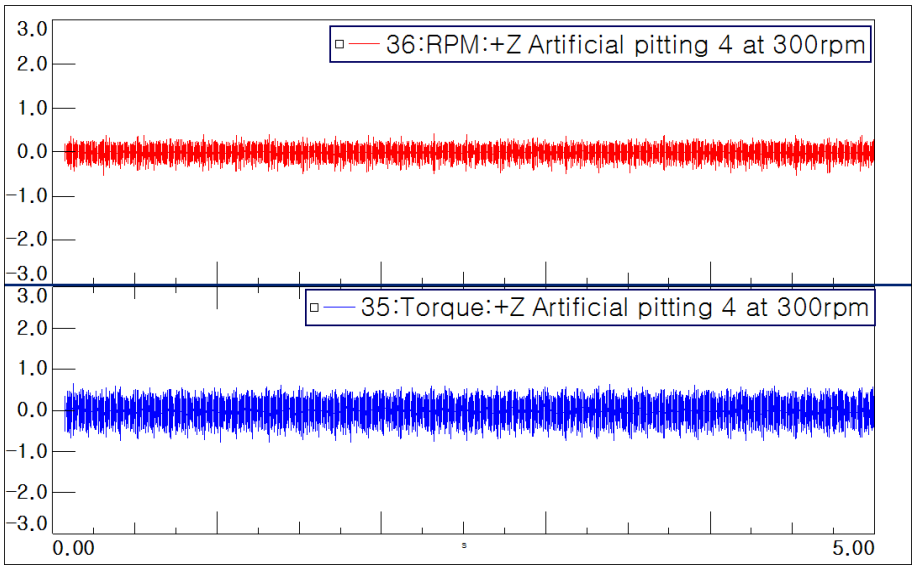



c) 500rpm

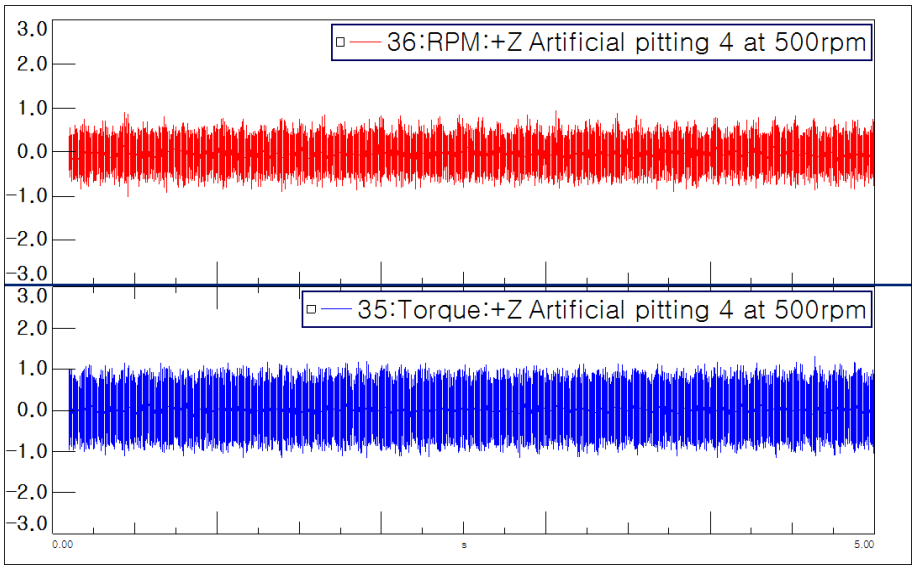
그림 2.3.75 시험편 2(피팅 2개)의 진동 파형




a) 100rpm

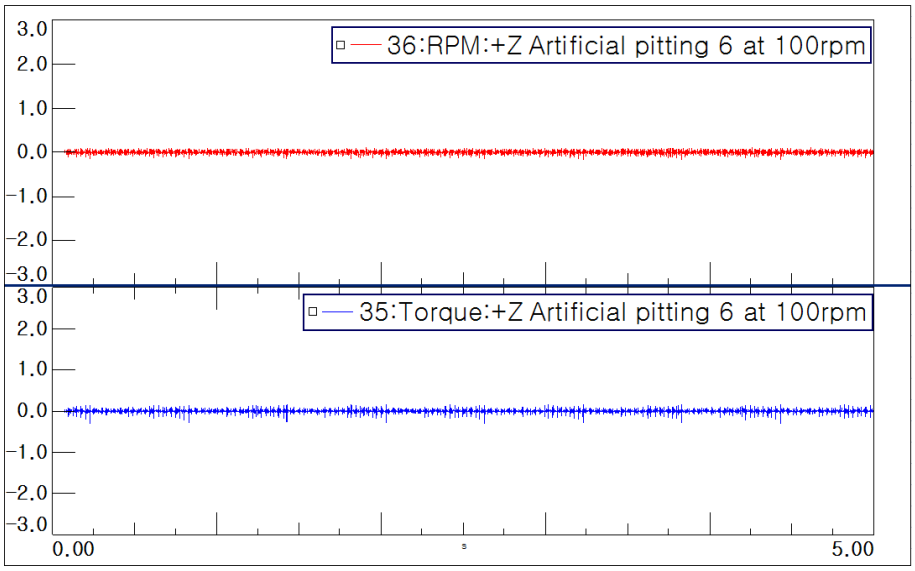



b) 300rpm

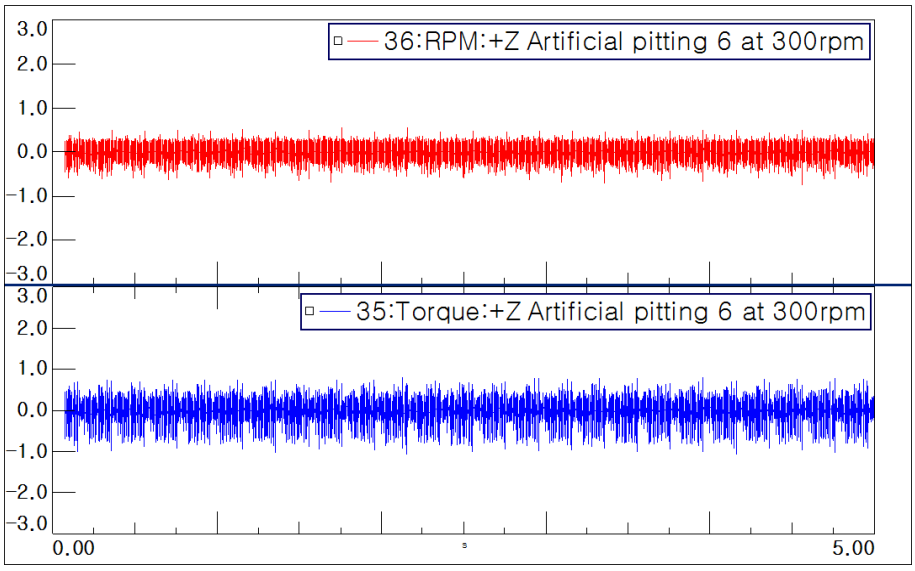



c) 500rpm

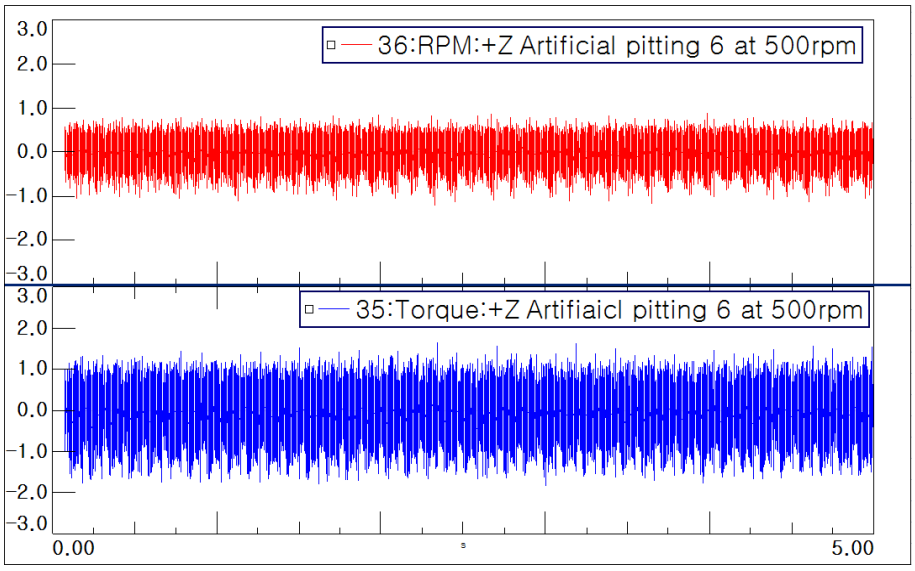
그림 2.3.76 시험편 3(피팅 4개)의 진동 파형




a) 100rpm

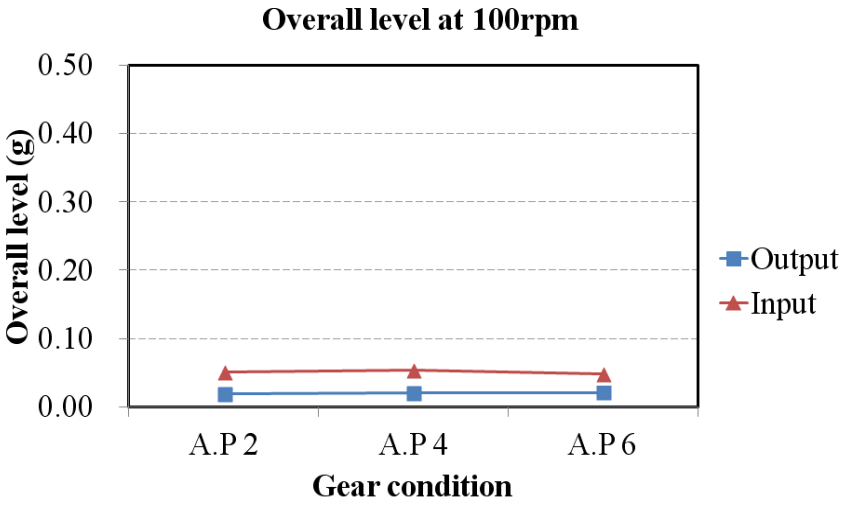



b) 300rpm

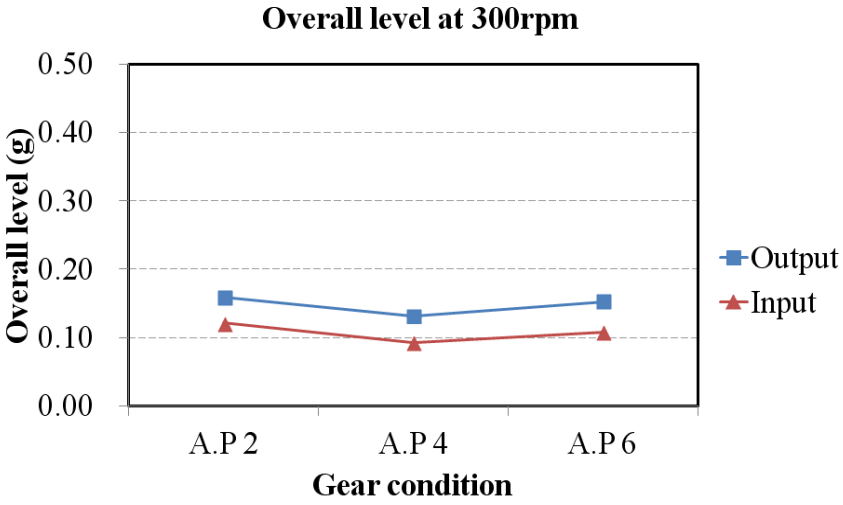



c) 500rpm

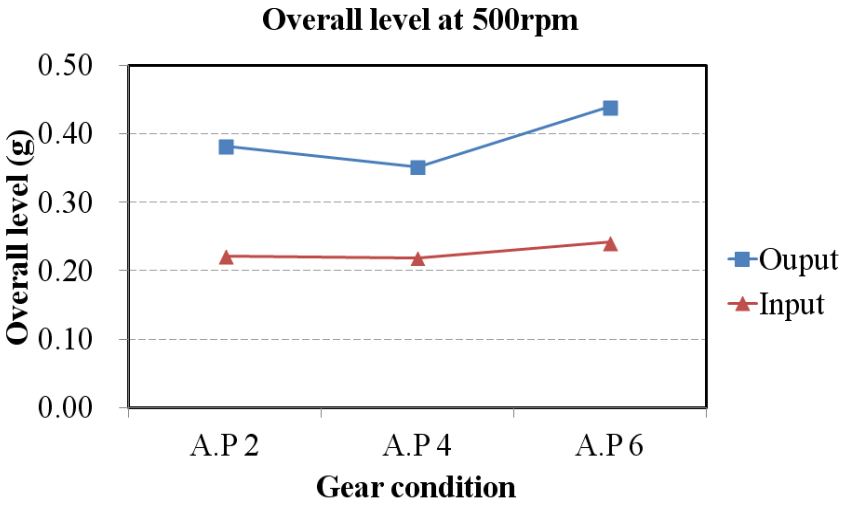
그림 2.3.77 시험편 4(피팅 6개)의 진동 파형




a) 100rpm

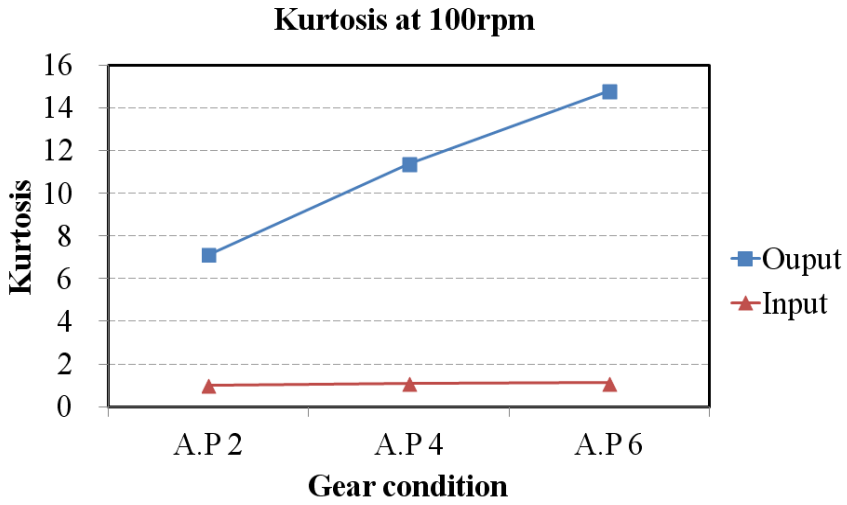



b) 300rpm

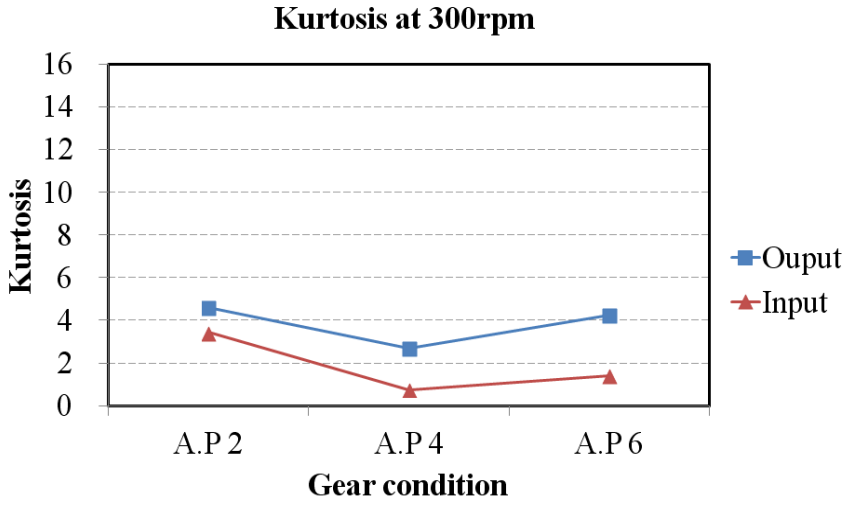



c) 500rpm

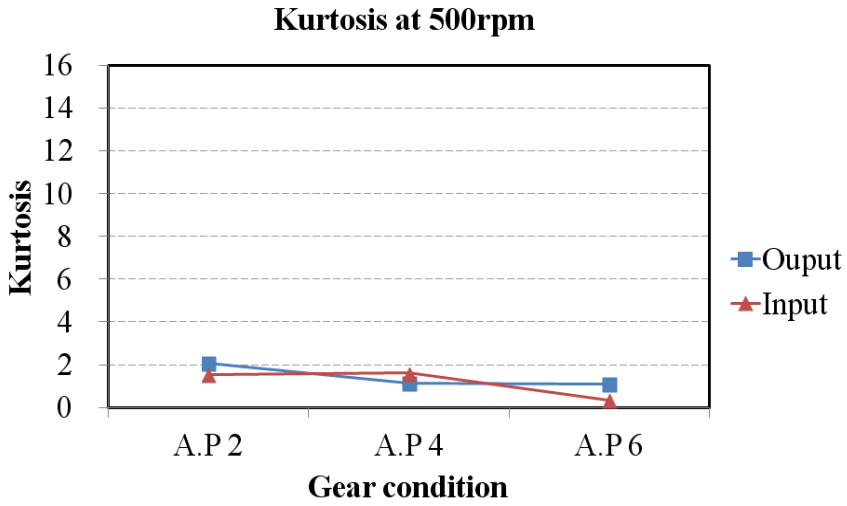
그림 2.3.78 rpm에 따른 RMS 크기 비교




a) 100rpm

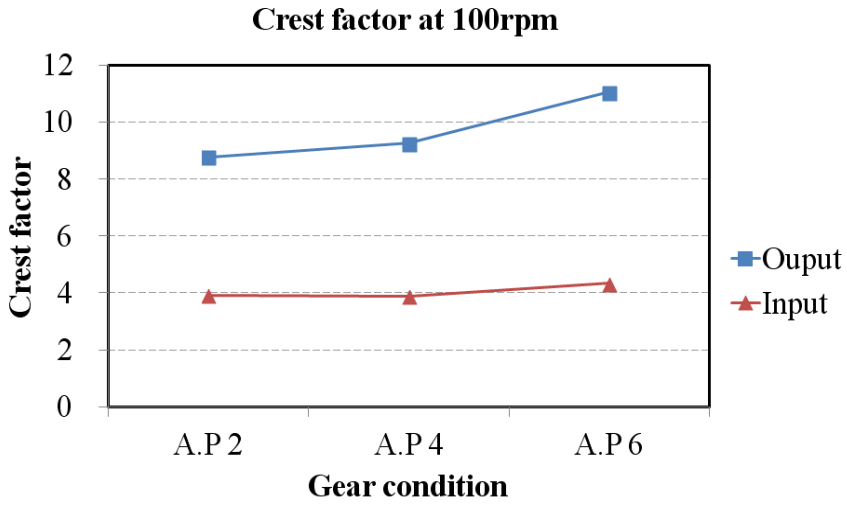



b) 300rpm

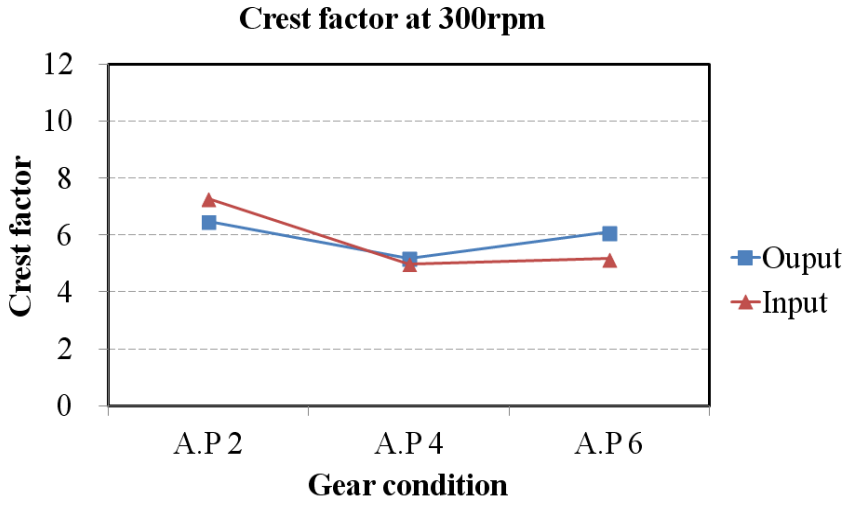



c) 500rpm

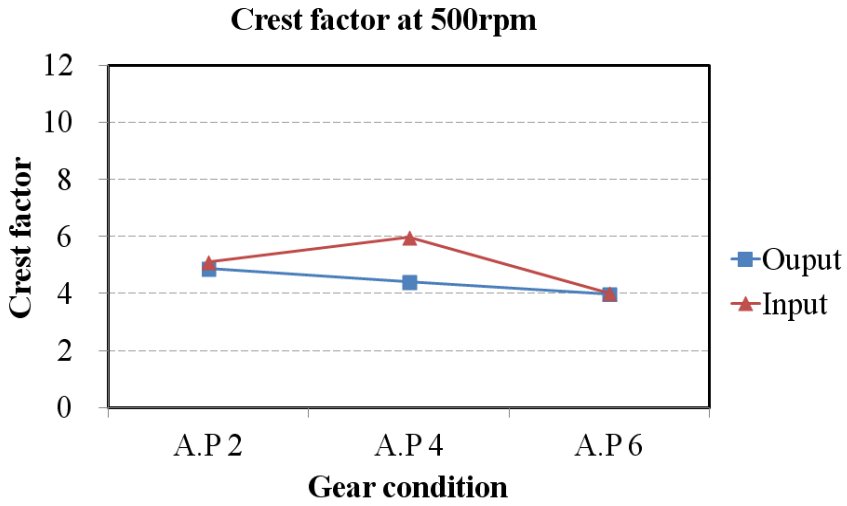
그림 2.3.79 rpm에 따른 첨도(Kurtosis) 변화




a) 100rpm




b) 300rpm




c) 500rpm

그림 2.3.80 rpm에 따른 파고율(Crest factor) 변화

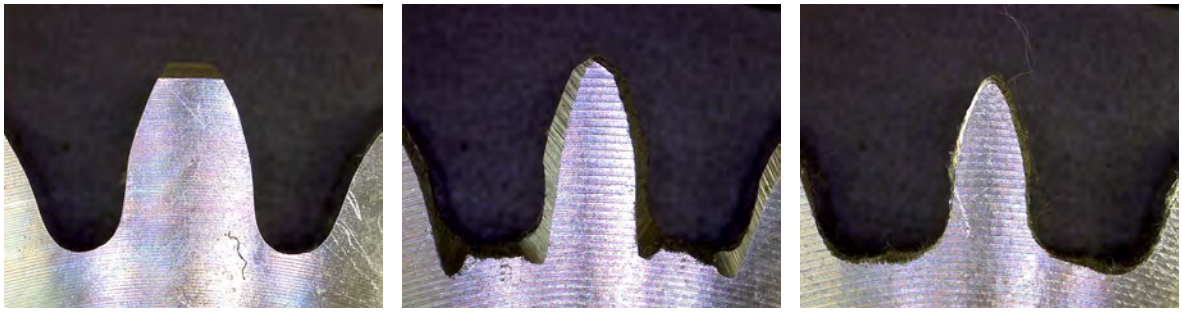
사. 평기어 인공 마모 모드

(1) 시험편 가공

기어는 접촉에 의해서 하중을 전달하기 때문에, 접촉면에서 마모가 발생한다. 일반적으로 접촉면에 열처리를 통하여 마모량을 감소시키지만 필연적으로 마모가 발생한다. 치면의 마모량에 따른 진동 특성을 평가하기 위해서 반복적인 시험을 통하여 치면에 마모를 시켜야 한다. 그러나 이러한 마모 시험은 시간과 비용적인 측면뿐만 아니라 원하는 깊이만큼 마모시키가 어렵다. 따라서 기어 치면에 인공적인 가공을 통하여 마모시험편을 제작하였다. 표 2.3.13은 시험편 종류를 나타내고 있으며, 3가지의 시험편을 준비하였다. 정상적인 시험편, 치면에 0.5 mm를 가공한 시험편과 1.0 mm를 가공한 시험편이다. 그림 2.3.81은 마모시험편 형상을 나타내고 있다.

표 2.3.13 인공 마모를 삽입한 시험편 조건

| 시험편번호 | 시험편 조건 | 비고 |
|---|---|---|
| 1 | 정상 | Normal |
| 2 | 0.5 mm 마모 | Wear 1 |
| 3 | 1 mm 마모 | Wear 2 |



정상 (Normal) 마모 1 (Wear 1) 마모 2 (Wear 2)

그림 2.3.81 인공 마모 형상

(2) 시험결과

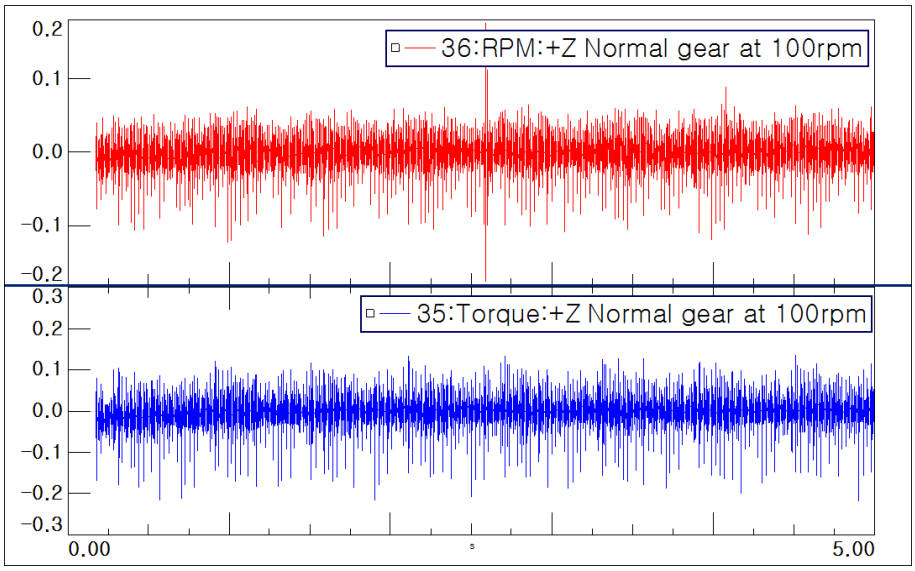
그림 2.3.82 ~ 2.3.84는 시험편 조건에 따라서 발생한 진동 파형이다. 시험편의 종류에 상관없이 rpm이 증가함에 따라 진동크기가 증가하였고, 출력측이 입력측보다 큰 진동을 보이고 있다.

그림 2.3.85는 각각의 시험편에 대해서 rpm에 따른 RMS의 크기 변화이다. 100 rpm에서는 RMS의 크기가 0.02 g 이하가 발생하였고 마모 조건에 따라서 크기 변화가 미미하였으며, 입력측이 출력측보다 RMS가 크게 발생하였다. 300 rpm 및 500 rpm의 경우에는 정상상태보다 마모상태의 RMS의 크기가 작게 발생하고 있고, 마모조건 1(치면 0.5 mm마모)과 마모조건 2(치면 1.0 mm마모)의 시험편은 크기가 유사하다.

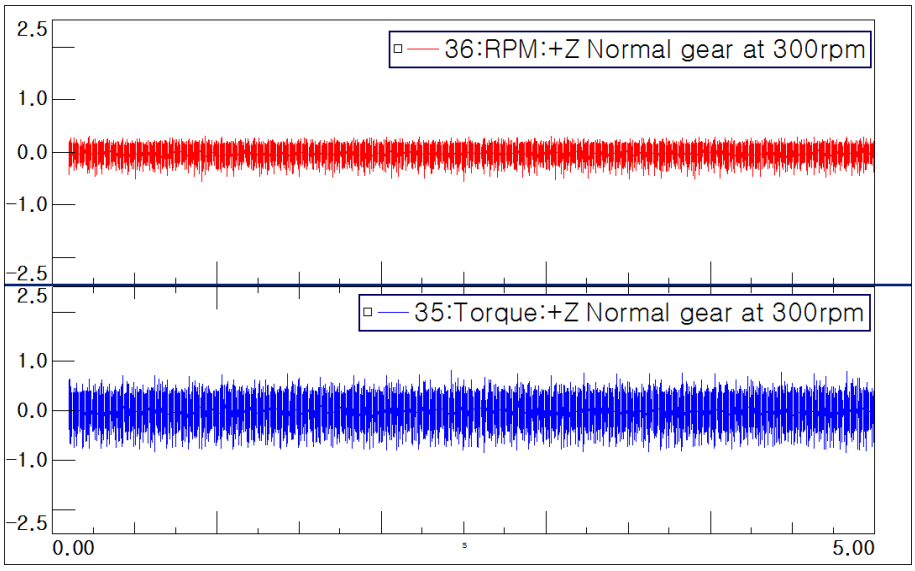
그림 2.3.86은 rpm에 따른 첨도 변화이다. 100 rpm 및 300 rpm에서 입력측과 출력측의 경향이 다르지만, 정상상태보다 마모 시험편에서 첨도변화가 크게 발생하고 있다. 특히 마모조건 2인 경우에는 차이가 확실히 발생하고 있다. 500 rpm에서는 입력측과 출력측에 상관없이 시험편 조건에 따라서 비례적으로 증가하고 있다.

그림 2.3.87은 rpm에 따른 파고율 변화이다. rpm에 상관없이 시험편의 종류에 따라서 비례적으로 증가하고 있으나, 크기 변화가 미미하였다.

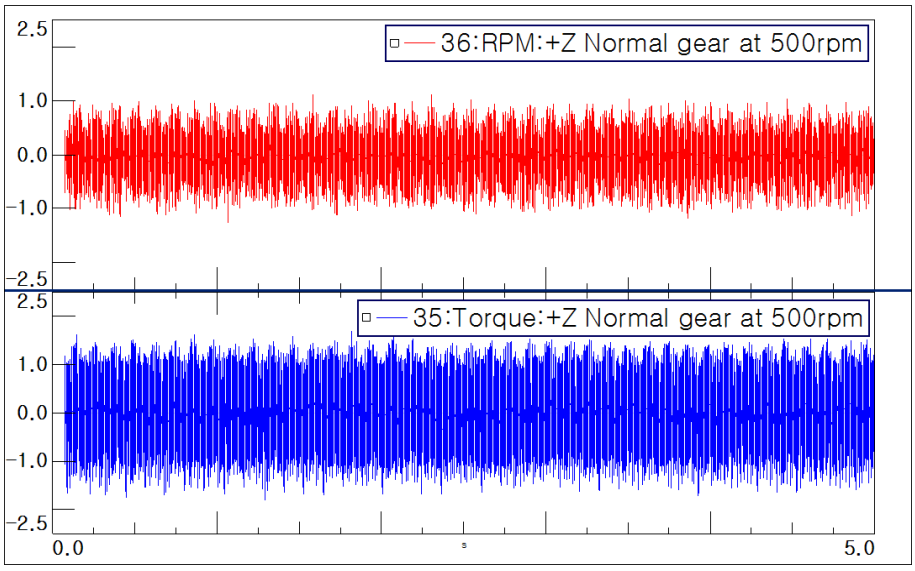
기어 치면에 인공적인 마모를 발생시켜서 진동 시험한 결과 시험편에 상관없이 RMS의 크기 차이는 미미하였다. 첨도 및 파고율 변화는 시험편의 마모량에 따라서 크기가 증가하였으나 크기는 작았다. 따라서, 기어 치면의 마모에 따른 진동특성을 평가한 결과 전반적인 진동신호의 차이를 발견하기 어려웠다.




a) 100rpm

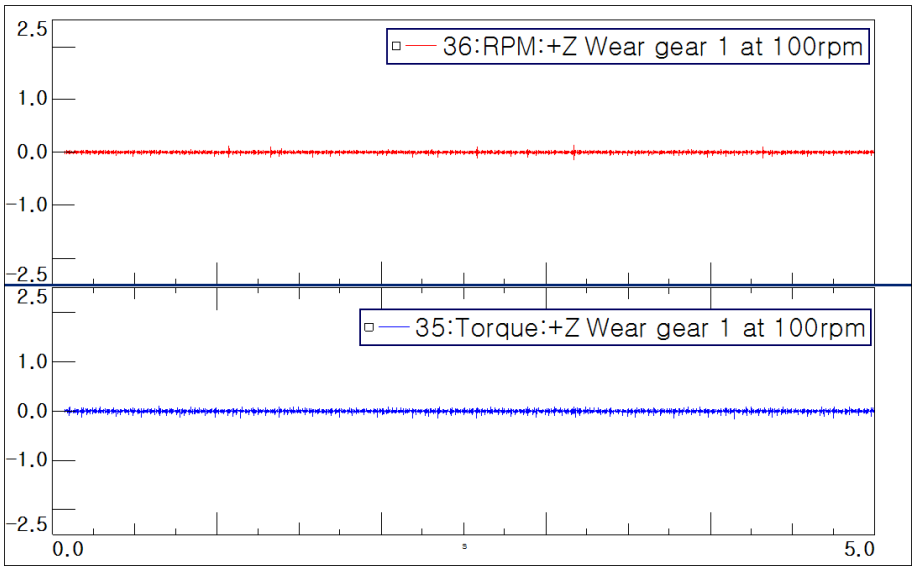



b) 300rpm

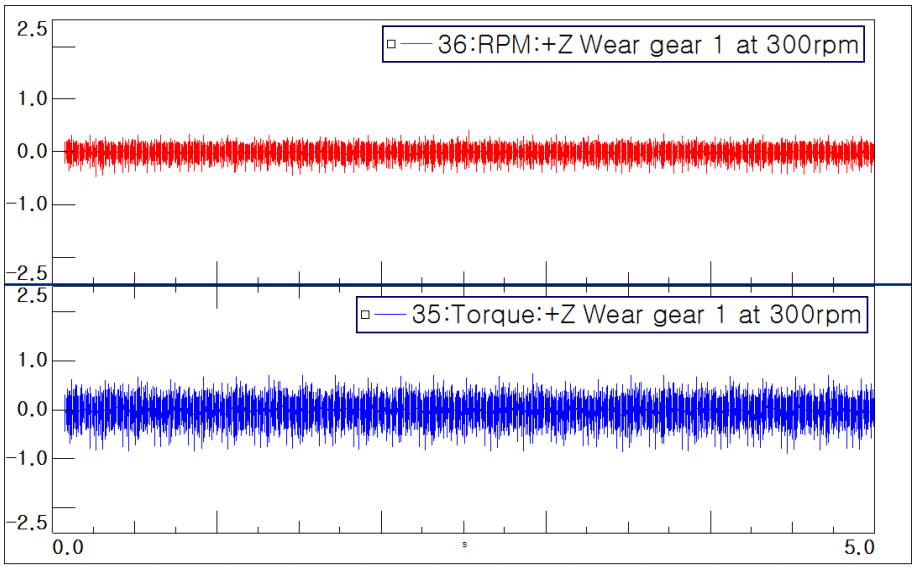



c) 500rpm

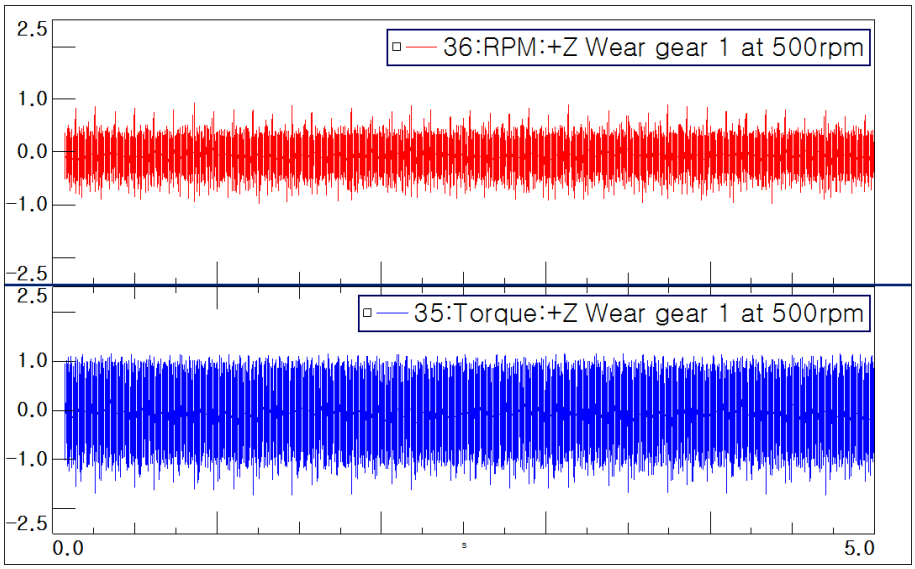
그림 2.3.82 정상기어의 진동 파형




a) 100rpm

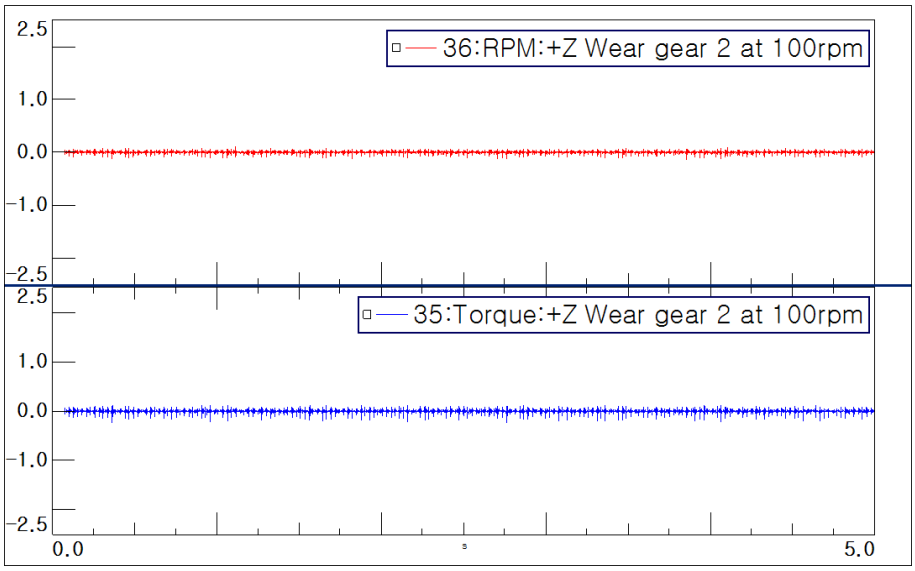



b) 300rpm

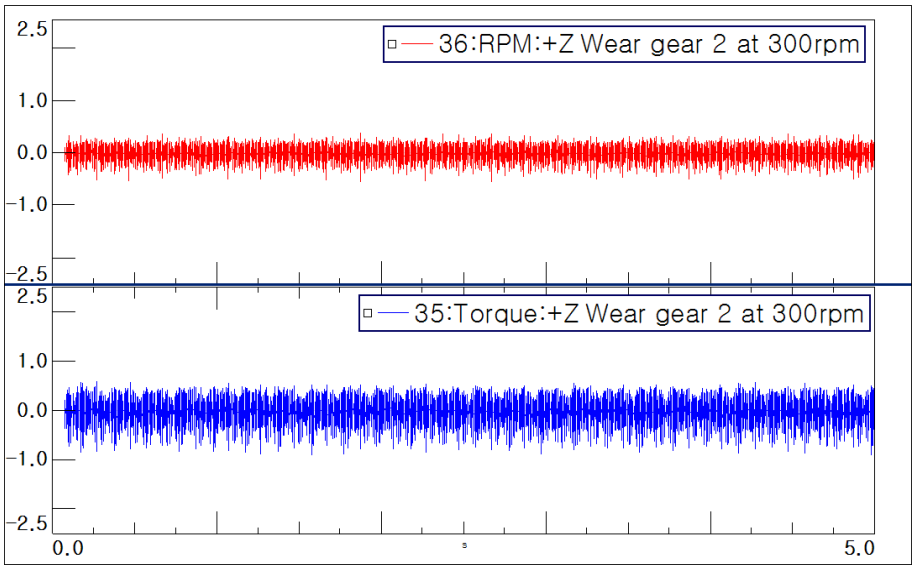



c) 500rpm

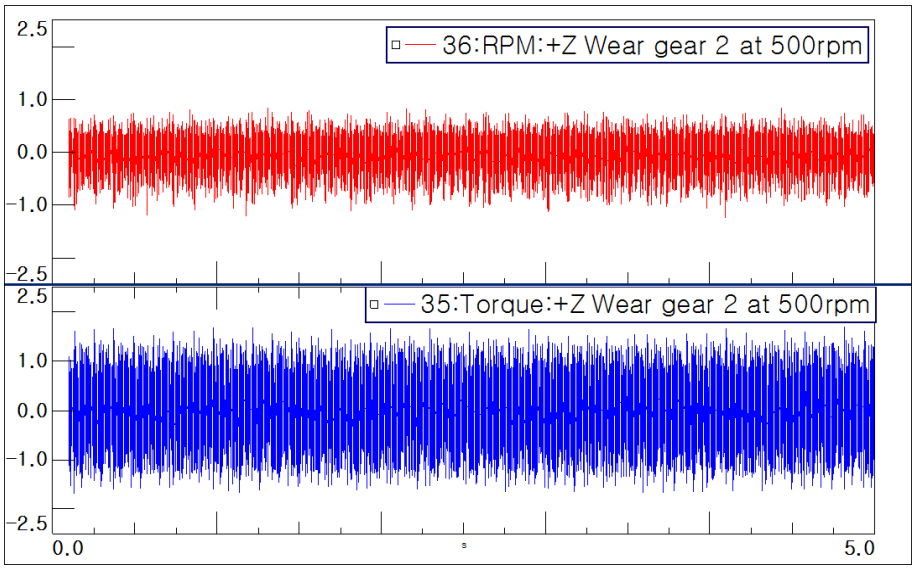
그림 2.3.83 마모 기어 1의 진동 파형




a) 100rpm

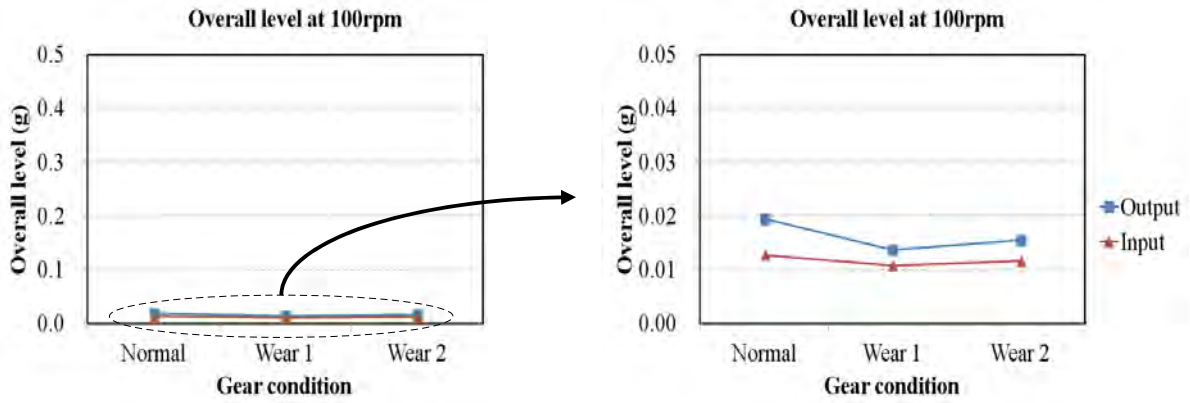



b) 300rpm

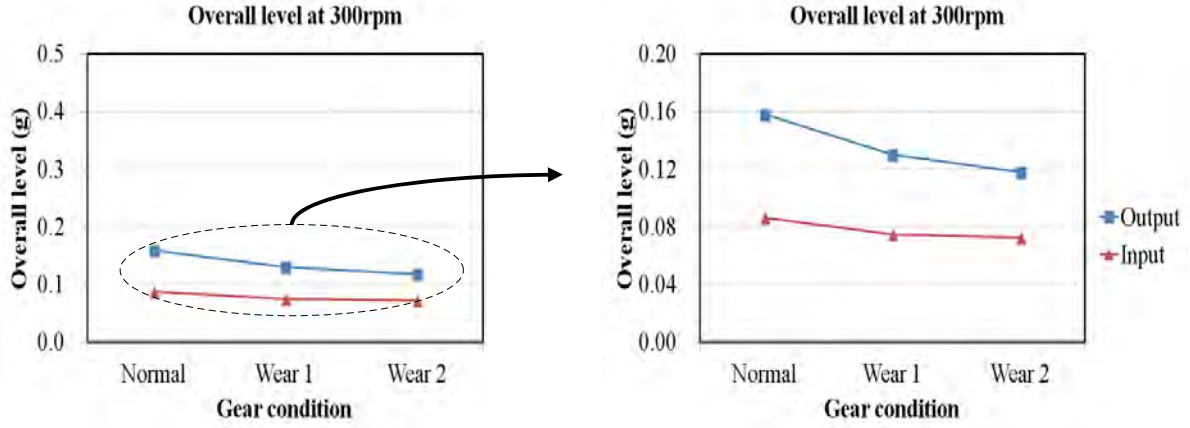



c) 500rpm

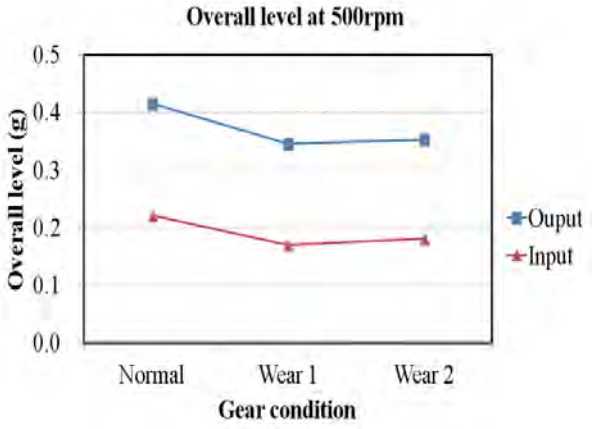
그림 2.3.84 정상기어의 진동 파형




a) 100rpm

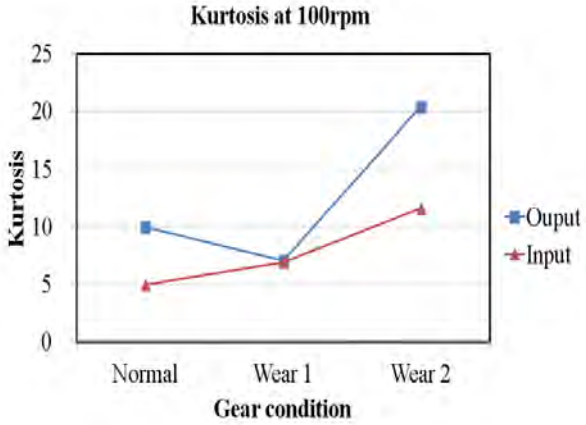



b) 300rpm

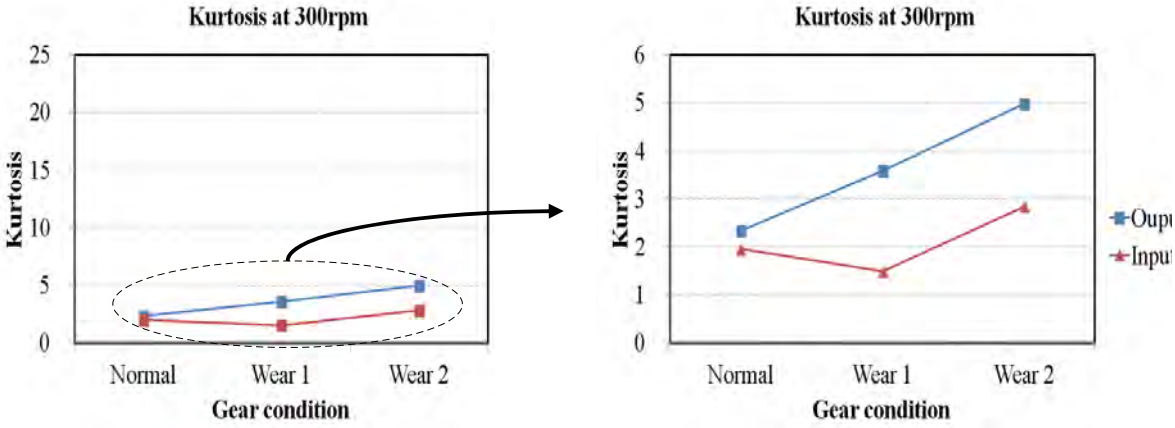



c) 500rpm

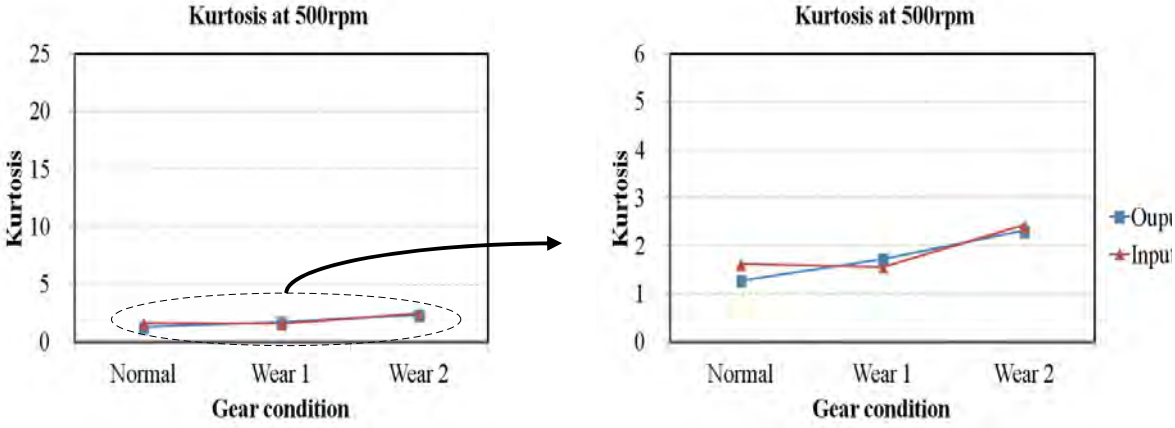
그림 2.3.85 rpm에 따른 RMS 크기 비교




a) 100rpm

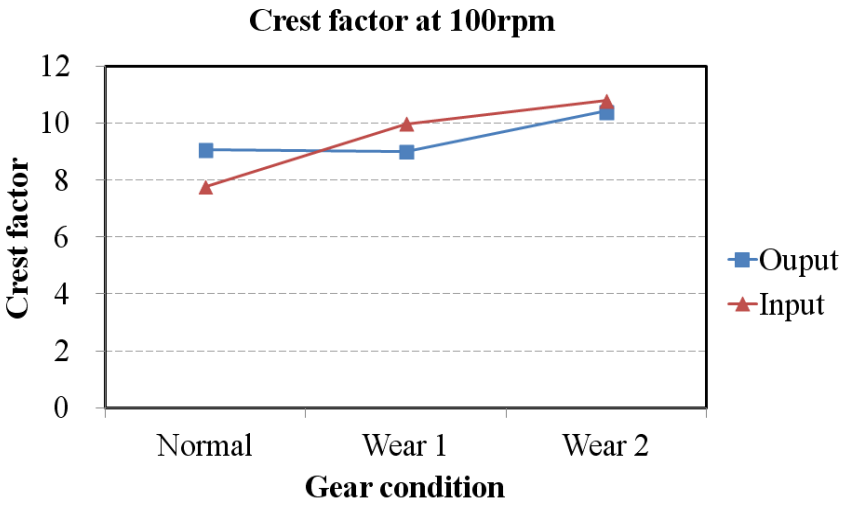



b) 300rpm

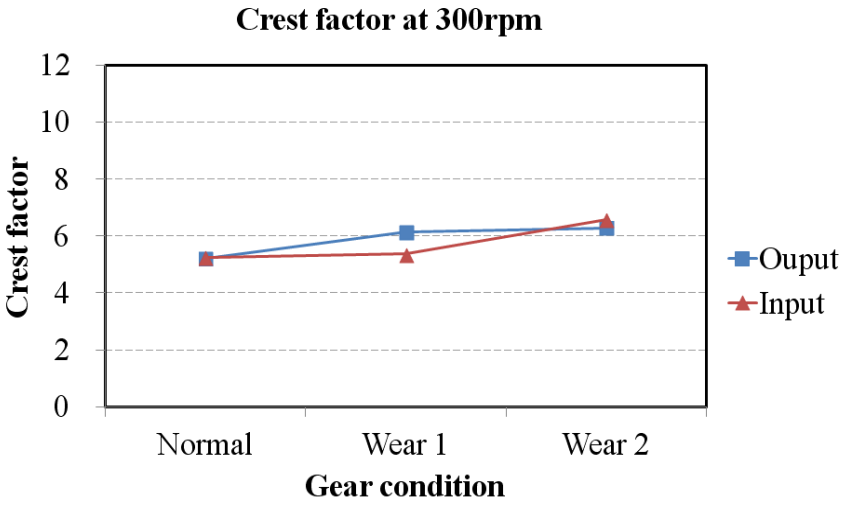



c) 500rpm

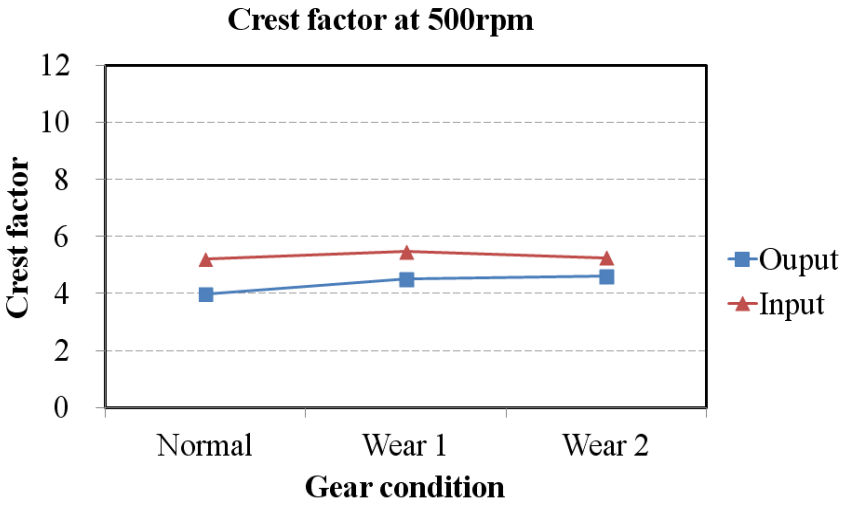
그림 2.3.86 rpm에 따른 Kurtosis 크기 비교




a) 100rpm




b) 300rpm




c) 500rpm

그림 2.3.87 rpm에 따른 파고율(Crest factor) 크기 비교

## 3. 고속철도 감속기 기어 손상 모드 진동특성 시험 및 분석

### 가. 감속기 시험 및 진동특성 분석 - 정상상태

#### (1) 실물 시험 및 진동특성 분석

감속기의 시스템 특성을 파악하기 위하여 실제 사용조건인 실차에서 데이터를 취득하고 신호를 분석해야 하지만 실차에서는 속도 변화 및 토크 변화와 같은 다양한 시험을 실시할 수 없으므로 실물시험기를 이용하여 감속기의 진동특성을 파악하는 것이 더 효율적일 수 있다. 실제차량에서는 1차 감속기와 2차 감속기가 동력전달축으로 연결되어 동시에 측정이 가능하지만 실물시험기는 하나의 감속기에 대해서만 시험할 수 있도록 제작되어 있기 때문에 1차감속기와 2차감속기를 분리하여 측정하여야 한다. 그러므로 실물시험기를 이용하여 1차 및 2차감속기 각각에 대하여 속도 및 토크를 변동하면서 다양한 조건하에 1차감속기 및 2차감속기에 대하여 진동특성을 분석·비교하고자 하였다.

##### (가) KTX 감속기 실물시험

###### ① 측정개요

KTX 실물시험기를 이용한 진동시험은 한국철도기술연구원 내 감속구동장치 시험기를 이용하여 측정하였다. 감속구동장치 시험기는 1개의 감속기에 대해서만 시험이 가능하므로 1차 감속기와 2차 감속기 각각에 대하여 별도로 측정을 하였다. 2차 감속기는 베어링부위가 밖으로 돌출된 형태라서 입력측 및 출력측 베어링대에 가속도계를 부착하여 실제 모니터링 대상인 기어박스 상부 진동과 비교할 수 있게 하였다. 1차 감속기는 베어링대에 부착할 수 없는 형태라서 출력측과 입력측 상부의 기어박스에 가속도계를 부착하여 측정하였다. 또한 시험기의 감속기 고정축 베어링 상부에도 가속도계를 부착하여 참고값으로서 감속기와 비교할 수 있게 하였다. 속도는 2차 감속기 실물시험의 경우, 축에 반사판을 붙이고 축의 지지대에 Photo 센서를 부착하여 측정하였으며, 1차 감속기 실물시험은 별도의 고정봉에 Photo 센서를 부착하여 측정하였다.

감속기 시험품이 준비되는 상황에 따라 2차 감속기 시험을 먼저 실시한 후 1차 감속기 시험을 하였으며, 설치위치 및 시험에 대한 개요는 표 2.3.14와 같다. 고속철도 감속구동장치는 맞물림에 의한 진동뿐 아니라 레일에서 발생하는 진동도 같이 측정되므로 이를 고려하여 센서를 선정하였으며, 측정에 사용된 장비의 주요제원은 표 2.3.15와 같다. 2차 감속기 측정시 센서 부착위치 및 계측장비는 그림 2.3.88과 같으며, 1차 감속기 측정 시 센서 부착위치 및 시험장면은 그림 2.3.89와 같다.

표 2.3.14 시험개요

| | 2차 감속기 | 1차 감속기 |
|---|---|---|
| 시험일자 | 2012년 10월 9일~10일 | 2013년 4월 30일<br>2013년 9월 4일 |
| 시험장소 | 철도기술연구원 부품시험동 | 철도기술연구원 부품시험동 |
| 시험대상 | KTX 2차 감속기 1set | KTX 1차 감속기 1set |
| | 기어비 : 1.16(51/44) | 기어비 : 1.89(51/27) |
| Vibration accelerometer | 4개 | 3개 |
| 설치 위치 | • 2차 감속기 기어박스 : 3축 1개<br>• 2차 감속기 출력측베어링 : 3축 1개<br>• 2차 감속기 입력측베어링 : 3축 1개<br>• 감속기 고정축 베어링 : 3축 1개<br>• 속도센서(타코) : 1채널 | • 1차 감속기 입력측 기어박스 : 3축 1개<br>• 1차 감속기 출력측 기어박스 : 3축 1개<br>• 감속기 고정축 베어링 : 3축 1개<br>• 속도센서(타코) : 1채널 |

표 2.3.15 실험장비

| 측정 장비 | 수 량 | 사 양 | 비 고 |
|---|---|---|---|
| Data recorder | 1대 | LMS Test Lab | 데이타저장 |
| Photo Sensor | 1대 | E3S-AD11Sensing distance : 10~20cm | 속도 측정 |
| F/V Converter | 1대 | K3HB-RNB-L2AT11 | 속도 측정 |
| Accelerometer | 4개 | ICP : Range : ±250g<br>Limit : ±500g<br>Freq. : 0.5~10,000Hz | 진동측정 |

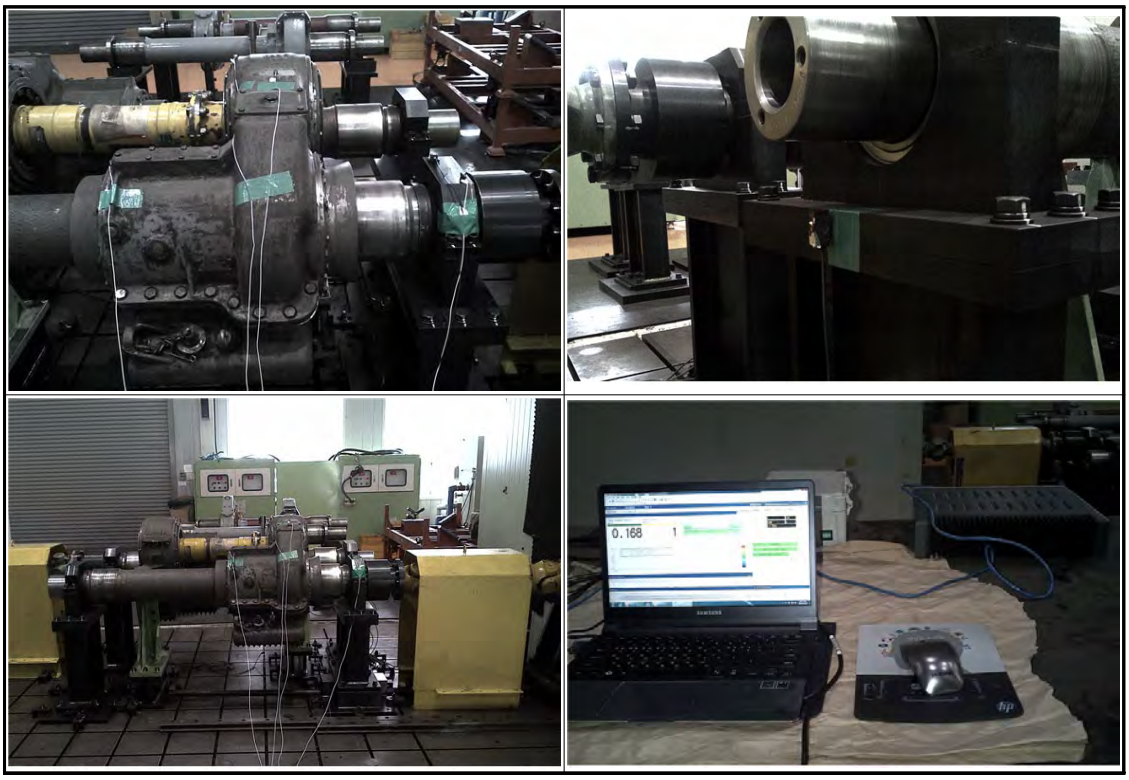



그림 2.3.88 2차감속기 센서 부착위치 및 계측장비 사진

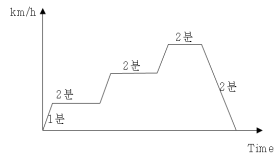
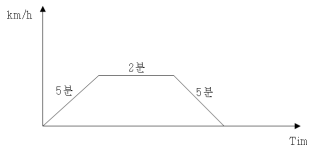
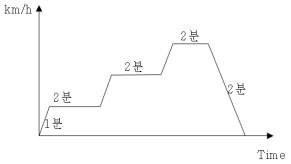


그림 2.3.89 1차감속기 부착위치 사진

② 측정 방법

시험조건으로 속도에 따른 특성 및 토크에 따른 특성을 측정할 수 있도록 표 2.3.16과 같이 시험조건을 구성하였다. 열차의 진행 방향에 따른 특성을 알기 위하여 정방향 외에 역방향시험도 추가하였으며, 최대속도까지 올렸을 때의 오더(order)에 따른 주파수의 변화도 측정할 수 있도록 최대속도 시험도 반영하였다. KTX 감속기 사양에 있는 토크의 평균값은 약 6,000 N·m이지만 실물시험기 상태 및 실차와 달리 실물시험에서는 주행에 따른 감속기 냉각이 이루어지지 않기 때문에 시험기의 안전 및 시험기 상태를 고려하여 토크는 3,000 N·m까지만 실험을 진행하였다. 그리고 무부하 ~ 3,000 N·m까지 1,000 N·m씩 증가시키면서 토크변동에 따른 진동을 측정하였다.

표 2.3.16 시험 조건

| | |
|---|---|
| 1. 무부하 시험<br>(1) 정방향 ( [100 km/h]: 2분, [200 km/h]: 2분, [300 km/h]: 2분 )<br>(2) 역방향 ( [100 km/h]: 2분, [200 km/h]: 2분, [300 km/h]: 2분 ) |  |
| 2. 최대속도[300 km/h] 시험<br>(1) 무부하, 정방향 ( 증속 5분, 정속 2분, 감속 5분 )<br>(2) 무부하, 역방향 ( 증속 5분, 정속 2분, 감속 5분 )<br>(3) 토크 3000, 정방향 ( 증속 5분, 정속 2분, 감속 5분 )<br>(3) 토크 3000, 역방향 ( 증속 5분, 정속 2분, 감속 5분 ) |  |
| 3. 파워링시험 [100 km/h, 200 km/h, 300 km/h ]<br>(1) 토크 1000, ( [100 km/h]: 2분, [200 km/h]: 2분, [300 km/h]: 2분 )<br>(2) 토크 2000, ( [100 km/h]: 2분, [200 km/h]: 2분, [300 km/h]: 2분 )<br>(2) 토크 3000, ( [100 km/h]: 2분, [200 km/h]: 2분, [300 km/h]: 2분 ) |  |
| 4. 브레이킹시험 [100 km/h, 200 km/h, 300 km/h ]<br>(1) 토크 1000, ( [100 km/h]: 2분, [200 km/h]: 2분, [300 km/h]: 2분 )<br>(2) 토크 2000, ( [100 km/h]: 2분, [200 km/h]: 2분, [300 km/h]: 2분 )<br>(2) 토크 3000, ( [100 km/h]: 2분, [200 km/h]: 2분, [300 km/h]: 2분 ) | |

| | |
|---|---|
| ※ 2차 감속기 속도에 따른 rpm<br>- 300 km/h시 rpm : 2,005(입력), <u>1,730(출력)</u><br>- 200 km/h시 rpm : 1,337(입력), <u>1,153(출력)</u><br>- 100 km/h시 rpm : 668(입력), <u>577(출력)</u> | ※ 1차 감속기 속도에 따른 rpm<br>- 300 km/h시 rpm : 3,788(입력), <u>2,005(출력)</u><br>- 200 km/h시 rpm : 2,525(입력), <u>1,337(출력)</u><br>- 100 km/h시 rpm : 1,263(입력), <u>668(출력)</u> |

(나) KTX 2차 감속기 실물 시험

① 측정 위치에 따른 특성 분석

속도 변화 및 토크 변화에 따른 감속구동장치의 진동 특성을 파악하기 위하여 실물 시험기를 이용하여 2차 감속장치의 진동을 측정하였으며, 진동센서는 감속장치 케이스인 기어박스와 입력측 베어링 및 출력측 베어링에 부착하여 측정하였다. 토크 3000N·m 측정결과인 그림 2.3.90을 보면, 입력측 베어링은 254 km/h 지점(F 지점)에서 진동이 커지고 있으며, 출력측 베어링은 274 km/h 지점(G 지점)에서 커지고 있다. 기어 케이스에서는 양쪽 베어링 진동이 모두 관측되는 것으로 나타났다. 그림 2.3.91은 F 지점에 대하여 주파수 분석을 한 결과로서 차륜과 레일의 진동에 의한 영향을 받는 실차시험 결과와 달리 1차 맞물림 주파수 1,245 Hz와 2차 맞물림 주파수인 2,490 Hz가 뚜렷하게 나타나고 있다.

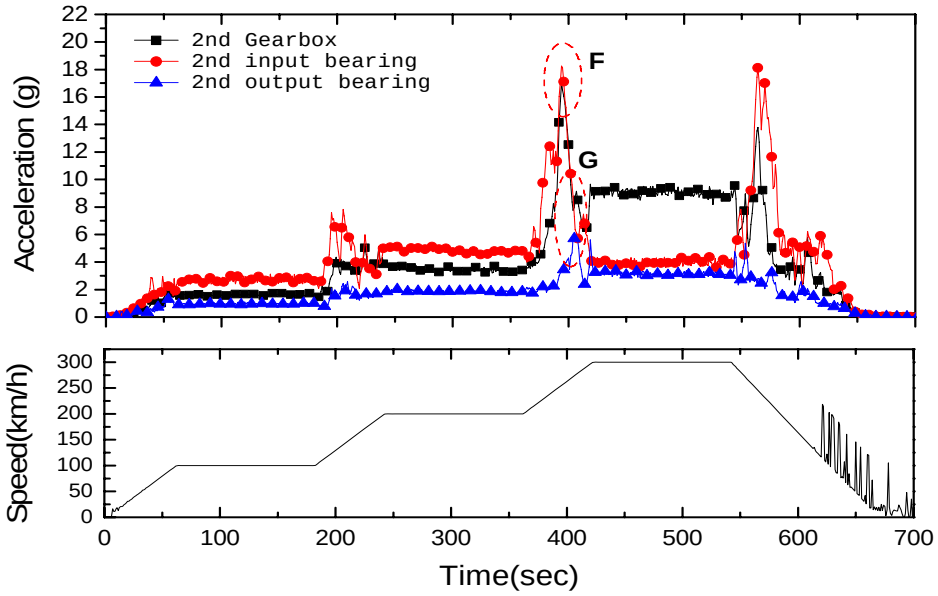



그림 2.3.90 기어박스 및 베어링 부위 진동 비교

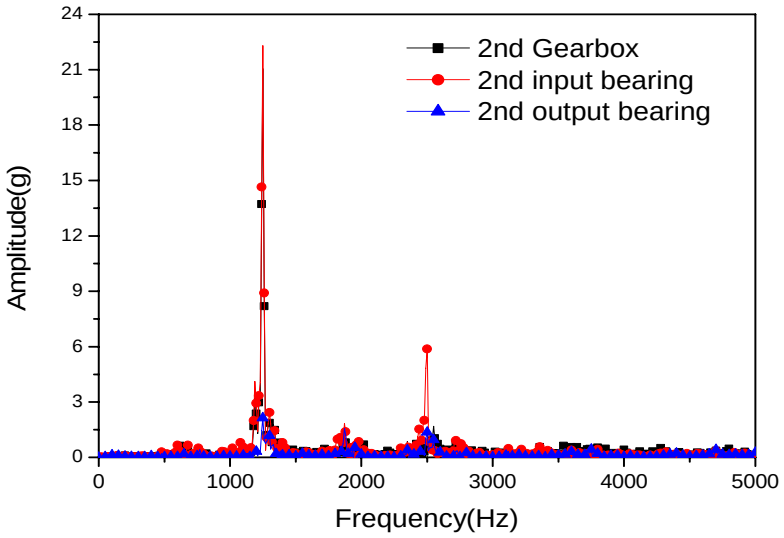



그림 2.3.91 기어박스 및 베어링 부위 주파수 분석 비교

② 정방향 역방향 특성 분석

속도를 0~300 km/h까지 증가시키면서 기어박스의 정방향 운전과 역방향 운전시의 진동수준을 분석하여 그림 2.3.92 ~ 2.3.93에 나타냈다. 무부하시(그림 2.3.92)는 정방향 운전이나 역방향 운전이나 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 토크 3,000 N · m 조건에서 속도가 300 km/h로 정속으로 시험할 때는 정방향과 역방향 운전에 따른 차이는 없으나 속도가 증가하는 구간에서는 정방향 운전과 역방향 운전에서의 진동수준의 경향은 약간 다르게 나타났다. 속도가 증가할 때 설정 토크에 맞추기 위하여 토크가 변동되며 이 원인에 의하여 정방향과 역방향 운전일 때 경향이 다른 것으로 추정되나, 일정한 속도 및 토크 조건에서는 별 차이가 없기 때문에 정방향과 역방향 운전에 의한 감속기의 진동에는 영향이 없는 것으로 보인다.

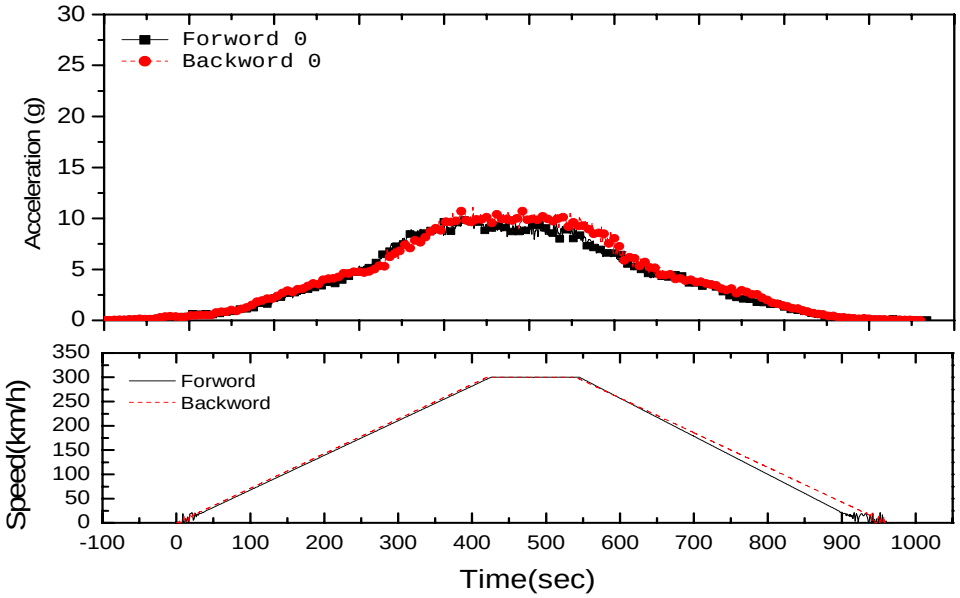



그림 2.3.92 무부하시 정방향 및 역방향 운전에 따른 진동 비교

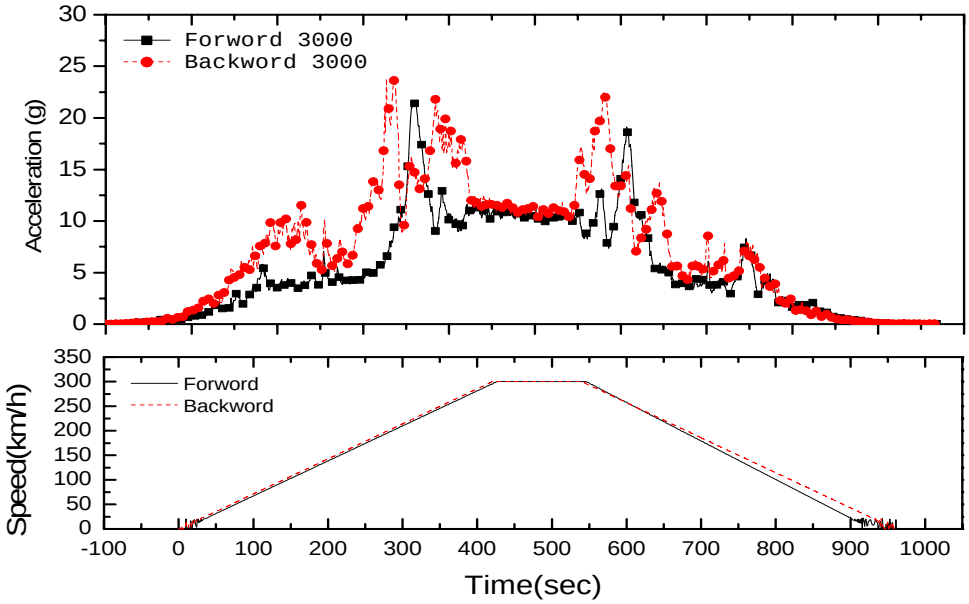



그림 2.3.93 토크 3,000N · m시 정방향 및 역방향 운전에 따른 진동 비교

③ 최대속도에 따른 오더분석

기어의 회전주파수(rpm)에 따른 오더를 분석하기 위하여 속도를 300 km/h (1730 rpm)까지 증가시켜서 측정을 하였으며, 분석 결과는 그림 2.3.94 ~ 2.3.95에 나타냈다. 기어의 1차 맞물림 주파수에 해당하는 오더는 출력측 기어의 잇수인 51이며, 2차는 102, 3차는 153이 해당된다. 무부하시(그림 2.3.94)에는 1차 맞물림 주파수에 해당하는 오더 외에 2차 및 3차는 희미하게 관측되었으나, 부하시(그림 2.3.95)는 속도 증가에 따른 1차, 2차, 3차 오더가 잘 관측되었다.

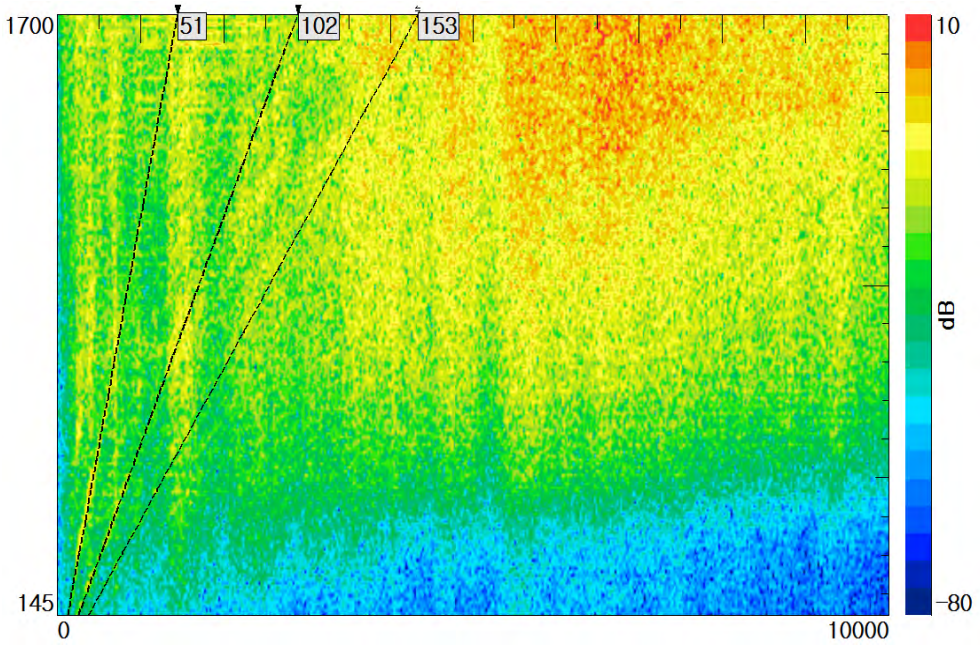



그림 2.3.94 무부하시 기어박스 진동 오더 분석

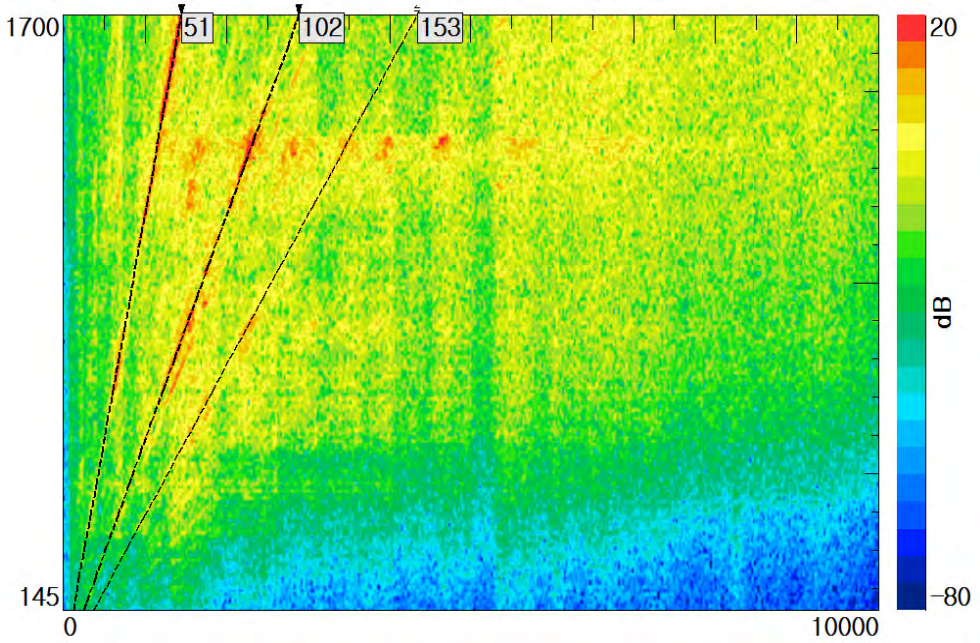



그림 2.3.95 부하시 기어박스 진동 오더 분석

④ 토크변동에 따른 파워링 특성 분석

그림 2.3.96은 토크 변화에 따른 감속장치의 기어케이스 상하진동 수준의 변화를 나타낸 그림이다. 무부하시가 속도에 따른 진동수준이 변동이 가장 확연하게 나타났으며, 부하시도 속도 증가에 따라 진동수준도 커지는 경향을 나타내고 있다. 토크변화에 따른 진동 수준은 100 km/h에서는 무부하시가 가장 작고 토크 1,000 N · m 일 때가 가장 크게 나타나고 있으며, 300 km/h 정속 주행에서는 무부하시가 가장 크고 토크 1,000 N · m 일 때가 가장 작게 나타나고 있다. 정속구간에서 토크변동에 따른 진동수준이 변화는 어떠한 경향을 나타내지 못하고 있는 것으로 보아서 일정한 토크를 유지하는 정속시에는 토크에 따른 영향은 없는 것으로 판단된다. 증속되는 구간에서 토크가 커지고 있는 원인은 일정 토크를 유지하기 위하여 속도가 변함에 따라 토크도 같이 변동되면서 진동이 커지는 것으로 추정된다. 그림 2.3.97은 토크 변화에 따른 좌우진동 수준의 변화를 나타낸 그림이다. 속도가 증가하면서 진동수준도 증가하고 있지만 상하진동의 경우보다 속도에 대한 변화추이가 뚜렷하지 않다. 좌우진동도 일정토크를 유지할 때는 토크에 대한 진동수준이 변화는 없는 것으로 나타났으며, 상하진동에서와 마찬가지로 속도변동에 따른 토크변동구간에서는 진동수준도 증가하고 있음을 알 수 있다.

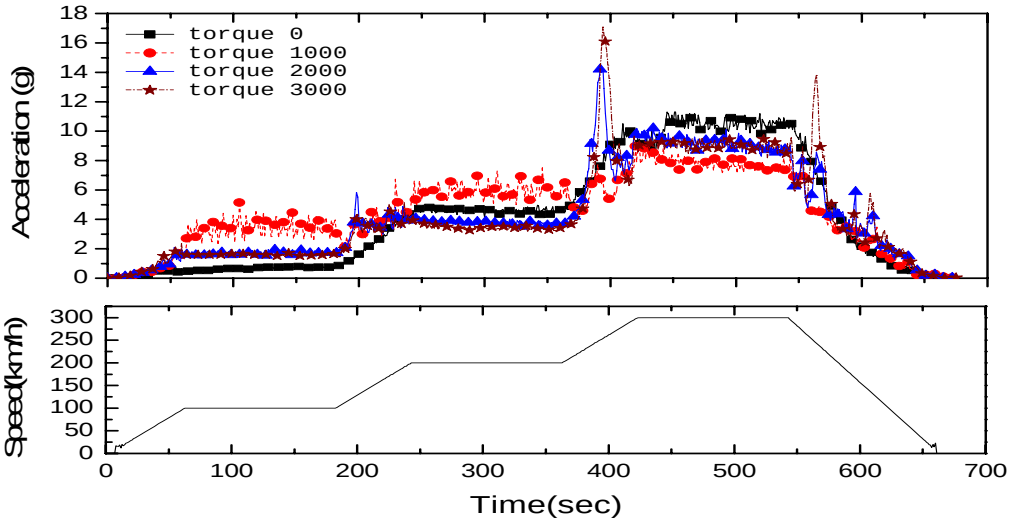



그림 2.3.96 속도 및 토크 변동에 따른 기어박스 상하진동 분석

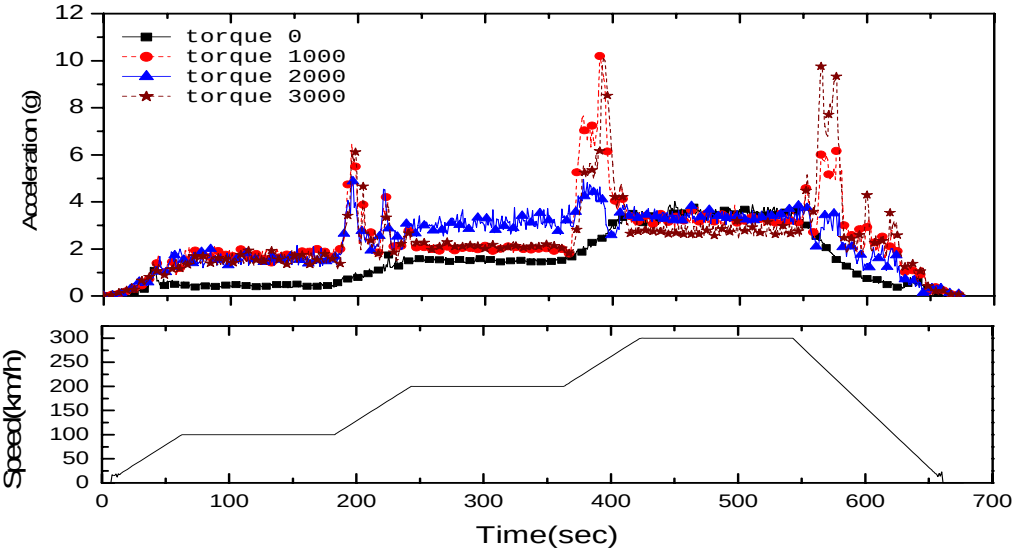



그림 2.3.97 속도 및 토크 변동에 따른 기어박스 좌우진동 분석

⑤ 토크변동에 따른 브레이킹 특성 분석

그림 2.3.98은 브레이킹시 토크 변화에 따른 감속장치의 기어케이스 상하진동 수준의 변화를 나타낸 그림이며, 그림 2.3.99는 브레이킹시 토크 변화에 따른 감속장치의 기어케이스 좌우진동 수준의 변화를 나타낸 그림이다. 같은 토크조건에서 상하진동은 속도에 따라 증가하고 있지만, 좌우진동은 토크 1,000 N · m에서 300 km/h의 진동이 200 km/h의 진동보다 약간 작게 나타나고 있다. 같은 토크조건에서도 파워링시보다 브레이킹시가 더 진동수준이 높게 나타나고 있다. 실제 주행 중에 정상적인 브레이킹은 속도가 줄어드는데 반하여 실물시험기에서는 속도를 유지하기 위해 역토크가 걸리며, 또한 역토크를 주는 반대편 모터의 제어 특성이 정토크를 줄 때와 다르기 때문으로 추정된다. 200 km/h 정속구간에서 상하진동은 토크 1,000 N · m일 때가 가장 크고 300 km/h 정속구간에서 상하진동은 토크 2,000 N · m일 때가 가장 크게 나타나고 있다. 좌우진동의 경우, 200 km/h 정속구간에서는 진동수준이 비슷하나 300 km/h에서는 토크가 커질수록 진동수준도 증가하고 있다. 브레이킹시도 파워링시와 마찬가지로 증속되는 구간에서 일정 토크를 유지하기 위하여 속도에 따라 토크도 같이 변동되면서 진동이 커지고 있다.

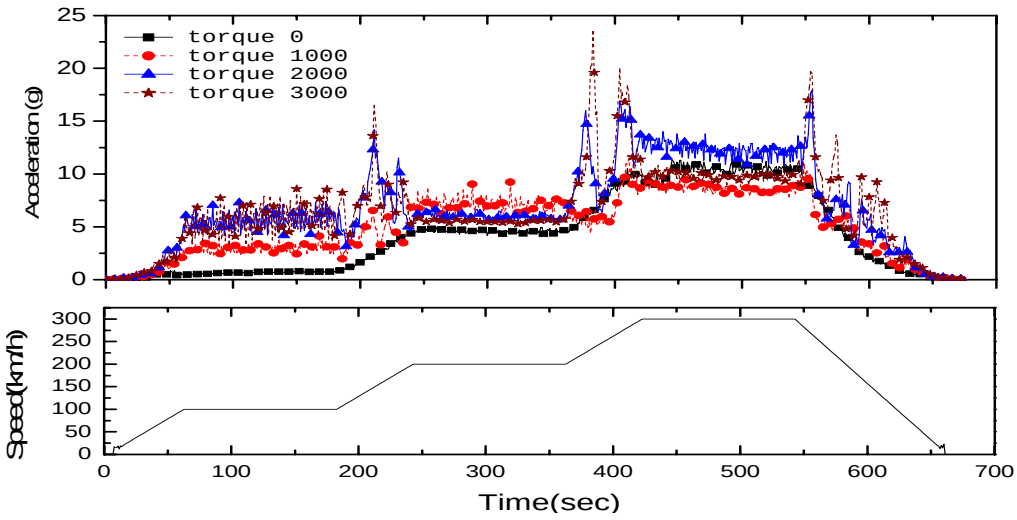



그림 2.3.98 속도 및 토크 변동에 따른 브레이킹시 기어박스 상하진동 분석

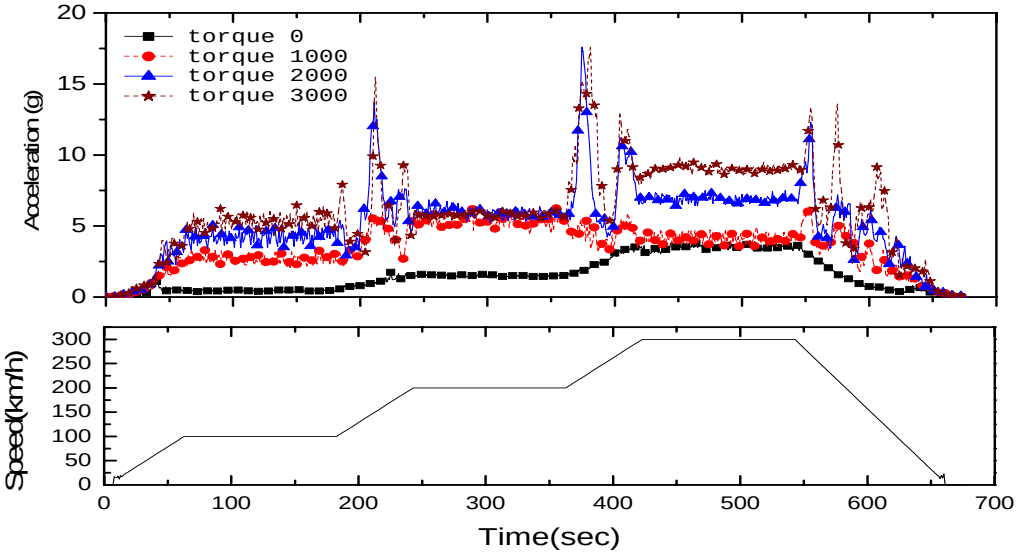



그림 3.3.99 속도 및 토크 변동에 따른 브레이킹시 기어박스 좌우진동 분석

⑥ 파고율 및 첨도 분석

2차 감속기의 진단을 위하여 파고율(Crest factor)과 첨도(Kurtosis)를 이용하여 분석해 보았다. 파고율은 파고의 지표로 식 (2.3.14)와 같이 표시되며, 베어링의 통과진동의 정량화 및 치차의 맞물림 진동의 평가에 주로 사용된다. 첨도는 확률밀도함수의 확산정도를 식 (2.3.15)로 표시되며, 베어링과 기어의 진단 및 회전기계의 진단에 주로 사용된다. 첨도의 경우, 정규분포를 만들기 위하여 식 (2.3.16)과 같이 3을 빼주는 정규분포 첨도를 이용하기도 하며, 여기에서는 정규분포 첨도를 이용하였다.

$$\text{파고율(Crest factor)} = \frac{x_p}{x_{\mathrm{rms}}} \quad \text{----------} \quad (2.3.14)$$

$$\text{첨도(Kurtosis)} = \frac{\text{4차모멘트}}{(x_{\mathrm{rms}})^4} \quad \text{----------} \quad (2.3.15)$$

$$\text{정규분포 첨도} = \frac{\text{4차모멘트}}{(x_{\mathrm{rms}})^4} - 3 \quad \text{----------} \quad (2.3.16)$$

그림 2.3.100은 속도 및 토크 변화에 따른 감속장치의 기어케이스의 파고율을 나타낸 그림이다. 파고율은 대부분 3~4 사이의 값을 가지고 있고 토크 및 속도에 따른 영향이 없는 것으로 판단된다. 650초 부근에서 갑자기 파고율이 커지고 있는데 정지하기 전에 토크를 0으로 낮추는 과정에서 감속기에 충격이 가해지면서 파고율이 커지고 있는 것으로 판단된다. 그림 2.3.101은 속도 및 토크 변화에 따른 감속장치 기어박스의 첨도를 나타낸 그림으로 첨도는 토크 및 속도에 관계없이 대부분 0~1 사이의 값을 나타내고 있다. 첨도도 파고율과 마찬가지로 정지하면서 토크를 0으로 낮추는 과정에서 충격으로 인하여 값이 커지고 있으며, 파고율보다 첨도값이 더 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

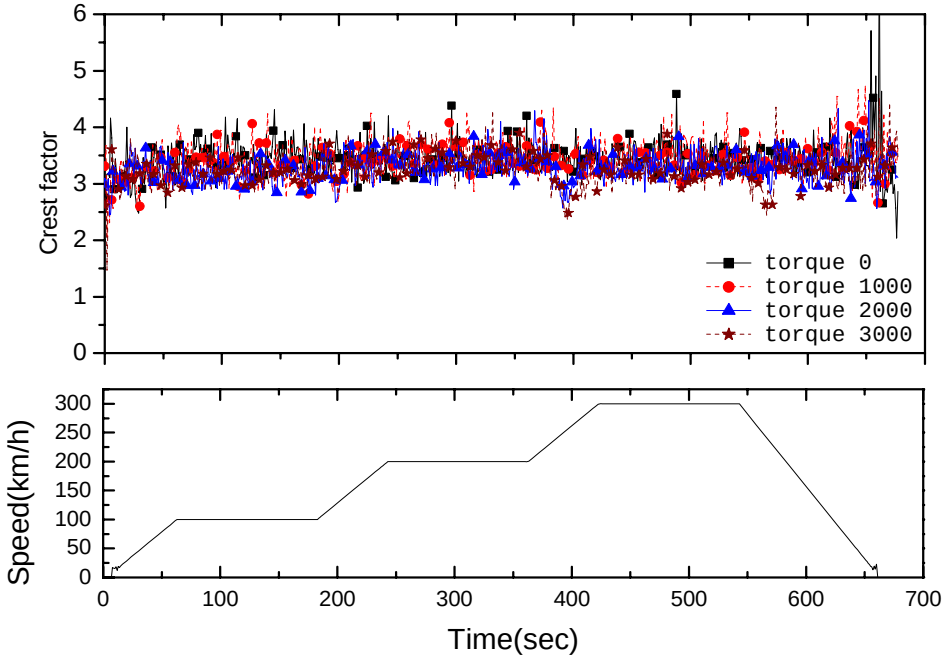



그림 2.3.100 속도 및 토크변동에 따른 파고율 분석

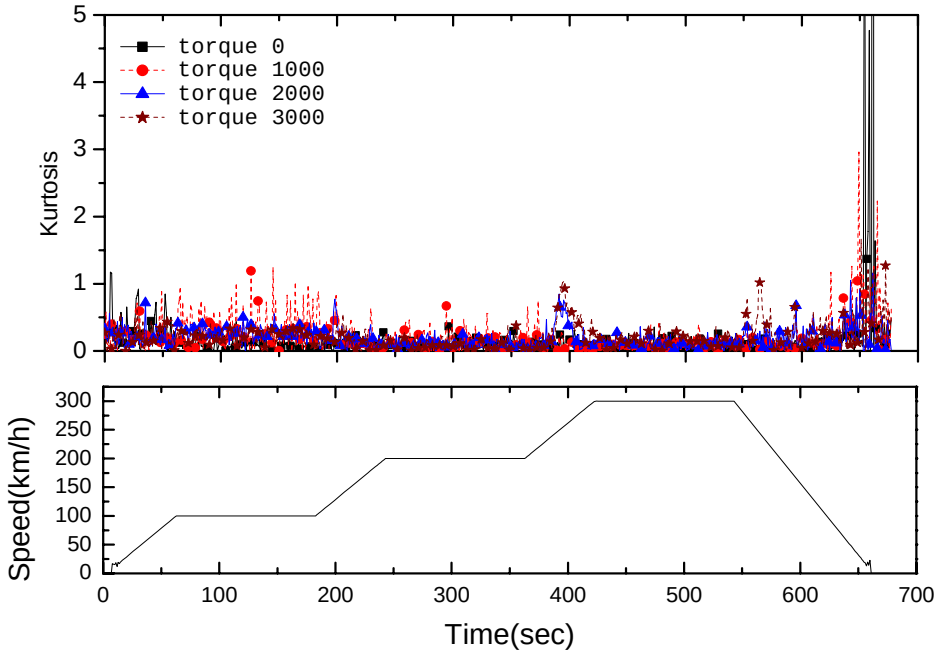



그림 2.3.101 속도 및 토크변동에 따른 첨도 분석

(다) KTX 1차 감속기 실물시험

① 정방향 역방향 특성 분석

1차 감속기에 대하여 속도를 0~300 km/h까지 증가시키면서 기어박스의 정방향 운전과 역방향 운전시의 진동수준을 분석하여 그림 2.3.102 ~ 2.3.103에 나타냈다. 무부하시 속도가 변동하는 구간에서는 정방향이 크고 정속구간에서는 정방향이 작게 나타났다. 토크 3,000 N·m 조건에서 속도가 변동하는 구간 및 300 km/h로 정속구간에서 정방향과 역방향 운전에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다.

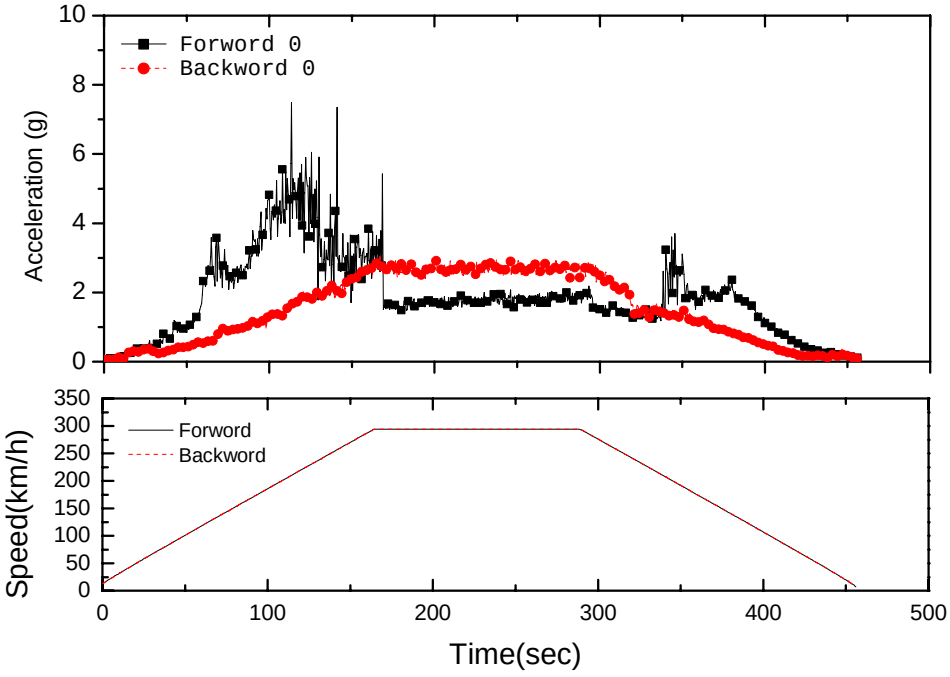



그림 2.3.102 1차 감속기 무부하시 정방향 역방향 특성 비교(1회차)

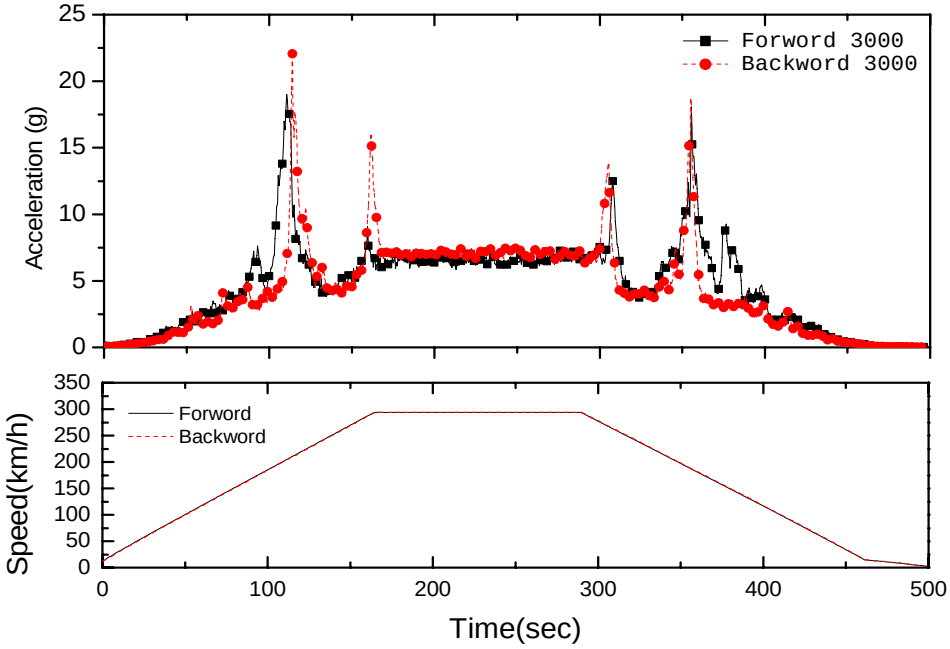



그림 2.3.103 1차 감속기 부하시 정방향 역방향 특성 비교(1회차)

② 최대속도에 따른 오더 분석

기어의 회전주파수(rpm)에 따른 오더를 분석하기 위하여 속도를 약 300 km/h (1,965rpm)까지 증가시켜서 측정을 하였으며, 무부하시의 오더 분석 결과는 그림 2.3.104에 부하시의 오더 분석 결과는 그림 2.3.105에 나타냈다. 무부하시는 1차 맞물림 주파수에 해당하는 오더가 크게 나타나고 있으며, 부하시(토크 3,000 N · m)는 2차 맞물림 주파수에 해당하는 오더가 크게 나타나고 있다. 1차 맞물림 주파수에 해당하는 오더는 출력측 기어의 잇수인 51보다 약간 작은 약 49.5로 관측되었으며 이 차이는 회전수 측정 시 오차로 인한 것으로 추정된다.

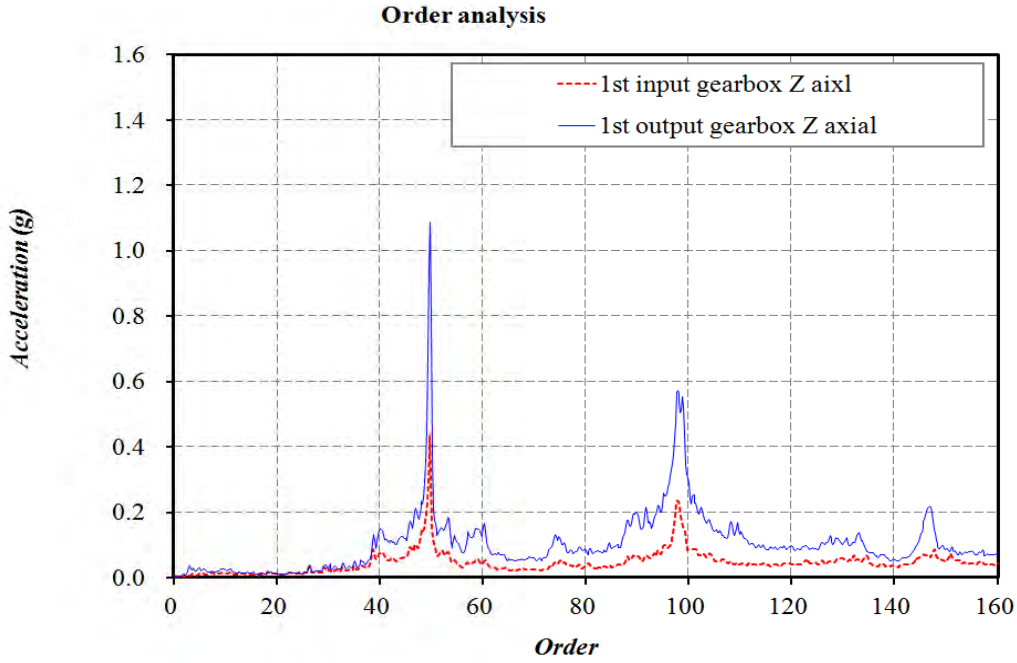



그림 2.3.104 1차 감속기(1회차) 무부하시 오더 분석

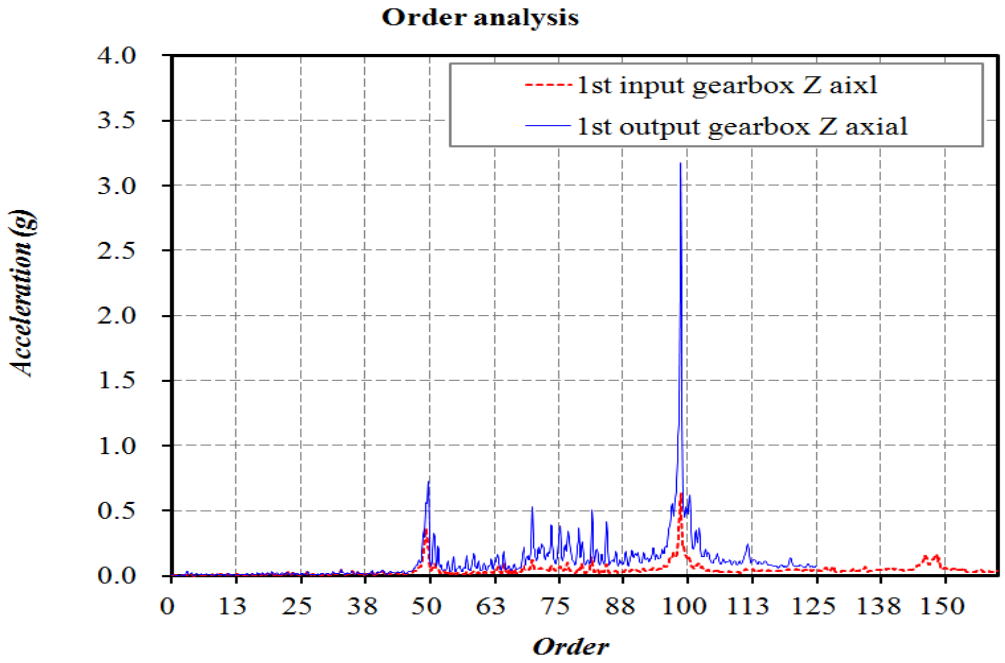



그림 2.3.105 1차 감속기(1회차) 부하시 오더 분석

③ 토크변동에 따른 파워링 특성 분석

그림 2.3.106은 토크 변화에 따른 1차 감속장치의 기어케이스 상하진동 수준의 변화를 나타낸 그림이다. 토크변화에 따른 진동 수준을 보면, 100 km/h 부하시는 비슷하게 나타나고 있으나 200 km/h에서는 토크 3,000 N · m일 때가 가장 크고 300km/h에서는 1,000 N · m일 때가 가장 크게 나타나고 있다. 그림 2.3.107은 토크 변동에 따른 1차 감속기 좌우진동의 변화를 나타낸 그림으로 상하진동보다는 진동수준이 낮게 나타나고 있으나 속도에 따른 진동수준의 변동되는 경향은 거의 비슷하게 나타나고 있다.

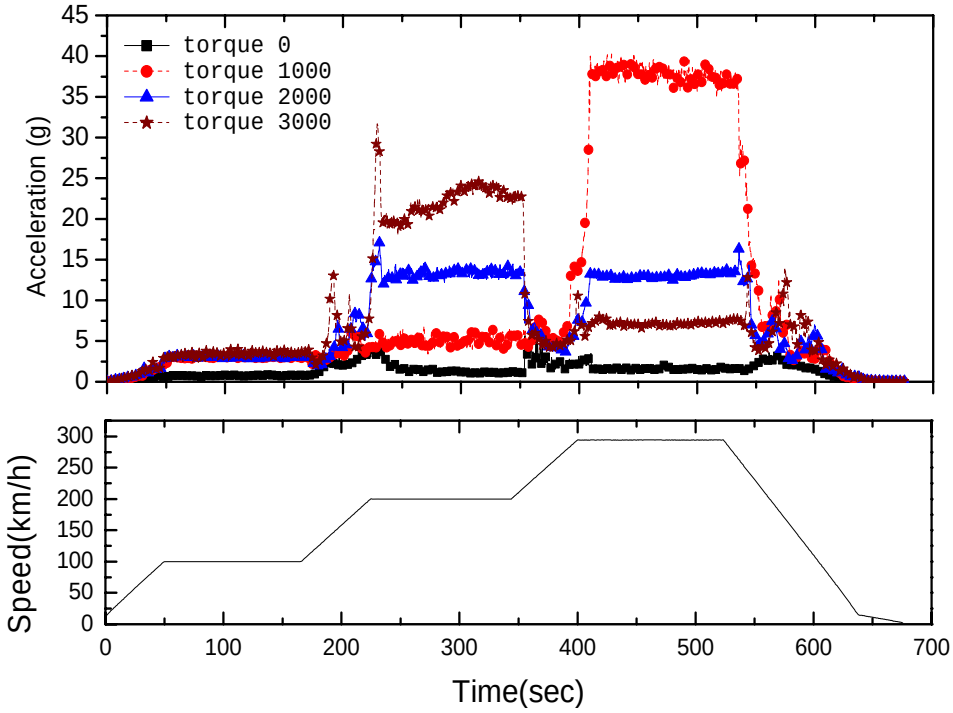



그림 2.3.106 1차 감속기(1회차) 토크변동에 따른 파워링시 상하진동 비교

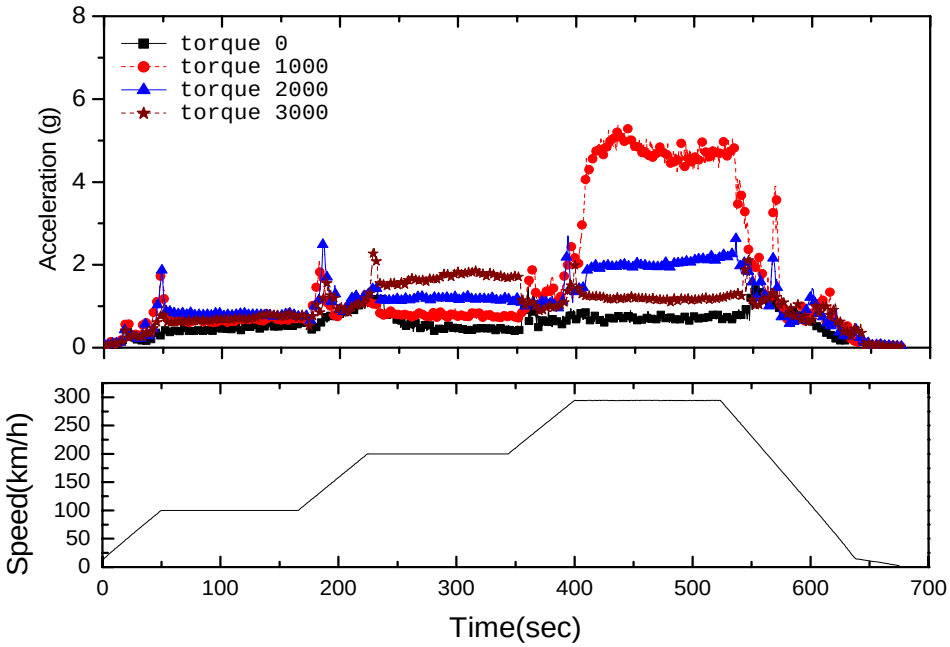



그림 2.3.107 1차 감속기(1회차) 토크변동에 따른 파워링시 좌우진동 비교

④ 파고율 및 첨도 분석

그림 2.3.108은 속도 및 토크 변화에 따른 1차 감속장치의 기어케이스의 파고율을 나타낸 그림이다. 2차 감속기에서 파고율은 대부분 3~4 사이의 값을 가지고 있었는데 1차 감속기는 200 km/h에서 토크 2,000 N · m과 토크 3,000 N · m, 300 km/h에서는 토크 1,000 N · m과 2,000 N · m의 파고율이 2~2.5사이의 값을 가지고 있다. 1차 감속장치의 기어케이스의 첨도는 그림 2.3.109와 같으며, 2차 감속기에서 토크 및 속도에 관계없이 대부분 0~1 사이의 값을 나타냈었는데 반하여 200 km/h와 300 km/h의 일부 토크값에서 약 1의 값을 지속적으로 나타내고 있다.

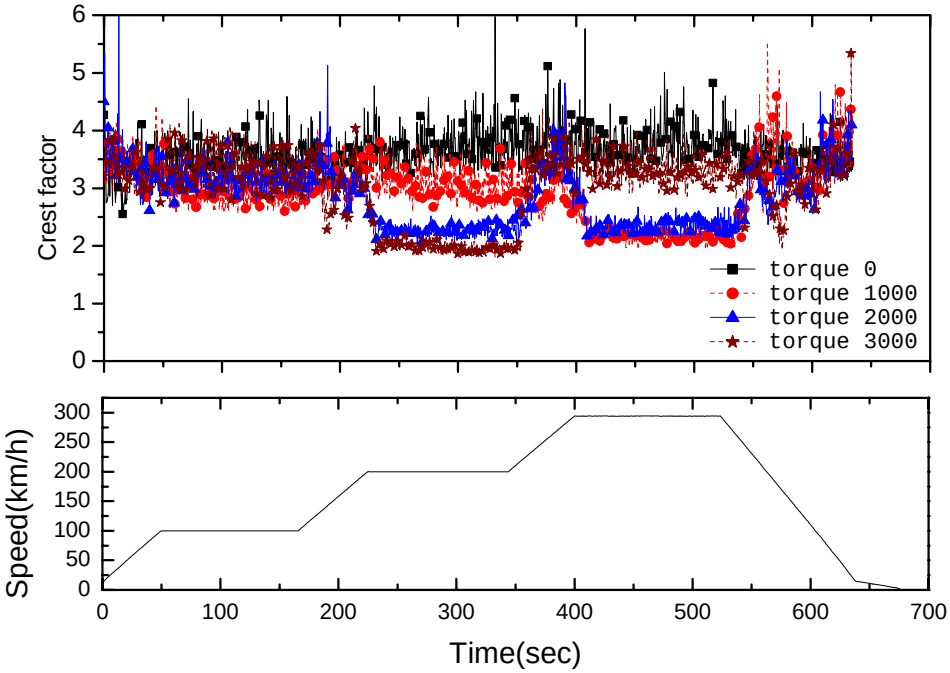



그림 2.3.108 1차 감속기(1회차) 상하진동에 대한 파고율

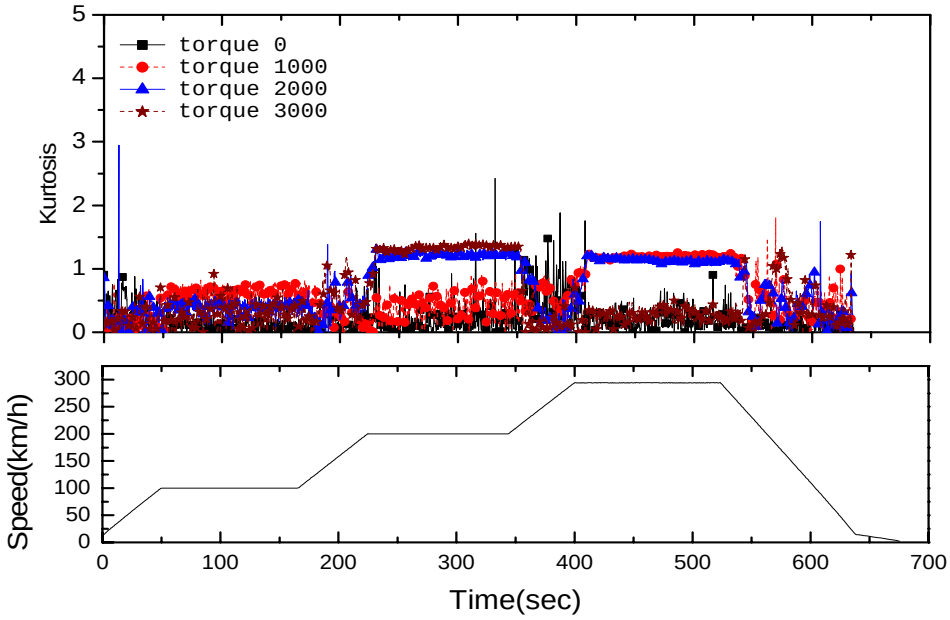



그림 2.3.109 1차 감속기(1회차) 상하진동에 대한 첨도

(라) KTX 1차 감속기 실물시험(2회차) 진동특성 분석

① 측정위치에 따른 특성 분석

1차 감속기의 입력측 기어박스와 출력측 기어박스, 시험기 지지베어링 상부에 진동센서를 부착하여 측정위치에 따른 진동수준을 비교하였다. 그림 2.3.110과 그림 2.3.111는 무부하시 측정위치별 상하진동과 좌우진동을 비교한 그림이며, 상하진동이 좌우진동보다 크지만 입력측과 출력측 상부 기어박스의 진동수준은 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그림 2.3.112와 그림 2.3.113은 부하시(토크 3,000 N · m) 측정위치별 상하진동 및 좌우진동을 비교한 그림이다. 상하진동은 출력측이 입력측보다 진동수준이 훨씬 크게 나타나고 있지만 좌우진동은 비슷하거나 300 km/h에서는 오히려 입력측이 더 큰 경향을 나타내고 있다. 입력측 기어박스 상부는 설치공간이 협소하므로 실제 차량에서는 출력측 기어박스 상부에 진동센서를 부착하여 진동을 측정해야만 한다. 토크 3,000 N · m에서의 상하 및 좌우진동에 대한 주파수 분석 결과인 그림 2.3.114를 보면, 출력측에서도 입력측의 맞물림 주파수 등 주파수 특성을 분석할 수 있으므로 출력측 기어박스만 측정하고 분석해도 될 것으로 판단된다.

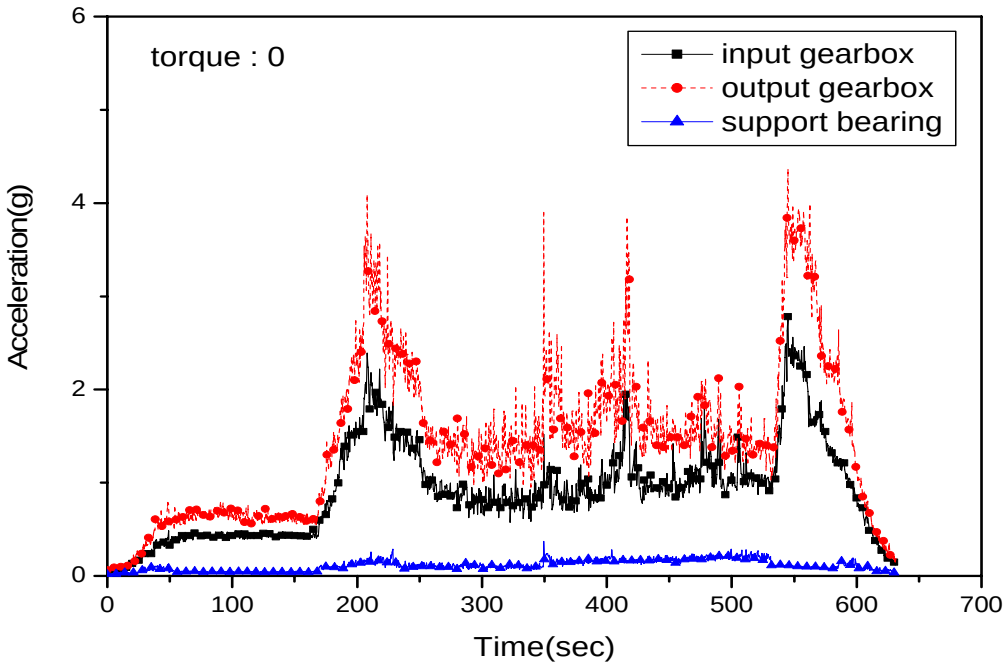



그림 2.3.110 1차감속기 무부하시 측정위치별 상하진동

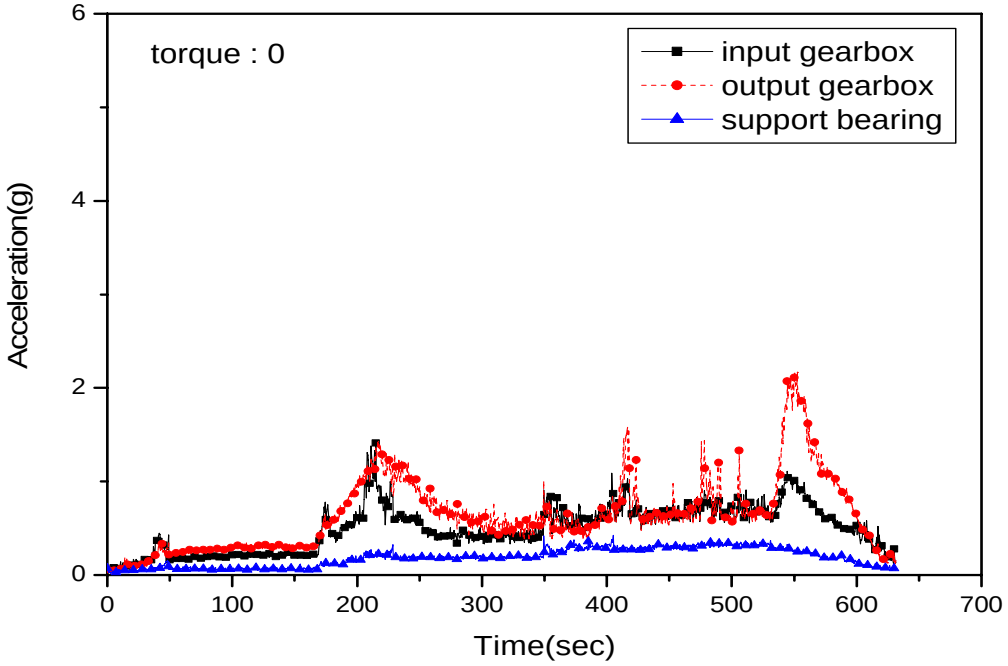



그림 2.3.111 1차감속기 무부하시 측정위치별 좌우진동

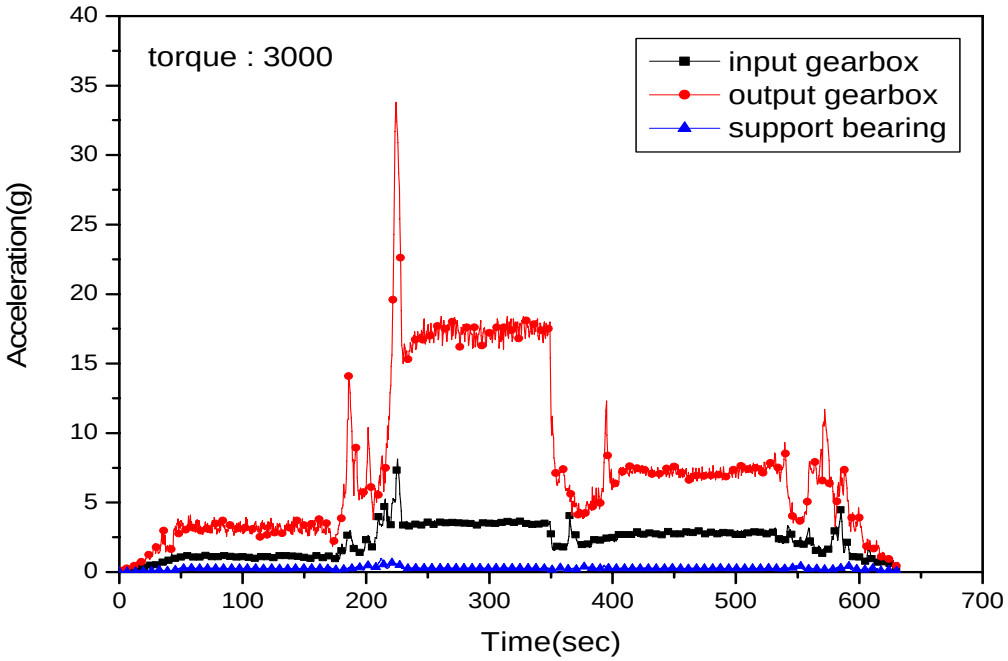



그림 2.3.112 1차감속기 부하시 측정위치별 상하진동

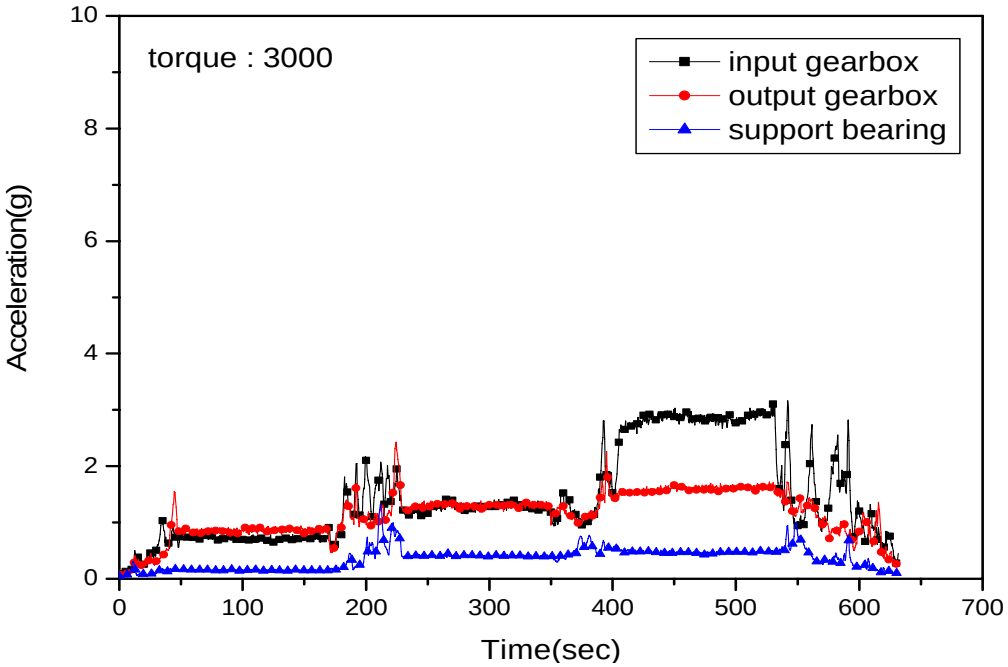



그림 2.3.113 1차감속기 부하시 측정위치별 좌우진동

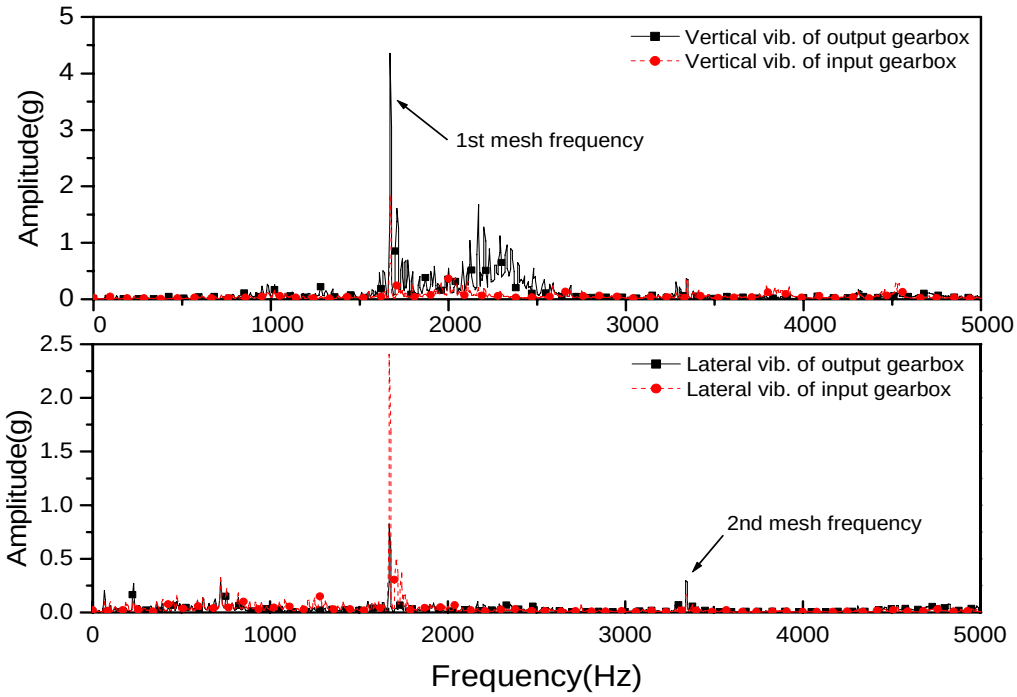



그림 2.3.114 1차감속기 부하시 측정위치별 주파수 분석좌우진동

② 정방향 역방향 특성 분석

1차 감속기의 2회차 시험에서도 속도를 0~300 km/h까지 증가시키면서 기어박스의 정방향 운전과 역방향 운전시의 진동수준을 분석하여 그림 2.3.115 ~ 2.3.116에 나타냈다. 1회차 시험과 마찬가지로 무부하시는 역방향이 크게 나타났고 토크 3,000 N · m 조건에서 속도가 변동하는 구간 및 300 km/h로 정속구간에서 정방향과 역방향 운전에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다.

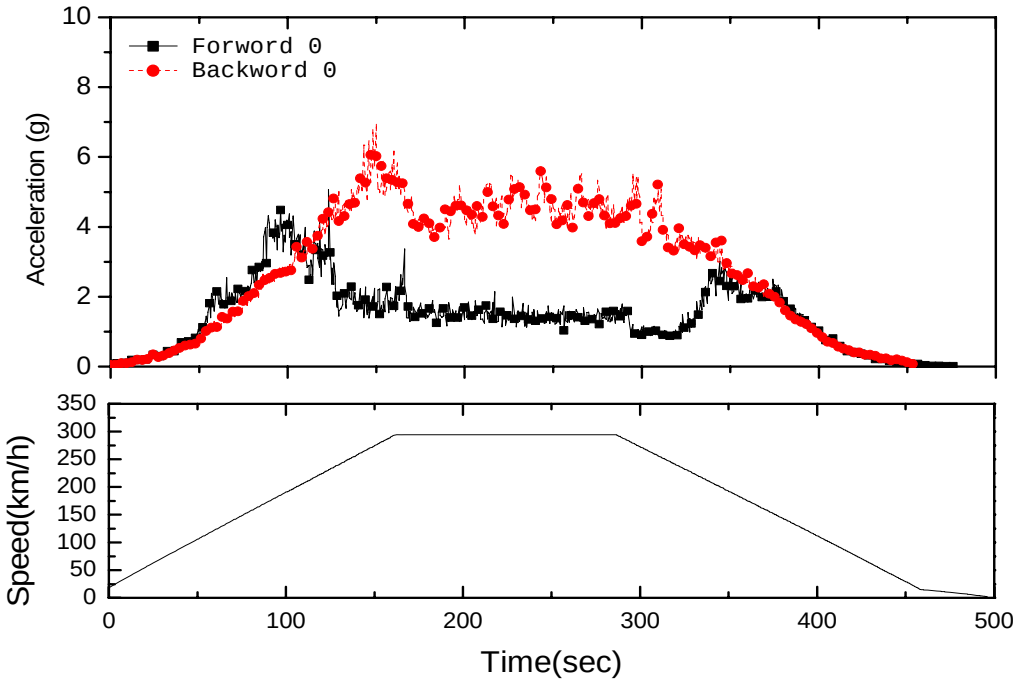



그림 2.3.115 1차 감속기(2회차) 무부하시 정 · 역방향 운전에 따른 상하진동

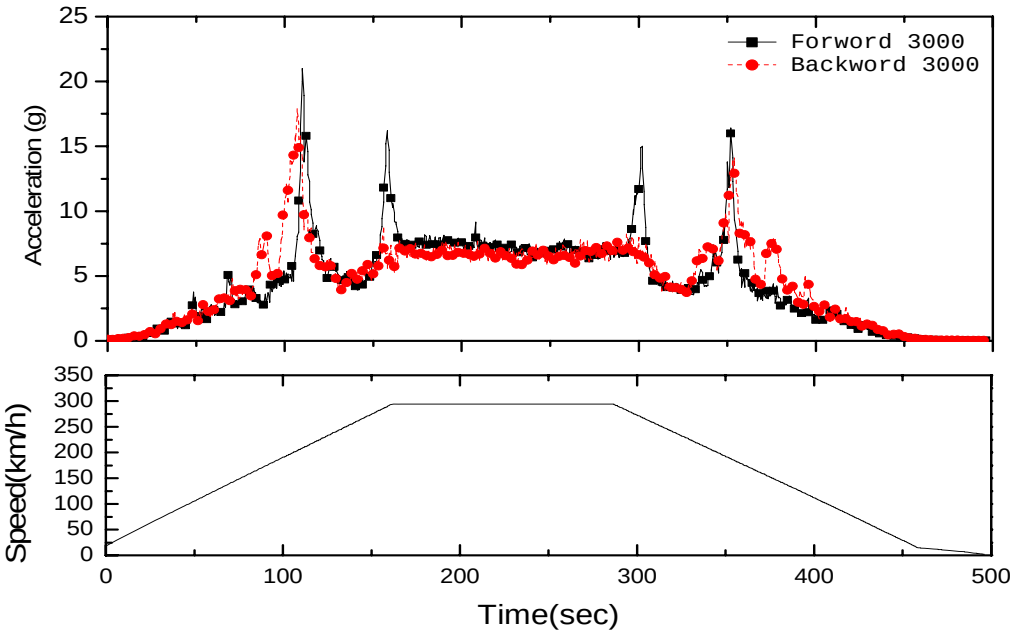



그림 2.3.116 1차 감속기(2회차) 부하시 정·역방향 운전에 따른 상하진동

③ 최대속도에 따른 오더 분석

최대속도인 약 300 km/h (1,965 rpm)까지 증가시켜 가면서 기어의 회전주파수(rpm)에 따른 오더를 분석하였으며, 무부하시 오더에 대한 칼라맵 결과를 그림 2.3.117, 부하시 오더에 대한 칼라맵 결과는 그림 2.3.118에 나타냈다. 무부하시와 부하시 모두 1차, 2차 및 3차 맞물림 주파수에 해당하는 오더를 관측할 수 있었으며, 1차 맞물림에 해당하는 오더는 1회차 시험과 비슷한 49.6으로 나타났다. 평기어인 2차 감속기에서는 기어의 잇수에 해당하는 51오더가 정확하게 관측되었는데 헬리컬기어인 1차 감속기는 기어 잇수(51)보다 작게 나타나고 있다. 2차 감속기의 출력축은 일체축이라서 감속기를 지지하는 축에 속도센서를 부착하였으나 1차감속기 시험시 지지축에 속도를 부착할 수 없는 구조이어서 별도의 바를 설치하여 측정하였다. 측정위치가 유니버설 조인트에 의하여 변동이 생길 수 있는 부분이므로 이러한 원인에 의하여 오더가 작게 나온 것으로 추정된다.

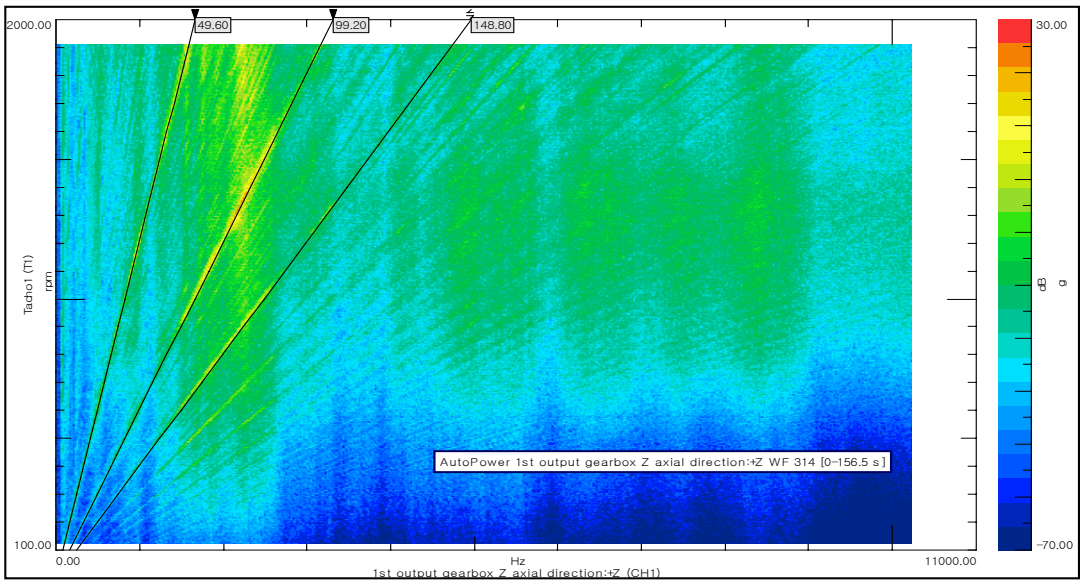



그림 2.3.117 1차 감속기(2회차) 무부하시 오더 분석

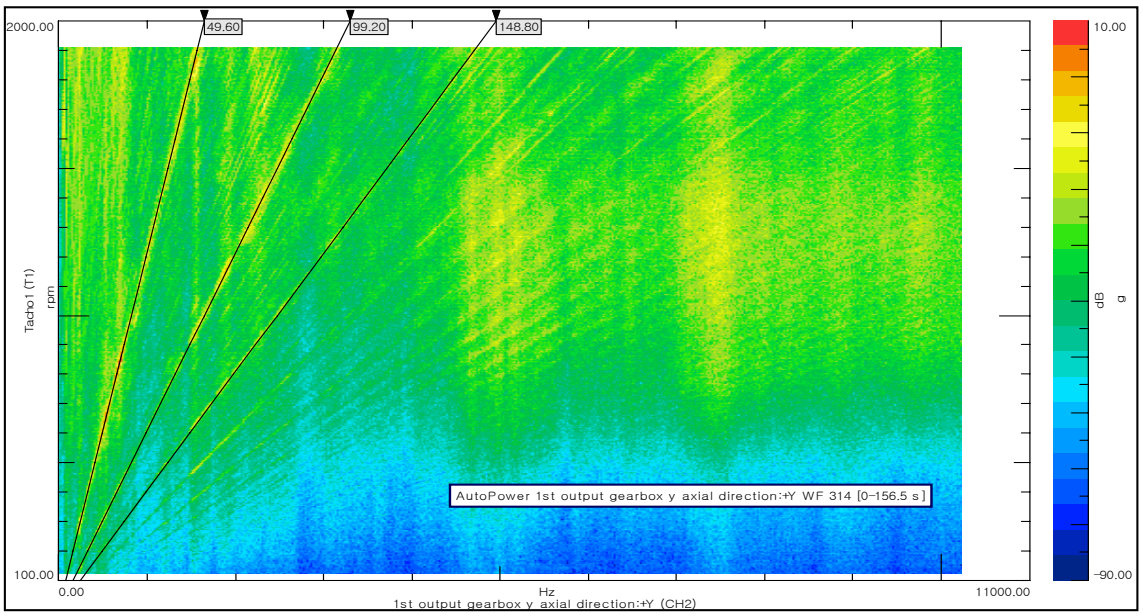



그림 2.3.118 1차 감속기(2회차) 부하시 오더 분석

④ 토크변동에 따른 파워링 특성 분석

그림 2.3.119는 토크 변화에 따른 1차 감속장치의 기어케이스 상하진동 수준의 변화를 나타낸 그림이며, 그림 2.3.120은 토크 변화에 따른 1차 감속장치의 기어케이스 좌우진동 수준의 변화를 나타낸 그림이다. 상하진동의 경우 1회차 시험과 마찬가지로 부하시의 진동수준은 100 km/h에서는 모두 비슷하게 나타나고 있으나 200 km/h에서는 토크 3,000 N · m일 때가 가장 크고 300 km/h에서는 1,000 N · m일 때가 가장 크게 나타나고 있다. 부하시 좌우진동 수준은 100 km/h, 200 km/h에서는 모두 비슷하고 300 km/h에서는 1,000 N · m 조건에서가 가장 크게 나타났으며, 속도에 따라 진동수준은 증가하고 있다.

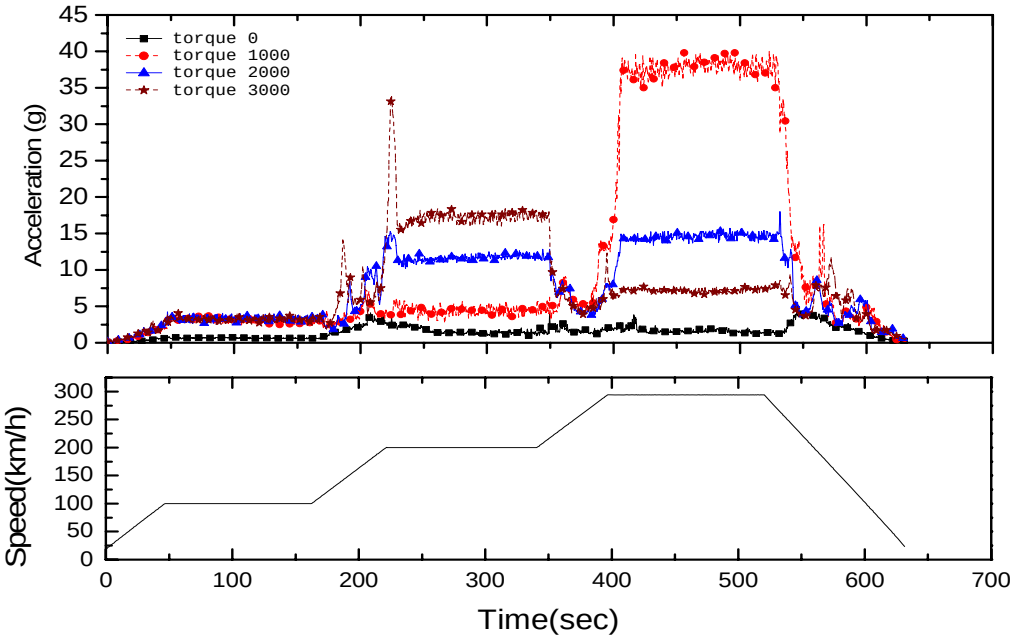



그림 2.3.119 1차 감속기(2회차) 토크변동에 따른 파워링시 상하진동 비교

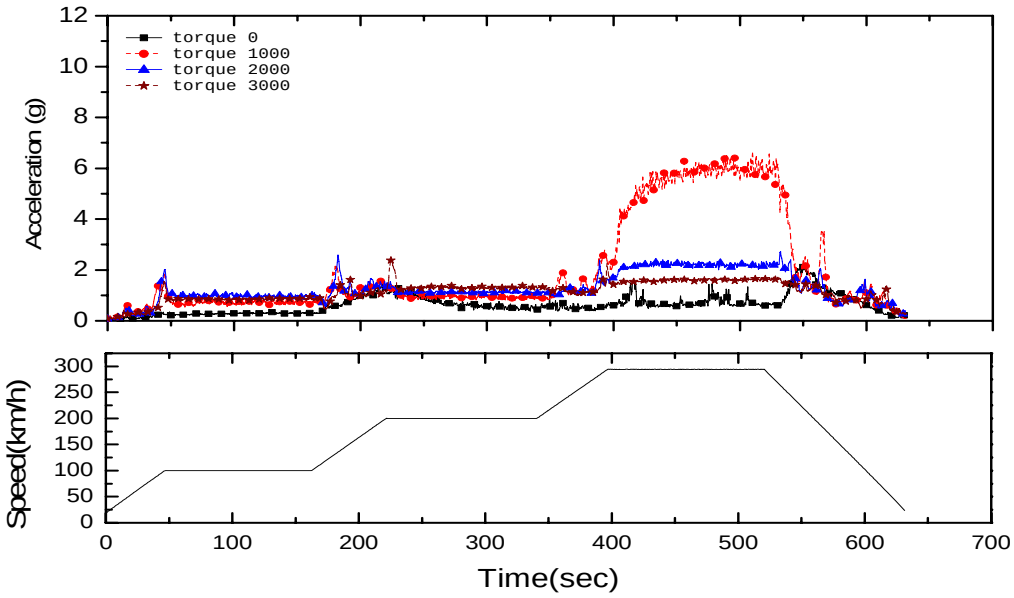



그림 2.3.120 1차 감속기(2회차) 토크변동에 따른 파워링시 좌우진동 비교

⑤ 토크변동에 따른 브레이킹 특성 분석

그림 2.3.121는 브레이킹시 토크 변화에 따른 1차 감속기 기어케이스 상하진동 수준의 변화를 나타낸 그림이며, 그림 2.3.122는 좌우진동 수준의 변화를 나타낸 그림이다. 상하진동의 경우 200 km/h에서는 2,000 N · m일 때가 가장 크고, 300 km/h에서는 1,000 N · m일 때가 크게 나타나고 있다. 부하시 좌우진동수준은 100 km/h, 200 km/h에서는 모두 비슷하고 300 km/h에서 크게 증가하고 있으며, 300 km/h에서 3,000 N · m 조건에서가 가장 작게 나타났다. 토크를 변수로 주었을 때 브레이킹시 토크 변동에 따른 경향성은 나타나지 않았다.

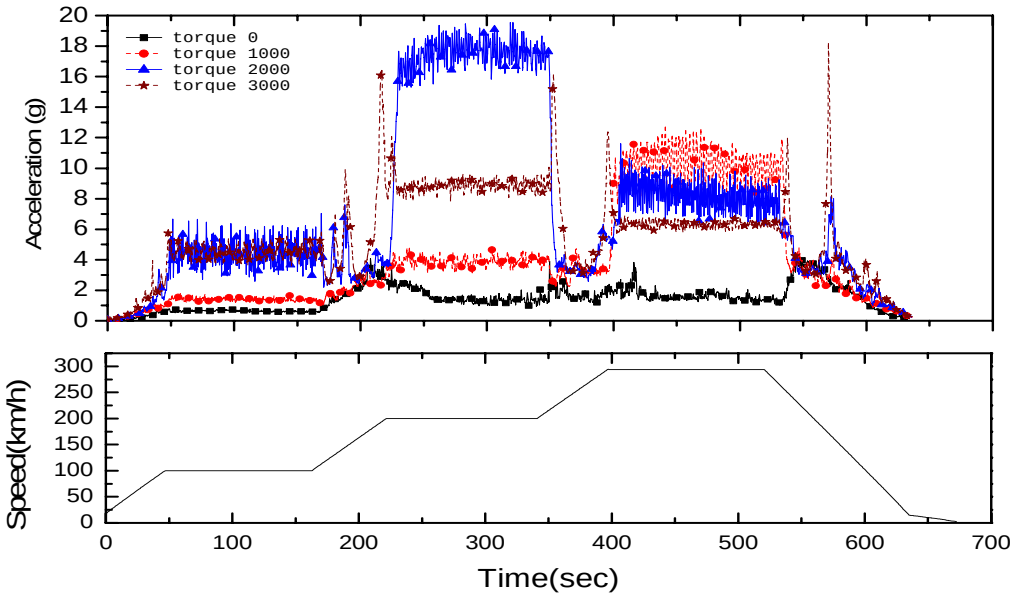



그림 2.3.121 1차 감속기 토크변동에 따른 브레이킹시 상하진동 비교

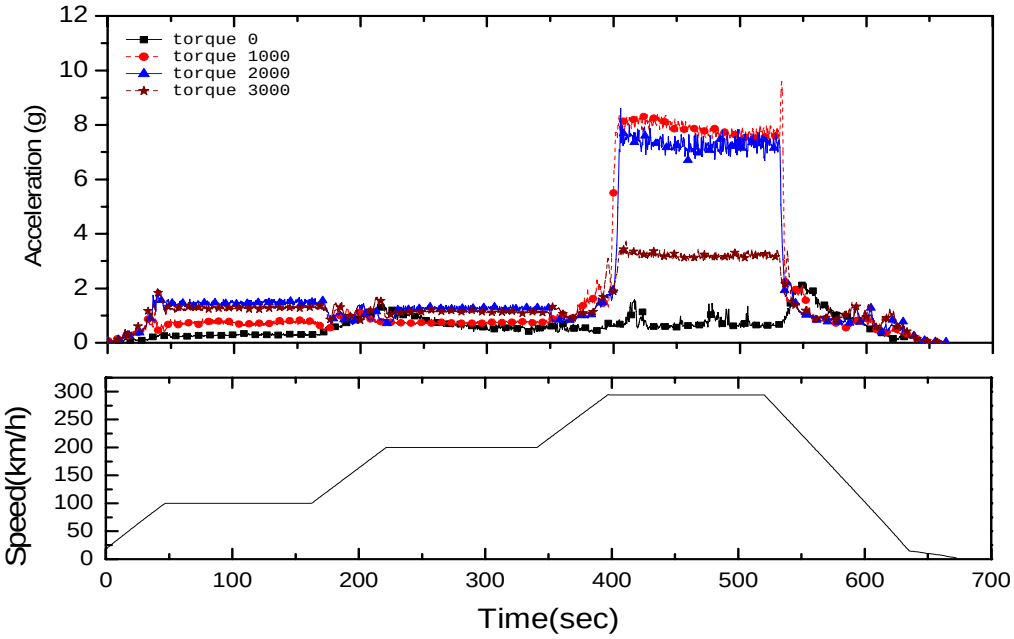



그림 2.3.122 1차 감속기 토크변동에 따른 브레이킹시 좌우진동 비교

⑥ 파고율 및 첨도 분석

그림 2.3.123은 속도 및 토크 변화에 따른 1차 감속장치의 기어케이스의 파고율을 나타낸 그림이다. 1차 감속기 1회차 시험과 마찬가지로 대부분의 파고율은 대부분 3~4 사이의 값을 가지고 있었지만 200 km/h에서 토크 2,000 N · m과 토크 3,000 N · m, 300 km/h에서는 토크 1,000 N · m과 2,000 N · m의 파고율이 2~2.5사이의 값을 가지고 있다. 그림 2.3.124는 1차 감속장치의 기어케이스의 첨도를 나타낸 그림이며, 200 km/h와 300 km/h의 일부 토크값에서 약 1의 값을 나타내는 것을 제외하고 대부분 토크 및 속도에 관계없이 0~1 사이의 값을 나타내고 있다.

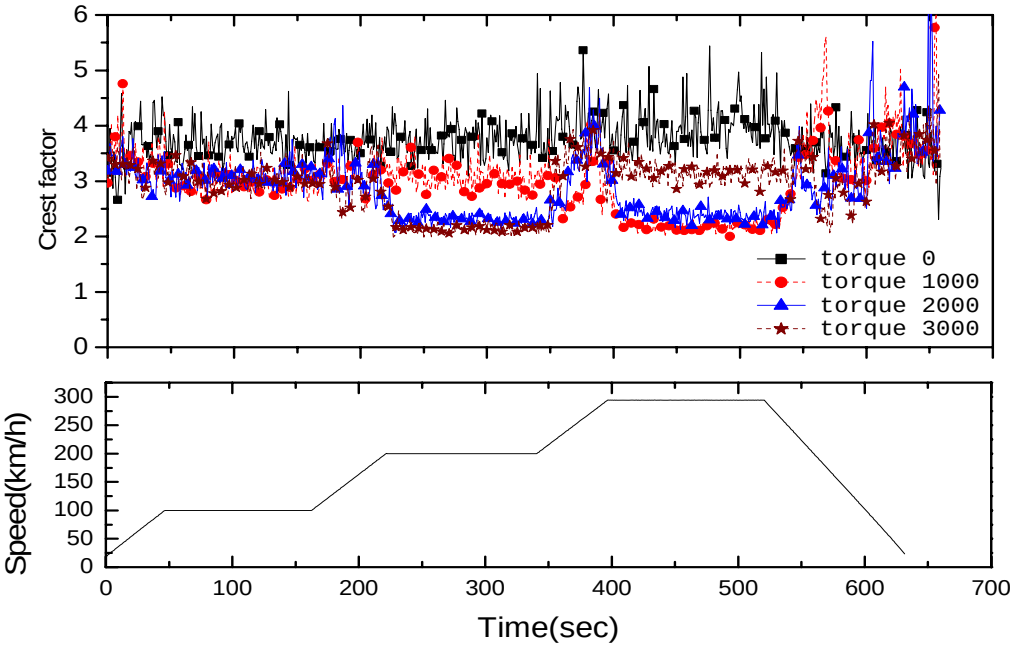



그림 2.3.123 1차 감속기(2회차) 상하진동에 대한 파고율

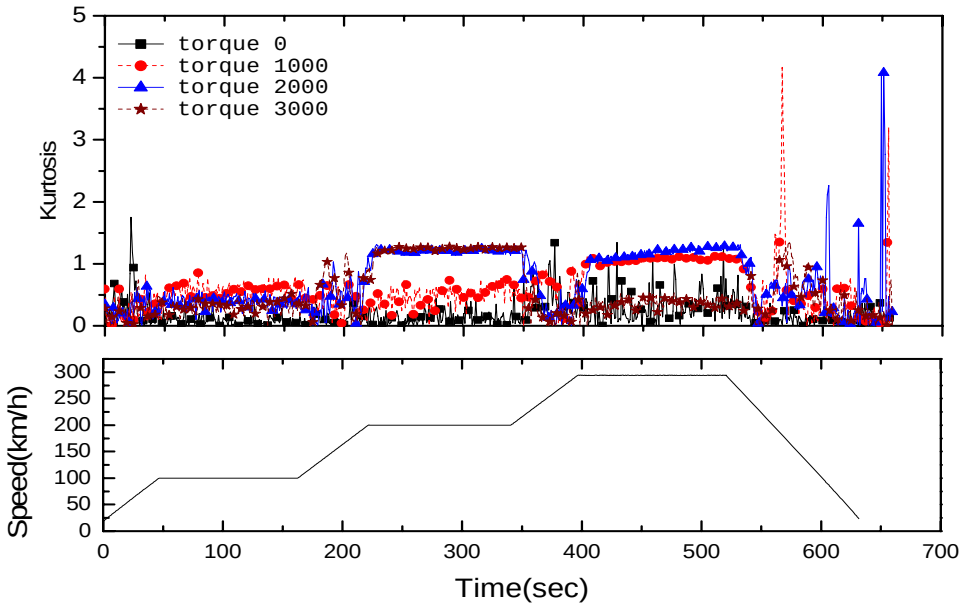



그림 2.3.124 1차 감속기(2회차) 상하진동에 대한 첨도

나. 1차 감속기 시험 및 진동특성 분석 - 이상상태

(1) 측정 개요

1차 감속기 이상상태에서의 진동특성을 파악하기 위해서 기어에 인공 결함을 삽입하여 실험을 하였다. 실험 대상은 입력측 피니언 기어이며 입력측 피니언 기어는 구동 모터와 직접 연결되어 있고 가장 많은 부하를 받는다. 또한 감속기 손상 발생 시 가장 많이 발생하고 손상되는 부분이다. 피니언 기어에 피팅, 기어 이 한 개 50% 파손, 기어 이 한 개 절손, 기어 이 두 개 절손 상태를 구현하여 측정하였다.

(2) 측정 방법

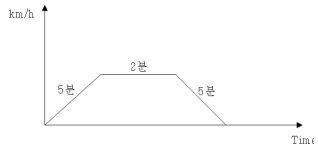
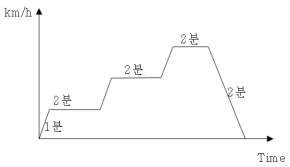
실험 조건은 표 2.3.17과 같으며 기어 이 두 개 절손 상태는 안전을 위해서 토크 1,000 N · m, 속도 668 rpm(약 100 km/h)에서 최대 속도 실험을 진행하였다. 모터 피니언에 인공 결함을 삽입한 것을 그림 2.3.125에서 보여주고 있다. 운행 중인 KTX 감속기에서 진동 신호를 취득할 수 있는 출력측 밖에 없기 때문에 1차 감속기 출력측에서 진동 신호를 취득하였다.



(a) 피팅 (b) 기어 이 50% 파손 (c) 기어 이 한 개 절손 (d) 기어 이 두 개 절손

그림 2.3.125 감속기 이상상태 진동특성 파악을 위한 실험용 피니언 기어

표 2.3.17 실험 조건

<table>
<tr><td>1. 최대속도[100 km/h] 시험<br>(1) 토크 1000, 정방향 ( 증속 5분, 정속 2분, 감속 5분 )</td><td>
</td></tr>
<tr><td>2. 파워링시험 [100 km/h, 200 km/h, 300 km/h ]<br>(1) 토크 3000, ( [100 km/h]: 2분, [200 km/h]: 2분, [300 km/h]: 2분 )</td><td>
</td></tr>
<tr><td>※ 2차 감속기 속도에 따른 rpm<br>- 300 km/h시 rpm : 2,005(입력), <u>1,730(출력)</u><br>- 200 km/h시 rpm : 1,337(입력), <u>1,153(출력)</u><br>- 100 km/h시 rpm : 668(입력), <u>577(출력)</u></td><td>※ 1차 감속기 속도에 따른 rpm<br>- 300 km/h시 rpm : 3,788(입력), <u>2,005(출력)</u><br>- 200 km/h시 rpm : 2,525(입력), <u>1,337(출력)</u><br>- 100 km/h시 rpm : 1,263(입력), <u>668(출력)</u></td></tr>
</table>

(3) 진동 특성 분석

속도 및 토크 변화에 따른 결함별 진동특성을 분석하여 그림 2.3.126 ~ 2.3.127에 나타냈다. 실험 조건, 결함에 상관없이 상하, 좌우 진동을 비교하면 모든 상태에서 상하 진동이 좌우 진동보다 크다. 상하 진동이 감속기에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 토크 3,000 N · m, 속도 668 rpm에서 결함 상태가 정상 상태보다 상하 진동 레벨이 약 2배 이상으로 나타났다. 하지만 토크 3,000 N · m, 속도 1,967 rpm에서는 상사 진동 레벨 차이가 약 10배 이상 차이를 보인다. 속도 증가에 따른 부하 증가로 인한 진동 레벨이 상승한 것으로 판단된다. 토크 1,000 N · m, 속도 668 rpm에서는 토크 3,000 N · m, 속도 668rpm과 비슷한 경향을 보인다. 이 실험 조건에서 기어 이 2개 부러진 상태(100% breakage 2)가 가장 높은 진동 레벨을 보인 것을 알 수 있다.

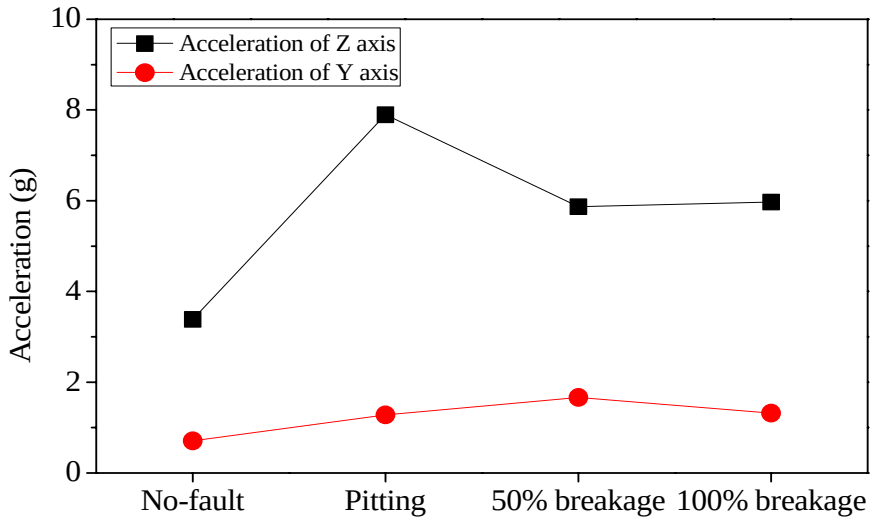



그림 2.3.126 Average acceleration at T 3,000N·m, speed 668rpm

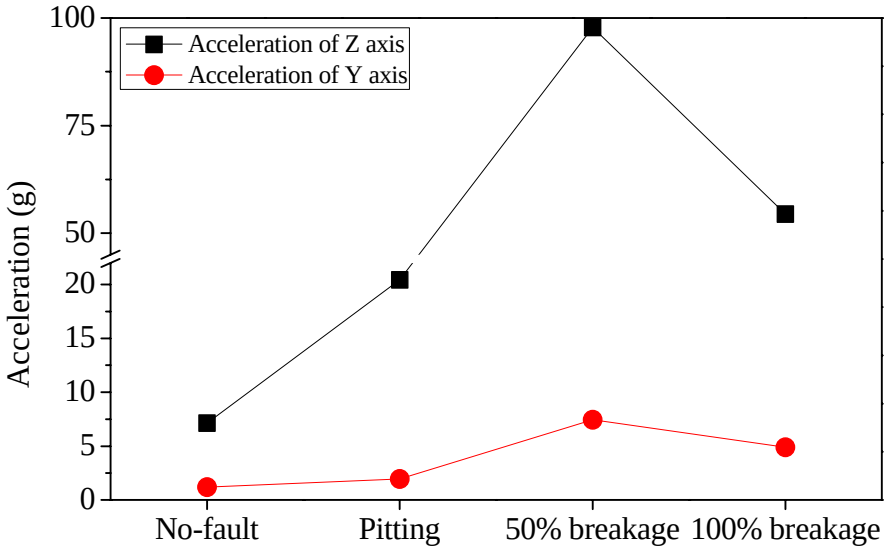



그림 2.3.127 Average acceleration at T 3,000N·m, speed 1,967rpm

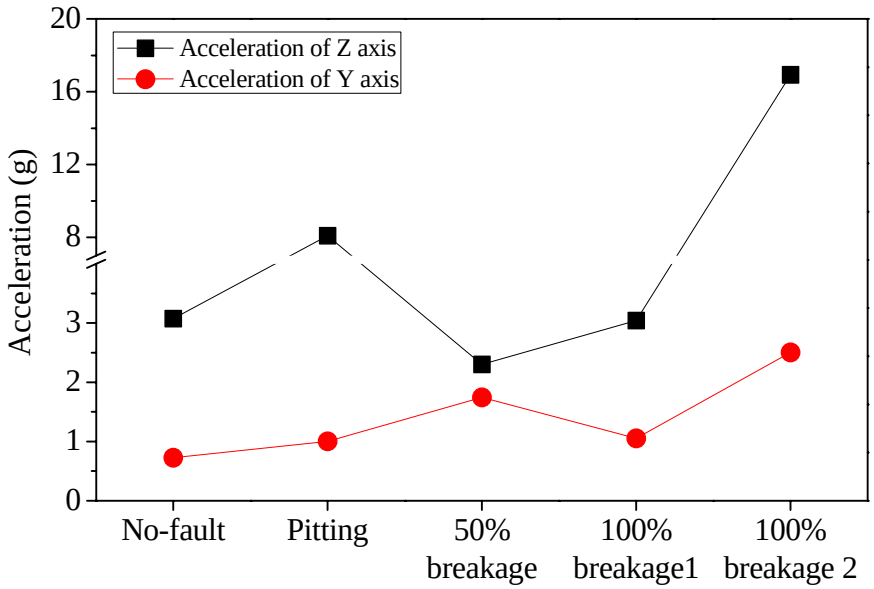



그림 2.3.128 Average acceleration at T 1,000N·m, speed 668rpm

그림 2.3.126 ~ 2.3.128에서 상하 진동이 좌우 진동보다 높기에 좌우 진동보다는 상하 진동이 감속기에 더 영향을 준다는 것을 의미한다. 따라서 상하 진동을 중심으로 주파수 분석을 하였다. 그림 2.3.129는 정상 기어와 피팅 기어에 대한 주파수 분석이다. 정상 기어와 피팅 기어의 주파수 형태는 비슷하다는 것을 알 수 있으나 피팅 기어의 1차 맞물림 주파수 진폭과 사이드밴드 진폭이 더 크다는 것을 알 수 있다. 그림 2.3.130은 50% 파손과 1개 절손 상태를 비교한 것이다. 두 상태 모두 1차 맞물림 주파수가 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 50% 파손이 1개 절손 상태보다 높은 진동을 보인다는 것은 특이 사항이다. 전반적으로 기어 이가 파손상태일 때는 1차 맞물림 주파수 진폭이 10g 이상이다. 그리고 사이드밴드는 일정 간격(파손된 입력측 기어 회전 주파수)으로 발생하며 그 크기 역시 정상상태와 피팅상태보다 높다는 것을 알 수 있다.

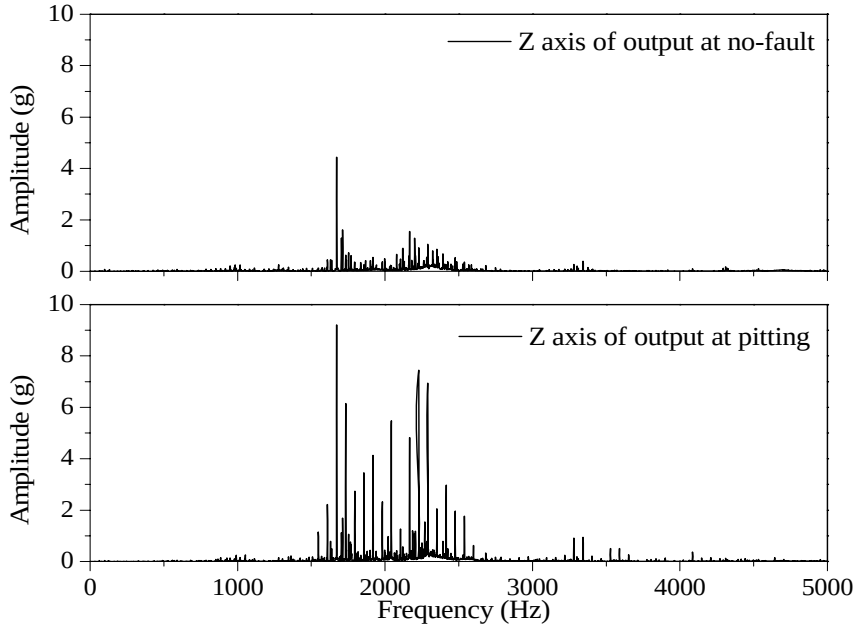



그림 2.3.129 결함상태별 주파수 분석(토크 3,000N·m, 속도 1967rpm)-1

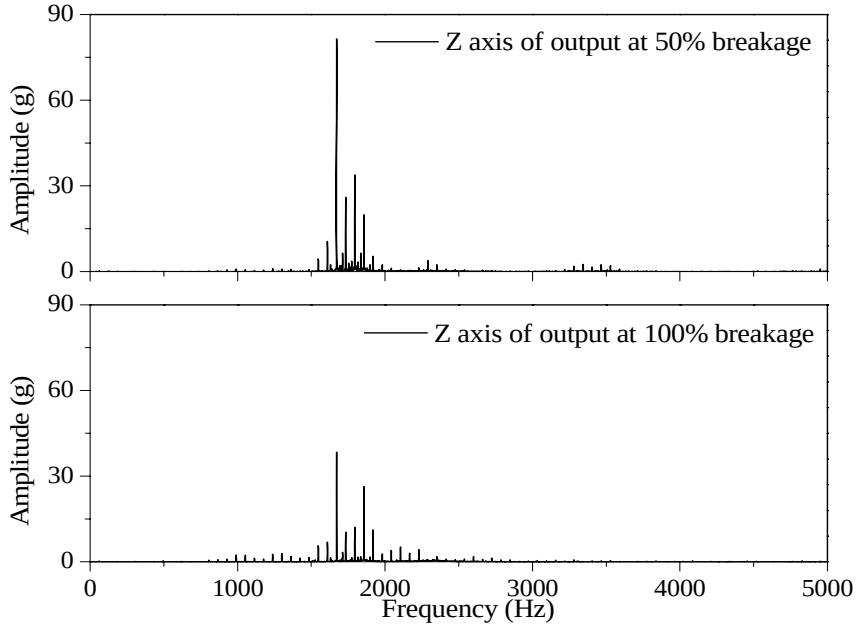



그림 2.3.130 결함상태별 주파수 분석(토크 3,000N·m, 속도 1967rpm)-2

그림 2.3.131 ~ 2.3.135는 토크 1,000 N · m, 속도 668 rpm에서 각 결함 상태에 따른 주파수 분석 그래프이다. 그림 2.3.131과 그림 2.3.132는 정상상태와 피팅 상태의 주파수 그래프이다. 두 상태에서 공통적으로 3차와 4차 맞물림 주파수가 주주파수로 나타났다. 피팅상태가 정상상태보다 높은 진폭을 가진다는 것을 알 수 있다. 그림 2.3.133과 그림 2.3.134는 반파 상태와 절손 상태의 주파수 그래프이다. 정상 상태와 피팅 상태와 달리 1,2,3,4 차 맞물림 주파수가 명확하게 나타나며 사이드밴드의 수와 진폭이 증가하는 것을 알 수 있다. 절손 상태는 다른 결함 상태보다 많은 사이드밴드가 나타나고 있다. 그림 2.3.135는 기어 이가 두 개 부러진 상태로 사이드밴드가 급격하게 증가하고 진폭도 커졌다. 그리고 다른 결함상태들과 다른 주파수 형태를 가진다.

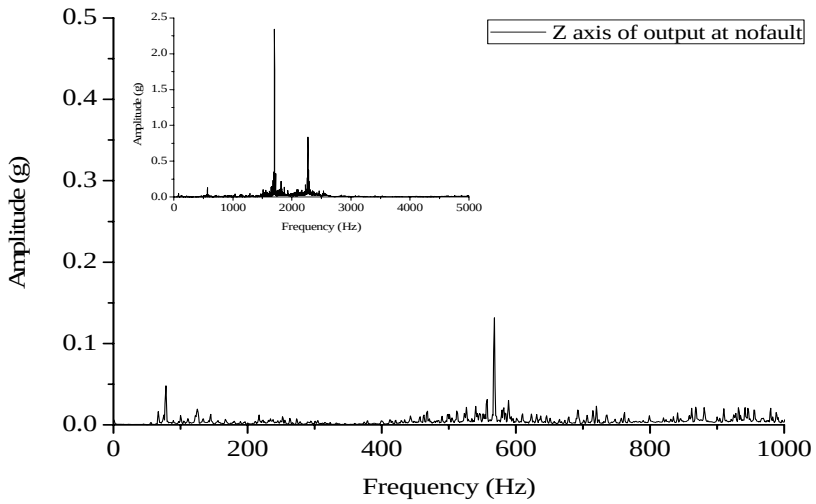



그림 2.3.131 정상 상태에서의 주파수 그래프

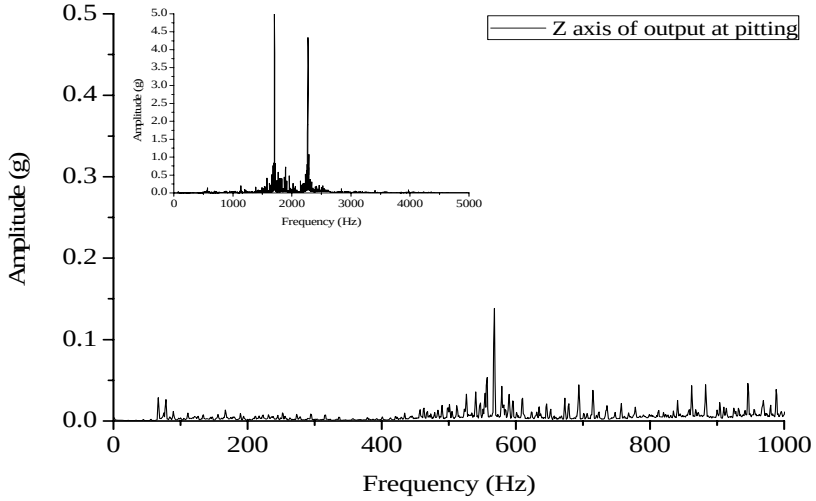



그림 2.3.132 피팅 상태에서의 주파수 그래프

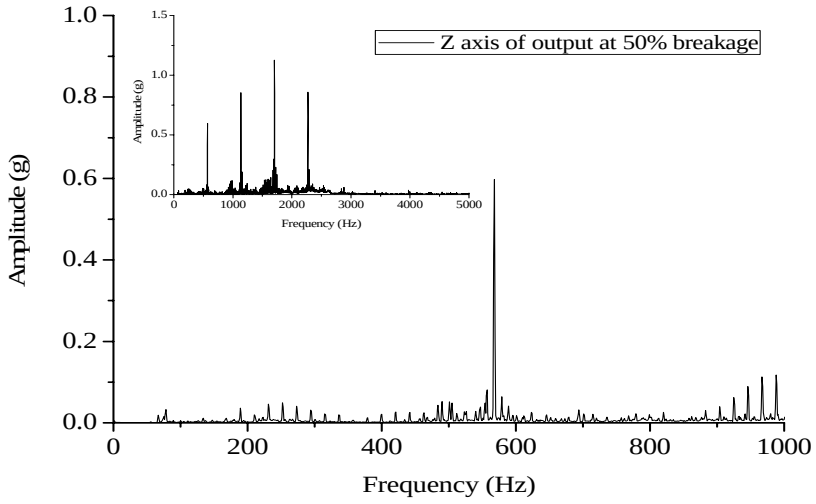



그림 2.3.133 반파 상태에서의 주파수 그래프

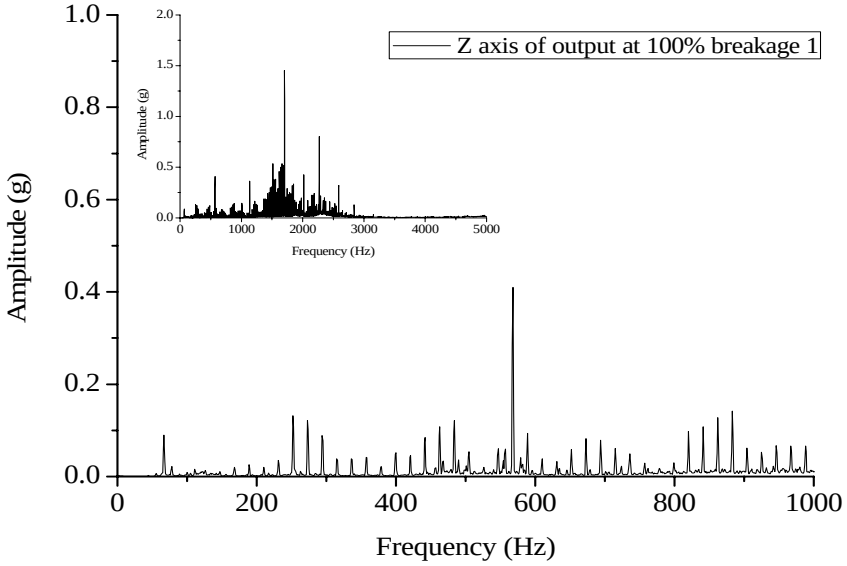



그림 2.3.134 기어 이 한 개 절손 상태에서의 주파수 그래프

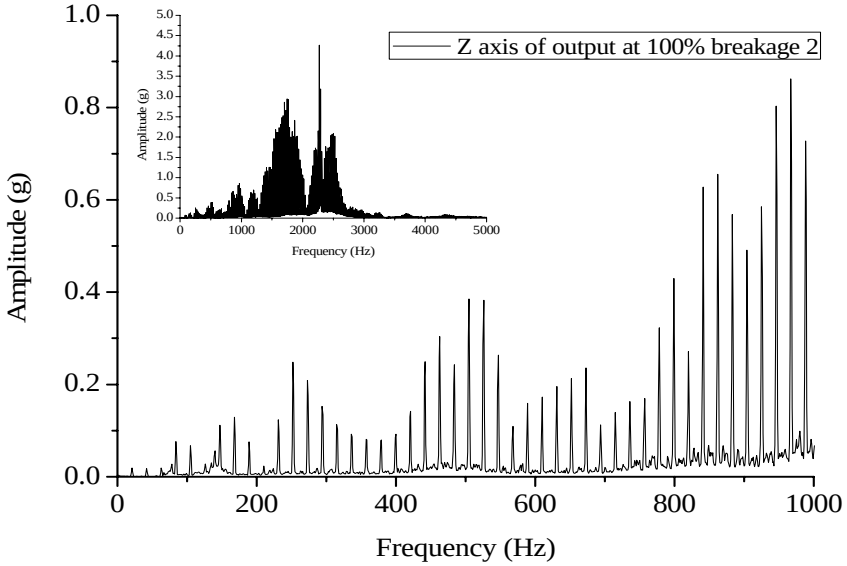



그림 2.3.135 기어 이 두 개 절손 상태에서의 주파수 그래프

(4) 파고율 및 첨도 분석

그림 2.3.136 ~ 2.3.141은 속도 및 토크변화에 따른 결함별 평균 파고율과 평균 첨도이다. 속도, 토크, 결함에 상관없이 비슷한 파고율과 첨도를 보인다. 또한 정상상태에서의 범위 내에 존재하며 파고율은 3~6, 첨도는 1 이하의 값을 가진다. 하지만 기어 이 2개 부러졌을 때 파고율과 첨도가 상승하는 것을 알 수 있다. 이 차이는 물림율의 변화로 인한 것으로 보인다. 정상상태에서의 물림율은 2.7이다. 피팅 상태와 기어 이 반파 상태 역시 정상 기어의 물림율과 큰 변화를 보이지 않는다. 기어 이 한 개 절손 상태는 2.7보다 낮아지지만 최소 한 개의 기어 이가 맞물리기에 정상상태와 비슷한 파고율과 첨도를 가진다. 하지만 기어 이 두 개 절손 상태는 다른 결함 상태와 다르게 기어들이 맞물리게 된다. 이 영향으로 기어 이가 두 개 부러졌을 때 더 큰 충격이 발생하여 파고율과 첨도 상승하는 것으로 판단된다.

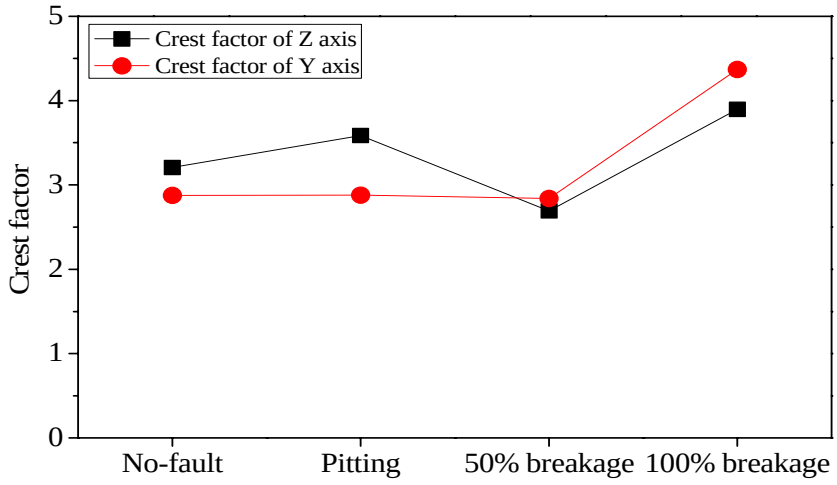



그림 2.3.136 Average crest factor at T 3,000N·m, speed 668 rpm

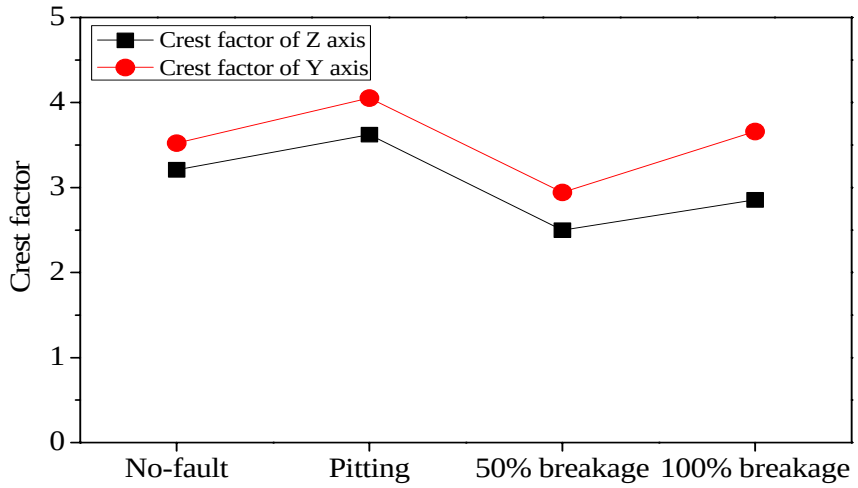



그림 2.3.137 Average crest factor at T 3,000N·m, speed 1,967rpm

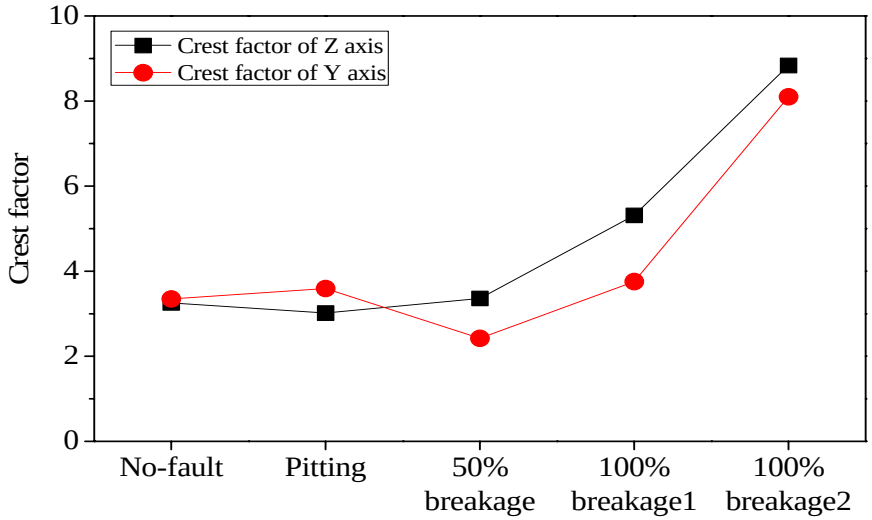



그림 2.3.138 Average crest factor at T 1,000N·m, speed 668rpm

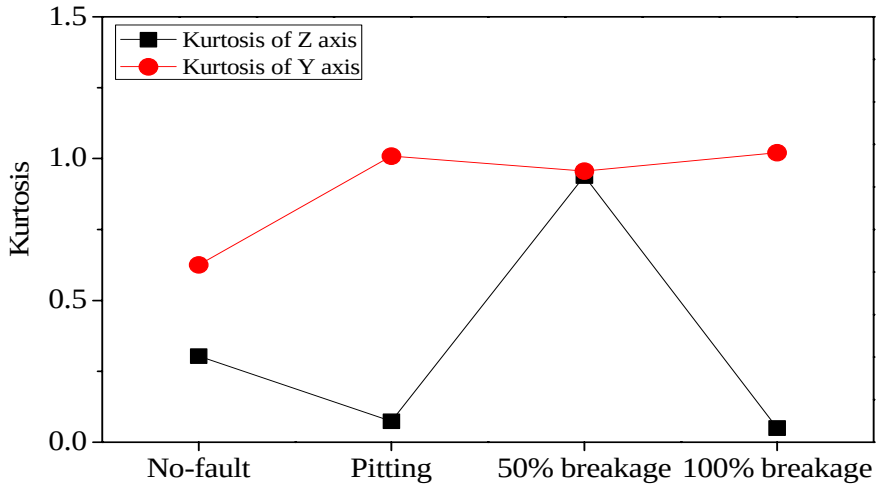



그림 2.3.139 Average kurtosis at T 3,000N・m, speed 668rpm

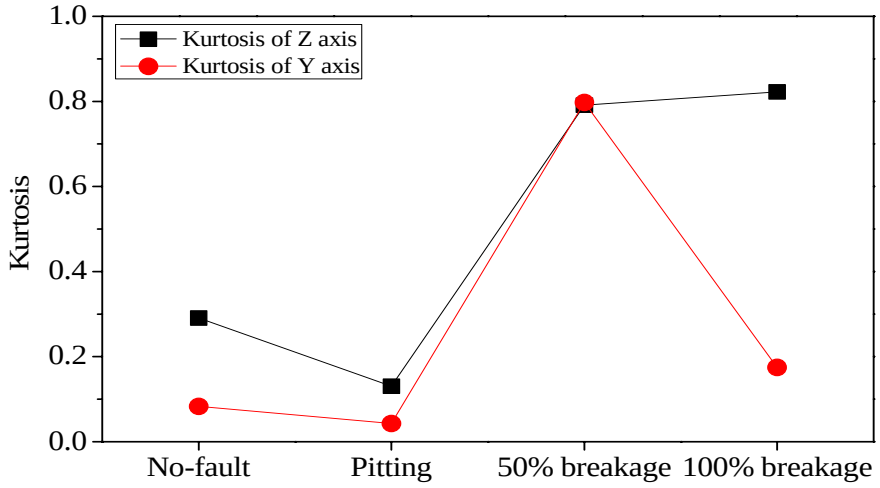



그림 2.3.140 Average kurtosis at T 3,000N・m, speed 1,967rpm

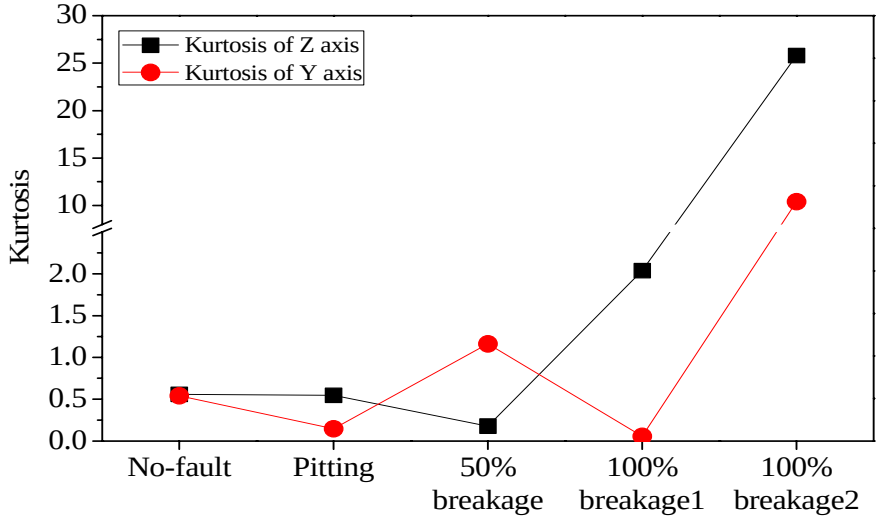



그림 2.3.141 Average kurtosis at T 1,000N・m, speed 668rpm

# 제4절 진동에 의한 감속기 결함 및 이상상태 평가

## 1. 철도차량 감속기 현차시험 및 진동특성 분석

### 가. 전동차용 감속기

#### (1) 시험방법 및 기준 검토

##### (가) 개요

감속구동장치의 진동을 측정하고 특성을 분석하기 위하여 적절한 센서 및 부착위치를 선정해야 함. 현재 감속구동장치의 측정데이터가 없는 상황에서 시험의 신뢰성 및 시험 횟수를 줄이기 위하여 관련 규격 “기어장치의 인수검사 (ISO 8579)”을 참고하여 감속구동장치 실물시험에 적용하고자 한다.

##### (나) 부착위치 및 측정 주파수

- 계측기의 측정 주파수 범위는 가장 낮은 축의 회전 주파수와 가장 높은 물림 주파수를 측정할 수 있는 것이어야 한다.
- 기어박스의 진동 속도 주파수 범위는 가속도 적분식 측정법을 사용하는 경우에는 10~10,000 Hz 또는 그 이상이 바람직하다.
- 기어 상자의 진동 측정은 베어링대와 같은 강성이 높은 부분에서 측정하여야 한다.
- 베어링대에서 측정할 수 없는 경우에는 가장 가까운 부착 부분에서 측정하여도 된다.
- 측정은 직교하는 3방향에서 하고 그 중 2방향은 회전축에 수직(수평과 연직한 것이 바람직함.) 한 방향에서 하여야 한다.
- 측정한 기어박스의 진동 속도 rms 값은 45~1590 Hz에서의 값을 기준으로 등급을 붙일 수 있으며 그림 2.4.1과 같다.

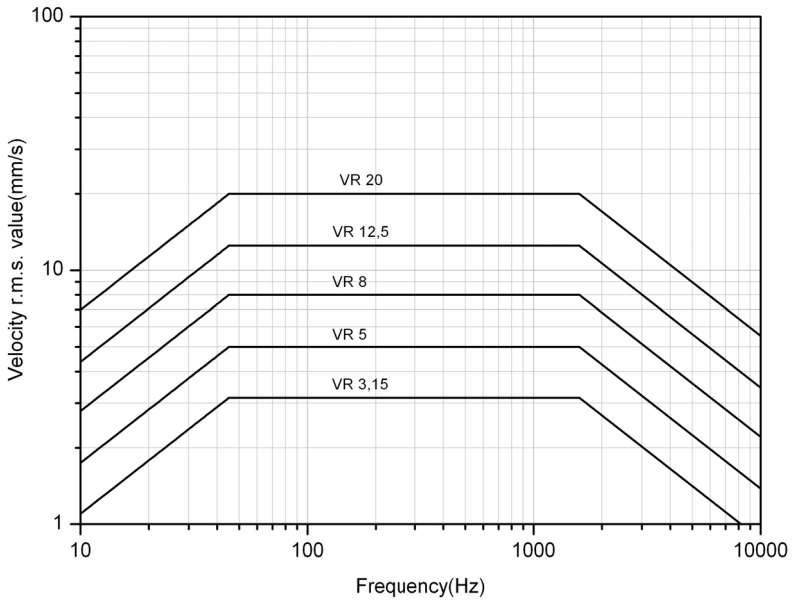



그림 2.4.1 기어의 진동등급

표 2.4.1 대표적 기어장치의 등급

| 등급값 | 대표적 기어 장치 |
|---|---|
| A | 함정용 등 |
| B | 고속용(3600rpm 초과) 등 |
| C | 산업용, 선박용 |
| D | 분쇄기 등 |

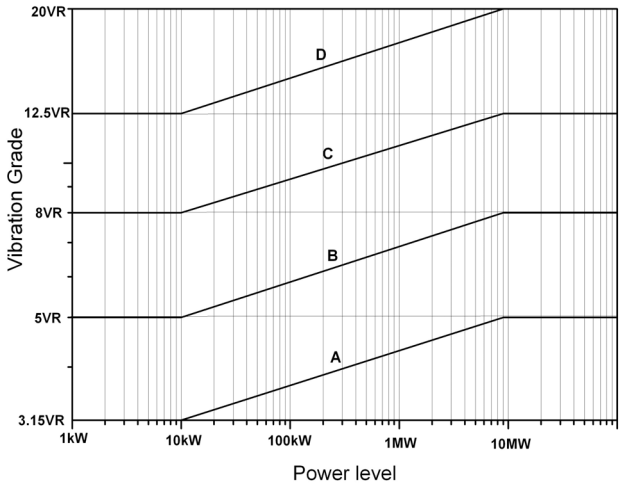



그림 2.4.2 대표적 기어장치의 진동 등급값

(다) 기어장치의 등급

표 2.4.1과 그림 2.4.2는 대표적 기어장치의 등급을 나타낸다. KTX는 고속용이므로 B등급에 해당하며, 최고동력은 1,130 kW이므로 VR 8에 근접한다. 인수 기준으로서 안전을 고려하여 선정하면 VR 5를 기준으로 선정하는 것이 적정하다.

(2) 전동차용 감속구동장치 실물시험 및 분석

(가) 목적

전동차용 감속기 실물 진동시험은 추후 측정할 고속열차용 감속기 실물시험의 예비시험성격이며, 전동차용 감속기 진동시험 결과는 참고자료로 활용하여 고속열차용 감속기 진동시험결과와 비교하고자 한다.

(나) 측정 개요

전동차용 감속구동장치 진동시험은 한국철도기술연구원 부품시험동에 설치된 감속구동장치 시험기를 이용하여 측정하였다. 가속도계 센서 부착위치는 입력측인 피니언, 출력측인 기어를 지지하는 베어링대, 기어케이스 상부에 부착하였고, 속도는 축에 은박테이프를 붙이고 축의 지지대에 Photo 센서를 부착하여 측정하였다. 그림 2.4.3은 센서 부착위치이며, 그림 2.4.4는 센서 부착위치 및 계측장비에 대한 사진이다. 측정에 사용된 장비의 주요제원은 표 2.4.3과 같다.

표 2.4.2 시험 개요

| | |
|---|---|
| 시험일자 | 2012. 3. 21~22 |
| 시험장소 | 철도기술연구원 부품시험동 |
| 시험대상 | 전동차용 감속기 1set |
| | 기어비 : 7.07(99/14) |
| Vibration Accelermeter | 5개 |
| 설치 위치 | - 기어측 : 단축 3개<br>- 기어박스 : 단축 1개<br>- 피니언측 : 단축 1개)<br>- 축 지지대 : 속도센서(타코) 1개 |

표 2.4.3 측정에 사용된 장비

| 측정 장비 | 수 량 | 사 양 | 비 고 |
|---|---|---|---|
| Data recorder | 1대 | LMS Test Lab | 데이타저장 |
| Photo Sensor | 1대 | E3S-AD11 | 속도 측정 |
| F/V Converter | 1대 | K3HB-RNB-L2AT11 | 속도 측정 |
| Accelerometer | 5개 | ICP | 진동측정 |

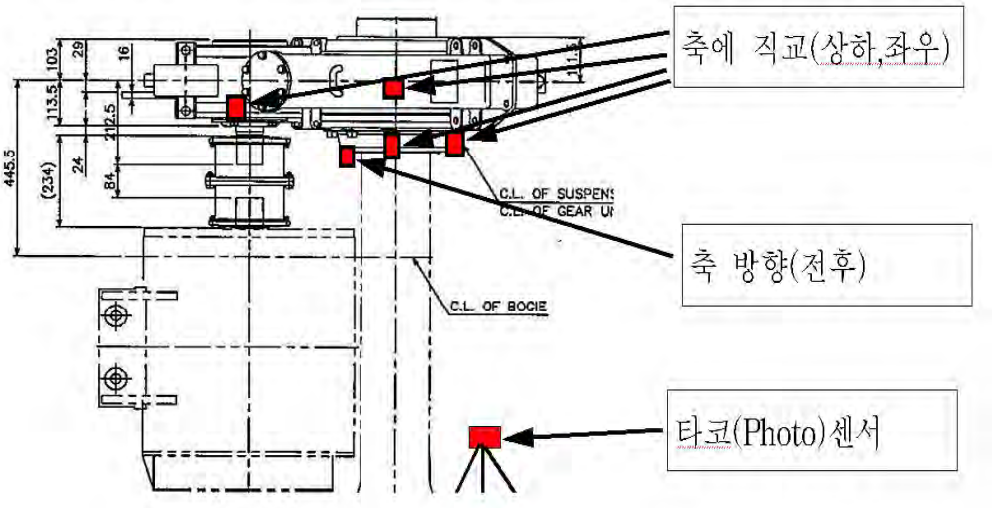


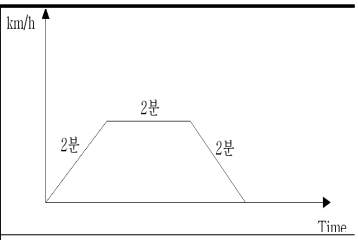
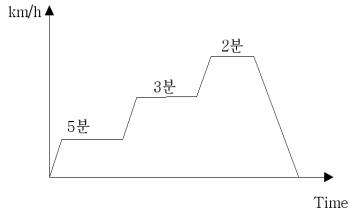
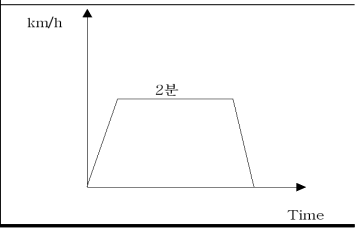

그림 2.4.3 감속구동장치 센서 부착위치



그림 2.4.4 센서 부착위치 및 계측장비 사진

시험조건으로는 전동차용 감속구동장치 시험규격을 참고해서 표 2.4.4와 같이 시험조건을 구성하였다. 규격에 있는 파워링, 브레이킹, 최대토크 시험을 반영하였으며, 또한 최대속도까지 올렸을 때의 오더(Order)에 따른 주파수의 변화도 측정할 수 있도록 최대속도 시험도 반영하였다.

표 2.4.4 시험조건

| | |
|---|---|
| – 최대속도[100 km/h, rpm(647(기어), 4574(피니언))]시험<br>· 정방향(증속 2분, 정속 2분, 감속 2분)<br>· 역방향(증속 2분, 정속 2분, 감속 2분) |  |
| – 파워링시험[정격(50km/h),영업(80km/h), 최대(100km/h)]<br>· 정방향(정격 5분, 영업 3분, 최대 2분)<br>· 역방향(정격 5분, 영업 3분, 최대 2분) |  |
| – 브레이킹시험[정격(50km/h),영업(80km/h),최대(100km/h)]<br>· 정방향(정격 5분, 영업 3분, 최대 2분)<br>· 역방향(정격 5분, 영업 3분, 최대 2분) | |
| – 최대토크[20km/h, rpm(129(기어),915(피니언))]시험<br>· 정방향(정속 2분)<br>· 역방향(정속 2분) |  |

(다) 측정결과

기어의 회전주파수(rpm)에 따른 오더를 분석하였으며, 분석 결과는 그림 2.4.5에 나타냈다. 출력측 기어의 잇수는 99로서 기어 맞물림 오더에 해당한다. 전체 측정위치에서 맞물림 주파수(Gear Mesh Frequency)의 1차에 해당하는 99오더가 관찰되고 있으며, 회전축에 수직인 상하 및 횡방향에서는 2차, 3차 맞물림 주파수인 198과 297 오더에서도 진동이 관측된다. 또한 피니언 기어 회전수의 2차 오더에 해당하는 14.14에서도 진동이 관측된다.

전동차용 감속구동장치는 표 2.4.1의 등급에 의하면 100 km/h 속도에서 4,574 rpm이므로 고속용으로 B등급에 해당한다. VR 8과 VR 5 사이에 해당하므로 인수 기준으로서 안전을 고려하여 선정하면 VR 5가 기준이 될 수 있다. 최대 속도인 100 km/h로 구동했을 때 전동차용 감속구동장치의 등급 시험 결과는 그림 2.4.6과 같다. 출력측 기어 등급 결과를 보면, 대부분 VR 3.15 이내에 있고 맞물림 주파수인 1,067 Hz에서만 VR 3.15를 넘어감을 알 수 있다. 그림 2.4.6 (b)에서 기어박스의 진동은 맞물림 주파수에서 VR 5를 넘어가고 있으며, 입력측 진동은 입력측 기어의 회전 주파수(76 Hz)의 2배인 152 Hz에서 VR 8을 넘어가고 있다. 입력측 상의 기어 회전체에서 회전 불균형이 있는 것으로 판단된다.

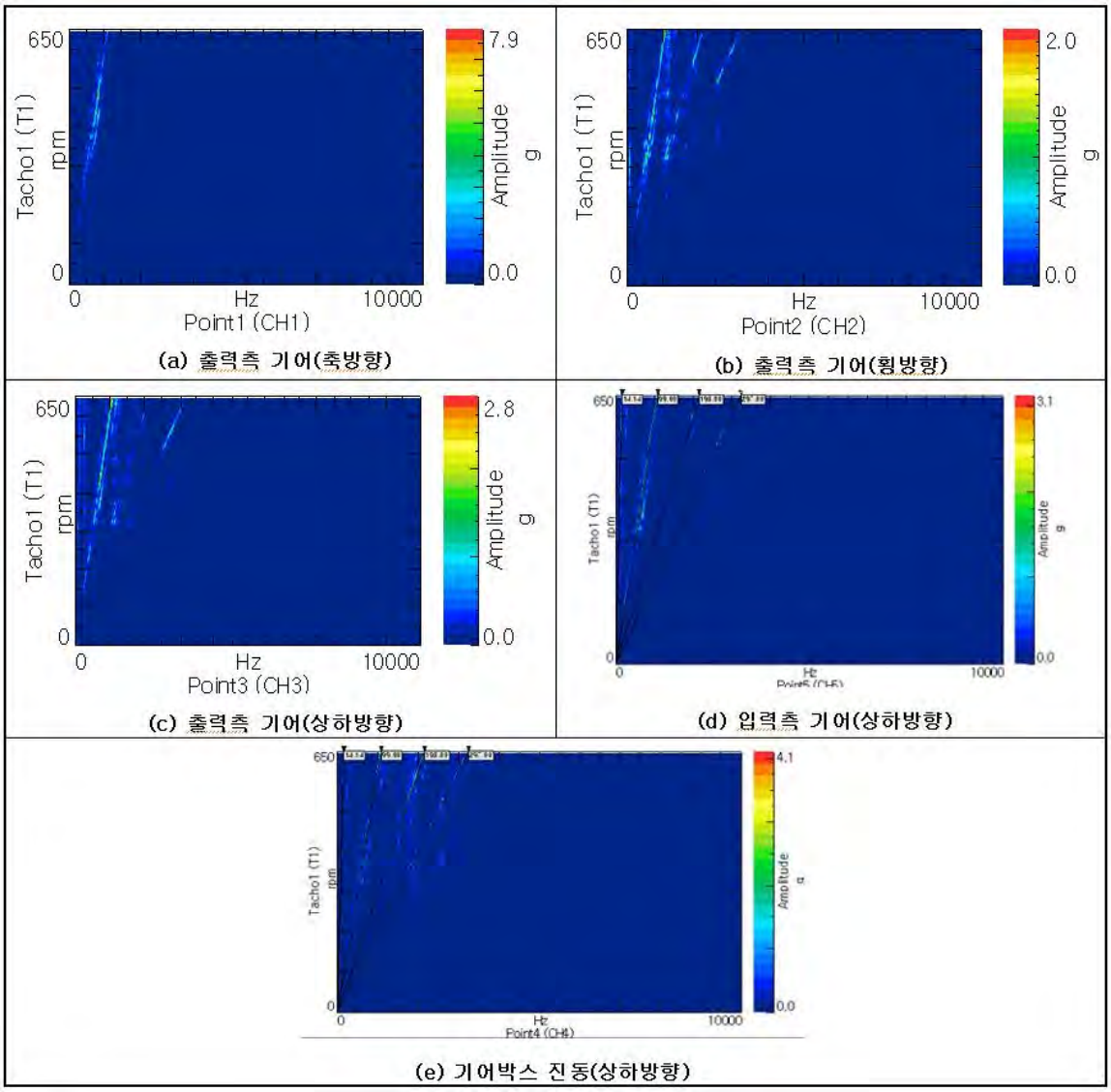



그림 2.4.5 Order 분석(0~647rpm(100km/h))

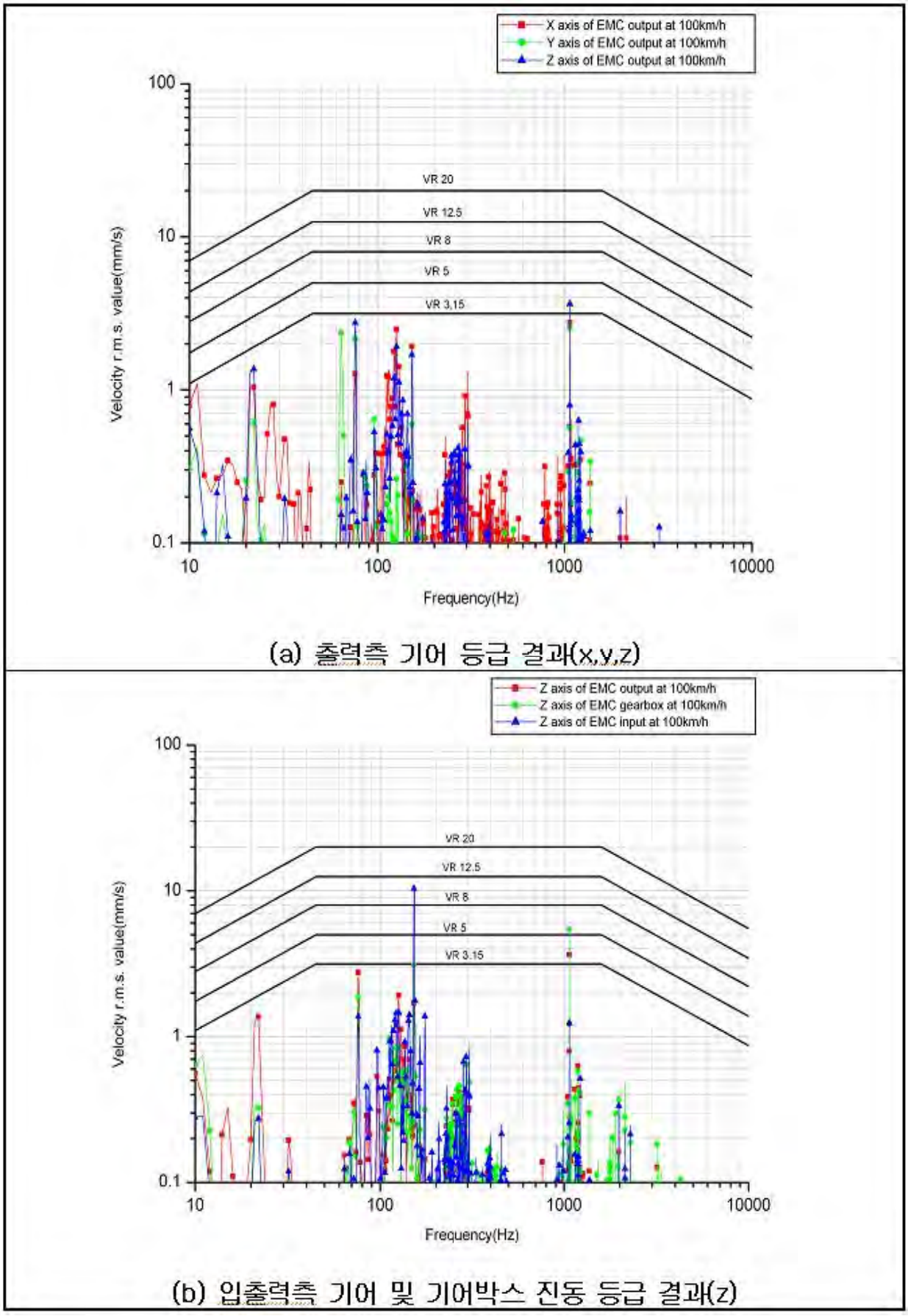



그림 2.4.6 전동차용 감속구동장치 진동 등급 결과

(3) 전동차용 감속구동장치 실차시험 및 분석

(가) 측정개요

부산지하철 1호선(노포역-신평역) Gearbox 및 대차의 가동 중 현재 진동상태와 주파수 분석을 확인하기 위하여 1호기 Gearbox(93년도 제작) 수직(V: Vertical), 축(A: Axial)방향 및 대차 수직(V: Vertical)방향과, 2호기 Gearbox(84년도 제작) 수직(V: Vertical), 축(A: Axial)방향 및 대차 수직(V: Vertical)방향, 차륜 Tach sensor(Speed detector)포함 총 7point를 지하철 왕복운행 구간 동안 다채널 진동 분석 장비(6500, LMS)로 측정 하였다. 가동 조건은 정상운행속도 80 km/h를 기준으로 각역 출발 및 도착을 포함한 부산 지하철 1호선 전체 운행구간을 기준으로 하였다. 계측기의 측정 기본 설정 값은 다음과 같다.

- 6500 : 3600 Line, Fmax 2000 Hz
  LMS : 1800 Line, Fmax 3072 Hz

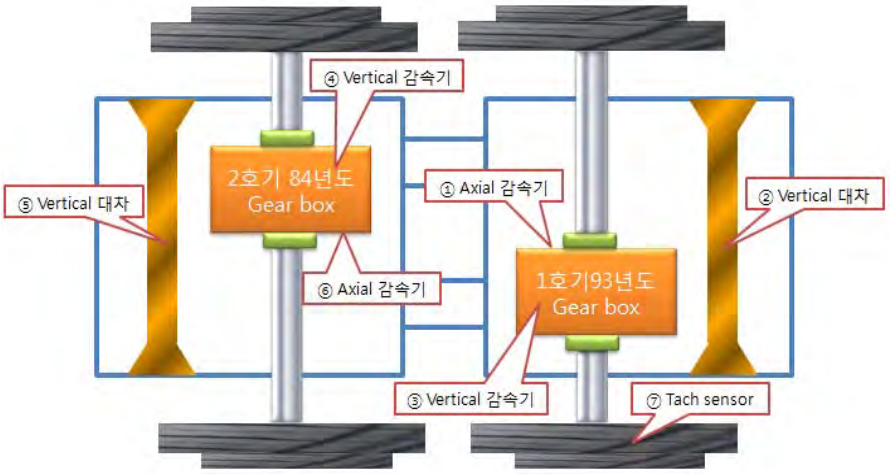



그림 2.4.7 전동차용 감속기 실차시험 부착위치

표 2.4.5 시험 개요

| | |
|---|---|
| 시험일자 | 2012. 3. 15 |
| 시험구간 | 부산지하철 1호선 노포↔신평역 |
| 시험대상 | 전동차용 감속기 2set |
| | 기어비 : 5.73(86/15) |
| Vibration Accelermeter | 6개 |
| 설치 위치 | - 1호기 : 3축(상하, 좌우) 1개<br>- 1호기 대차 : 단축 1개<br>- 2호기 : 3축(상하, 좌우) 1개<br>- 2호기 대차 : 단축 1개<br>- 속도센서(타코) : 1채널 |



그림 2.4.8 부산전동차 센서 부착위치 및 계측장비 사진

(나) 측정결과

부산지하철의 노포-신평역 구간의 상하방향 진동파형을 측정한 결과, 93년도(1호기) 감속기 및 84년도 감속기의 진동파형의 형태는 그림 2.4.9 ~ 2.4.10과 같이 유사하게 나타나고 있다. 속도센서의 오류로 인하여 속도를 측정할 수 없었지만 운행구간에서의 최고속도는 70 km/h~80 km/h로 운행하였으므로 이 속도구간에서 회전주파수 및 맞물림 주파수를 구하면 표 2.4.6과 같다. 그림 2.4.11과 그림 2.4.12는 기어박스의 진동스펙트럼으로서 맞물림 주파수보다는 회전주파수 성분이 크게 관측되고 있다. 그림 2.4.11과 2.4.12에서 70 km/h로 운행하였다고 추정했을 때, 1차 맞물림 주파수는 관측되지 않았지만, 2차 및 3차로 추정되는 맞물림 주파수는 관측되고 있다. 93년도 감속기에 대하여 그림 2.4.13은 노포역-범어사구간, 그림 2.4.14는 범내골-범일동 구간에서의 진동 스펙트럼을 나타낸다.

표 2.4.6 70 km/h 및 80 km/h 시 물림 주파수 및 기어 회전 주파수

| 주파수 성 분 | 운행속도 70 km/h | | | 운행속도 80 km/h | | | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1차성분 | 2차성분 | 3차성분 | 1차성분 | 2차성분 | 3차성분 | |
| $f_m$ | 619.2 | 1238.5 | 1857.7 | 707.7 | 1415.4 | 2123.1 | $f_m$ : 기어의 맞물림 주파수<br>$f_r$ : 기어의 입력축 회전주파수<br>$f_{ro}$ : 기어의 출력축 회전주파수 |
| $nf_r$ | 41.3 | 82.6 | 123.8 | 21.1 | 94.4 | 141.5 | |
| $nf_{ro}$ | 7.2 | 14.4 | 21.6 | 8.2 | 16.5 | 24.7 | |

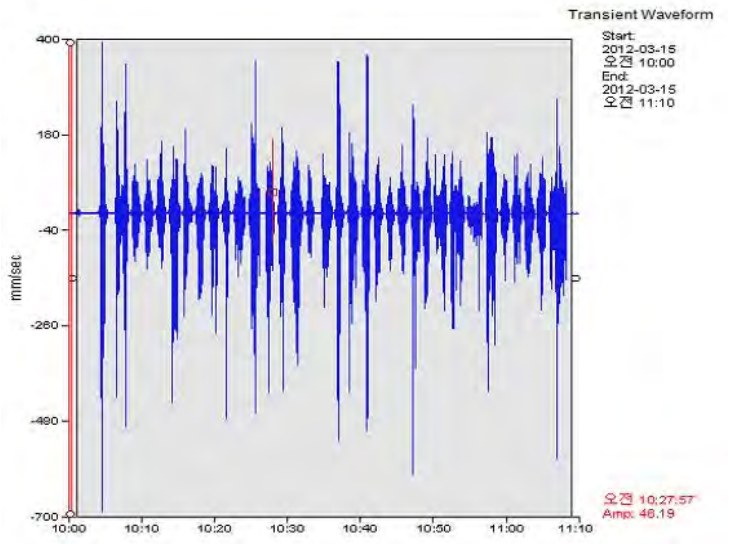



그림 2.4.9 93년도 Gearbox 상하진동

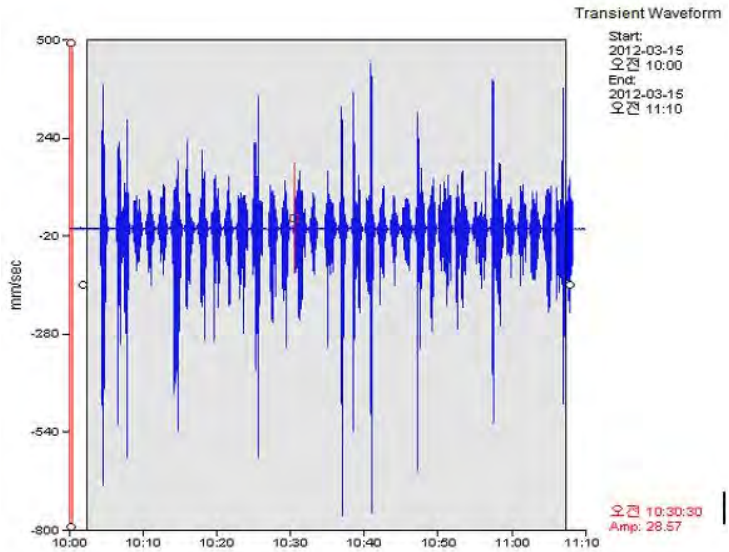



그림 2.4.10 84년도 Gearbox 상하진동

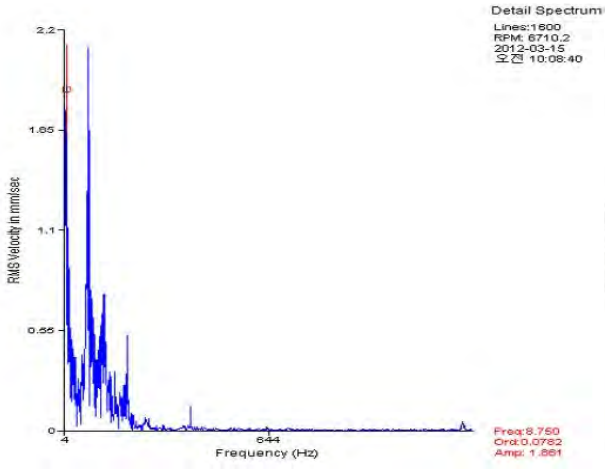



그림 2.4.11 93년도 Gearbox Spectrum

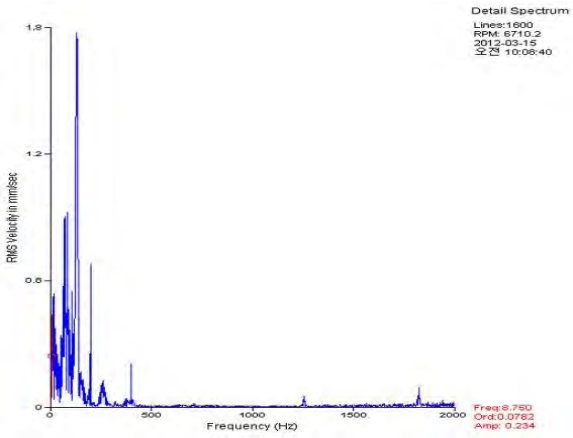



그림 2.4.12 84년도 Gearbox Spectrum

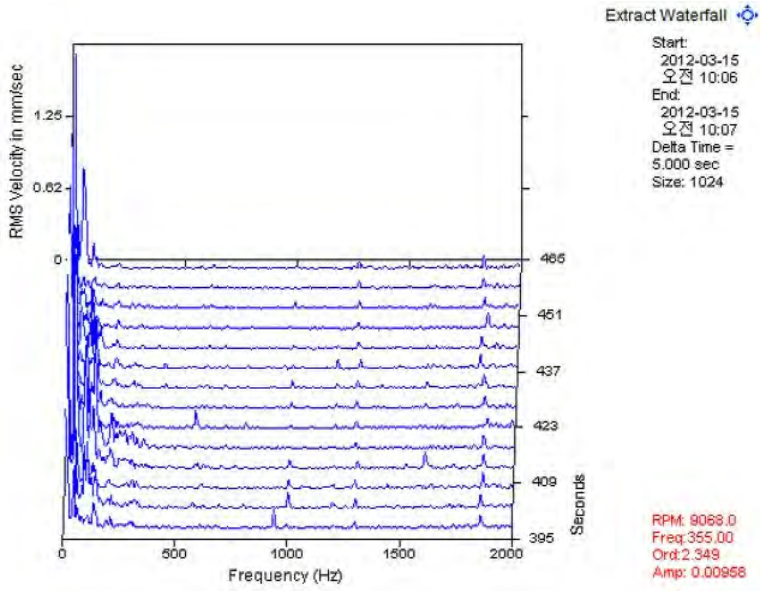



그림 2.4.13 노포역-범어사 구간 93년도 감속기 상하진동

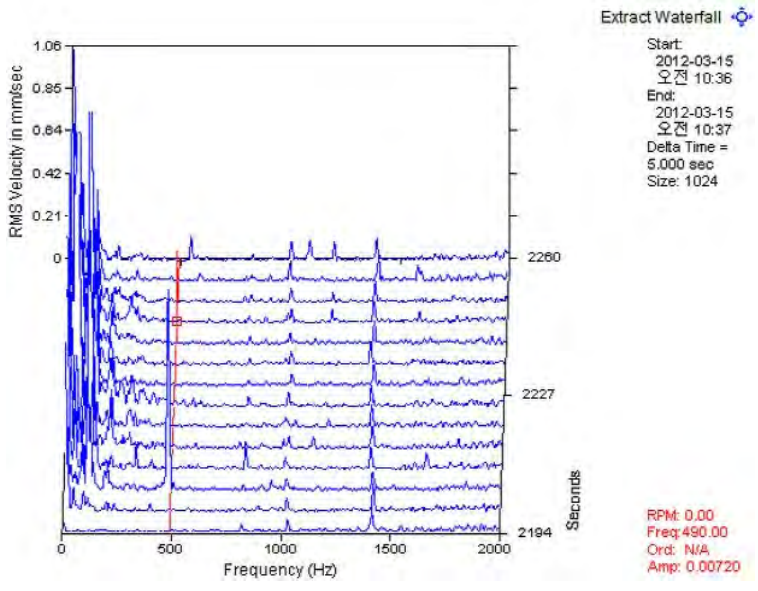



그림 2.4.14 범내골-범일동 구간 93년도 감속기 상하진동

나. KTX 감속기

(1) 고속열차용 감속기 1차 현차시험

(가) 목적

고속열차용 감속기 실차시험을 통하여 감속기 진동 특성 및 현차에서 휠/레일에서 발생하는 진동이 감속기에 미치는 영향을 파악하는 것이다.

(나) 측정개요

고속열차용 감속구동장치는 KTX 열차의 동력차 후위대차 및 동력객차의 전위대차에 부착된 감속구동장치에 센서를 설치한 후 경부선 및 호남선 운행 시의 진동을 측정하였다. 진동특성을 비교하기 위하여 기어박스 및 베어링대의 가속도계를 부착하였고, 속도는 측정하는 감속기가 부착된 대차에 Photo 센서를 부착하고 해당 차륜에 은박테이프를 붙여서 측정하였다. 그림 2.3.15는 센서 부착위치이며, 그림 2.3.16은 센서 부착위치에 대한 사진을 나타내었다. 측정에 사용된 장비의 주요제원은 표 2.4.8과 같다. 고속열차용 감속구동장치 진동시험은 현차 운행 조건에 따라서 시험을 진행하였으며 특별히 요구한 시험조건 없이 운행하는 전 구간에 걸쳐서 데이터를 취득하였다.

표 2.4.7 시험 개요

| | |
|---|---|
| 시험일자 | 2012. 6. 19(경부선), 2012. 6. 20(호남선) |
| 시험구간 | 서울-부산, 용산-광주 |
| 시험대상 | 고속열차용 감속기 1set |
| Vibration Accelermeter | 14개 |
| 설치 위치 | - 1차 감속기 기어박스 : 3축 2개<br>- 1차 감속기 출력측 베어링 : 3축 1개<br>- 2차 감속기 기어박스 : 3축 1개<br>- 2차 감속기 출력측 베어링 : 3축 1개<br>- 대차 : 3축 1개<br>- 축상 : 단축 1개<br>- 속도센서(타코) : 1채널 |

표 2.4.8 측정에 사용된 장비

| 측정 장비 | 수 량 | 사 양 | 비 고 |
|---|---|---|---|
| Data recorder | 1대 | LMS Test Lab | 데이터저장 |
| Photo Sensor | 1대 | E3S-AD11 | 속도 측정 |
| F/V Converter | 1대 | K3HB-RNB-L2AT11 | 속도 측정 |
| Accelerometer | 19 ch | ICP | 진동측정 |

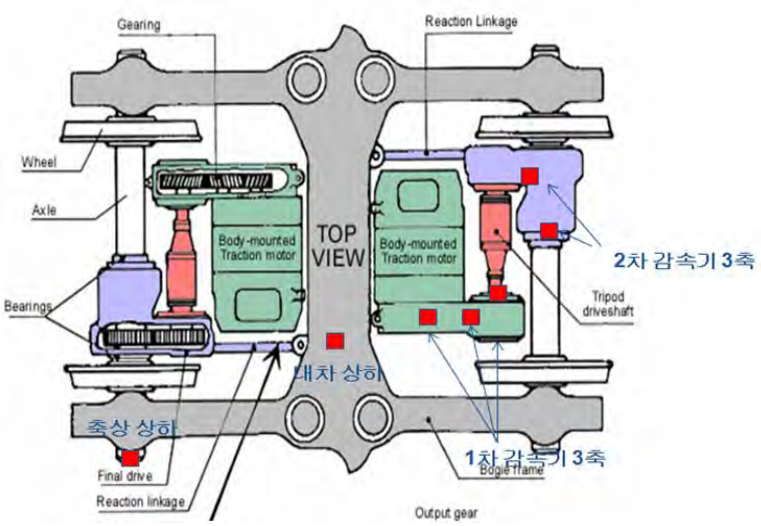


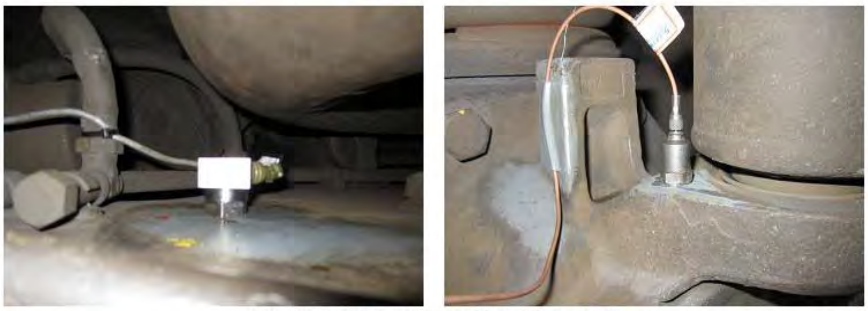

그림 2.4.15 고속열차용 감속기 시험용 가속도 센서 부착 위치



(a) 감속기 베어링부 센서 설치 위치



(b) 감속기 기어박스부 센서 설치 위치



(c) 대차 센서 및 축상센서 설치 위치

그림 2.4.16 고속열차용 감속기 센서 부착사진

표 2.4.9 300 km/h 주행 시 1, 2차 감속기 물림 주파수 및 기어 회전 주파수

| 주파수 성 분 | 1차 감속기 입력회전수 3,789 rpm (300 km/h) | | | 2차 감속기 입력회전수 2,006 rpm (300 km/h) | | | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1차성분 | 2차성분 | 3차성분 | 1차성분 | 2차성분 | 3차성분 | |
| $f_m$ | 1705 | 3410 | 5115 | 1471 | 2942 | 4413 | $f_m$ : 기어의 맞물림 주파수 |
| $nf_r$ | 63.2 | 126.3 | 189.5 | 33.4 | 66.9 | 100.3 | $f_r$ : 기어의 입력축 회전주파수 |
| $nf_{ro}$ | 33.4 | 66.9 | 100.3 | 28.8 | 57.7 | 86.5 | $f_{ro}$ : 기어의 출력축 회전주파수 |

(다) 고속열차용 감속기 현차시험 분석 방법

감속기와 같은 회전기계의 분석방법으로 시간영역에서 분석하는 방법과 주파수 영역에서 분석하는 방법이 있다. 추세를 알고자 할 때는 시간영역에서 분석하고 기계의 이상상태 등에 대한 상세진단은 주파수 영역에서 분석한다. rms 등과 같은 진동레벨은 실시간으로 기계의 상태를 진단할 수 있어서 많이 사용하지만 회전속도에 따라 진동레벨이 달라지므로 운행속도에 영향을 받지 않도록 선택된 영역에서의 Peak 값을 rms값으로 나누어준 값인 파고율(Crest factor)을 시간영역 분석방법으로 적용하였다. 참고로 정상적인 상태에서 파고율은 3정도로 나타난다.

주파수 분석방법은 감속기가 구동되면서 나타나는 물림주파수와 같은 특성 주파수가 실차시험에서도 관측되는지에 대해서 알아보고자 하였다. 표 2.4.9는 300 km/h로 주행 시 1차 및 2차 감속기의 물림주파수 및 회전 주파수를 나타냈다.

(라) 고속열차용 감속기 1차 현차시험 분석 결과

① 시간영역 분석

그림 2.4.17 ~ 2.4.20은 경부선에서 10초 간격으로 계산한 파고율을 나타냈으며, 2차측 기어박스 진동은 센서 이상으로 측정하지 못하여 1차측 기어박스 진동, 1차측 출력 베어링부 진동, 2차측 출력 베어링부 진동에 대하여 비교하여 나타냈다. 그래프를 보면 파고율은 보통 3 근처에서 움직이다가 5를 넘어서기도 하는데 운행속도보다 선로조건에 따라 변하는 것으로 판단된다.

그림 2.4.21 ~ 2.4.29는 호남선에서 10초 간격으로 계산한 파고율을 나타냈다. 저속으로 운행한 용산-광명 구간이 고속으로 운행한 광명-천안아산 구간보다 피크값이 크게 나타나고 있다. 호남선은 기존선을 운행하게 되어 역으로 진출입할 때 분기기를 많이 통과하게 되므로 경부선보다 대체적으로 피크값이 크게 나타나고 있다. 파고율을 이용하여 감속기 이상여부를 감지하기 위해서는 선로의 영향을 억제해 주는 알고리즘 또는 운행 구간 및 선로와 연동해서 분석하여 알려줄 수 있는 알고리즘 개발이 필요할 것으로 판단된다.

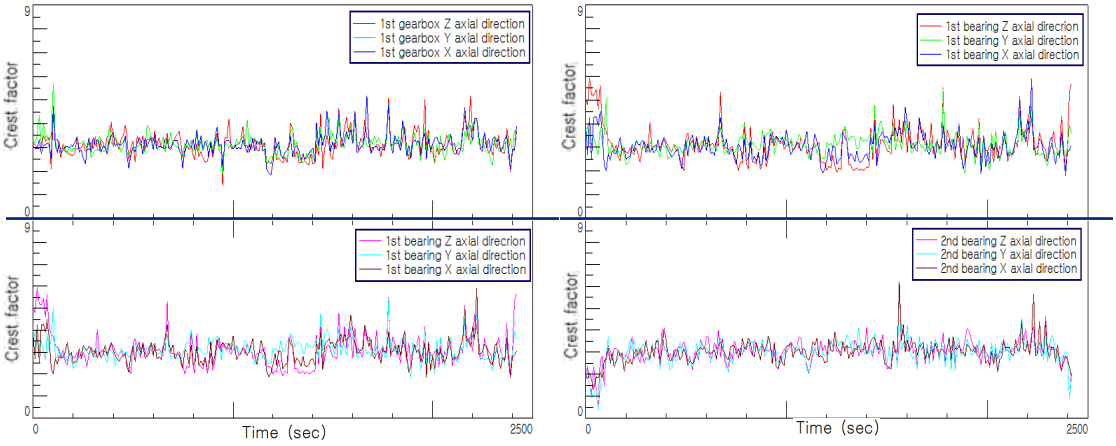



그림 2.4.17 광명역-대전역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(경부선)

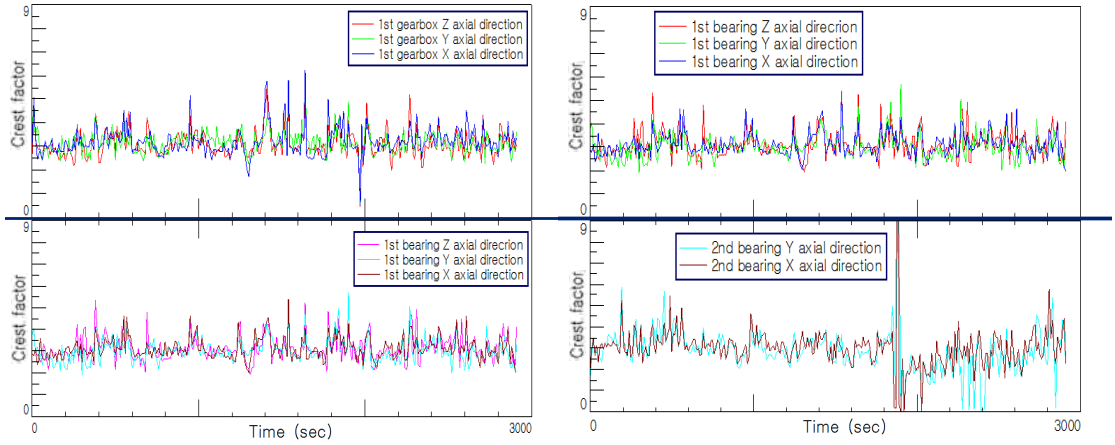



그림 2.4.18 대전역-동대구역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(경부선)

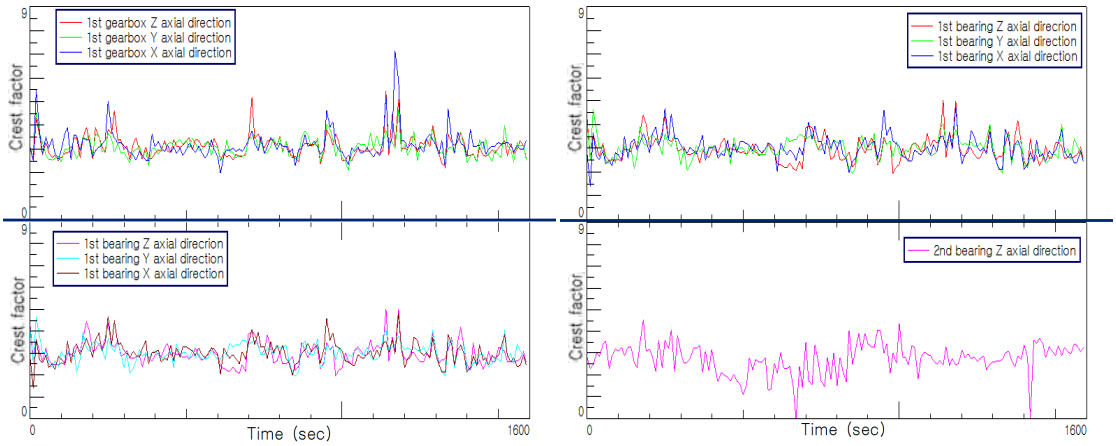



그림 2.4.19 동대구역-울산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(경부선)

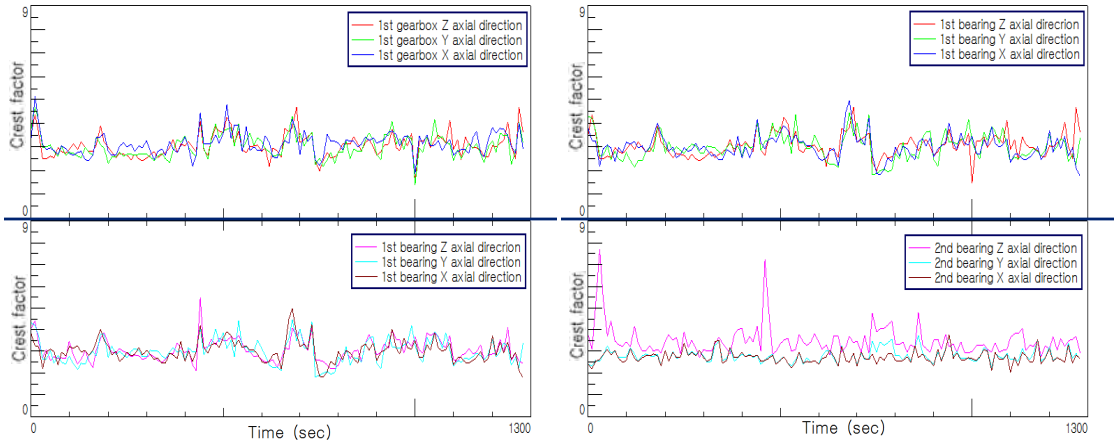



그림 2.4.20 울산역-부산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(경부선)

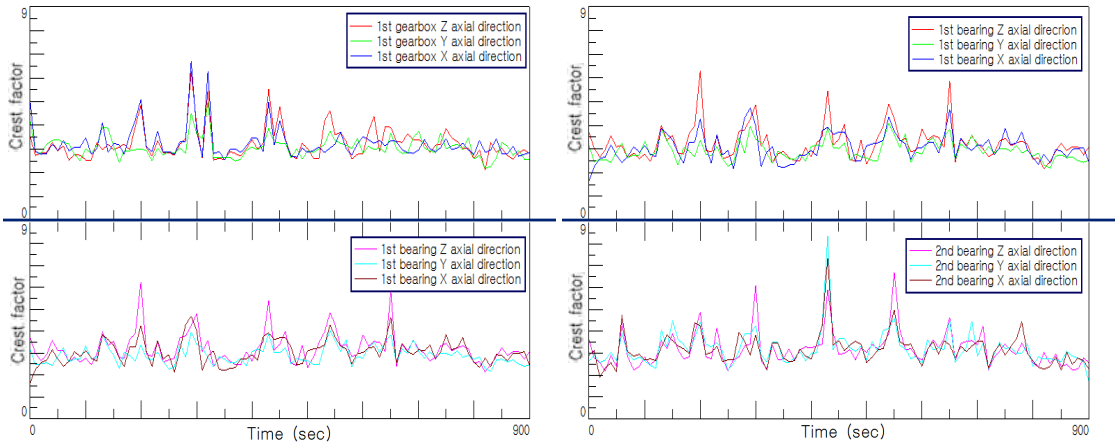



그림 2.4.21 용산역-광명역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선)

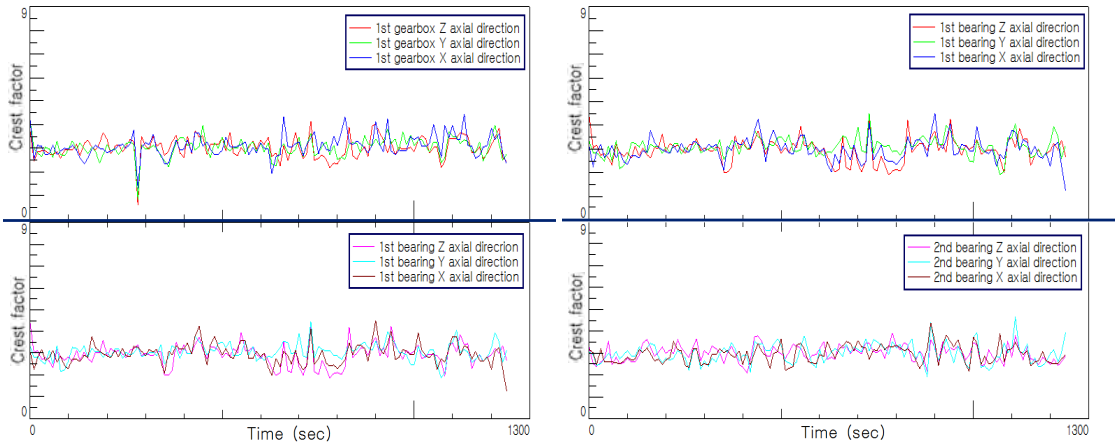



그림 2.4.22 광명역-천안아산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선)

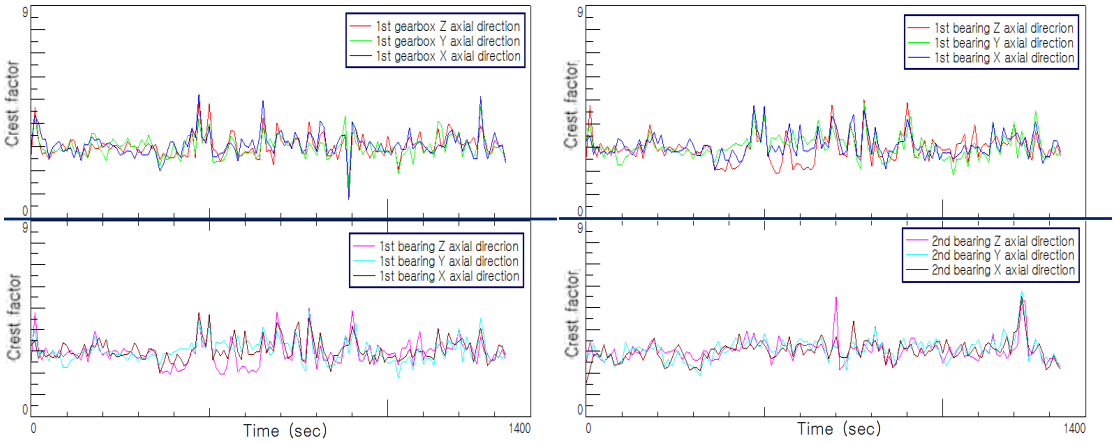



그림 2.4.23 천안아산역-서대전역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선)

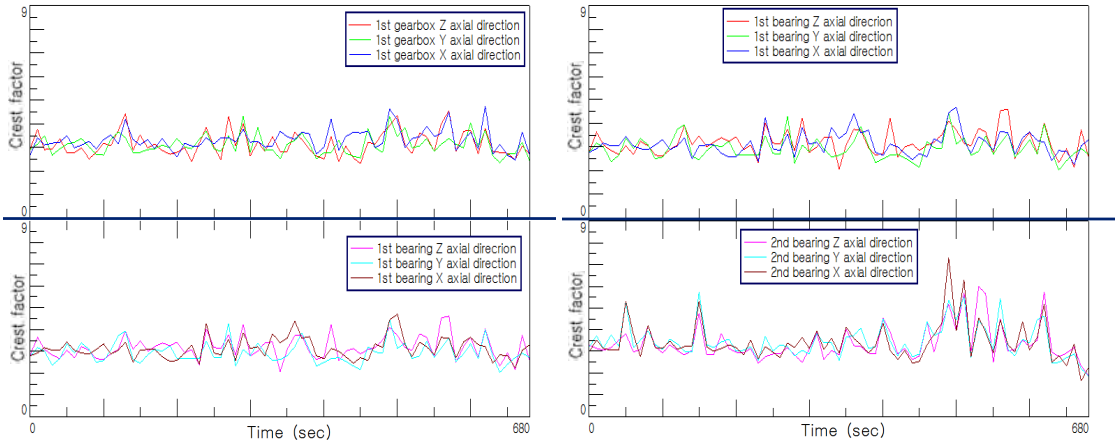



그림 2.4.24 서대전역-계룡역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선)

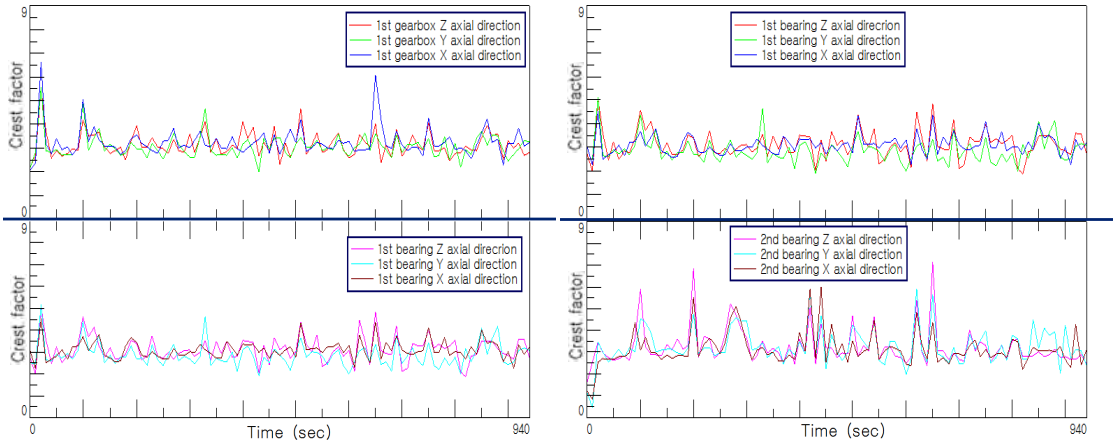



그림 2.4.25 계룡역-논산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선)

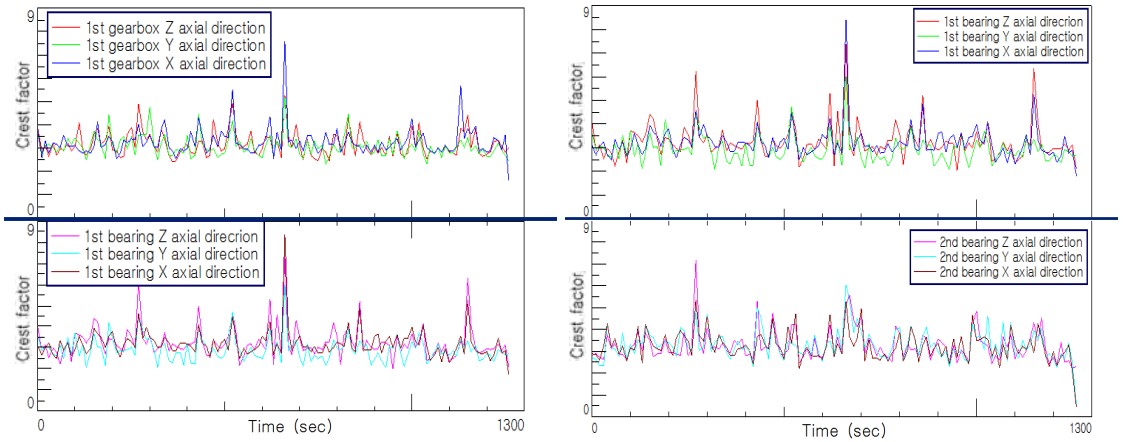



그림 2.4.26 논산역-익산역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선)

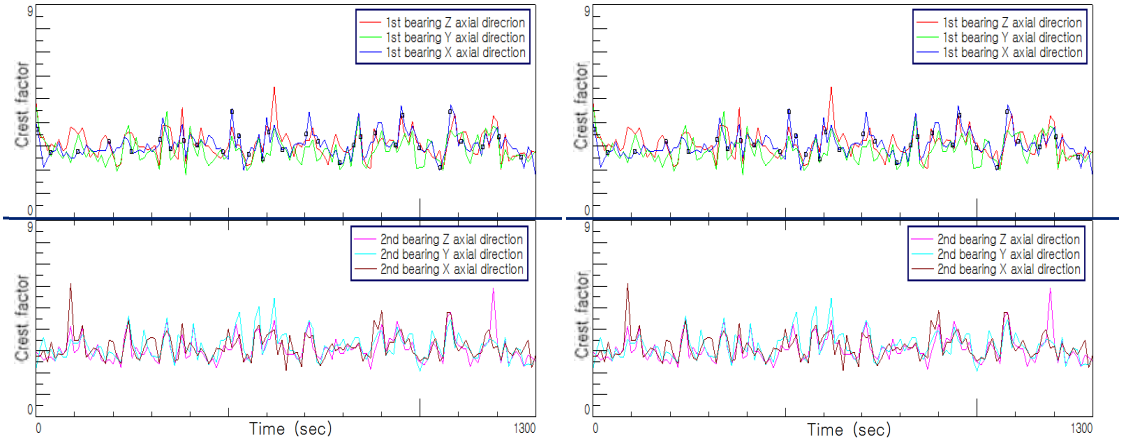



그림 2.4.27 익산역-정읍역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선)

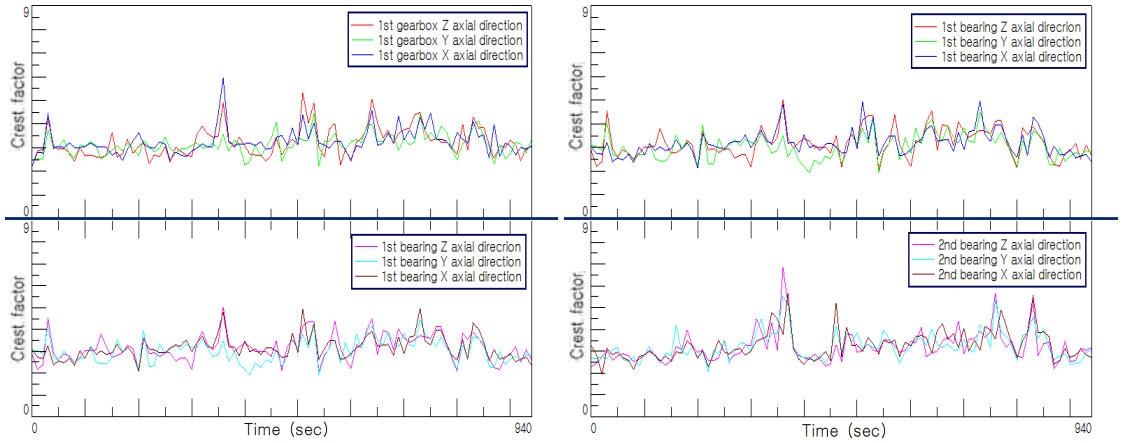



그림 2.4.28 정읍역-장성역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선)

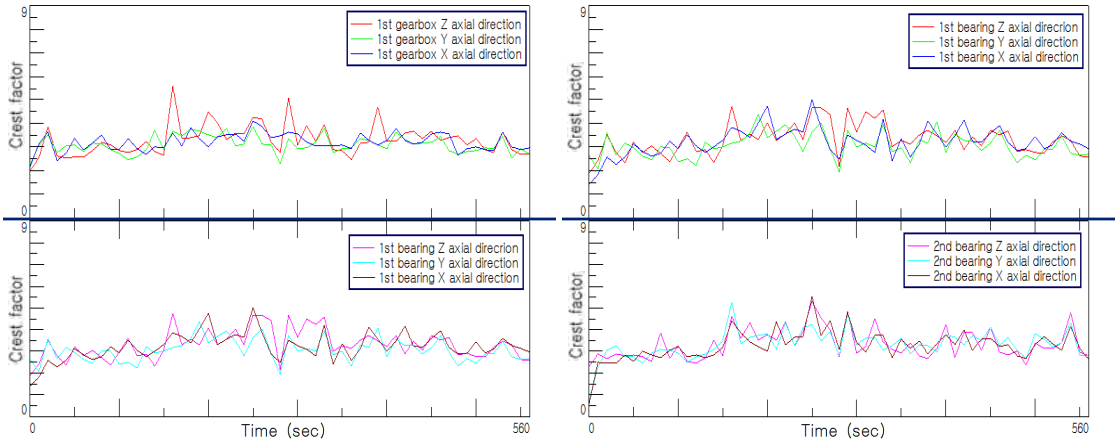



그림 2.4.29 장성역-광주역 구간 KTX 감속기 파고율 분석 결과(호남선)

② 주파수 영역 분석

본 현차시험에서는 운행 중 속도센서의 레이저 감지부분에 기름 때 등의 이물질이 묻어서 속도가 제대로 측정되지 못하였다. 따라서 속도와 연동하여 분석하지 않고 운행구간을 1초 단위로 주파수 분석을 하여 경향 및 물림 주파수로 추정되는 파형이 나오는지 알아보려고 하였다. 그림 2.4.30 ~ 2.4.32은 고속구간(광명-대전구간)에서 KTX 1차 감속기 기어박스 진동과 출력측 베어링 진동을 주파수 분석한 결과를 칼라맵으로 나타낸 것이다. 속도에 따라 변동되는 부분이 확연하게 들어나고 있으며, 정속으로 추정되는 구간인 1,210초~1,475초 구간에 대하여 확대하여 우측그래프에 나타냈다. 주파수 분석한 값은 300 km/h로 운행하였을 때의 1차 물림주파수(표 2.4.9 참조) 1,705 Hz와 정확하게 일치하고 있으며, 2차 및 3차 물림주파수도 같이 관측되고 있었다. 그림 2.4.32은 KTX 2차 감속기 출력측 베어링 진동을 주파수 분석한 결과로서 1차 감속기와 마찬가지로 표 2.4.9의 1차 맞물림 주파수 1,471 Hz가 정확하게 관측되고 있다. 그림 2.4.33과 그림 2.4.34는 논산-익산(호남선) 구간에 대한 주파수 분석 결과를 칼라맵으로 나타낸 것이다. 고속구간(광명-대전구간)보다는 물림주파수가 희미하지만 잘 관측되고 있으며, 속도를 역산해 보니 최고속도 130 km/h로 주행한 것으로 나타났다.

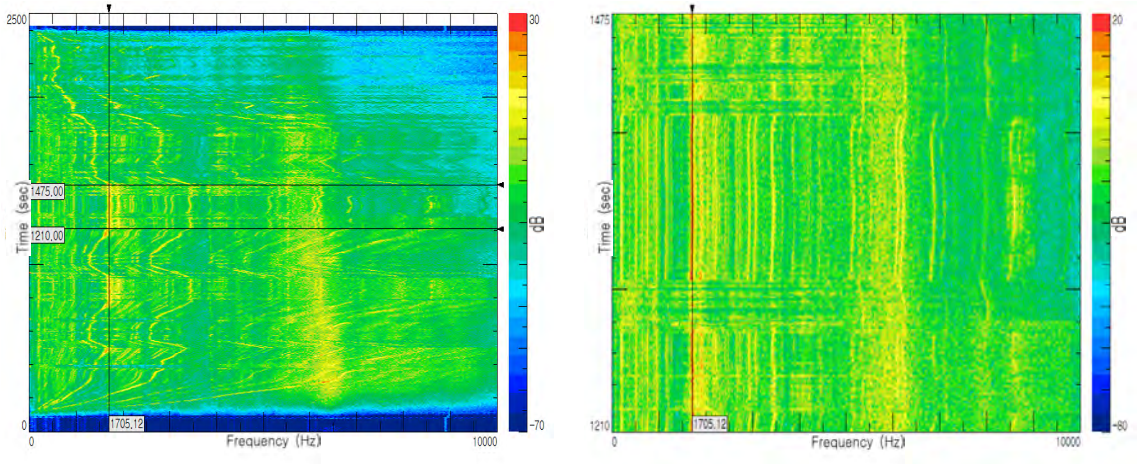



그림 2.4.30 광명역-대전역 구간 KTX 1차 감속기 기어박스 주파수 분석

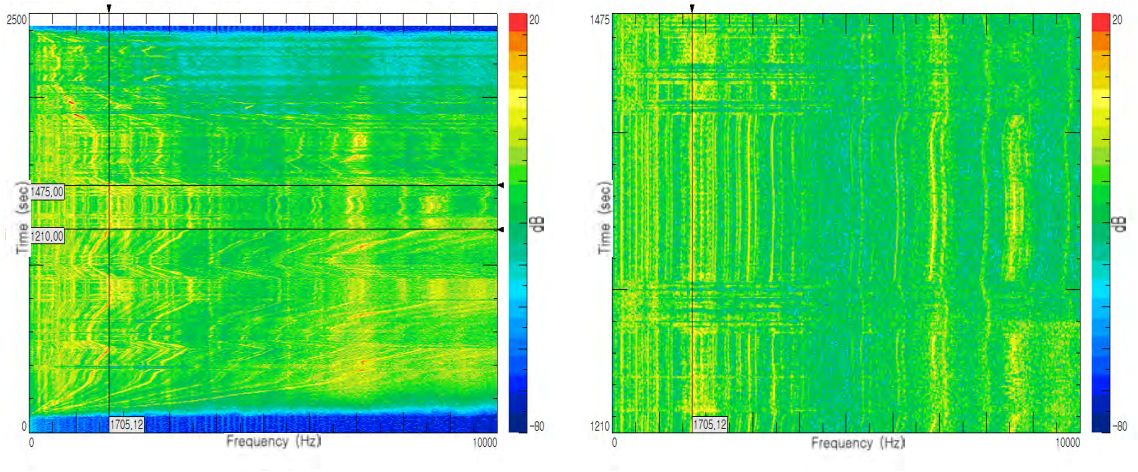



그림 2.4.31 광명역-대전역 구간 KTX 1차 감속기 출력측 베어링부 주파수 분석

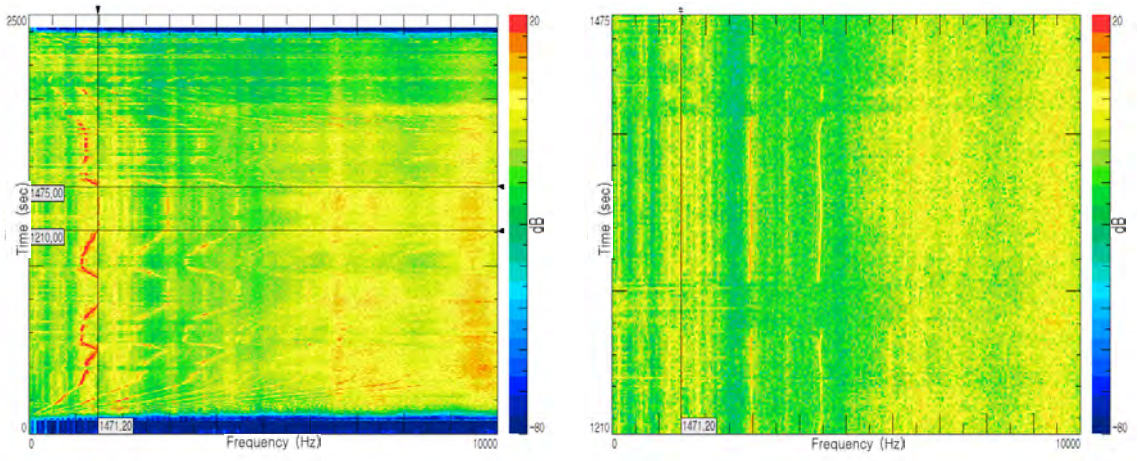
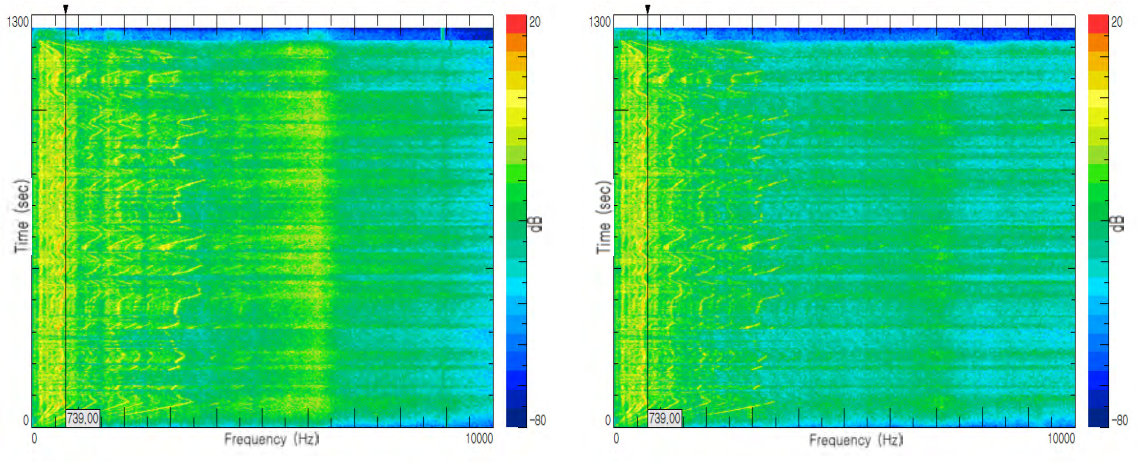



그림 2.4.32 광명역-대전역 구간 KTX 2차 감속기 출력측 베어링부 주파수 분석




a) 1차 감속기 기어박스 b) 1차 감속기 출력측 베어링 부

그림 2.4.33 KTX 1차 감속기 주파수 분석(논산-익산 구간)

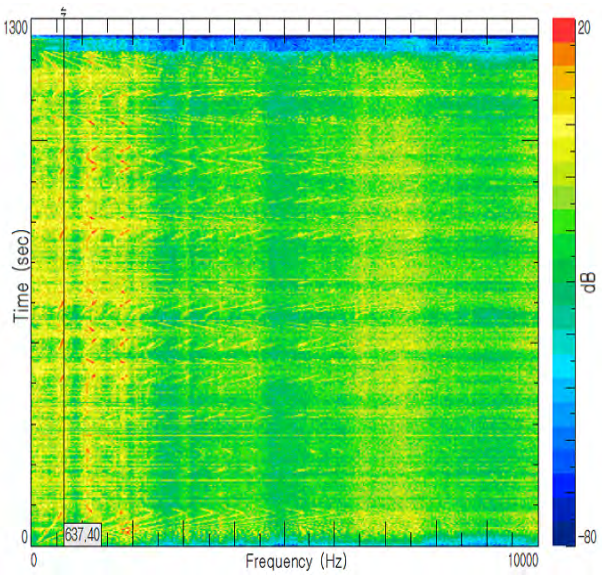



그림 2.4.34 논산역-익산역 구간 KTX 2차 감속기 출력측 베어링부 주파수 분석

(2) 고속열차용 감속기 2차 현차시험(경부선, 2013.04.01)

(가) 측정개요

측정대상은 KTX열차를 대상으로 열차 동력객차의 전위대차에 부착된 감속기에 센서를 설치한 후 경부선 운행 시의 진동을 측정하였다. 진동특성을 비교하기 위하여 기어박스 및 베어링대의 가속도계를 부착하였고, 속도는 측정대상 감속기가 부착된 대차에 Photo 센서를 부착하고 차륜에 반사테이프를 붙여 측정하였다. 그림 2.4.35는 센서 부착위치이며, 그림 2.4.36은 센서 부착위치에 대한 사진을 나타내었다. 측정에 사용된 장비의 주요제원은 표 2.4.10과 같다. 진동시험은 실제운행 조건에 따라서 시험을 진행하였으며, 실제 운행되는 구간의 데이터를 취득하였다.

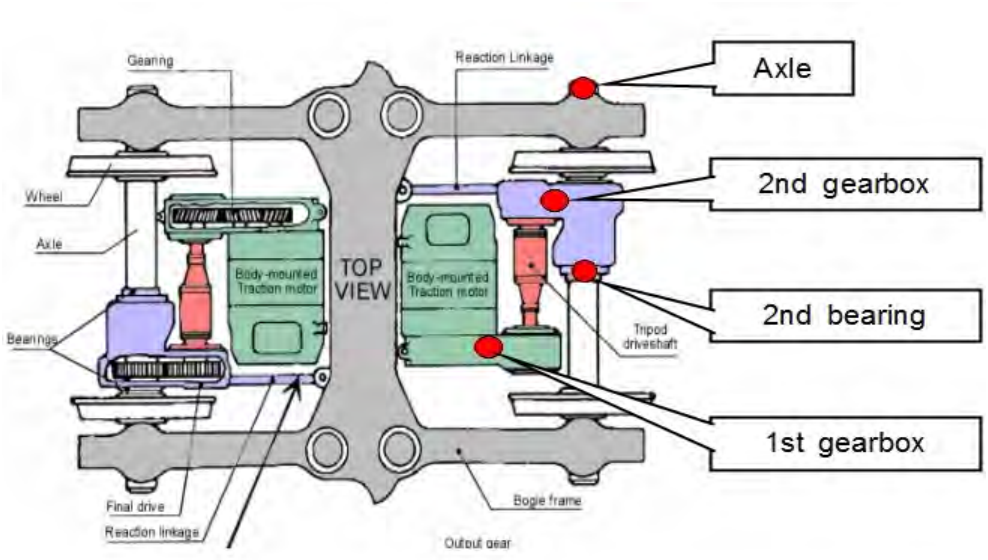



그림 2.4.35 KTX 감속기 가속도 센서 부착위치

표 2.4.10 측정에 사용된 장비제원

| 측정 장비 | 수 량 | 사 양 | 비 고 |
|---|---|---|---|
| Data recorder | 1대 | LMS Test Lab | 데이터저장 |
| Photo Sensor | 1대 | E3S-AD11 | 속도 측정 |
| F/V Converter | 1대 | K3HB-RNB-L2AT11 | 속도 측정 |
| Accelerometer | 8 ch | ICP | 진동측정 |



a) 1차측 감속기 기어박스



b) 2차측 감속기 기어박스



c) 2차측 감속기 베어링



d) 축상

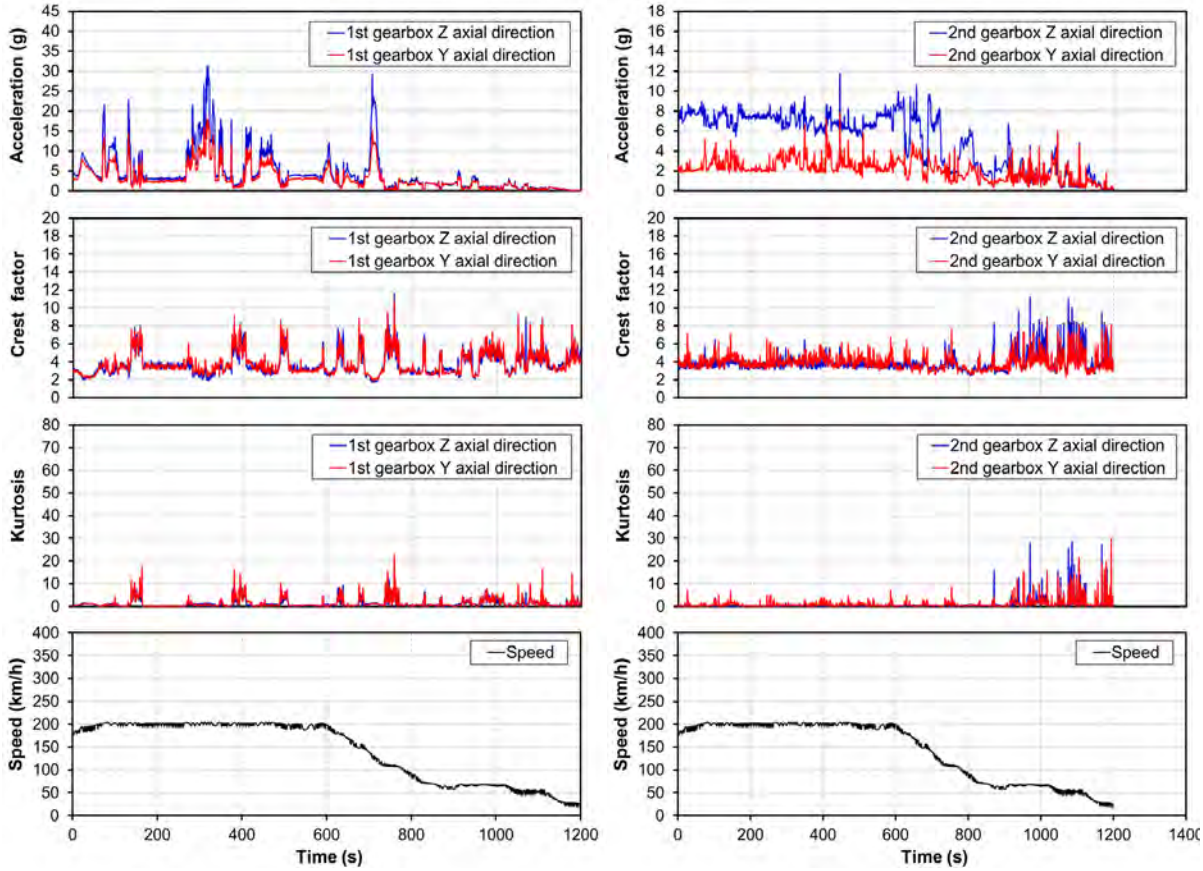


e) 속도 측정

그림 2.4.36 KTX 감속기 센서부착 위치

(나) 분석결과

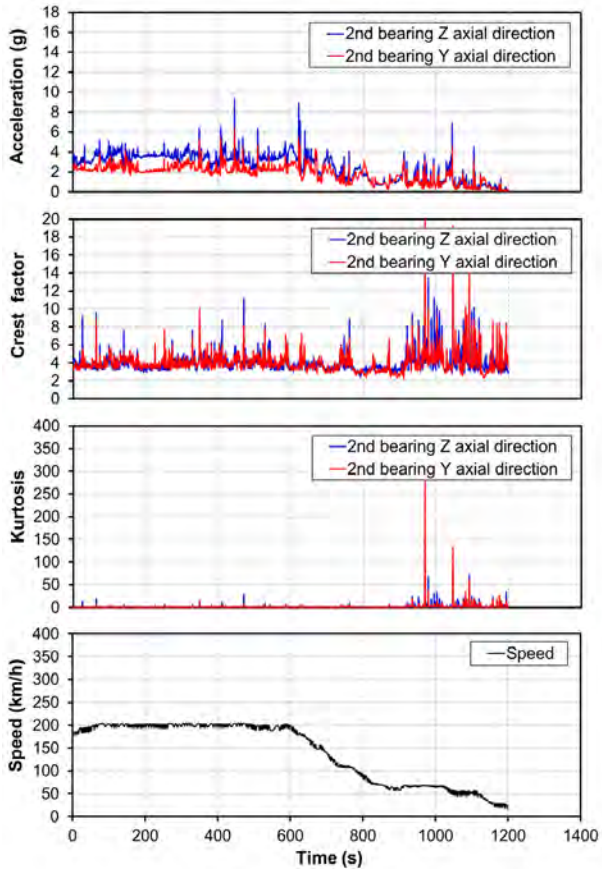
그림 2.4.37 ~ 2.4.42는 경부선에서 각 역별로 시간영역에 대해 분석한 결과이다. 감속기의 실시간 상태진단을 위해 속도에 따라 rms 진동레벨과 시간에 따른 기어의 이상상태를 파악하기 위해 사용되는 분석방법 중 미소국부결함의 검출분석에 유용한 파고율(Crest factor)분석 및 회전기기 이상진단에 주로 사용되는 커토시스(Kurtosis)분석을 실시하였다. 분석결과 그래프의 데이터 샘플링은 1초 단위 샘플링 결과로 나타내었다. 그림 2.4.37 ~ 2.4.39는 경부선 하행 주행시(광명→부산) 각 역별로 시간영역에 대해 분석한 결과를 나타낸다. 그림 2.4.37은 하행선 광명-대전역 구간의 1, 2차 감속기 및 2차감속기 베어링, 축상의 진동 측정결과 및 파고율, 첨도의 분석결과이다. 하행선 광명-대전역 구간에서 감속기 rms 진동레벨은 100 km/h 이상 주행시 1, 2차 감속기 모두 상하방향 진동이 좌우방향 진동보다 크게 나타났다. 특히 2차 감속기의 경우 100 km/h 이상 주행시 좌우방향 진동에 비해 상하방향 진동이 2~3배 이상 크게 나타났다. 이것은 2차 감속기의 경우 평기어(spur gear)가 조립되어 있으며, 평기어의 경우 좌우축방향(axle) 하중이 작용하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 차량 감속시 1차 감속기의 상하진동 피크가 발생하며, 2차 감속기의 경우 감속의 영향이 미미하다. 또한, 200 km/h 로 주행시 1차 감속기의 경우 갑자기 진동이 증가하는 현상이 발생하며, 2차 감속기의 경우 대체로 일정한 진동을 나타내고 있다. 차량속도 100 km/h 이하로 주행할 경우 1, 2차 감속기의 진동 레벨은 감소하였지만, 2차 감속기의 경우 파고율 및 첨도가 커지는 경향이 있다. 이와 같은 경향은 2차 감속기 베어링 및 축상의 진동과 같은 경향을 나타내고 있는 것으로 볼 때, 차량이 기존선을 주행할 때 2차 감속기에서 발생되는 진동은 선로의 영향에 의한 것으로 판단된다. 그림 2.4.38은 하행선 대전역(14:08)-김천구미역(14:35) 구간의 진동 측정결과 및 파고율, 첨도의 분석결과이다. 하행선 대전역-김천구미역 구간에서 차량 가속 및 감속시 1차 감속기에서 상하진동 피크가 발생하지만, 2차 감속기의 경우는 가속 및 감속의 영향이 미미하다. 차량속도 150 km/h 이하로 주행할 경우 1, 2차 감속기의 진동 레벨은 감소하였지만, 2차 감속기의 경우 파고율 및 첨도가 커지는 경향이 있으며, 2차 감속기 베어링 및 축상의 진동과 같은 경향을 나타내고 있는 것으로 볼 때, 기존선 선로의 영향에 의한 진동인 것으로 판단된다. 그림 2.4.39는 하행선 울산역(15:31)-부산역(15:52) 구간의 진동 측정결과 및 파고율, 첨도의 분석결과이다. 하행선 울산역-부산역 구간에서도 차량 가속 및 감속시 1차 감속기에서 상하진동 피크가 발생하였고, 가속시에 약 6배 이상의 피크가 발생하였다. 차량속도 150 km/h 이하로 주행할 경우 1, 2차 감속기의 진동 레벨은 감소하였지만, 2차 감속기의 경우 파고율 및 첨도가 커지는 경향이 있었으며 기존선 선로의 영향에 의한 진동인 것으로 판단된다.



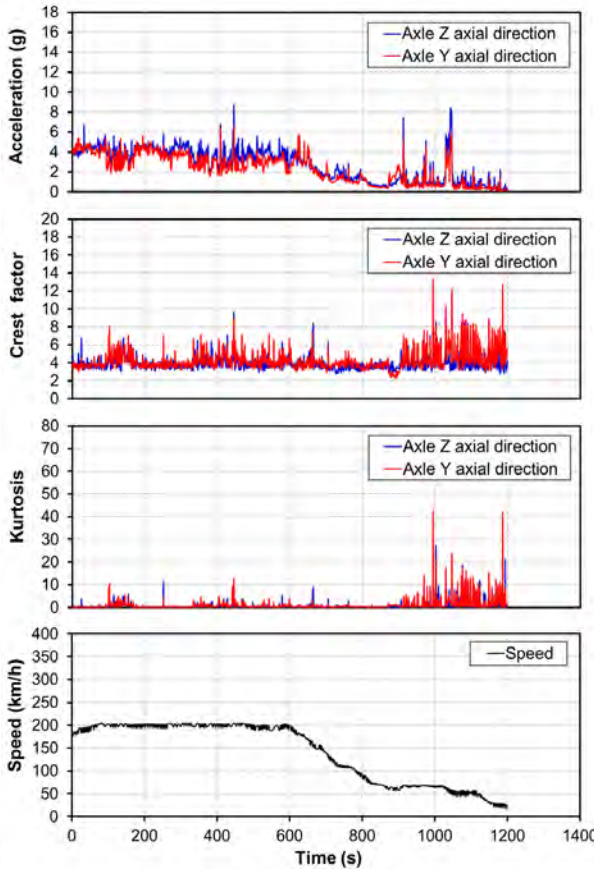

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

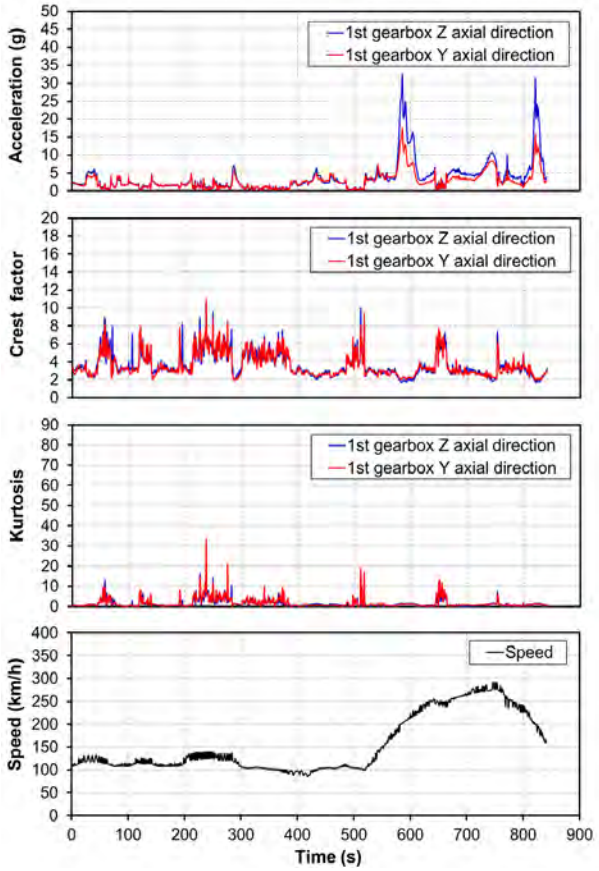



c) 2차 감속기 베어링

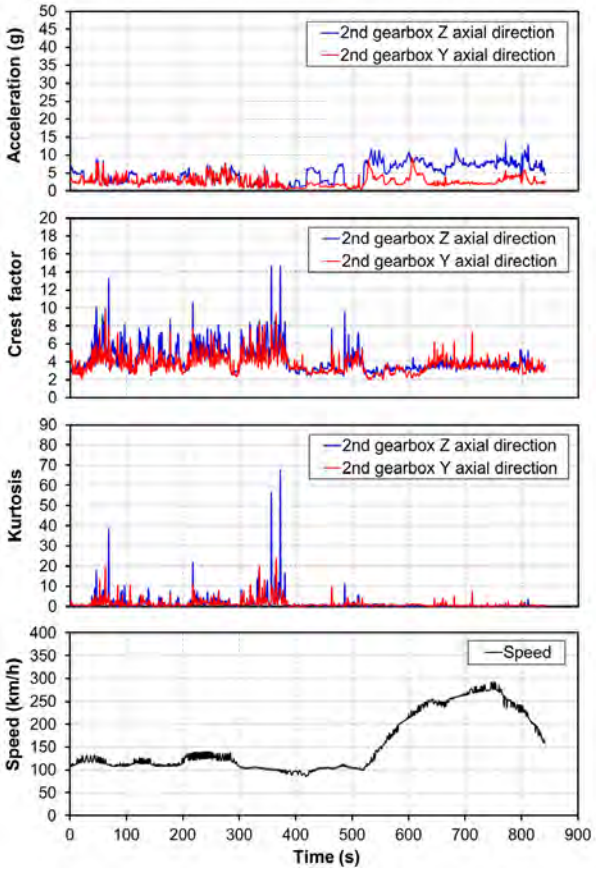



d) 축상

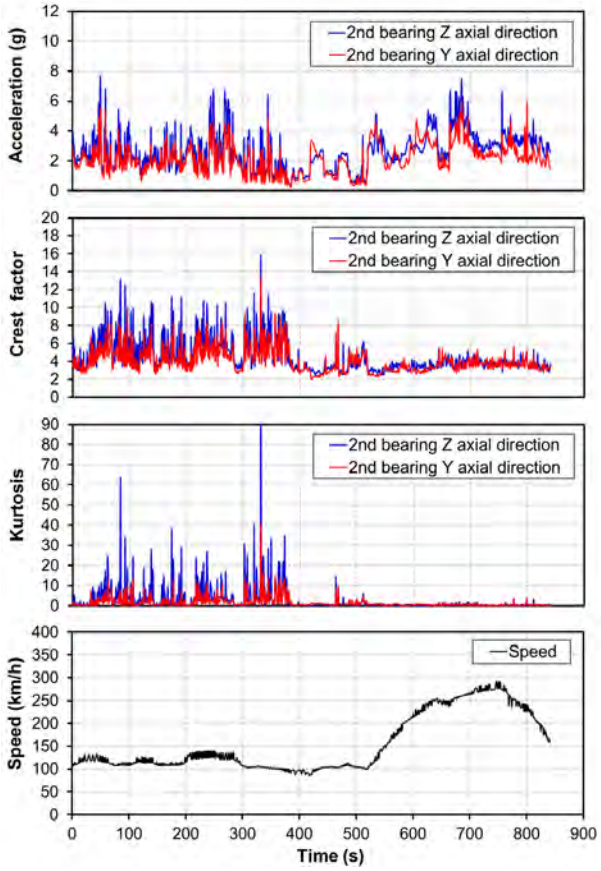
그림 2.4.37 광명역-대전역 감속기 시간영역 진동특성분석



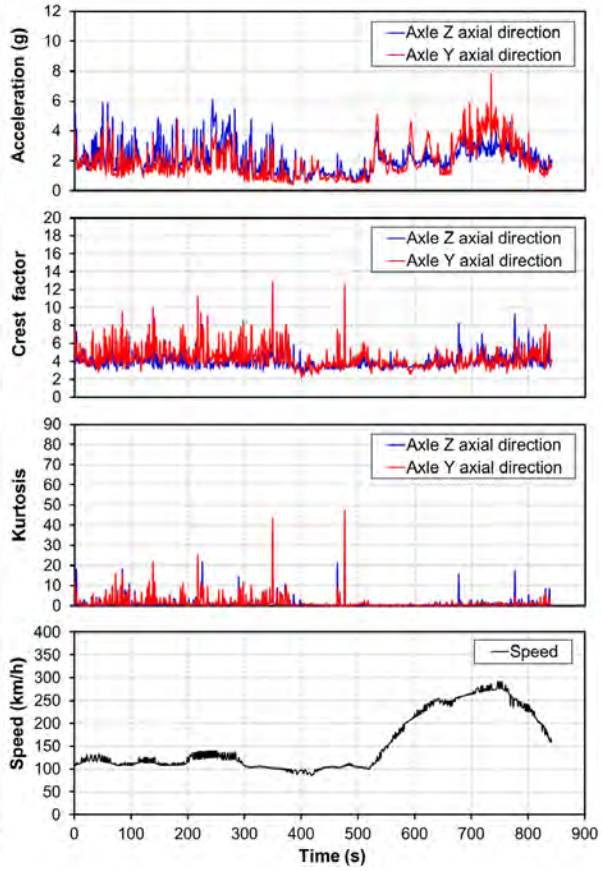

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

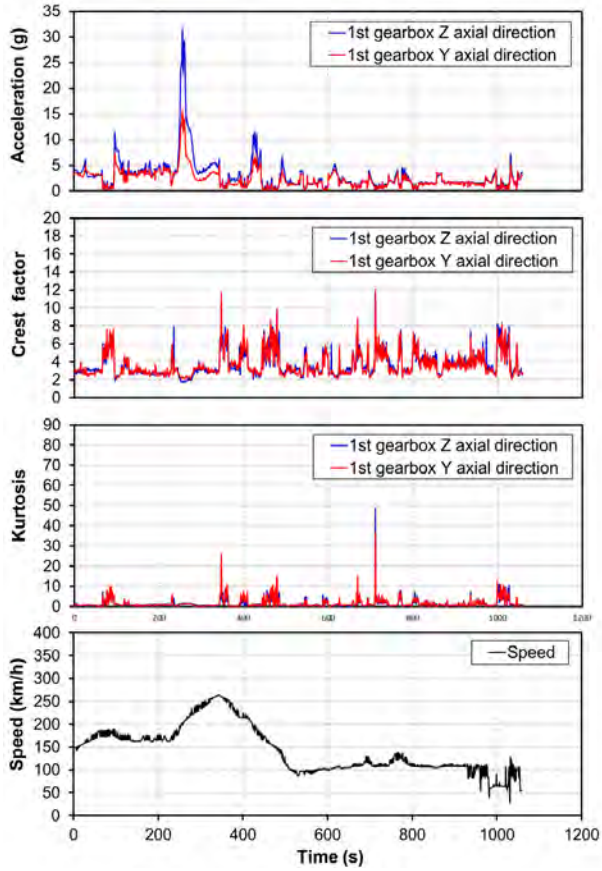



c) 2차 감속기 베어링

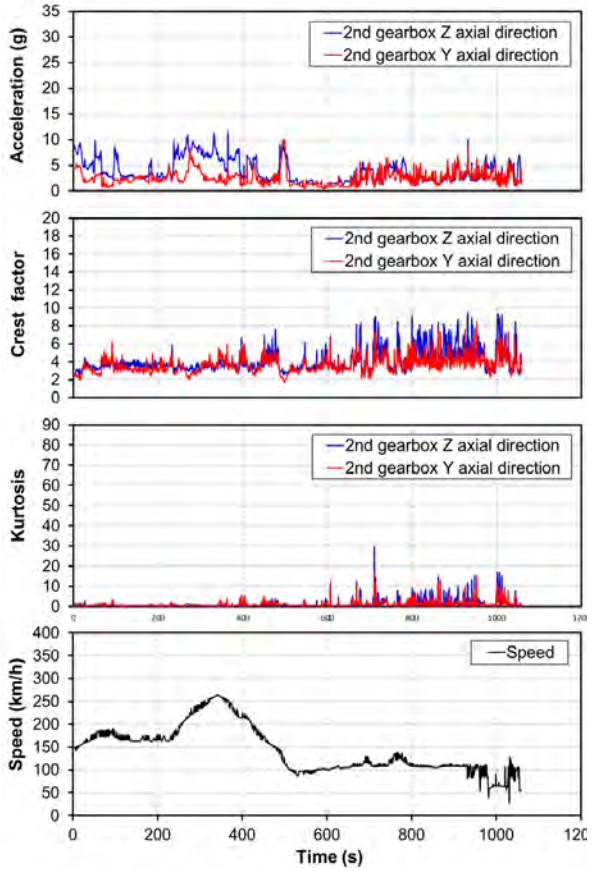



d) 축상

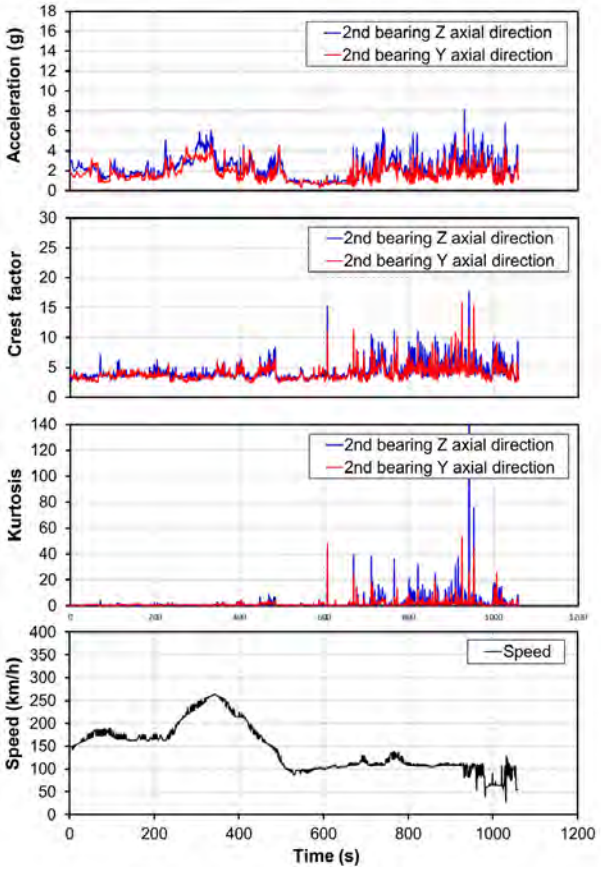
그림 2.4.38 대전역-김천구미역 감속기 시간영역 진동특성분석



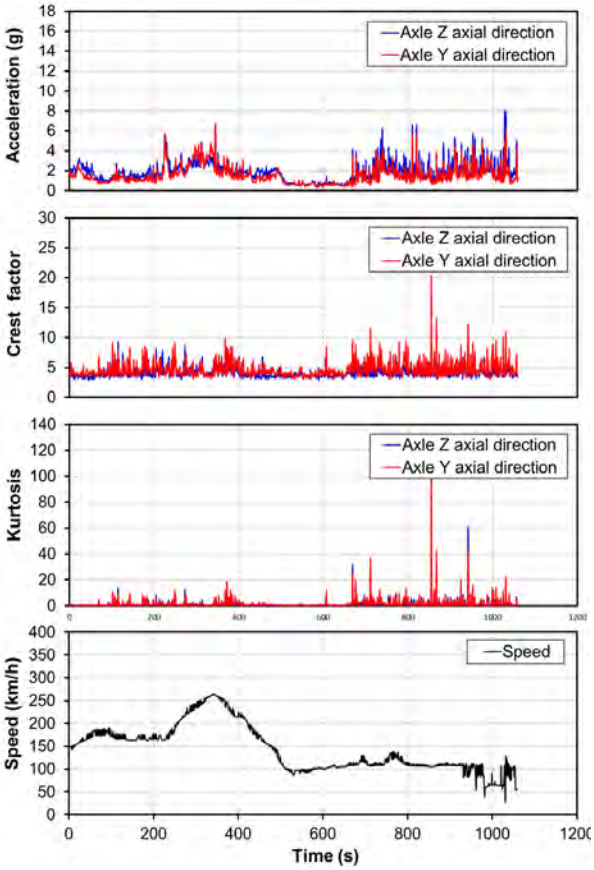

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스




c) 2차 감속기 베어링

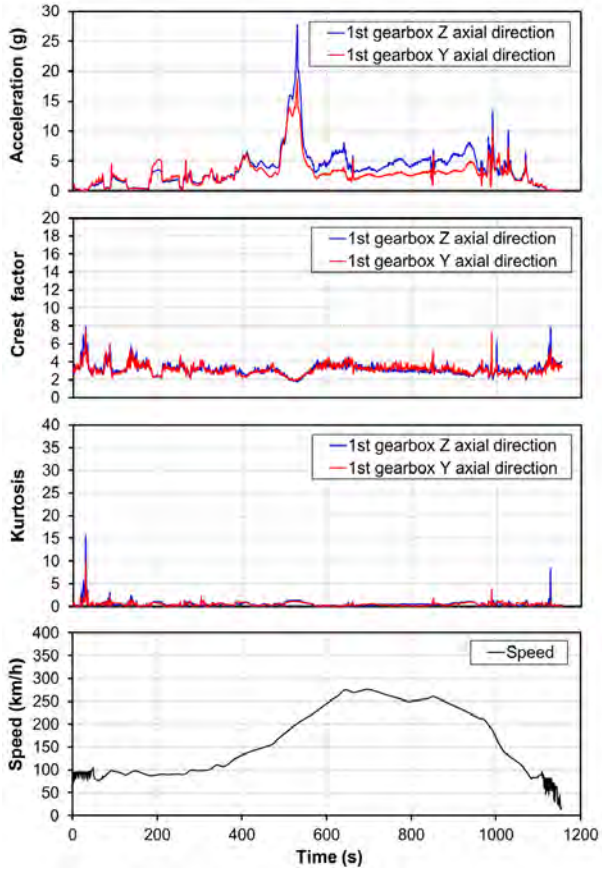



d) 축상

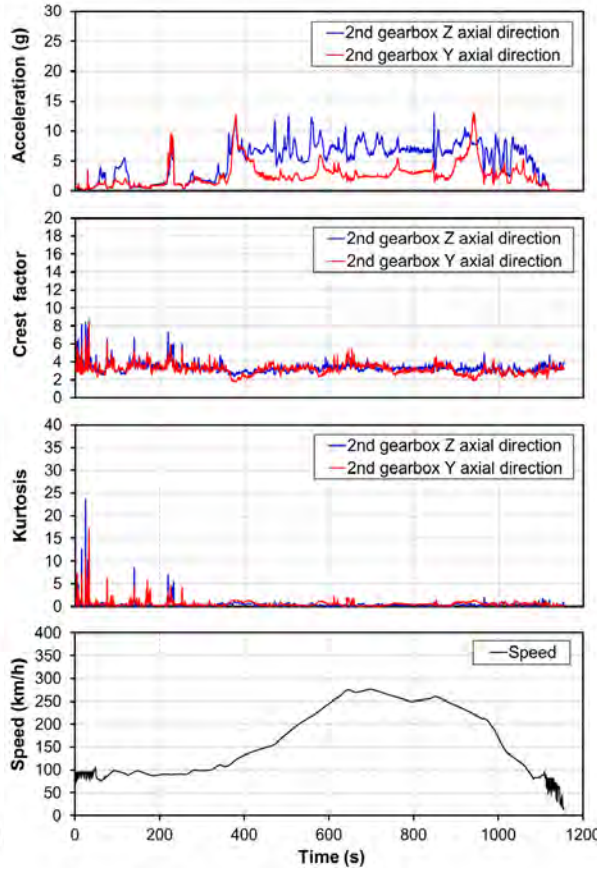
그림 2.4.39 울산역-부산역 감속기 시간영역 진동특성분석

그림 2.4.40 ~ 2.4.42는 경부선 상행 주행시(부산→광명) 각 역별로 시간영역에 대해 분석한 결과이다. 그림 2.4.40은 상행선 부산역(16:40)-울산역(17:00) 구간의 1, 2차 감속기 및 2차감속기 베어링, 축상의 진동 측정결과 및 파고율, 첨도의 분석결과이다. 상행선 부산-울산역 구간에서 감속기 rms 진동레벨은 100 km/h 이상 주행시 1, 2차 감속기 모두 상하방향 진동이 좌우방향 진동보다 크게 나타났다. 특히 2차 감속기의 경우 100 km/h 이상 주행시 좌우방향 진동에 비해 상하방향 진동에 비해 크게 나타났다. 차량 가속시(500~600초 사이 약 200 km/h 주행대역) 1차 감속기의 상하진동 피크가 발생하였다. 대체적으로 차량이 약 200 km/h 를 가·감속 통과할 경우 1차 감속기의 피크가 발생하는 것으로 볼 때 감속기와 다른 부품간의 공진에 의한 것일 수 있다. 초기 100 km/h 주행시(약 220초 위치) 축상의 진동이 크게 발생한 경우가 있으며, 축상의 진동은 바로 2차 감속기 베어링 및 2차 감속기 기어박스의 진동에 영향을 주지만 1차 감속기에는 큰 영향을 주지 않는다. 그림 2.4.41은 상행선 동대구역(17:28)-대전역(18:16) 구간의 진동 측정결과 및 분석결과이다. 상행선 동대구역-대전역 구간 운행시 감속기에 발생하는 진동특성은 가감속시 1차 감속기에서 피크가 발생하였다. 또한 100 km/h로 저속 주행시 축상 및 2차 감속기에서 진동 및 파고율, 첨도가 증가하는 경향이 있으며, 기존선 운행에 의한 선로의 영향인 것으로 판단된다. 이 구간의 특이사항으로는 300 km/h 고속 운행시(800~1000초 사이) 2차 감속기의 경우 진동이 거의 일정한 반면, 1차 감속기의 진동이 갑자기 증가하는 현상이 발생한다. 이 경우 축상 및 2차 감속기 베어링의 진동에 큰 변화가 없는 것으로 판단할 때, 선로의 영향보다는 1차 감속기와 모터 조립체 자체의 진동 때문인 것으로 판단된다. 그림 2.4.42는 상행선 대전(18:18)-천안아산역(18:39) 구간의 진동 측정결과 및 분석결과이다. 상행선 대전-천안아산역 차량 가속 및 감속시 1차 감속기에서 상하진동 피크가 발생하였고, 저속 운행시 파고율과 첨도가 높아지는 경향이 있다. 이 구간에서도 300 km/h 고속 운행시(800~1000초 사이), 1차 감속기의 진동이 갑자기 증가하는 현상이 발생하고 있다.

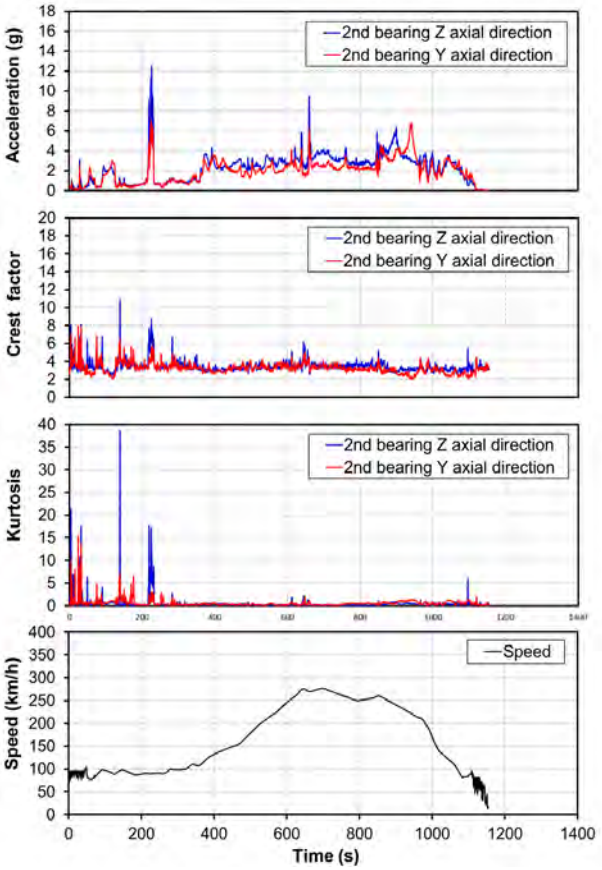
고속열차가 경부선 운행시 감속기에 발생하는 진동특성을 분석결과를 정리하면 다음과 같다. 1차 감속기에서 가감속시 약 200 km/h 속도대역에서 진동 레벨이 크게 올라가는 특성이 있다. 2차 감속기의 경우 100 km/h 이상 주행시 좌우방향 진동에 비해 상하방향 진동에 비해 크게 나타났으며, 축상의 진동레벨 특성과 비슷한 특성을 보인다. 100 km/h로 저속 주행시 축상 및 2차 감속기의 파고율, 첨도가 증가하는 경향이 있으며, 기존선 운행에 의한 선로의 영향인 것으로 판단된다. 300 km/h 고속 운행시 2차 감속기의 경우 진동이 거의 일정한 반면, 1차 감속기의 진동이 갑자기 증가하는 현상이 발생한다.



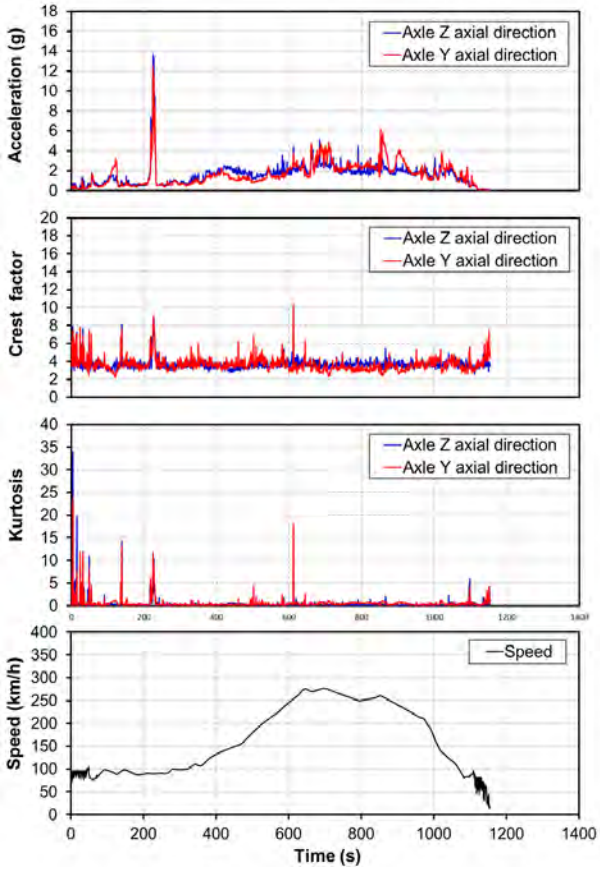

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

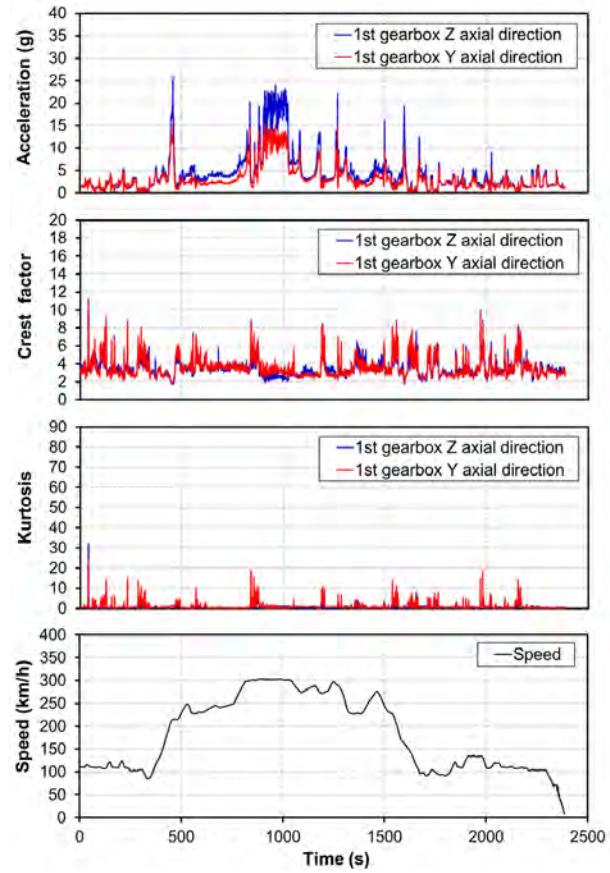



c) 2차 감속기 베어링

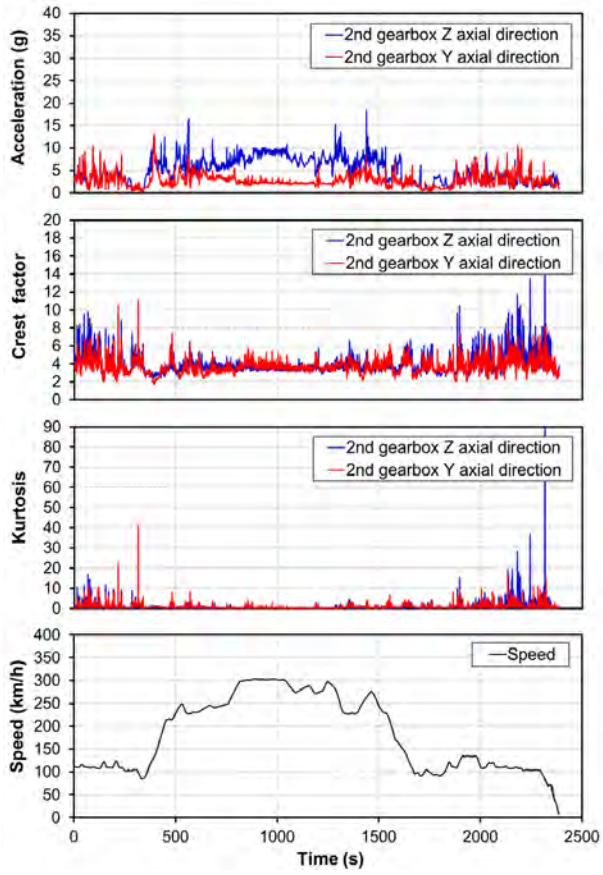



d) 축상

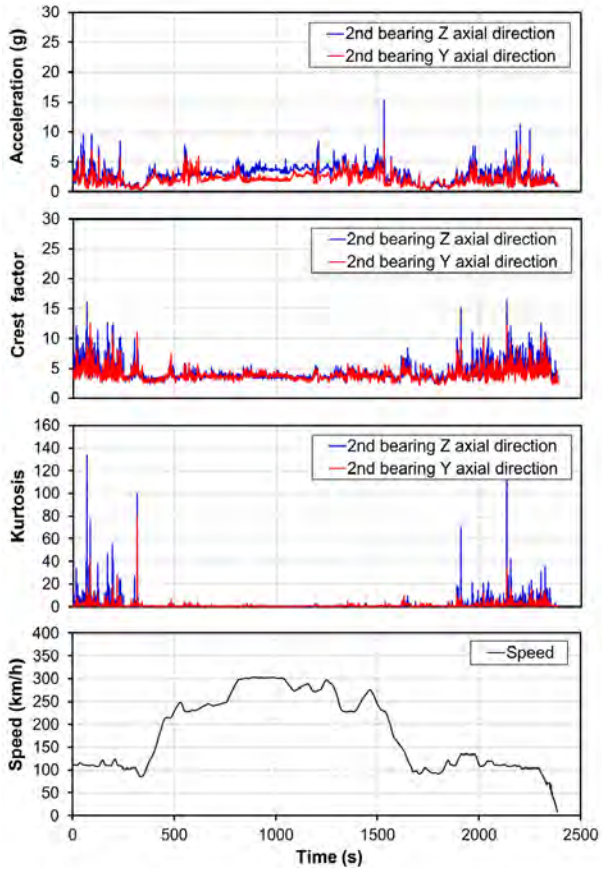
그림 2.4.40 부산역-울산역 감속기 시간영역 진동특성분석



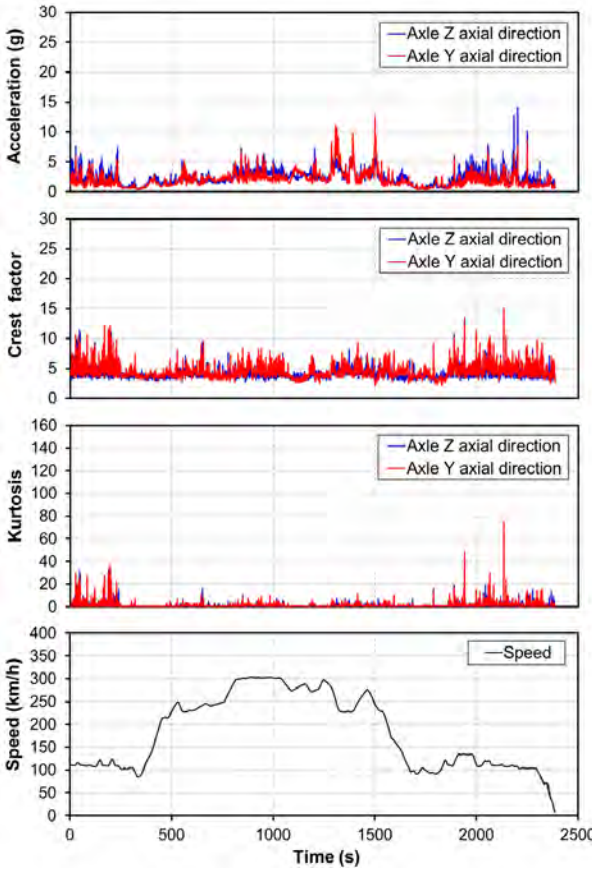

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

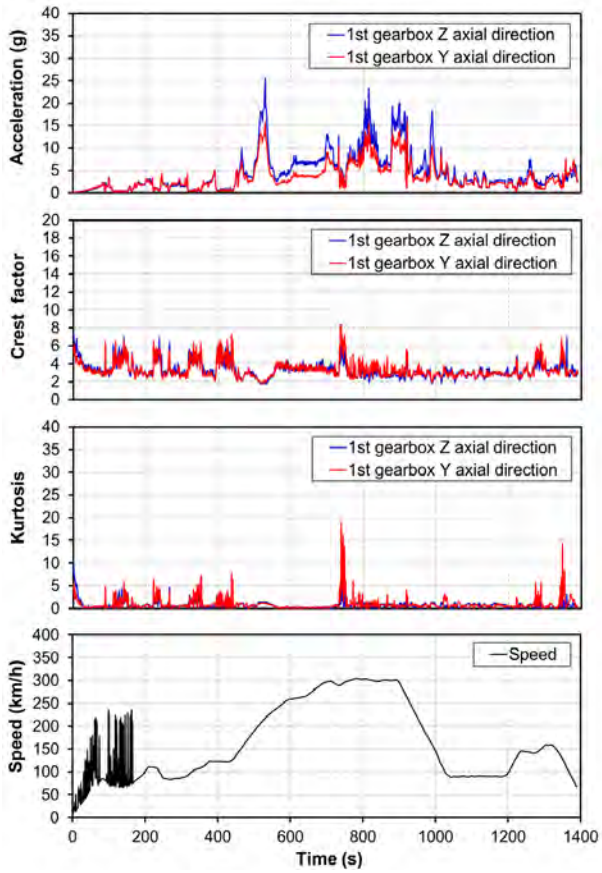



c) 2차 감속기 베어링

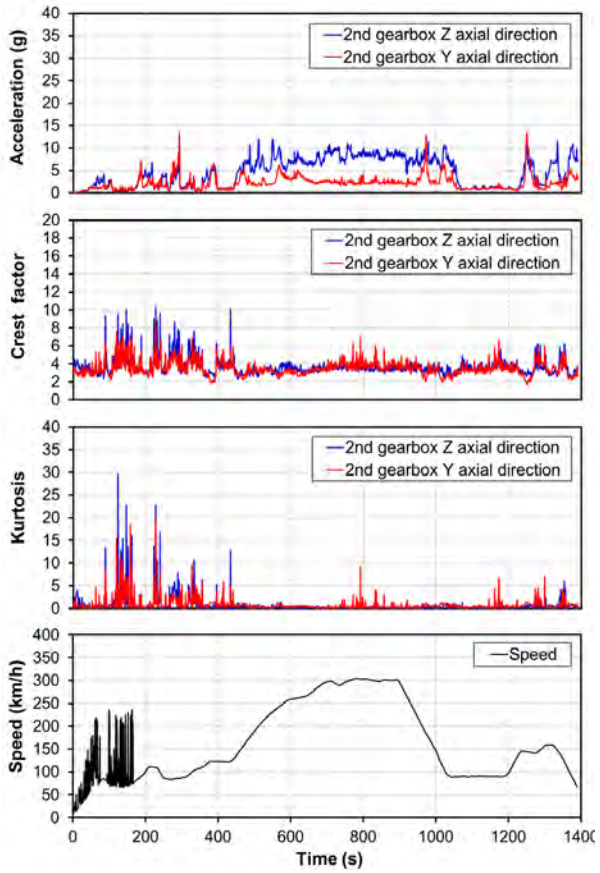



d) 축상

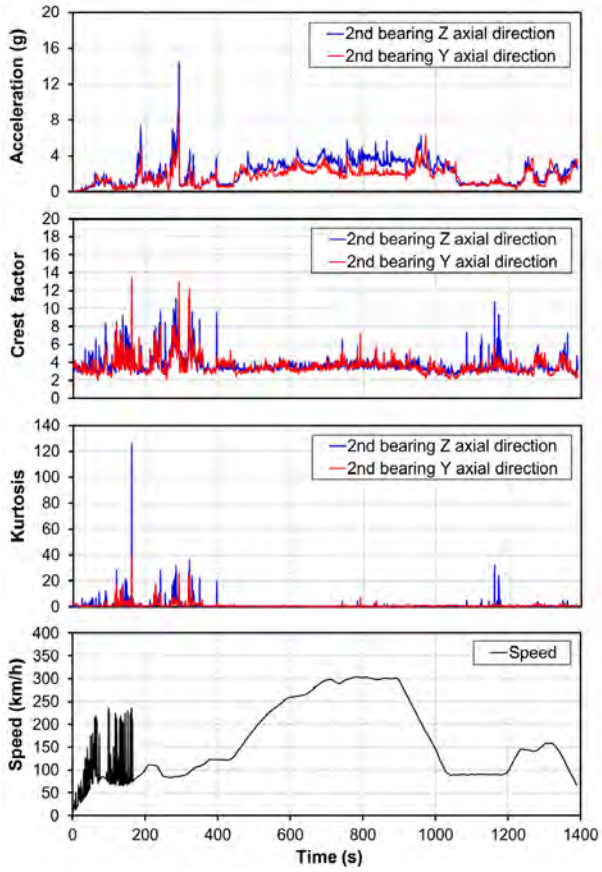
그림 2.4.41 동대구역-대전역 감속기 시간영역 진동특성분석



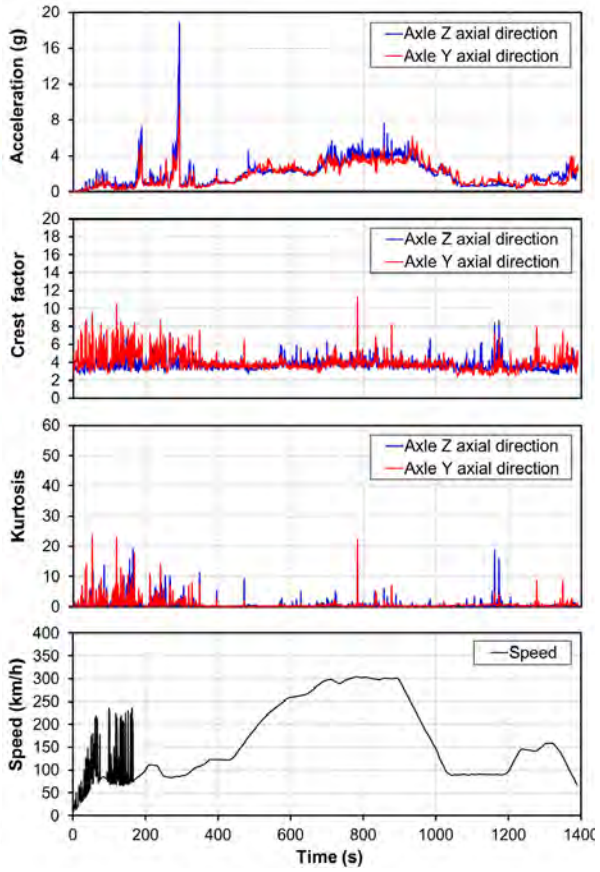

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스




c) 2차 감속기 베어링




d) 축상

그림 2.4.42 대전역-광명역 감속기 시간영역 진동특성분석

(3) 고속열차용 감속기 3차 현차시험(호남선, 2013.04.02)

(가) 측정개요

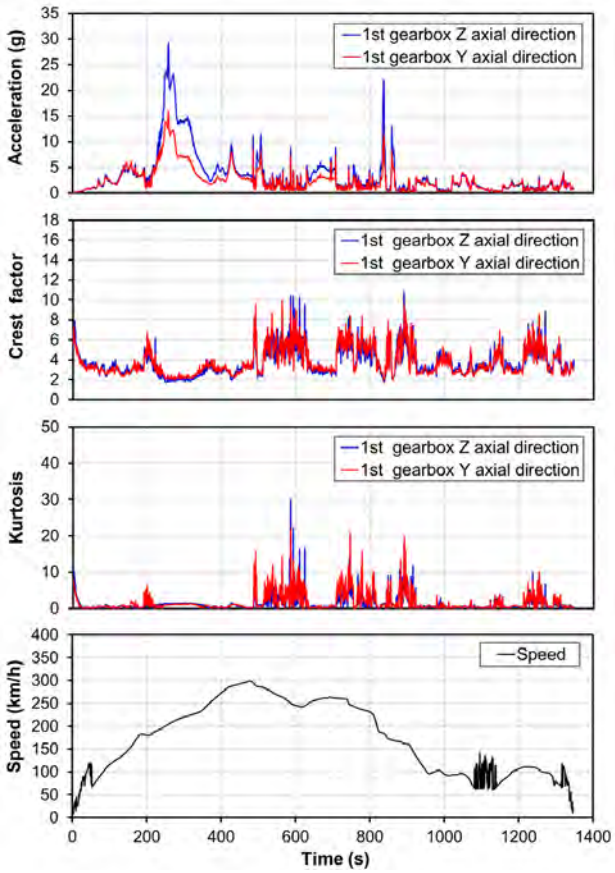
측정대상은 경부선 운행 시 측정된 열차와 동일한 KTX열차를 대상으로 동일한 감속기에 측정지점을 선정하여 호남선 운행시의 진동을 측정하였다.

(나) 분석결과

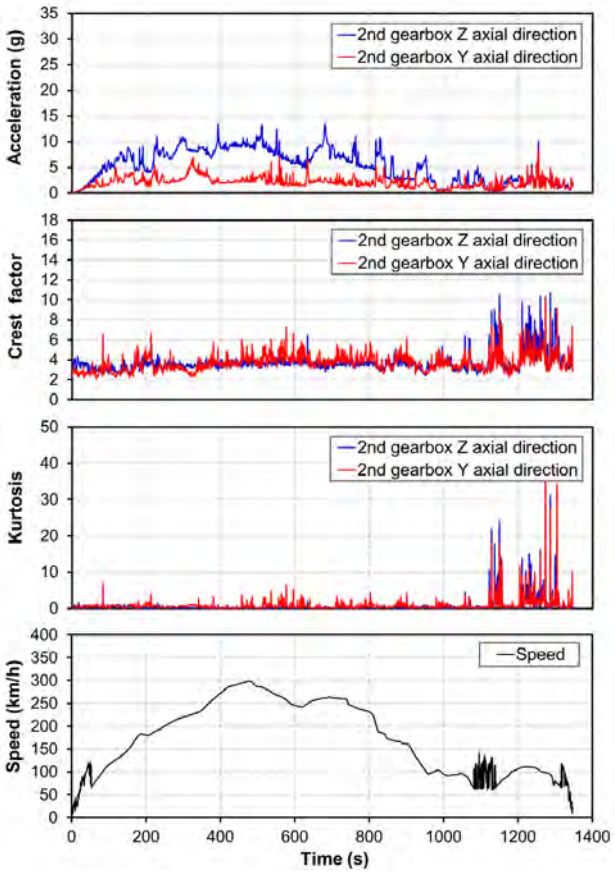
그림 2.4.43 ~ 2.4.48은 호남선 하행 주행시(광명→광주) 각 역별로 진동데이터를 시간영역에 대해 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림 2.4.43은 하행선 천안아산역(08:28)-서대전역(08:51) 구간의 1, 2차 감속기 및 2차감속기 베어링, 축상의 진동 측정결과 및 파고율, 첨도의 분석결과이다. 진동특성은 경부선 분석결과와 같이 가·감속시 200 km/h 에서 1차 감속기의 진동이 크게 증가하는 현상이 발생하며, 차량속도 100 km/h 이하로 주행할 경우 1, 2차 감속기의 진동 레벨은 감소하였지만, 2차 감속기의 경우 파고율 및 첨도가 커지는 경향이 있다. 그림 2.4.44 ~ 2.4.48은 서대전역부터 호남선을 운행할 때(서대전(08:51)-계룡(09:07)-논산(09:24)-익산(09:49)-정읍(10:15)-장성(10:31)-광주(10:57)) 감속기 진동 레벨 및 파고율, 첨도의 분석결과이다. 기존선을 운행하기 때문에 운행속도는 150 km/h 이하로 저속 운행하였고, 감속기에 발생하는 진동은 대체로 1차 감속기보다 2차 감속기의 진동이 크게 나타났다. 2차 감속기의 진동은 축상의 진동과 같은 경향을 나타내고 있으므로 선로 영향에 의하여 2차 감속기의 진동이 1차 감속기의 진동보다 커진 것으로 판단된다. 또한 2차 감속기의 파고율과 첨도도 크게 나타나고 있어 모니터링 시스템의 이상상태 진단기준시 고려해야 할 부분이다.

그림 2.4.49 ~ 2.4.54은 호남선 상행 주행시(광주→광명) 각 역별로 진동데이터를 시간영역에 대해 분석한 결과를 나타낸다. 그림 2.4.49 ~ 2.4.52은 광주역부터 서대전역까지 기존선을 운행할 때(광주(11:45)-장성(12:09)-김제(12:37)-익산(12:53)-서대전(13:46)) 감속기 진동 레벨 및 파고율, 첨도의 분석결과이다. 기존선을 운행하기 때문에 운행속도는 150 km/h 이하로 운행하였고, 감속기에 발생하는 진동은 대체로 1차 감속기보다 2차 감속기의 진동이 크게 나타났다. 2차 감속기의 진동은 축상의 진동과 같은 경향을 나타내고 있으므로 선로의 영향을 직접 받고 있음을 알 수 있다. 또한 2차 감속기의 파고율과 첨도도 크게 나타나고 있어 모니터링 시스템의 이상상태 진단기준시 고려해야 할 부분이다. 특히 그림 2.4.52와 같이 익산-서대전 구간의 경우 축상 및 2차 감속기 베어링, 2차 감속기 기어박스의 진동이 다른 구간에 비해 커지고 있으므로 선로 조건이 다른 구간에 비해 열악한 것으로 판단된다. 그림 2.4.53 ~ 2.4.54은 서대전역(13:46)-천안아산(14:10)-광명(14:36) 구간의 진동 측정결과이다. 서대전역에서 고속선으로 진입할 경우 축상진동 및 2차감속기 진동이 증가한다. 고속선을 주행할 경우 경부선 분석결과와 같이 가•감속시 200 km/h 에서 1차 감속기의 진동이 크게 증가하는 현상이 발생하며, 차량속도 100 km/h 이하로 주행할 경우 2차 감속기의 파고율 및 첨도가 커지는 경향이 있다.

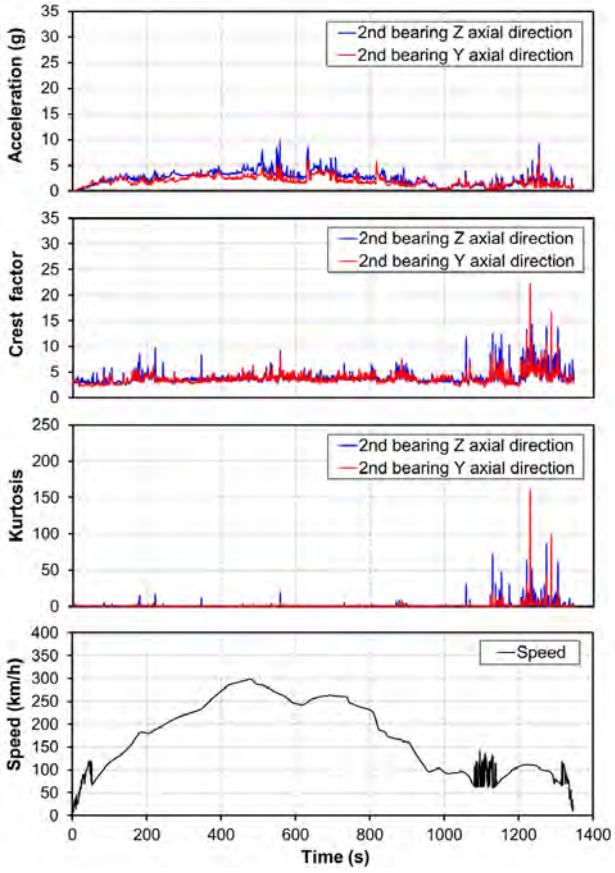
고속열차가 호남선 주행시 감속기 진동 특성을 보면, 고속선에서는 경부선과 동일한 선로를 주행하므로 진동특성이 동일하다. 그러나 기존선 운행시 감속기에 발생하는 진동은 대체로 1차 감속기보다 2차 감속기의 진동이 크게 나타났다. 익산-서대전 구간의 경우 축상 및 2차감속기 베어링, 2차 감속기 기어박스의 진동이 다른 구간에 비해 크다.



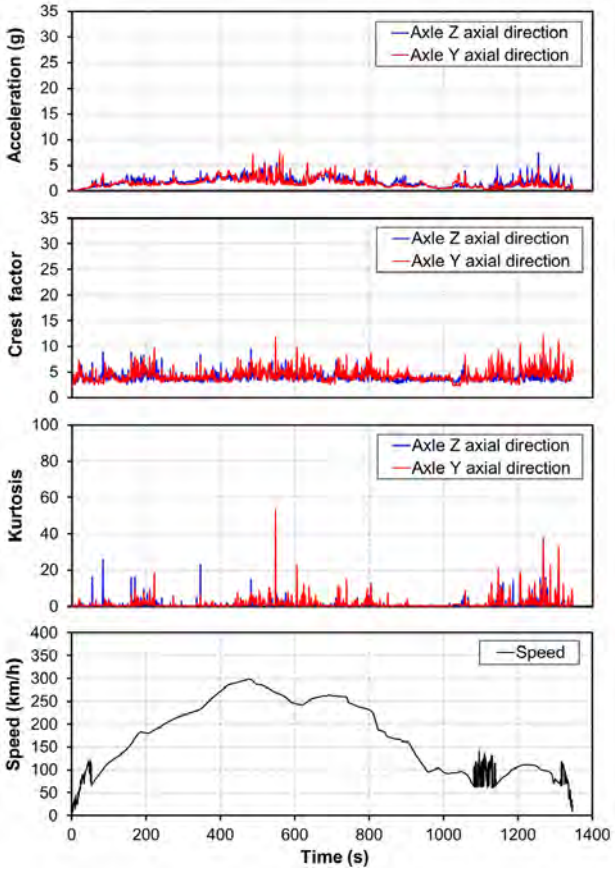

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

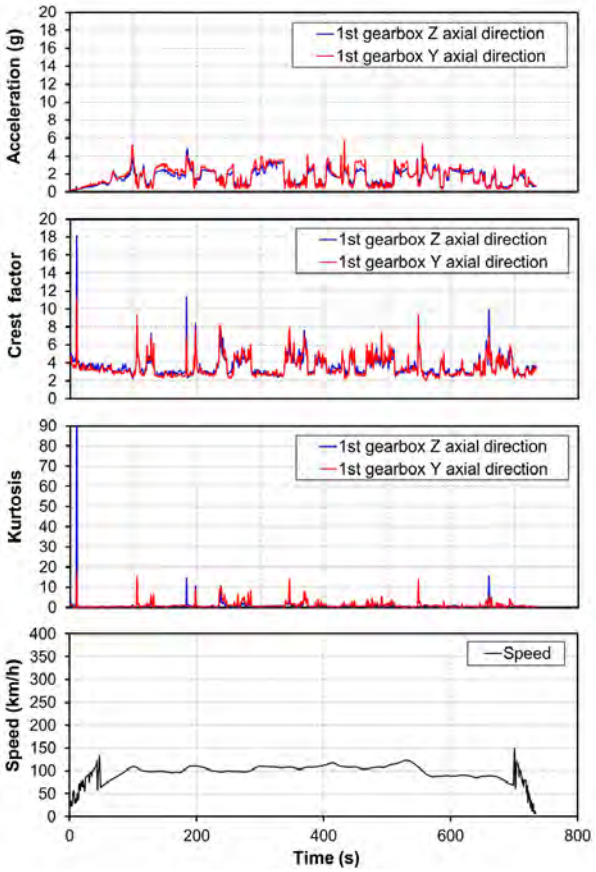



c) 2차 감속기 베어링

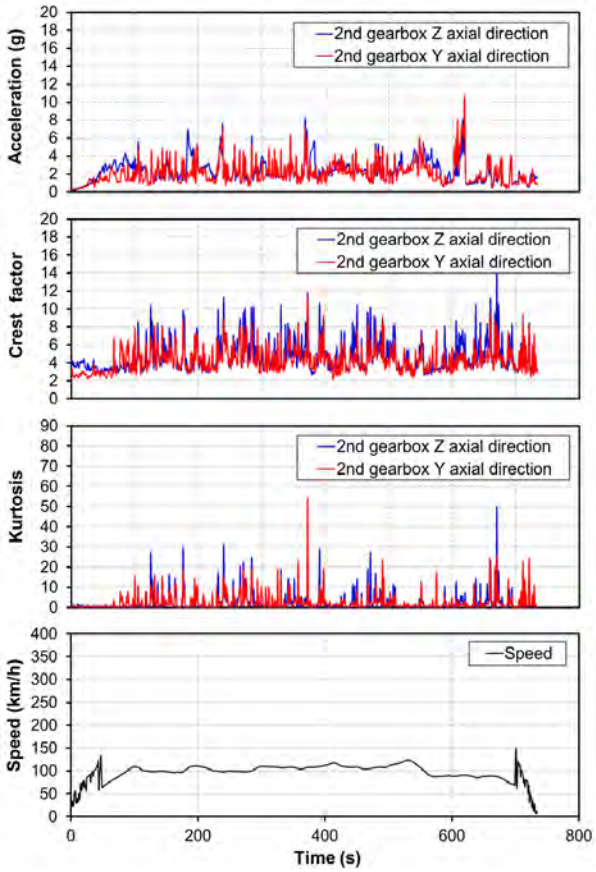



d) 축상

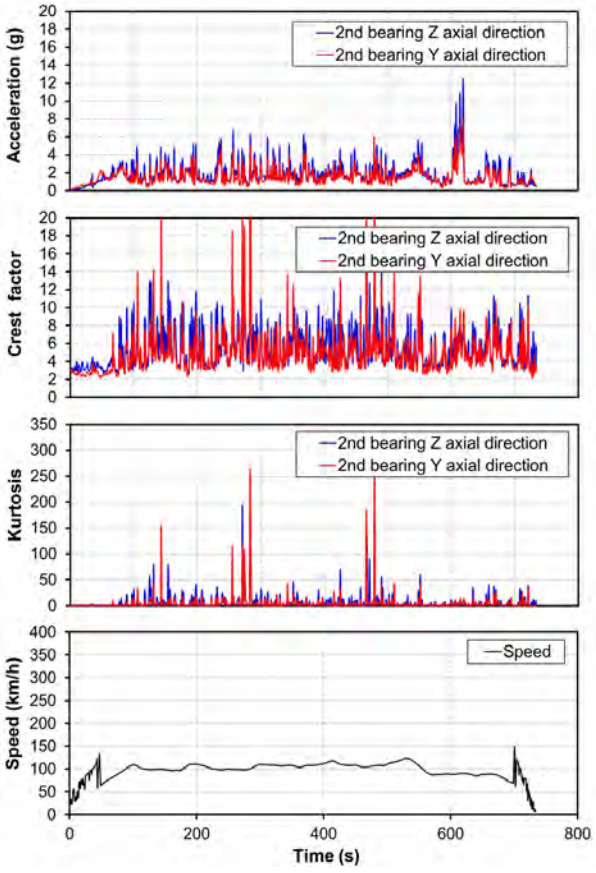
그림 2.4.43 천안아산역-서대전역 감속기 시간영역 진동특성분석



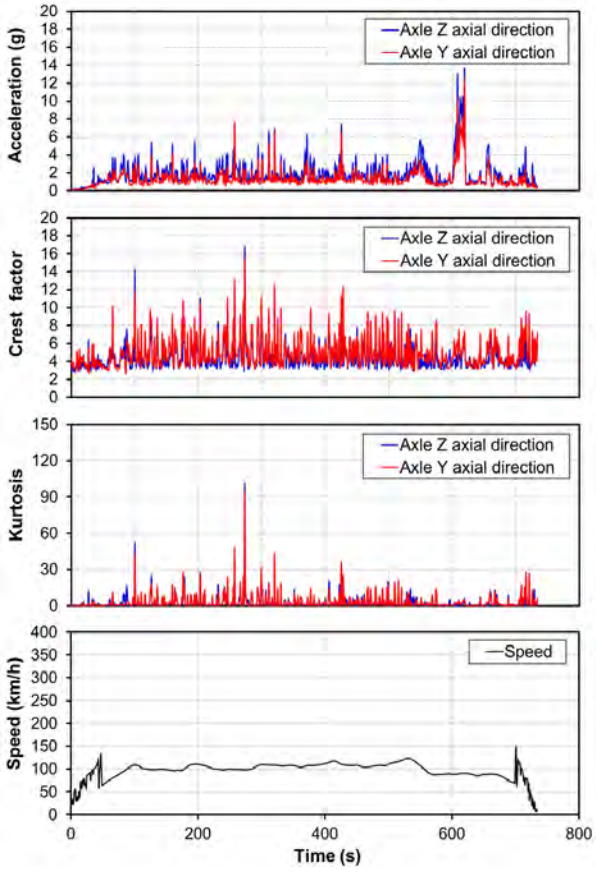

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

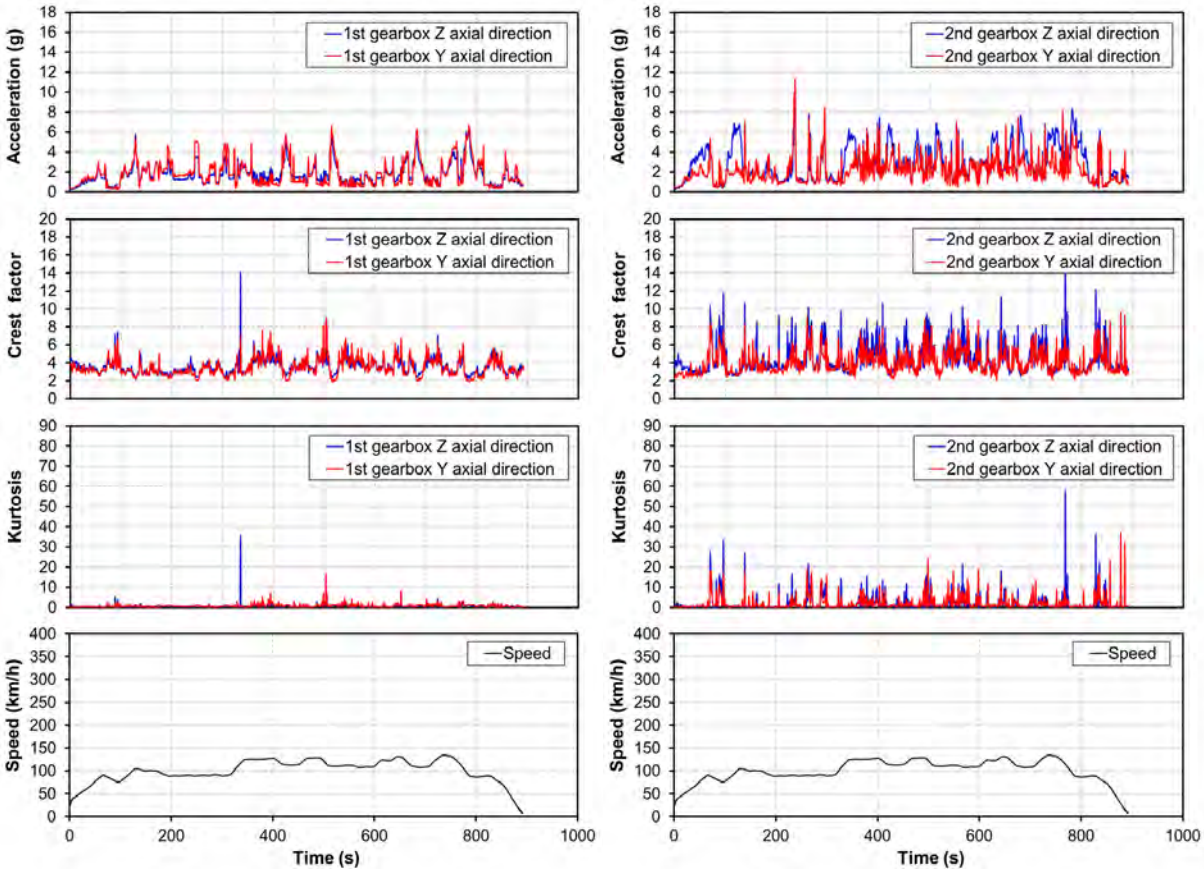



c) 2차 감속기 베어링




d) 축상

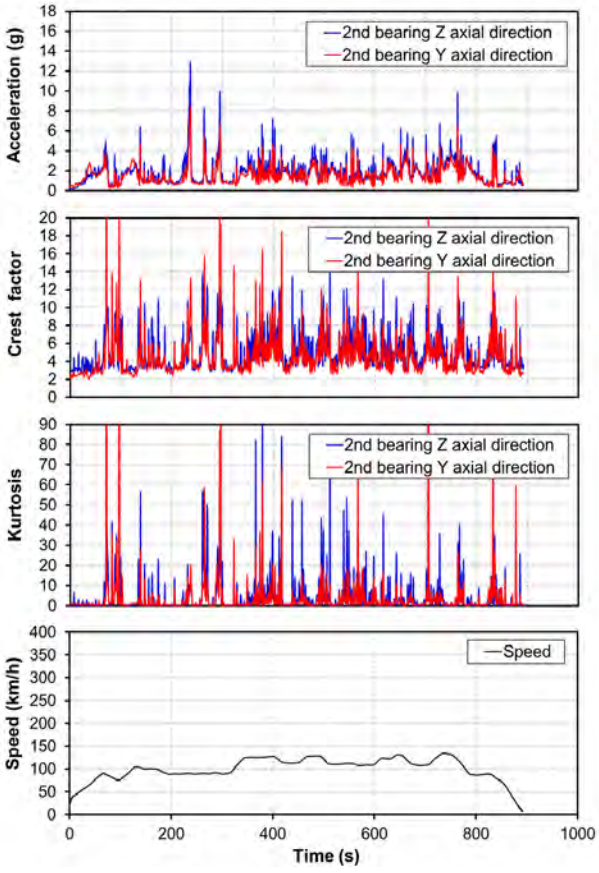
그림 2.4.44 서대전역-계룡역 감속기 시간영역 진동특성분석



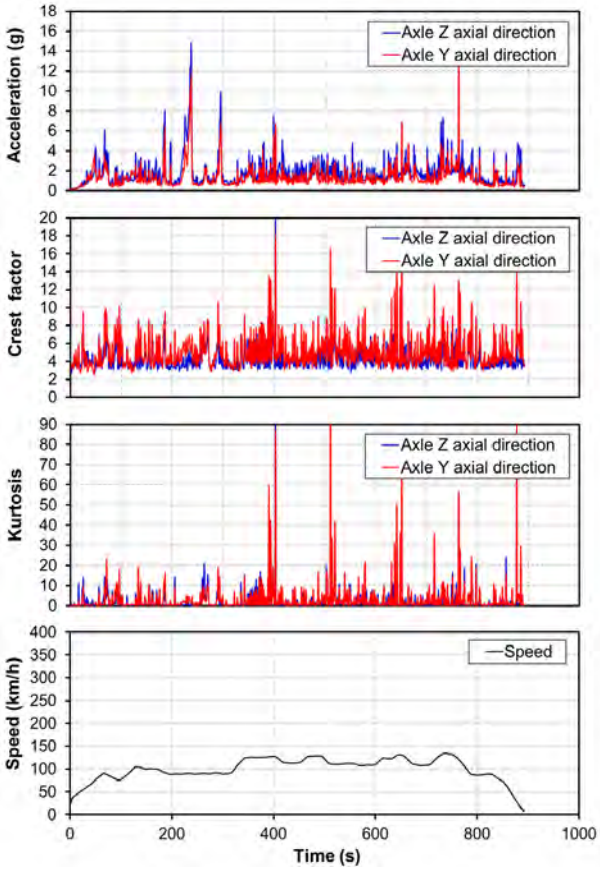

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

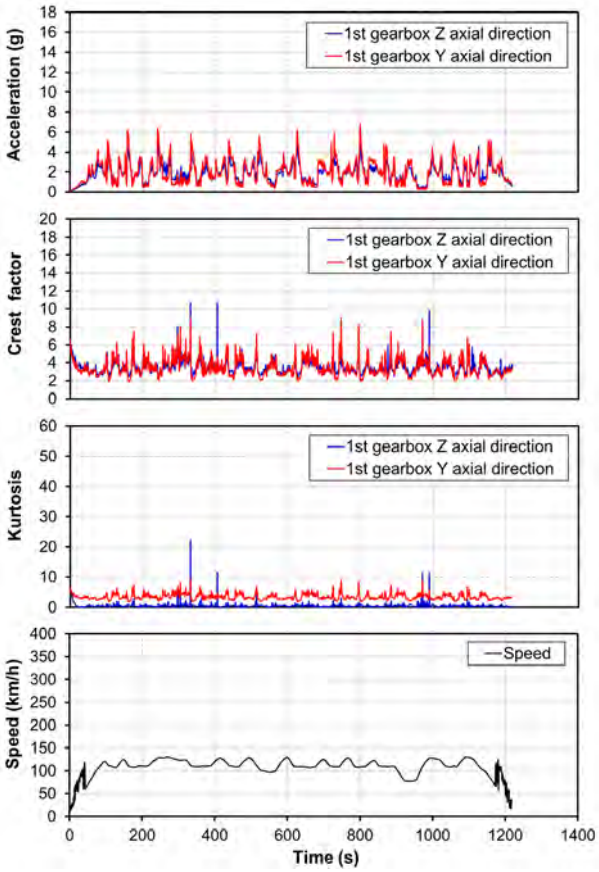



c) 2차 감속기 베어링

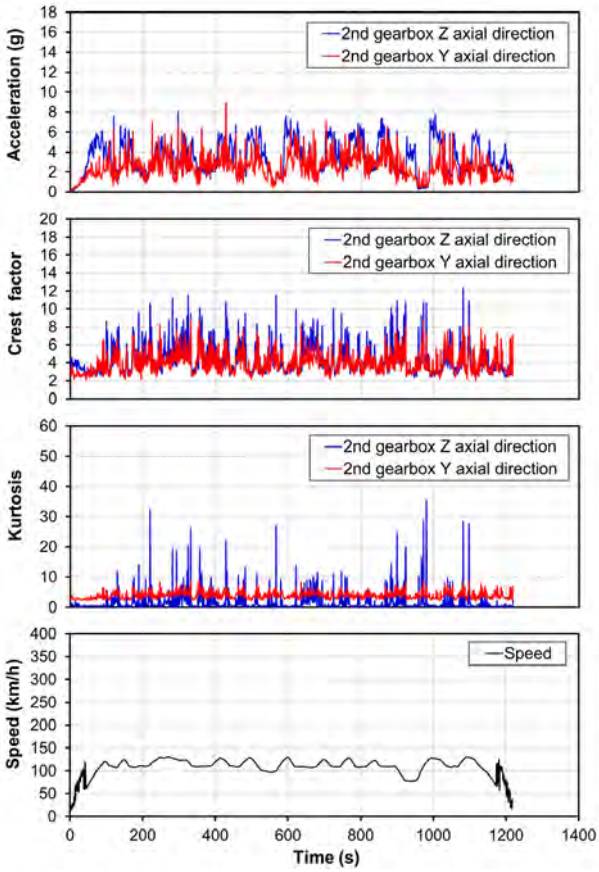



d) 축상

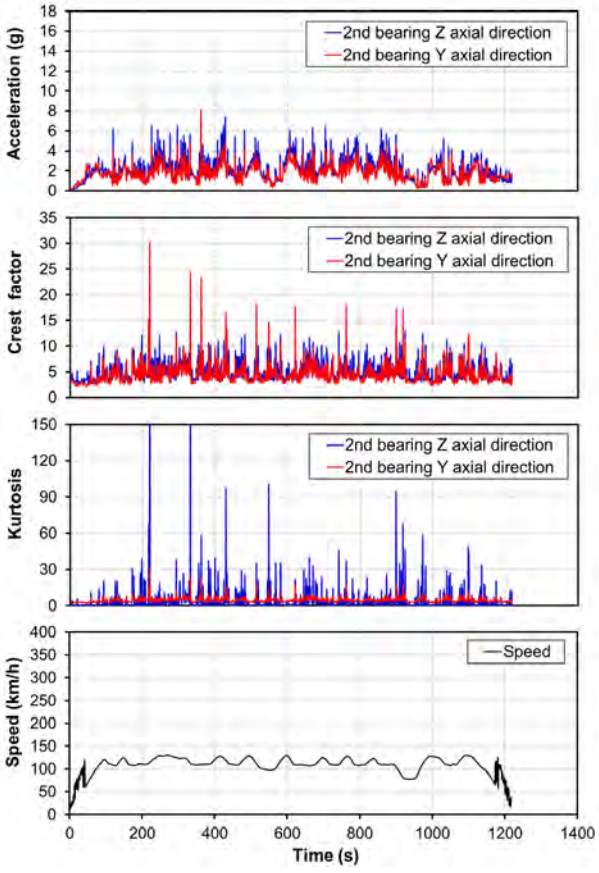
그림 2.4.45 계룡역-논산역 감속기 시간영역 진동특성분석



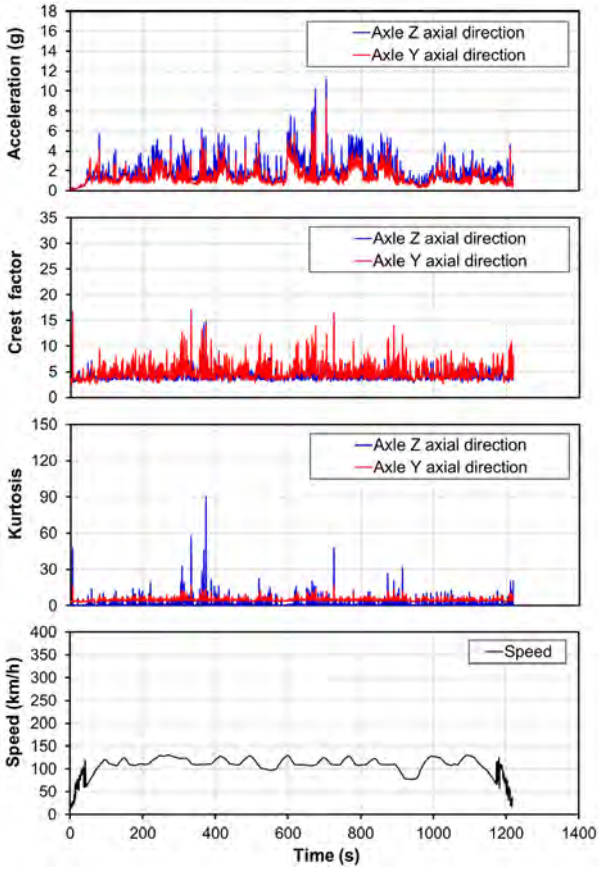

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

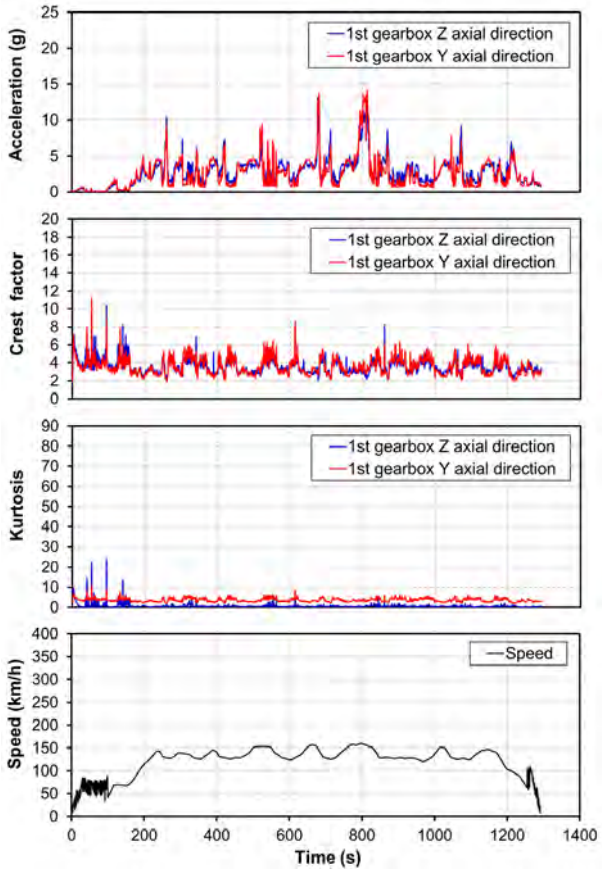



c) 2차 감속기 베어링

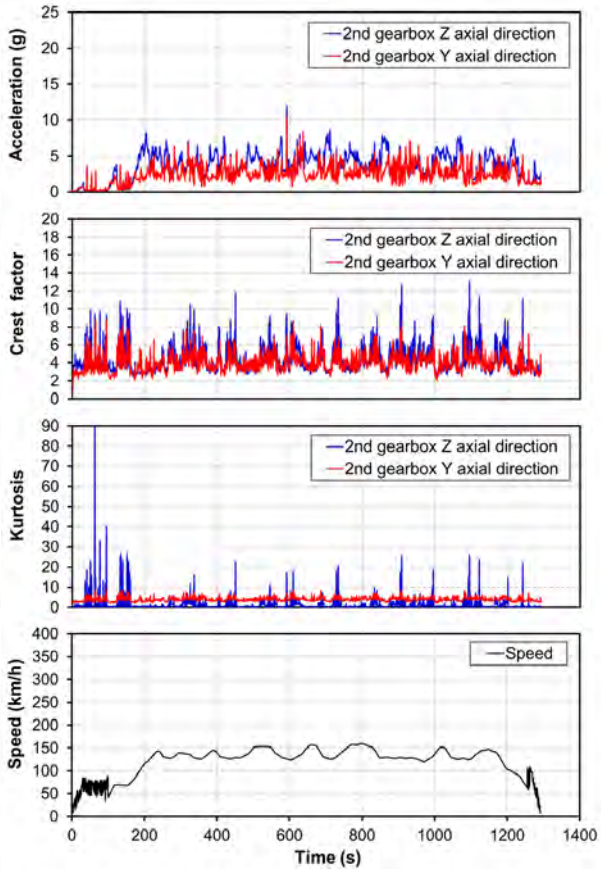



d) 축상

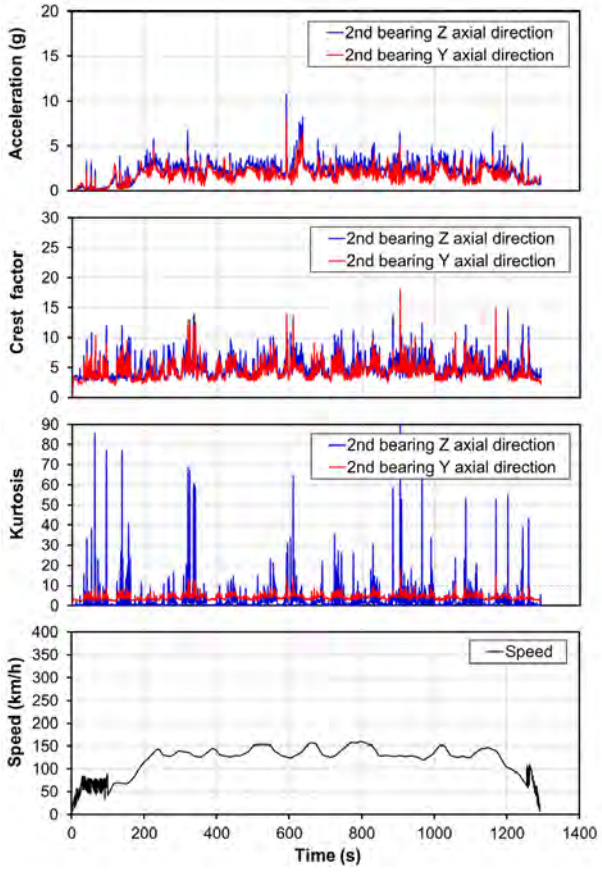
그림 2.4.46 논산역-익산역 감속기 시간영역 진동특성분석



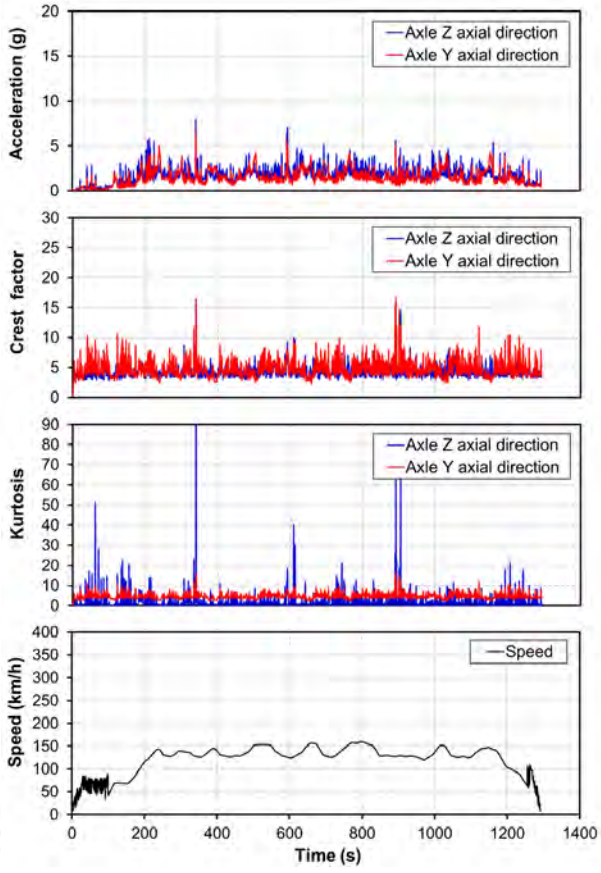

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

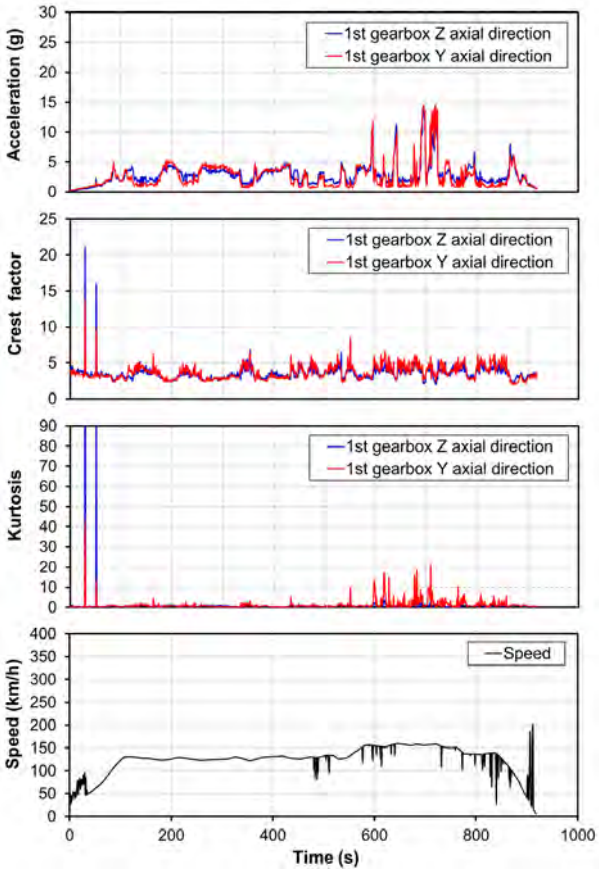



c) 2차 감속기 베어링

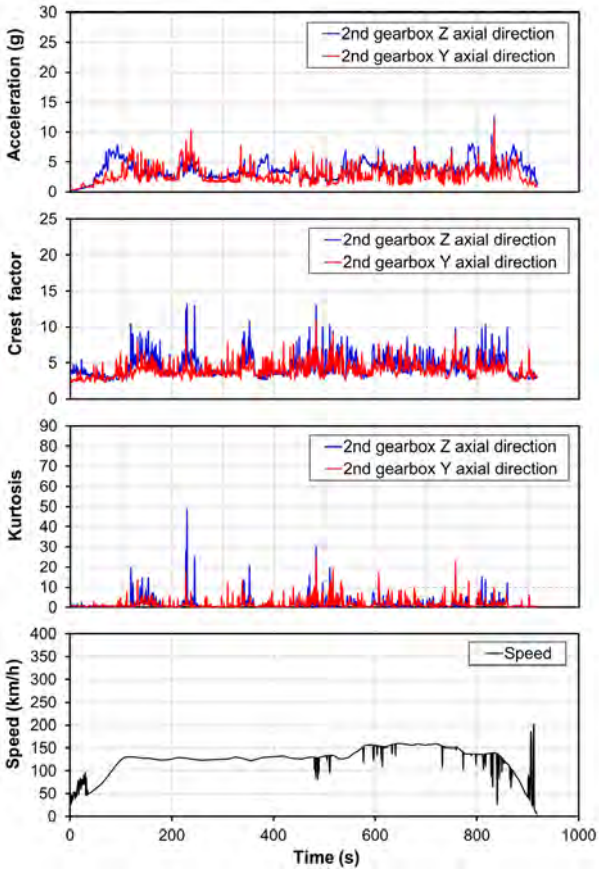



d) 축상

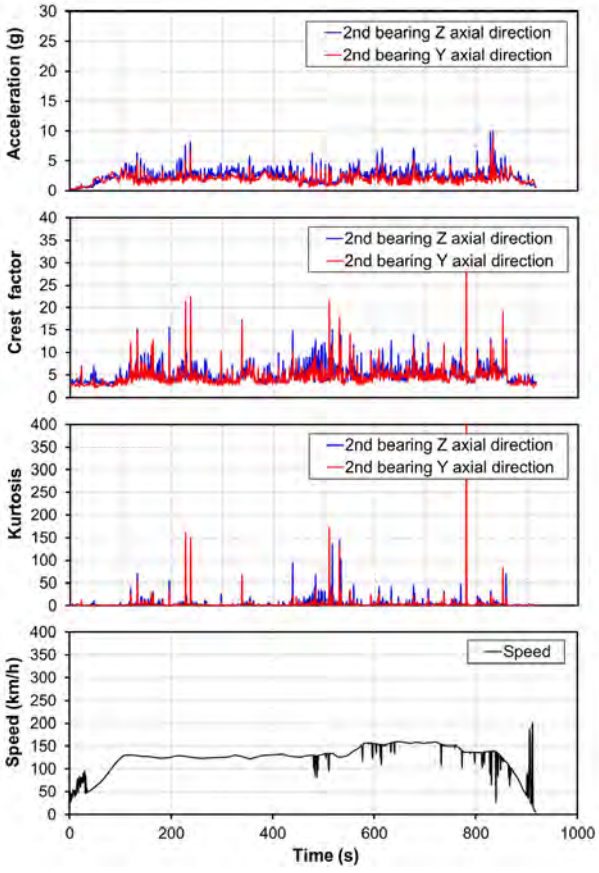
그림 2.4.47 익산역-정읍역 감속기 시간영역 진동특성분석



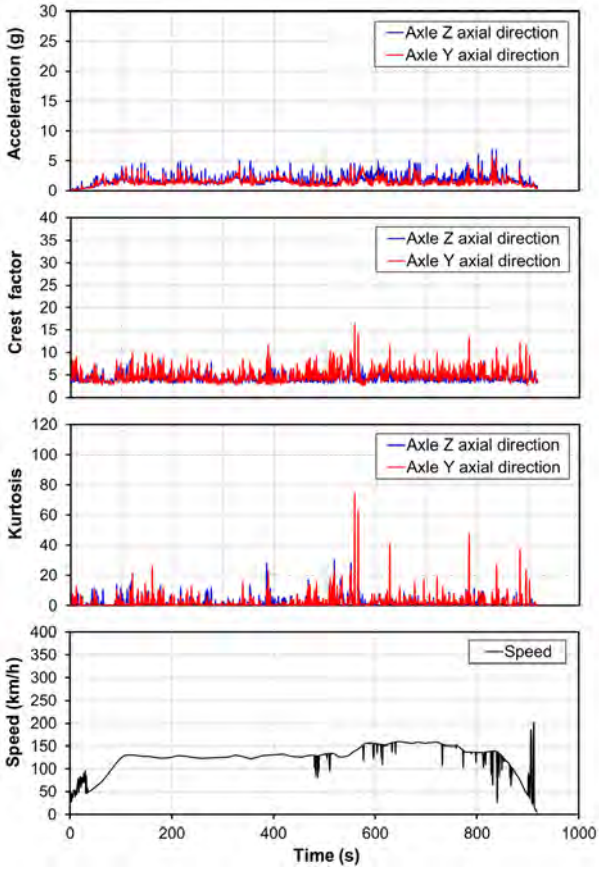

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

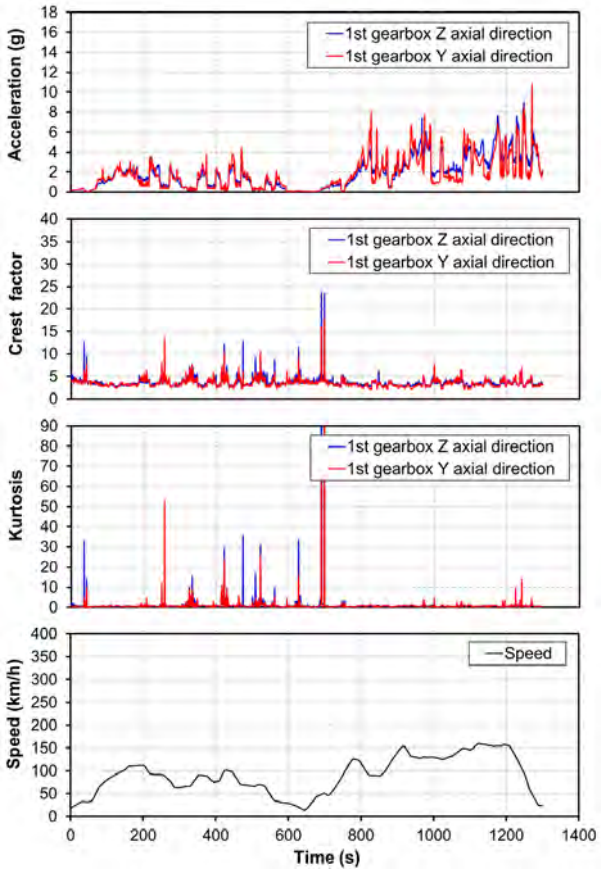



c) 2차 감속기 베어링

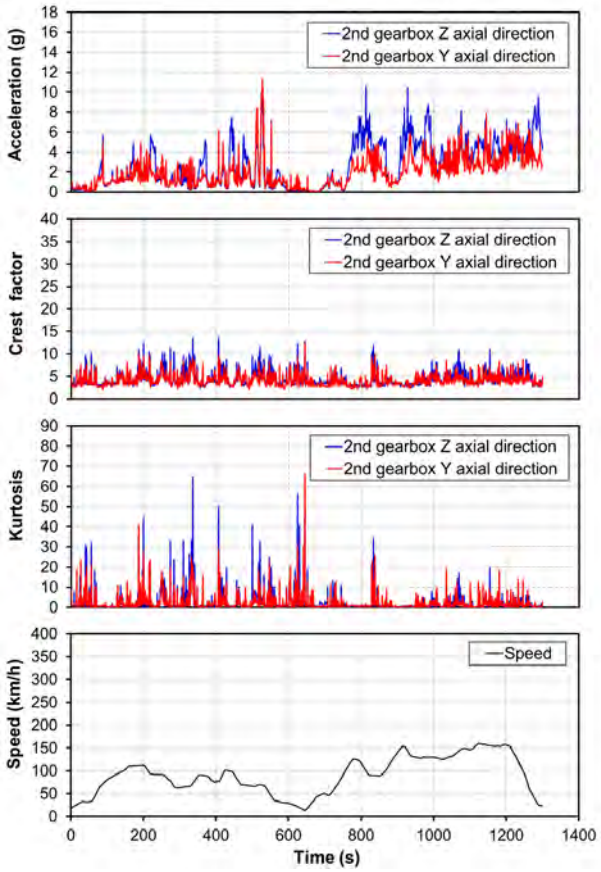



d) 축상

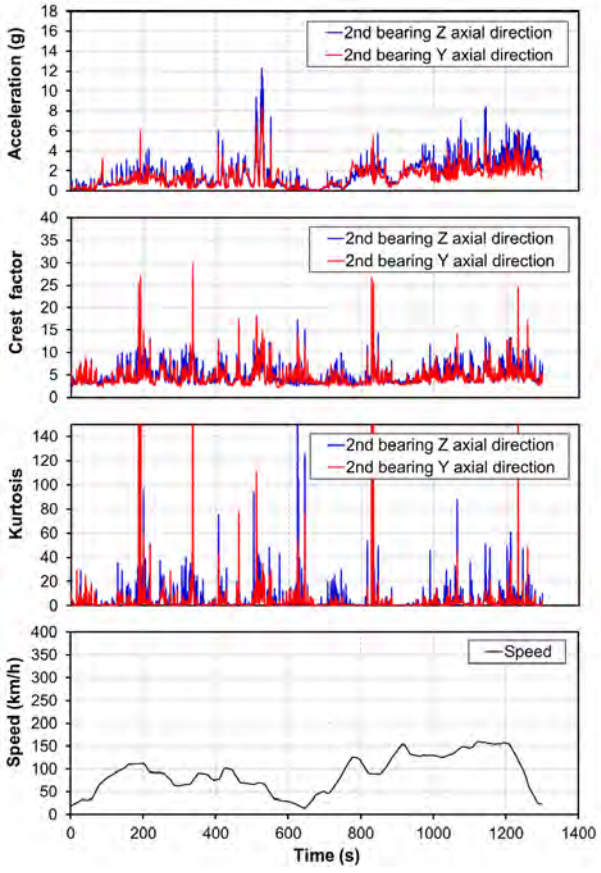
그림 2.4.48 정읍역-장성역 감속기 시간영역 진동특성분석



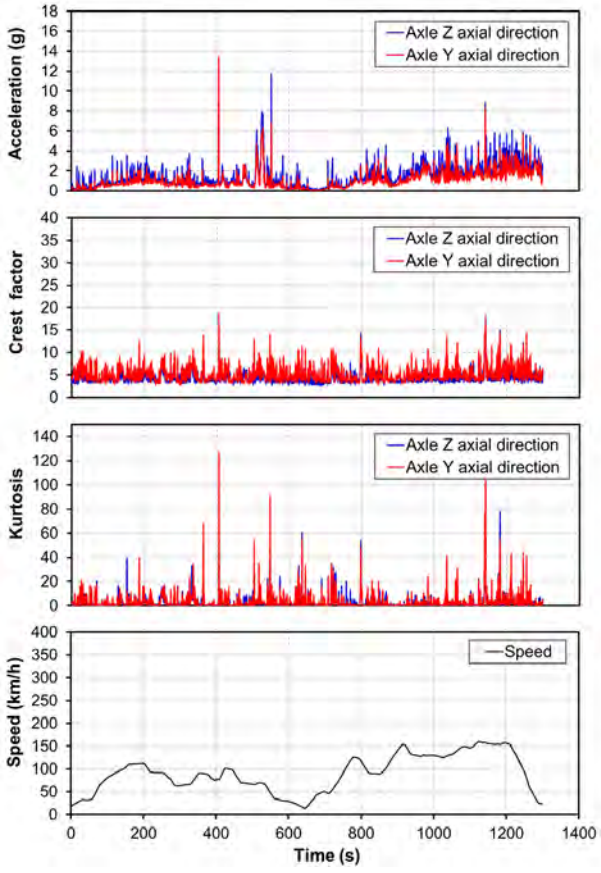

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

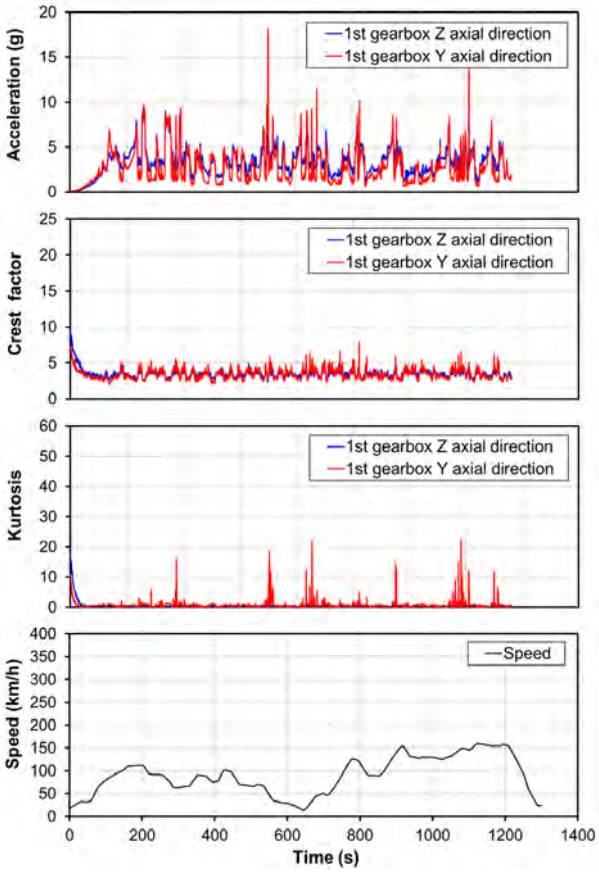



c) 2차 감속기 베어링

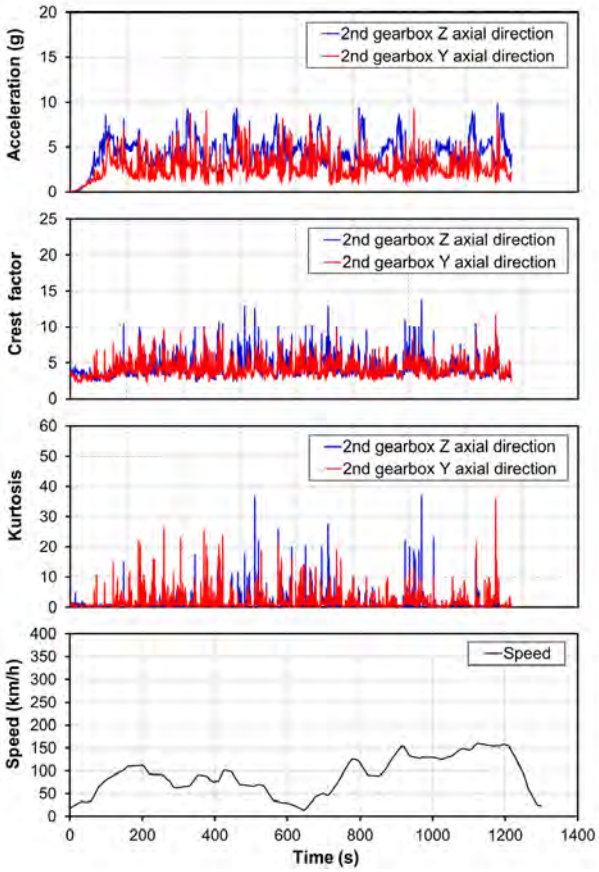



d) 축상

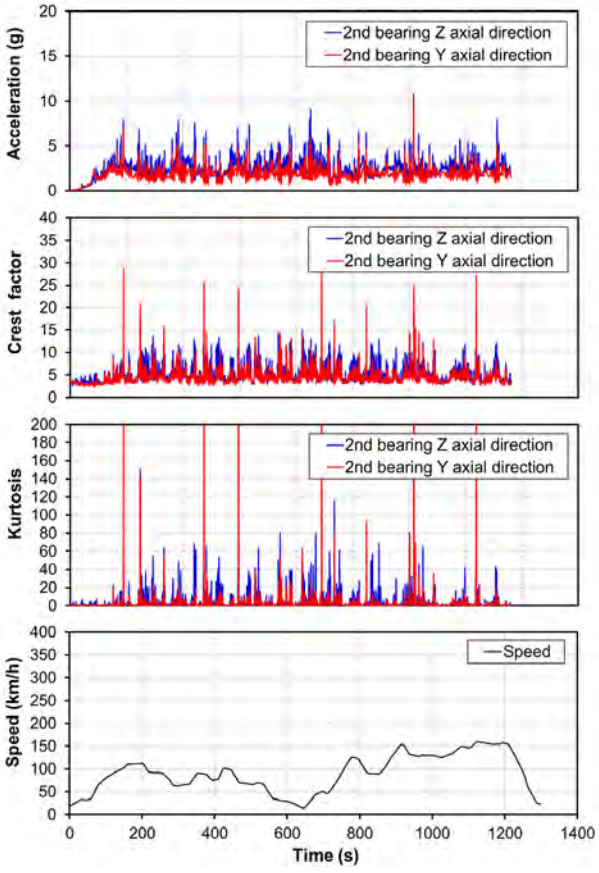
그림 2.4.49 광주역-장성역 감속기 시간영역 진동특성분석



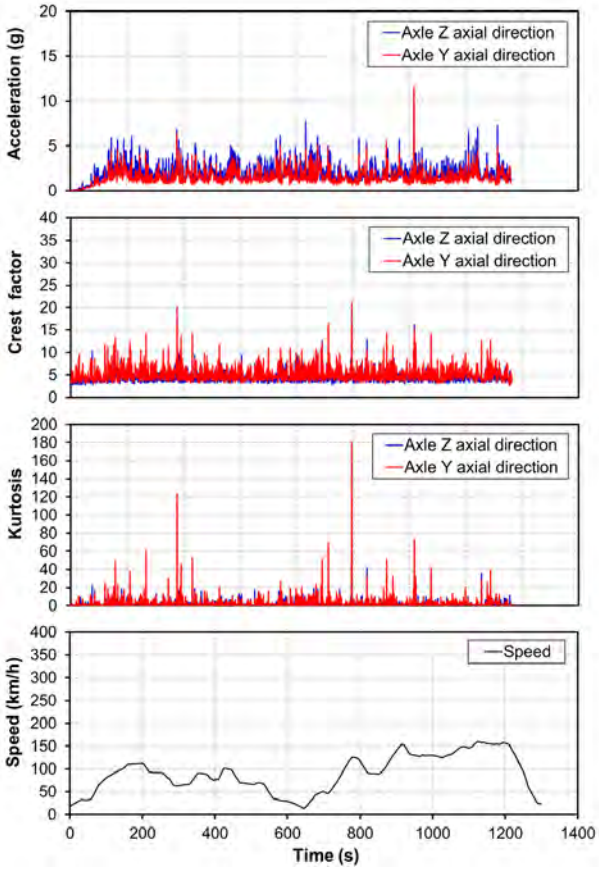

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

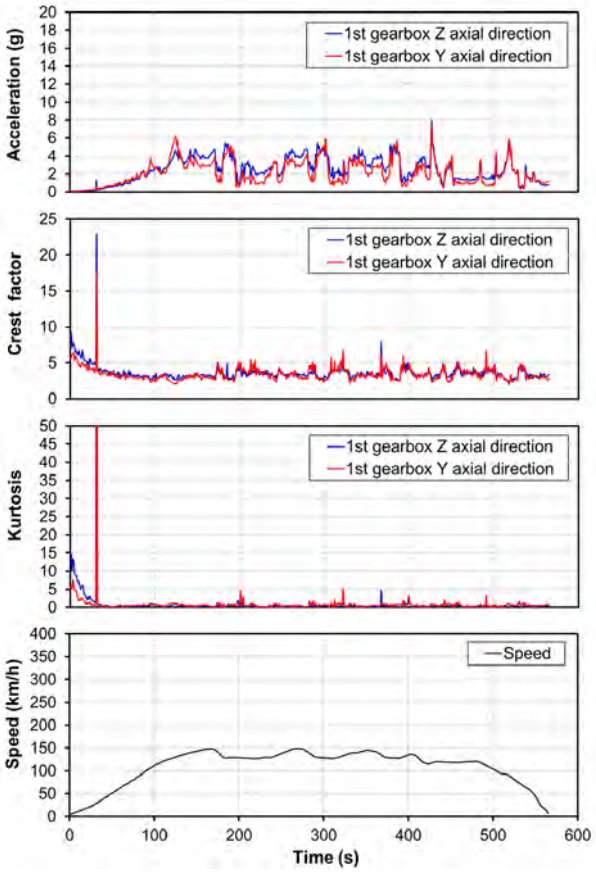



c) 2차 감속기 베어링

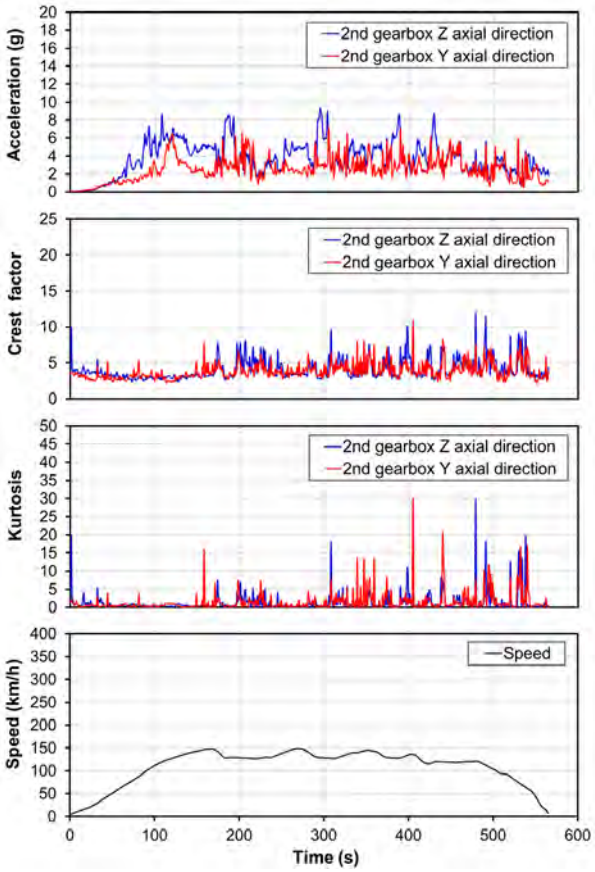



d) 축상

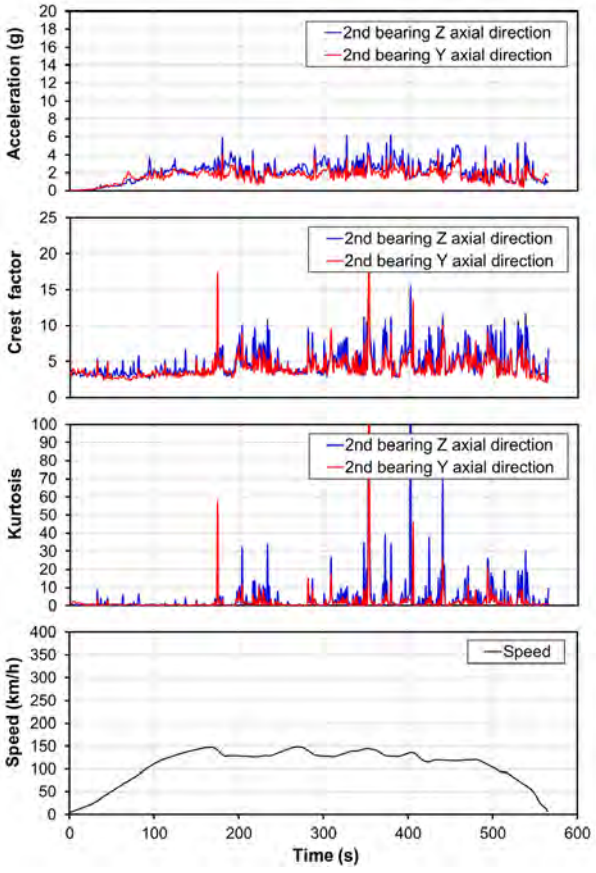
그림 2.4.50 장성역-김제역 감속기 시간영역 진동특성분석



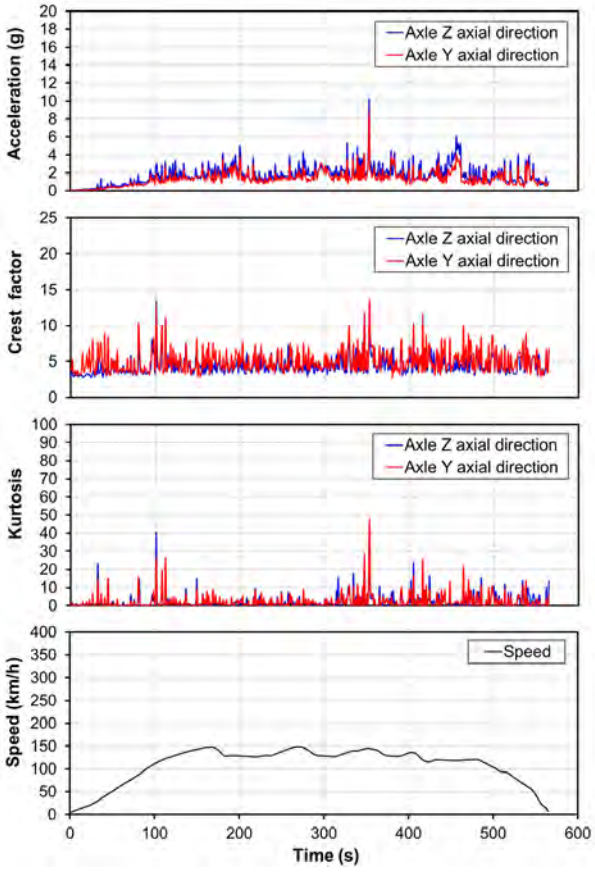

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

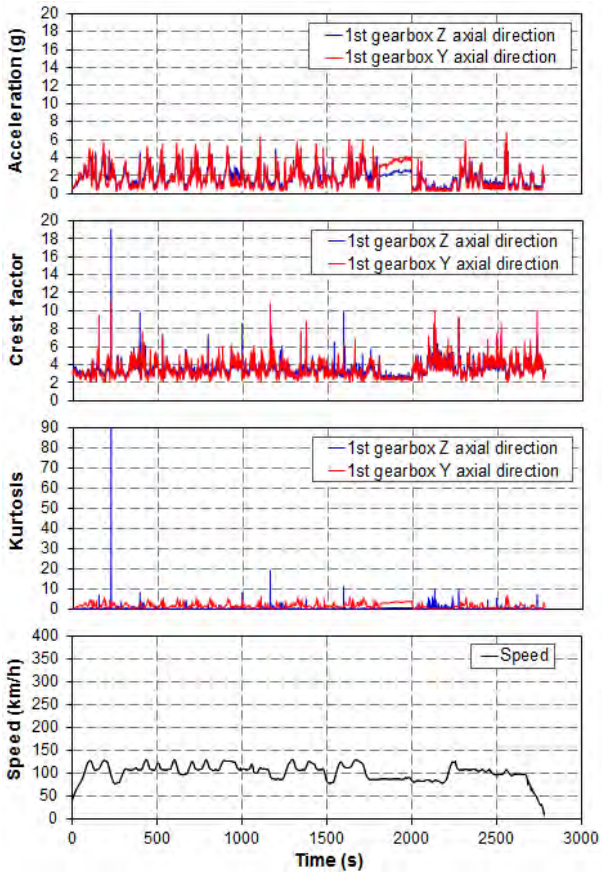



c) 2차 감속기 베어링

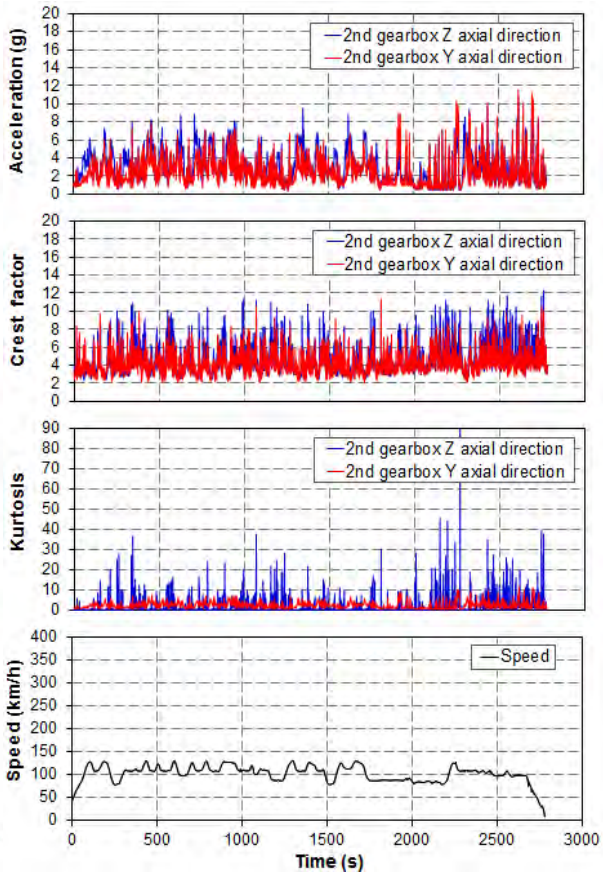



d) 축상

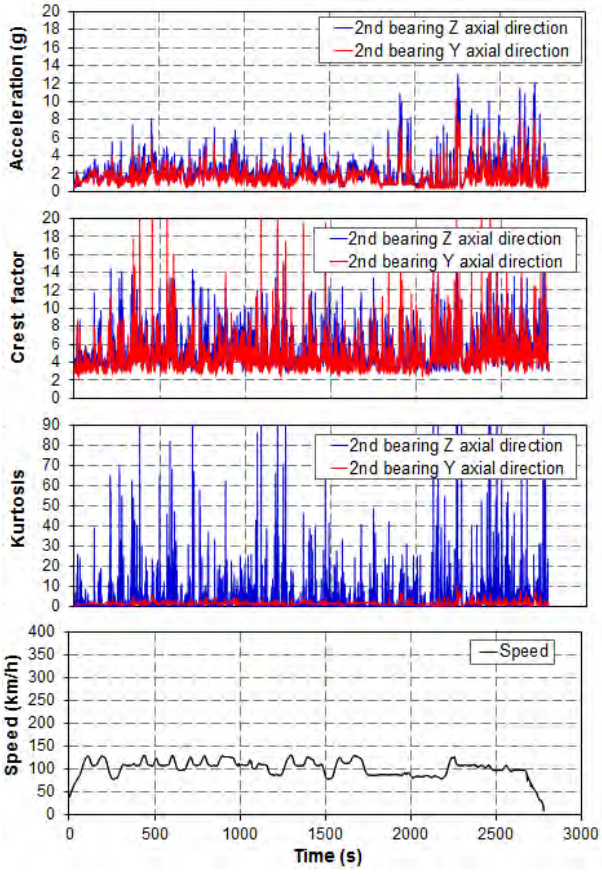
그림 2.4.51 김제역-익산역 감속기 시간영역 진동특성분석



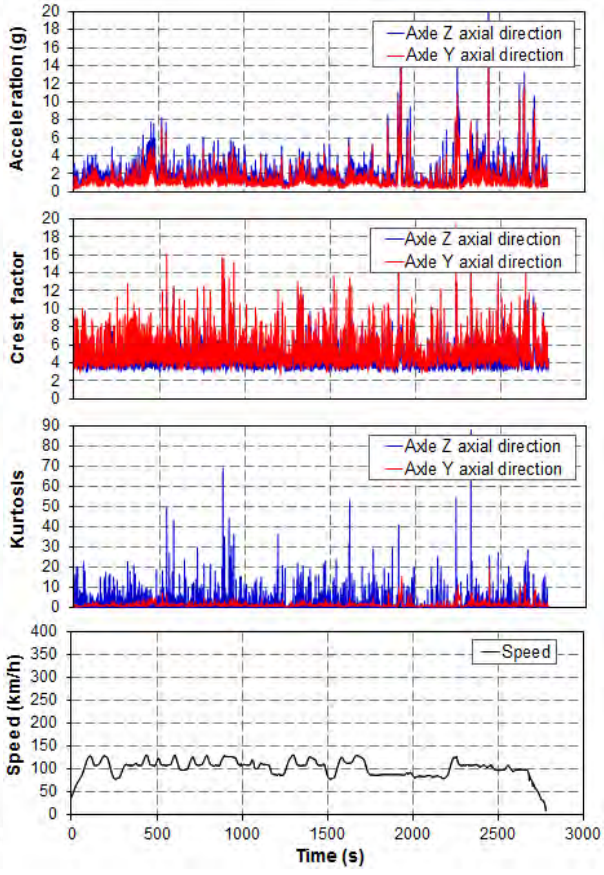

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

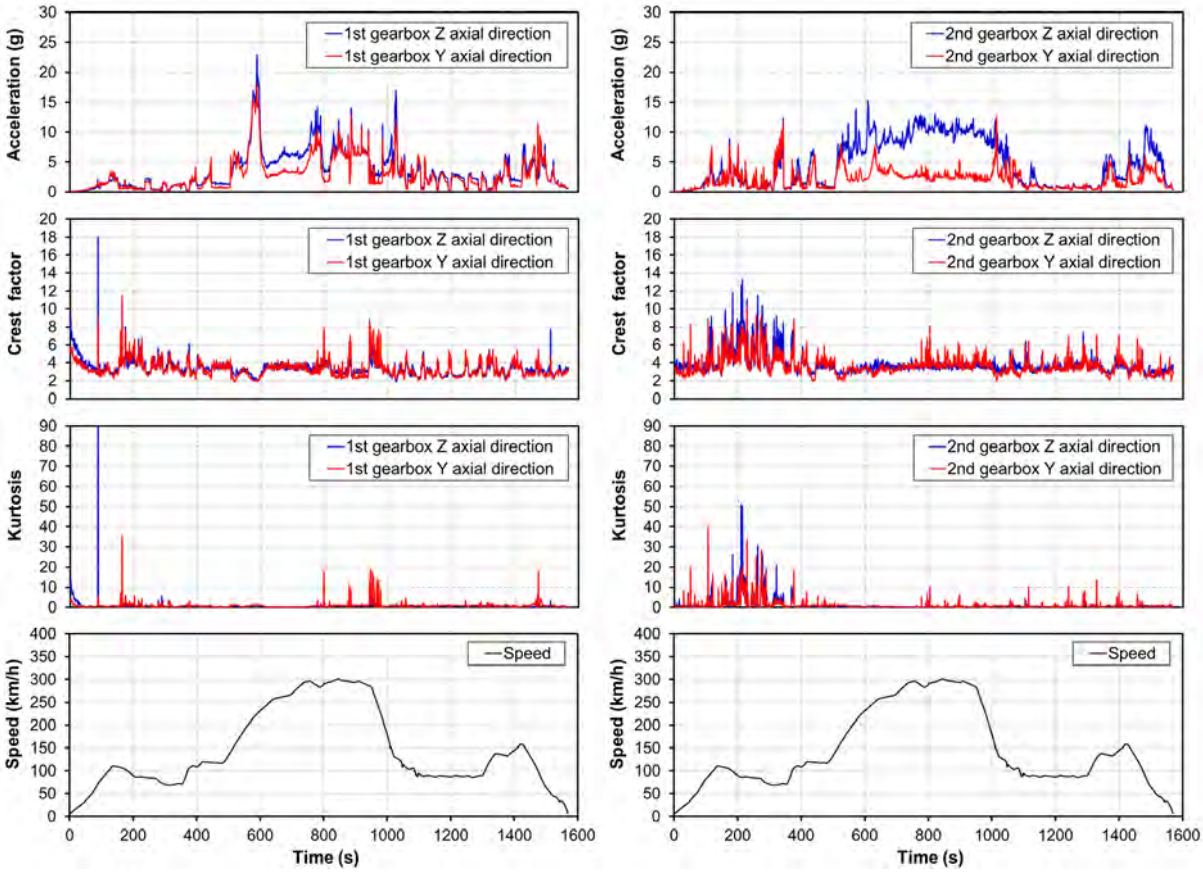



c) 2차 감속기 베어링




d) 축상

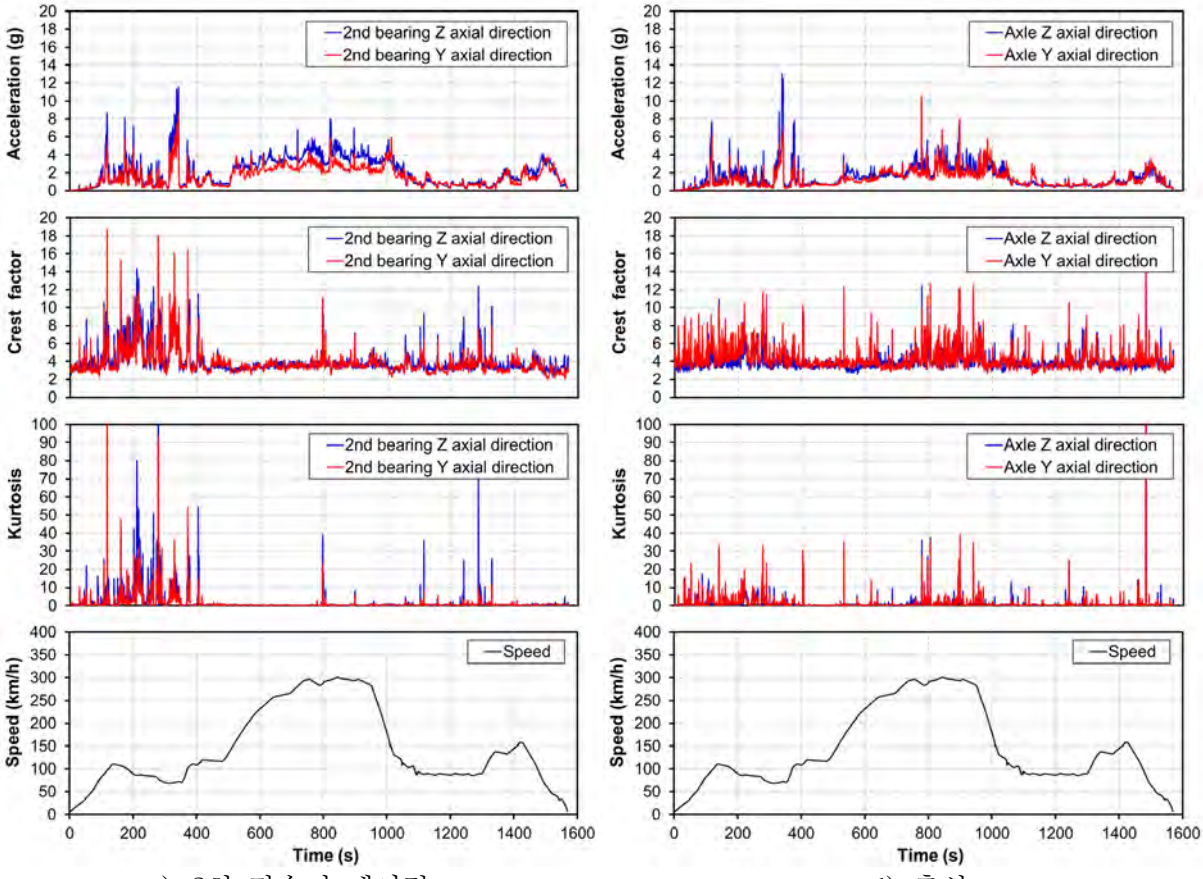
그림 2.4.52 익산역-서대전역 감속기 시간영역 진동특성분석




a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스

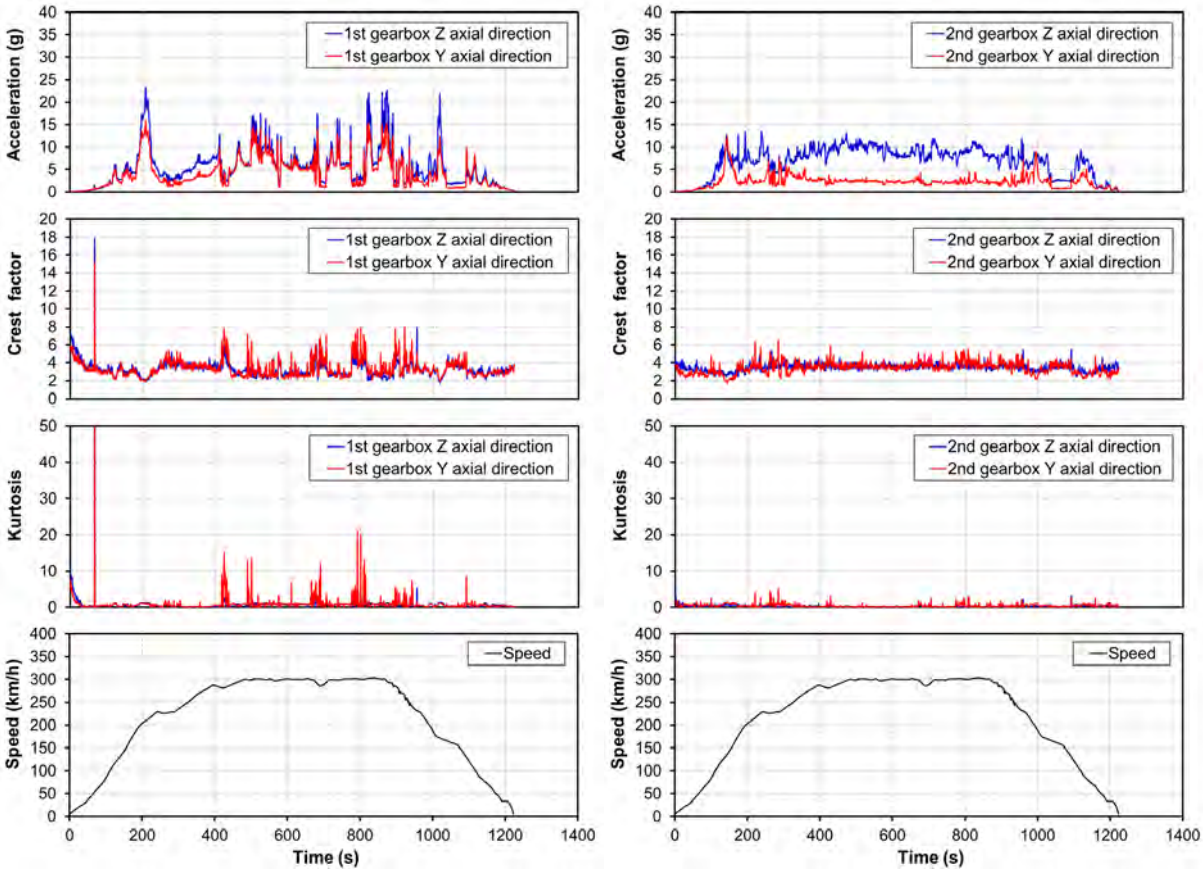



c) 2차 감속기 베어링




d) 축상

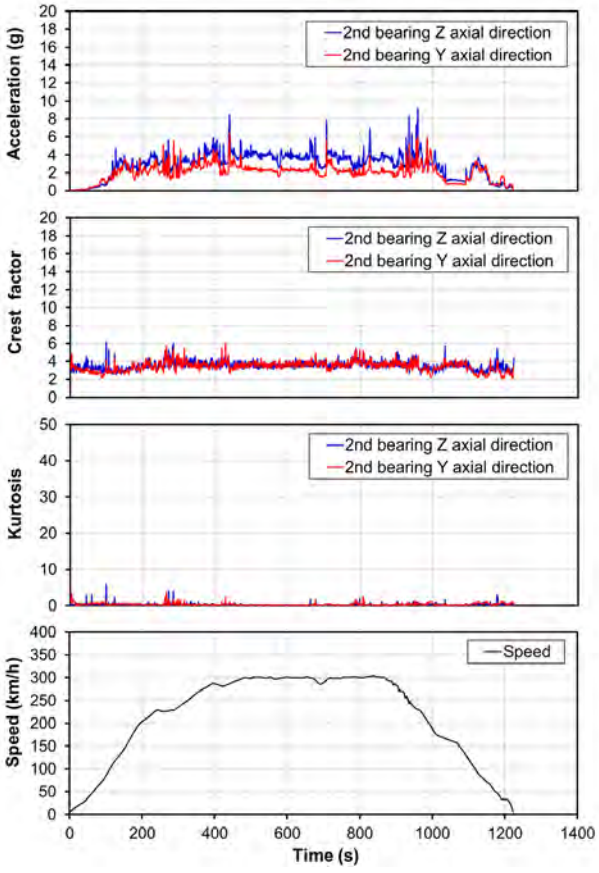
그림 2.4.53 서대전역-천안아산역 감속기 시간영역 진동특성분석



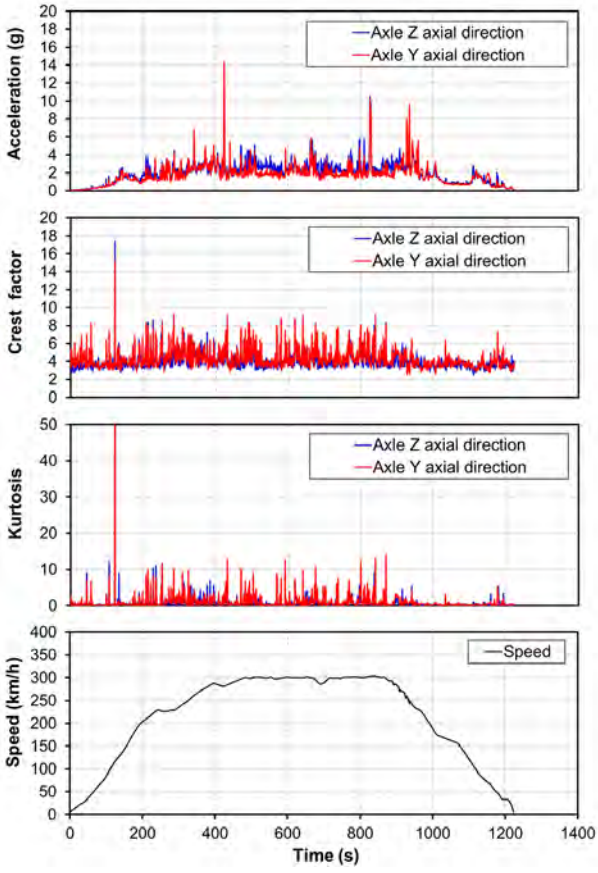

a) 1차 감속기 기어박스




b) 2차 감속기 기어박스



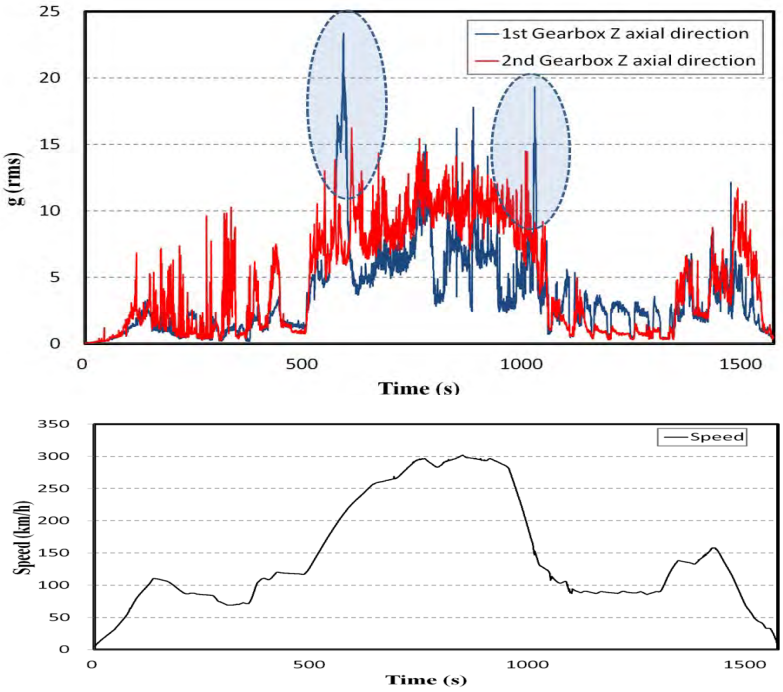

c) 2차 감속기 베어링



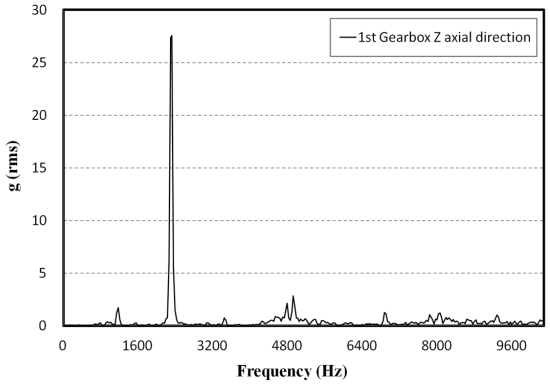

d) 축상

그림 2.4.54 천안아산역-광명역 감속기 시간영역 진동특성분석

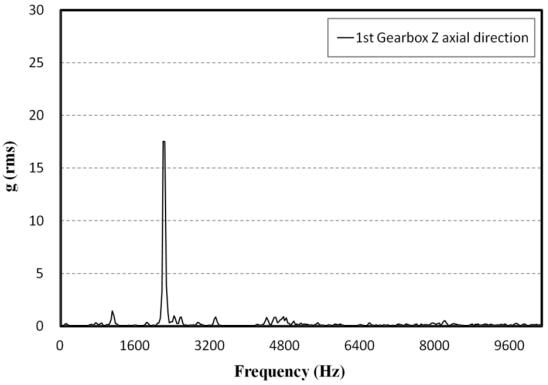
그림 2.4.55는 고속선 서대전-천안아산 주행시 1차 감속기의 진동이 급격히 커지는 부분을 주파수 분석한 결과이다. 그림 2.4.55 a)에서 가속시 (590초 위치) 1차 감속기의 진동이 커지는 부분의 차량속도는 225 km/h 이고, 그림 2.4.55 b) 에서 이 때 주파수는 1, 2차 성분이 1,152, 2,304 Hz 이다. 2차 주파수 성분이 크게 나타나고 있으며, 차축 회전수는 21.6 Hz, 모터회전 주파수는 47.4 Hz, 1차감속기 맞물림 주파수는 1,281 Hz, 2차 감속기 맞물림 주파수는 1,104 Hz 이다. 피크로 나타나는 2차 주파수 성분과 정확하게 일치하는 특정 주파수가 없다. 그림 2.4.55 a)에서 감속시 (1026초 위치) 1차 감속기의 진동이 커지는 부분의 차량속도는 129.5 km/h 이고, 그림 2.4.55 c) 의 주파수분석 결과에서 이 때의 피크 주파수는 1, 2차 성분이 1,088, 2,176 Hz 이다. 2차 주파수 성분이 크게 나타나고 있으며, 차축 회전수는 12.5 Hz, 모터회전 주파수는 27.3 Hz, 1차감속기 맞물림 주파수는 737 Hz, 2차 감속기 맞물림 주파수는 636 Hz 이다. 이와 같이 피크로 나타나는 2차 주파수 성분과 정확하게 일치하는 특징 주파수가 없다.




a) 1, 2차 감속기 상하방향 진동



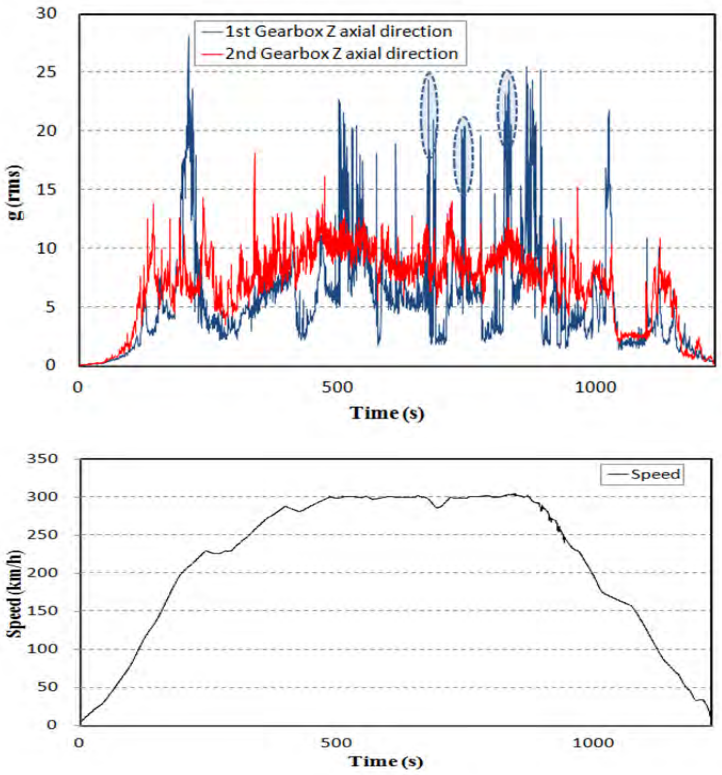

b) 가속시 피크영역 주파수 분석



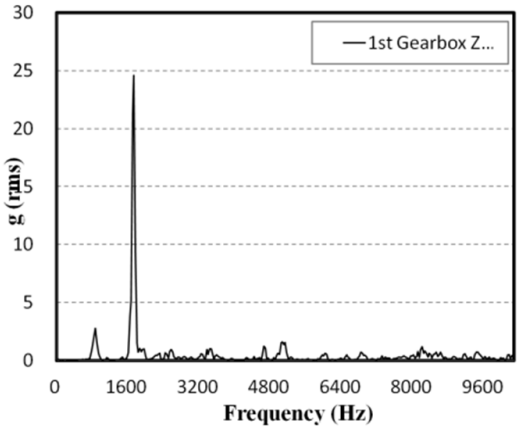

c) 감속시 피크영역 주파수 분석

그림 2.4.55 서대전-천안아산역 감속기 진동특성분석

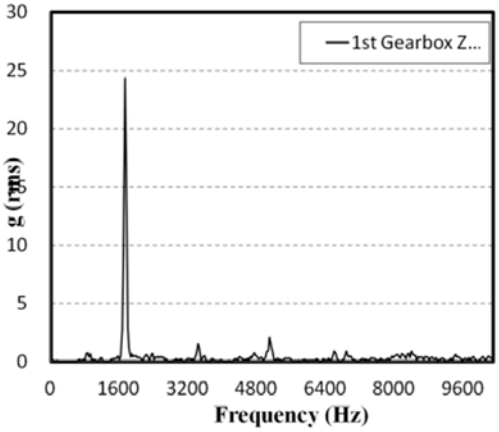
그림 2.4.56은 고속선 천안아산-광명 구간을 고속 주행시 1차 감속기의 진동이 급격히 커지는 부분을 주파수 분석한 결과이다. 그림 2.4.56 a)에서 고속 주행시 (673초 위치) 1차 감속기의 진동이 커지는 첫 번째 부분의 차량속도는 298 km/h 이고, 그림 3.3.58 (b) 에서 이 때의 피크 주파수는 1,696 Hz 이다. 이 때의 차축 회전수는 28.6 Hz, 모터회전 주파수는 62.8 Hz, 1차감속기 맞물림 주파수는 1,696 Hz, 2차 감속기 맞물림 주파수는 1,462 Hz 이다. 피크로 나타나는 주파수 성분과 거의 일치하는 주파수 성분은 1차감속기 맞물림 주파수이며, 모터와 1차감속기의 구동에 의한 것으로 판단된다. 그림 2.4.56 a)에서 고속 주행시 (약 740초 위치) 1차 감속기의 진동이 커지는 두 번째 부분의 차량속도도 298 km/h 이고, 그림 2.4.56 c) 의 주파수분석 결과에서 이때의 피크 주파수는 1,728 Hz 이다. 피크로 나타나는 주파수 성분과 거의 일치하는 주파수 성분은 위의 경우와 같이 1차감속기 맞물림 주파수이다.




a) 1, 2차 감속기 상하방향 진동




b) 첫번째 피크영역 주파수 분석




c) 두번째 피크영역 주파수 분석

그림 2.4.56 천안아산-광명역 감속기 진동특성분석

(4) 고속열차용 감속기 첨도 및 파고율 진단 적용성 검토

KTX에 대하여 경부선과 호남선에 대하여 파고율 및 첨도가 높게 나타나는 부분(파고율 5 이상, 첨도 3 이상)을 분석하여 그림 2.4.57과 2.4.58에 나타냈다. KTX의 경우에 고속구간인 경부선보다 저속구간인 호남선에서 파고율 및 첨도가 높게 나타나는 부분이 많았다. 고속구간에서 파고율 및 첨도가 높게 나타나는 부분에 대한 최대 지속시간은 2차 감속기의 파고율에서 3초로 나타났으며, 저속구간인 호남선에서의 최대 지속시간은 2차 감속기의 파고율 및 첨도에서 7초로 나타났다. 실차에서는 궤도 및 분기기 등 외부 조건에 의하여 진동이 커질 수 있으며, 대차 불안정 센서의 경우, 270km/h 이상에서 일정 가속도를 초과하는 값이 5초간 지속되는 것을 기준으로 하고 있다. KTX 감속기의 경우도 지속시간을 기준으로 하거나 일정값 이상을 초과하는 확률을 기준으로 하면 첨도 및 파고율을 진단에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

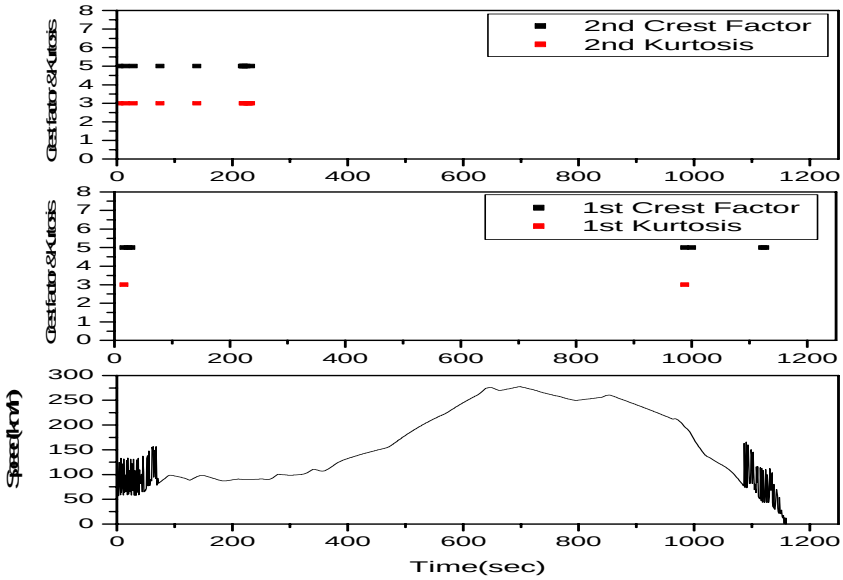



그림 2.4.57 KTX 부산-울산 구간 감속기 파고율 및 첨도 분석

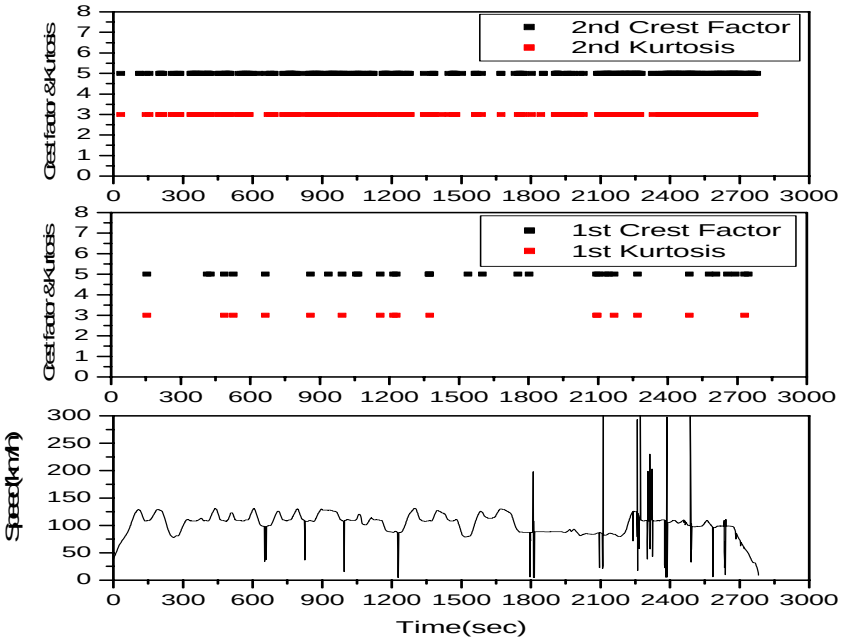



그림 2.4.58 KTX 익산-서대전 구간 감속기 진단기준 초과값

다. KTX-산천 감속기

(1) KTX-산천 감속기 현차시험 및 분석

(가) 목적

고속열차(KTX-산천) 감속기의 정상상태 진동특성을 파악하는 것이다. 실차에 대한 감속기 진동에 대한 시간영역 분석과 주파수영역 대한 분석을 실시함으로써, 감속기 진동진단의 적절한 분석방법을 파악하기 위함이다.

(나) 측정개요

측정대상은 KTX-산천 TC2의 동력객차부분에 위치한 감속기를 대상으로 측정을 실시하였으며, 감속기의 진동데이터와 고속열차(KTX-산천)의 속도데이터를 기록하기 위해 감속기에 가속도 센서 부착하고 차륜주변에 속도센서를 부착하였다. 부착된 센서의 위치 및 센서의 측정위치 및 방향은 아래 표 2.4.11과 같으며, 자세한 센서의 부착위치와 차량의 속도를 측정하기 위한 속도센서의 위치를 아래 그림 2.4.59와 그림 2.4.60에 나타내었다. 측정구간은 고속선로 중 경부선을 대상으로 서울역-부산역 1왕복측정을 하였으며, 역 정보 및 터널 통과시의 정보 등을 얻기 위해 각각의 구간에 대한 표시신호를 같이 입력하여 기록하였다.

표 2.4.11 측정위치 및 방향

| 측정대상 | 측정방향 |
|---|---|
| 1차 감속기 기어박스 (1st gearbox) | 상하방향 (Z axial direction) |
| | 좌우방향 (Y axial direction) |
| | 전후방향 (X axial direction) |
| 2차 감속기 기어박스 (2nd gearbox) | 상하방향 (Z axial direction) |
| | 좌우방향 (Y axial direction) |
| | 전후방향 (X axial direction) |
| 2차 감속기 베어링 (2nd bearing) | 상하방향 (Z axial direction) |
| | 좌우방향 (Y axial direction) |
| | 전후방향 (X axial direction) |
| 축상 (Axlebox) | 상하방향 (Z axial direction) |
| 대차(Bogie) | 상하방향 (Z axial direction) |

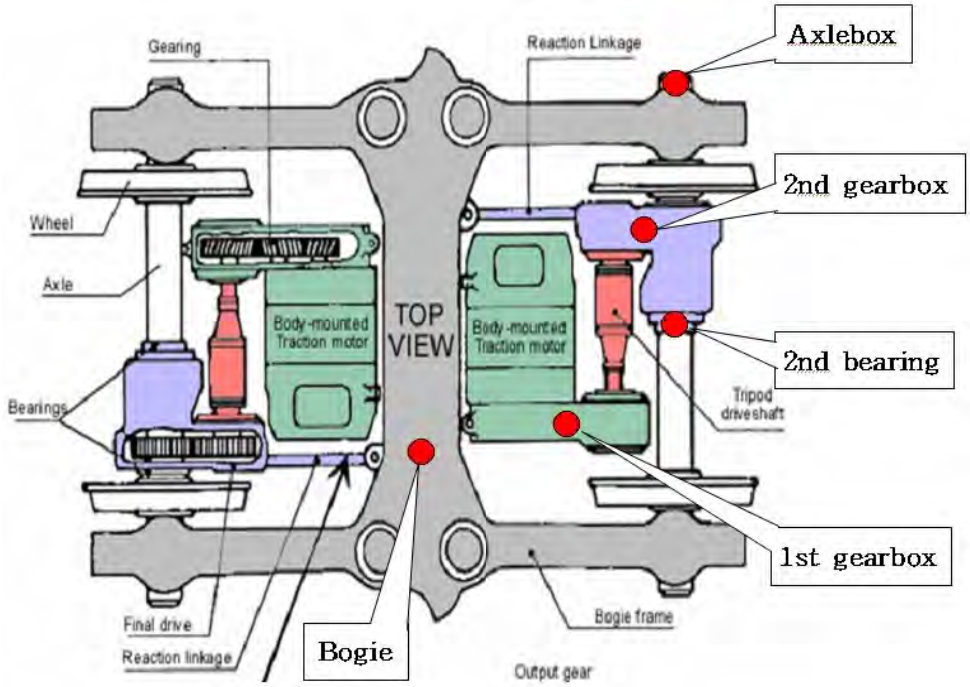



그림 2.4.59 가속도센서 부착도면




그림 2.4.60 가속도센서 및 속도센서 부착사진

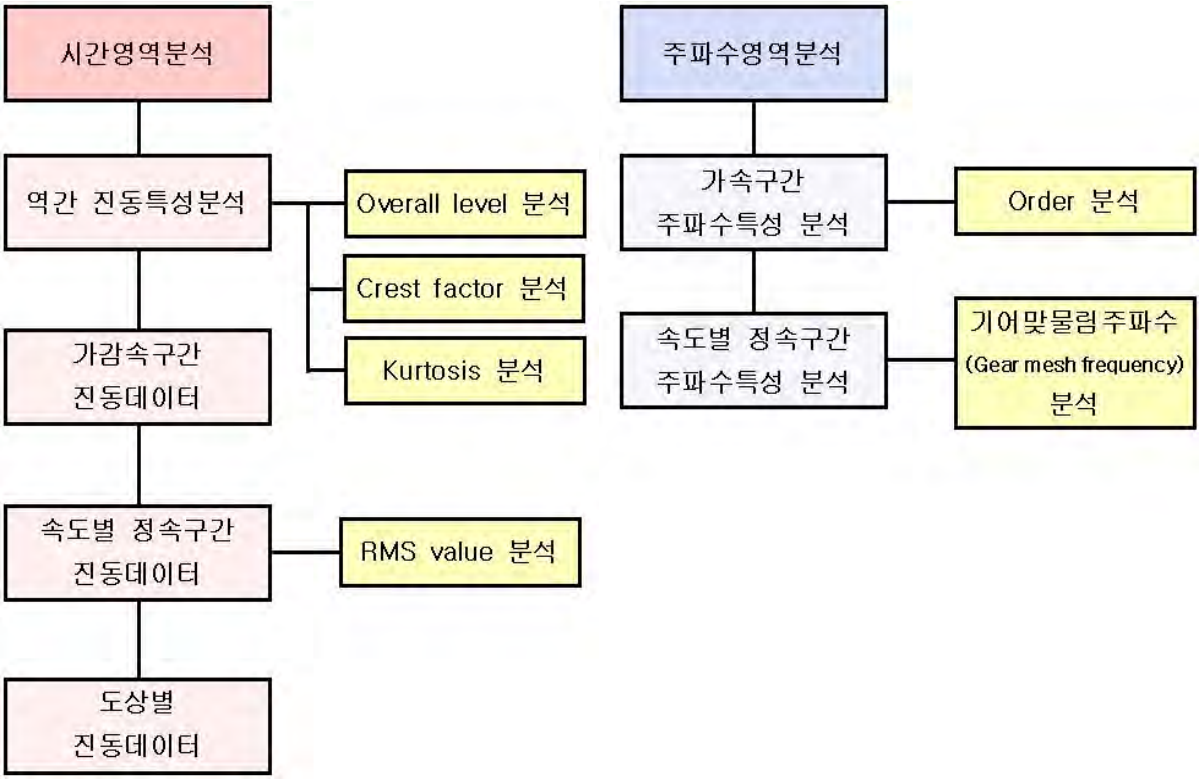



그림 2.4.61 고속열차(KTX-산천) 분석방법

(2) 분석방법

분석방법은 시간영역 분석과 주파수영역 분석으로 분류하여 분석하였으며, 고속열차(KTX-산천)에 적용된 자세한 분석방법은 다음 그림 2.4.61과 같다.

(3) 분석결과

(가) 시간영역 분석결과

① 진동특성 분석결과

각 역간에서 발생되는 진동레벨의 특성을 알아보기 위해 각 역의 주행상태의 가속도 진동레벨을 1초 단위로 샘플링한 데이터를 표시하였으며, 다음과 그림 2.4.62 ~ 2.4.73에 나타내었다. 각 역간별 발생되는 감속기와 감속기에 진동영향을 줄 수 있는 축상 및 대차의 진동레벨을 나타내었다. 그 결과 대차에서 발생되는 진동레벨을 제외하고 1차, 2차 감속기 기어박스 및 2차 감속기 베어링, 축상진동레벨은 속도에 따라 진동레벨이 변화하는 것을 알 수 있다. 이러한 속도에 따른 진동레벨의 변화는 2차 감속기 기어박스에서의 진동이 가장 큰 것으로 나타났다.

이러한 감속기의 진동레벨은 정상상태의 감속기를 대상으로 측정한 결과로써, 각 역간 운행 시 감속기에서 발생되는 진동레벨특성의 기준으로 적용할 수 있다.

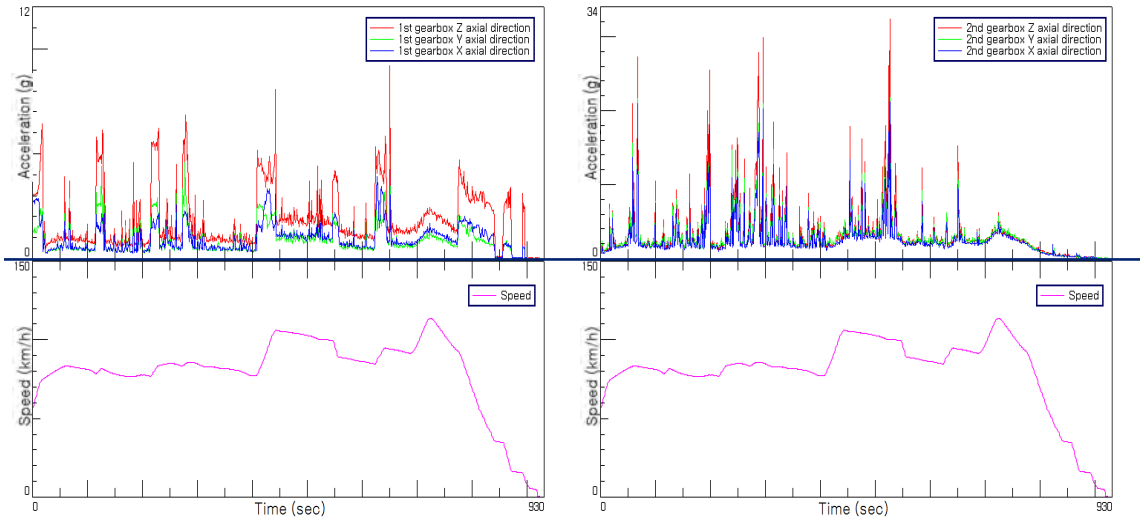



그림 2.4.62 서울역-광명역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석

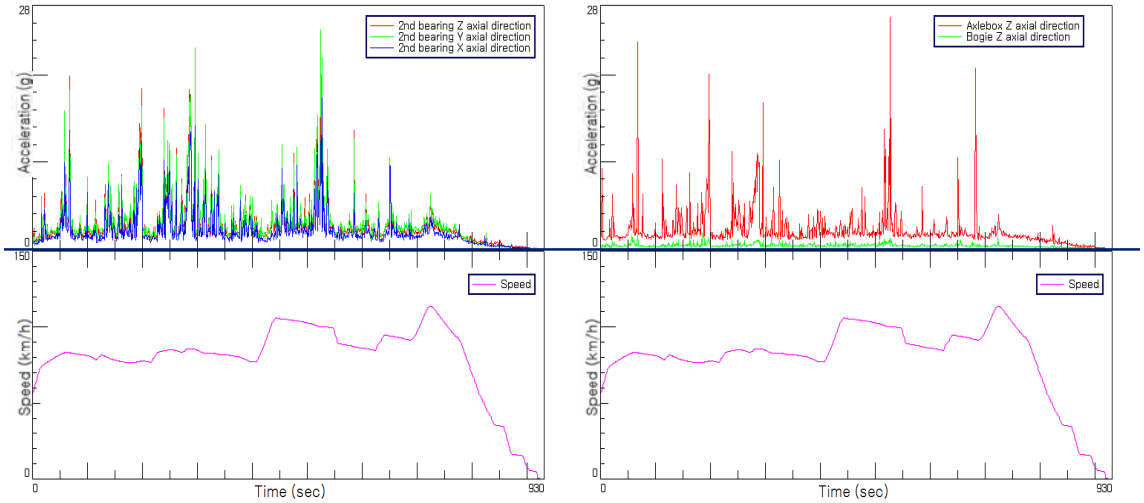



그림 2.4.63 서울역-광명역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석

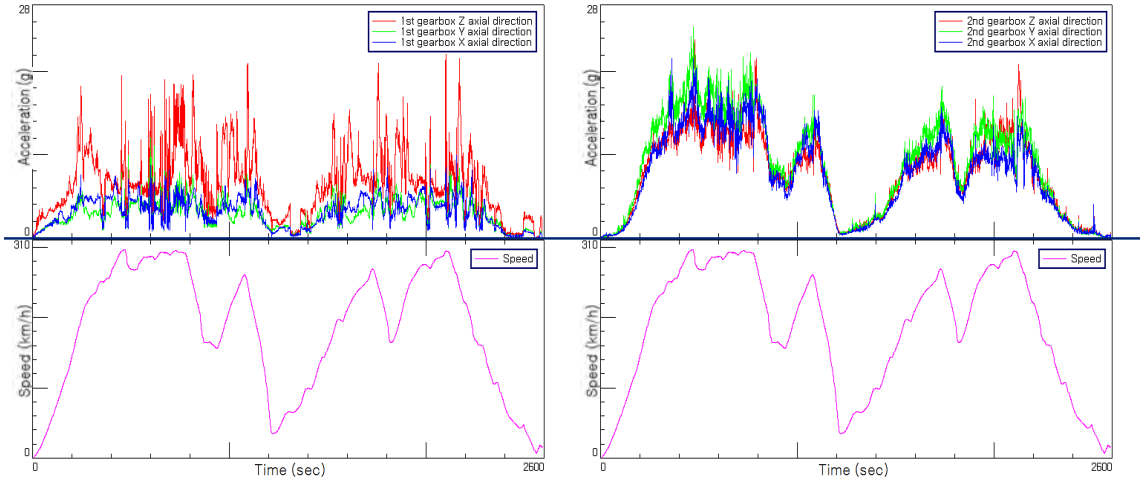



그림 2.4.64 광명역-대전역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석

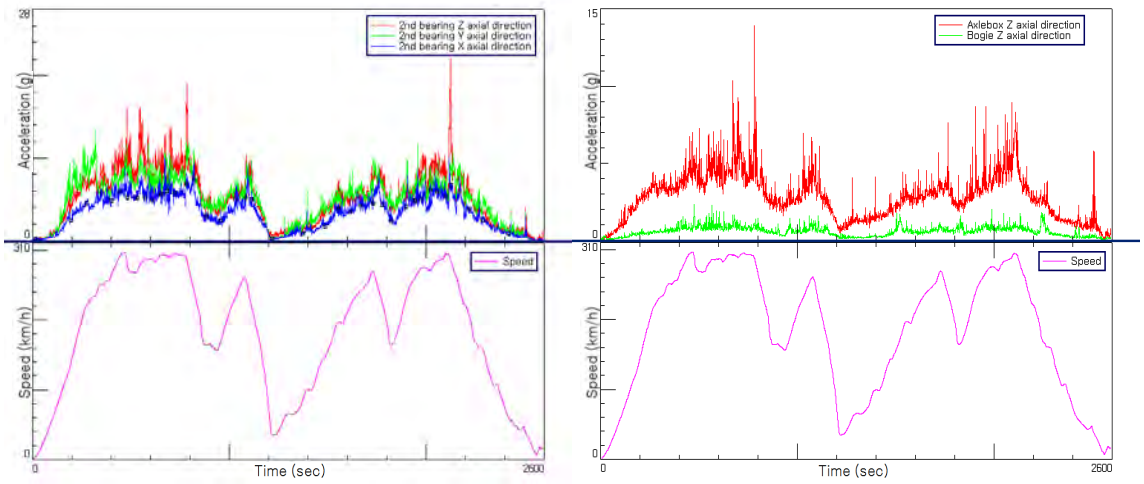



그림 2.4.65 광명역-대전역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석

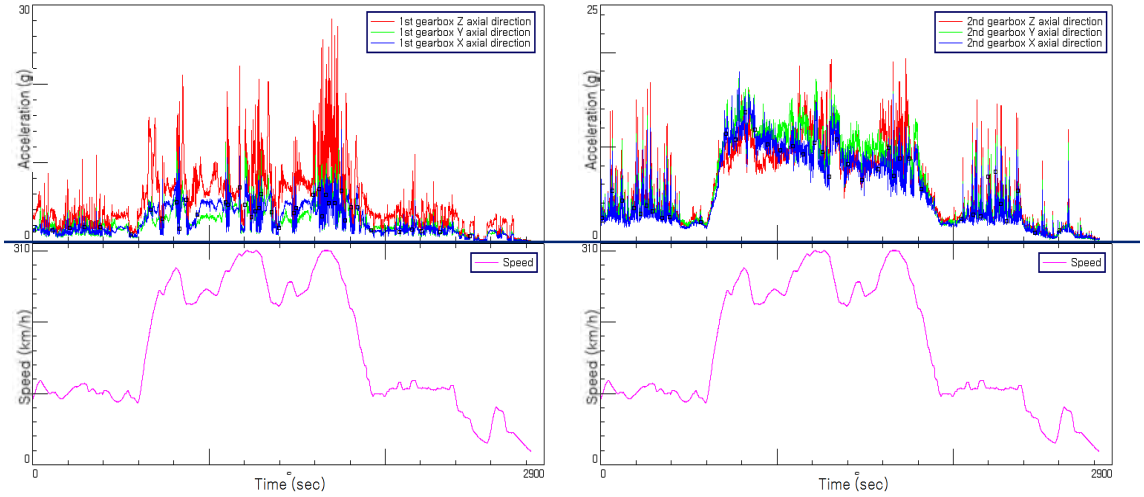



그림 2.4.66 대전역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석

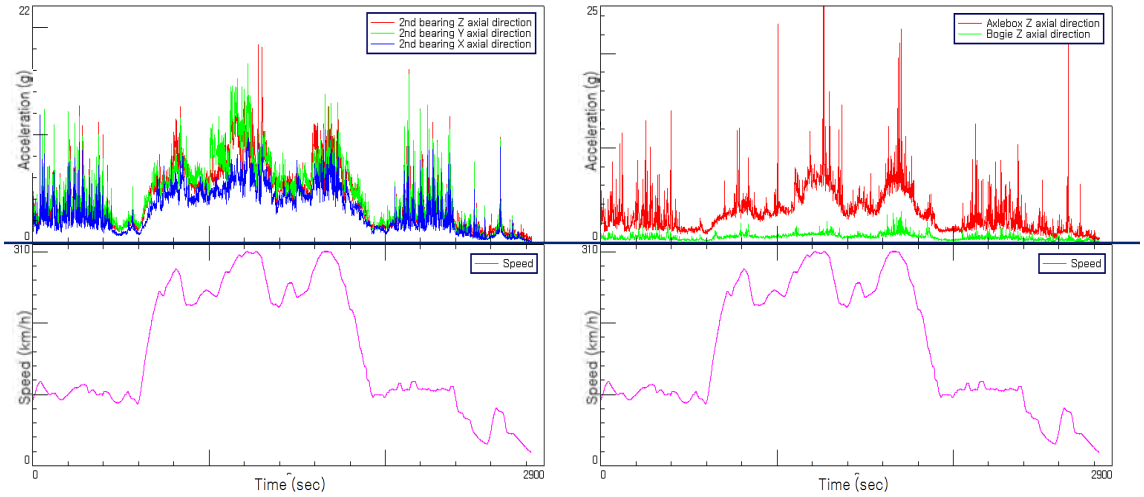



그림 2.4.67 대전역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석

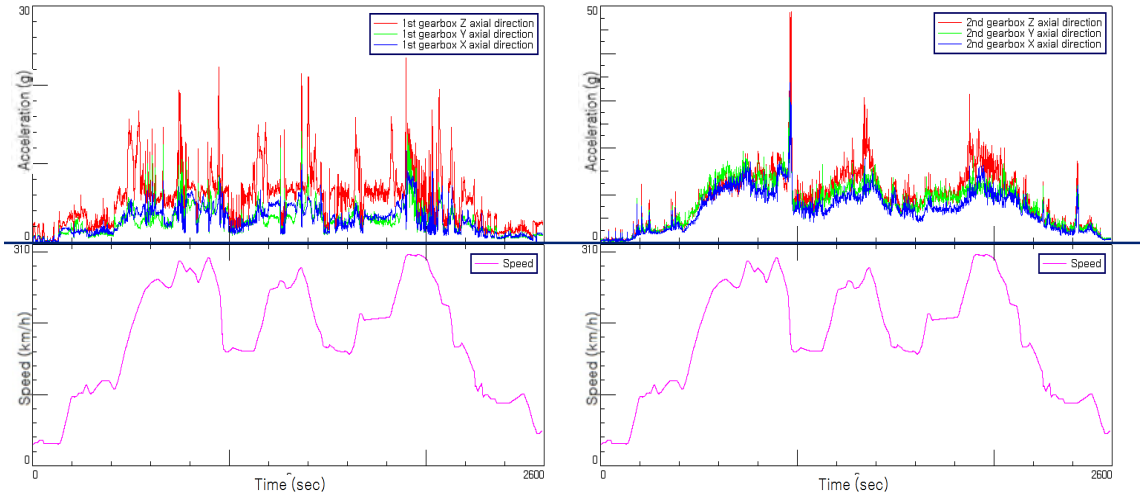



그림 2.4.68 동대구역-부산역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석

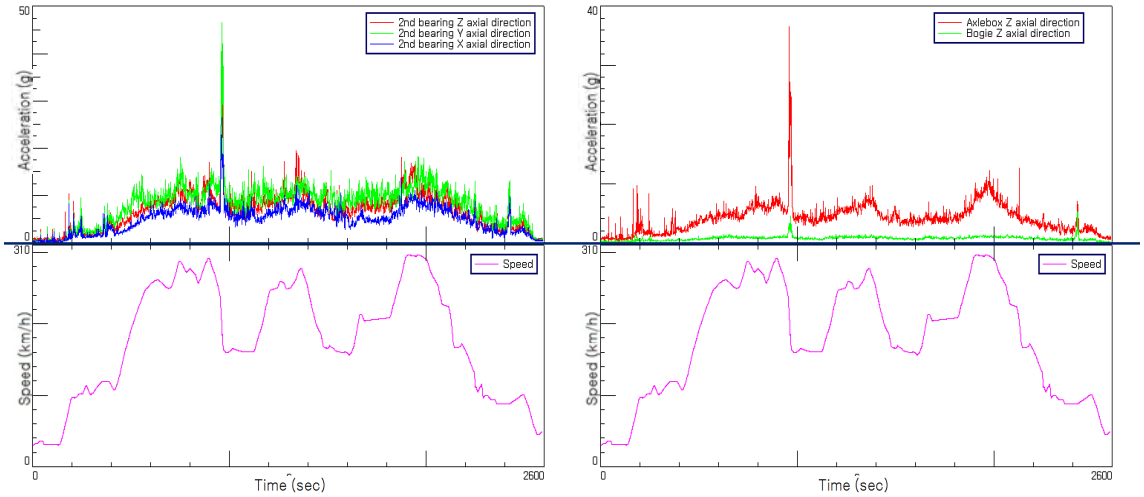



그림 2.4.69 동대구역-부산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석

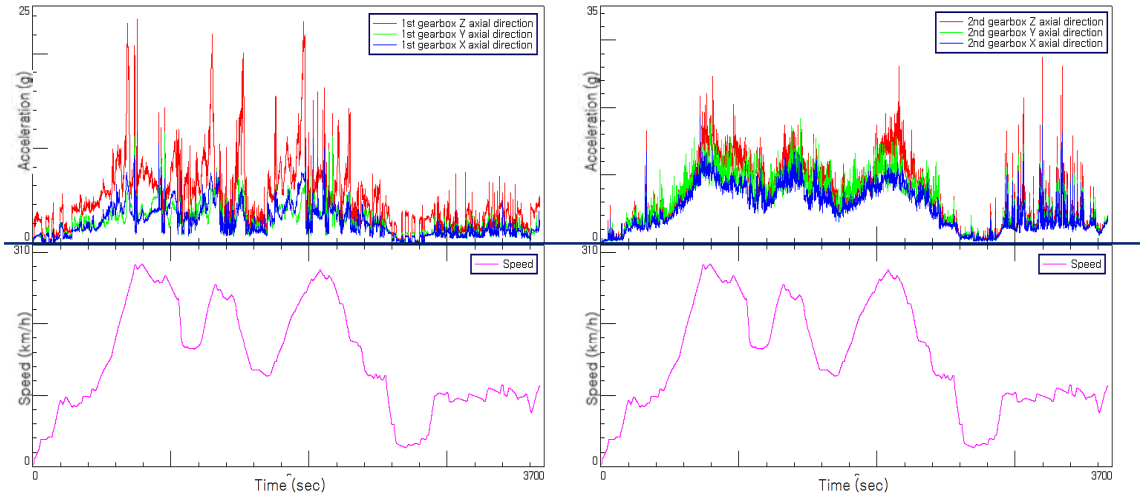



그림 2.4.70 부산역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석

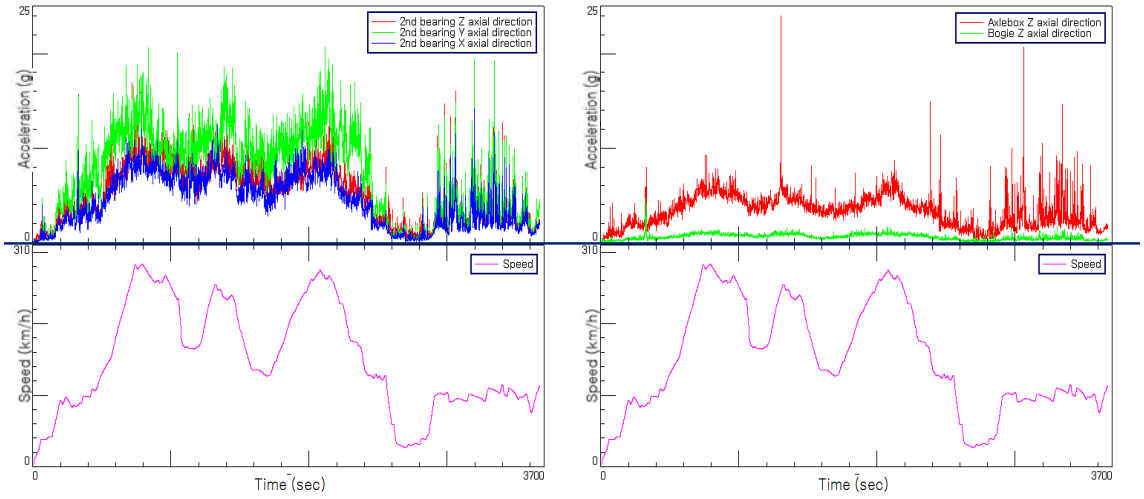



그림 2.4.71 부산역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석

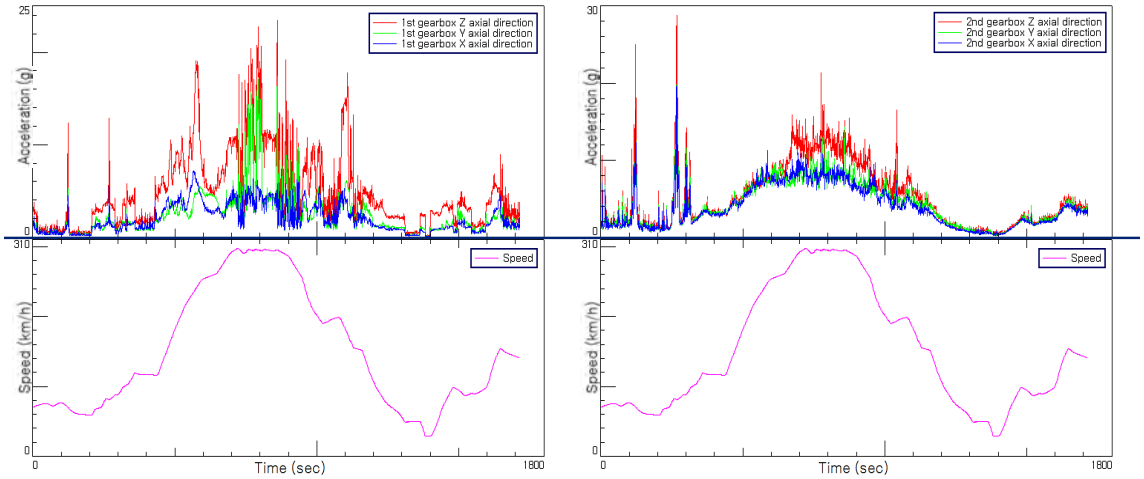



그림 2.4.72 대전역-천안아산역 1차, 2차 감속기 기어박스 진동레벨분석

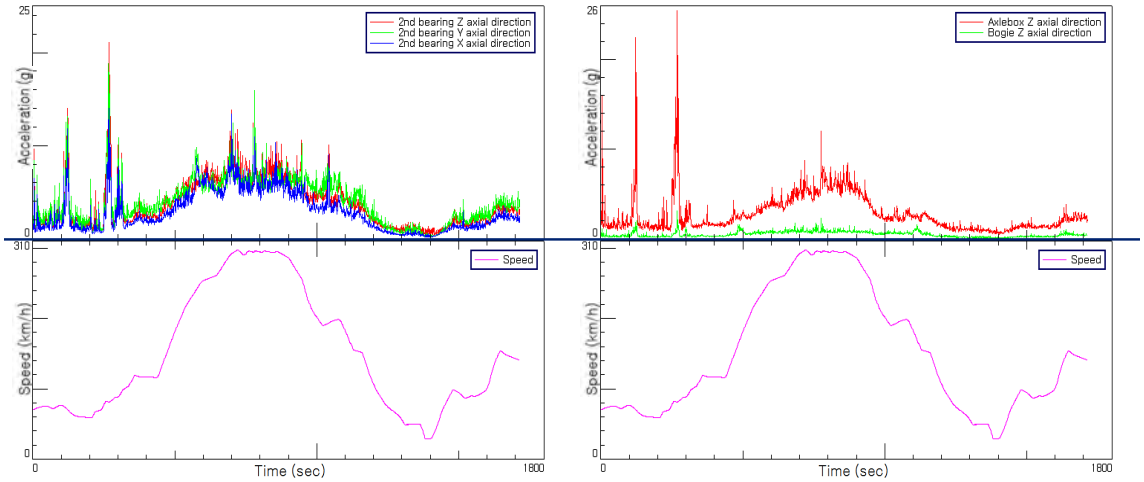



그림 2.4.73 대전역-천안아산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 진동레벨분석

② 파고율(Crest factor) 분석 결과

시간에 따른 기어의 이상상태를 파악하기 위해 사용되는 분석방법 중 미소국부결함의 검출 분석에 유용한 파고율 분석을 실시하였다. 파고율값을 나타내기 위한 적정 샘플링시간을 알아보기 위하여 다음 그림 2.4.74 ~ 2.4.78와 같이 비교분석을 실시하였다. 샘플링 시간을 다르게 해여 나타낸 결과 15초로 샘플링한 결과까지는 진동특성의 레벨의 변화가 일어나는 앞부분과 끝부분에서의 변화의 경향성을 파악할 수 있으나, 20초로 샘플링한 결과는 레벨변화가 눈에 띄게 나타나야하는 구간에서 변화의 경향성을 파악하기가 어려우며, 그 결과 15초 이하로 샘플링하는 것이 Crest factor 레벨의 변화를 알 수 있는 한계 샘플링이라고 표현할 수 있다.

그림 2.4.79 ~ 2.4.90은 각 역간 운행 시 15초로 샘플링한 Crest factor 레벨을 그래프로 나타내었다. 감속기 내 기어의 이상진단 판단을 위한 분석방법 중 정상상태의 감속기의 경부선 운행 시의 파고율을 분석한 결과 대전역-동대구역을 운행 중 1차 감속기에서 순간적으로 파고율값 7을 넘는 경우를 제외한 나머지 전 구간에서 열차의 운행 속도에 관계없이 평균적으로 3~4레벨의 경향성을 보이는 것으로 분석되었다.

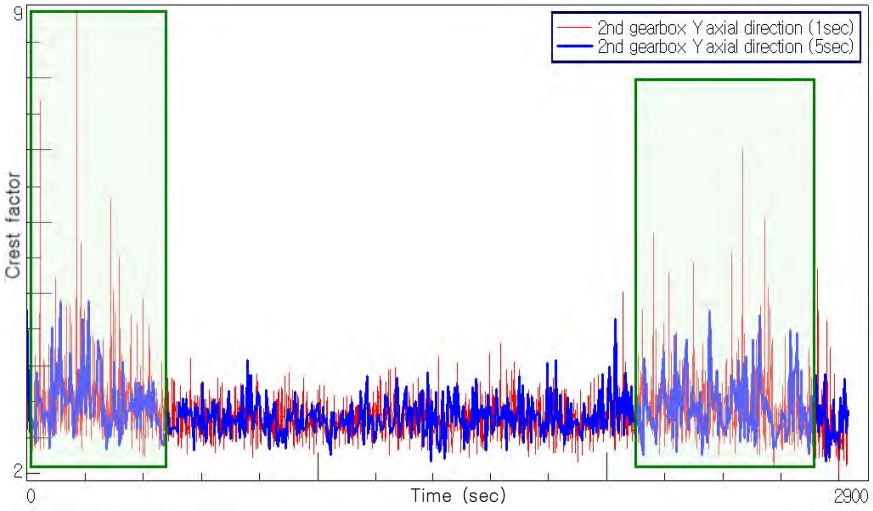



그림 2.4.74 1초 샘플링 시와 5초 샘플링 시 파고율 비교

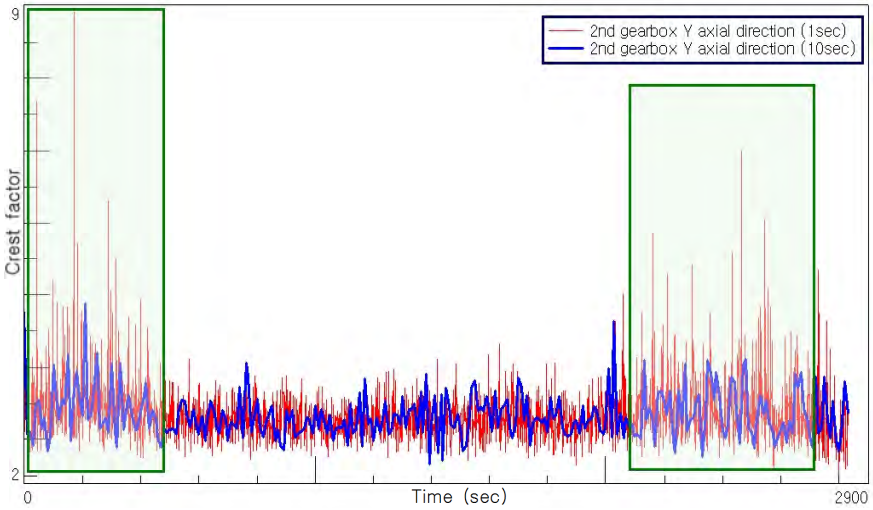



그림 2.4.75 1초 샘플링 시와 10초 샘플링 시 파고율 비교

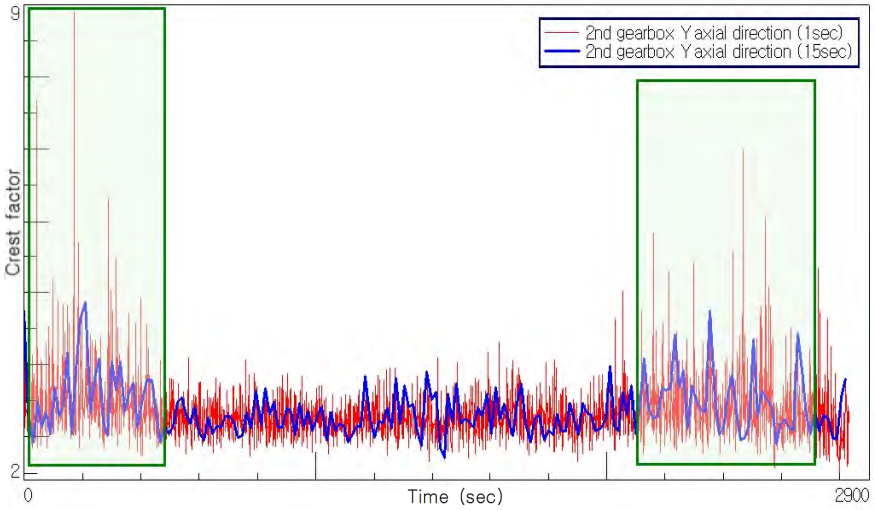



그림 2.4.76 1초 샘플링 시와 15초 샘플링 시 파고율 비교

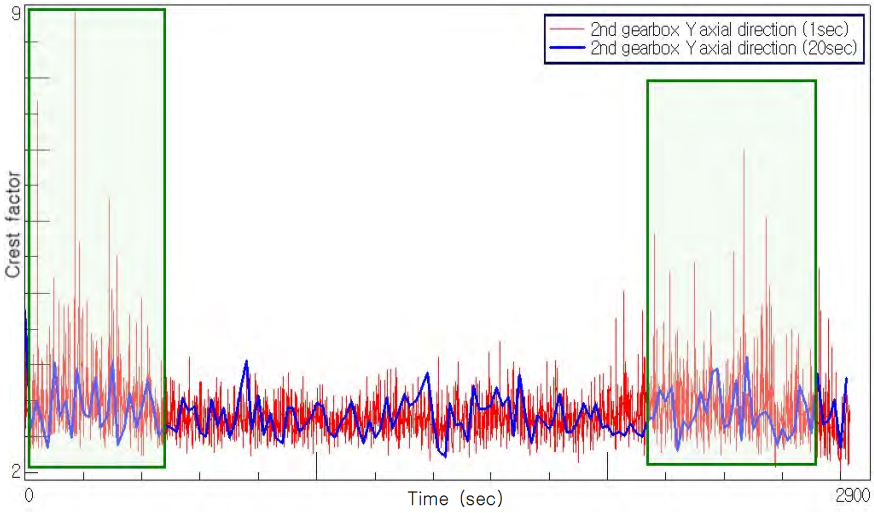



그림 2.4.77 1초 샘플링 시와 20초 샘플링 시 파고율 비교

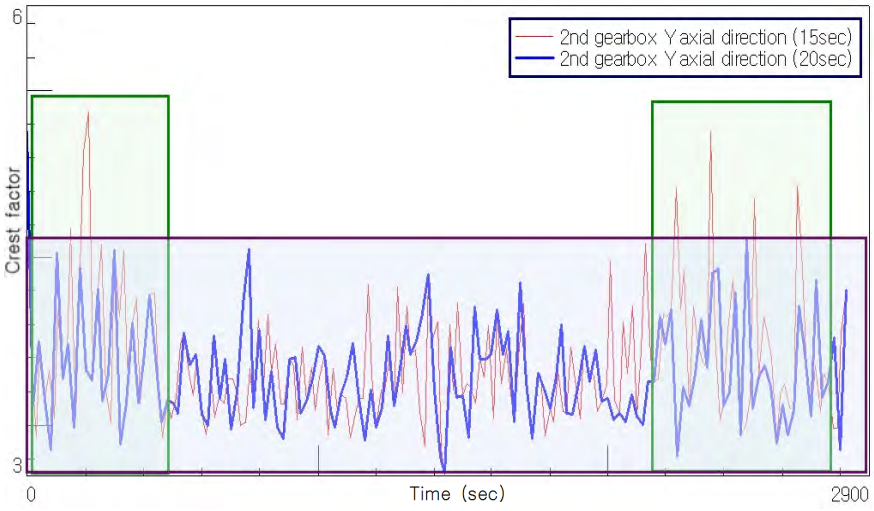



그림 2.4.78 15초 샘플링 시와 20초 샘프링 시 파고율 비교

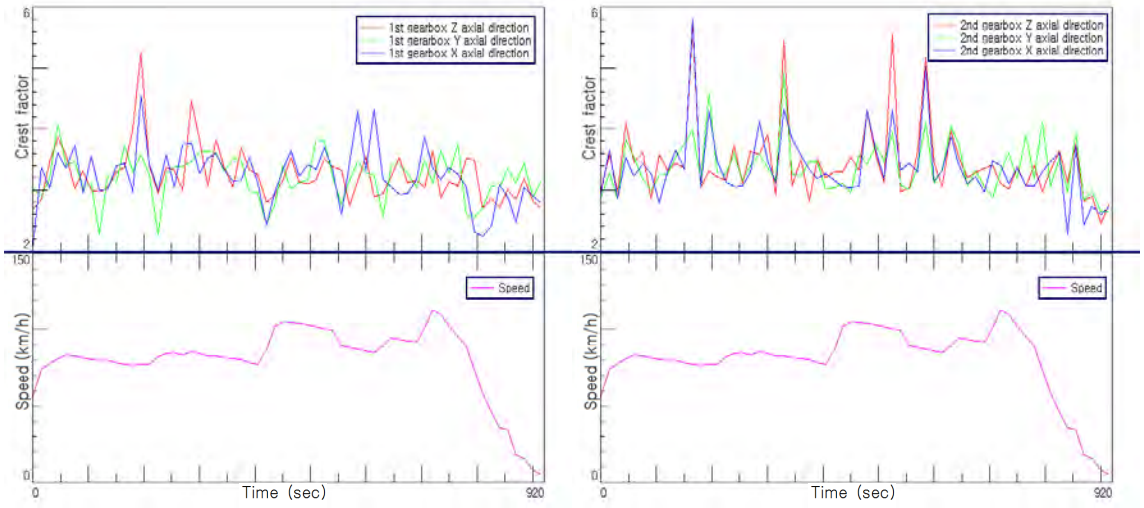



그림 2.4.79 서울역-광명역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석

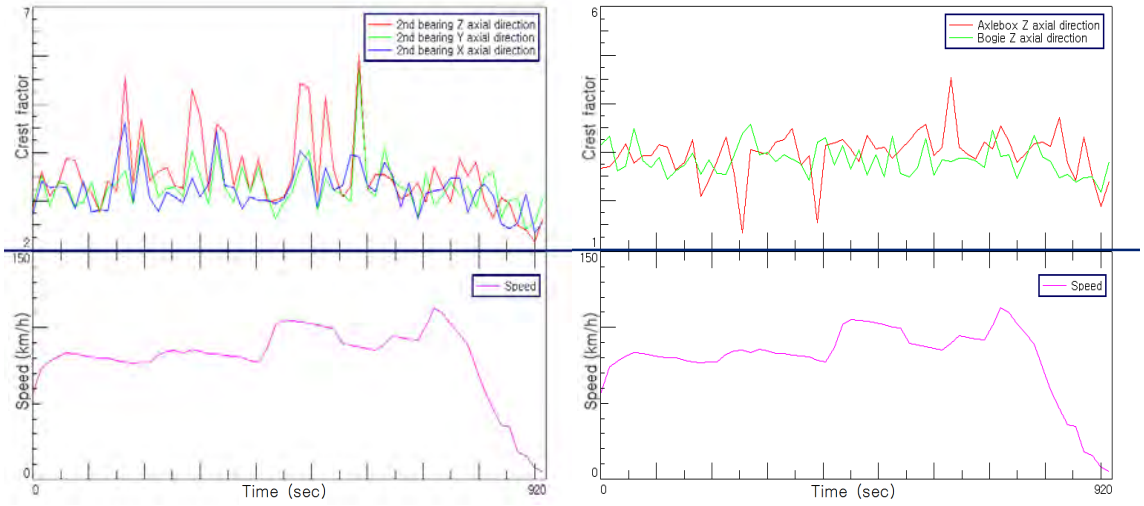



그림 2.4.80 서울역-광명역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석

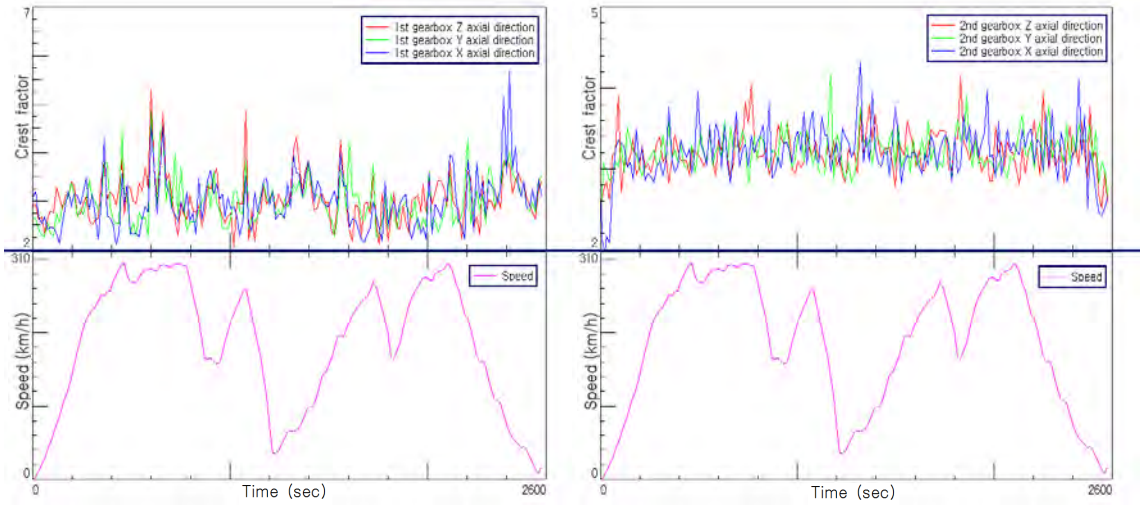



그림 2.4.81 광명역-대전역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석

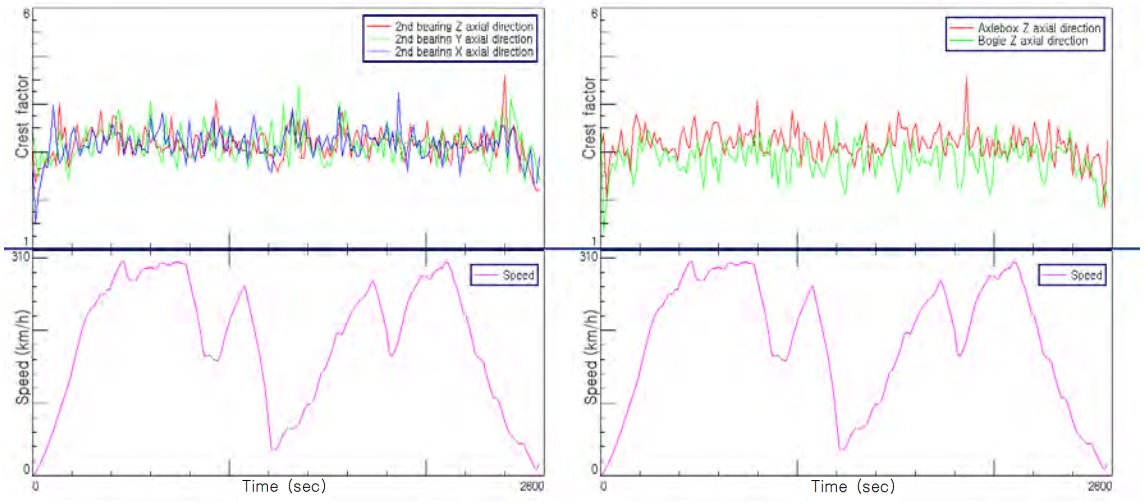



그림 2.4.82 광명역-대전역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석

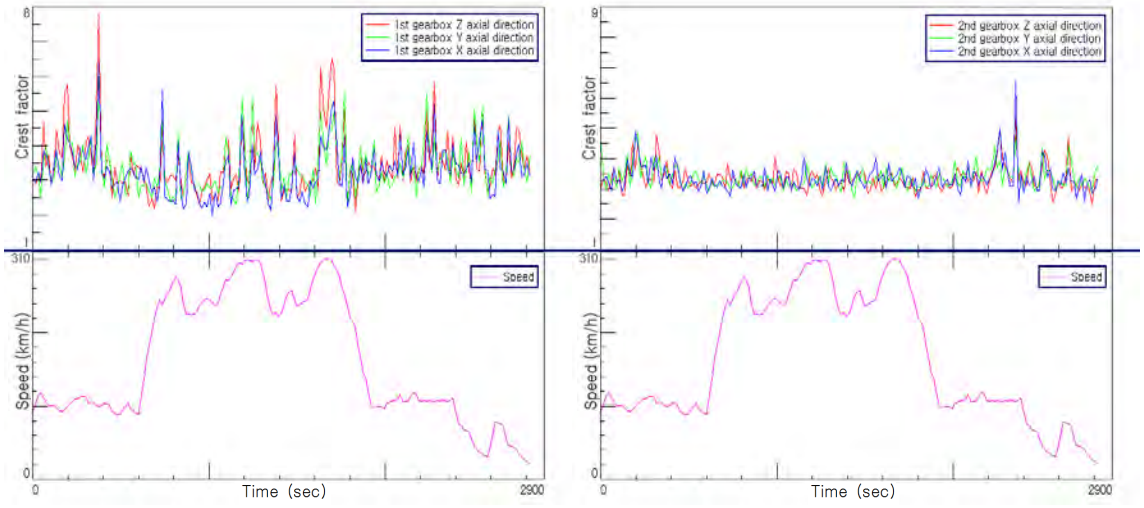



그림 2.4.83 대전역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석

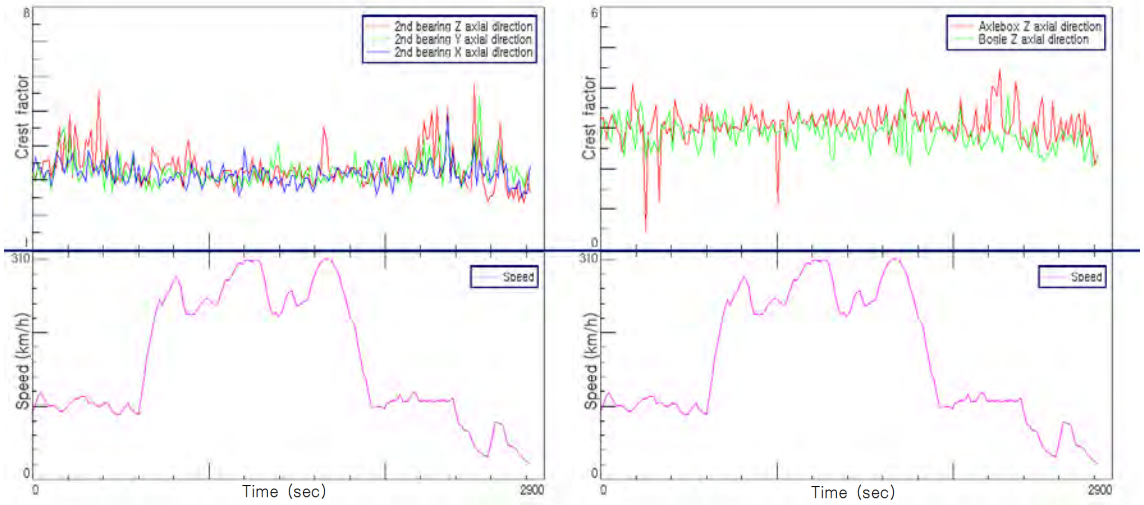



그림 2.4.84 대전역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석

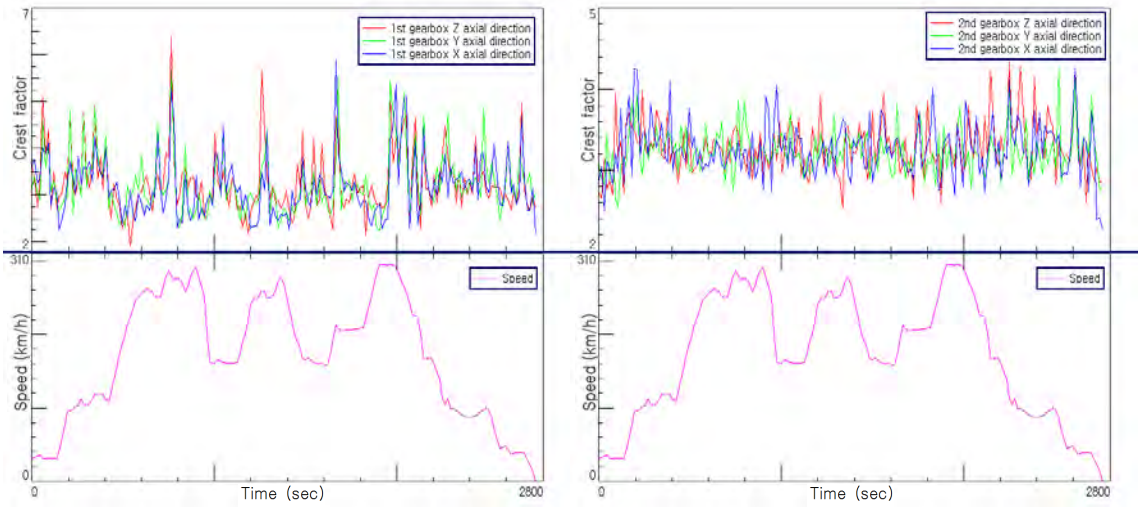



그림 2.4.85 동대구역-부산역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석

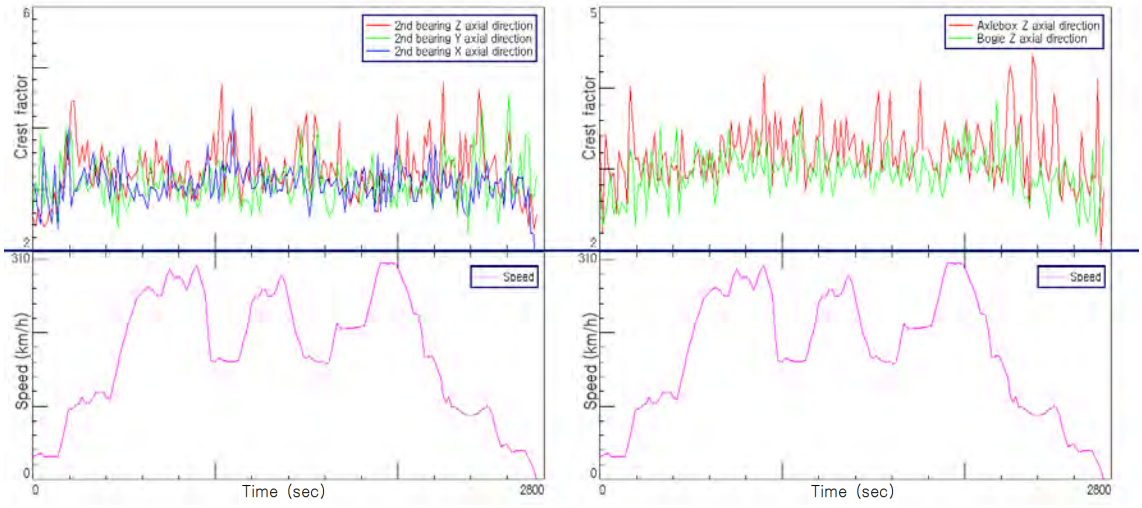



그림 2.4.86 동대구역-부산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석

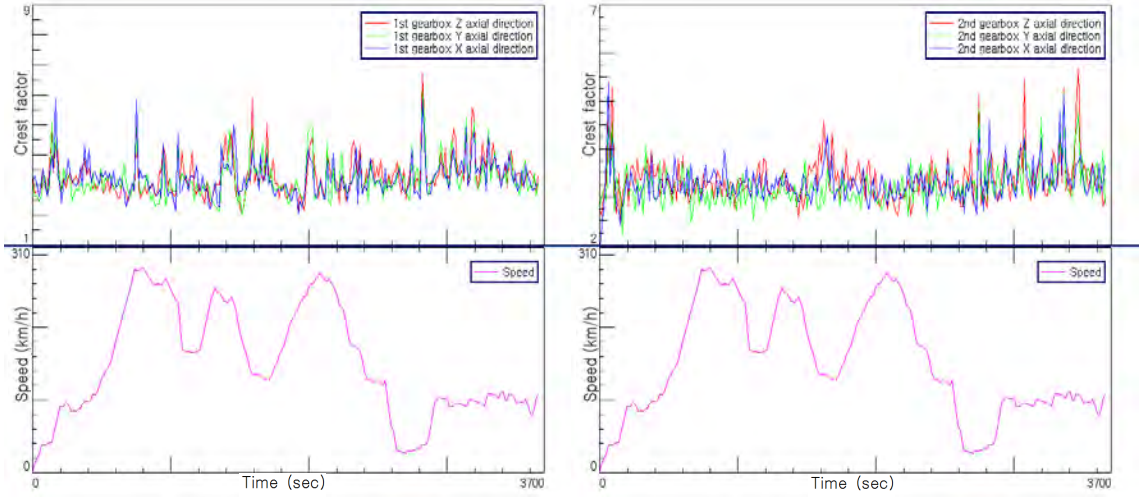



그림 2.4.87 부산역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석

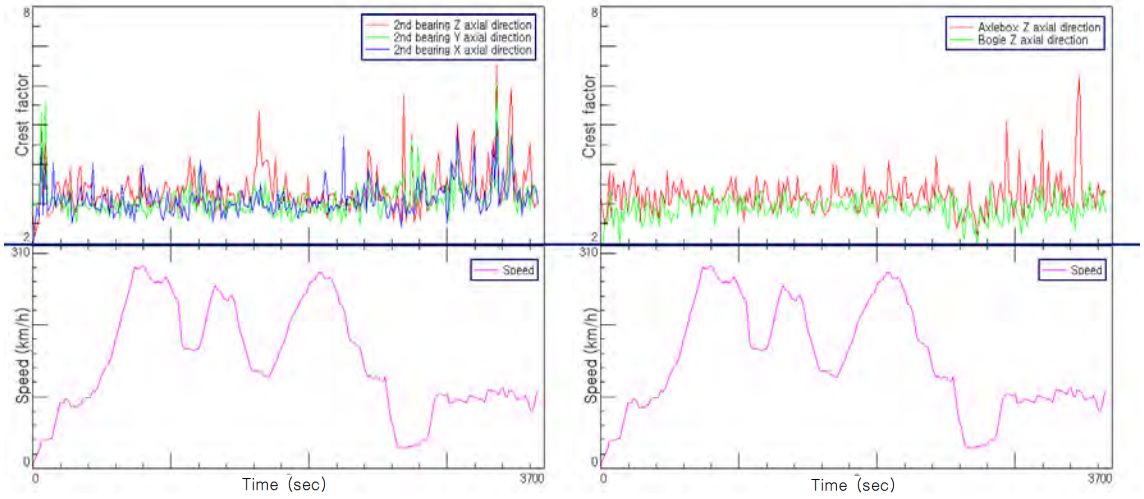



그림 2.4.88 부산역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석

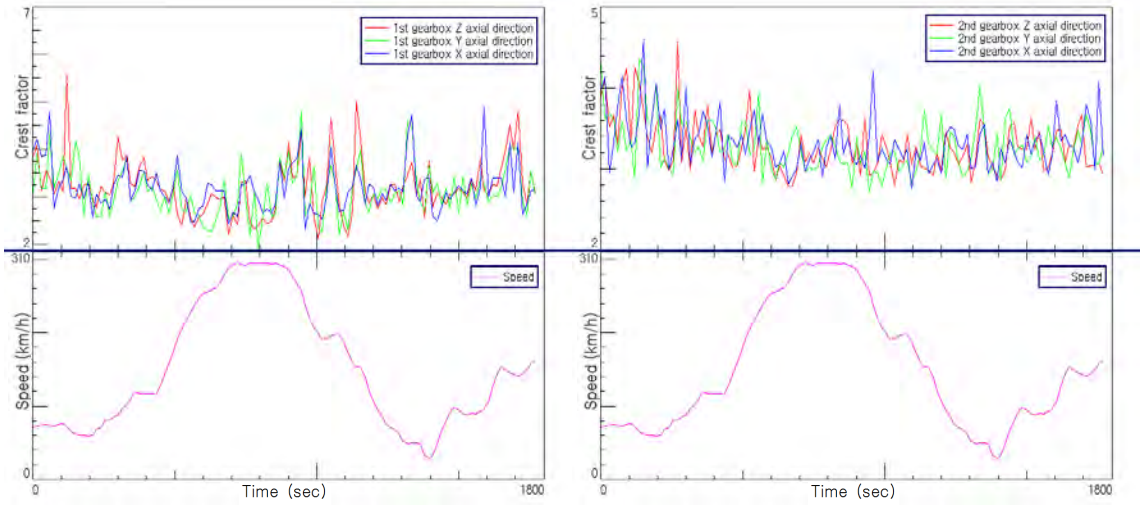



그림 2.4.89 대전역-천안아산역 1차, 2차 감속기 기어박스 파고율분석

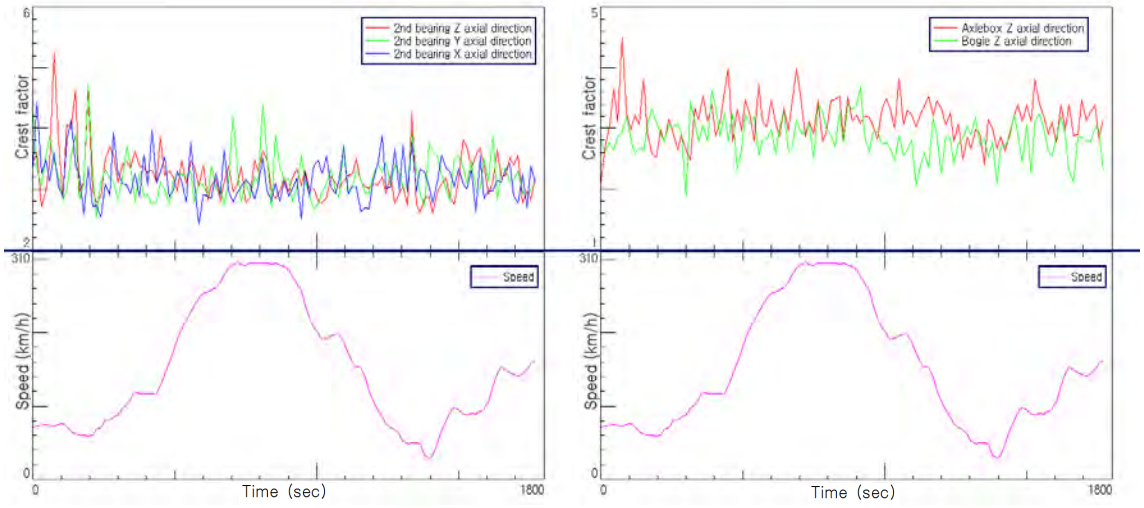



그림 2.4.90 대전역-천안아산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 파고율분석

③ 첨도(Kurtosis) 분석결과

파고율 분석결과와 마찬가지로 시간에 따른 기어의 이상상태를 파악하기 위해서 사용되는 분석방법 중 회전기의 진단에 주로 사용되는 Kurtosis 분석을 실시하였다. 파고율 분석과 마찬가지로 샘플링시간을 15초로 분석한 결과를 다음 그림 2.4.91 ~ 2.4.102와 같이 나타내었다. Kurtosis 분석결과 역시 속도에 관계없이 순간적으로 레벨이 올라가는 경우와 단시간 동안 레벨이 높게 나오는 경우를 제외하고 대부분 1이하의 레벨에서 경향성을 파악할 수 있다.

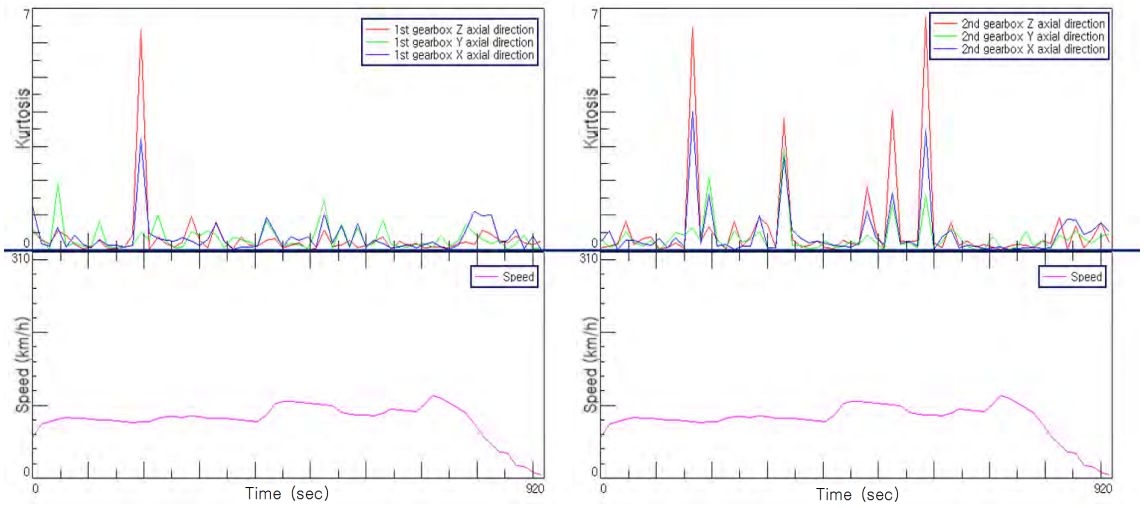



그림 2.4.91 서울역-광명역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석

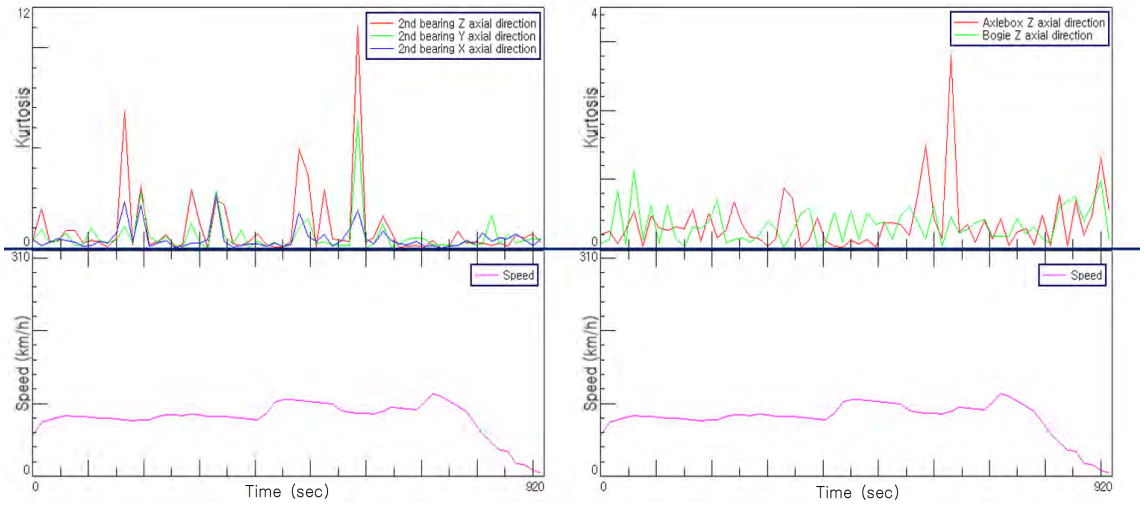



그림 2.4.92 서울역-광명역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석

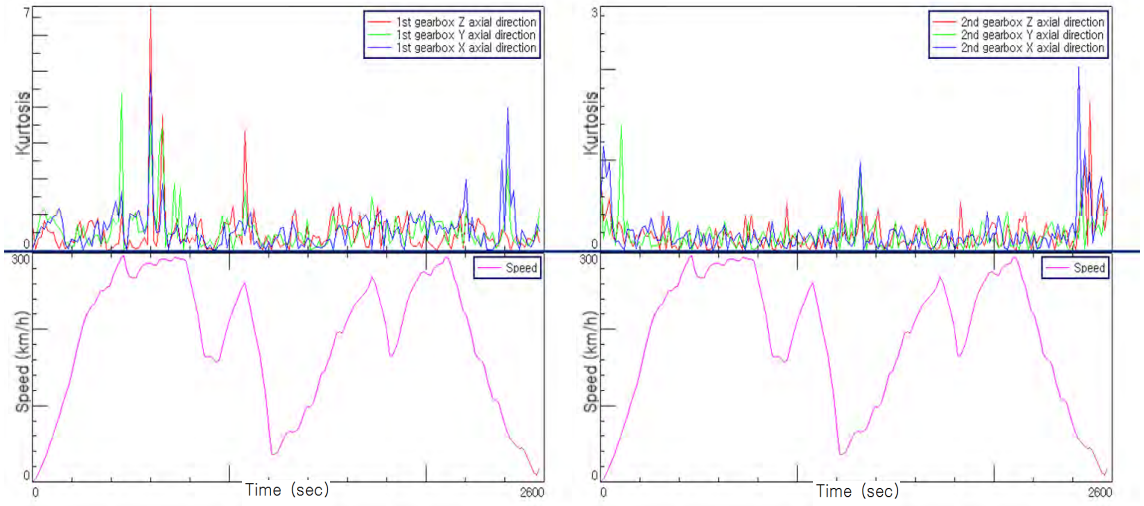



그림 2.4.93 광명역-대전역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석

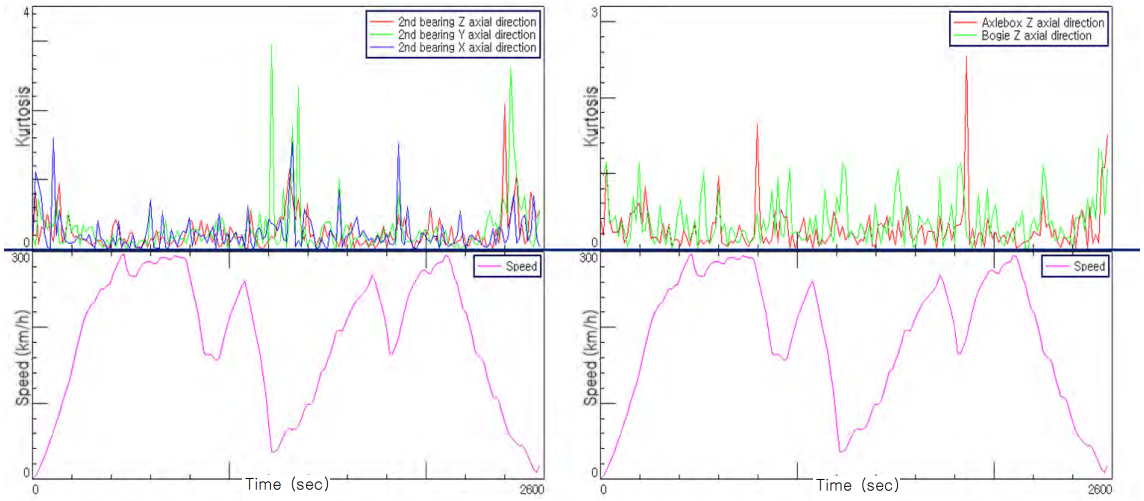



그림 2.4.94 광명역-대전역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석

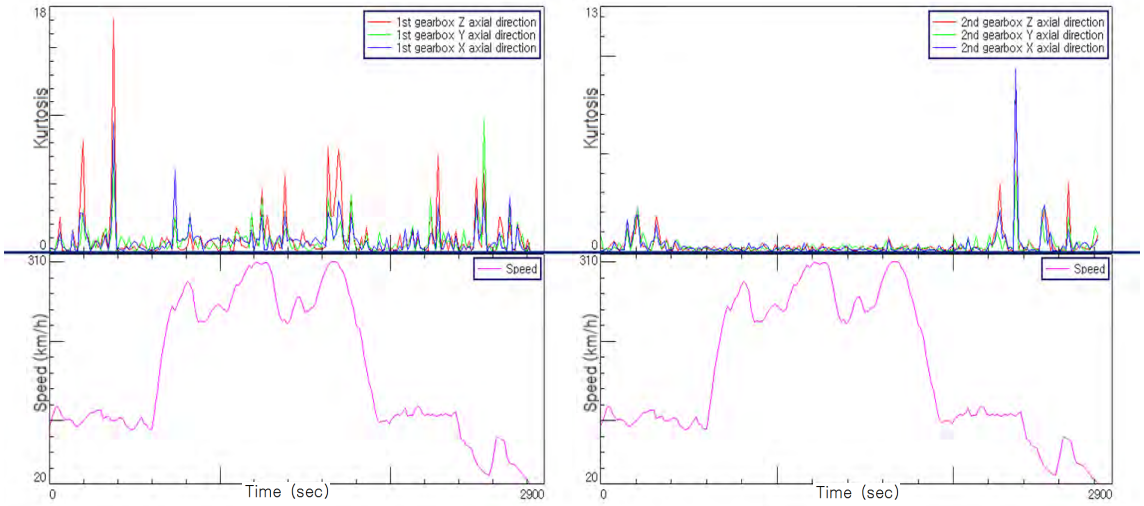



그림 2.4.95 대전역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석

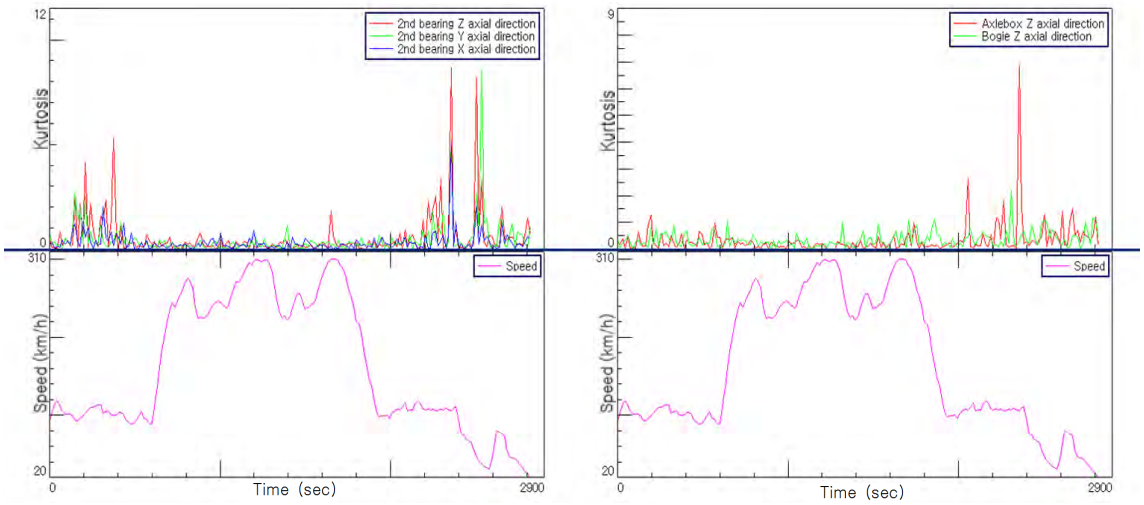



그림 2.4.96 대전역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석

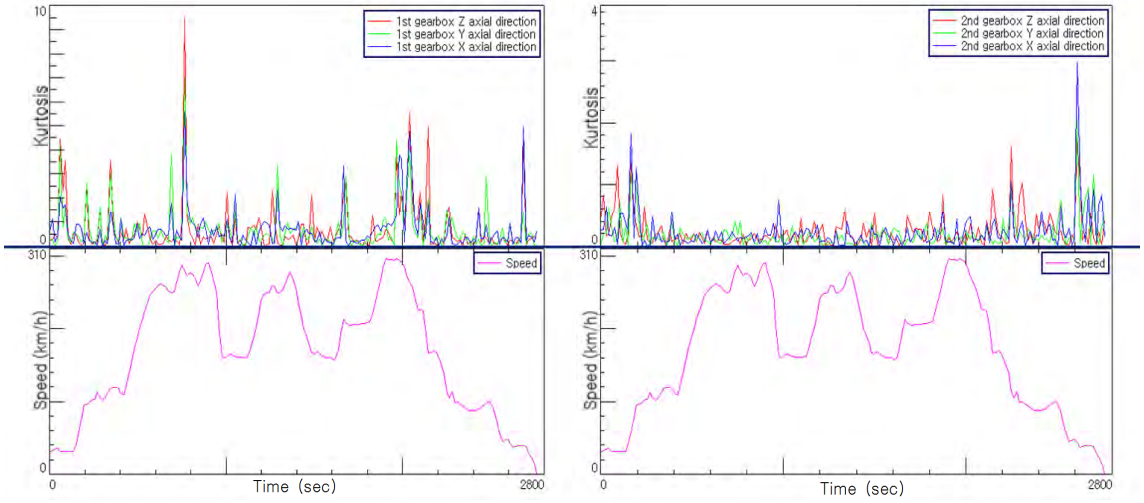



그림 2.4.97 동대구역-부산역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석

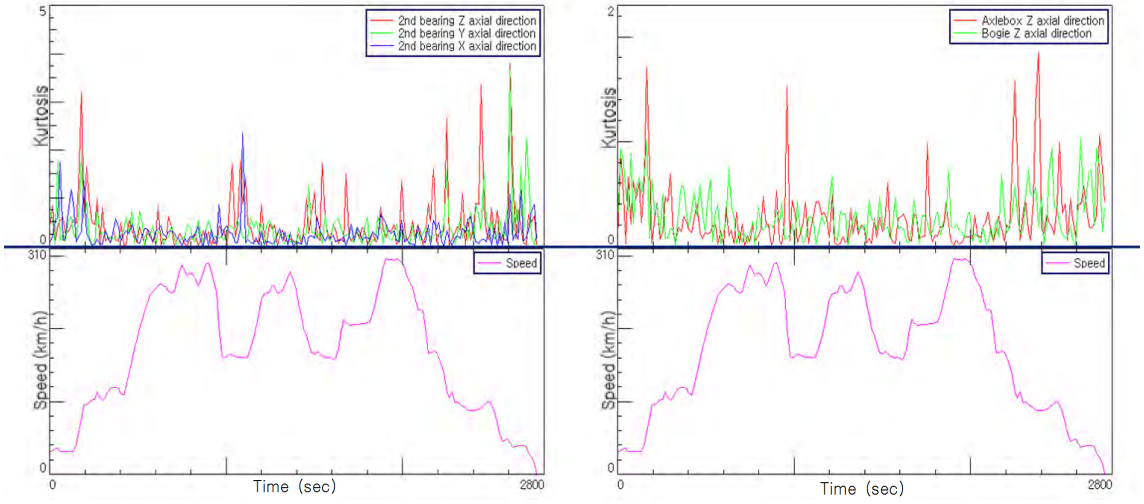



그림 2.4.98 동대구역-부산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석

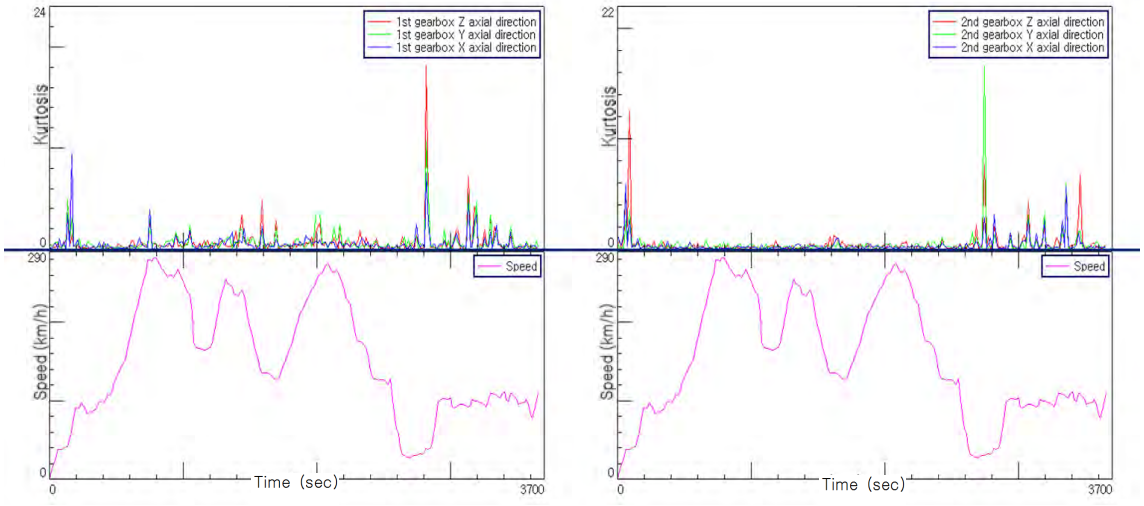



그림 2.4.99 부산역-동대구역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석

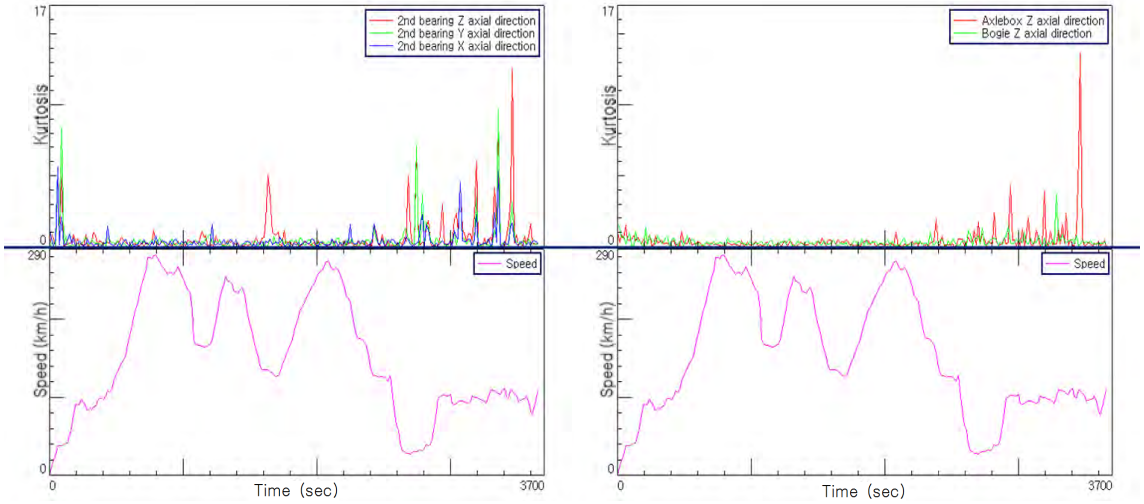



그림 2.4.100 부산역-동대구역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석

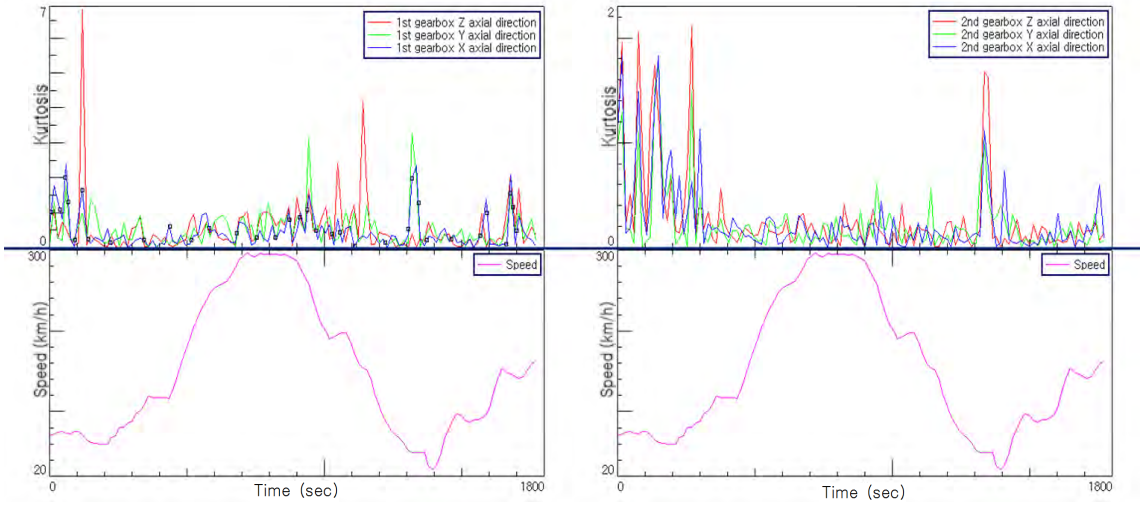



그림 2.4.101 대전역-천안아산역 1차, 2차 감속기 기어박스 Kurtosis 분석

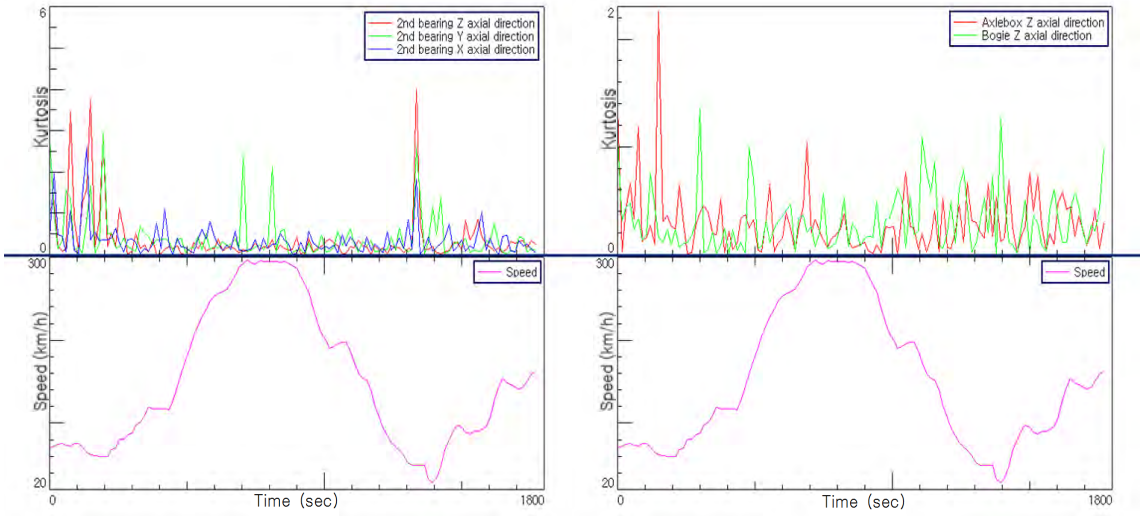



그림 2.4.102 대전역-천안아산역 2차 감속기 베어링, 축상, 대차 Kurtosis 분석

④ 가감속구간 진동데이터 진동비교 분석

운행구간 중 정가속과 정감속이 이루어지는 대표구간(광명역-대전역, 대전역-천안아산역)을 선정하여 가속과 감속 시 진동레벨의 변화를 다음 그림 2.4.103 ~ 2.4.120과 같이 분석하였다.
가속/감속 시 감속기의 진동레벨을 분석한 결과 1차 감속기 기어박스의 진동레벨이 불규칙적으로 발생하여 대체적으로 가속과 감속 시의 진동레벨특성을 비교하기가 어려웠으나, 그 외 2차 감속기 및 베어링에서는 추세선을 나타내어 비교한 결과 가속 시 발생되는 진동레벨이 감속 시 발생되는 진동레벨보다 높은 것을 알 수 있다.

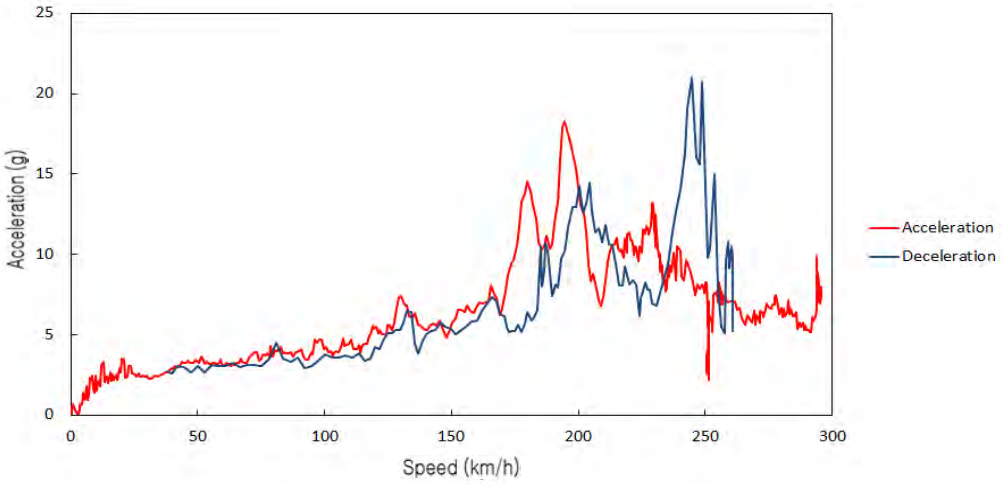



그림 2.4.103 광명역-대전역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스
상하방향 진동레벨

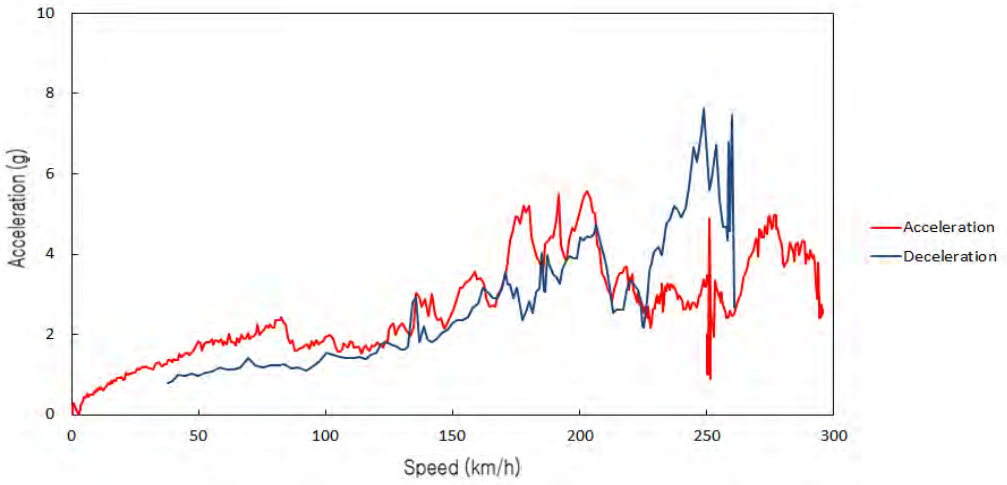



그림 2.4.104 광명역-대전역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 좌우방향 진동레벨

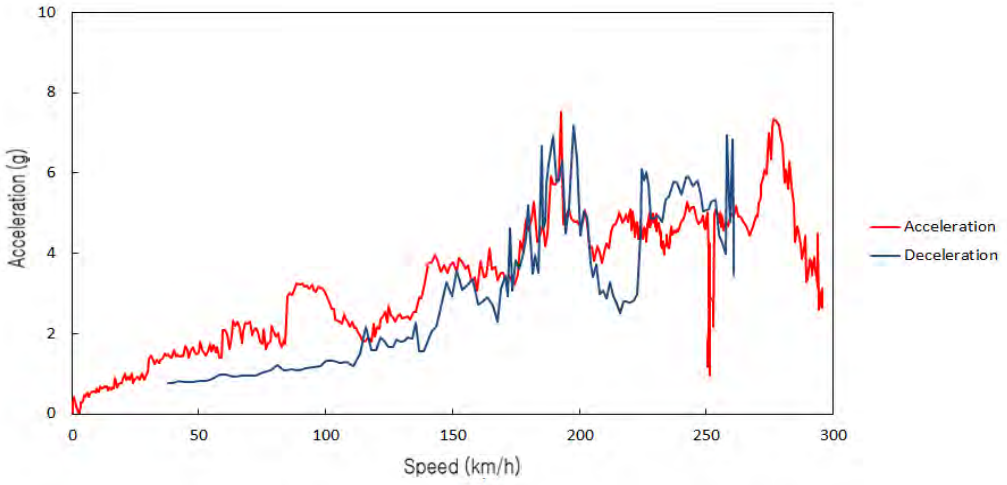



그림 2.4.105 광명역-대전역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 전후방향 진동레벨

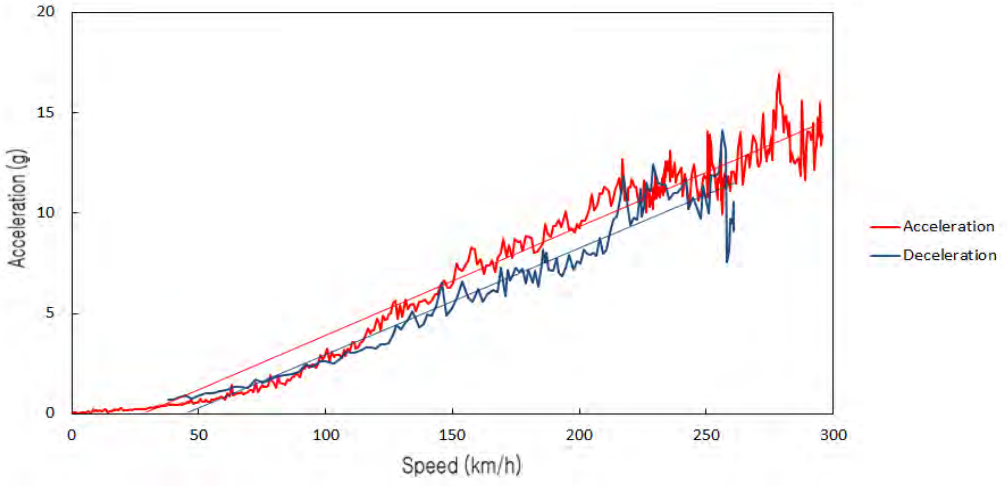



그림 2.4.106 광명역-대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 상하방향 진동레벨

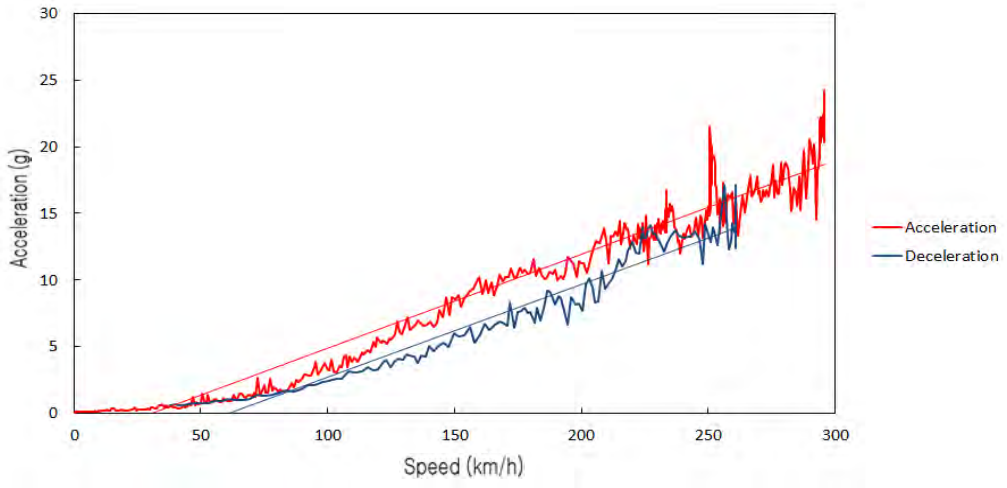



그림 2.4.107 광명역~대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 좌우방향 진동레벨

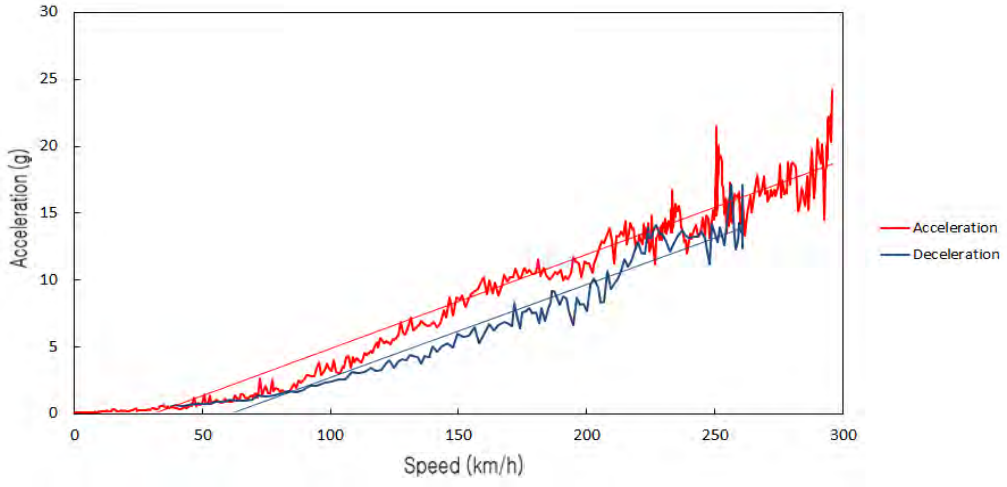



그림 2.4.108 광명역~대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 전후방향 진동레벨

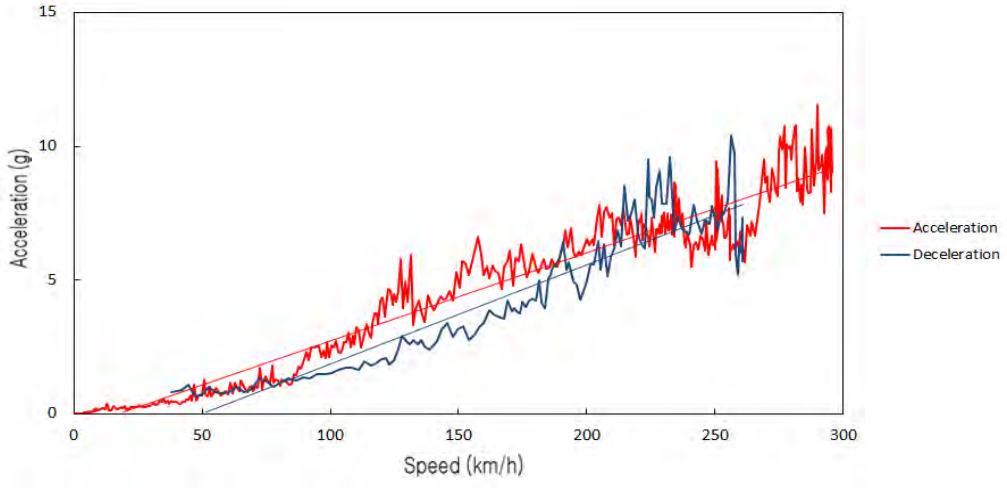



그림 2.4.109 광명역~대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기 베어링 상하방향 진동레벨

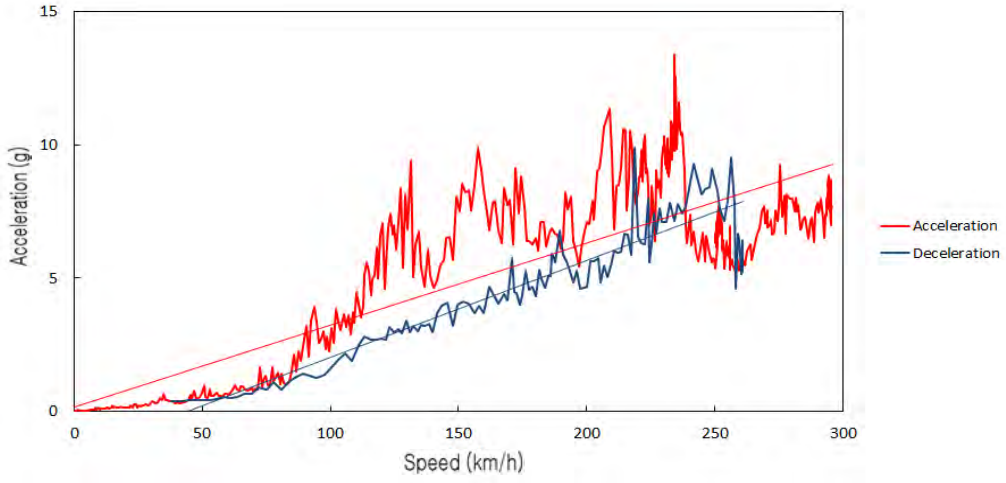



그림 2.4.110 광명역-대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기
베어링 좌우방향 진동레벨

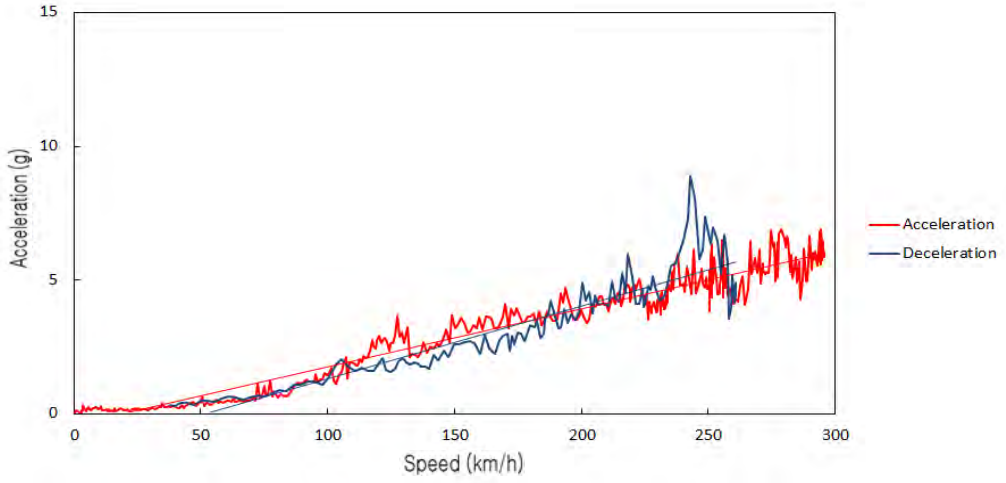



그림 2.4.111 광명역~대전역 가속/감속주행 시 2차 감속기
베어링 전후방향 진동레벨

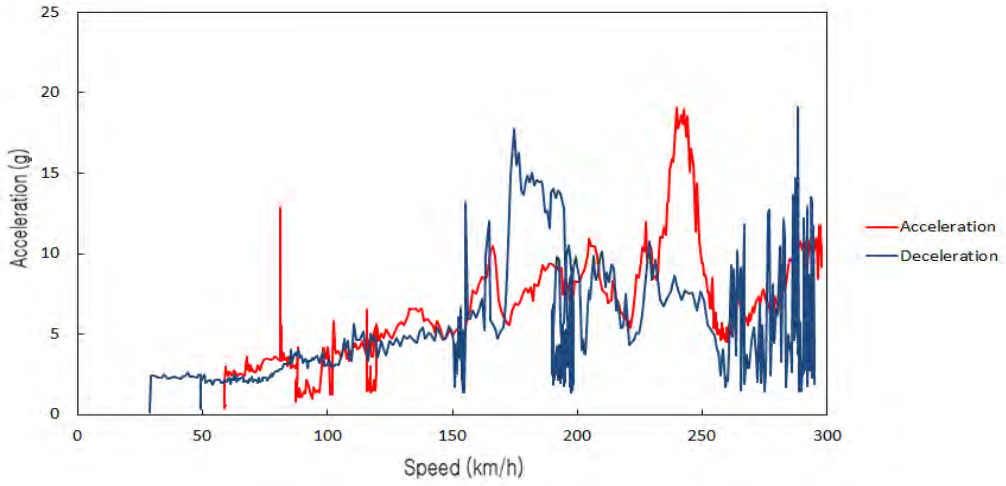



그림 2.4.112 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스
상하방향 진동레벨

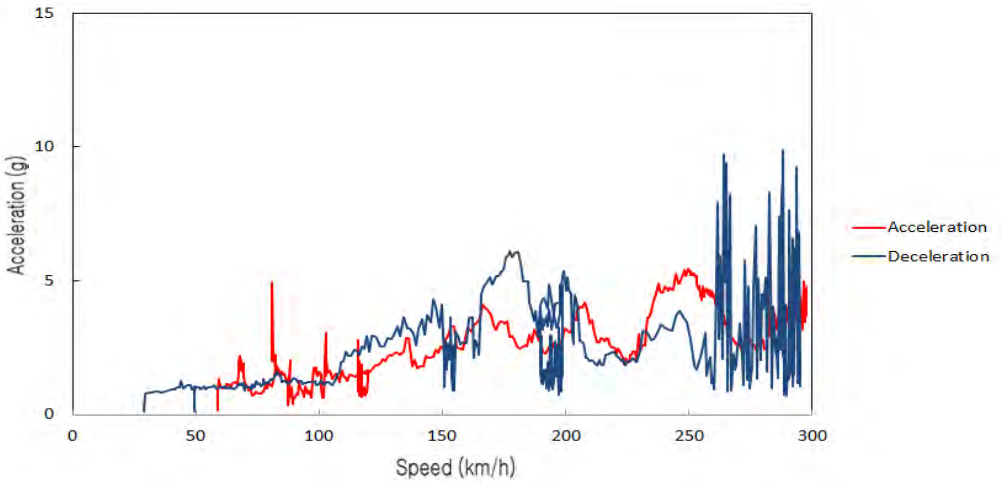



그림 2.4.113 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 좌우방향 진동레벨

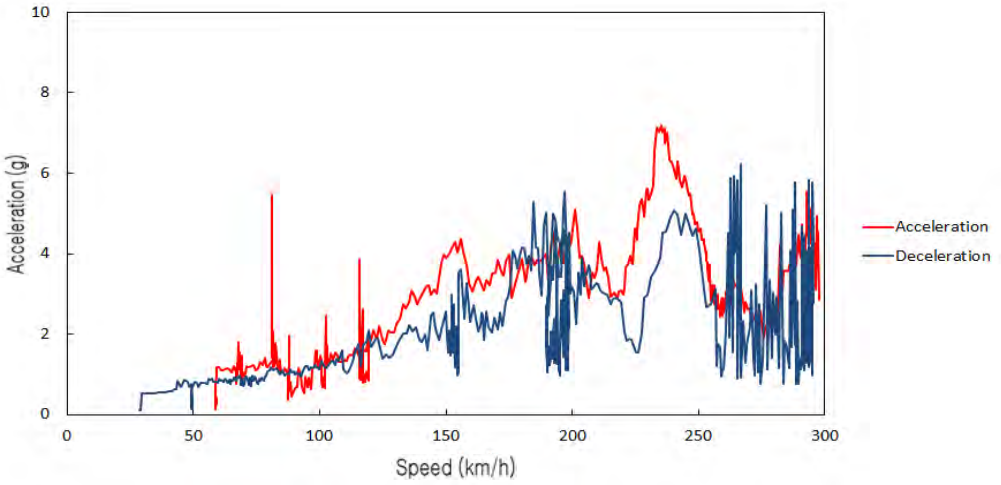



그림 2.4.114 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 1차 감속기 기어박스 전후방향 진동레벨

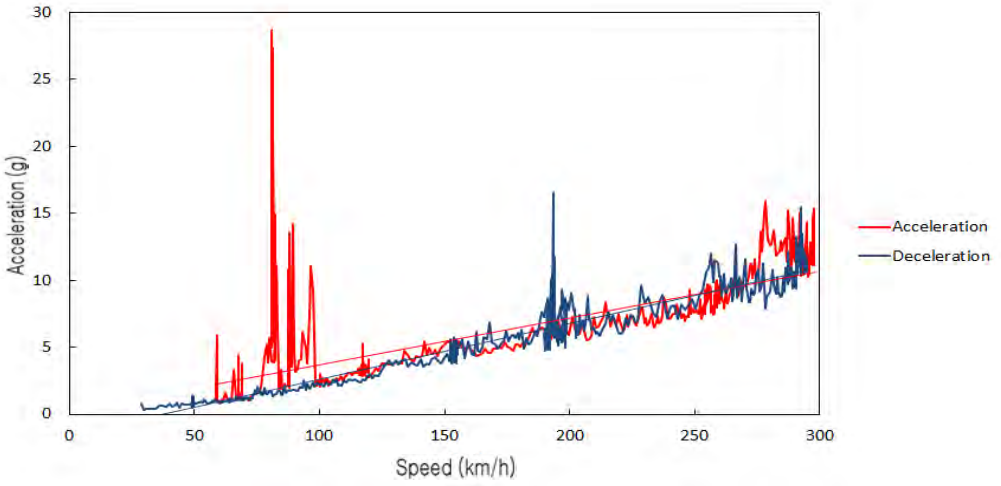



그림 2.4.115 대전역~천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 상하방향 진동레벨

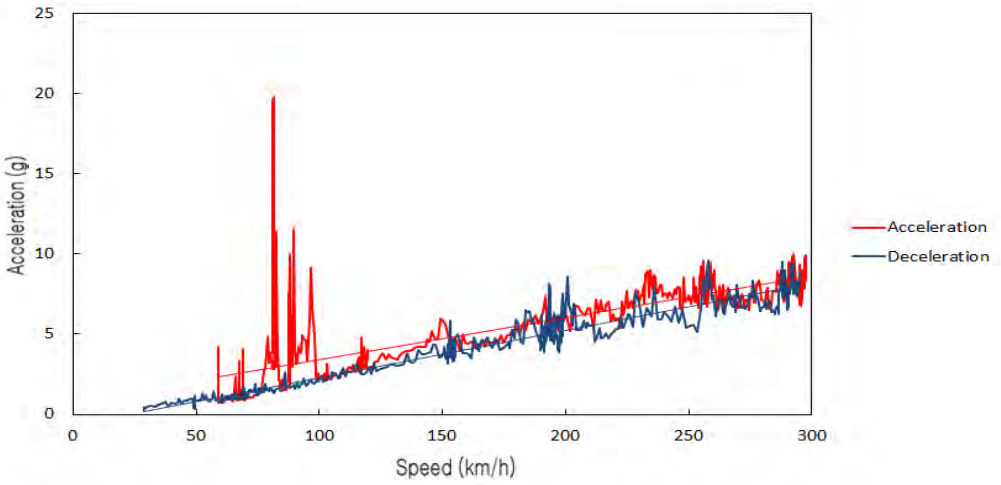



그림 2.4.116 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 좌우방향 진동레벨

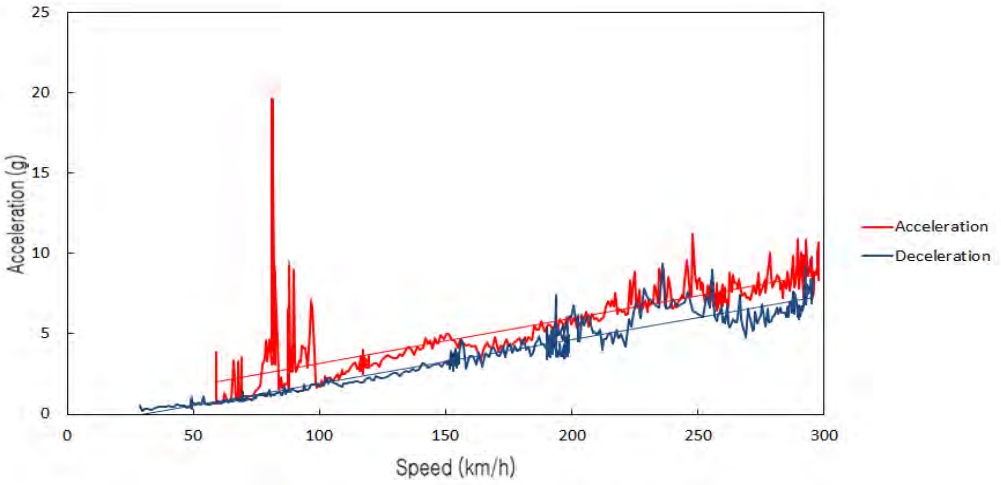



그림 2.4.117 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 기어박스 전후방향 진동레벨

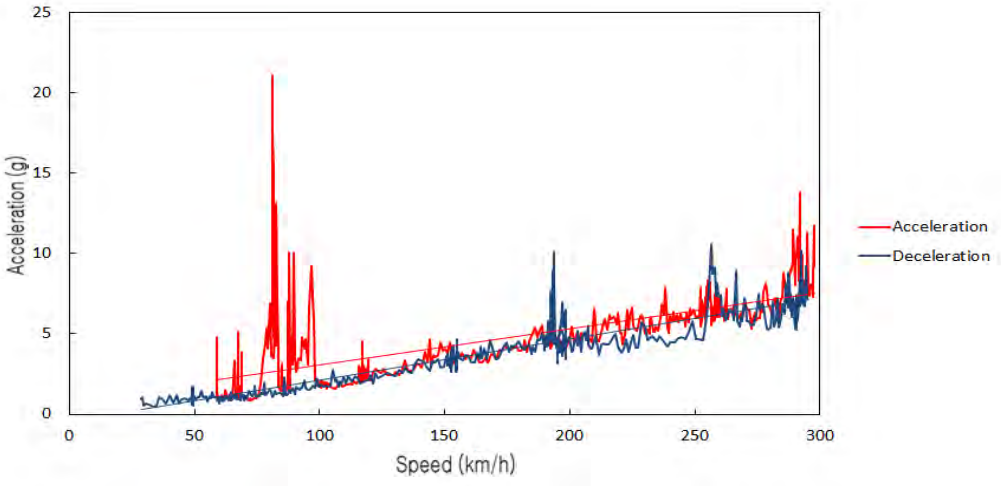



그림 2.4.118 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 베어링 상하방향 진동레벨

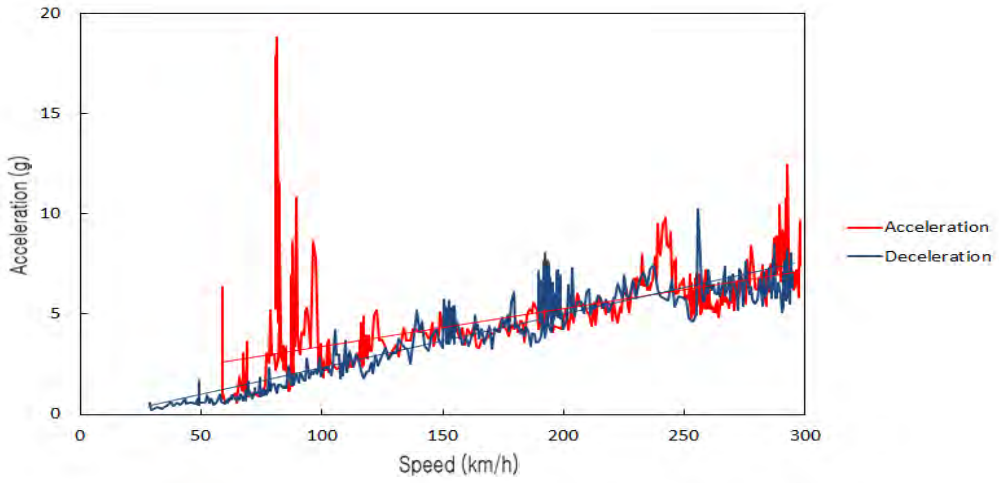



그림 2.4.119 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 베어링 좌우방향 진동레벨

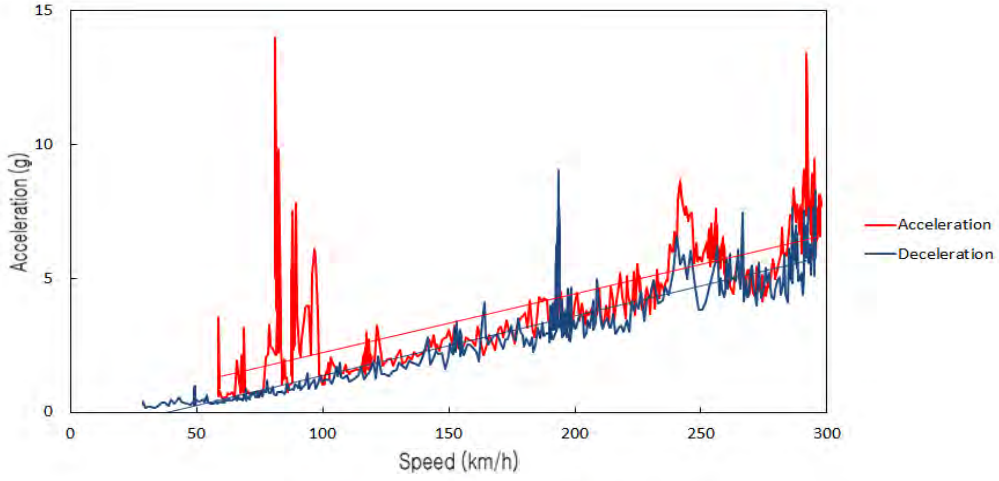



그림 2.4.120 대전역-천안아산역 가속/감속주행 시 2차 감속기 베어링 전후방향 진동레벨

⑤ 속도별 정속구간 진동특성 분석

고속열차(KTX-산천)이 정속운행 시 감속기에서 발생되는 진동레벨을 파악하기 위하여 속도별로 비교분석을 실시하였다. 분석 Unit은 rms값으로 분석하였으며, 정속으로 판단하기 위한 구간의 규명은 속도의 변화가 ±1 km/h의 범위 내에서 약 30초 이상 유지되는 구간을 선택하여 분석하였다. 이러한 분석방법을 통한 결과는 다음 그림 2.4.121 ~ 2.4.123과 같이 나타났다. 정속주행 시 속도별로 분석한 결과 속도가 100 km/h 이상 상태에서 정속주행 할 경우 2차 감속기의 진동레벨이 1차 감속기의 진동레벨보다 높아지는 것을 알 수 있으며, 그림 2.4.121과 같이 200 km/h 이상의 정속 주행 시 1차 감속기 상하방향진동레벨이 2차 감속기 베어링의 상하방향진동레벨보다 높아지는 현상을 보인 것을 제외하면, 정속 운행 시 2차 감속기 진동레벨이 1차 감속기의 진동레벨보다 비교적 높은 것으로 분석되었다.

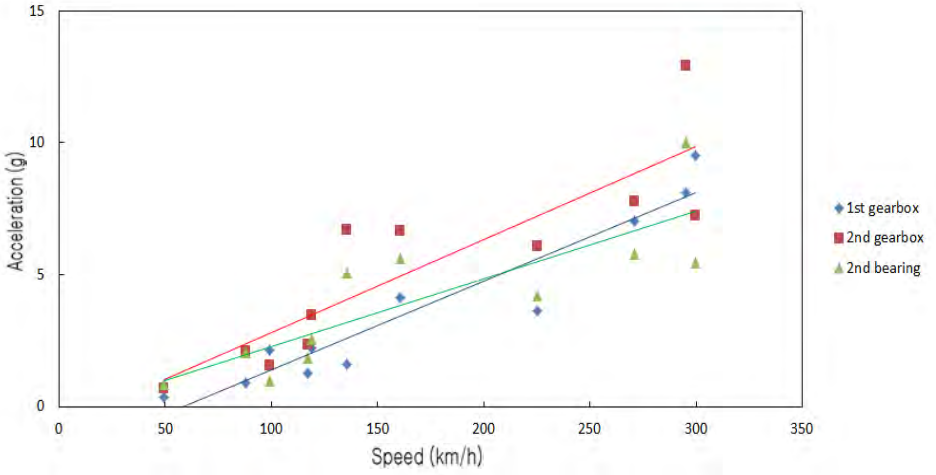



그림 2.4.121 속도별 정속주행 시 1차 감속기 기어박스, 2차 감속기 기어박스, 2차 감속기 베어링 상하방향 진동레벨

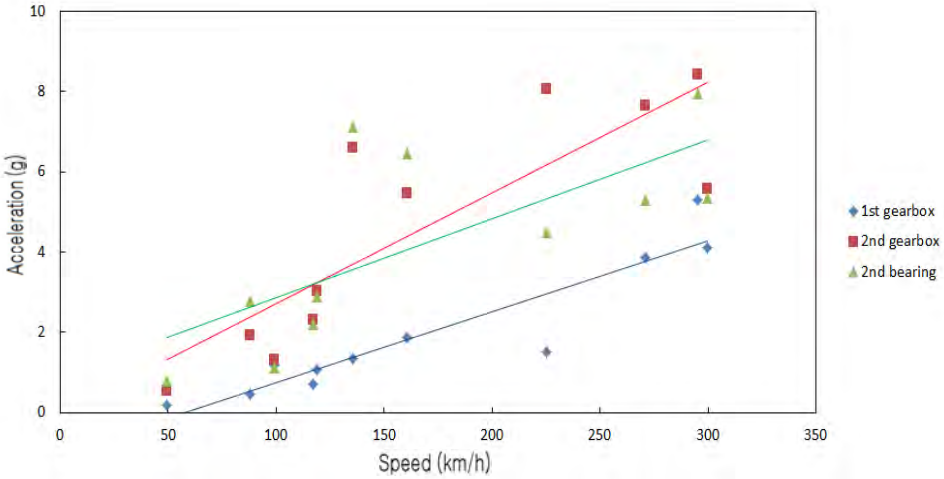



그림 2.4.122 속도별 정속주행 시 1차 감속기 기어박스, 2차 감속기 기어박스, 2차 감속기 베어링 좌우방향 진동레벨

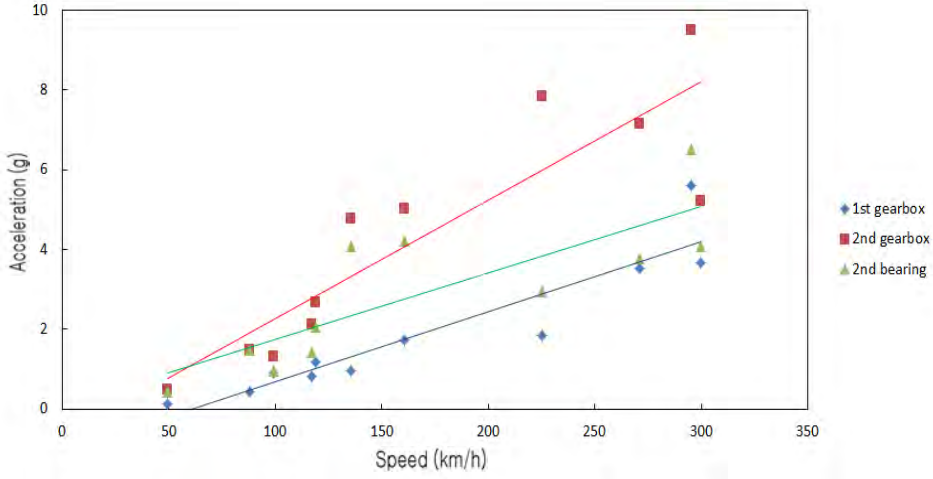



그림 2.4.123 속도별 정속주행 시 1차, 2차 감속기 기어박스, 2차 감속기 베어링 전후방향 진동레벨

⑥ 도상별 진동데이터 비교분석

국내의 고속선 중 크게 자갈도상과 콘크리트도상으로 분류하여, 각 도상별 고속열차(KTX-산천) 주행 시 감속기에 미치는 진동레벨을 비교분석하였다. 분석대상은 터널구간에서 자갈도상과 콘크리트도상으로 구분하고, 동일한 속도(약 270~290 km/h)로 가속 시 감속기에서 발생되는 진동레벨(Overall level)을 비교분석하였다. 다음 그림 2.4.124는 비교 분석하기 위한 터널구간과 고속열차(KTX-산천)의 운행속도를 나타내었다. 터널구간 중 분석구간의 진동레벨 비교결과는 다음 그림 2.4.125 ~ 2.4.135와 같이 나타났다. 터널구간에서 도상별 주행 시 감속기에 미치는 진동레벨을 분석한 결과 1차 감속기, 축상, 대차에서 자갈도상인 금오터널 통과 시 불규칙적으로 레벨이 올라가는 현상을 보였으며, 콘크리트 도상인 황학터널 통과 시 2차 감속기 좌우방향 가속도레벨이 약 3~4 g 정도 높게 나타나는 현상을 알 수 있다. 그 외 비교결과 황학터널과 금오터널 가속 시 비슷한 레벨을 보인 것으로 분석되었다.

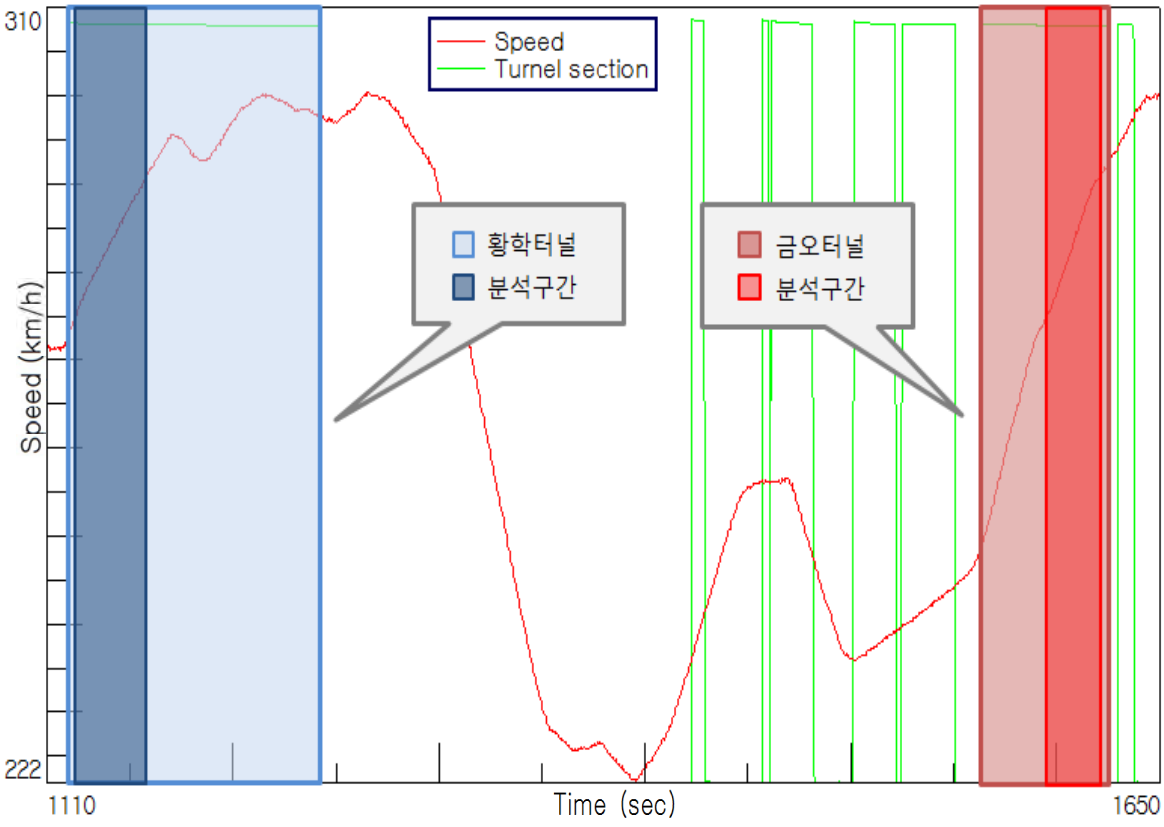



그림 2.4.124 터널구간 도상별 분석구간
(황학터널 : 콘크리트도상 / 금오터널 : 자갈도상)

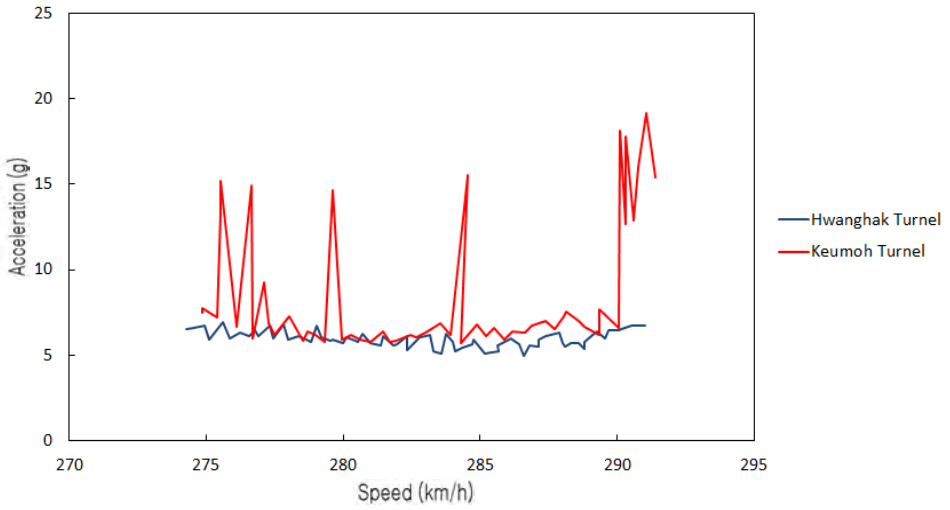



그림 2.4.125 1차 감속기 기어박스 상하방향 도상별 진동레벨분석

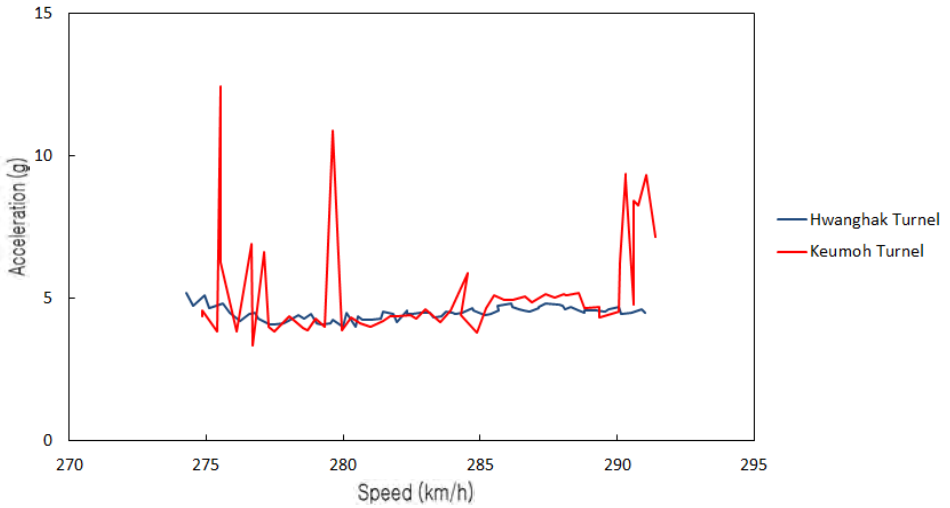



그림 2.4.126 1차 감속기 기어박스 좌우방향 도상별 진동레벨분석

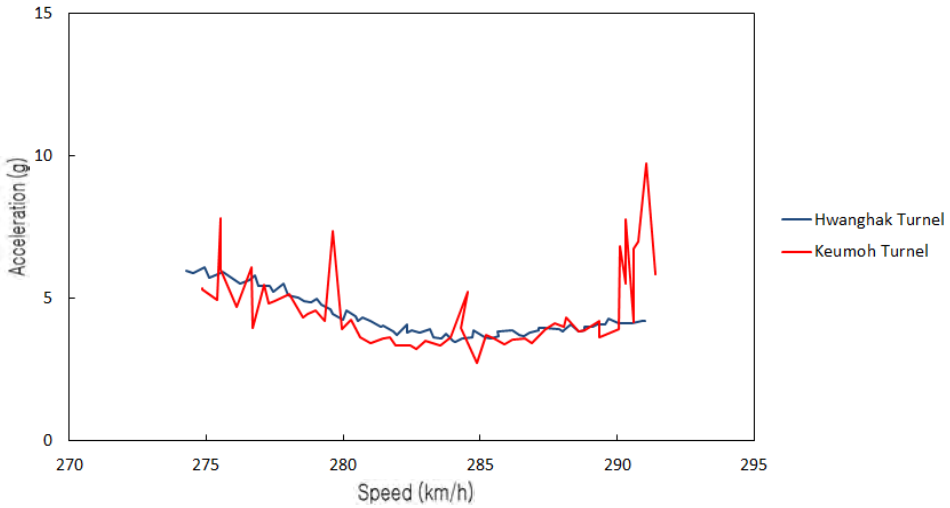



그림 2.4.127 1차 감속기 기어박스 전후방향 도상별 진동레벨분석

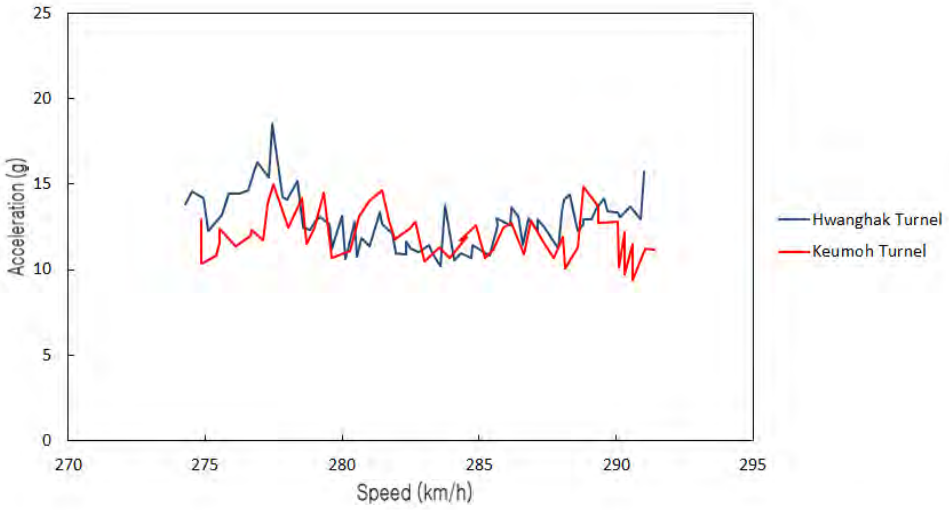



그림 2.4.128 2차 감속기 기어박스 상하방향 도상별 진동레벨분석

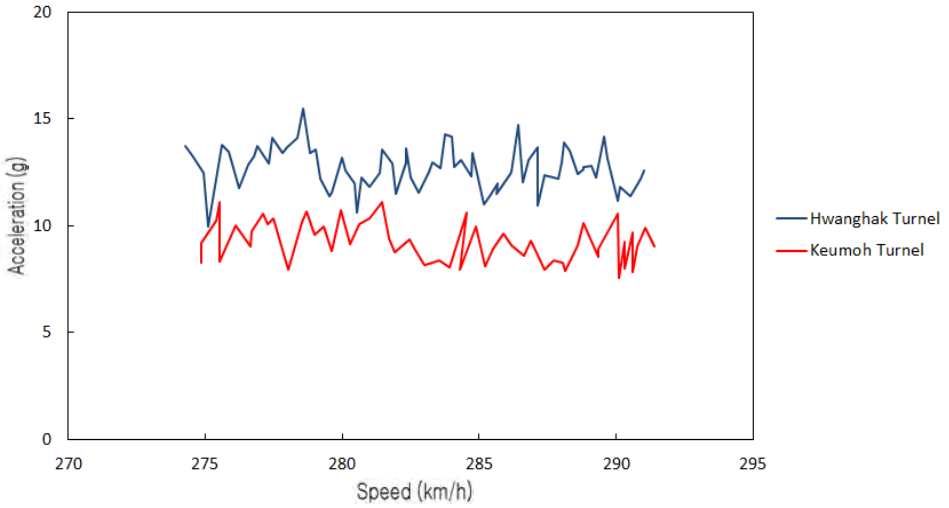



그림 2.4.129 2차 감속기 기어박스 좌우방향 도상별 진동레벨분석

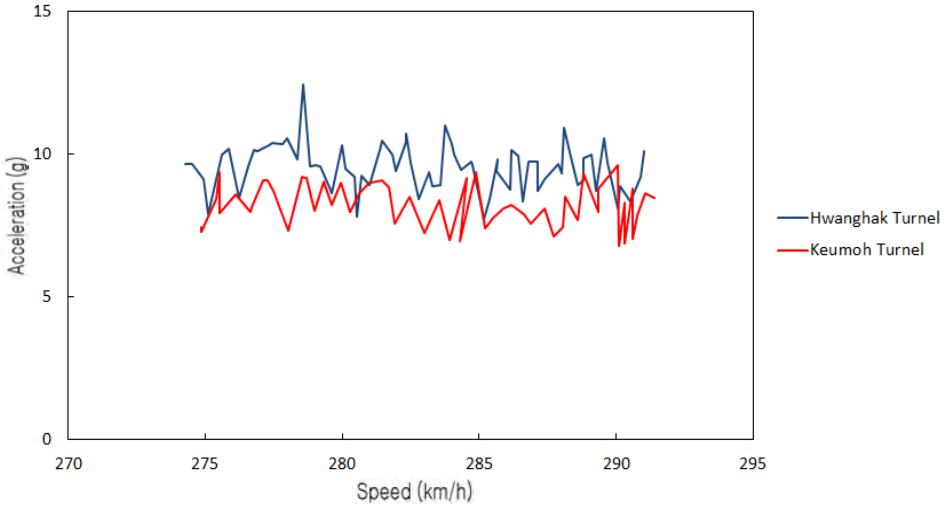



그림 2.4.130 2차 감속기 기어박스 전후방향 도상별 진동레벨분석

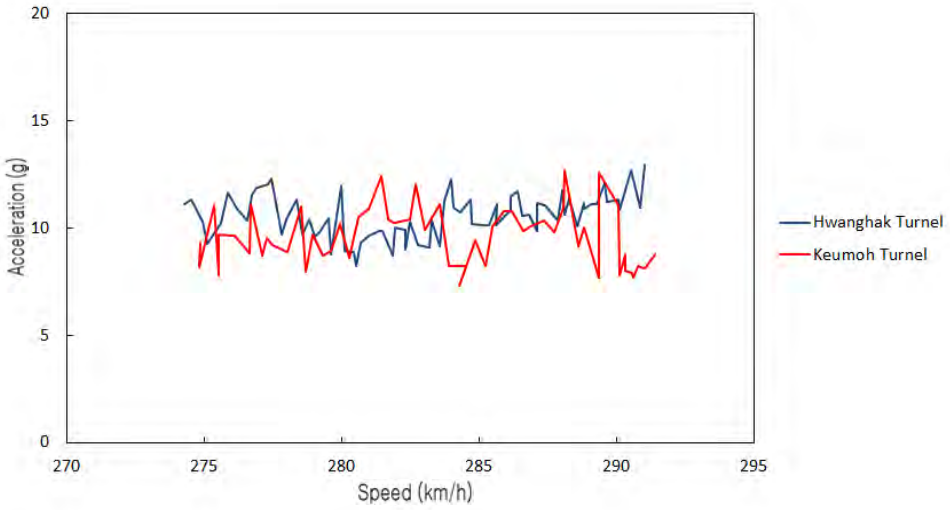



그림 2.4.131 2차 감속기 베어링 상하방향 도상별 진동레벨분석

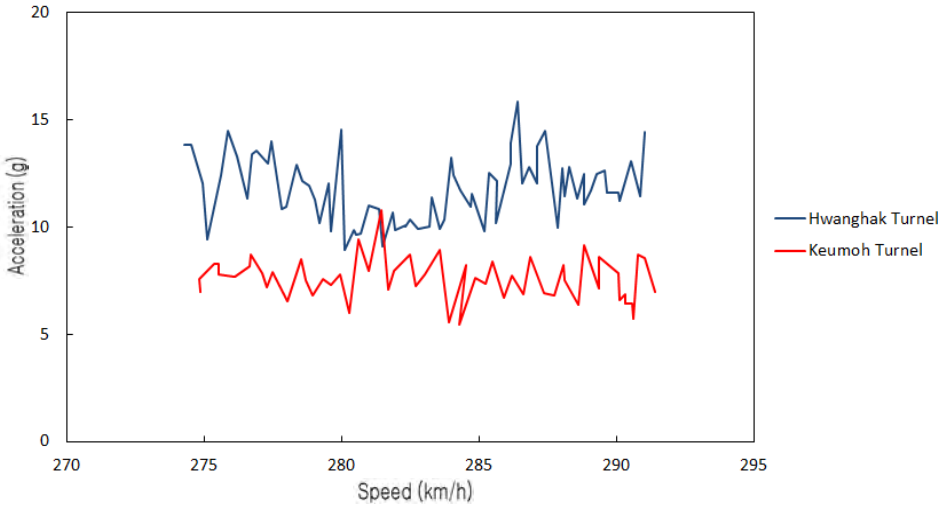



그림 2.4.132 2차 감속기 베어링 좌우방향 도상별 진동레벨분석

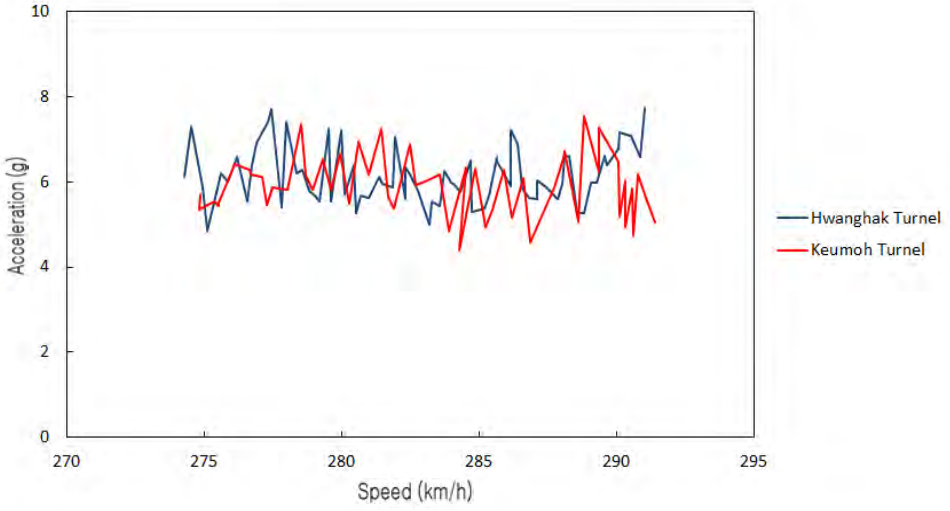



그림 2.4.133 2차 감속기 베어링 전후방향 도상별 진동레벨분석

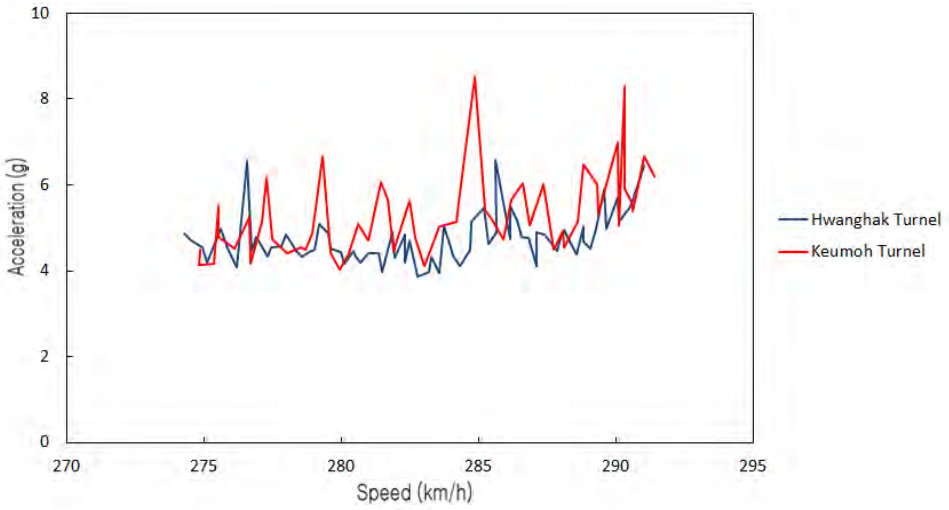



그림 2.4.134 축상 상하방향 도상별 진동레벨분석

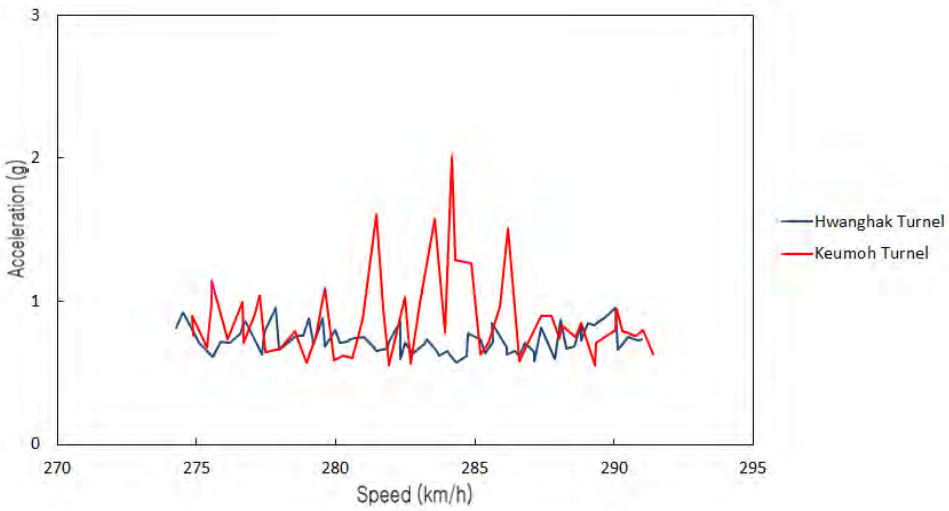



그림 2.4.135 대차 상하방향 도상별 진동레벨분석

(나) 주파수영역 분석 결과

① 가속구간 주파수특성 분석

고속열차(KTX-산천) 가속 시 정상상태의 감속기의 주파수특성을 파악하기 위해 그림 2.4.136과 같은 조건에서 분석을 실시하였다. 2.4.134와 같이 광명역-대전역 구간에서 약 0.5~296km/h의 속도로 가속 시 rpm증가에 따른 Order분석을 그림 2.4.137과 같이 나타내었다. 그림 2.4.137과 같이 1차 감속기의 Order분석을 실시한 결과 다음 1차 감속기 정상상태 Order식으로 도출한 값과 동일한 값으로 분석되었다. 다음 식 (2.4.1)은 1차 감속기 Order 도출 식이다.

$$Order1 = 1\text{차 감속기 기어비} \times \text{기어잇수} \quad \text{----------} \quad (2.4.1)$$

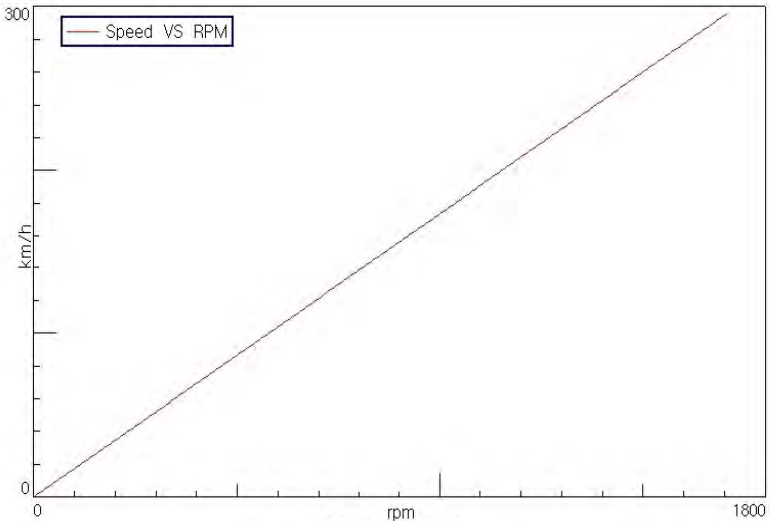



그림 2.4.136 광명역-대전역 가속 시 rpm에 따른 속도

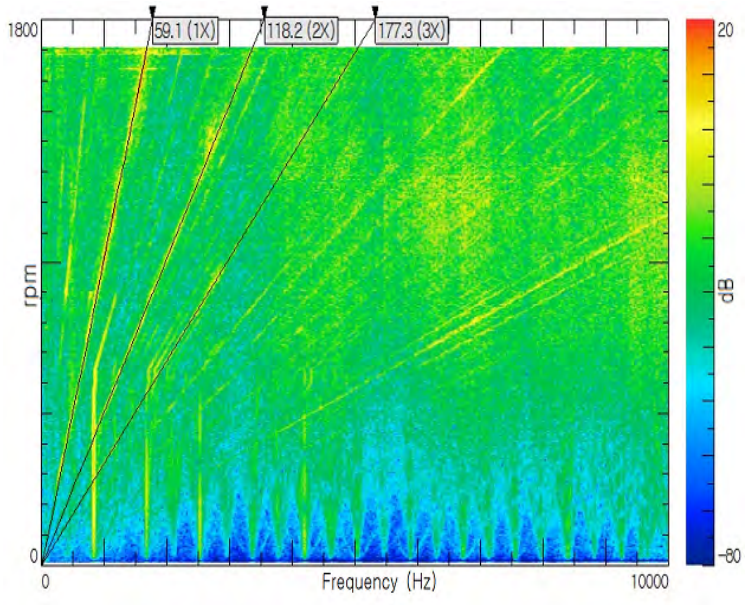



그림 2.4.137 1차 감속기 기어박스 Order 분석결과

1차 감속기 기어비는 1.159이며, 기어잇수는 51이므로 1차 감속기의 1차 Order는 59.1, 2차 Order는 118.2, 3차 Order는 177.3임을 알 수 있다. 그림 2.4.138은 2차 감속기 기어박스의 Order분석 결과이다. 그림 2.4.138과 같이, 2차 감속기의 Order 도출식은 다음 식 (2.4.2)과 같다.

$$Order2 = 2\text{차 감속기 회전주파수} \times \text{기어잇수} \quad \text{----------} \quad (2.4.2)$$

2차 감속기의 정상상태 시 회전주파수 1일 때, Order는 51이며, 분석결과 1차 Order값이 51인 것을 확인 할 수 있었다. 그림 2.4.139는 2차 감속기의 베어링의 Order분석결과이다. 그림 2.4.139와 같이 2차 감속기의 베어링 Order분석결과 역시 2차 감속기의 특성을 그대로 보였으며, 기어박스의 Order 차수와 같이 나타났다.

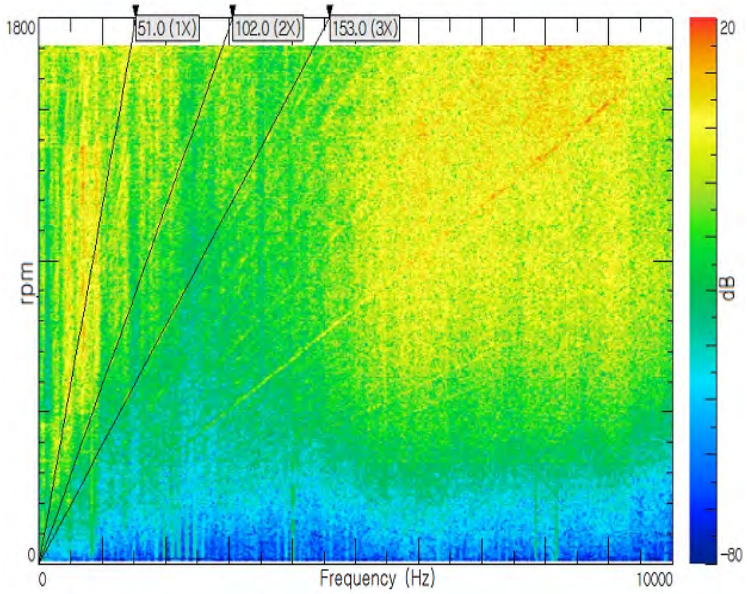



그림 2.4.138 2차 감속기 기어박스 Order 분석결과

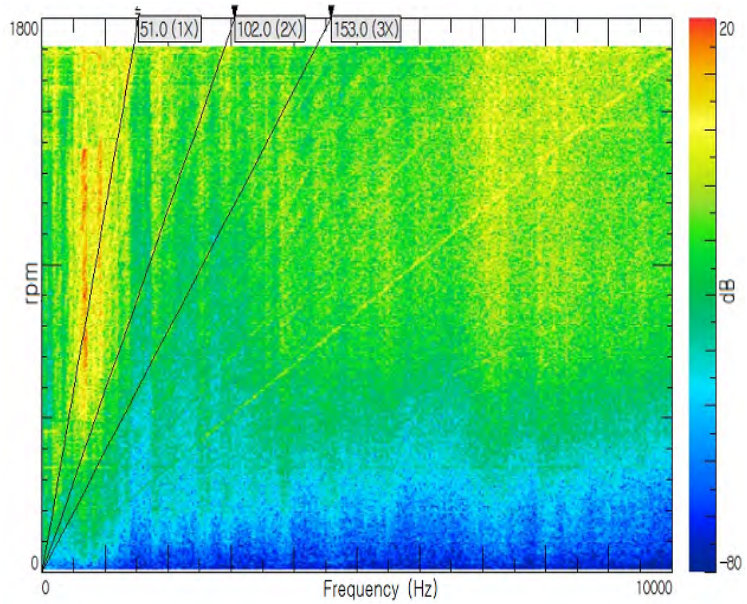



그림 2.4.139 2차 감속기 베어링 Order 분석결과

② 정속주행 시 주파수 특성 분석

고속열차(KTX-산천)가 정속주행 시 감속기 내의 기어의 맞물림 주파수특성을 파악하기 위해 160 km/h±0.5로 정속주행 시와 300 km/h-0.5 주행 시의 기어 맞물림 주파수 특성을 분석한 결과는 그림 2.4.140 ~ 2.4.142와 같다. 1차 감속기의 기어 맞물림 주파수분석결과 그림 2.4.140과 같이 나타났으며, 1차 감속기 기어 맞물림 주파수 도출식인 다음 식 (2.4.3)과 같다.

$$GMF \times 1(Hz) = \frac{\text{속도}(km/h)/3.6}{\pi \times D} \times \text{기어비} \times \text{잇수} \quad \text{----------} \quad (2.4.3)$$

맞물림 주파수와 측정결과를 비교해본 결과, 1차 감속기의 기어 맞물림 주파수는 160 km/h일 때, 909.4 Hz이며, 실제 분석한 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

실차에서는 궤도 및 분기기 등 외부 조건에 의하여 진동이 커질 수 있으며, 대차 불안정 센서의 경우, 270km/h 이상에서 일정 가속도를 초과하는 값이 5초간 지속되는 것을 기준으로 하고 있다. KTX 감속기의 경우도 지속시간을 기준으로 하거나 일정값 이상을 초과하는 확률을 기준으로 하면 첨도 및 파고율을 진단에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

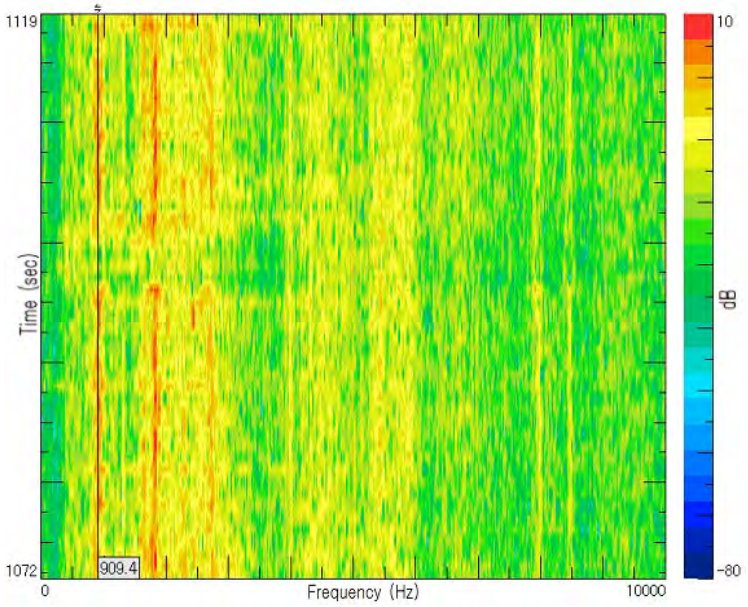



그림 2.4.140 160 km/h 정속주행 시 1차 감속기 기어박스 주파수 분석결과

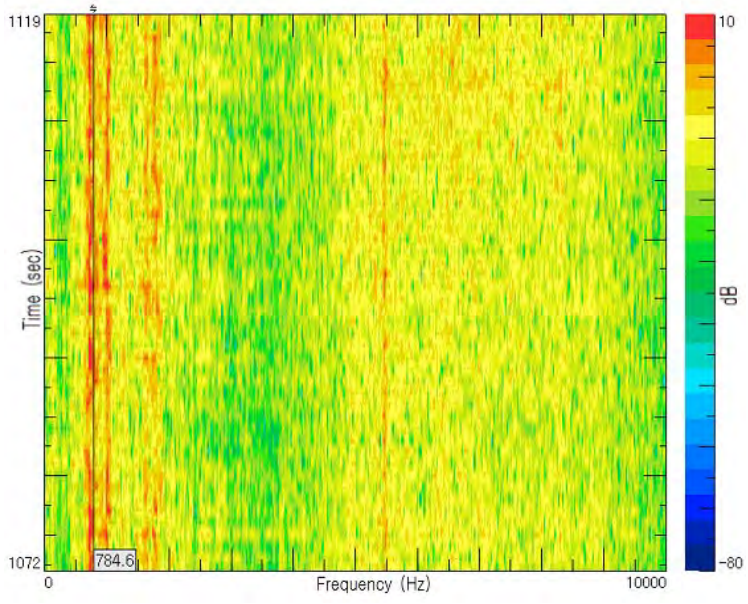



그림 2.4.141 160 km/h 정속주행 시 2차 감속기 기어박스 주파수 분석결과

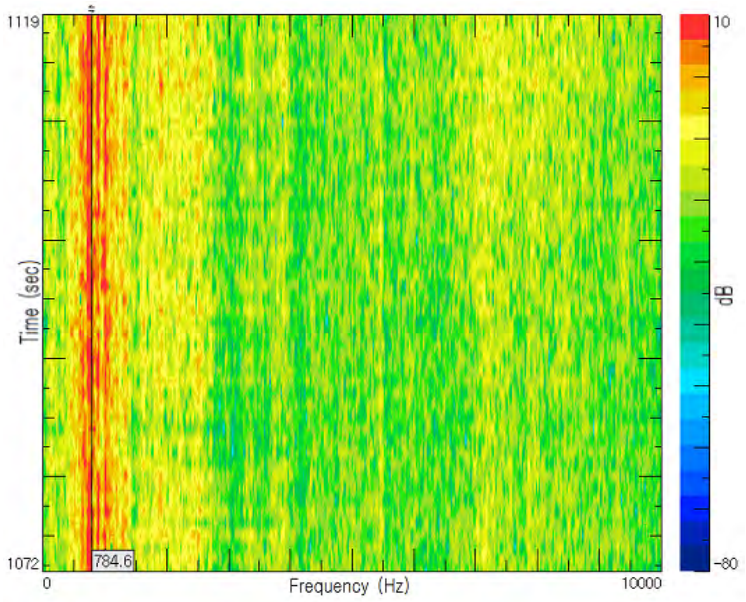



그림 2.4.142 160 km/h 정속주행 시 2차 감속기
베어링 주파수 분석결과

그림 2.4.141과 2.4.142는 2차 감속기의 시간-주파수분석결과를 나타내었다. 위 그림의 분석결과와 2차 감속기 기어 맞물림 주파수 도출식 (2.4.4)와 같다.

$$GMF \times 2(Hz) = \frac{\text{속도}(km/h)/3.6}{\pi \times D} \times \text{잇수} \quad \text{----------} \quad (2.4.4)$$

도출식에 의하면 2차 감속기의 기어맞물림 주파수는 784.6 Hz와 일치해야 하지만, 윤축 및 그 외적인 영향으로 인하여 2차 감속기의 기어 맞물림 주파수 특징이 잘 구분되지 않는 것으로 사료된다.

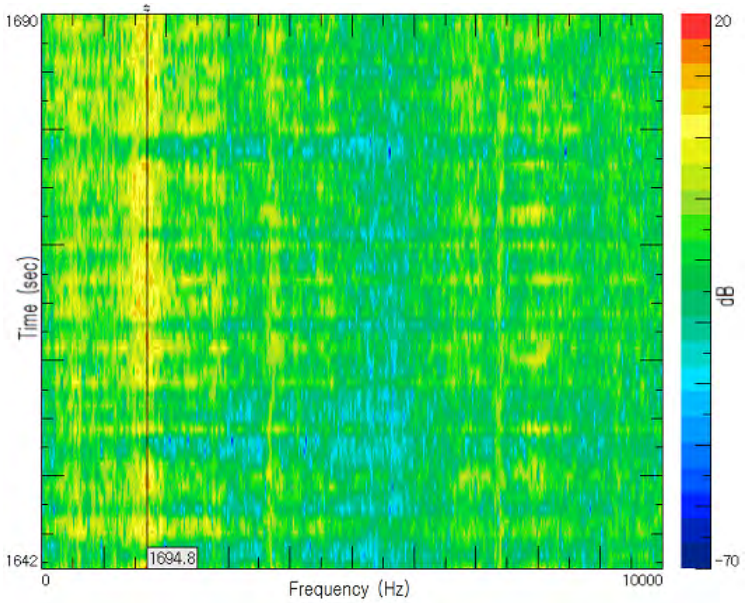



그림 2.4.143 300 km/h 정속주행 시 1차 감속기
기어박스 주파수 분석결과

그림 2.4.143은 300 km/h로 정속주행 시 1차 감속기의 기어 맞물림 주파수특성을 파악하기 위해 분석한 결과이다. 그림 2.4.143과 같이 분석한 결과 300 km/h 정속주행 시 1차 감속기의 특성이 식 (2.4.3)으로 계산한 것과 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 2.4.144와 그림 2.4.145는 300 km/h 정속주행 시 2차 감속기의 특성을 파악하기 위해 기어박스와 베어링 주파수 결과를 나타내었다. 주파수분석 결과와 같이 160 km/h의 분석결과와 마찬가지로 2차 감속기 기어 맞물림 주파수 식에 의해 구한 1471.2 Hz와 일치하지 않고 있다. 2차감속기에서는 윤축 및 그 외적인 진동으로 인하여 기어 맞물림 주파수 특성이 정확하게 나타나지 않고 있는 것으로 파악된다.

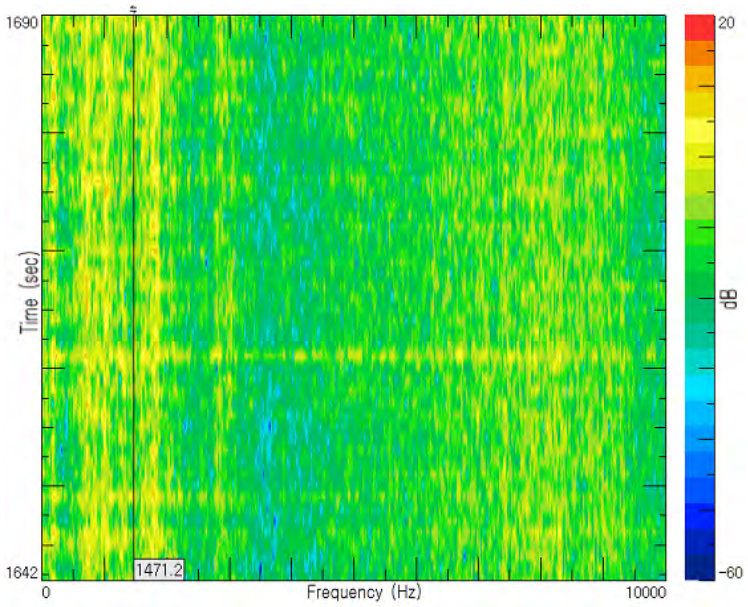



그림 2.4.144 300 km/h 정속주행 시 2차 감속기
기어박스 주파수 분석결과

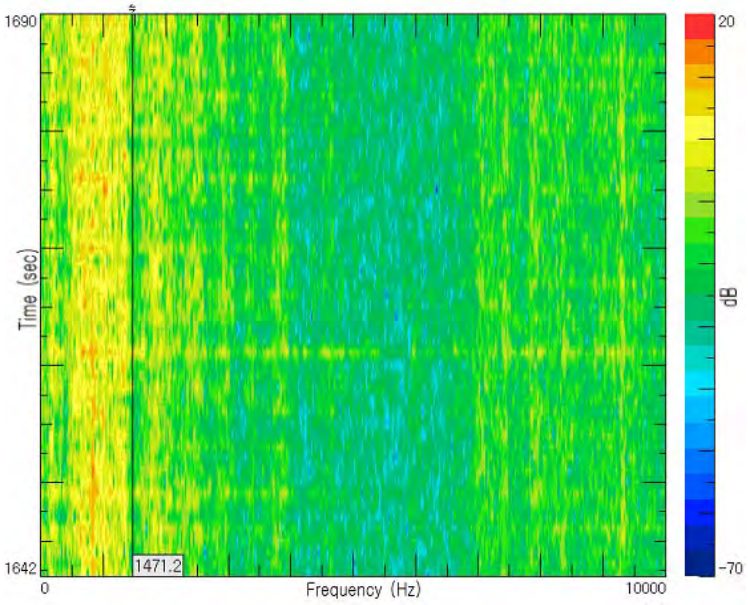



그림 2.4.145 300 km/h 정속주행 시 2차 감속기
베어링 주파수 분석결과

(4) KTX-산천 감속기 첨도 및 파고율 진단 적용성 검토

KTX-산천에 대하여 서울-광명 구간과 광명-대전 구간에서 파고율 및 첨도가 높게 나타나는 부분(파고율 5 이상, 첨도 3 이상)을 분석하여 그림 2.4.146과 2.4.147에 나타냈다. 저속구간인 서울-광명 구간에서 파고율 및 첨도가 높게 나타나는 부분에 대한 최대 지속시간은 2차 감속기의 파고율에서 3초가 나왔으며, 2차 감속기 첨도, 1차 감속기 첨도 및 파고율 등은 2초로 나타났다. 고속구간인 광명-대전 구간에서 파고율 및 첨도가 높게 나타나는 부분은 저속구간보다 작게 나타났으며, 최대 지속시간도 2초로 1차 감속기의 첨도에서 나타났다.

실차에서는 궤도 및 분기기 등 외부 조건에 의하여 진동이 커질 수 있으며, 대차 불안정 센서의 경우, 이를 고려하여 270 km/h 이상에서 5초간 지속되는 것을 기준으로 하고 있다. 대차 불안정 센서는 고속에서 작동하는 것이므로 안전을 고려하여 지속시간을 짧게 가져가고 있다. 그러나 감속기의 경우, 고속뿐만 아니라 분기기 통과 등 선로조건이 안 좋은 저속 구간을 운행할 때도 고려해야 한다. KTX 및 KTX-산천의 실차시험 분석 결과에서 파고율 및 첨도가 높게 나타나는 부분에 대한 최대 지속시간은 KTX는 7초, KTX-산천은 3초로 나타났지만 지속시간을 기준으로 진단을 할 경우, 감속기의 변동성이 크므로 대차 불안정 센서보다 지속시간을 길게 가져가야 할 것으로 판단된다. 또 다른 방법으로 일정시간 동안 측정한 값에 대한 확률을 기준으로도 첨도 및 파고율을 진단에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

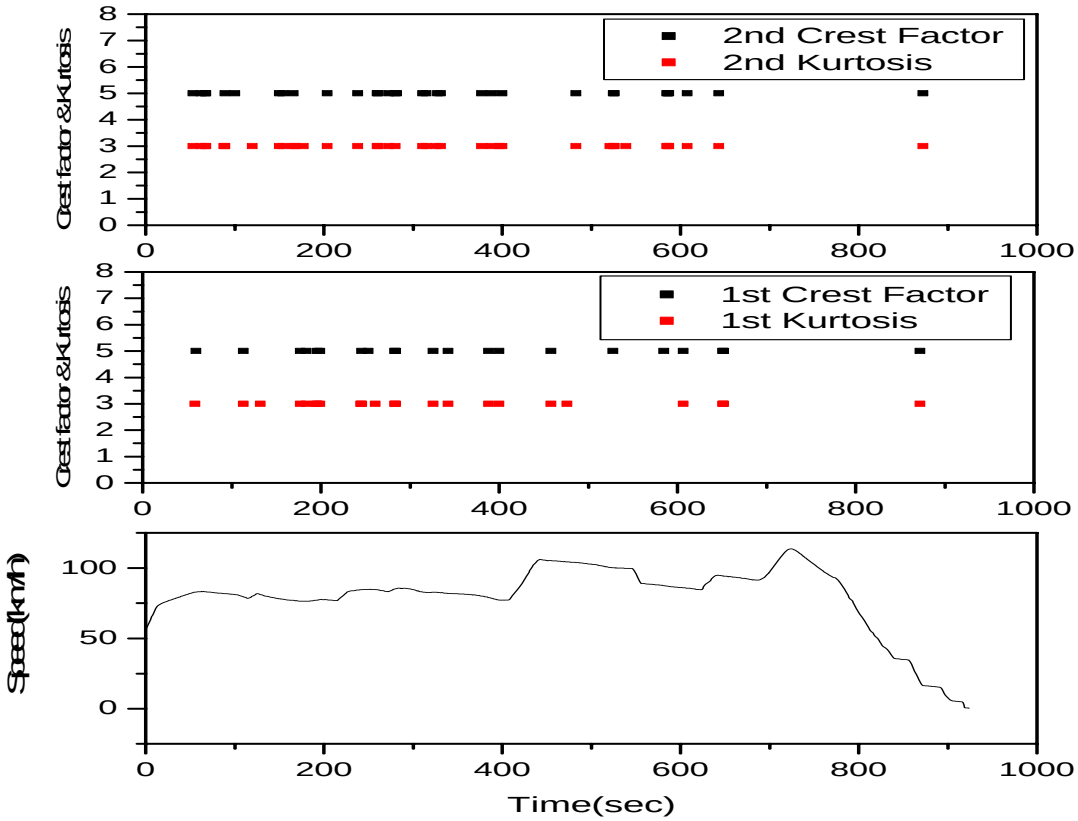



그림 2.4.146 KTX(산천) 서울-광명 구간 감속기 진단기준 초과값

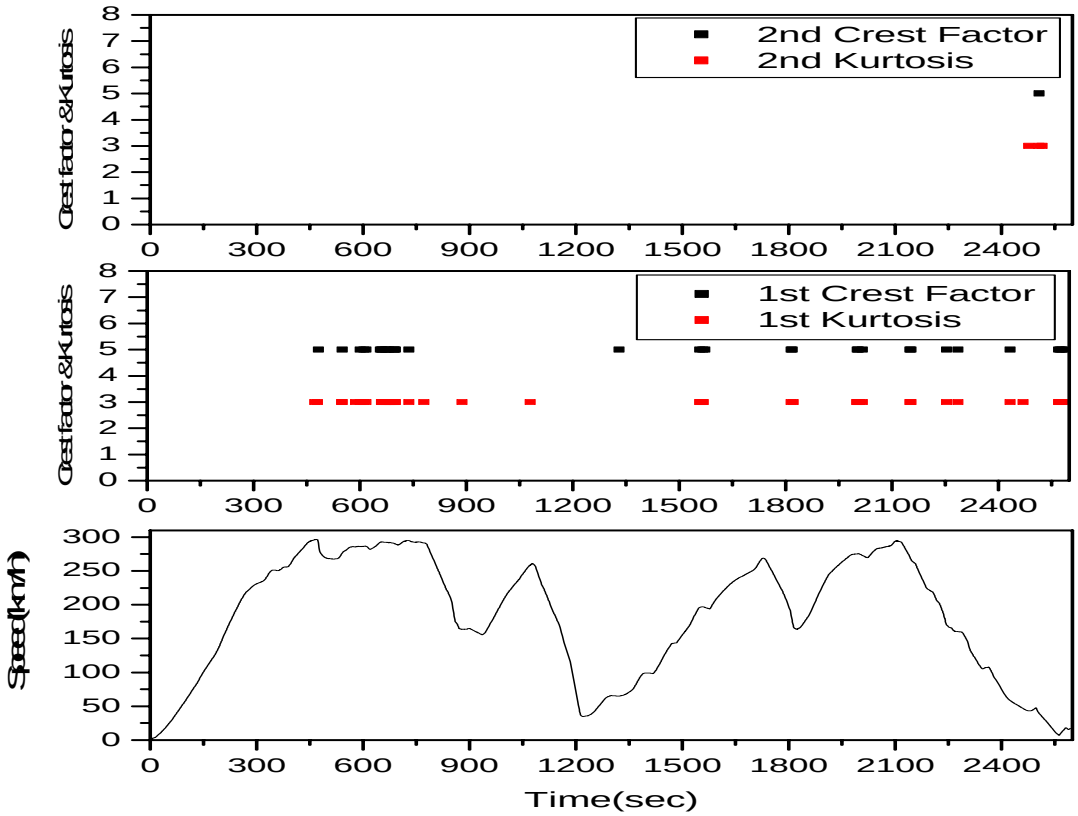



그림 2.4.147 KTX(산천) 광명-대전 구간 감속기 진단기준 초과값

라. 차세대 고속전철용 감속기

(1) 측정개요

측정대상은 시운전 시험차량인 차세대고속철도 HEMU열차를 대상으로 감속기에 입력측 및 출력측 감속기, 대차, 축상을 측정지점으로 선정하여 경부선 운행시의 진동을 측정하였다. 그 외 속도측정방법 및 데이터 취득방법은 기존 KTX 측정 시와 동일센서 및 방법을 사용하였다. 그림 2.4.148은 가속도센서 부착위치이며, 그림 2.4.149는 센서 부착위치에 대한 사진을 나타내었다.

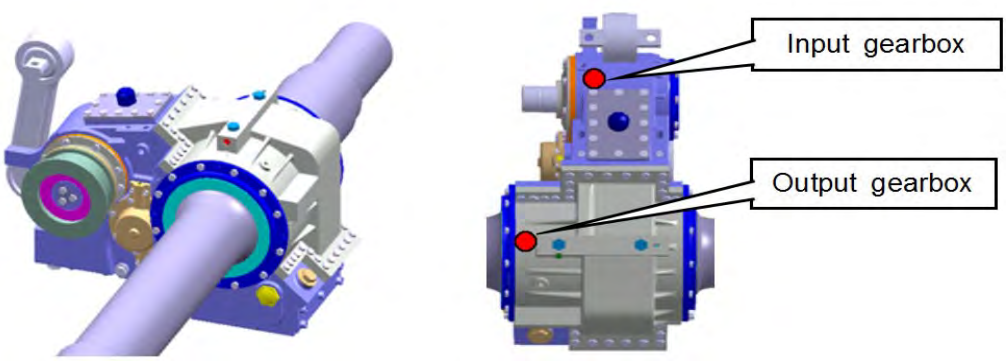



그림 2.4.148 HEMU 감속기 가속도센서 부착위치



a) 입력측 기어박스



b) 출력측 기어박스



c) 대차



d) 축상



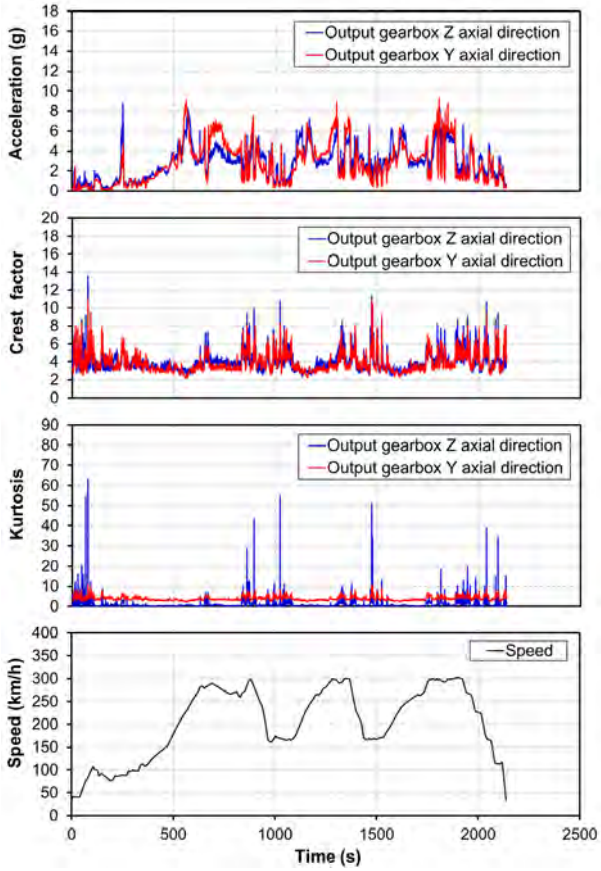
e) 속도 측정

그림 2.4.149 HEMU 감속기 센서부착 위치

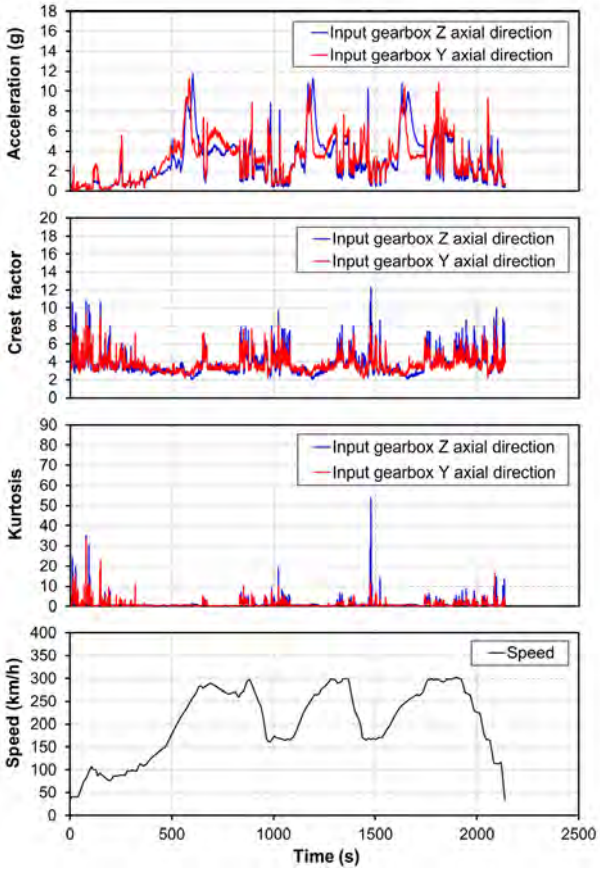
(2) 분석결과

(가) 시간영역 분석

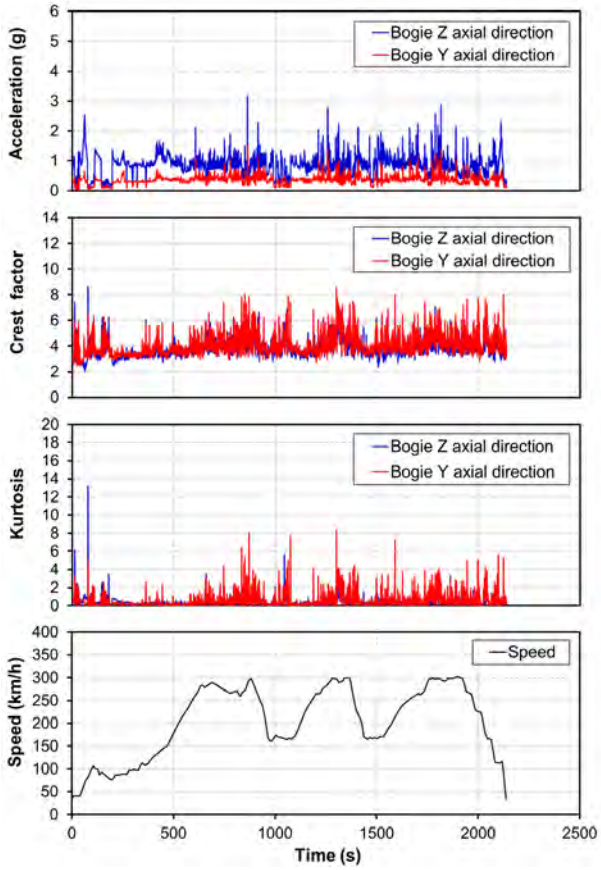
그림 2.4.150 ~ 2.4.152는 차세대 고속전철(HEMU)이 경부선 상행 운행시 감속기의 진동측정 결과이고, 그림 2.4.153 ~ 2.4.154는 경부선 하행 운행시 측정결과이다. 차세대 고속전철 감속기의 구조는 한 세트의 감속기로 되어 있고 입력축과 출력축 사이에 아이들러가 조립되어 있다. 감속기 진동특성은 KTX 2차 감속기의 진동특성과 같이 차축의 진동이 바로 감속기로 전달된다. 따라서 기존선을 운행할 경우 차축의 진동과 함께 감속기의 진동도 커지는 경향이 있다. 특히 그림 2.4.151과 같이 상행선 동대구역-대전역 구간의 초기 운행 구간(600초 까지)에서는 차축 및 감속기의 진동이 다른 곳에 비해 커지므로 주의가 필요하다.



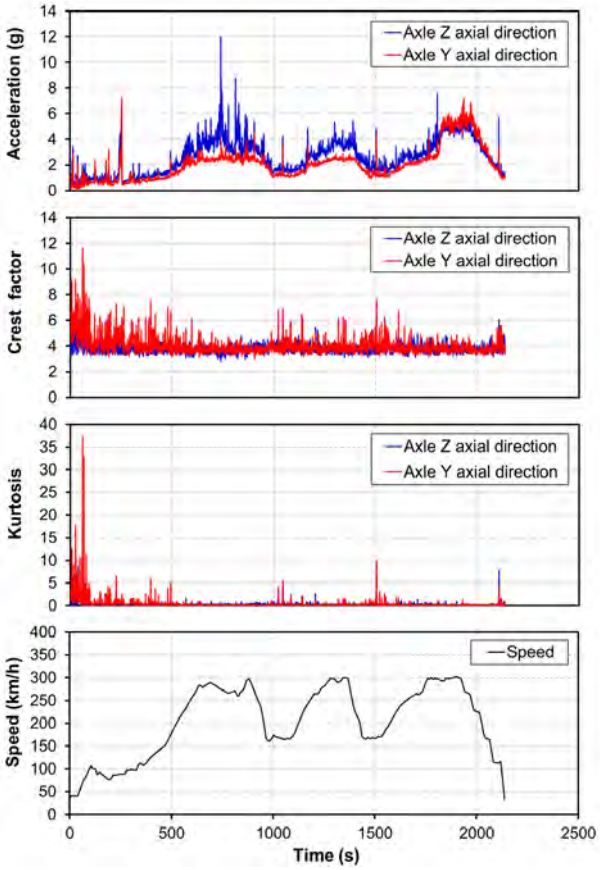

a) 입력측 기어박스




b) 출력측 기어박스

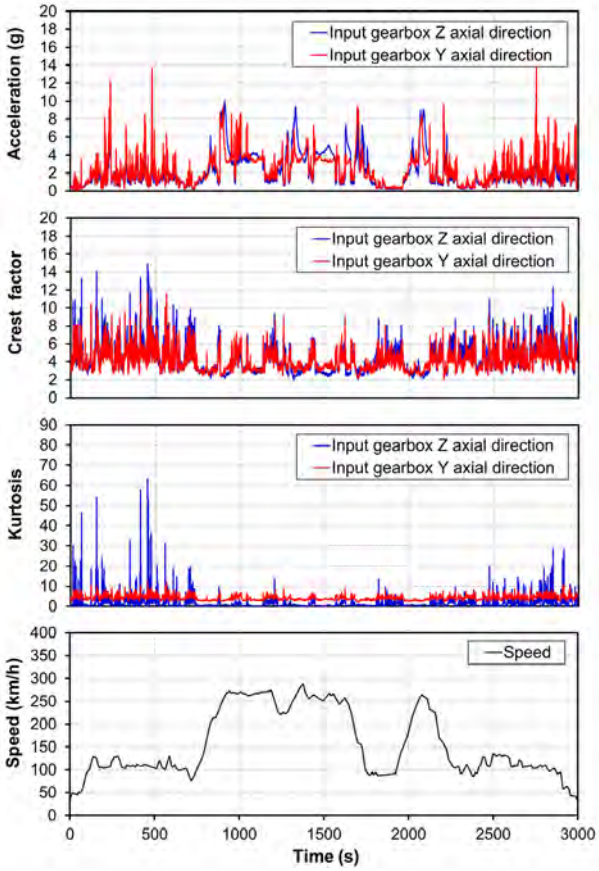



c) 대차

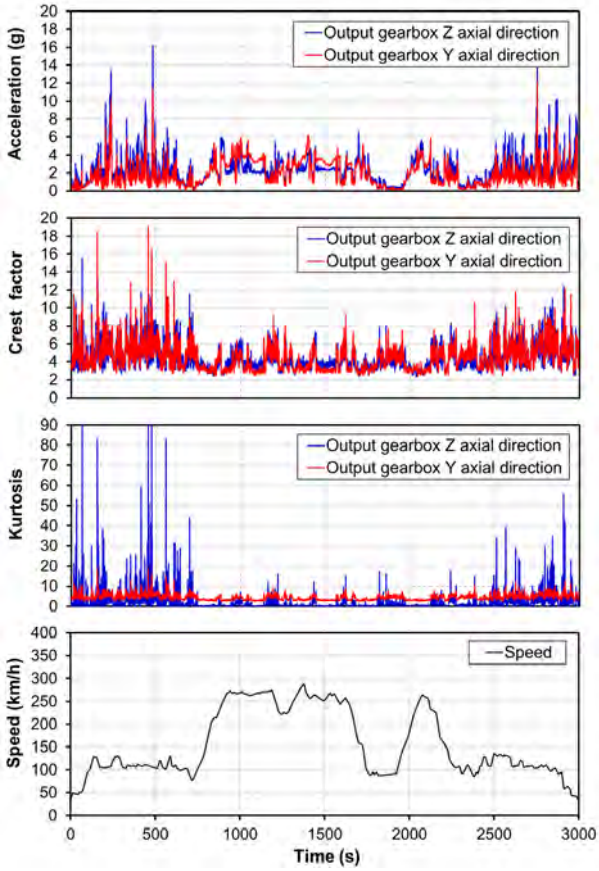



d) 축상

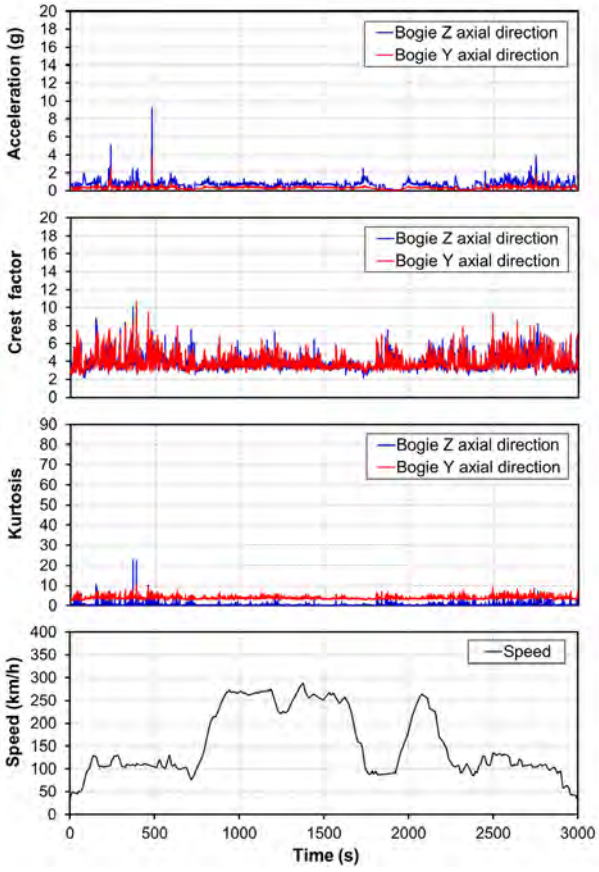
그림 2.4.150 부산역-동대구역 감속기 시간영역 진동특성분석



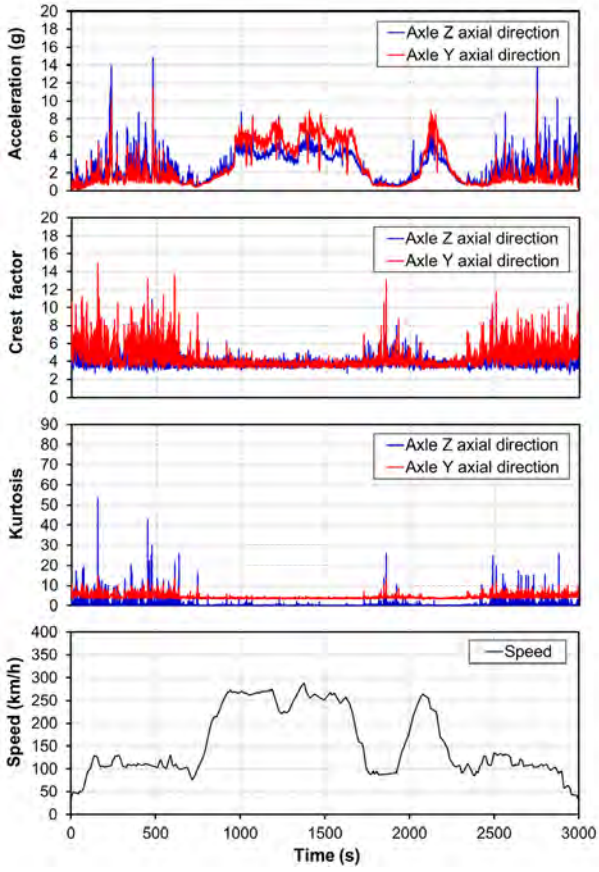

a) 입력측 기어박스




b) 출력측 기어박스

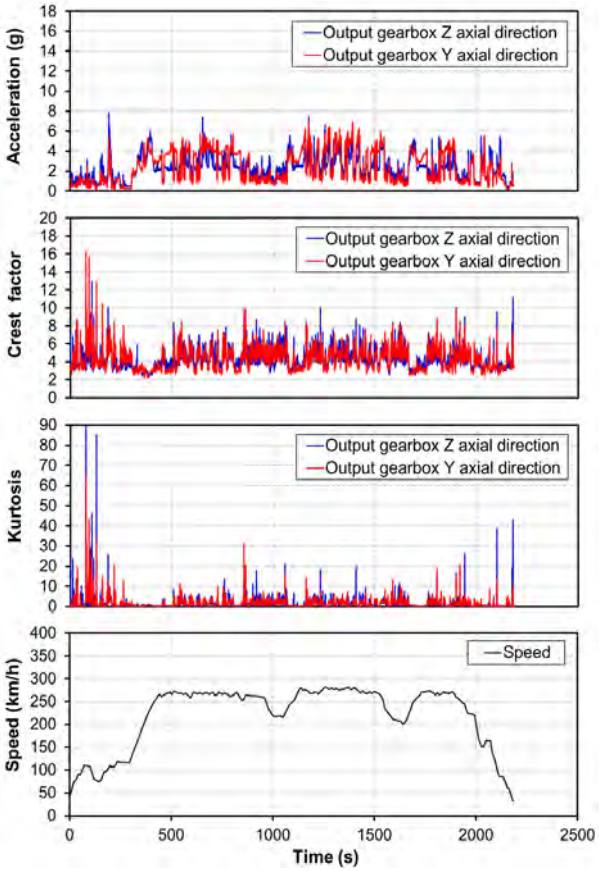



c) 대차

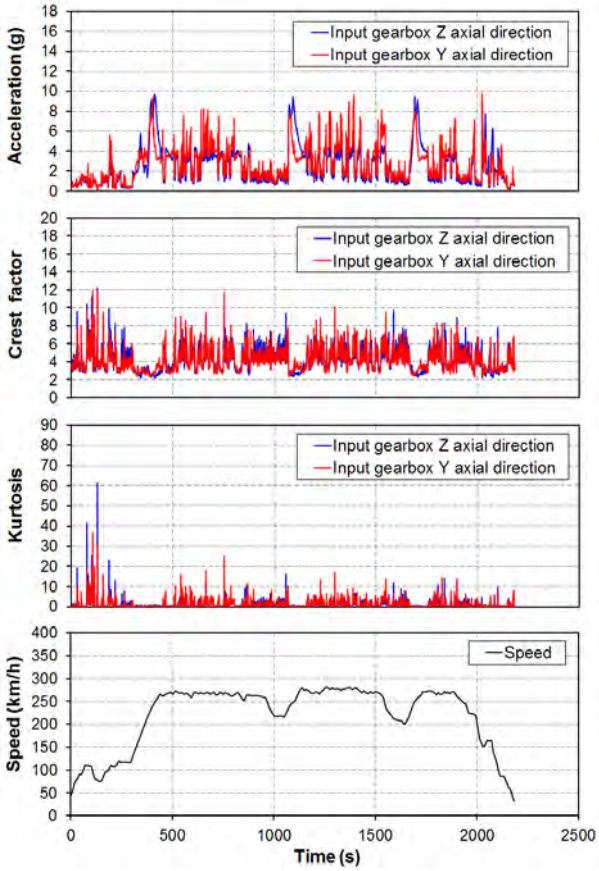



d) 축상

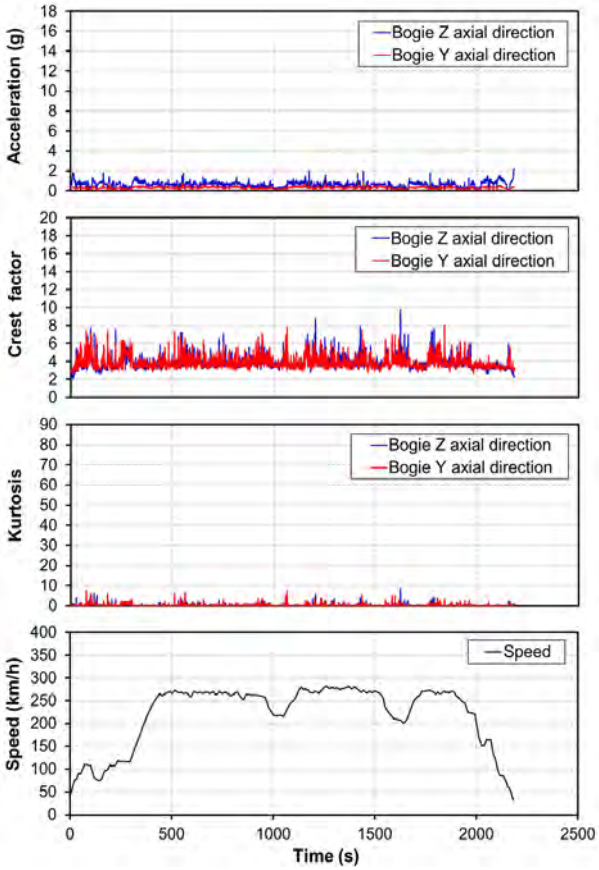
그림 2.4.151 동대구역-대전역 감속기 시간영역 진동특성분석



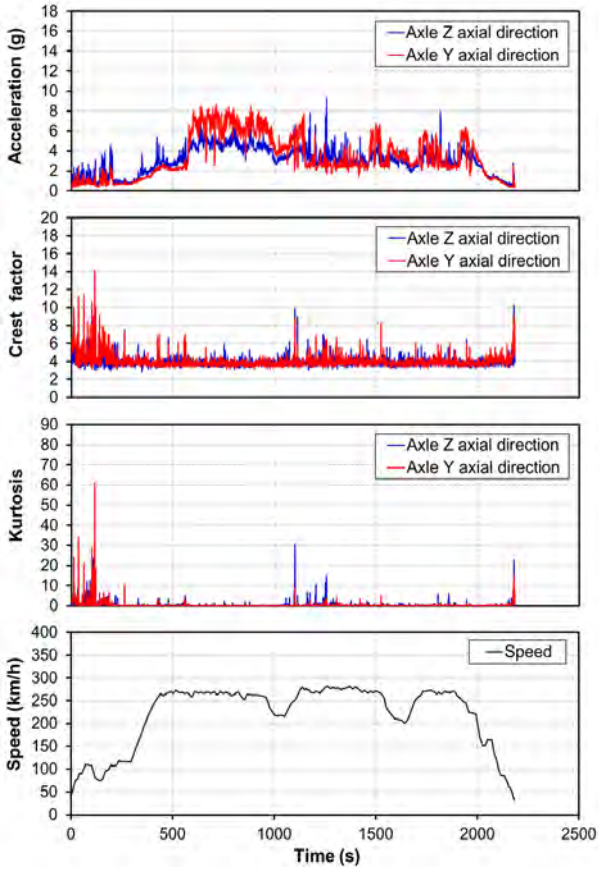

a) 입력측 기어박스




b) 출력측 기어박스

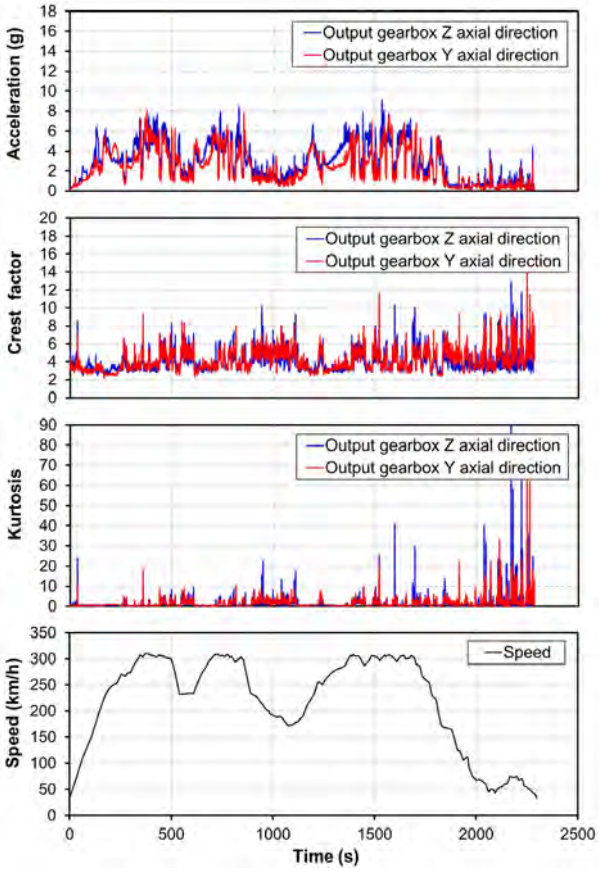



c) 대차

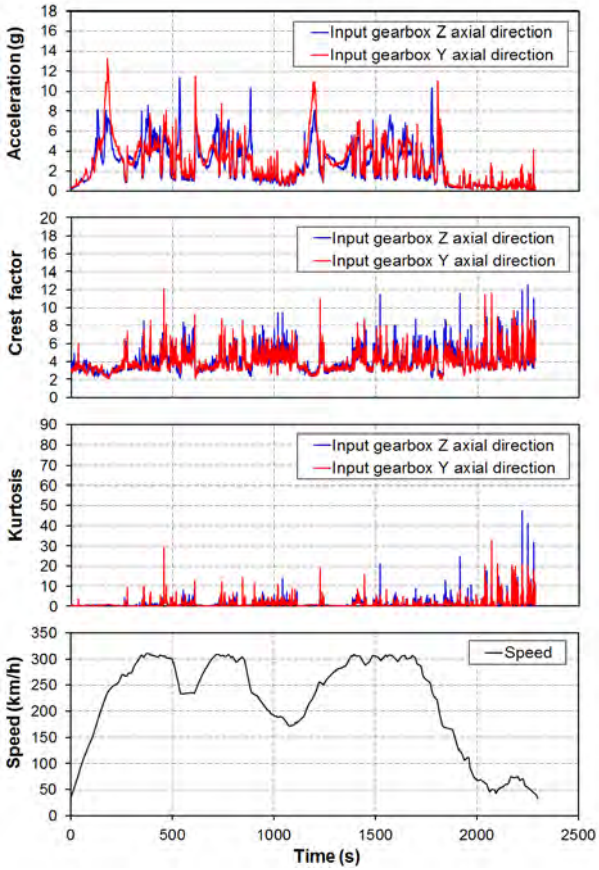



d) 축상

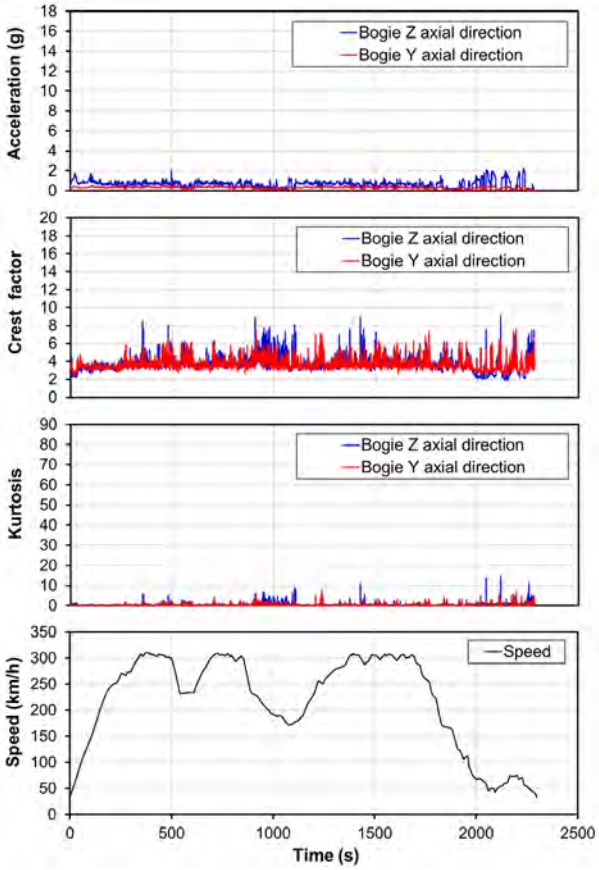
그림 2.4.152 대전역-광명역 감속기 시간영역 진동특성분석



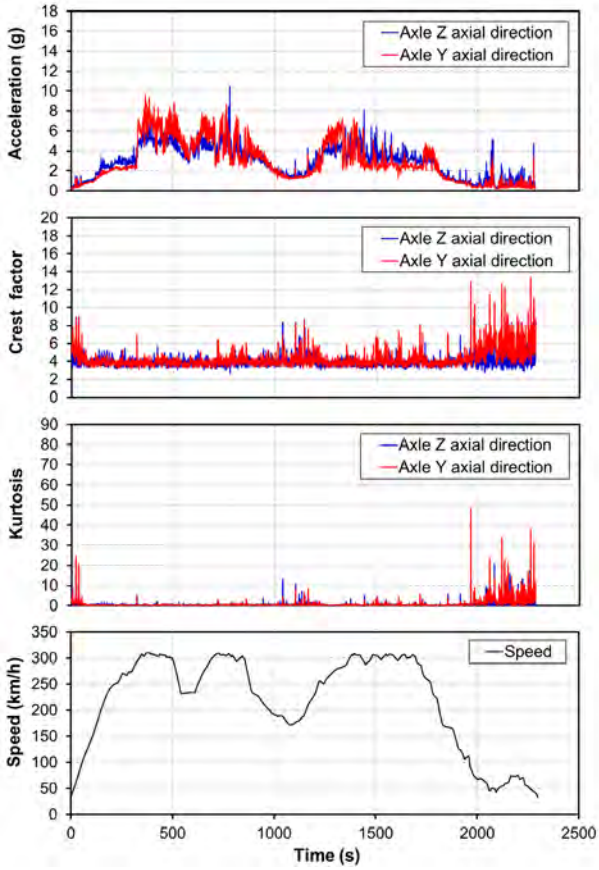

a) 입력측 기어박스




b) 출력측 기어박스

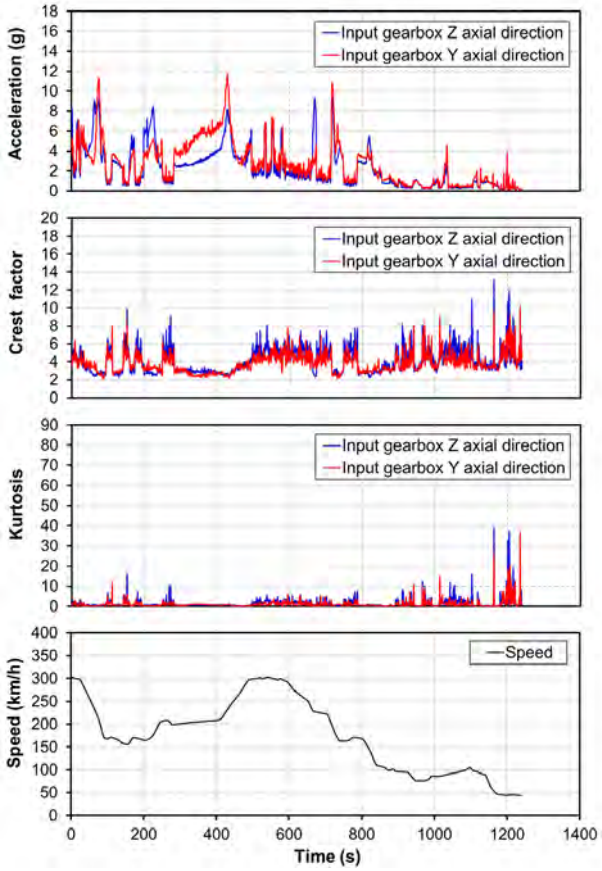



c) 대차

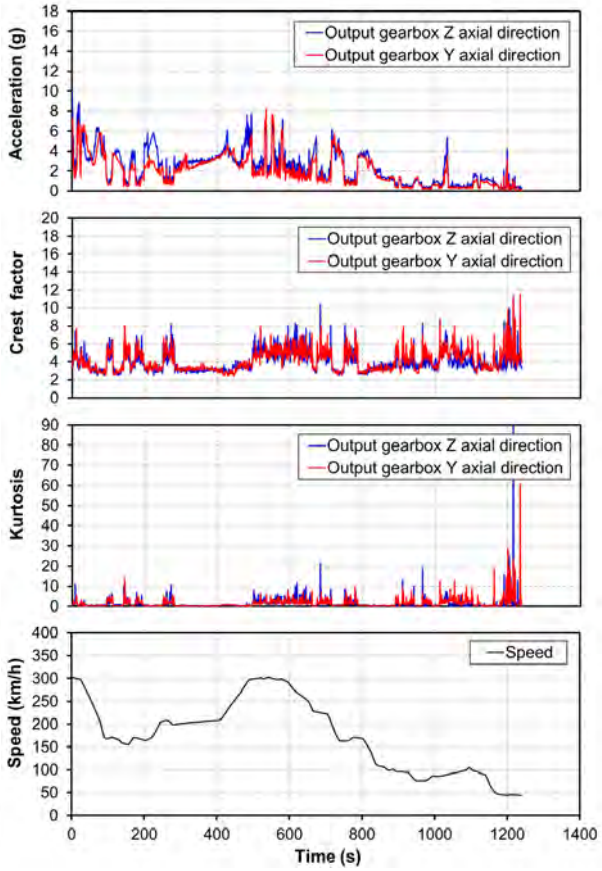



d) 축상

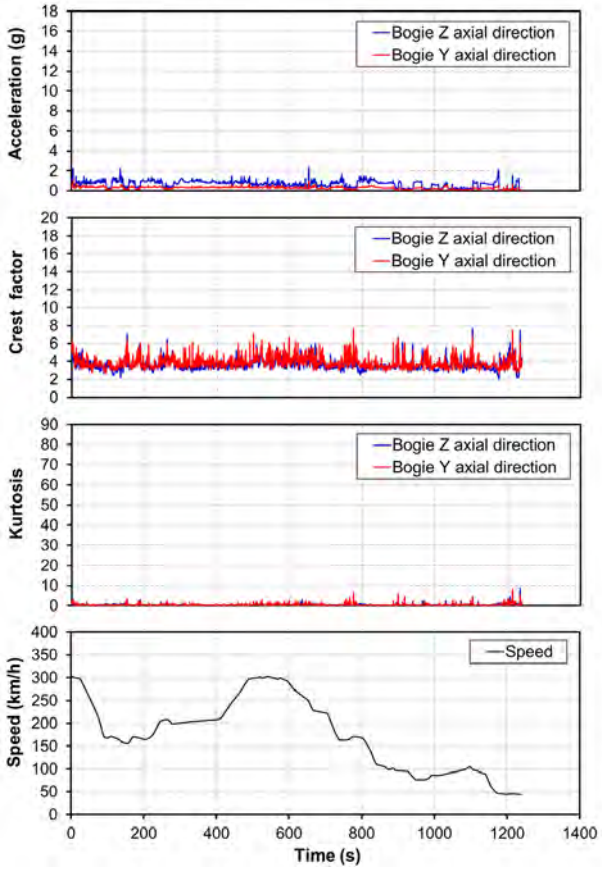
그림 2.4.153 광명역-대전역 감속기 시간영역 진동특성분석



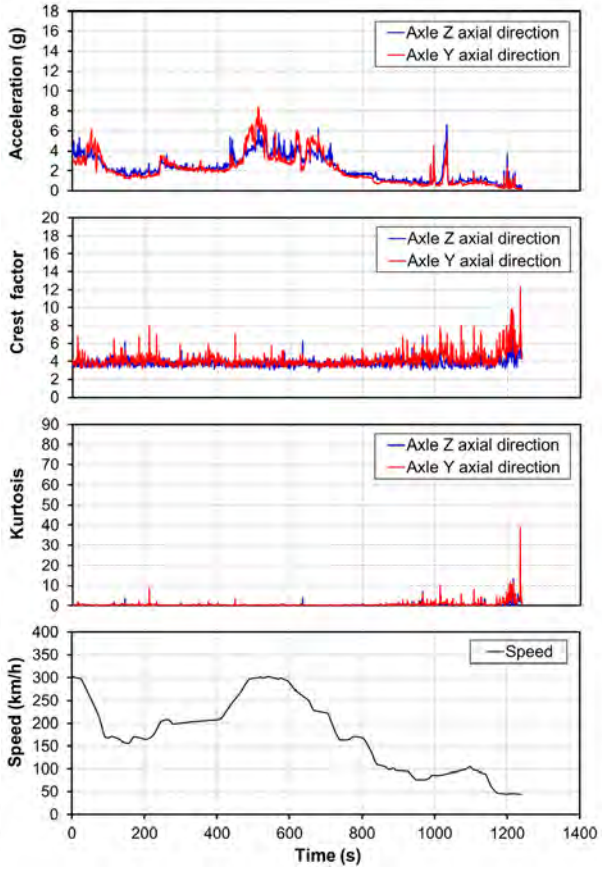

a) 입력측 기어박스




b) 출력측 기어박스




c) 대차




d) 축상

그림 2.4.154 동대구역-부산역 감속기 시간영역 진동특성분석

## 2. 감속기 결함 및 이상상태 평가 방법

### 가. 감속기 진동진단 기술 및 방법

#### (1) 감속기 진단을 위한 진동의 기초

##### (가) 진동 파라미터

진동의 크기를 나타내는 지표로서 평균치, 실효치, 피크치 등이 있다.

$$\text{평균치}(d_{av}) = \frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|dt = \frac{2}{\pi}D = 0637D \quad \text{----------} \quad (2.4.5)$$

$$\text{실효치}(d_{rms}) = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|dt} = \frac{D}{\sqrt{2}} = 0.707 \quad \text{----------} \quad (2.4.6)$$

평균치, 실효치, 피크치 등은 변위, 속도, 가속도의 단위를 갖는다. 이러한 단위를 갖는 파라미터를 유차원 파라미터라 한다. 이러한 유차원 파라미터 이외에도 다음과 같은 2개의 무차원 파라미터가 있다.

$$\text{파형률}(F_f) = \frac{\text{실효치}}{\text{평균치}}\left(= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11, \text{정현파일경우}\right) \quad \text{-------} \quad (2.4.7)$$

$$\text{파고률}(F_c) = \frac{\text{피크치}}{\text{실효치}}\left(= \frac{D}{\frac{D}{\sqrt{2}}} = 1.41, \text{정현파일경우}\right) \quad \text{-------} \quad (2.4.8)$$

표 2.4.12는 설비진단에서 자주 사용하는 무차원 징후 파라미터의 정의와 성질 및 용도를 나타내고 있다. 파형률이 1.11보다 크면, 정현파가 왜곡된 것을 나타낸다. 파고율에 대해서도 동일하게 1.41보다 크면, 정현파의 피크가 커진 것을 나타낸다.

표 2.4.12 무차원 파라미터의 성질과 주요한 용도

| 무차원 파라미터 | 정 의 | 전형적 파형의 값 | | | 용 도 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 단파형 | 정현파 | 랜덤파 | |
| 파형율 (Shape factor) | $\frac{x_{rms}}{x_a}$ | 1 | 1.11 $\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}}\right)$ | 1.253 | – 저주파영역의 언밸런스, 미스 얼라이먼트 등<br>– 맥동파형등의 정량화 |
| 파고율 (Crest factor) | $\frac{x_p}{x_{rms}}$ | 1 | 1.414 $(\sqrt{2})$ | | – 베어링의 통과진동의 정량화<br>– 차치의 맞물림진동의 평가 |
| 충격지수 (Impulse factor) | $\frac{x_p}{x_a}$ | 1 | 1.571 $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ | | – 베어링 기어의 국부결함 진단<br>– 왕복기관의 진단 |
| 틈새율 (Clearance factor) | $\frac{x_p}{(x_r)^2}$ | 1 | 1.732 $(\sqrt{3})$ | | – C, I등과 동일한 용도로 사용하지만, 특히 미소국부결함의 검출능력이 높음 |
| 커토시스 (Kurtosis valuse) | $\frac{4\text{차모멘트}}{(x_{rms})^4}$ | 1 | 1.5 | 3.0 | – 베어링, 기어의 진단<br>– 회전기의 진단 |

(나) 진동측정변수의 성질

변위는 주파수와 독립하게 기계의 움직임을 나타낸다. 변위는 원칙적으로 저주파 성분용의 변수로서, 오일위프등과 같은 불안정한 현상, 언밸런스, 미스얼라이먼트 등 현재 기계의 문제에 관한 정보를 포함한다. 속도는 변위를 일정하게 하면 주파수와 거의 동일하기 때문에, 넓은 범위의 회전속도에 걸쳐서 기계 상태를 평가하는데 적합하다. 다시 말해서 속도를 사용하면 회전속도가 변화하여도 판정기준은 일정하게 할 수 있는 장점이다. 가속도는 고주파 성분에 적합한 변수로서, 초기피로 고장의 징후를 많이 포함하고 있다.

(다) 진동측정 위치

① 케이스 진동 측정의 장단점

접촉형 가속도센서로 기계 케이스의 진동을 측정하는 장단점은 다음과 같다.

<장점>

- 축 변위를 비접촉변위 센서로 측정한 것과 비교해서 탈부착이 용이하다.
- 측정할 수 있는 주파수 범위가 넓고, 넓은 동적특성 범위를 측정할 수 있다.

<단점>

- 접촉공진의 문제가 발생할 수 있기 때문에 항상 주의해야한다.
- 변위센서로 직접 축의 움직임을 측정하는 것과 비교해서, 일반적으로 이상 검출감도가 떨어진다.
- 축과 케이스 사이의 기계임피던스가 불분명하기 때문에 정량적 평가가 곤란하다.

따라서 판전기준의 작성이 곤란하다.

② 축 진동측정의 장단점

비접촉 변위센서로 축의 움직임을 직접 측정하면 다음과 같은 장단점이 있다.

<장점>

- 저널 베어링내의 축의 이동량을 직접측정이 가능하며, 베어링의 거동과 안정성을 판정할 수 있다.
- 언밸런스와 미스어라이먼트 등을 직접 측정할 수 있다. 따라서 판정기준의 작성이 용이하다.

<단점>

- 동적특성범위가 좁다.
- 탈부착이 용이하지 못하다.
- 고주파에 대한 감도가 낮다.
- 현실적으로 고속회전기계의 축에서 적당한 부착 장소를 찾기가 용이하지 못하다.
- 축 표면이 매끄럽고, 재질도 일정해야한다.

③ 위치 선택의 기준

회전기계를 진단할 경우, 축의 변위를 측정해야하는지 혹은 케이스 진동의 변위를 측정해야하는지에 대한 판단 기준은 다음과 같다.

축 케이스 지지장치의 강성이 강하고 베어링의 강성이 약할 경우에는 축변위를 측정해야한다. 또는 회전부분의 중량 WR 과 정지부분의 중량 WS의 비가 다음과 같을 때 축변위를 측정해야 정확한 진단을 할 수 있다.

$$\frac{W_S}{W_R} > 20 \quad \text{---------- (2.4.9)}$$

축 케이스 지지장치의 강성이 약하고 베어링의 강성이 강할 경우에는 케이스의 진동을 측정해야 한다. 또는 회전부분의 중량 WR 과 정지부분의 중량 WS의 비가 다음과 같을 때 케이스의 진동을 측정해야 한다.

$$\frac{W_S}{W_R} < 10 \quad \text{---------- (2.4.10)}$$

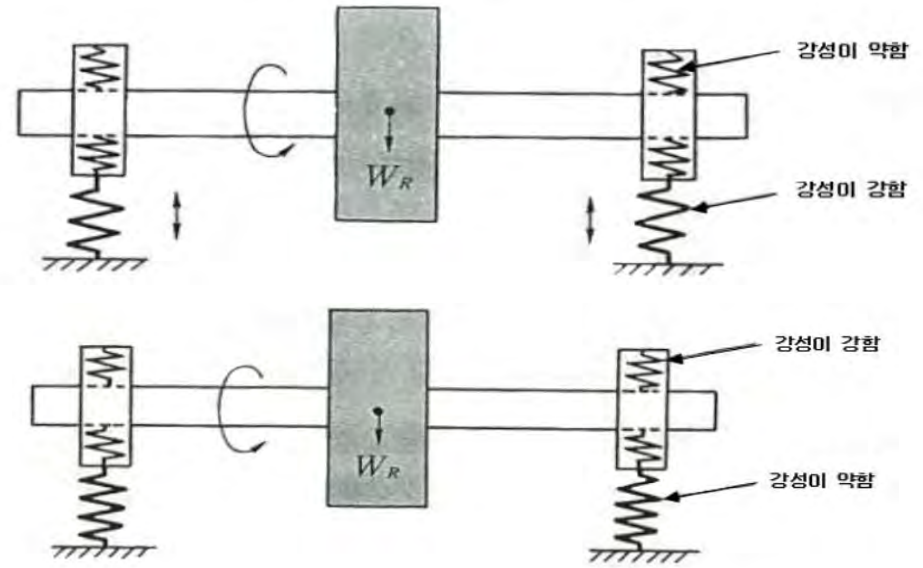



그림 2.4.155 지지부분과 축부분의 강성과 진동측정변수의 관계




그림 2.4.156 설비진단을 위한 신호처리기술

④ 신호처리법

회전기계를 진단하는 경우 우선 측정된 진동파형에 포함되어있는 노이즈 성분을 제거한 후, 정밀해석에 편리하도록 신호를 전처리한다. 전처리된 신호는 그림 2.4.156과 같이 시간영역해석기술, 주파수해석기술, 공간영역해석기술로 해석하여 이상을 나타내는 여러 종류의 특징적인 파라미터를 압출한다.

㉮ 신호 전처리 기법

신호 전처리 기법 가운데 필터링과 평균가산법은 전주파수영역에서, 포격선처리는 고주파영역에서 사용된다.

㉯ 필터링

노이즈를 제거하여 원하는 영역의 신호를 얻기 위해서는 여러 가지의 필터가 사용된다. 이 가운데 가장 많이 사용되는 4가지 필터의 특징이 다음과 같다.

- 고주파통과 필터
- 저주파통과 필터
- 대역통과 필터
- 대역제거 필터

대역통과 필터는 3종류의 필터로 구분되며, 특징은 다음과 같다.

<Butterworth 필터>

통과영역의 게인이 평탄해서 일반범용 필터로 사용한다. 감쇠특성과 위상특성이 좋다.

<Bessel 필터>

위상특성이 주파수에 대해서 선형이다. 따라서 모든 주파수성분은 동일 절대시간 만큼만 지연되고, 파형의 왜곡은 없다. 파형의 군속도가 일정하기 때문에 이 필터는 충격진동 등의 필터에 적합하다. 펄스파형의 오버랩핑 등을 막을 수 있기 때문에 다른 필터에 비해 감쇠특성이 나쁘다.

<Chevyshev 필터>

감쇠특성이 매우 우수하지만, 위상특성이 떨어진다. Bessel필터와 상반된 성질을 갖고 있다. 매우 높은 차단특성이 필요하면서 위상에 문제가 필요 없는 경우에 사용된다.

㉰ 평균가산법

평균가산법은 시간영역, 주파수영역 모두에서 사용된다. 주파수영역에서 평균가산은 FFT로 주파수영역으로 변환시킨 후 평균을 취하기 때문에 정확한 동기신호를 취하지 않을 경우 유효하다. 회전기계의 진동은 회전과 동기화되는 성분에 불규칙한 성분이 포함된 파형으로 나타낸다. 예를 들면, 유체기계에 대한 신호는 주기진동의 유체에 의한 백색성 불규칙 진동이 중첩되어 관측된다. 그러나 진단에 필요한 것은 회전에 동기화된 성분이기 때문에 이 불규칙 진동을 제거해야만 한다. 그림 2.4.157은 평균가산법의 원리를 나타낸다. 여러 신호를 더함에 따라 신호성분은 n배(n은 가산횟수)가 되며, 불규칙한 노이즈는 n1/2배가 되기 때문에 신호 S와 노이즈 N의 비는 다음과 같이 향상된다.

$$\frac{S}{N} = \sqrt{n} \quad \text{----------} \quad (2.4.11)$$

S/N비는 가산 횟수의 평방근에 비례해서 향상된다. 단 위식이 사용되는 것은 노이즈가 불규칙한 잡음의 경우에 한정되며, 유색성노이즈의 경우에는 개선효과가 감소한다. 평균가산법을 할 때 가장 중요한 점은 동기펄스를 정확하게 맞추는 것이다. 가산시점의 처짐이 발생하면 오차가 발생한다.

㉱ 포격선 처리

그림 2.4.158과 같이 베어링 혹은 기어장치에 이상이 존재하면, 높은 주파수 성분 $f_e$를 중심에 갖는 진동이 주기 $T_s$로 나타난다. 진단에 필요한 정보는 반복 주파수($f_e = 1/T_s$)이지만, 이 상태로 주파수 변환하면 반복 주파수 성분 $f_s$가 나타나지 않는다. 이러한 경우에는 그림2.4.154(b)에 나타내는 것과 같이 신호를 절대치 처리하면 신호의 주기성이 나타나서, 반복 주파수 성분 $f_s$가 나타난다. 또한 이 신호를 저주파영역 통과 필터를 이용하면, 반복 주파수 $f_s$와 그의 고주파 성분이 명확하게 나타난다.

㉲ 시간영역의 해석기술

진동파형을 시간의 함수로서 그의 특징을 해석할 경우 가장 기본적인 수법이 확률기본량의 계산이다. 진동파형의 샘플링 값은 $x_1$, $x_2$, $x_3$..., $x_n$ 이라면, 표 2.4.13에 나타낸 계산식으로 통계기본량을 계산한다. 통계기본량 가운데, 평균치, 분산, 표준편차, n차 모우멘트는 유차원 파라미터라고 하고, 변동율, Skewness, Kurtosis는 무차원 파라미터라 한다. 무차원 파라미터는 진단에 매우 유익한 지표가 되는 량으로 다음과 같은 의미를 갖는다.

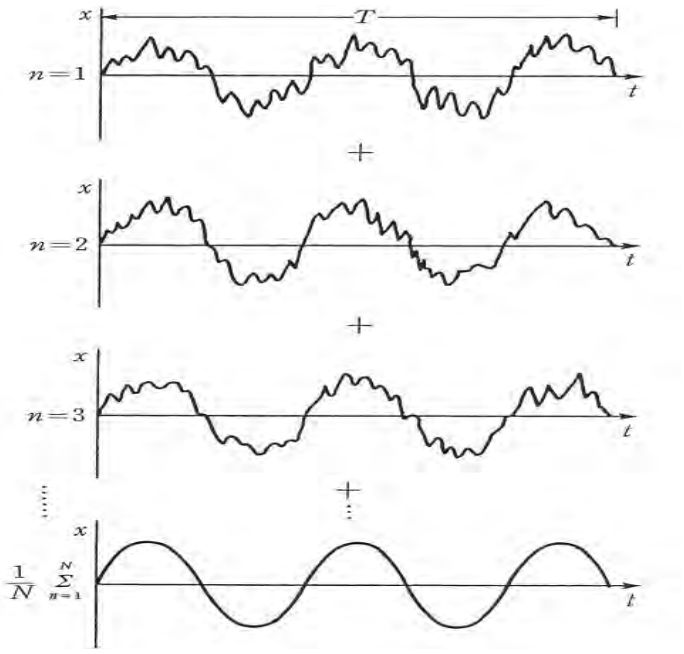



그림 2.4.157 평균가산법의 원리

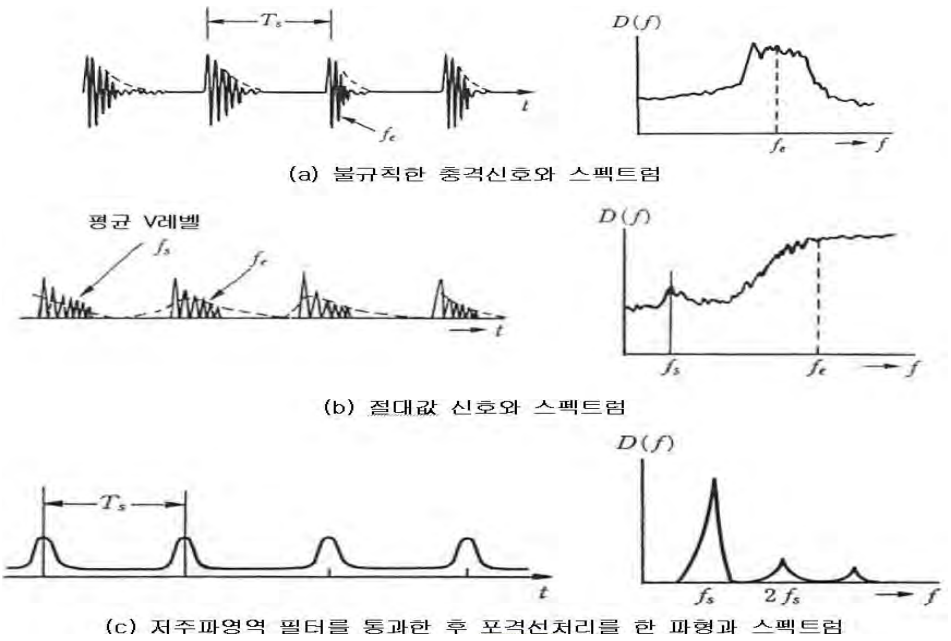



그림 2.4.158 포격선 처리한 진동파형과 스펙트럼

- 변동율

진동의 분산정도를 나타낸다. 이것은 진동파형 혹은 측정치가 평균치에 대해서 얼마나 분산되어 있는가를 나타내고, 분자의 표준편차 대신에 최고(peak)값을 대입하면 파고율(crest factor)이 된다.

- Skewness

평균치를 중심으로 진동파형의 왜곡정도를 나타낸다. 또는 진동의 비대칭성 정도를 나타내는 것으로 생각해도 관계없다. 진동파형이 대칭이라면 0이 된다. $\beta_1 > 0$이면 양의 신호, $\beta_1 < 0$ 이면 음의 신호가 왜곡되어 있다.

표 2.4.13 진동의 기본 통계량 계산법

| 구 분 | 기본 통계량 | 정 의 |
|---|---|---|
| 유차원 파라미터 | 평균치(Mean) | $\bar{x} = \frac{1}{N}\{(x_1 + x_2 + \ldots + x_n)\} = \frac{1}{N}\sum^{N} x_i$ |
| | 분산(Variance) | $V = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_1 - \bar{x})^2$ |
| | 표준편차s(Standard Devation) | $s = \sqrt{V} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_1 - \bar{x})^2}$ |
| | k차 모우멘트uk(K' th Moment) | $\mu_k = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_1 - \bar{x})^k$ |
| 무차원 파라미터 | 변동율 C.V (Coefficent of Variance) | $C.V = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균치}} = \frac{s}{\bar{x}}$ |
| | Skewness | $\beta_1 = \frac{3\text{차 모우멘트}}{(\text{표준편차})^3} = \frac{\mu_3}{s^3}$ |
| | Kurtosis | $\beta_2 = \frac{4\text{차 모우멘트}}{(\text{표준편차})^4} = \frac{\mu_4}{s^4}$ |

- Kurtosis

진동파형이 얼마나 충격적인가, 혹은 파형이 얼마나 피크값이 뾰족한가를 나타내는 값이다. 베어링 혹은 기어장치에 국부적인 결함이 있으면, 진동은 충격적이다. 따라서, Kurtosis는 베어링 혹은 기어장치의 진단에 많이 이용되고 있다. 진동파형의 성질은 확률밀도함수 p(x)를 구하면 더욱 확실히 알 수 있다. 진폭이 x와 $x+\Delta x$의 사이에 존재하는 확률을 생각하면, 시간율을 다음 식 (2.4.12)와 같이 정의 된다.

$$\frac{\Delta t_1+\Delta t_2+\ldots+\Delta t_n}{T} \quad \text{----------} \quad (2.4.12)$$

정상상태 진동의 경우 관측시간 T를 충분히 크게 하고, 진폭의 미소량 $\Delta x$을 작게 하면 위의 값은 일정한 값에 근접한다고 알려져 있다. 진동파형의 확률밀도함수는 다음 식 (2.4.13)와 같이 정의된다.

$$p(x)=\lim_{\substack{\Delta t\to 0\\ n\to\infty}}\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i}{T}\frac{1}{\Delta x} \quad \text{----------} \quad (2.4.13)$$

진동파형이 불규칙하면 확률밀도함수는 정규분포가 된다. 이 확률밀도함수를 사용하면 진동파형의 특징을 통계적으로 취급할 수 있다. 또한 확률밀도함수를 사용하면 통계기본량을 다음과 같이 간단히 구할 수 있다.

평균치 : $\bar{x}=\int_{-\infty}^{\infty} x\,p(x)dx$

자승 평균치 : $\overline{x^2}=\int_{-\infty}^{\infty} x^2\,p(x)dx$

실효치 : $x_{rms}=\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} x^2\,p(x)dx}$

Skewness : $\beta_1=\int_{-\infty}^{\infty}(x-\bar{x})^3\,p(x)dx/x_{rms}^3$

Kurtosis : $\beta_2=\int_{-\infty}^{\infty}(x-\bar{x})^4\,p(x)dx/x_{rms}^4$

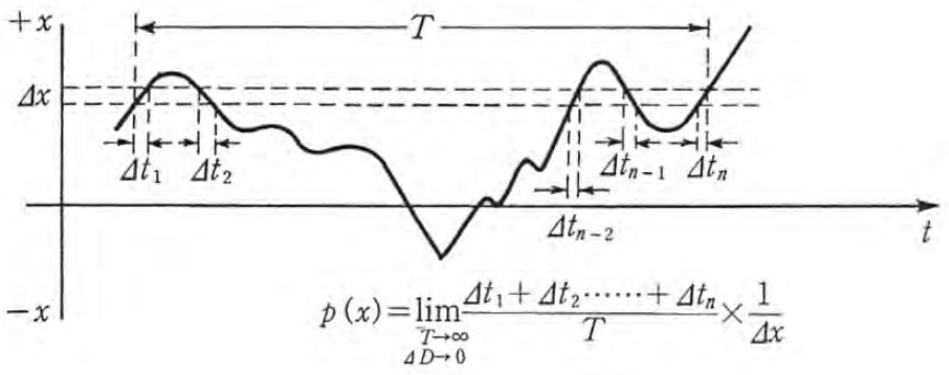



그림 2.4.159 진동파형의 확률밀도함수

㉮ 진동의 회전속도특성의 해석기술

● 차수비분석

회전기계의 회전주파수 $f_r$은 회전속도를 N(rpm)으로하면 다음 식 (2.4.14)로 정의된다.

$$f_r = \frac{N}{60}\,(Hz) \quad \text{----------} \quad (2.4.14)$$

회전기계를 진단할 경우에는 회전주파수의 정수배 성분 $f_r$, $2f_r$, ...., $nf_r$과 회전 주파수의 분수배 성분 $f_r/2$, $f_r/3$, ...., $f_r/n$ 및 그것에 대한 합과 차 성분에 착목해야 한다. 그러나 위의 식으로부터 회전주파수와 그의 성분들은 회전속도에 따라 변화한다. 이러한 불합리함을 제거하기 위해서 주파수축을 회전주파수 $f_r$로 정규화한 것을 이용한다. 주파수 축을 $f/f_r$로 스펙트럼 분석을 하는 것을 차수비 분석이라고 한다.

● 차수 트래킹 분석

설비진단에서는 회전주파수의 특정 고차성분에 착목해서 회전속도가 변화할 때 그의 성분이 어떻게 변화하는가를 관측할 경우가 있다. 예를 들면 회전기계의 이상을 공진으로 확인하고 싶을 경우에는 회전주파수의 1차성분이 회전속도의 상승에 따라서 어떻게 변화하는가를 관측한다. 이와 같이 회전속도가 변화할 때 동일한 차수성분의 진동을 추적하여 표시하는 방법을 차수 트레킹분석이라고 한다.

● 캠벨해석

캠밸선도에서는 회전기계의 회전속도의 변화에 대응하는 진동특성의 변화를 해석하는 수법이다. 회전기계를 구성하는 각 부재의 공진상황과 회전축의 위험속도의 분석에 매우 편리하며,캠벨선도는 차수비 분석, 차수 트레킹 분석의 정보를 1장의 선도로 표시할 수 있다.

㉯ 진동의 공간특성 해석법

회전기계의 진단에 있어서 진동이 공간적으로 어떤 거동을 하는 가를 파악하는 매우 중요한 정보가 된다.

● 진동공간특성을 나타내는 지표

회전축의 수평축의 진폭값 $V_X$를 기준으로 횡방향의 진폭값 $V_Y$, 및 축방향의 진폭값 $V_Z$의 강도를 표시한다. 종진동비는 회전기계에 덜컥거림이 있는 경우, 급격히 증가하는 성질을 갖고 있으며, 종진동비 $S$는 다음 식 (2.4.15)와 같다.

$$S = V_Y / V_X \quad \text{----------} \quad (2.4.15)$$

축진동비 $T$는 축방향의 진폭값과 수평방향의 진폭값의 비로 정의된다. 축진동비는 미스어라이먼트 혹은 축의 굽힘 등의 진단에 이용된다.

$$T = V_Z / V_X \quad \text{----------} \quad (2.4.16)$$

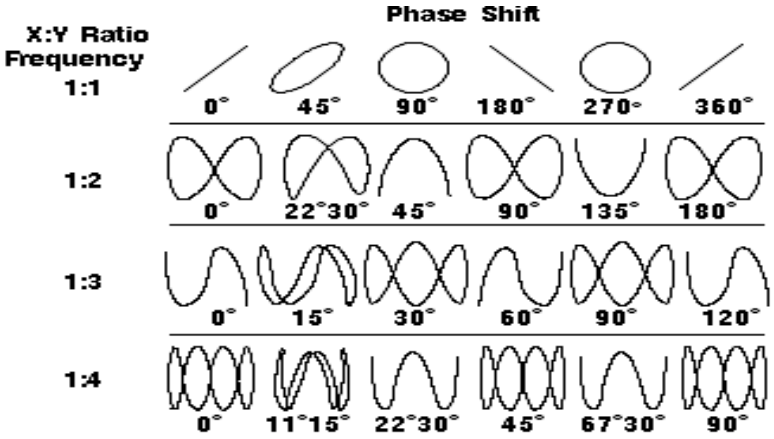



그림 2.4.160 리사쥬 선도

● 리사쥬 해석

리사쥬해석은 수평방향진동과 종방향진동을 싱크로스코프에 입력시켜 리사쥬도형을 그린다. 횡축의 진폭비 $a/b$와 위상차 $\alpha-\beta$의 값으로 여러 가지의 도형이 그려진다. 축중심의 선회운동의 궤적이 직감적으로 관측할 수 있기 때문에 진단에 매우 유익하며, 진동의 공간적 특성을 해석할 경우 매우 유익한 해석방법이다.

그림 2.4.160에 회전기계의 전형적인 이상과 진동파형, 및 리사쥬의 관계를 나타내고 있다. 그림 가운데 회전동기신호는 매우 중요한 움직임을 하고 있다. 1싸이클에 2개의 회전동기신호가 있는 것은 회전주파수의 약 1/2의 주파수인 것을 의미한다.

(2) 진동에 의한 감속기 진단 방법

(가) 감속기의 진단방법

감속기에서 발생하는 진동을 크게 구분하면 강제진동과 자려진동 2종류가 있다. 강제진동은 회전체가 회전해서 자기자신을 진동시키기도 하고 외부에서 전달되는 힘(불균형력, 외부에서의 힘)의 주파수와 동일하거나 정수배의 주파수 진동이 발생한다. 이러한 강제력의 주파수와 회전축의 고유진동수가 일치하면 진동의 진폭이 급격히 커진다. 자려진동은 회전체의 회전에 의한 힘 등의 강제력의 주파수와 무관하게 회전체의 고유진동수 혹은 그 근방에서 진동이 발생한다. 임의의 회전수에서 갑자기 진동이 커지고 그 때의 진동수는 회전체의 고유진동수가 되며 강제력의 주파수(회전주파수)와 일치하지 않는 것이 일반적이다.

- 주파수 분석을 해서 발생하는 진동의 주파수를 조사한다.
- 진동의 강제력이 회전체의 회전에 의한 힘인가를 위상분석으로 조사한다.
- 회전수를 변화시켜, 진폭값이 어떻게 변화하는지 진동형태분석으로 조사한다.

위의 것을 수행하면 이상의 원인을 파악할 수 있다. 또한 발생하는 진동이 저주파수 영역에서 발생할 때 진동을 가속도로 측정할 경우 속도로 변화한 후 분석하면 좋다.

① 측정 파라미터의 선정방법

진동센서는 변위, 속도, 가속도계가 활용되고 있다. 감속기는 저주파에서 고주파까지 다양한 주파수 성분을 갖는 진동이 발생하고 있어 낮은 주파수(1 kHz이하)는 속도를 높은 주파수(1 kHz이상)

에서는 가속도를 파라미터로 사용하는 경우가 많다. 일반적으로 그림 2.4.157과 같이 주파수 영역별로 측정 파라미터를 선정한다. 그 이유는 기계진동의 성질에 의한 것으로, 정현파의 진동변위 $D$, 진동속도 $V$, 진동가속도 $A$, 진동각속도 $\omega$의 관계는 다음 식 (2.4.17)과 같다.

$$D = \frac{V}{\omega} = \frac{A}{\omega^2} \quad \text{----------} \quad (2.4.17)$$

주파수가 낮을수록 변위 감도가 높고, 주파수가 높을수록 가속도의 감도가 높게 나타나기 때문이다. 감속기를 진동으로 진단할 경우 측정파라미터의 선택은 진동의 종류를 측정하려는 주파수대역으로 구분하여 선정해야만 한다. 미국기어제작협회(AGMA)에서는 그림 2.4.157과 같이 손상예방곡선을 만들어서 설비진단 시 측정 파라미터를 선정하고 있다.

10 Hz이하의 저주파수 영역에서는 일정한 진동변위레벨을 판정기준으로 이용하고 있으며 10 Hz ~1 kHz의 중간주파수 영역에서는 일정한 진동속도레벨을 이용하고 1 kHz이상의 고주파수 영역에서는 일정한 가속도레벨을 판정기준으로 진단을 수행한다. 따라서 감속기의 경우에도 그림 2.4.161의 손상예방곡선에 채용한 진동파라미터를 이용하여 1 kHz이하의 저주파수 영역에서는 진동속도를 1 kHz~10 kHz까지의 고주파수 영역에서는 진동가속도를 이용하는 것이 바람직하다. 단, 진동속도와 진동가속도에 의해서 검출할 수 있는 이상상태의 종류는 약간 다르기 때문에 양쪽을 고려한 진단을 수행해야 할 것이다.

② 측정포인트의 선정

일반적으로 고속회전기계에서 축의 진동, 중고속 회전기계에서는 베어링의 진동을 측정하여 진단에 많이 이용한다.

베어링 진동을 측정하는 경우 고주파진동에서 진동의 감쇠가 크기 때문에 측정위치가 변하면 측정값이 크게 변하며 기계의 강성은 방향에 따라 다르기 때문에 저주파수 진동은 측정방향에 따라 달라진다. 그리고 저주파수 진동은 이상의 종류에 따라서 발생하는 진동의 방향이 달라지기 때문에 수평, 수직, 축의 3방향을 측정하는 것이 바람직하다. 따라서 고속철도용 감속기의 경우 베어링과 기어의 측정위치 축 케이스로 선정하는 것이 바람직하다.

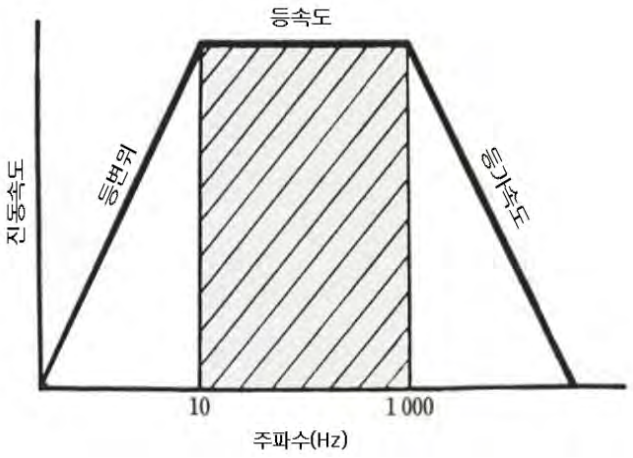



그림 2.4.161 손상예방곡선

③ 판정기준

㉮ 절대판정방법

회전기계의 절대판정기준은 다음과 같은 항목을 고려해서 작성한다.

- 이상 시 진동현상의 이론적인 고찰
- 실험에 의한 진동현상의 해명
- 측정데이타의 통계적 평가
- 국내외 참고문헌, 규격의 조사

㉯ 상대치 판정방법

절대치판정방법이 작성되어 있지 않은 경우에는 과거의 실험 데이터 등을 이용해서 정상값의 몇 배인가를 파악해서 상대치 판정기준을 적용한다. 그러나 일반적으로 두 가지 판정방법을 이용하는 것이 좋다.

표 2.4.14 회전기계의 판정기준

| | |
|---|---|
| 절대판정기준 | 동일 부위(베어링 위)에서 측정한 값을 판정기준과 비교해서 판정한다. |
| 상대판정기준 | 동일부위를 정량적으로 측정해서 시계렬을 비교하여 정상적인 경우의 값을 초기치로해서 그것에 얼마나 큰가를 비교해서 판정한다. |
| 상호판정기준 | 동일한 기계가 복수 있는 경우 그것들을 동일조건에서 측정하여 상호 비교 하는 것으로부터 판정한다. |

(3) 베어링의 진단원리

(가) 베어링의 회전메카니즘

베어링의 구조는 그림 2.4.162와 같이 내외륜궤도를 베어링이 접촉하면서 회전하고 있다.

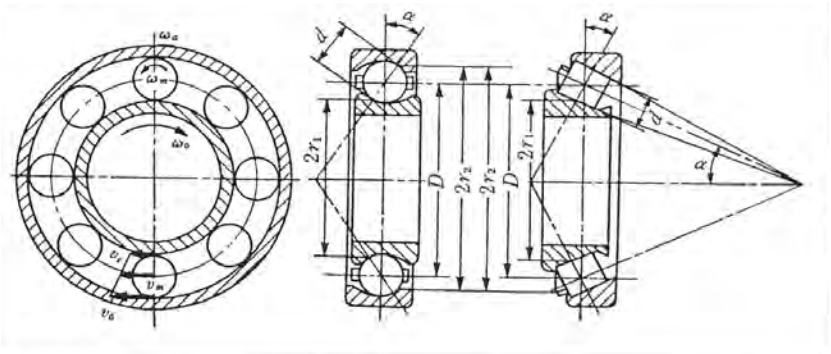


그림 2.4.162 베어링의 구조

여기서, $D$ : 베어링의 피치 원직경, $d$ : 베어링 직경, $r_1$ : 내륜궤도의 반경, $r_2$ : 외륜궤도의 반경, $\alpha$ : 접촉각 을 나타낸다.

그리고 다음 가정을 통하여 베어링의 메카니즘을 나타낼 수 있다.

- 궤도륜과 베어링 사이에는 미끄럼접촉이 없음
- 레디알, 트러스트 방향하중을 받을 때의 각부의 변형은 없음

이상과 같이 가정하여 기하학적 조건으로부터 축이 회전하면 다음 식과 같은 주파수가 발생한다.

- 내륜의 1점이 1개의 베어링과 접촉하는 주파수

$$f_i = \frac{1}{2} f_0 \left(1 + \frac{d}{D} cos\alpha\right)(Hz) \quad \text{---------- (2.4.18)}$$

- 외륜의 1점이 1개의 베어링과 접촉하는 주파수

$$f_c = \frac{1}{2} f_0 \left(1 - \frac{d}{D} cos\alpha\right)(Hz) \quad \text{---------- (2.4.19)}$$

- 회전체의 1점이 내륜 혹은 외륜과 접촉하는 주파수

$$f_b = \frac{1}{2} \times f_0 \times \frac{d}{D} f_0 \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2\alpha\right](Hz) \quad \text{---------- (2.4.20)}$$

여기서, $f_o$ : 축의 회전주파수, $D$ : 베어링의 피치원직경, $Z$ : 베어링의 수, $d$ : 베어링의 베어링직경, $\alpha$ : 접촉각을 나타낸다.

(나) 베어링의 공전주기

베어링은 축의 주위를 얼마큼의 주기로 회전할까. 여기서 베어링의 공전주기에 대해서 생각해보자. 앞에서 기술한 가정(궤도륜과 베어링의 사이에 미끄럼접촉이 없음)을 만족하기 위해서는 다음과 같이 식 (2.4.21)이 성립해야만 한다.

$$v_m = \frac{1}{2}(v_i + v_o) \quad \text{---------- (2.4.21)}$$

여기서, $v_i$, $v_o$, $v_m$ 은 각각 내륜, 외륜의 회전속도, 베어링의 공전속도로서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$v_i = r_1\omega_o = \pi D f_o \left(1 - \frac{d}{D} cos\alpha\right) \quad \text{---------- (2.4.22)}$$

$$v_o = r_2\omega_o = \pi D f_a \left(1 + \frac{d}{D} cos\,\alpha\right) \quad \text{---------- (2.4.23)}$$

$$v_m = \frac{1}{2} d\omega_m = \pi d f_m \quad \text{---------- (2.4.24)}$$

여기서, $w_o$, $w_a$, $w_m$은 각각 내륜, 외륜, 베어링 공전의 각속도, $f_a$는 외륜의 회전주파수

($\omega_a = 2\pi f_a$), $w_m$은 베어링의 공전주파수($\omega_m = 2\pi f_m$)이다.

상식을 식 (2.4.21)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$f_m = \frac{1}{2}\left[f_o\left(1-\frac{d}{D}cos\,\alpha\right)+f_a\left(1+\frac{d}{D}cos\,\alpha\right)\right](Hz) \quad \text{---------- (2.4.25)}$$

상식은 정지좌표계에서 본 베어링의 공전주파수이다. 따라서 베어링 케이스를 정지좌표계로 생각하면, 내륜의 1점이 1개의 베어링과 접촉하는 주파수는

$$f_i = f_0 - f_m = \frac{1}{2}(f_0 - f_a)\left(1+\frac{d}{D}cos\,\alpha\right)(Hz) \quad \text{---------- (2.4.26)}$$

또는 외륜의 1점이 1개의 베어링과 접촉하는 주파수는 다음과 같다.

$$f_c = f_a - f_m = \frac{1}{2}(f_a - f_0)\left(1-\frac{d}{D}cos\,\alpha\right)(Hz) \quad \text{---------- (2.4.27)}$$

(다) 베어링의 자전주기

베어링의 자전주기에 대해서 고려하자. 베어링의 자전에 의한 회전주파수는 베어링 케이스에 대한 내륜 및 외륜의 회전주파수의 비로 각각의 반경비에 반비례하는 것이 가정(궤도륜과 베어링의 사이에 미끄럼접촉이 없음)으로부터 알 수 있다. 따라서 다음과 같이 2개의 식이 성립한다.

$$\frac{f_b}{f_i} = -\frac{D}{d}\left(1-\frac{d}{D}cos\alpha\right) \quad \text{---------- (2.4.28)}$$

$$\frac{f_b}{f_c} = -\frac{D}{d}\left(1+\frac{d}{D}cos\alpha\right) \quad \text{---------- (2.4.29)}$$

여기서, 상식 우변의 음의 부호는 정지좌표계에서 본 내륜의 회전방향과 베어링의 자전방향이 역이기 때문이다. 베어링의 1점이 내륜 혹은 외륜과의 접촉하는 주파수는 다음과 같이 나타난다.

$$f_b = \frac{1}{2} = \frac{D}{d}(f_a - f_o)\left\{1-\left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos\alpha\right\}(Hz) \quad \text{---------- (2.4.30)}$$

(라) 베어링의 진동측정 및 신호처리 요령

베어링 진단을 위한 신호처리 순서도를 그림 2.4.163에 나타내고 있다. 진동가속도 센서를 설치하는 장소는 가능한 피진단축의 근방으로 선정하여 축의 결함에 의해서 발생하는 링킹주파수부근의 진동을 측정하기 용이해야 한다. 축 케이스위의 검출감도는 거의 유사하지만 링킹주파수가 높이지면 주파수 센서는 축 부근에 설치해야만 한다. 신호처리는 링킹주파수를 검출하기 위해서 밴드패스 필터와 포격선 처리를 필수적으로 해야 한다.

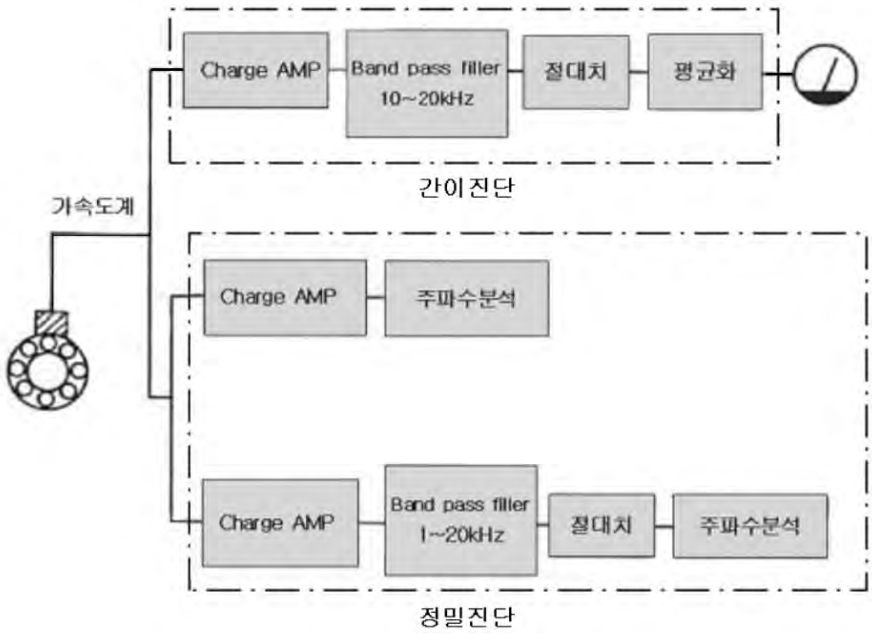



그림 2.4.163 베어링 진단을 위한 신호처리 순서도

일반적으로 포격선 처리되어진 파형을 FFT해석하면 각 이상상태에 대응하는 스펙트럼 성분이 나타나기 때문에 이상 상태의 내용을 진단할 수 있다. 그림 2.4.164는 이상상태와 시계열 파형 및 대응하는 주파수 스펙트럼을 정리하였다. 이와 같이 FFT해석과 대응하는 통과주파수성분의 유무를 분석하면 비교적 간단히 이상의 종류와 발생위치를 파악할 수 있다.

이상상태가 얼마나 진행되었는지를 파악하기 위해서는 무차원 파라미터를 이용한다. 무차원 파라미터는 시간영역과 주파수영역에 대한 두 가지 지표가 있다. 시간영역의 무차원 파라미터는 파고율(Crest Factor : Fc)과 Kurtosis로 파악할 수 있다. 그림 2.4.165는 축의 노화진행과 함께 변화하는 Kurtosis를 나타내고 있다.

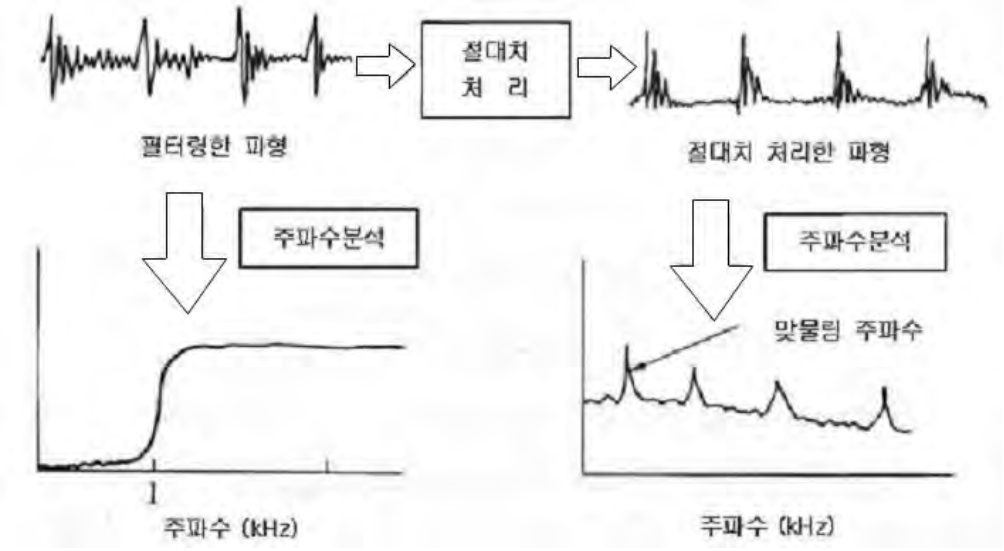



그림 2.4.164 베어링 진단을 위한 신호 전처리

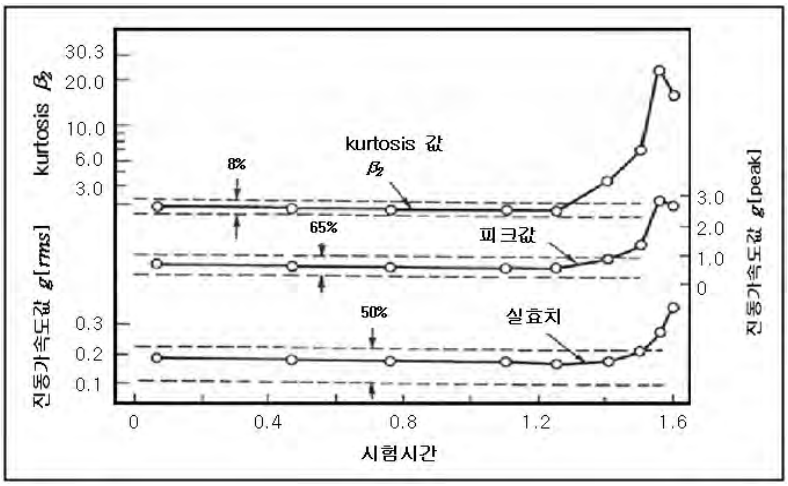



그림 2.4.165 베어링 진단을 위한 신호처리

위 그림 2.4.165에서 노화진행과 함께 Kurtosis가 상승하는 것을 알 수 있다. Kurtosis의 장점은 정상 시의 값이 일정한 값 3을 나타낸다. 피크치과 실효치는 정상 시의 값이 축마다 다르지만, 부하 등과 같은 운전조건의 영향을 거의 받지 않는 장점이 있다.

주파수영역에서의 노화지표는 축의 종합노화도로 다음과 같이 정의된다.

$$Df_a = \frac{\sum P_p(f_{a11})}{\sum P(n\Delta f)} \quad \text{----------} \quad (2.4.31)$$

여기서, $\sum P(n\Delta f)$는 진동스펙트럼의 총에너지,

$\sum P_p(f_{a11})$는 모든 통과주파수성분의 에너지 합을 나타낸다.

위 식(2.4.31)은 모든 진동 파워에 대한 모든 통과주파수성분의 합에 대한 비로 축의 종합 노화도를 나타낸다.

동일하게 내륜의 노화도는 다음 식 (2.4.32)와 같이 정의된다.

$$Df_u = \frac{\sum P(nf_{in})}{\sum P(n\Delta f)} \quad \text{----------} \quad (2.4.32)$$

여기서, $\sum P(n\Delta f)$는 진동스펙트럼의 총에너지, $\sum P(nf_{in})$는 내륜 통과주파수성분의 에너지 합을 나타낸다.

위 식 (2.4.32)는 모든 진동 파워에 대한 내륜의 통과주파수성분의 합에 대한 비로 축의 내륜의 노화도를 나타낸다. 동일하게 외륜의 노화도, 베어링의 노화도, 가이드레일의 노화도 등도 각각의 통과 주파수의 에너지와 전 진동에너지의 비로 정의된다.

(4) 기어의 진단원리

(가) 기어의 맞물림

그림 2.4.166과 같이 기어는 대소의 기어가 서로 맞물려 회전할 때 대치자의 톱니1과 소기어의 톱니A가 맞물리고, 다음에 대기어의 톱니2와 소기어의 톱니B가 맞물릴 때 까지 시간을 맞물림 주기라고 하며, 맞물림 주기의 역수를 기어의 맞물림 주파수라고 한다.

기어의 맞물림 주파수는 다음 식 (2.4.33)으로 표현된다.

$$f_m = Z_1 \frac{N_1}{60} = Z_2 \frac{N_2}{60} \quad \text{----------} \quad (2.4.33)$$

여기서, $Z_1$ : 대기어의 개수, $Z_2$: 소기어의 개수를 나타낸다.

$Z_1$과 $Z_2$가 불분면한 경우에는 다음 식 (2.4.34)로 구할 수 있다.

$$Z = \frac{D}{M} \quad \text{----------} \quad (2.4.34)$$

여기서, $D$는 기어의 피치원 직경, $M$은 모듈을 나타낸다.

(나) 기어의 진단법

① 진동측정과 신호처리

기어장치의 정밀진단을 위해서 진동가속도센서는 일반적으로 축 케이스 위에 설치한다. 진동측정은 맞물림 주파수 부근의 주파수영역의 진동을 측정하는 저주파수 영역과 기어의 톱니의 고유진동수 부근의 고주파진동을 측정하는 고주파영역의 2채널로 수행한다. 저주파영역에서는 피진단 기어의 1회전 펄스에 대한 동기를 행하여 평균가산처리를 한다.

저주파영역에 대한 기어의 이상징후는 회전주파수 $f_r$ 및 그의 고주파 성분 $nf_r$과 맞물림 주파수 $Zf_r$ 및 그의 고주파 성분 $nZf_r$과 사이드밴드 $Zf_r + nf_r$의 변화로 나타난다. 기어장치의 경우 위의 주파수성분은 정상 시에도 발생하기 때문에 해당하는 이상이 발생하면 이러한 주파수성분이 변동한다.

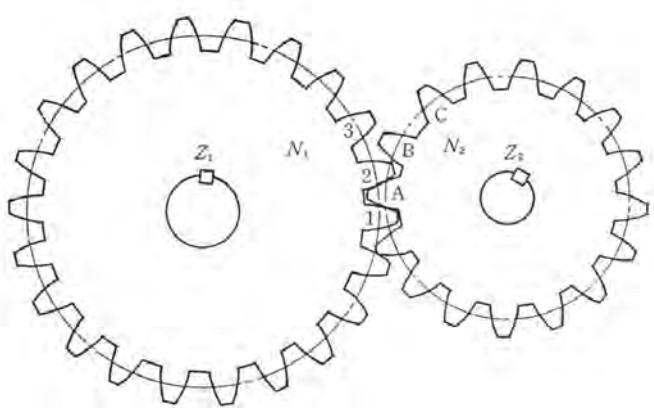



그림 2.4.166 기어의 맞물림

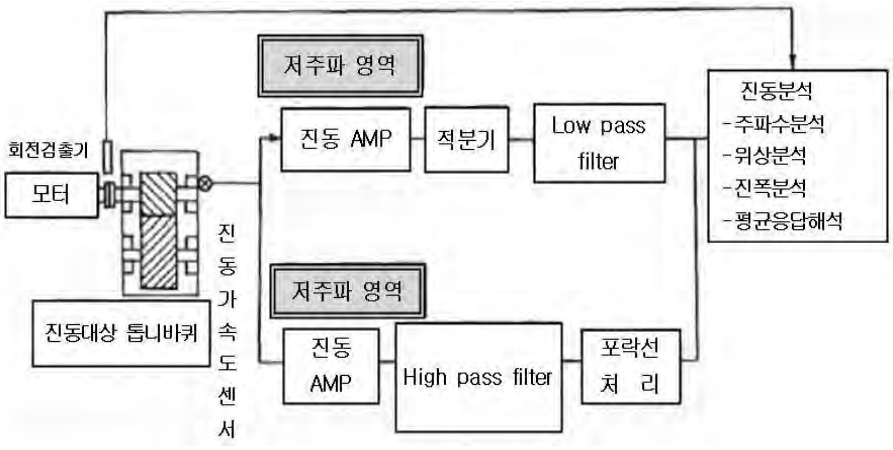



그림 2.4.167 기어진단을 위한 신호처리 순서도

고주파영역에서는 기어의 톱니의 고유진동수를 중심주파수로 밴드패스필터에 통과시킨다. 고주파영역의 경우 신호처리는 고주파영역에서는 축을 진단할 때와 동일하게 포격선처리가 필요하다. 포격선을 FFT분석하면 저주파영역과 동일하게 주파수성분을 얻을 수 있다. 시간영역에서는 기어의 노화지표로서 사용할 수 있는 무차원 징후파라미터로서 축의 경우와 동일하게 파고율과 Kurtosis 이며, 기어의 경우에는 특히 파고율이 노화도를 나타내는데 유효하다. 기어의 경우는 진동의 실효치와 피크치 등과 같은 유차원파라미터는 회전속도와 부하상태에서 커다랗게 변동하기 때문에 이용할 필요가 없다.

기어의 진단에 있어서 주파수스펙트럼 가운데 $f_r$, $nf_r$, $Zf_r(=f_m)$, $nZf_r(=nf_m)$, $Zf_r+nf_r$의 성분이 변화하는지 주의하여야 한다. 기어의 상태에 변화가 있으면 이 성분이 증감할 것이다. 그림 2.4.168은 기어장치의 광대역 스펙트럼의 실례이다. 저주파영역에 저속 혹은 고속축의 회전주파수 성분을 나타내는 피크가 존재한다. 맞물림 주파성분의 부근을 확대하면 그림과 같이 작은 사이드밴드가 관측된다. 노화가 진행하면 이 성분이 증가한다. 또한, 맞물림 주파수의 고주파성분 $2f_m$ 및 $3f_m$도 관측된다. 기어의 노화가 진행되면 이성분도 증가하거나 감소한다.

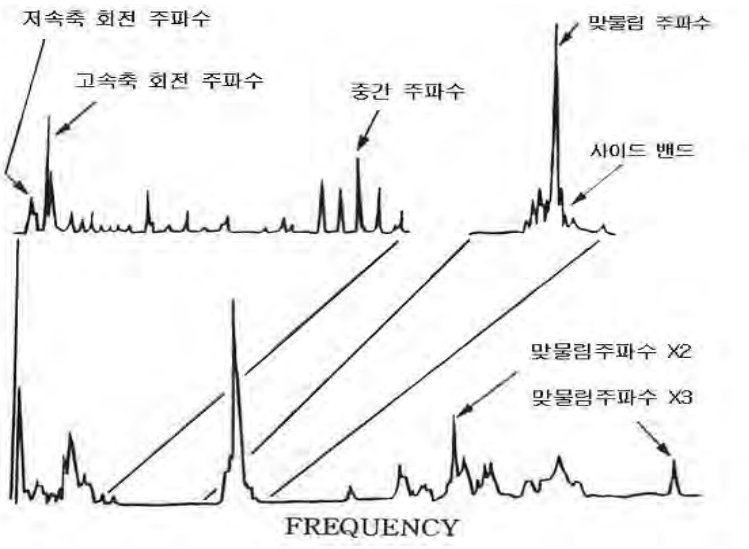



그림 2.4.168 기어장치의 진동 주파수 스펙트럼 예

(5) Advanced analysis method

(가) Sideband Ratio

기어 맞물림 주파수 피크치와 측대역 주파수 크기를 이용하여 기어 상태를 확인할 수 있다. 특히 Sideband Ratio는 기어 맞물림 주파수 피크치로 측대역 주파수 크기를 나누기 때문에 하중 변동에 덜 민감하여 기어 상태를 양적화 하는데 효과적이다. 정상 기어에서 맞물림 주파수와 측대역 주파수 크기를 비교 시 측대역 주파수 크기가 작으면 Sideband Ratio도 작다. 하지만 기어의 손상이 진행되면 측대역 주파수의 크기와 수가 증가하며 Sideband Ratio도 증가한다. 식 (2.4.35)은 Sideband Ratio 식이며 기어 맞물림 주파수를 기준으로 $SB_{a1}$은 하위 측대역 주파수 크기, $SB_{a2}$가 상위 측대역 주파수 크기이다. 그리고 $SB_{a1}$과 $SB_{a2}$의 합은 Sideband level을 의미한다.

$$SBR_a = \frac{SB_{a1} + SB_{a2}}{GMF_{peak}} \quad \text{----------} \quad (2.4.35)$$

(나) Spectral Kurtosis Filtering

손상된 기어와 베어링의 진동신호는 일반적으로 충격성 신호를 포함하고 있다. 이 신호는 진동의 다른 발생원에 의해 감춰져 있어서 충격성 신호를 찾는 것은 쉽지가 않다. Spectral Kurtosis에 기초한 필터링과 기술들은 원데이터에 감춰진 충격성 결함 신호를 찾기 위한 최적 주파수 대역을 찾는 것이다. 즉, 필터링된 신호의 특성을 계산하고 envelope 분석에 적합한 필터를 선택하기 위해서 사용된다. 하지만 정도가 심각한 스폴 혹은 결함은 충격적이지 않기에 결함 종류 결정에 영향을 준다. spectral kurtosis는 먼저 원 진동 신호를 H(t,f)로 정의되는 STFT(Short Time Fourier Transform)을 계산한다. 그리고 식 (2.4.36)처럼 H(t,f)의 4제곱 평균을 H(t,f)의 평균 제곱으로 나눔으로써 구할 수 있으며 이것은 주파수 함수로써 첨도(kurtosis) 값을 제공한다. 그림 2.4.169는 그 과정이다.

$$K_r(f) = \frac{\langle H^4(t,f) \rangle}{\langle H^2(t,f) \rangle^2} - 2 \quad \text{----------} \quad (2.4.36)$$

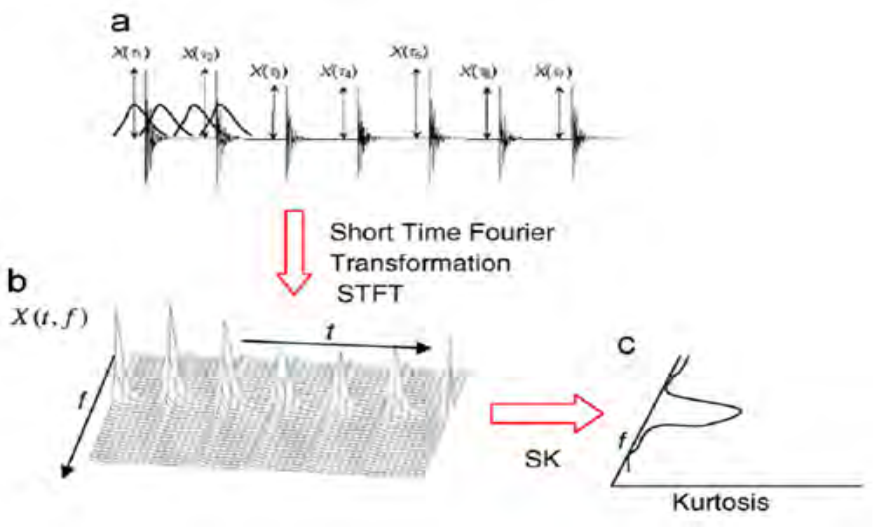



그림 2.4.169 Spectral kurtosis 계산 과정

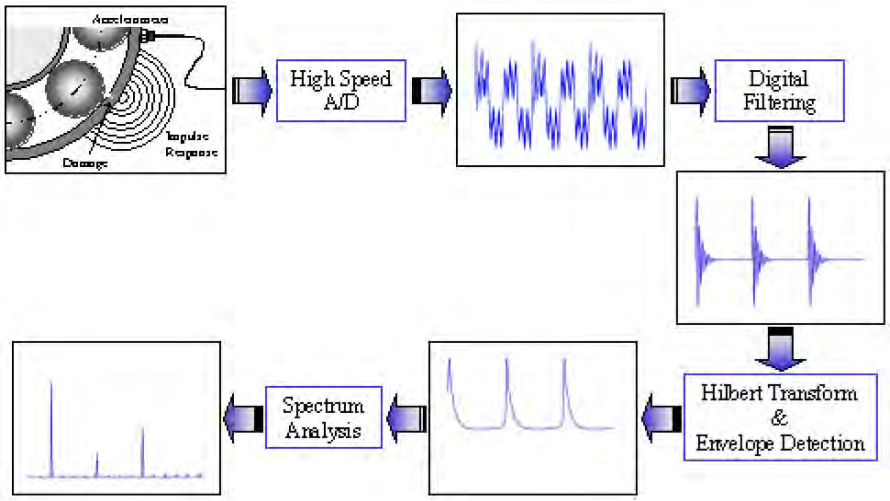



그림 2.4.170 Acceleration enveloping - digital approach

(다) Acceleration Enveloping

이 방법은 고주파 공명 기술이라 불리며 NASA에서 진행되던 프로젝트에서 우연하게 발견된 것이다. 이 진단 방법은 먼저 베어링 결함 발생 시 광대역으로 가진시키는 반복적 충격성 성분이 발생한다는 가정을 한다. 하지만 언밸런스와 같은 결함 충격성에서의 공진 응답 레벨은 축 가진과 비교했을 때 매우 낮은 레벨을 보인다. 그럼에도 공진 응답의 주파수 성분이 보통 더 높다는 특징이 있다. 높은 진폭의 회전 진동과 시스템이 갖는 기본 공진 주파수 응답 없이 베어링 결함 검출의 열쇠는 베어링 결함에 의한 낮은 진폭 응답을 찾아내는 것이다. 이것을 위해서 베어링 결함에 의한 신호를 분리할 밴드 패스 필터가 사용된다. 고주파 손상 응답이 포착되면 신호는 교정기를 통과하고 신호의 envelope이 수정된 신호로부터 감지된다. envelope 신호에 FFT를 적용하여 손상된 베어링 요소와 관련된 주파수와 진폭을 발견할 수 있다. 그림 2.4.170이 그 과정이다.

이론적으로는 진동 센서가 요구되는 주파수 범위를 가지게 되면 enveloping과 demodulation process를 통해서 베어링과 기어 결함을 검출할 수 있다. 또한 문헌상에서 베어링 진단에 대해 가장 확실하게 인정받는 방법이며 막 시작된 베어링 스폴을 검출하는 데 가장 적합하다. 하지만 envelope은 복조 밴드 선택이 간단하지 않으며 계속적으로 연구되고 있다. 또한 가진되는 시스템 공진에 의존하여서 더 높은 샘플링율이 요구된다.

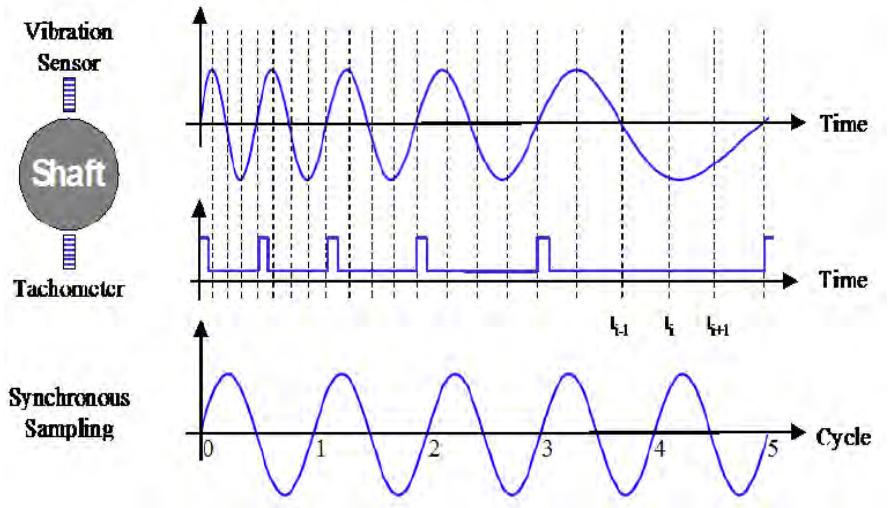



그림 2.4.171 Synchronous sampling - digital approach

(라) Synchronous Sampling

회전체에 대해서 진동은 축 속도의 배수와 약수로 발생한다. 축 속도가 3,600 rpm 즉 60 Hz라 하면 60 Hz의 배수 혹은 때로는 분수로 진동 응답을 보인다. 이러한 배수를 order라고 한다. 다음 식이 order 관련 식이며 f는 주파수, O는 order, RPM은 축속도이다.

$$f = \frac{O \times RPM}{60} \quad \text{----------(2.4.37)}$$

회전 속도가 일정하면 FFT 분석 시 우리가 원하는 결과를 얻을 수 있다. 하지만 속도가 데이터 취득 창과 함께 변화하면 배수 주파수가 스며든 주파수 영역에서의 기본 order와 조화군을 일으킨다. 그런데 주파수 분석은 주파수 분석 분해능에 의존하기에 관심 주파수가 항상 옳은 것이 아니다. 그 이유는 신호 에너지가 주변으로 갈라지기 때문이다. 이러한 이유로 order 분석이 주파수 분석보다 선호되는 것이다. order 영역에서 기본 order와 조화군은 축 속도에 대해서 일정하다. 그리고 1 order는 축속도를 의미하며 2 order는 항상 축 속도의 2배가 된다.

order 분석은 시간의 동등 증분 샘플링 대신에 축 회전 위치의 동등 증분으로 샘플링을 하며 이 방법을 Synchronous Sampling이라고 한다. 그리고 이 방법의 장점은 축속도 변동 효과를 줄일 수 있다는 것이다. 이렇게 샘플링된 데이터를 Time Synchronous Averaging을 이용하여 노이즈를 제거하여 관심 있는 신호 성분을 향상 시킨다.

이 방법을 베어링과 기어 결함 진단에 적용할 때 해결되어야 할 두 가지가 있다. 먼저 베어링 손상 신호는 보통 축 order에 비동기화 되어 있다. 위성 기어와 같은 복잡한 기어 세트에서 모든 기어 맞물림 주파수가 축 주파수의 정수 배수가 아니다. 그래서 일정한 시간영역 동기화 평균 기술이 진동 응답에 적용되면 베어링 결함 신호가 평균이 되고 만다. 그러므로 시간 영역에서의 평균 대신 order 영역 평균을 이용해야 한다. 두 번째는 주축(main shaft)과 그 이외의 축 사이에서의 order span이 다르기에 데이터 취득동안 적용되는 order 분해능과 최대 order에 대해서 주의를 해야 한다.

(마) Cepstrum Processing Method

이 방법은 취득한 신호를 FFT 분석으로 파워스펙트럼을 구한다. 이 파워스펙트럼에 자연 대수를 취한 후 역 퓨리에 변환을 적용한 것이 cepstrum이다. cepstrum은 단순하게 스펙트럼의 스펙트럼이라고 할 수 있으며 기본 주파수와 이것들의 조화 급수들이 한 가지 성분으로 축소된다. 따라서 이 방법은 조화군에서 정보를 추출하는데 간편한 방법이며 측대역 주파수와 진폭 변조로 인하여 진폭과 간격을 분리해 내기 어려운 경우의 기어상태 분석에 매우 효과적이다. 하지만 조화군이 축 문제(unbalance, misalignment 등)와 관련되어 있을 수 있기에 기어 결함 관련 문제가 아닐 수 있다. 또한 cepstrum 비교 시 중요한 변화 유무를 결정할 기준치가 필요하다.

(바) FM4

FM4는 제한된 많은 기어 이에서의 결함으로부터 발생되는 진동 패턴에서 변화를 찾기 위해 개발된 것이다. 진폭 분포가 다음 식처럼 difference signal(회전주파수와 맞물림주파수 및 1차 사이드밴드를 제거한 신호)에서 4차 정규화된 통계 모멘트를 적용하여 계산된다. 정상 상태에서의 기어박스는 가우시안 진폭 분산과 같은 difference signal을 가지지만 결함 기어를 가진 기어박스는 주요 피크나 피크 이하의 진폭 분포에서 발생되는 일련의 주요 피크를 가진 difference signal을 만

든다. 한 개 이상의 기어가 결함이 발생하면 데이터 분포는 평평하게 되며 첨도값은 증가하게 된다.

$$FM4 = \frac{N\sum_{i=1}^{N}\left(d_i - \bar{d}\right)^4}{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(d_i - \bar{d}\right)^2\right]^2} \quad \text{----------} \quad (2.4.38)$$

여기서, $d$는 difference signal, $\bar{d}$는 difference signal의 평균, N은 데이터들의 총 개수를 의미한다.

(사) NA4

NA4는 한 개 이상의 기어가 손상되었을 때 FM4 파라미터의 성능을 향상시키기 위해서 개발되었다. NA4와 FM4의 차이는 NA4는 첨도를 계산하기 위해서 residual signal을 사용하는 것으로 residual signal은 FM4와 달리 사이드밴드를 제거하지 않지 않은 신호이다. 두 번째 차이는 분산의 평균을 사용하는 것이다. 기어 데미지가 하나의 기어에서 다른 기어로 확산되면 평균 분산 값은 천천히 증가하며 NA4도 그에 따라 증가한다. NA4가 증가하는 또 다른 이유는 residual signal은 기어 결함이 발생할 때 증가하는 첫 번째 오더 사이드밴드들을 포함한다.

$$NA4 = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^{N}\left(r_i - \bar{r}\right)^4}{\left\{\frac{1}{M} \cdot \sum_{j=1}^{M}\left[\left(\sum_{i=1}^{N}\left(r_{ij} - \bar{r}_j\right)^2\right)\right]\right\}^2} \quad \text{----------} \quad (2.4.39)$$

여기서, $r_i$은 residual signal의 시간 기록에서의 i번째 점, $r_{ij}$는 residual signal의 j번째 시간 기록에서의 i번째 점, $\bar{r}$은 residual signal의 평균, N은 시간 기록에서 데이터들의 총 개수, 그리고 M은 run ensemble에서의 현재 시간 기록을 의미한다.

(아) NA6

NA6는 NA4와 같이 residual signal을 이용하는데 손상을 더 잘 감지할 수 있도록 6차 모멘트를 적용하여 peak에 더 민감하도록 한 것으로 본 과제에서 제안한 방법이다.

$$NA6 = \frac{N^2 \cdot \sum_{i=1}^{N}\left(r_i - \bar{r}\right)^6}{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(r_{ij} - \bar{r}_j\right)^2\right]^3} \quad \text{----------} \quad (2.4.40)$$

여기서, $r_i$은 residual signal의 시간 기록에서의 i번째 점, $\bar{r}$은 residual signal의 평균, N은 시간신호에서 데이터들의 총 개수이다.

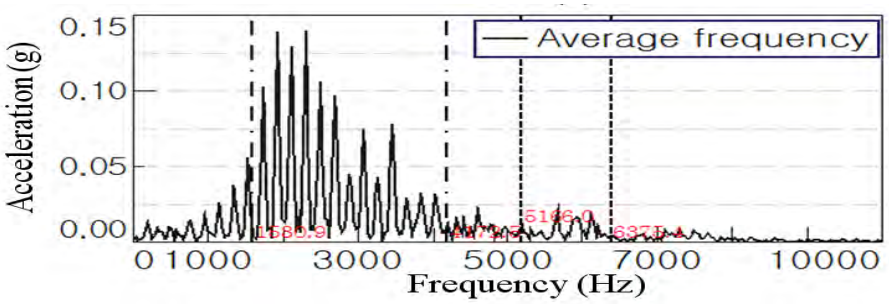
나. 감속기 결함 및 이상상태 평가

(1) 기어 시편 균열시 상태 평가

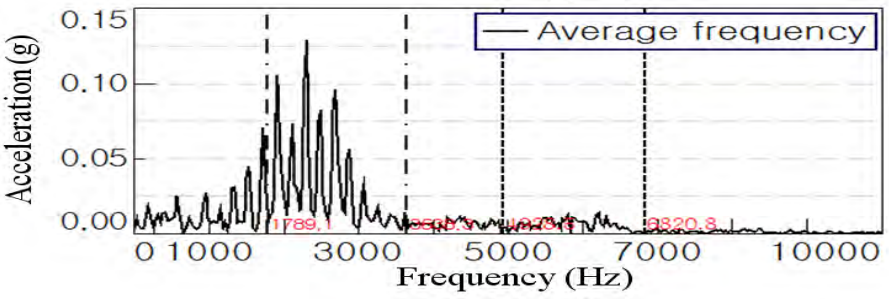
기어 시편 손상 모드 진동특성 시험 및 분석은 2절에서 이루어 졌으며, 기어가 1개 파손될 때는 대표적인 시간영역분석 방법인 RMS, 파고율 및 첨도 등으로 손상여부를 확연하게 알 수 있었다. 균열(Crack)이 발생했을 때도 확연하지는 않지만 약간 증가하는 경향을 나타냈으나 균열에 따른 기어의 진동 특성을 좀 더 자세히 파악하기 위하여 다른 진단 방법을 적용하여 분석하였다.

(가) FFT 분석

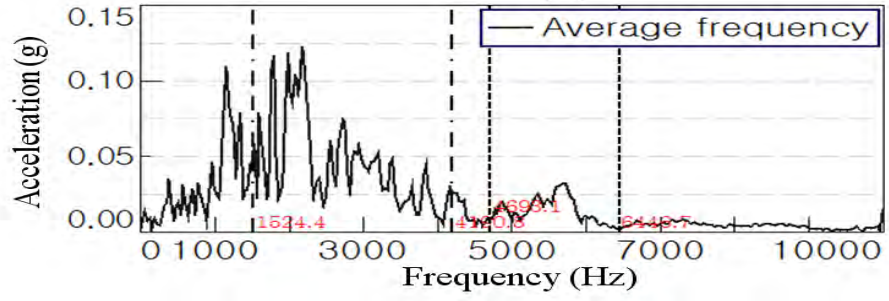
기어 결함 진단 시 기본적으로 사용하며 상대적으로 간단한 방법이 FFT 분석이다. 그림 2.4.172는 정상기어, 인공 균열 2 mm, 인공 균열 4 mm의 FFT 분석을 한 것이다. 정상 기어와 인공 균열 2 mm는 비슷한 형태의 주파수 형태를 보이며 인공 균열 4 mm만이 다른 형태를 보인다. 하지만 정상 기어의 주요 주파수 대역의 진폭이 인공 균열 2 mm의 주요 주파수 대역의 진폭보다 큰 값을 가진다. 또한 정상 기어와 인공 균열 4 mm는 약 6,000 Hz 대역에서 주파수 특성이 나타나지만 인공 균열 2 mm에서는 6,000 Hz 대역에서의 주파수 특성이 나타나지 않는다. 따라서 FFT 분석으로 균열 진전에 따른 문제가 발생하는 주파수 영역을 판단하기에는 한계가 존재한다.




a) 정상기어 시편




b) 인공 균열 2mm 시편



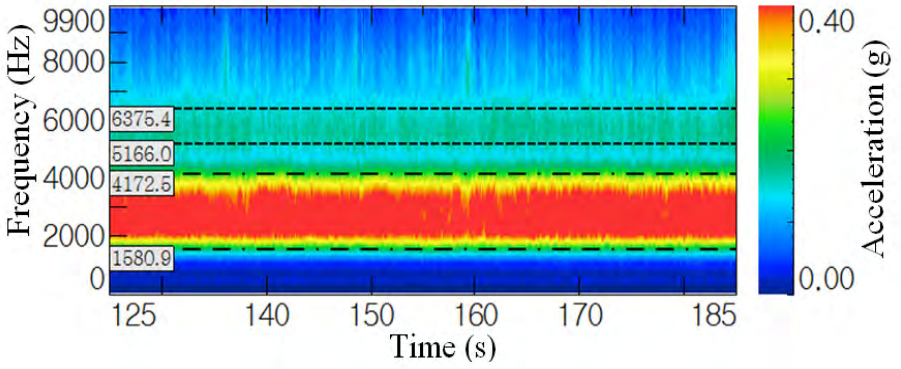

c) 인공 균열 4mm 시편

그림 2.4.172 인공 균열에 따른 FFT 분석

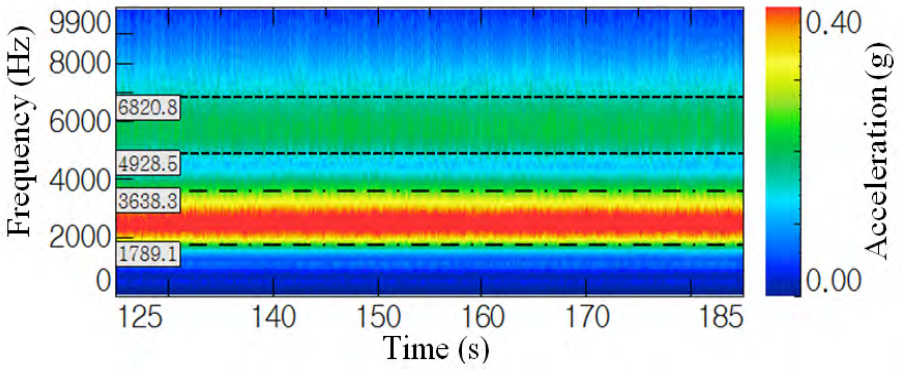
(나) Wavelet 분석

FFT 분석은 신호에 대한 전체적인 변환이며 신호의 부분적 정보에 대한 주파수 특성을 알 수 없다. 또한 신호가 멀티 스케일 특성을 지니거나 비정상 특성을 지닐 겨우 신호의 물리적 특성을 표현하지 못하는 단점이 있다. 이를 보완한 wavelet은 신호가 지닌 스케일 성분을 "시간-스케일" 공간으로 표현할 수 있다.

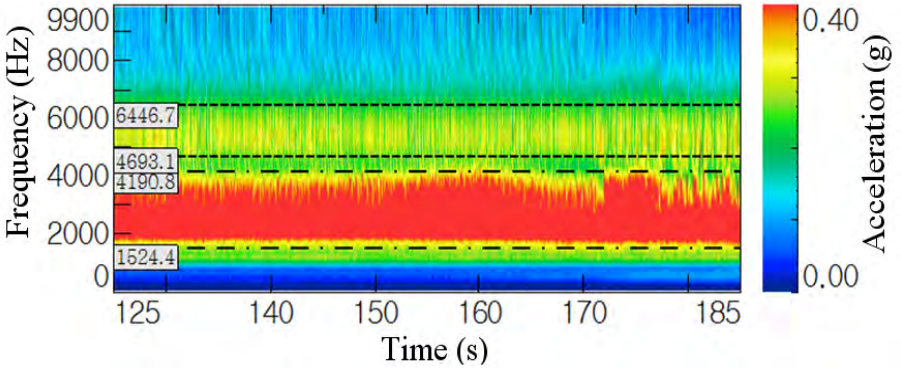
그림 2.4.173은 정상기어, 인공 균열 2 mm, 인공 균열 4 mm의 wavelet 분석이다. wavelet 분석은 FFT 분석과 달리 시간에 따른 주파수 변화를 한 눈에 볼 수가 있다. 이것을 통해서 어느 시간 때에 어떤 주파수 성분이 문제가 되는지를 알 수 있다. 또한 FFT 분석에서 판단하기 어려웠던 약 6000 Hz 대역에 대해서도 명확하게 구분되는 것을 알 수 있다. 즉, 균열진전에 따라서 주파수 특성 변화를 명확하게 확인할 수 있다. 하지만 FFT 분석에 비해서 정밀하게 분석할 수 있지만 계산되는 데이터가 많으며 계산 시간이 길다는 단점이 있다.




a) 정상 기어 시편




b) 인공 균열 2mm 기어 시편




c) 인공 균열 4mm 기어 시편

그림 2.4.173 인공 균열에 따른 Wavelet 분석

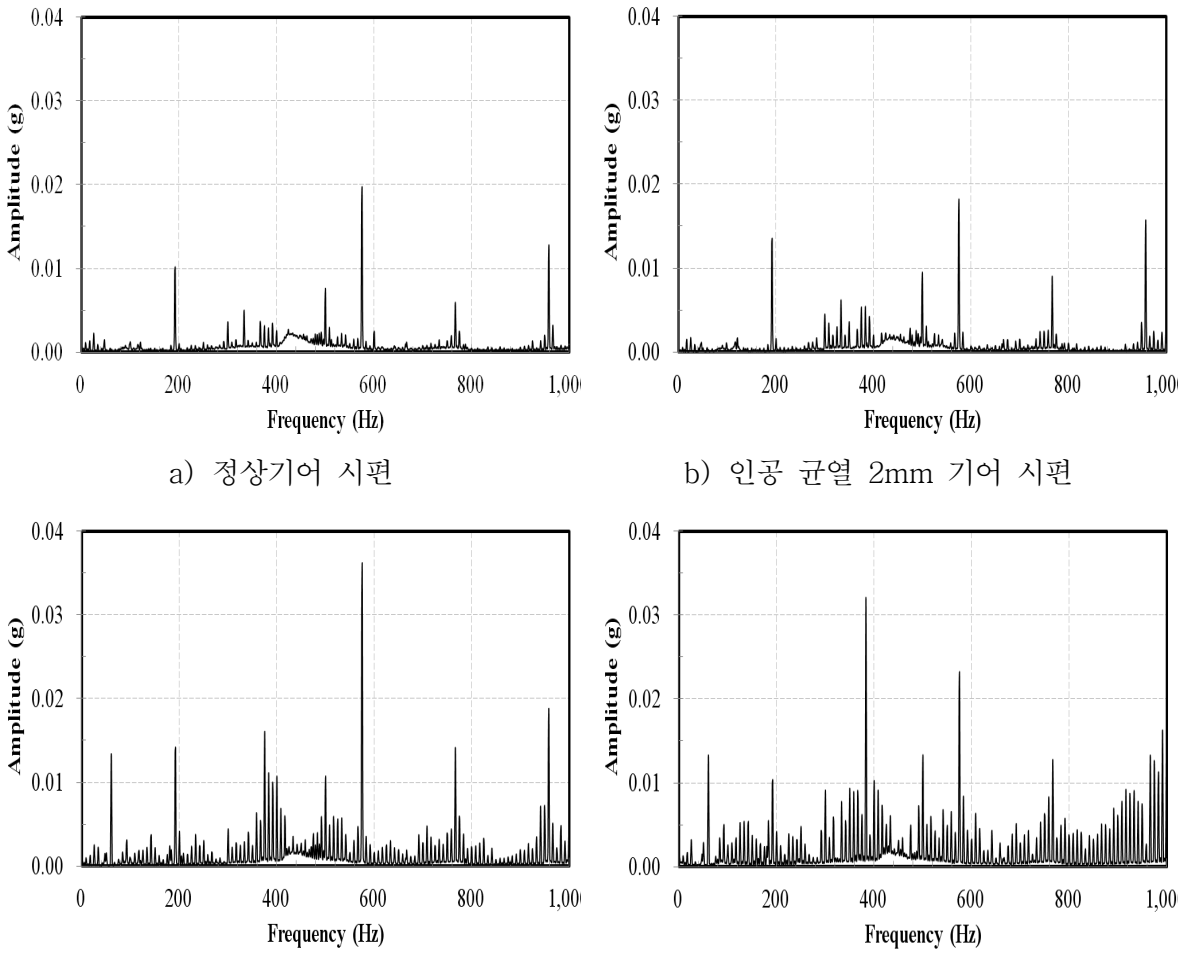
(다) Sideband Energy Ratio(SER) 분석

Sideband energy ratio는 맞물림 주파수와 측대역 주파수를 이용하여 기어 결함을 찾는 분석 방법으로 정의는 식 (2.4.41)과 같다.

$$SER = \frac{\sum_{i=1}^{6} Sideband\ Amplitue_i}{Center\ Mesh\ Frequency\ Amplitude} \quad \text{----------} \quad (2.4.41)$$

그림 2.4.174는 정상 기어, 균열 2 mm, 균열 4 mm, 부러짐을 모사한 기어 시편의 상세 주파수 분석 결과이다. 각 상태별 측대역 주파수는 회전주파수 약 8 Hz 간격으로 나타나고 있으며 그 형태는 $f_m \pm f_r$ 이다($f_m$ : 맞물림 주파수, $f_r$ : 회전주파수).

표 2.4.15는 기어 시편 상태에 따라 1, 2, 3차 맞물림 주파수에 대한 SER을 비교 분석한 것이다. 2차 맞물림 주파수를 제외한 1, 3차 맞물림 주파수에서의 SER이 기어 상태에 따라서 증가하는 것을 알 수 있다. 정상 상태와 초기 균열을 모사한 균열 2 mm는 1차 맞물림 주파수에서 0.2 이내의 SER을 가지지만 파단 직전을 모사한 균열 4 mm에서는 그 값이 0.6 이상이며 파단일 때는 1 이상의 값을 가진다. 3차 맞물림 주파수 SER에서도 파단일 때 약 1의 값을 가진다.




a) 정상기어 시편 b) 인공 균열 2mm 기어 시편

c) 인공 균열 4mm 기어 시편 d) 부러진 기어 시편

그림 2.4.174 균열을 모사한 기어 시편별 상세 주파수 분석

표 2.4.15 균열을 모사한 기어 시편 Sideband energy ratio 비교 분석

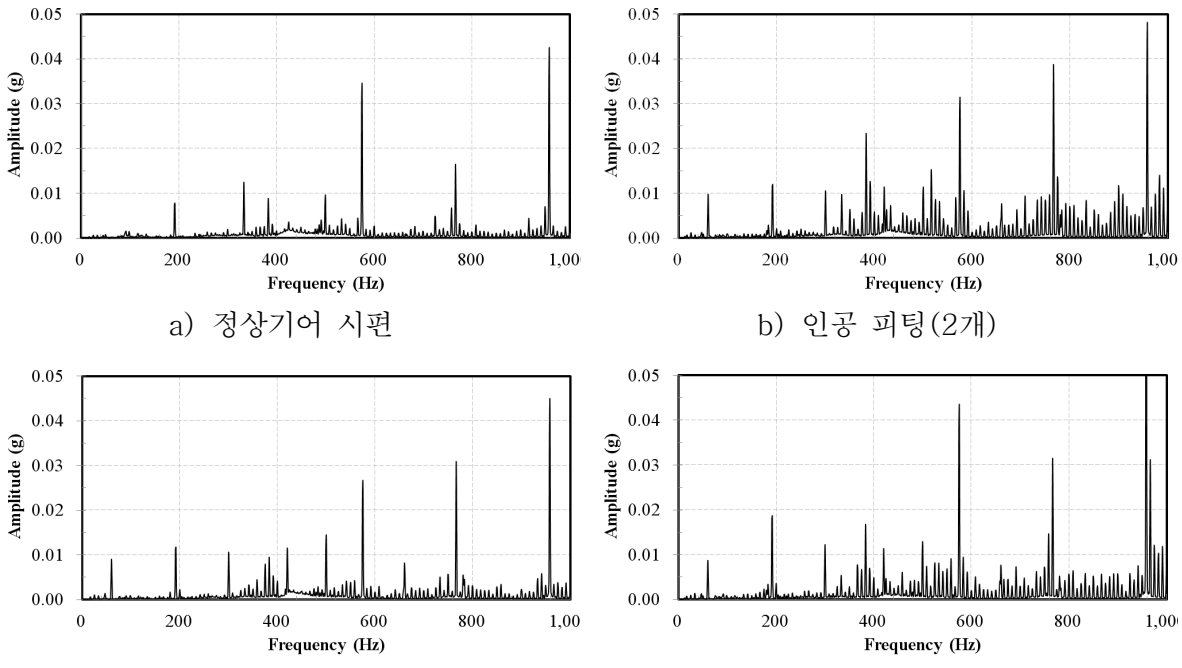
| | 맞물림 주파수 | | |
|---|---|---|---|
| | 1차 (192 Hz) | 2차 (383 Hz) | 3차 (575 Hz) |
| 정상 | 0.2429 | 4.7440 | 0.3329 |
| 균열 2 mm | 0.2741 | 2.7231 | 0.3499 |
| 균열 4 mm | 0.6486 | 4.0875 | 0.3642 |
| 부러짐 | 1.2805 | 1.0807 | 0.9874 |

(2) 기어 시편 피팅시 상태 평가

피팅 역시 기어 손상의 대표적인 것으로써 피치선 아래에서 많이 발생하며 피팅이 계속 진행되면 균열로 진행될 수 있다. 자연적 피팅을 발생시키기 위해서는 많은 시간이 필요하다. 따라서 기어 시편에 인공 피팅을 삽입하여 각 피팅 상태에 따른 진동 특성으로 분석하였다. 또한 이전 실험과 다른 점은 하중을 100 $kg_f$에서 200 $kg_f$로 증가시켰다.

(가) FFT 분석

그림 2.4.175는 인공 피팅에 대한 FFT분석이다. 균열 실험과 마찬가지로 각 상태마다 맞물림 주파수 특성이 나타나고 있다. 또한 각 상태별 측대역 주파수는 회전주파수 약 8 Hz 간격으로 나타나고 있으며 그 형태는 $f_m \pm f_r$로 균열 실험과 같은 결과를 보인다. 그림 2.4.175 a) 보다 그림 2.4.171 b)의 진폭이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 인공 피팅 실험에서는 하중을 증가 시켰기 때문에 진폭이 증가한 것이다. 그림 2.4.175에서 1차 맞물림 주파수에서 피팅의 개수가 증가할수록 진폭이 증가하는 경향을 보이다. 하지만 이것만으로 피팅 정도를 판단하는 것은 무리가 있다. 왜냐하면 그 진폭 차가 크지 않으며 피팅 정도가 심하지 않으면 그것을 구분하는 것은 쉽지 않다.




a) 정상기어 시편 b) 인공 피팅(2개)

c) 인공 피팅(4개) d) 인공 피팅(6개)

그림 2.4.175 피팅을 모사한 기어 시편별 상세 주파수 분석

표 2.4.16 피팅을 모사한 기어 시편 Sideband energy ratio 비교 분석

| | 맞물림 주파수 | | |
|---|---|---|---|
| | 1차 (192 Hz) | 2차 (383 Hz) | 3차 (575 Hz) |
| 정상 | 0.2710 | 1.3043 | 0.3140 |
| 인공 피팅 2개 | 0.5752 | 1.2542 | 0.8436 |
| 인공 피팅 4개 | 0.3533 | 2.2566 | 0.4140 |
| 인공 피팅 6개 | 0.4956 | 1.5612 | 0.5872 |

(나) SER 분석

표 2.4.16은 기어 시편 상태에 따라 1, 2, 3차 맞물림 주파수에 대한 SER을 비교 분석한 것이다. 인공 피팅 2개를 제외하면 전반적으로 피팅 정도에 따라 SER이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 이것으로써 피팅 정도를 구분할 수 있다고 할 수 없다. 그 이유는 피팅 정도에 따라 SER의 차이가 균열 실험처럼 확연하게 차이가 나타나지 않기 때문이다.

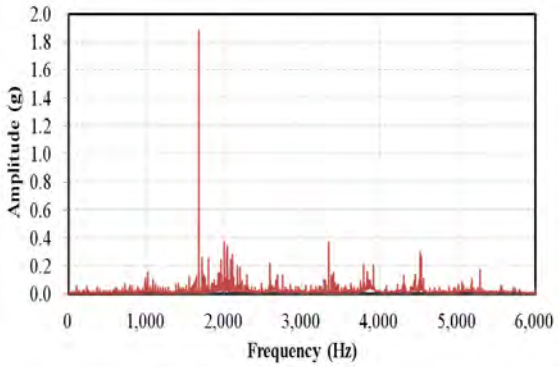
(3) 1차 감속기 결함에 따른 이상상태 평가

2장 3절 3에서 1차 감속기 기어 결함 별 실험을 하였으나 물림율이 큰 헬리컬 기어에서는 2개가 부러졌을 때 외에는 파고율 및 첨도에 의해서 결함에 따른 이상상태를 진단하기가 어려웠다. 그러므로 여기서는 취득된 결함 별 진동신호를 고도화된 진단 방법을 이용하여 그 특성을 분석하였다.

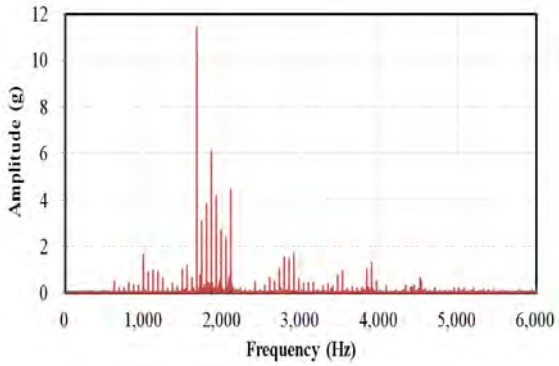
(가) FFT 분석

기어 1개가 파손된 1차 감속기를 입력축에 설치하고 KTX 최고 속도 300 km/h일 때인 1,965 rpm으로 토크는 3000 N·m의 조건에서 실험 후 정상 상태와 이상 상태에서의 진동 특성을 분석하여 진단 방법을 평가하였다. 그림 2.4.176과 2.4.177은 정상상태와 이상상태의 주파수 분석을 했다. 전반적으로 이상상태가 정상상태보다 배 이상의 진동 값을 가지지만 이상상태의 출력축 Z 방향에서의 진동값이 가장 큰 값을 가진다. 정상상태에서도 출력축 Z 방향이 더 큰 진동 값을 가지지만 이상상태에서는 정상기어가 있는 출력축 방향으로 더 많은 충격이 가해지는 것으로 판단된다. 1차 맞물림 주파수(1671 Hz)는 정상상태와 이상상태 모두에서 나타난다. 하지만 정상상태에서는 2차, 3차 맞물림 주파수가 확인이 되지만 이상상태에서는 측대역 주파수(Sideband)가 맞물림 주파수보다 큰 것을 알 수 있다. 또한, 이상상태에서는 회전주파수(33 Hz)의 약 1.9배인 62 Hz 간격으로 발생한다. 즉, $f_m \pm n \cdot f_r$ 형태로 측대역 주파수를 확인할 수 있다. ($f_m$ : 맞물림 주파수, $n$ : 정수, $f_r$ : 회전 주파수) 정상상태에서도 측대역 주파수가 발생하지만 그 크기가 작거나 노이즈로 볼 수 있다.

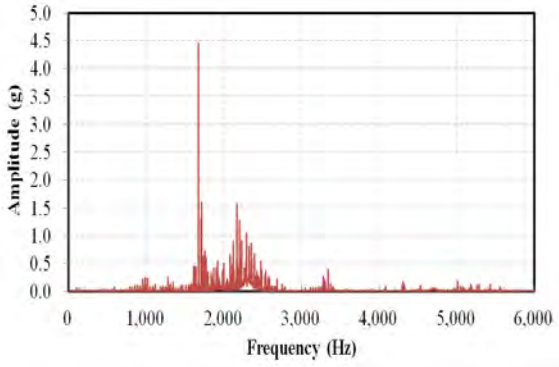
그림 2.4.178은 회전 주파수($f_r$) 분석을 위한 시간 영역이며 정상기어보다 부러진 기어에서 그리고 입력축보다는 출력축에서 확연하게 충격성 성분을 확인할 수 있다. 또한 이상상태에서 시간파형과 주파수 분석을 통해서 출력측 회전 주파수(33 Hz)가 아닌 입력측 회전주파수(62 Hz)라는 것을 확인할 수 있다. 그림 2.4.179는 정상상태와 이상상태의 회전주파수 분석이다. 그리고 표 2.4.17은 회전주파수, 1.9X, 2X에서의 진폭 수치이다. 회전주파수에서의 진폭 수치는 정상이든 이상이든 비슷한 값을 보인다. 하지만 1.9X, 2X에서의 수치는 이상상태일 때 더 큰 값을 나타낸다.



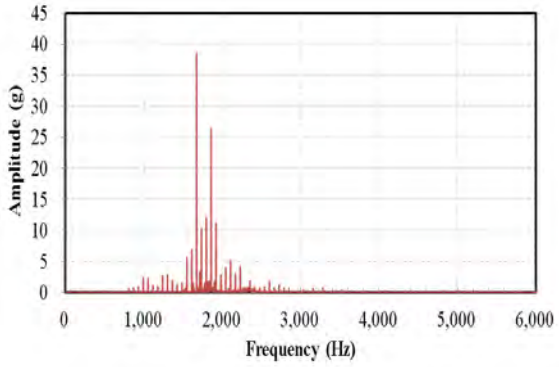

a) 정상상태의 입력측




b) 이상상태의 입력측

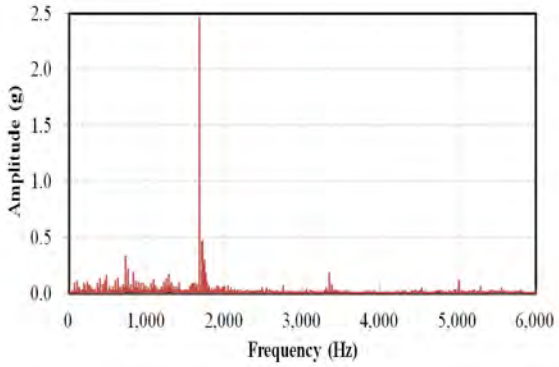



c) 정상상태의 출력측

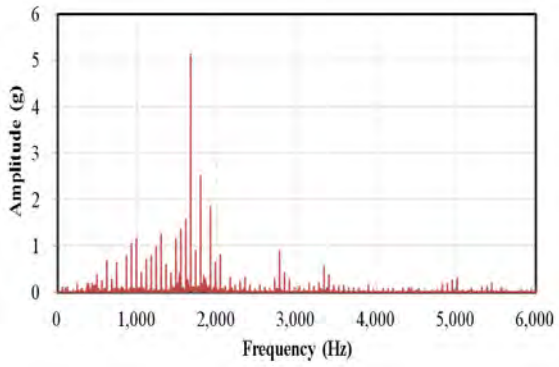



d) 이상상태의 출력측

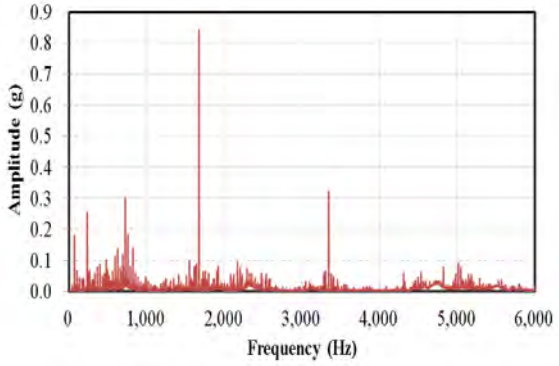
그림 2.4.176 정상상태와 이상상태의 주파수 분석 비교 (Z축 방향)



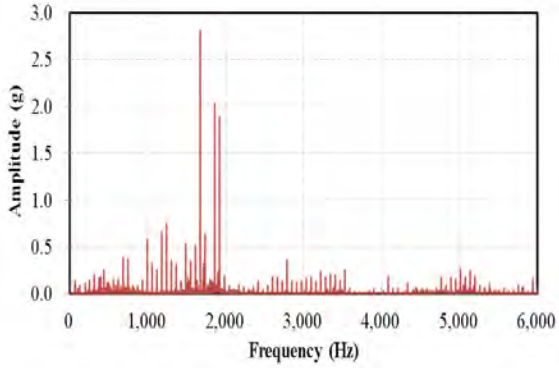

a) 정상상태의 입력측




b) 이상상태의 입력측

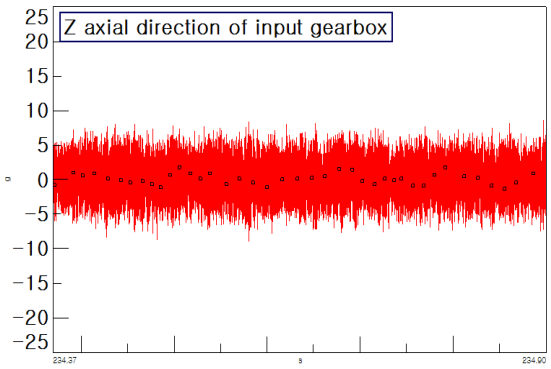



c) 정상상태의 출력측

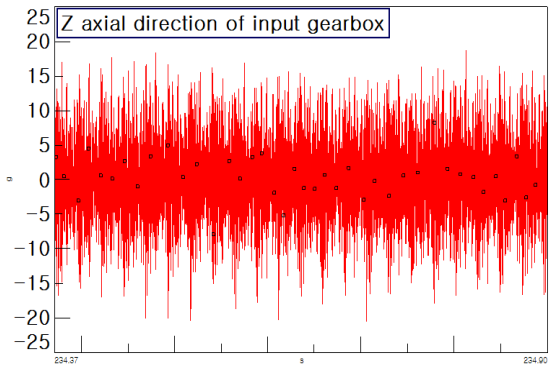



d) 이상상태의 출력측

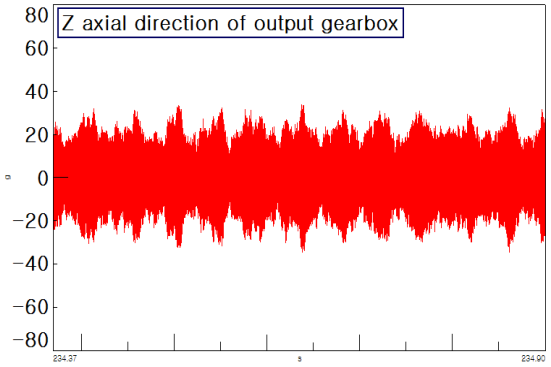
그림 2.4.177 정상상태와 이상상태의 주파수 분석 비교 (Y축 방향)



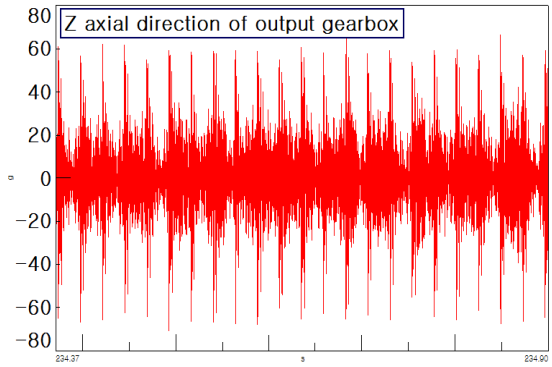

a) 정상상태의 입력측




b) 이상상태의 입력측

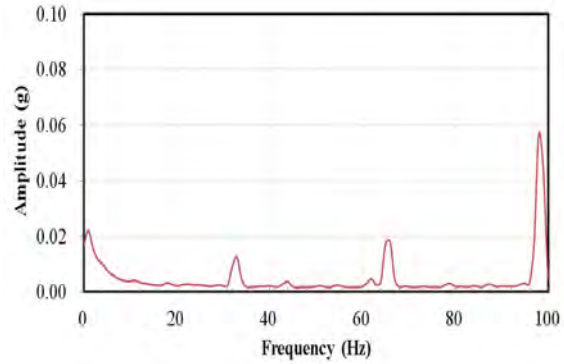



c) 정상상태의 출력측

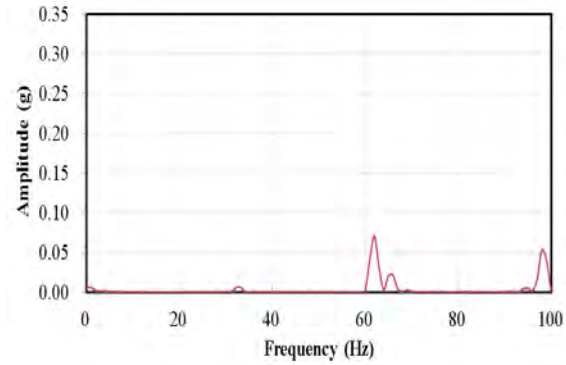



d) 이상상태의 출력측

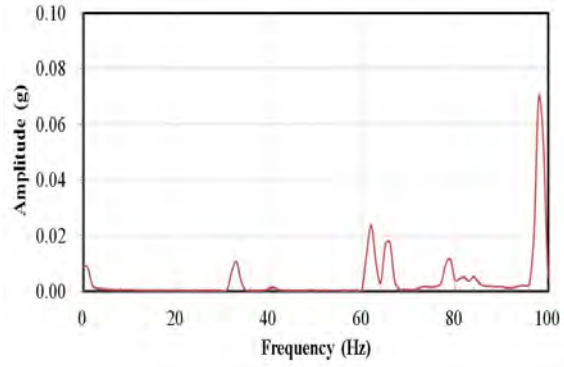
그림 2.4.178 시간영역 분석



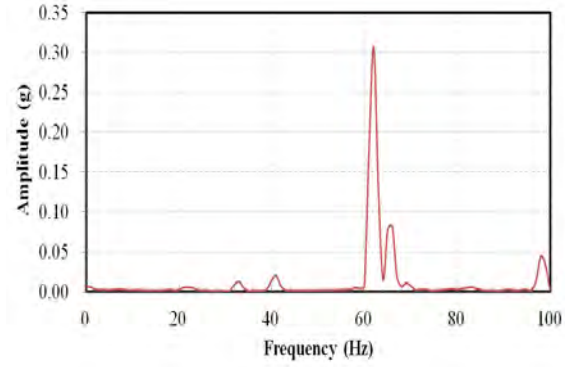

a) 정상상태의 입력측




b) 이상상태의 입력측




c) 정상상태의 출력측




d) 이상상태의 출력측

그림 2.4.179 정상상태와 이상상태의 회전주파수 분석

표 2.4.17 최고 속도에서의 회전주파수

단위 : g

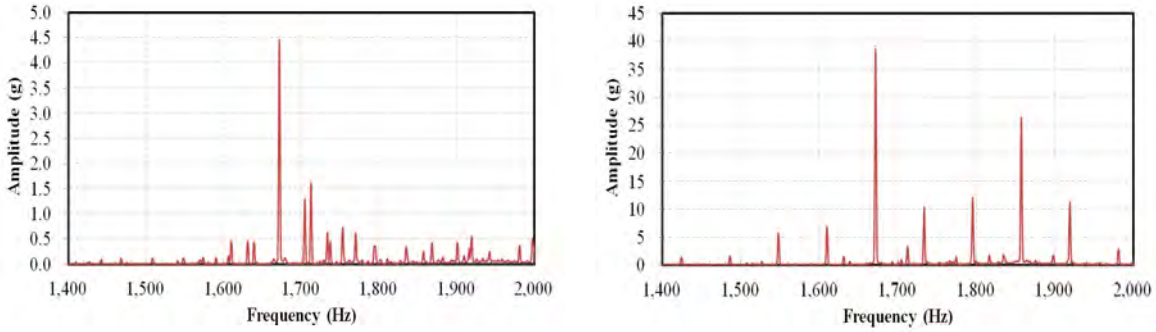
| | $f_r$ | | $1.9\times f_r$ | | $2\times f_r$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 입력측 | 출력측 | 입력측 | 출력측 | 입력측 | 출력측 |
| 정상 상태 | 0.01 | 0.01 | 0.004 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 이상 상태 | 0.007 | 0.01 | 0.07 | 0.31 | 0.02 | 0.08 |

(나) 정상상태와 이상상태(1개 파손시) SER 분석

감속기 실물 실험에서도 식 (3.3.5) 를 이용하여 기어 상태에 따른 SER을 분석하였으며, 그림 2.4.180은 정상 상태와 이상상태의 1차 맞물림 주파수(1671Hz)에서의 주파수 대역을 확대한 것이다. 위에서 언급한 것처럼 이상상태는 $f_m \pm n \cdot f_r$의 형태로 측대역 주파수가 발생한다. 반면에 정상상태는 그림 2.4.176 a)와 같으며 $f_m \pm f_r$의 형태를 보인다. 일반적으로 정상상태는 맞물림 주파수가 주로 나타나며 측대역 주파수가 나타나더라도 그 크기가 작거나 노이즈이다.

표 2.4.18은 기어 시편 실험과 같은 방법으로 정상 상태와 이상 상태의 SER을 비교 분석한 것이다. 정상상태는 0.5 내외의 값을 갖지만 이상 상태는 1 이상의 값을 갖는다. 정상상태에서는 맞물림 주파수에 비해 측대역 주파수가 작은 값을 갖는 반면에 이상상태에서는 높은 측대역 주파수를 가지기에 1 이상의 SER을 보인다.

감속기 실물 실험에서도 기어 시편과 같은 결과를 얻었다. 즉, 기어가 정상 상태에서 이상 상태로 진행될 때 SER의 수치가 증가한다. 또한 기어가 파단 되었을 경우 1차 맞물림 주파수 SER이 1이상의 값을 가진다.




a) 정상상태의 출력측 b) 이상상태의 출력측

그림 2.4.180 정상상태와 이상상태의 주파수 상세 비교 (Z축 방향)

표 2.4.18 Sideband energy ratio 비교 분석

| | Z축 | | Y축 | |
|---|---|---|---|---|
| | 입력측 | 출력측 | 입력측 | 출력측 |
| 정상 상태 | 0.3487 | 0.4083 | 0.1996 | 0.3749 |
| 이상 상태 | 1.3985 | 1.6358 | 1.5181 | 1.5024 |

표 2.4.19 속도에 따른 맞물림 주파수와 측대역 간격

| Torque (N・m) | Speed (rpm) | G.M.F X1 (Hz) | G.M.F X2 (Hz) | G.M.F X3 (Hz) | Sideband spacing (Hz) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1000 | 668 | 568 | 1,136 | 1,704 | $f_{r,inputgear}$ | 21 |
| | | | | | $f_{r,midgear}$ | 14 |
| | | | | | $f_{r,outputtgear}$ | 11 |
| 3000 | 1,967 | 1,671 | 3,342 | 5,013 | $f_{r,inputgear}$ | 62 |
| | | | | | $f_{r,midgear}$ | 41 |
| | | | | | $f_{r,outputtgear}$ | 33 |

(다) 결함에 따른 SER 분석

1~3차 맞물림 주파수를 대상으로 감속기 내 각 기어에 대한 SER을 분석하였다. 감속기 내 각 기어의 sideband 간격은 각 기어의 회전주파수로 나타나며 표 2.4.19에 나타내었다.

① 토크 3,000 N · m, 속도 1967 rpm

그림 2.4.181 ~ 2.4.183은 토크 3,000 N · m, 속도 1,967 rpm(약 300km/h)에서의 SER을 분석한 것이다. 전반적으로 결함을 가진 기어에서 각 맞물림 주파수의 SER은 결함 정도에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 결함이 있는 입력 기어에서의 SER이 다른 기어에서의 SER보다 높은 것을 알 수 있다. 이것은 결함을 가진 입력 기어의 측대역이 결함이 없는 다른 기어에 비해서 상대적으로 높은 진폭을 가졌기 때문이다. 하지만 그림 2.4.181과 2.4.183에서 입력 기어의 피팅 상태 SER이 반파 상태와 절손 상태보다 높은 SER을 보인다.

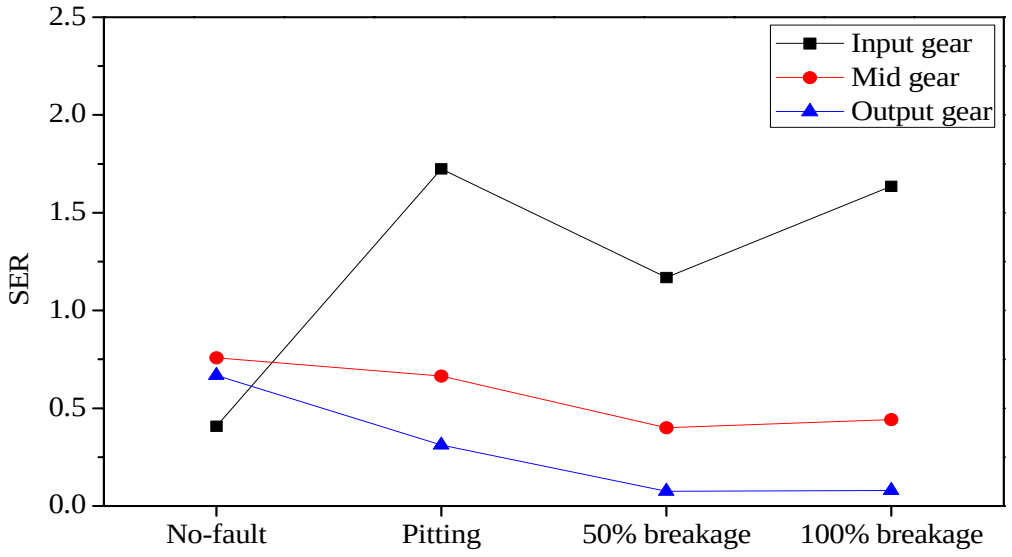



그림 2.4.181 토크 3,000N・m, 속도 1,967rpm에서의 1차 맞물림 주파수의 SER

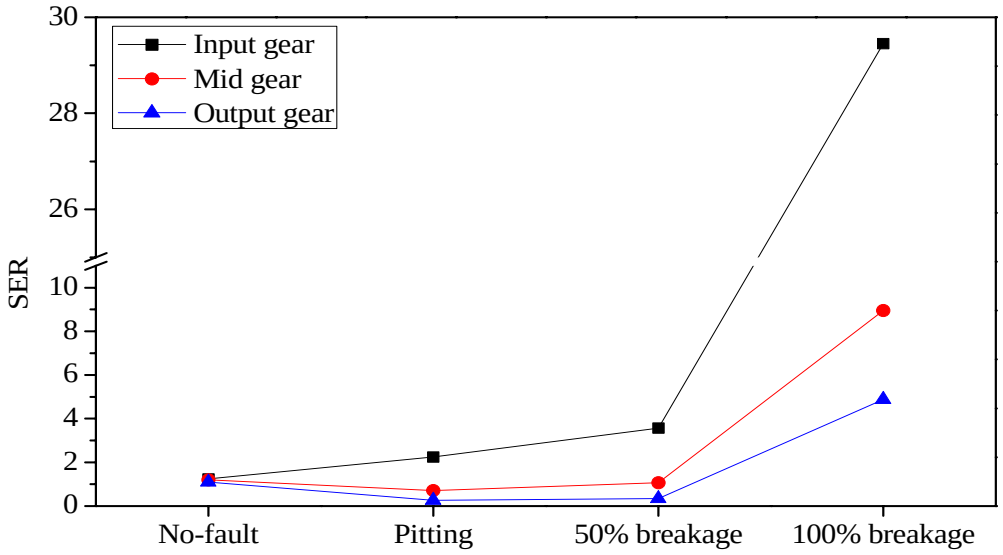



그림 2.4.182 토크 3,000N・m, 속도 1,967rpm에서의 2차 맞물림 주파수의 SER

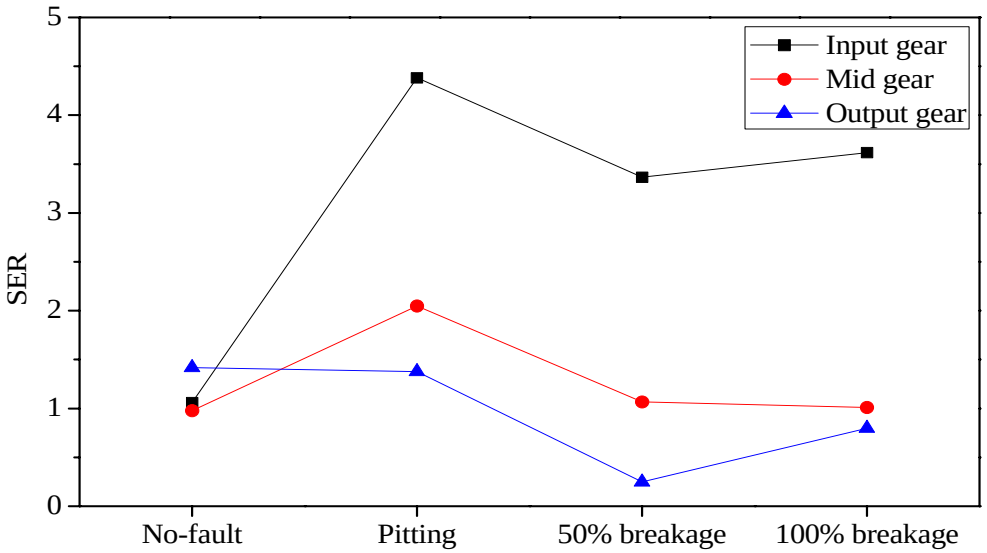



그림 2.4.183 토크 3,000N・m, 속도 1,967rpm에서의 3차 맞물림 주파수의 SER

② 토크 3000 N · m 속도 668 rpm

그림 2.4.184 ~ 2.4.186은 토크 3,000 N · m, 속도 668 rpm(약 100km/h)에서의 SER을 분석한 것이다. 그림 2.4.181 ~ 2.4.183처럼 결함을 가진 입력 기어에서의 SER이 다른 기어의 SER보다 높으며 이것은 위에서 언급한 것과 같은 이유이다. 하지만 그림 2.4.184와 2.4.186처럼 그림 2.4.185는 결함에 따라 증가하는 경향을 보이지 않는다.

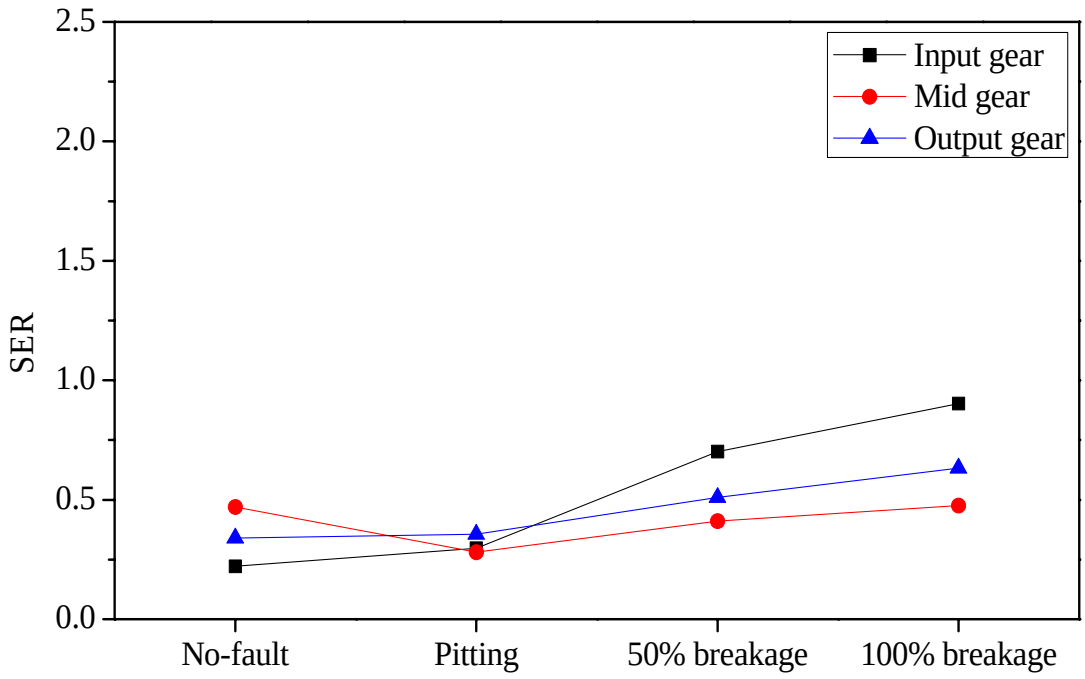



그림 2.4.184 토크 3,000N・m, 속도 668rpm 1차 맞물림 주파수 SER

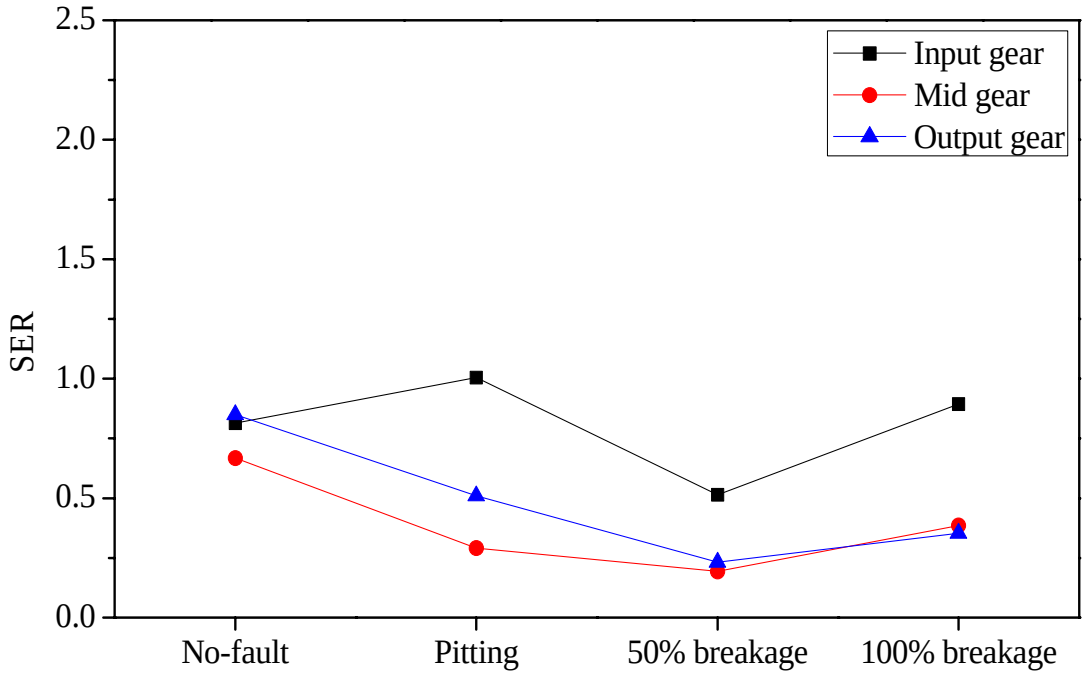



그림 2.4.185 토크 3,000N・m, 속도 668rpm 2차 맞물림 주파수 SER

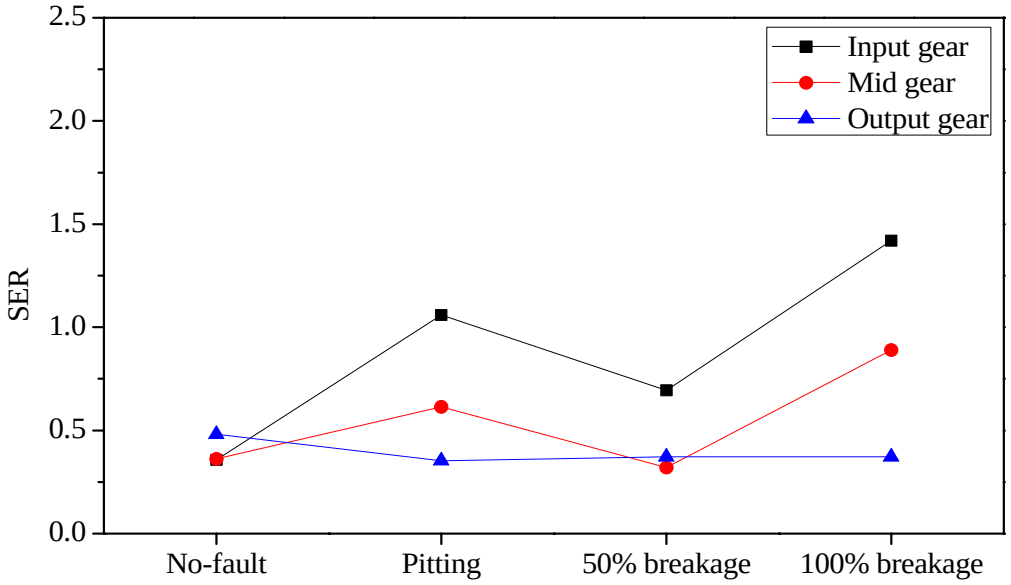



그림 2.4.186 토크 3,000N・m, 속도 668rpm 3차 맞물림 주파수 SER

③ 토크 1000 속도 668

그림 2.4.187 ~ 2.4.189는 토크 1,000 N・m, 속도 668 rpm(약 100km/h)에서의 SER을 분석한 것이다. 그림 2.4.181 ~ 2.4.186처럼 결함을 가진 입력 기어에서의 SER이 다른 기어의 SER보다 높게 나타난다. 그리고 두 개의 기어 이가 부러진 100% breakage 2는 다른 결함상태보다 배 이상 높은 SER을 보인다. 이것은 두 개의 기어 이가 부러졌을 때 더 많고 큰 측대역이 발생하기 때문이다.

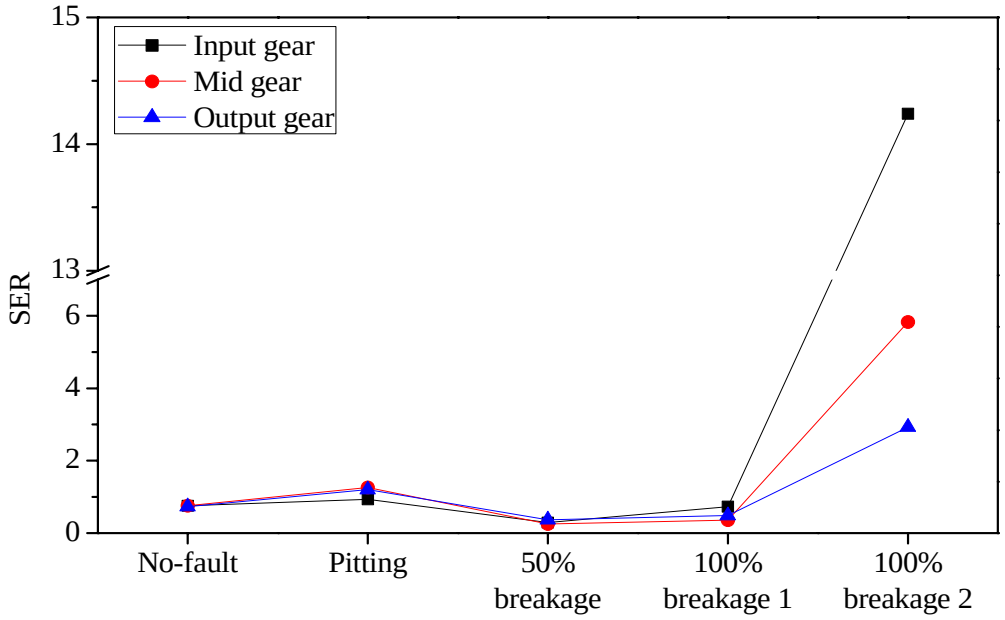



그림 2.4.187 토크 1,000, 속도 668rpm 1차 맞물림 주파수 SER

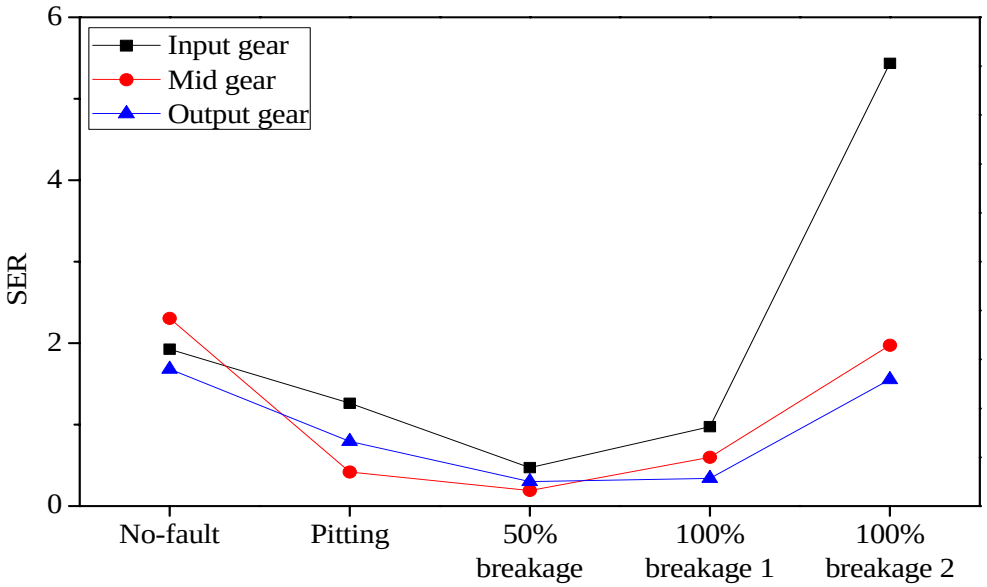



그림 2.4.188 토크 1,000, 속도 668rpm 2차 맞물림 주파수 SER

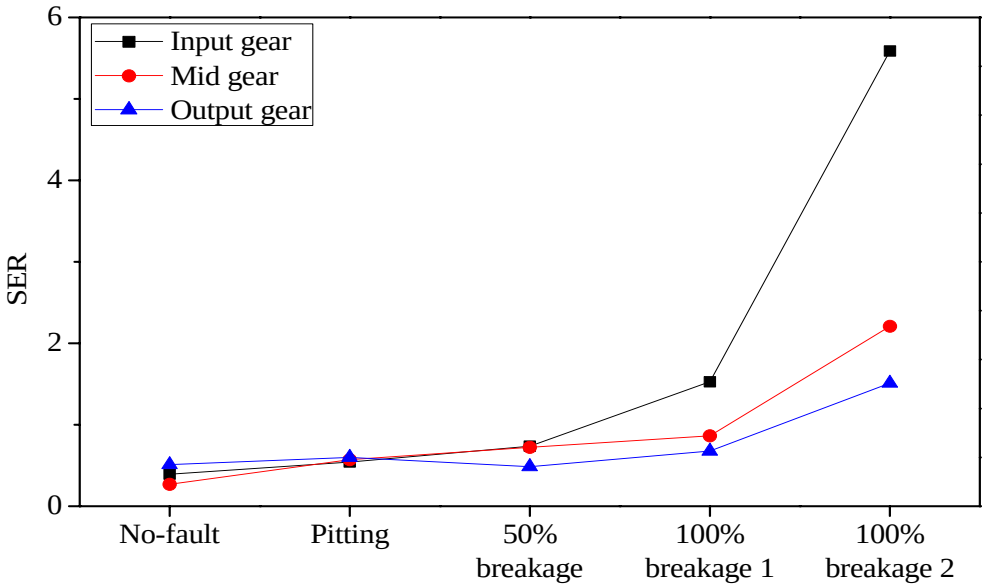



그림 2.4.189 토크 1,000, 속도 668rpm 3차 맞물림 주파수 SER

④ 종합

운전 조건 별, 맞물림 주파수 별로 결함에 따른 SER을 분석하였다. 같은 운전 조건이라도 맞물림 주파수에 따라 SER의 경향은 차이를 보였다. 이것은 주주파수 대역이 운전 조건에 따라서 다르기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 속도 1,967 rpm에서는 주주파수 대역이 결함에 상관없이 1차 맞물림 주파수 대역이며, 속도 668 rpm은 두 개의 기어 이가 부러졌을 때와 토크 1,000 N·m에서의 피팅 상태를 제외하고는 3차 맞물림 주파수 대역이 주주파수 대역이다. 주주파수 대역을 중심으로 SER을 비교하면 결함에 따라서 SER이 변화한다는 것을 알 수 있다. 하지만 피팅 상태가 반파 상태보다 높은 SER을 가지는 경우가 발생한다.

(라) 시간동기평균(TIme Synchronous Averaging)에 의한 첨도 분석

평균가산법은 시간영역과 주파수영역에서 모두 사용되는데, 시간영역에서 사용되는 시간동기평균을 이용하여 1차 감속기의 결함을 분석하였으며, 그림 2.4.190은 시간동기평균에 의한 신호처리 과정을 나타내고 있다.

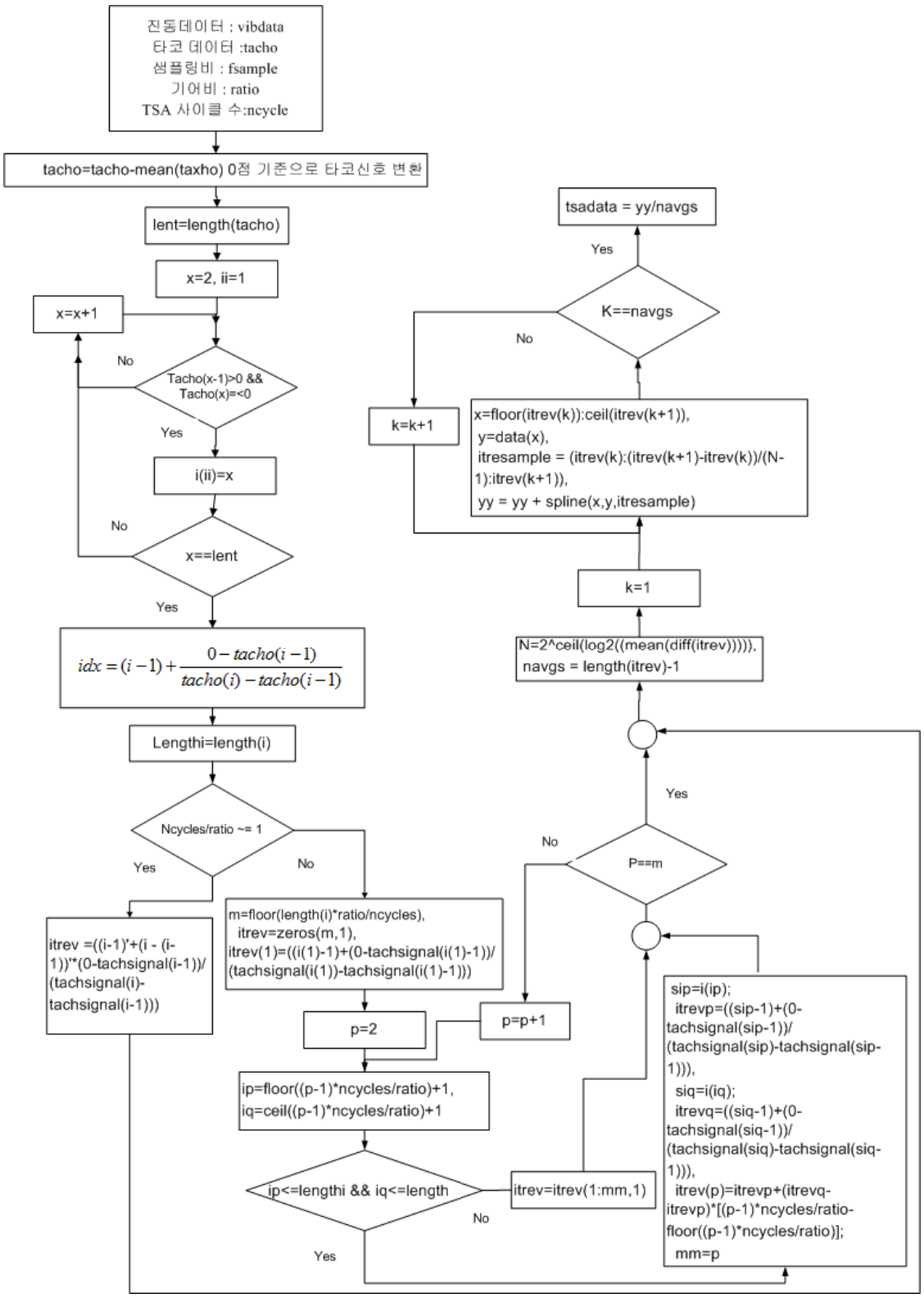



그림 2.4.190 시간동기평균에 의한 신호처리 과정

감속기가 회전할 때, 결함이 있는 기어에서 반복적으로 진동이 커지므로 시간동기평균(TSA)에 의하여 노이즈를 제거하고 결함신호가 두드러지게 하려면 분석하고자 하는 축의 회전수와 일치시켜 분석해야 한다. 실물시험에서 입력축에 인위적으로 결함을 생성하였으므로 결함이 있는 입력축에 동기화하여 시간동기평균을 하여야 한다. 만약 결함은 입력축에 있는데 출력축을 기준으로 동기화하여 시간동기평균을 수행하면, 결함이 있는 입력기어와 맞물리는 출력기어가 계속 달라지게 되므로 다른 결과가 나타날 수 있다. 그림 2.4.191은 정상기어와 입력축 기어에 결함이 있을 때에 대한 첨도를 비교한 결과로서 TSA 처리 전과 입력축에 대하여 TSA 처리 후는 별 차이가 없는 것으로 나타났으며, 여기서 첨도는 정규화를 위한 3을 빼지 않은 값이다.
실물시험에서는 감속기의 회전에 의한 진동 외에 다른 신호에 의한 영향을 받지 않기 때문에 시간동기평균 처리 전과 후가 비슷했지만 주기적이지 않은 신호 등이 있을 경우에 시간동기평균을 하면 이러한 신호를 제거할 수 있다. 그림 2.4.192는 분기기 등이 있는 역사를 통과할 때의 2차 감속기에 대한 실차시험 진동데이터에 대한 첨도이며, 시간동기평균에 의하여 주행시 궤도에 의한 영향이 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다.

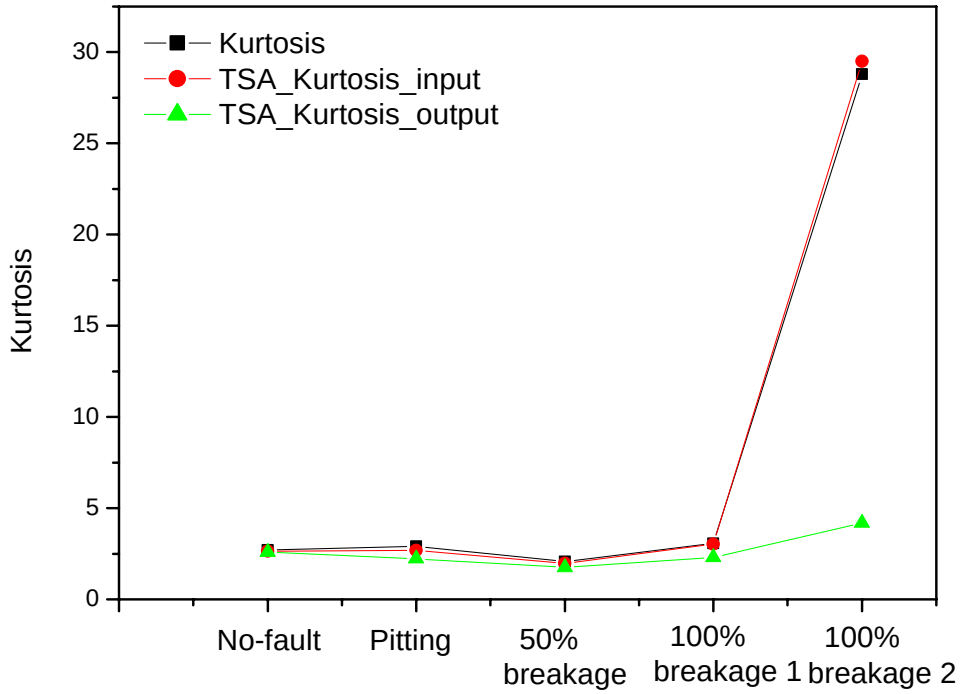



그림 2.4.191 토크 1,000 N · m, 속도 100km/h시 TSA 처리 전과 후의 첨도 비교

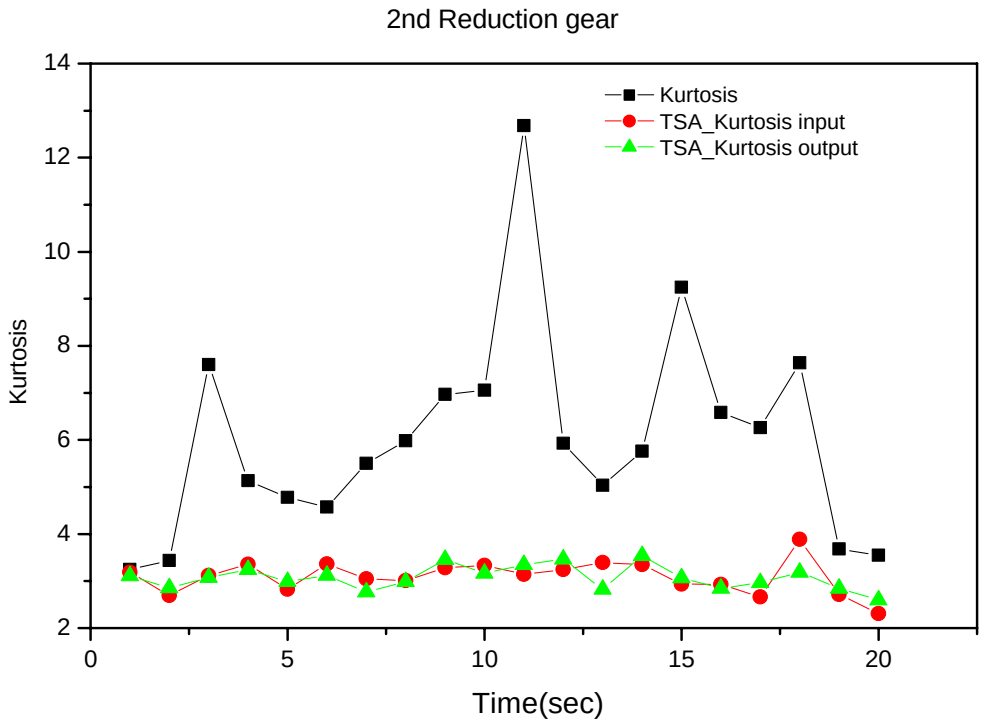



그림 2.4.192 실차시험시(속도 155 km/h) TSA 처리 전과 후의 첨도 비교

(마) residual 신호 및 difference 신호

결함이 발생시 정상적인 기어에서 발생하는 기어 맞물림 주파수 및 회전주파수 외에도 다른 주파수 성분도 커지게 된다. 기본적인 축 회전주파수 및 기어 맞물림 주파수 성분을 제거한 신호를 residual 신호라고 하며, residual 신호에 1차 사이드 밴드 주파수성분을 제거한 신호를 difference 신호라고 한다. 그림 2.4.193은 residual 또는 difference 신호 처리 과정을 나타낸 것으로 사이드 밴드오더 설정여부에 따라 residual 또는 difference 신호가 된다.

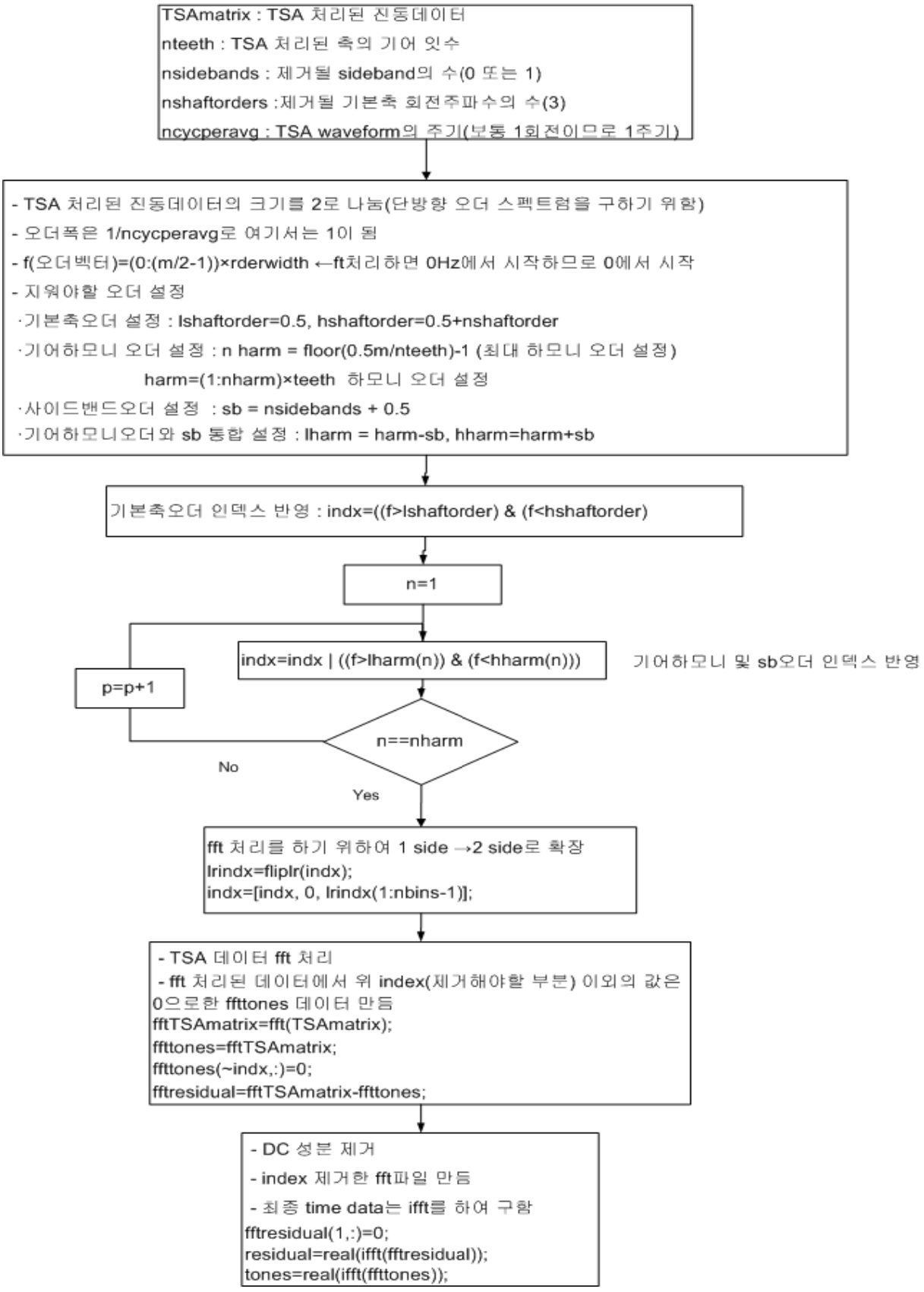



그림 2.4.193 residual(또는 difference)신호 처리 과정

(바) 실물감속기 이상상태 평가방법 결과 비교

시험조건은 토크 3,000 N · m, 속도 300 km/h로 하고 각 진단방법을 적용하여 정상상태를 100%로 하였을 때 손상별 진단방법에 따른 변화를 그림 2.4.194에 비교하여 나타냈다. 비교한 결과를 보면, RMS, SER, MED, NA6, NA4 순으로 변화의 폭이 줄어들고 있다. 그림 2.4.195는 속도가 100 km/h일 때의 각 진단방법에 따른 변화로서 NA6, SER, NA4, MED, RMS 순으로 변화의 폭이 줄어들고 있다. 시간영역에서는 RMS, 주파수 영역에서는 SER, TSA 처리한 결과는 NA4와 NA6가 손상 특성을 반영하고 있는 것으로 나타났다.

속도에 따른 진단방법별 특성을 보기 위하여 속도 100 km/h일 때의 진단값을 100%로 하였을 때 변화의 정도를 관측하였으며, 정상상태는 그림 2.4.196, 이상상태(기어 1개 파손)는 그림 2.4.197에 나타냈다. 속도에 따른 변동은 RMS, MED, SER에서 크게 나타나고 있으며, 속도의 변화에 영향을 덜 받는 진단방법은 Kurtosis, NA4, NA6로 나타났다. 전체 운행구간 및 다양한 속도에서 감속기를 진단하기 위해서 속도에 따른 변동이 적은 진단방법을 선택해야 하며, 속도에 민감한 진단 항목은 상호 비교하는 등의 보조적인 진단방법으로 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

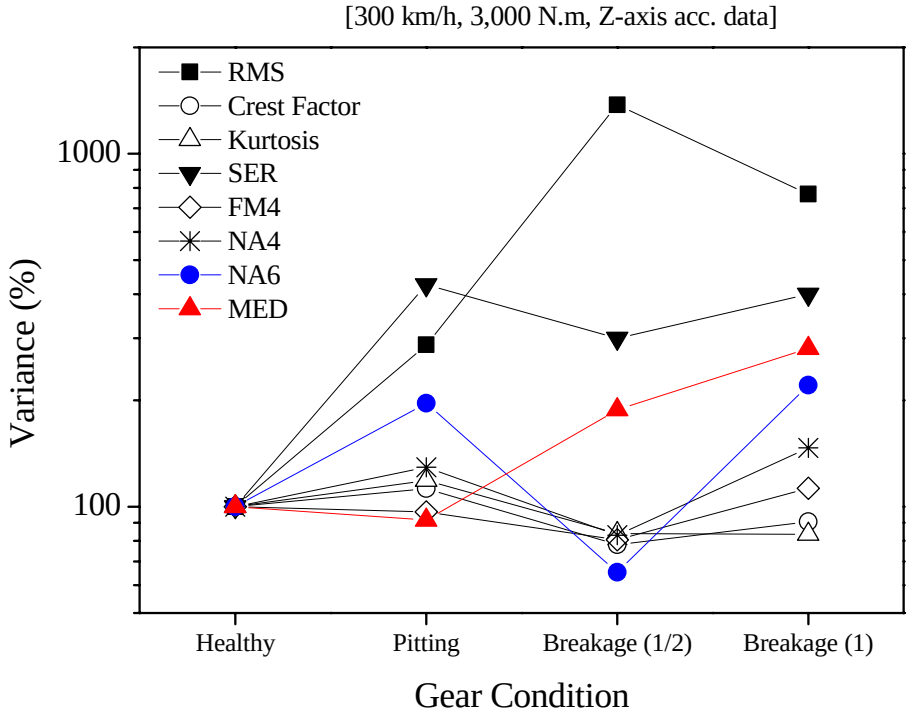



그림 2.4.194 300 km/h에서의 손상상태에 따른 진단방법 비교

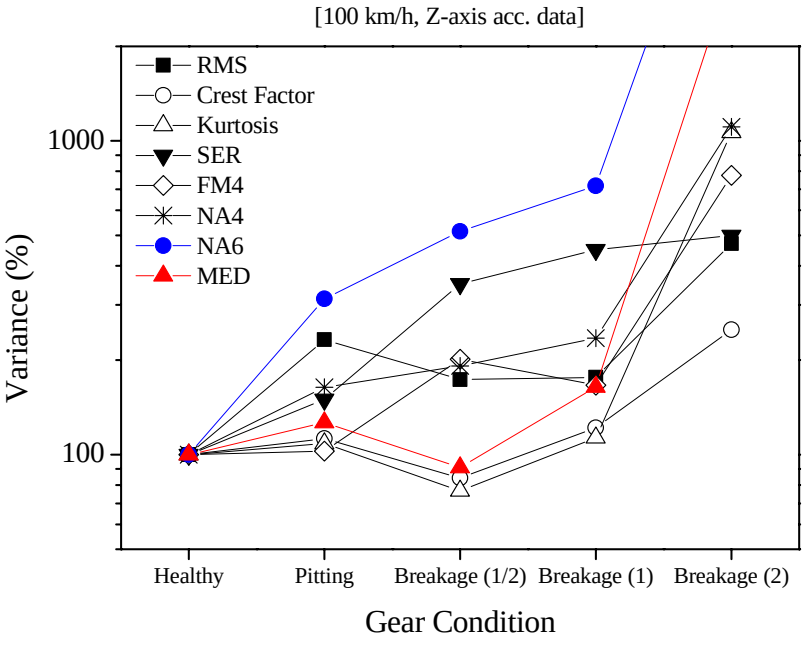



그림 2.4.195 100 km/h에서의 손상상태에 따른 진단방법 비교

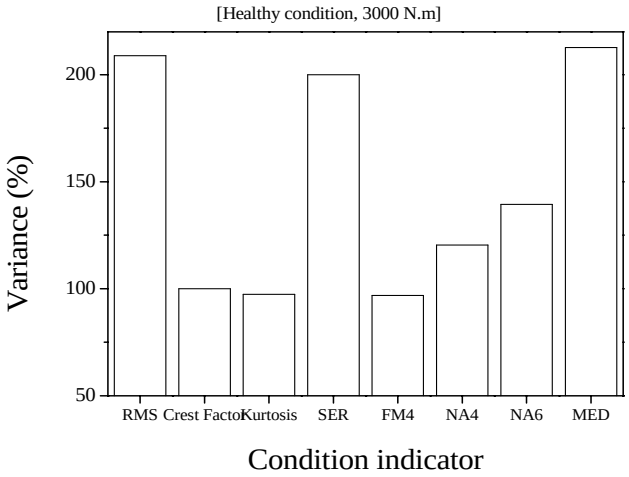



그림 2.4.196 정상상태시 속도에 따른 진단방법 비교

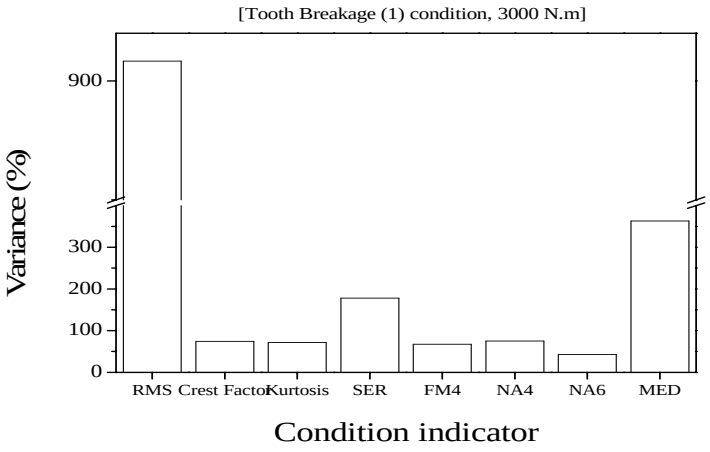



그림 2.4.197 이상상태(1개 파손)시 속도에 따른 진단방법 비교

다. 감속기 이상상태 진단 기준

(1) RMS 값 상대 비교에 의한 이상상태 진단 기준

이상상태 평가시 진동레벨(RMS)에 의한 방법은 결함에 대한 진단 파악에 효과적이지만 속도에 따른 변화로 인하여 진단 기준을 설정할 수 없다. 그러므로 절대적인 값이 아닌 차량내의 다른 감속기와의 상대적인 비교에 의하여 진단 기준을 제안할 수 있다. 평기어와 달리 헬리컬기어는 물림율이 크기 때문에 기어 1개가 절손되어도 물려있는 상태이므로 첨도 및 파고율에 의하여 진단하기 힘들기 때문에 보완 차원으로 본 진단 방법을 제안하였다.

진단기준으로 헬리컬기어는 실물시험 결과인 그림 2.4.194와 그림 2.4.195를 참고로 하였고 평기어는 시편시험 결과인 그림 2.4.198을 참고로 하여 표 2.4.20과 같이 진단 기준을 제안하였다. 진단프로그램에 적용은 1초 간격으로 RMS 값을 모니터링하고 주의값으로 1분 이상 지속시 주의 알람을 주고 위험값으로 1분 이상 지속시 위험 알람을 주도록 하였다.

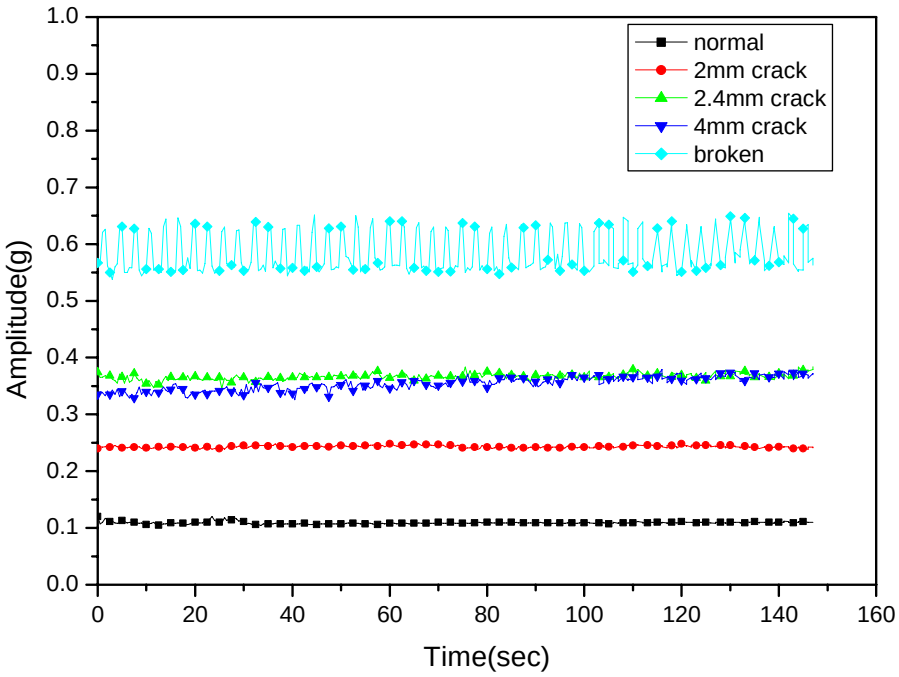



그림 2.4.198 시편시험에 의한 기어 손상에 따른 진동 수준 비교

표 2.4.20 RMS 이상상태 진단 기준

| RMS 값 | 상태 |
|---|---|
| 2배 미만 | 정상 |
| 2~5배 | 주의 |
| 5배 이상 | 위험 |

(2) 첨도에 의한 이상상태 진단 기준

감속기의 이상상태를 판단하기 위한 평가 기준을 설정하려면 결함이 있는 제품에 대하여 시험을 실시해야 한다. 실차에서는 결함이 있는 감속기를 시험할 수 없으므로 실물시험 등 시험실 수준에서 시험 및 분석을 통하여 이상상태 평가 기준을 설정해야 한다. 정상상태, 크랙상태(2 mm, 2.5 mm, 4 mm), 파손상태에 대하여 시편시험을 실시하고 변화를 나타낸 그림 2.4.199를 보면 정상상태는 약 3, 크랙이 있는 시편은 약 5~9, 파단된 시편은 약 90~190의 값을 나타내고 있다. 헬리컬 기어에 대한 실물시험은 그림 2.4.191에서 확인할 수 있는데 헬리컬 기어 특성상 물림율이 크므로 2개 파손시 약 28까지 올라가는데 그 외는 결함에 따른 변동이 적었다.

물림율이 작은 평기어(2차 감속기)의 경우, 속도와 부하에 따른 변동이 없는 무차원 파라메터인 첨도에 의한 진단은 효과적일 것으로 판단하여 표 2.4.21과 같이 진단 기준을 제안하였다. 진단 프로그램에 적용은 1초 간격으로 첨도 값을 모니터링하고 주의값으로 1분 동안 90% 이상 발생시 주의 알람을 주고 위험값으로 1분 동안 90% 이상 발생시 위험 알람을 주도록 하였다.

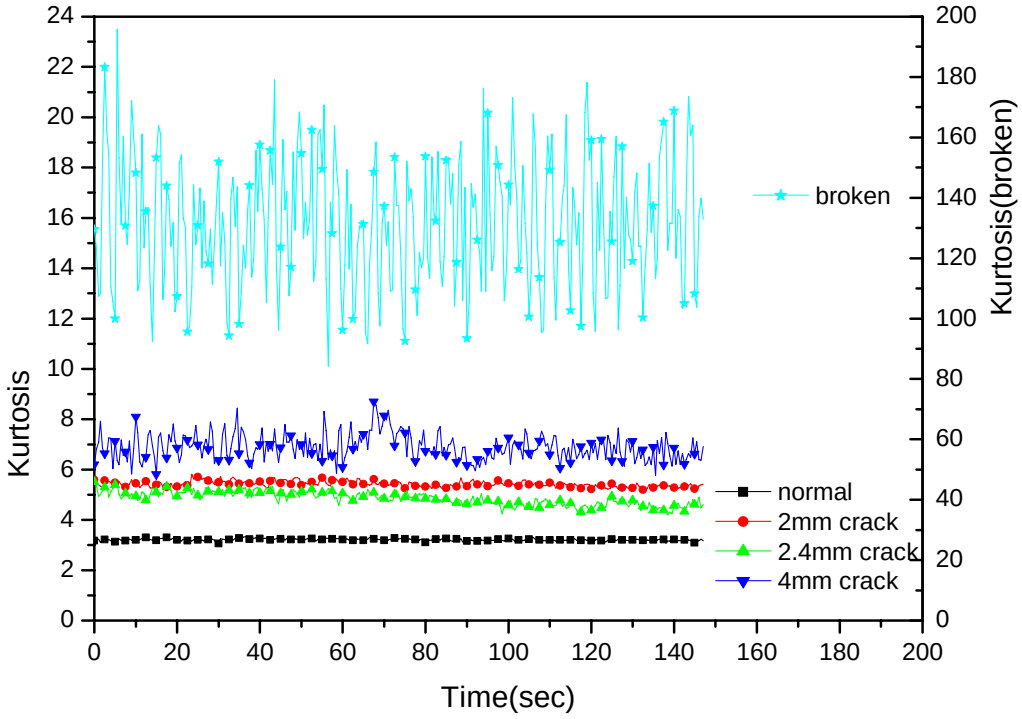



그림 2.4.199 시편시험에 의한 기어 손상에 따른 첨도 비교

표 2.4.21 첨도에 의한 이상상태 진단 기준

| 첨도(kurtosis) 값 | 상태 |
|---|---|
| 6 이하 | 정상 |
| 6~20 | 주의 |
| 20 이상 | 위험 |

(3) NA6에 의한 이상상태 진단 기준

본 과제에서 제안한 NA6는 residual signal을 이용하는데 손상을 더 잘 감지할 수 있도록 6차 모멘트를 적용하여 peak에 더 민감하도록 한 것이다. NA6는 이상상태 평가 방법 비교시 속도에 따른 변동이 적고 감속기 기어 손상 특성을 검출하는데 비교적 잘 반영하고 있는 진단 방법으로 NA6을 이용한 실물 시험에 따른 손상정도를 나타낸 그림 2.4.200을 보면 알 수 있다. TSA 처리를 한 후에 NA6를 적용하면 이상상태를 더 정확하게 진단할 수 있지만 실시간 모니터링 시스템 데이터 처리의 한계로 인하여 현재 모니터링 시스템에는 TSA 처리를 하지 않은 NA6가 반영되었다. 진단 기준으로 표 2.4.22와 같이 제안하였으며, 진단 프로그램에 적용은 1초 간격으로 NA6 값을 모니터링하고 주의값으로 1분 동안 90% 이상 발생시 주의 알람을 주고 위험값으로 1분 동안 90% 이상 발생시 위험 알람을 주도록 하였다.

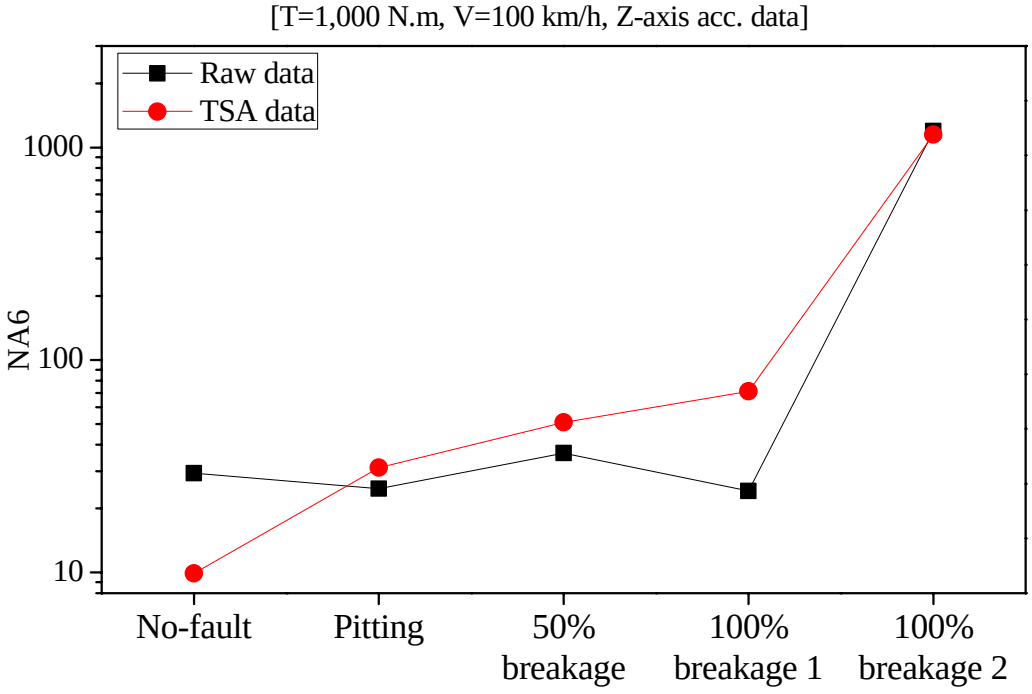



그림 2.4.200 실물시험에 의한 기어손상에 따른 NA6(TSA 처리 전후 비교)

표 2.4.22 NA6에 의한 이상상태 진단 기준

| NA6 값 | 상태 |
|---|---|
| 100 이하 | 정상 |
| 100~1,000 | 주의 |
| 1,000 이상 | 위험 |

# 제5절 감속기 진동진단 알고리즘 개발

## 1. 베어링 시스템

가. 베어링 시스템의 동적 특성

베어링의 결함에는 과열, 과대하중, False Brinelling, True Brinelling, 피로 결함, 오염, 반대방향의 하중, 윤활제 결함, 부식, 정렬불량 등이 있다. 이러한 요소들에 의하여 베어링이 손상 되면 베어링형상과 운전속도에 따라 결정되는 특이한 베어링 주파수가 발생하게 된다. 손상이 발생된 베어링은 기본적으로 5개의 결함 주파수를 발생한다.

첫 번째 주파수는 회전주파수(Rotating Frequency, N)로 모터의 회전에 의한 주파수 이고, 두 번째 주파수는 외륜의 볼 통과 주파수(Ball Pass Frequency of Outer race)는 외륜상의 한 점을 통과하는 볼의 주파수로

$$BPFO = N\frac{Z}{2}[1 - \frac{B}{P}cosq] \quad \text{----------(2.5.1)}$$

여기서 Z = 베어링의 잇수, N은 회전주파수 , B와 P는 각각 내경과 외경, q는 contact angle이다. 여기서 q는 롤러베어링일 경우 contact angle은 0 으로 한다.

세 번째 주파수는 내륜의 볼 통과 주파수(Ball Pass Freq. of Inner race)로써 내륜상의 한 점을 통과하는 주파수로 나타낸다.

$$BPFI = N\frac{Z}{2}[1 + \frac{B}{P}cosq] \quad \text{----------(2.5.2)}$$

네 번째 주파수는 볼 자전주파수(Ball Spin Freq.)로 볼 표면과 접촉하는 내륜 또는 외륜상의 한 점에 대한 각속도에 대응하는 주파수로로 나타낼 수 있다.

$$BSF = \frac{P}{2B}Z[1 - \left(\frac{B}{P}\right)^2 COS^2 q] \quad \text{----------(2.5.3)}$$

마지막으로 기본 열주파수(Fundamental Train Frequency)로 열(train) 또는 케이지(cage) 주파수는 각각의 볼 중심의 각속도에 대응하는 주파수로 나타낸다.

$$FTF = \frac{Z}{2}[1 - \frac{B}{P}cosq] \quad \text{----------(2.5.4)}$$

베어링 결함주파수는 회전속도로 변조되어, 회전속도 간격의 측대역(sideband) 주파수를 발생 하며, 어떤 경우에는 기본열 통과 주파수 혹은 볼자전 주파수가 고유진동수나 볼통과 주파수를 변조하기도 한다. 결함 베어링에서 발생하는 주파수는 베어링 주파수와 고유진동수 및 회전주파수의 조합으로 나타난다.

위와 같은 식을 이용하여 SKF 베어링에서는 베어링 특성 주파수에 대한 계산표를 만들어 두었고 본 연구에서는 그 표를 활용 하였다. 위 표에서는 1200rpm으로 구동하였을 경우에 대해서 베어링 특성 주파수를 보여 주고 있다. 각각에 대한 설명은 아래 표와 같다.

표 2.5.1 SKF사의 베어링 특성 주파수에 대한 계산표 파라메타

| | |
|---|---|
| d | bearing bore diameter [mm] |
| D | bearing outside diameter [mm] |
| ni[r/min] | rotational speed of inner ring [r/min] |
| ne[r/min] | rotational speed of outer ring [r/min] |
| fi[Hz] | rotational frequency of inner ring |
| fe | rotational frequency of outer ring |
| fc | rotational frequency of rolling element assembly |
| fr | rotational frequency of a rollimg element |
| fip | over-rolling frequency of one point on inner ring<br>(frequency when one point on inner raceway is damaged ) |
| fep | over-rolling frequency of one point on outer ring [Hz]<br>(frequency when one point on outer raceway is damaged ) |
| frp | over-rolling frequency of one point on rolling element [Hz]<br>(frequency when one point on a rolling element is damaged. A ball may change its rotational axis and thus not always be overrolled at the same point) |

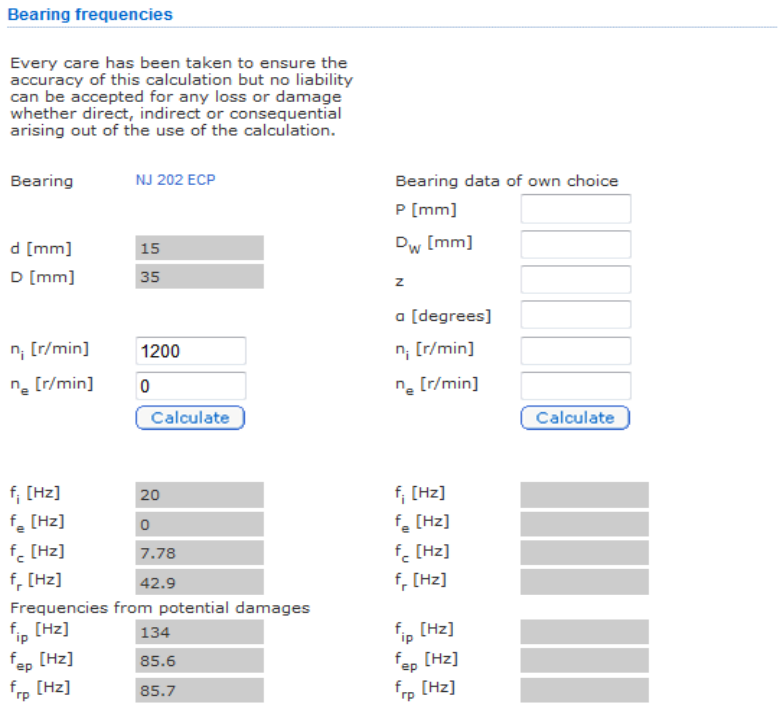



그림 2.5.1 SKF 사의 베어링 특성주파수 계산표

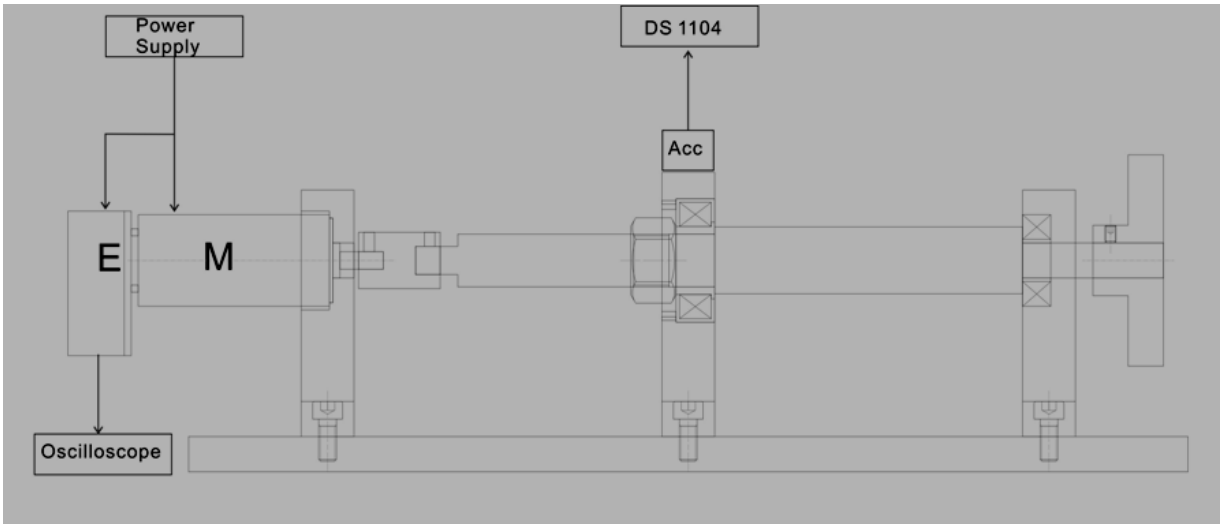



그림 2.5.2 베어링 특성 주파수 측정을 위한 실험장치 Schamatic

나. 베어링시스템의 실험모델 구현 및 검증

손상된 베어링의 특성 회전 주파수를 측정하기 위해 그림 2.5.2와 같은 실험 장치를 제작하였다.

실험 장비 구성은 위에서 보는 그림 2.5.3과 같다. 모터는 정격 12v에서 6000rpm의 회전수를 갖고, 모터 자체의 진동이 적은 coreless 타입의 모터를 사용하였다.

또한 모터축과 축과의 얼라이먼트를 고려해 커플링을 사용하였다. 모터의 회전수는 앤코더를 이용하여 정확한 회전수를 측정하였으며, PCB사의 500mv/g 급 가속도계를 베어링 하우징 윗부분에 설치하여 베어링의 특성 주파수를 계측하였다.

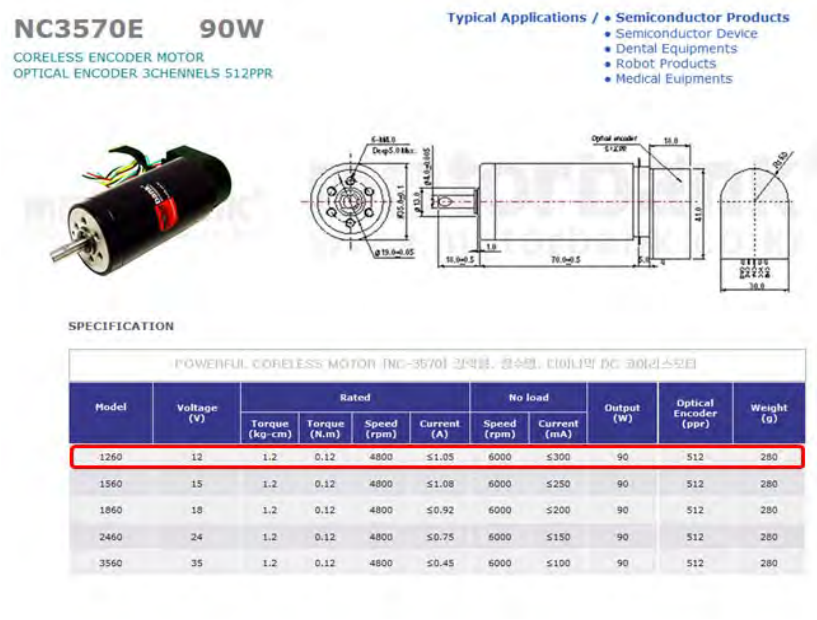



그림 2.5.3 실험장치에 사용된 모터 제원 : 정격 12v, 최대 6000rpm



그림 2.5.4 PCB사의 가속도계

측정된 데이터는 DSpace 사의 1104 모델을 통해 50kHz 의 샘플링 속도로 데이터를 저장하였다.

실험에 사용한 베어링은 다음 그림과 같은 SKF 사의 NJ 202 ECP 모델로서 inner 링과 outer 링이 분리되는 타입이며 정격하중 12.5kN에 22000r/min 까지 가능한 베어링을 사용하였다. 정상적인 베어링의 회전 주파수와 데미지를 입은 베어링의 회전주파수 차이를 비교하기 위해 베어링 inner 링에 사진과 같은 데미지를 주고 A상태의 inner 링을 결합한 베어링과 B상태의 inner링을 경합한 베어링의 가속도 신호의 계측실험을 수행하였다.

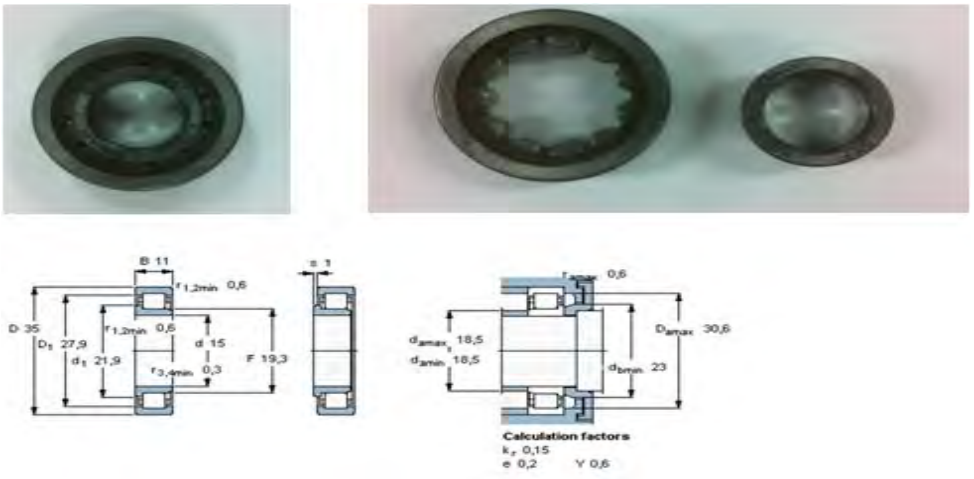



그림 2.5.5 실험에 사용된 SKF 사의 NJ 202 ECP 타입의 베어링 제원



A B

그림 2.5.6 글라인더로 손상시킨 inner링을 A로 명칭하고 정상상태의 inner링을 B로 명칭

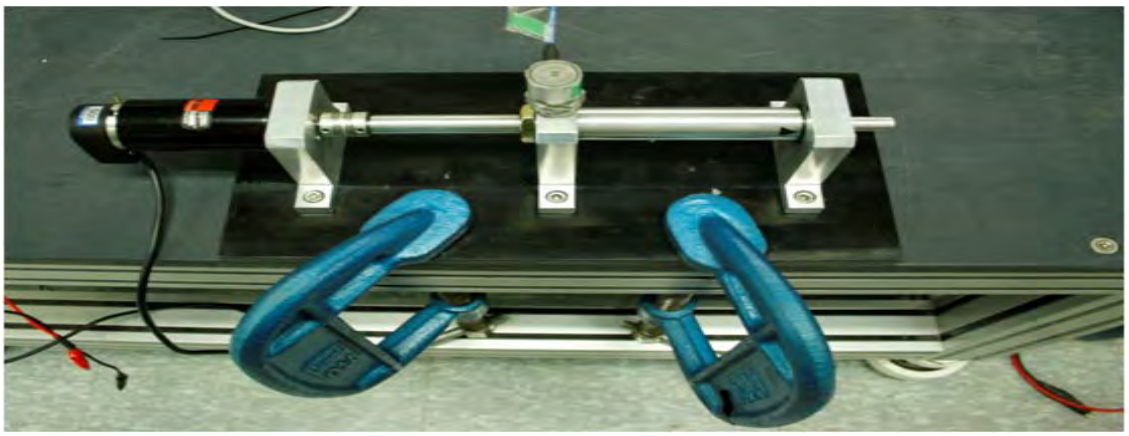


그림 2.5.7 베어링 특성 주파수 측정을 위한 실험장치(Type.1) Hardware 사진

다. 베어링시스템의 실험결과

다음의 결과들은 정상적인 베어링과 손상된 베어링에 대해서 계측된 가속도 신호와 그 신호에 대한 FFT 결과이다. DSpace 1104 장비를 이용해 5초 동안 50kHz 샘플링 속도로 데이터를 측정하였으며, 아래그림은 결과는 5초 동안 받은 데이터의 짧은 구간에 대한 그림이며, FFT는 5초 동안 받은 가속도 신호에 대해서 수행하였다.

그림 2.5.8 ~ 2.5.11은 정상상태 베어링과 손상된 베어링의 가속도 신호를 보여 주고 있다. 위 그림에서 보이듯이 정상상태에서도 특정하게 가속도가 커지는 부분을 볼 수 있다. 이는 현재 구성되어 있는 실험 모델의 회전 얼라이먼트가 정확하게 잡혀 있지 않다는 것을 보여준다. 위의 가속도 신호를 이용하여 Spectral Analysis 한 결과 전체적이 가속도 레벨은 높아지는 것을 보여주고 있다. 하지만 내륜 볼 패스 주파수(BPFI)는 회전주파수나, 질량 불평형과 같은 회전 결함으로부터 발생하는 진동수가 상대적으로 커서 큰 신호에 묻히는 결과가 발생하였다. 이는 회전축의 얼라이먼트가 틀어지면서 발생하는 문제라고 판단된다.

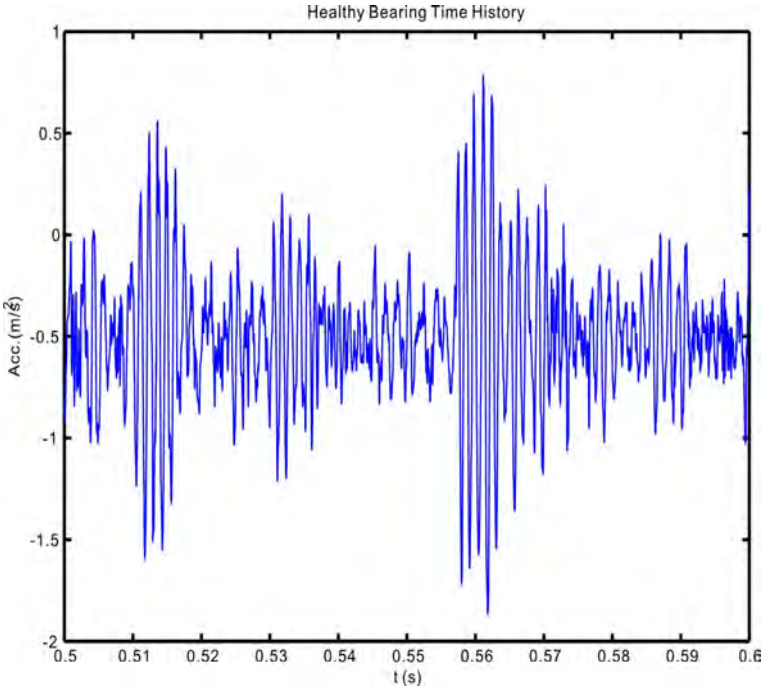



그림 2.5.8 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의
정상적인 베어링의 가속도 데이터

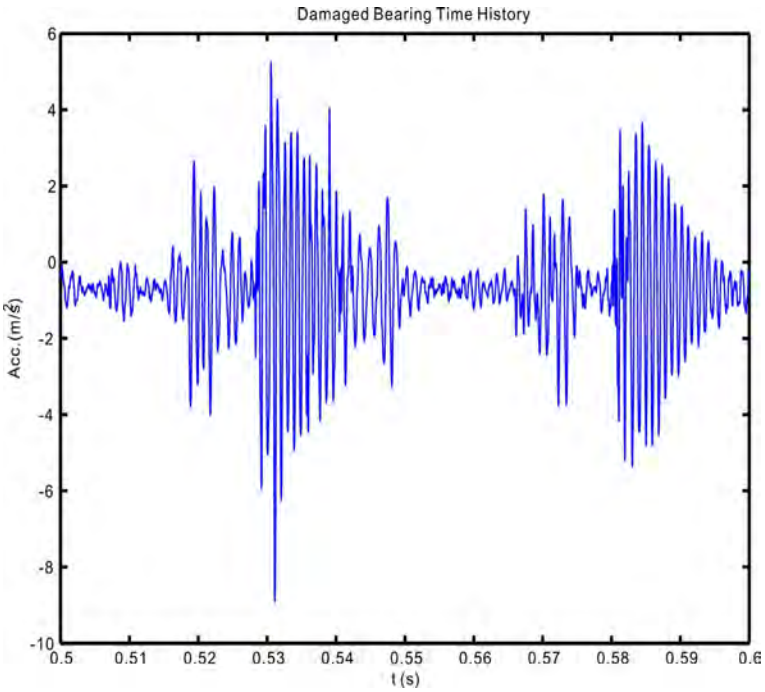



그림 2.5.9 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의
손상된 베어링의 가속도 데이터

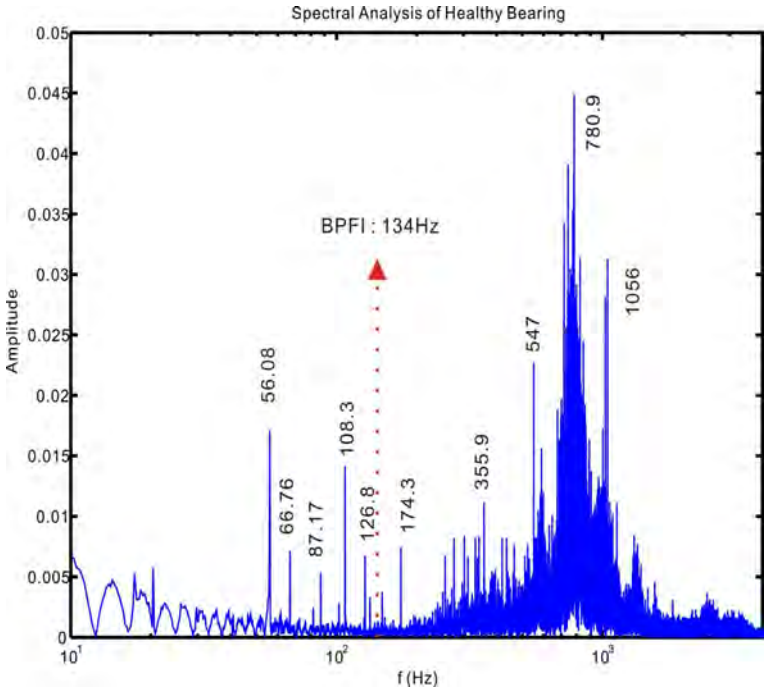



그림 2.5.10 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 정상적인 베어링의 가속도 데이터 FFT

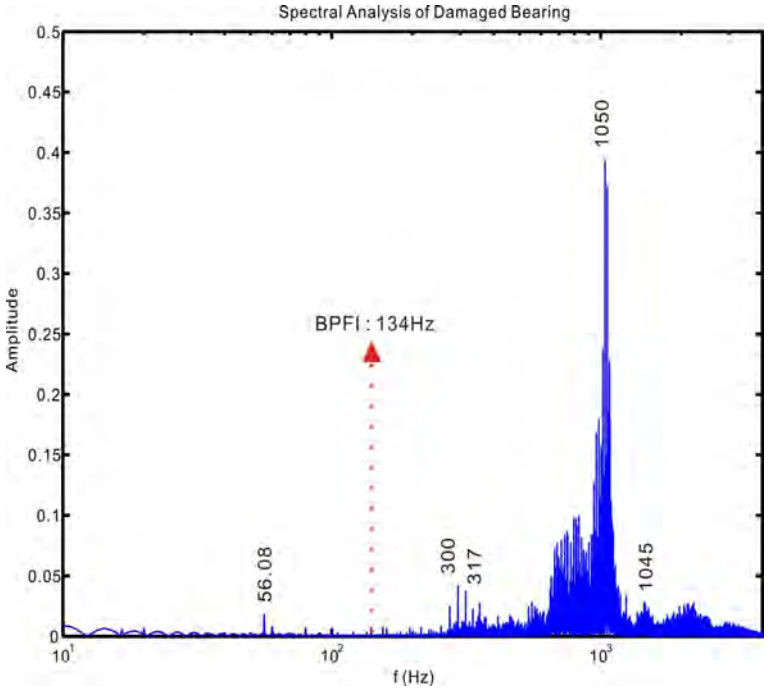



그림 2.5.11 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터 FFT

그림 2.5.12 ~ 2.5.17은 각 회전 rpm 에 따른 가속도 계측값이다. 이 계측값을 토대로 베어링의 손상 여부를 판단하기 위해 RMS (Root Mean Square) 값을 이용하였다. 이는 베어링이 손상되었을 경우 나타나는 특성주파수를 찾는 방법보다 간단하고 손쉽게 베어링의 손상여부를 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

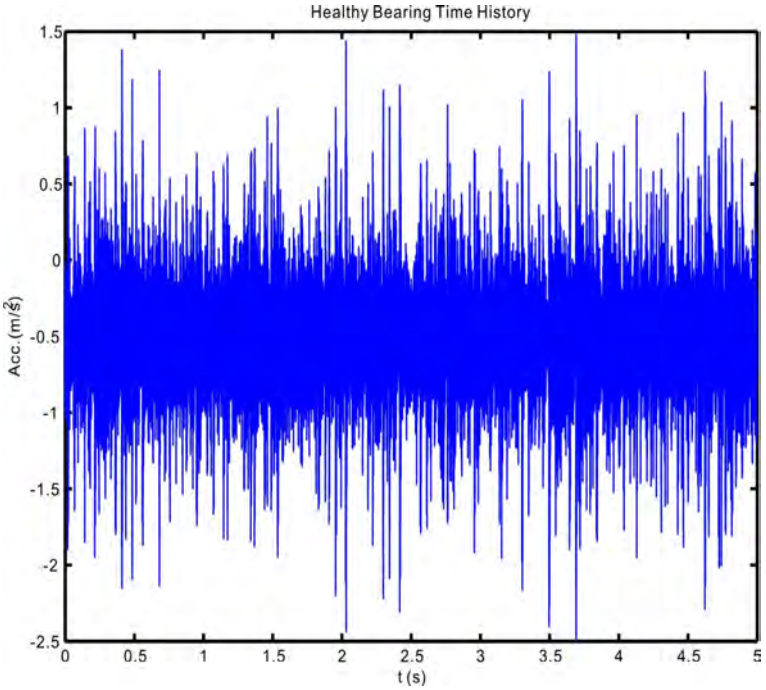



그림 2.5.12 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 정상상태의 베어링의 가속도 데이터

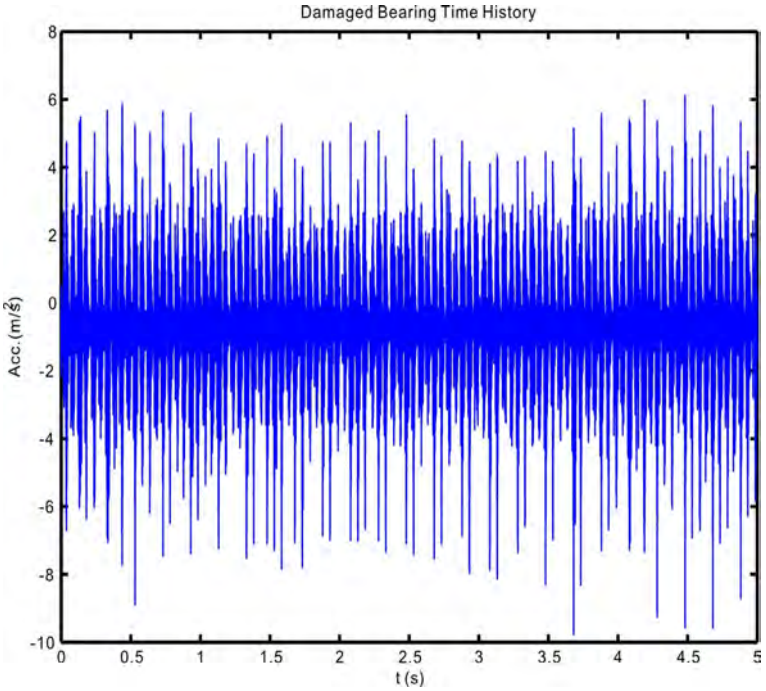



그림 2.5.13 수정 전 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터

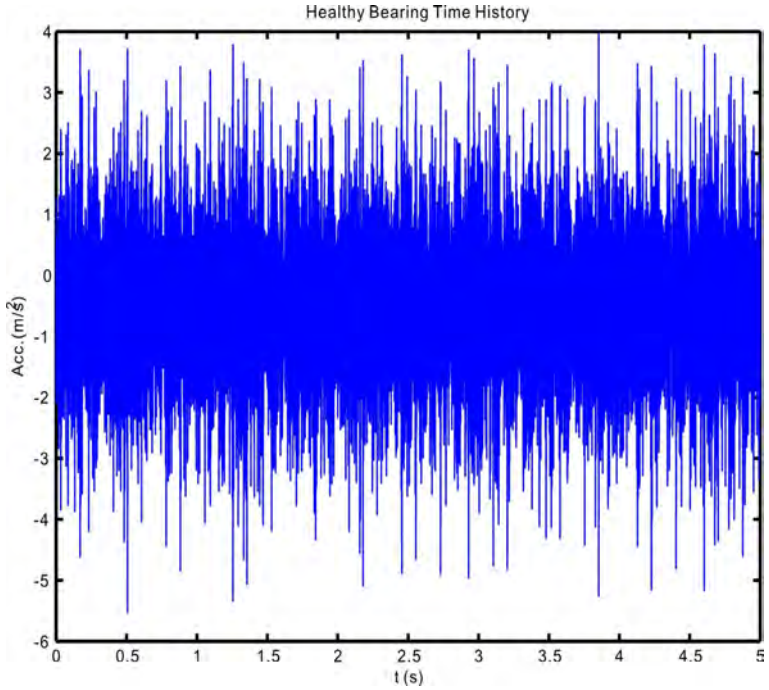



그림 2.5.14 수정 전 실험장치를 이용한 2400rpm에서의 정상상태의 베어링의 가속도 데이터

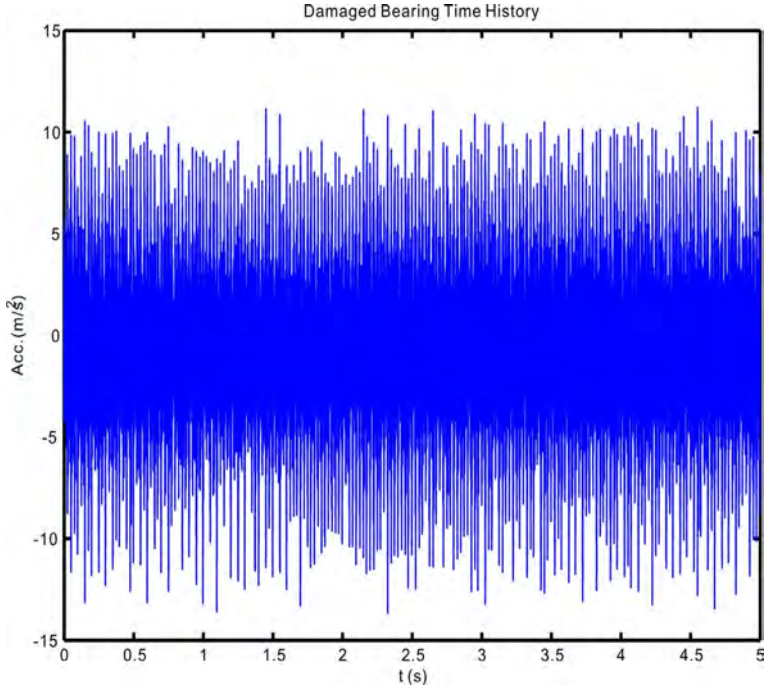



그림 2.2.15 수정 전 실험장치를 이용한 2400rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터

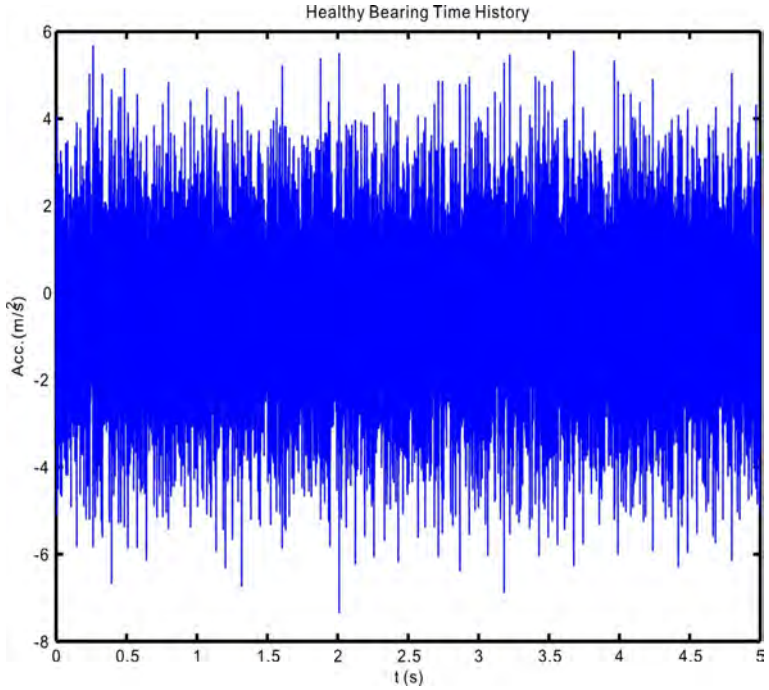



그림 2.5.16 수정 전 실험장치를 이용한 3600rpm에서의 정성상태의 베어링의 가속도 데이터

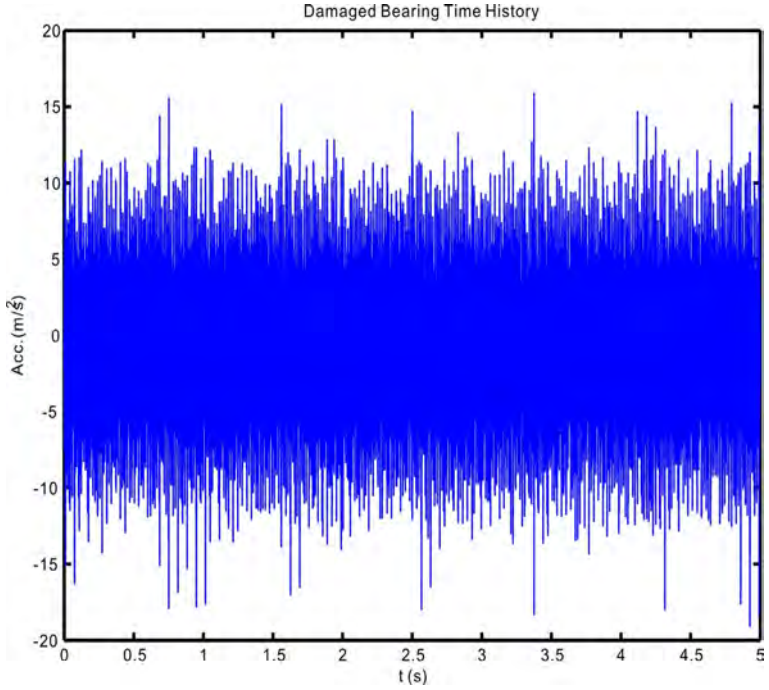



그림 2.2.17 수정 전 실험장치를 이용한 3600rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터

여기서 식 2.5.5는 RMS 값을 계산하는 식으로 다음과 같다.

$$y_s = \sum_{i=1}^{N} y_i^2 / N \quad \text{----------(2.5.5)}$$

RMS 값은 계측된 가속도값에 대해 RMS 값의 결과를 도출하였다. 다음 표 2.5.2 에서 보이는바와 같이 손상된 베어링의 RMS 값이 정상상태 베어링의 RMS 값보다 큰 것을 확인할 수 있다.

표 2.5.2 가속도 데이터 RMS 값 비교

| | 정상상태 베어링 | 손상된 베어링 |
|---|---|---|
| 20Hz | 0.6002 | 1.4320 |
| 40Hz | 1.0700 | 2.8325 |
| 60Hz | 1.5484 | 3.4247 |

또한 PSD(Power Spectral Density)의 커브의 면적으로도 표 2.5.3과 같이 베어링의 손상여부를 판단할 수 있다.

표 2.5.3 Power Spectral Density Curve 의 면적값 비교

| | 정상상태 베어링 | 손상된 베어링 |
|---|---|---|
| 20Hz | 21.7880 | 72.4203 |
| 40Hz | 54.1421 | 138.8821 |
| 60Hz | 88.8637 | 197.4528 |

그림 2.5.18은 처음 실험에서 발견된 얼라이먼트의 문제점을 해결하기 위해 아래 사진과 같이 실험 장비를 수정하였다. 수정한 실험 장비는 축에 질량을 추가할 수 있게 플라이휠을 설계해 추가하였다. 축의 얼라이먼트를 정렬 시킨 상태에서 실험을 수행하였다.

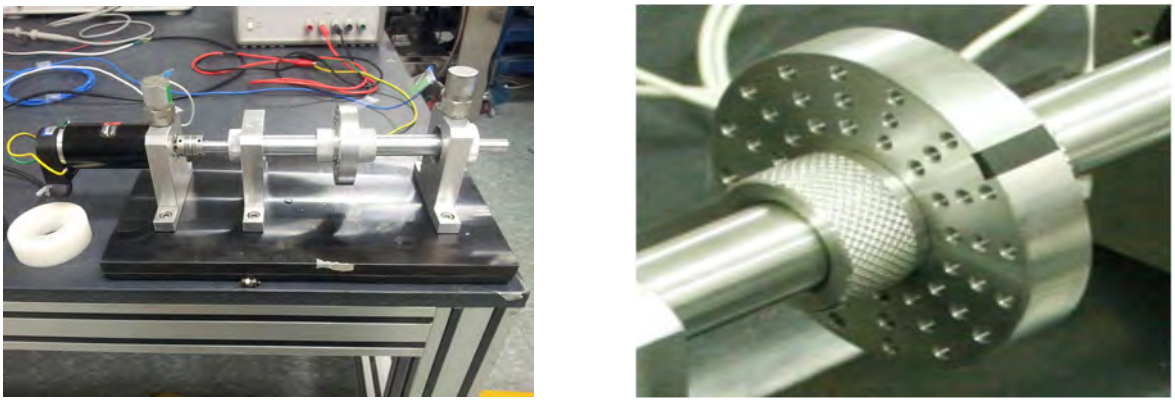


그림 2.5.18 수정된 실험장치의 실제 사진과 회전축의 얼라이먼트 정렬을 위한 플라이휠

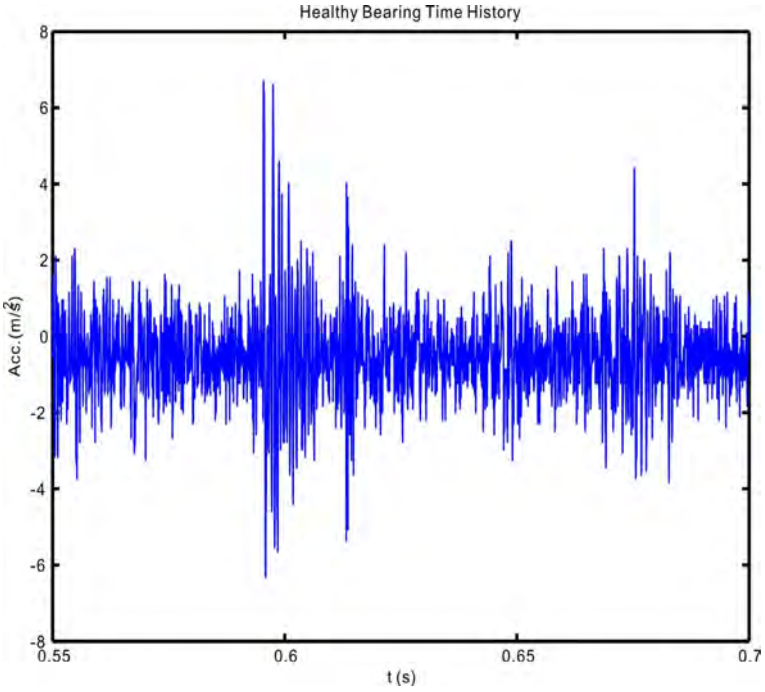



그림 2.5.19 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 정상적인 베어링의 가속도 데이터

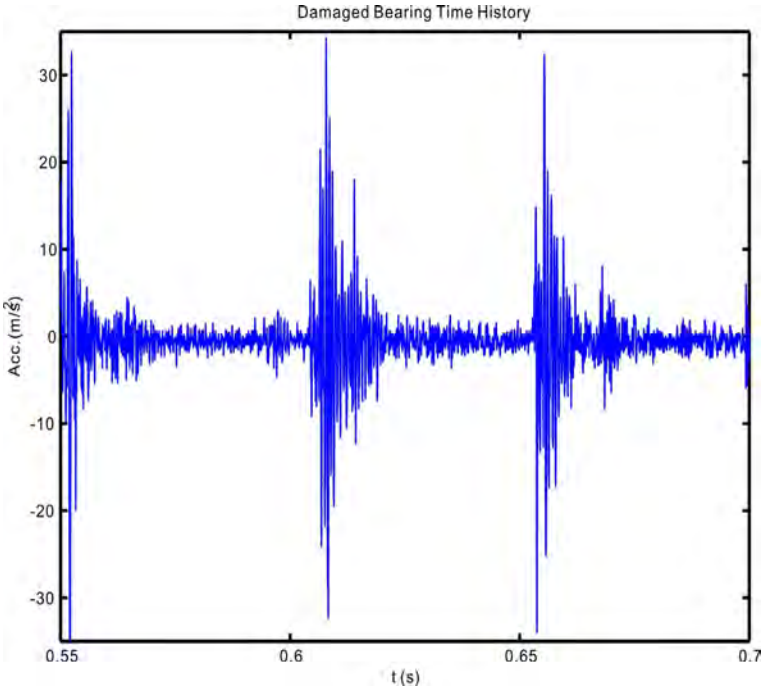



그림 2.5.20 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터

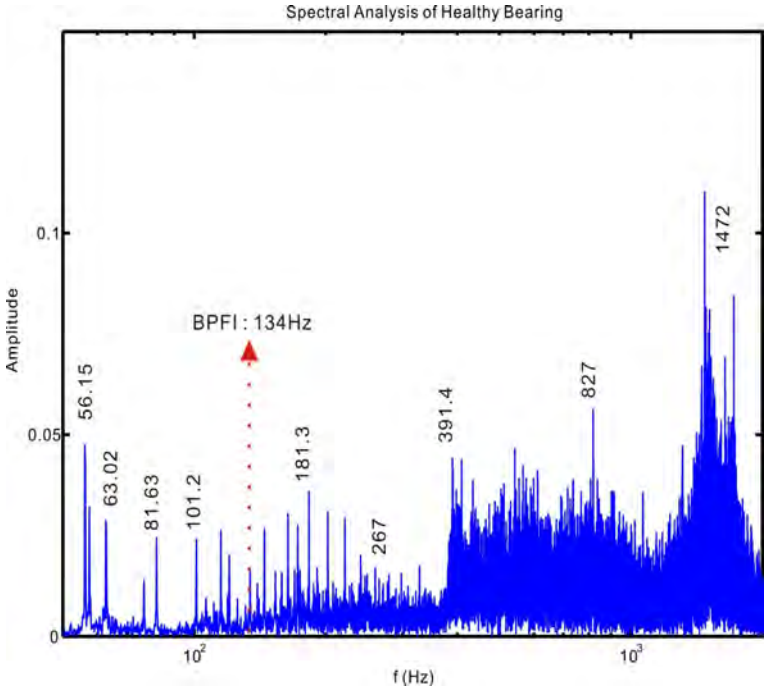



그림 2.5.21 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 정상적인 베어링의 가속도 데이터 FFT

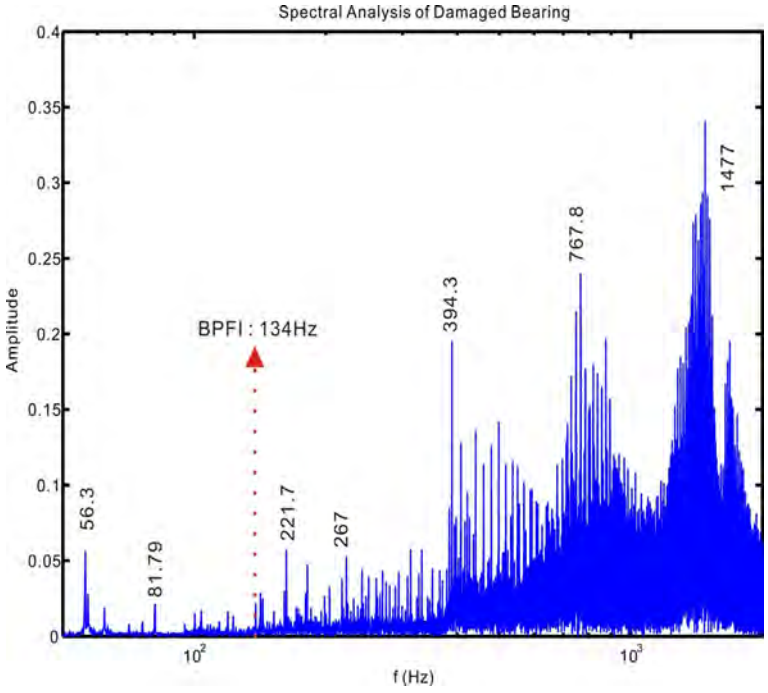



그림 2.5.22 정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링의 가속도 데이터 FFT



a) m2



b) m3

그림 2.5.23 손상된 베어링 m2 타입과 m3 타입

수정된 실험 장치를 이용한 실험결과를 보면, 얼라이먼트가 정렬됨에 따라 반복적인 실험에도 유사한 경향의 데이터를 얻을 수 있었다. 수정된 실험 장치를 이용하여 다른 조건의 손상을 가한 베어링에 대한 실험을 수행하였다. 그림 2.5.23과 같이 줄을 이용하여 inner 링에 손상을 가하였으며 m2로 칭한 데미지는 inner 링의 중간까지 줄을 이용하여 손상시킨 경우고, m3는 사진과 같이 전체에 손상을 가한 경우이다.

손상정도가 다른 베어링을 이용해 얻은 실험 결과는 그림 2.5.24 ~ 2.5.27과 같으며 손상의 정도에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 사료된다. 손상의 정도와는 크게 관계없이 비슷한 가속도 계측결과 값을 보이며 앞서 얼라이먼트가 부정확했던 실험치를 이용한 경우와 손상부분이 지나치게 큰 경우의 경향보다 베어링 파괴 특성 주파수에 비슷한 주파수가 측정된 것을 확인 할 수 있다. 또한 위 실험의 가속도 데이터에 대한 RMS 값 비교를 통해 손상된 베어링을 판단할 수 있음을 확인하였다.

표 2.5.4 수정된 실험장치를 이용한 실험의 RMS 값 비교

| 회전수 1200rpm | 정상상태 베어링 | 손상된 베어링 (m2) | 손상된 베어링 (m3) |
|---|---|---|---|
| 가속도 데이터 RMS 값 | 0.7799 | 4.6211 | 4.081 |
| PSD curve의 면적 값 | 0.0029 | 0.0142 | 0.0124 |

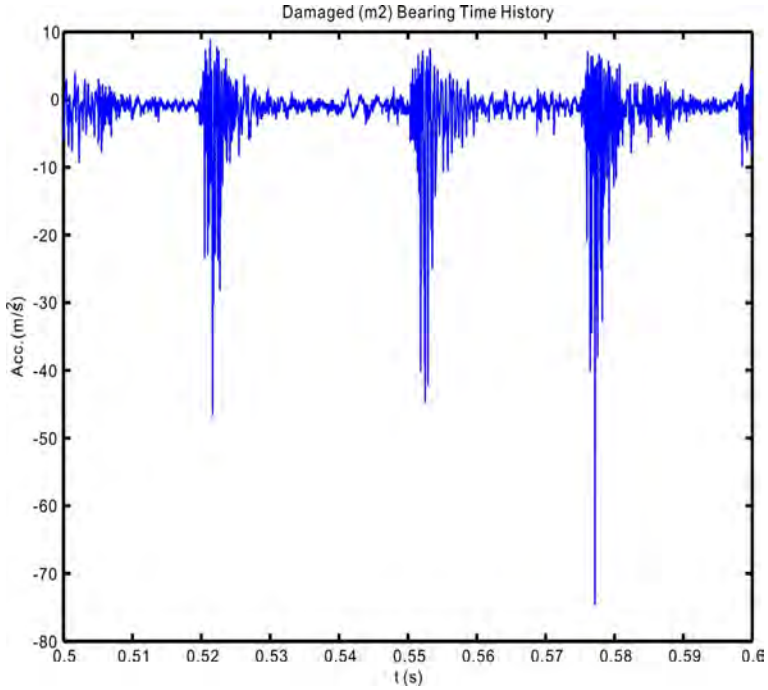



그림 2.5.24 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터

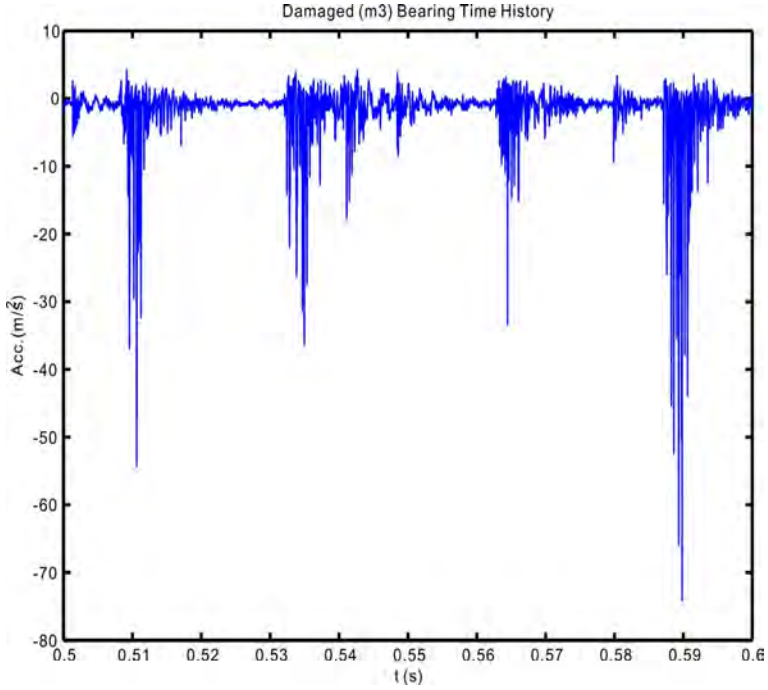



그림 2.5.25 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터

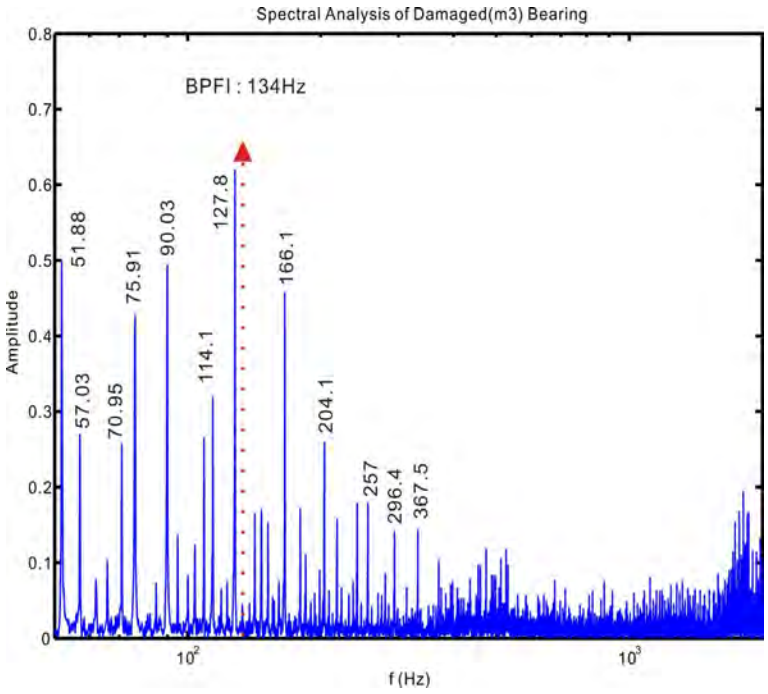



그림 2.5.26 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 FFT

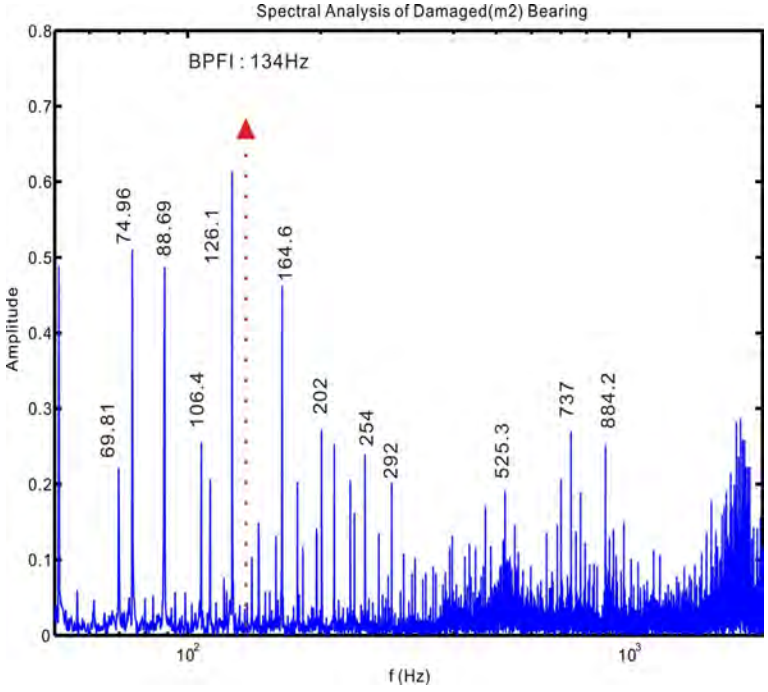



그림 2.5.27 수정된 실험장치를 이용한 1200rpm에서의 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터 FFT

라. 감속기 이상 진단 알고리즘 설계

다음 그림 2.2.28 은 감속기 이상 진단 알고리즘과 감속기 이상 진단 모니터링 및 경향 분석에 대한 흐름도이다. 현재 개발 중인 베어링 이상 유무 진단 알고리즘, 기어 이상 유무 진단 알고리즘 개발 완료 시 좀 더 세밀한 이상 진단이 가능해 진다.

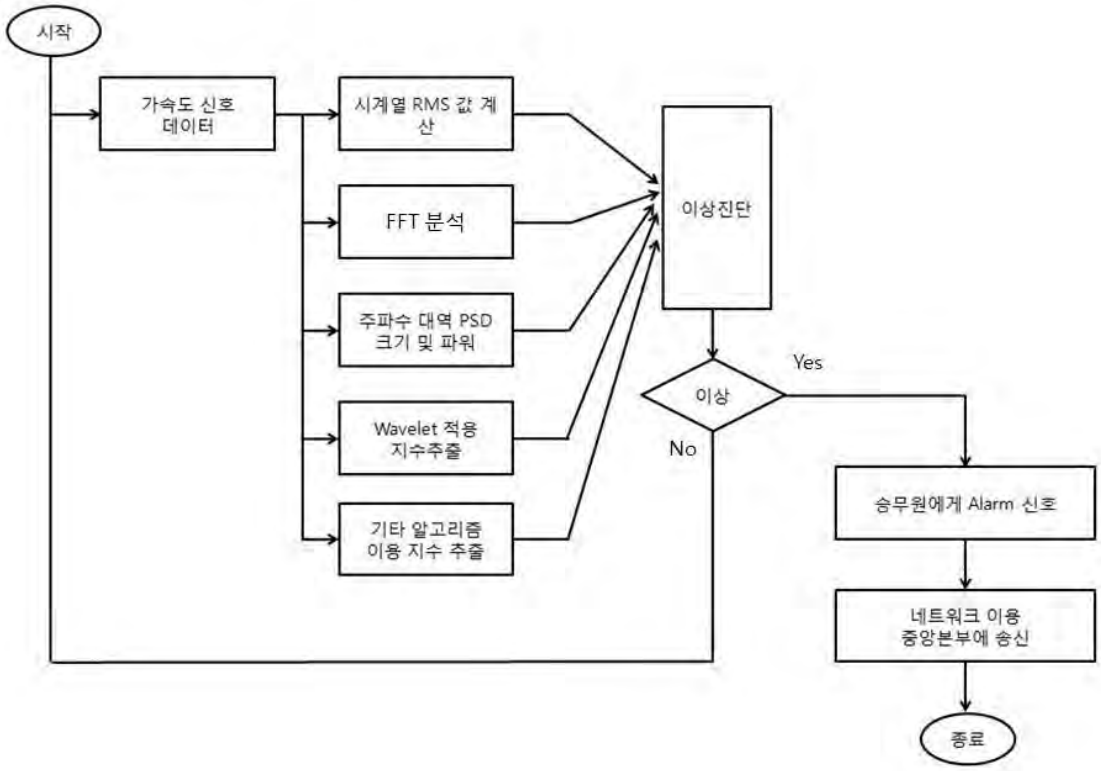



그림 2.5.28 감속기 이상 진단 알고리즘 흐름도

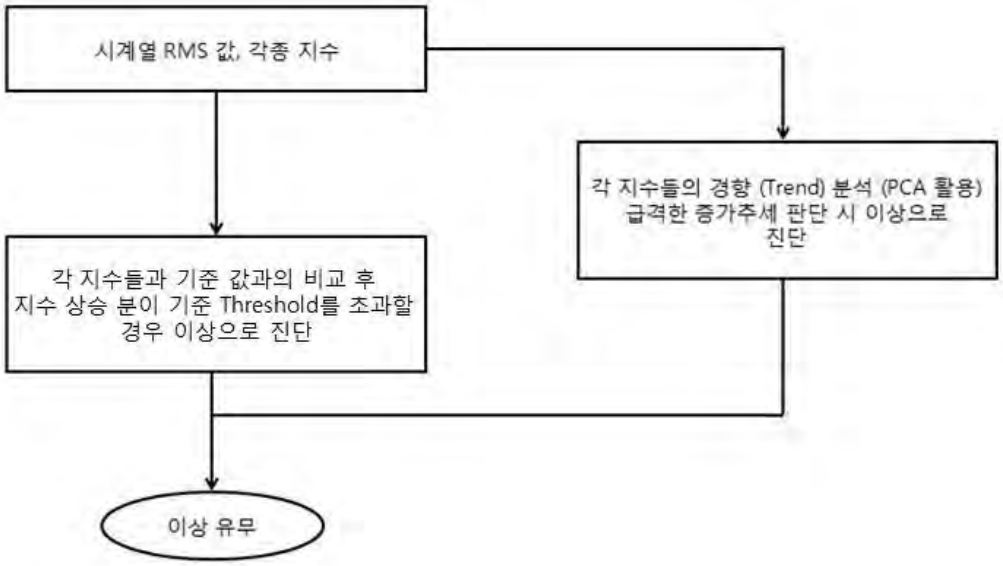



그림 2.5.29 감속기 이상 진단 모니터링 및 경향분석 흐름도

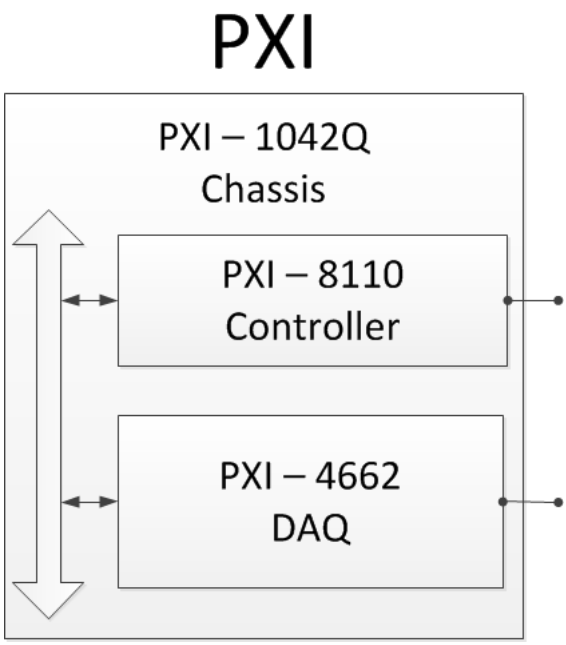
마. NI 측정 장비를 이용한 2차 실험 장치의 베어링 실험과 측정 자료

NI 측정 장비를 이용하여 같은 실험을 수행한 이유는 현재 보유한 50kHz 샘플링속도가 한계인 DSpace장비에서 놓치는 특성주파수가 있을 가능성이 있기 때문이다. 본 실험에 사용된 NI 측정장비의 경우 200kHz 까지 샘플링속도 설정이 가능하다. NI 측정장비에 대해 조금 더 설명하면 National Instruments 사의 Data Aquisition 장비로 일반 산업용 PC의 사양을 지니고 있어 사용환경의 선택이 비교적 자유로우며 일반적인 PC의 기능을 갖추고 있어 분석 툴의 설치가 가능하다. PXI를 작동하여 실험 데이터의 수집을 위해서 기본적으로 LabVIEW가 설치되어 있으며 일반적인 Windows OS 기반이므로 기타 분석 툴의 자유로운 설치 및 사용이 용이하다.

실험에 사용된 NI사의 PXI장비의 제원은 표 2.5.5에서 볼 수 있으며 앞서의 설명한 바와 같이 이번 실험에 충분히 사용가능한 성능을 지니고 있음을 확인할 수 있다.



a) NI사의 PXI장비의 전면부 DAQ포트




b) PXI장비의 컨트롤러와 DAQ, 그리고 외부와의 신호 연결에 대한 도식

그림 2.5.30 PXI 장비 및 도식도

표 2.5.5 NI사의 PXI장비의 제원

| | | |
|---|---|---|
| PXI – 1042Q Chassis | 작동 온도 범위 | 0℃~55℃ |
| | 입력 전압 범위 | 100V, 240V |
| | 최대 시스템 대역폭 | 132 MB/s |
| PXI - 8110 Controller | Intel Core 2 quad Q9100 2.26 GHZ<br>4GB DDR2 RAM | |
| PXI - 4662 DAQ | 채널 개수 | 4 |
| | 해상도 | 24 bit |
| | 최대 샘플속도 | 204.8 kS/s |
| | 소프트웨어 구성가능한 AC/DC 커플링 및 IEPE 컨디셔닝 (ICP센서 지원) | |

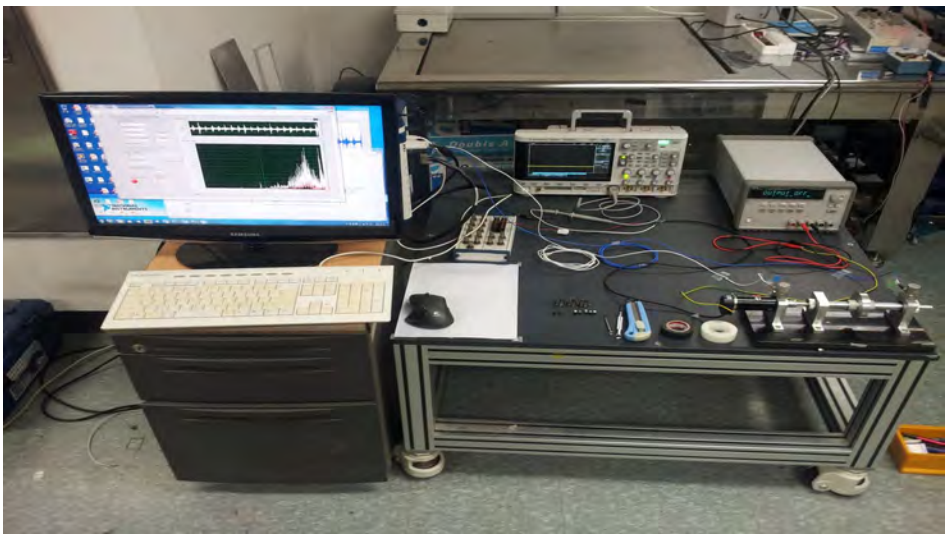


그림 2.5.31 수정된 실험장비에 PXI를 이용하여 실험을 구성한 모습

앞서 보여진 수정된 실험장비에 PXI를 그림 2.5.31과 같이 구성하였으며 측정 신호의 전체적인 흐름에 대한 다이어그램은 그림 2.5.32와 같다.

실험은 우선 Power Supply를 이용하여 BLDC 모터에 각각 4V, 8V, 12V로 인가하였으며 BLDC모터의 회전 속도는 모터에 내장된 인코더의 신호를 오실로스코프를 이용하여 확인하였다. 가속도계의 장착위치는 실험 베어링 마운트의 상부와 모터 마운트의 상부에 장착하였으며 두 가속도 신호는 PXI장비를 이용하여 동시에 측정하였다. 샘플링 속도는 DSpace장비와의 비교를 위해 50kHz의 샘플링 속도를 우선 측정하였고 PXI장비의 높은 샘플링 속도를 이용하기 위해 100kHz의 샘플링 속도로 한번 더 측정하였다. 베어링의 손상 케이스는 3종류로 Inner Ring에 각각 작은 scratch가 있는 m1 케이스, 긴 scratch가 있는 m2 케이스, 깊은 홈이 있는 m3 케이스가 있으며 비손상 Healthy 케이스까지 실험은 총 4가지 케이스에 대해 수행하였다. 회전속도는 오실로스코프를 이용하여 모터 내장인코더의 1회전 펄스인 z축상을 측정하였으며 각각 4V에서 20Hz(Rev. per Sec.), 8V에서 40Hz, 12V에서 61Hz로 측정되었다. 정리하면 4케이스에 대해 다른 2개 샘플링 속도를 적용하여 8번의 측정이 각각 5초간 수행되었다. 수정된 실험 장치에서 PXI를 이용한 측정 결과는 그림 2.5.33 ~ 2.5.48과 같다.

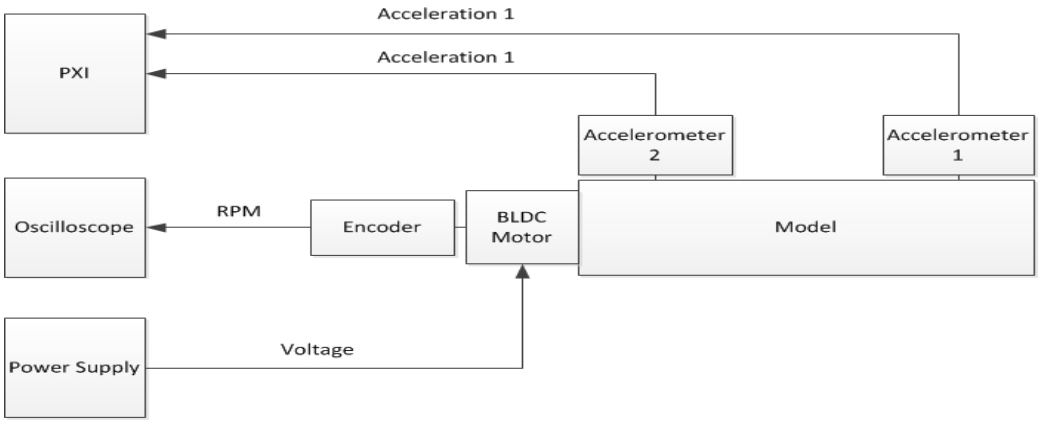



그림 2.5.32 PXI를 이용한 실험의 측정 신호의 흐름을 나타낸 다이어그램

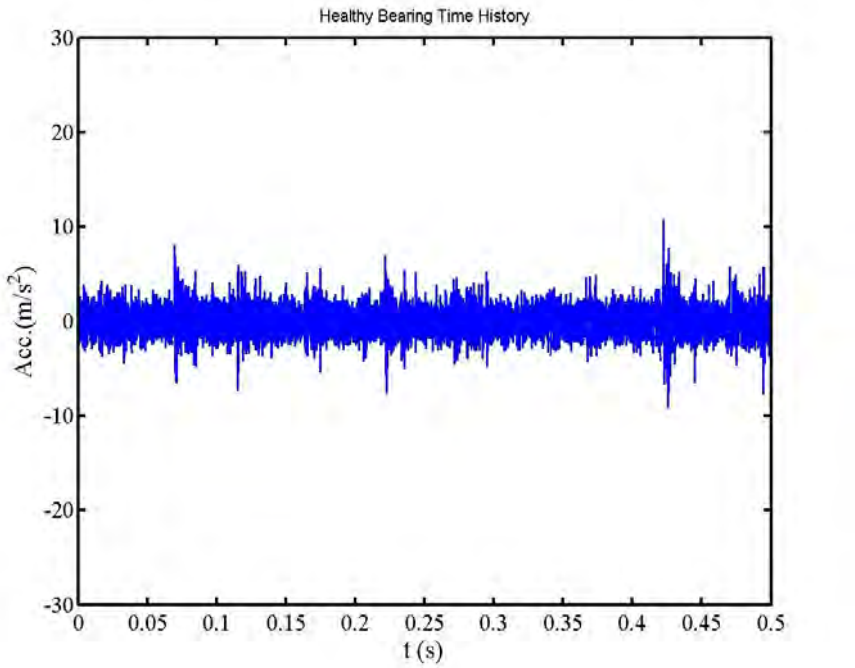



그림 2.5.33 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 정상적인 베어링의 가속도 데이터 : 샘플링속도 50 kHz

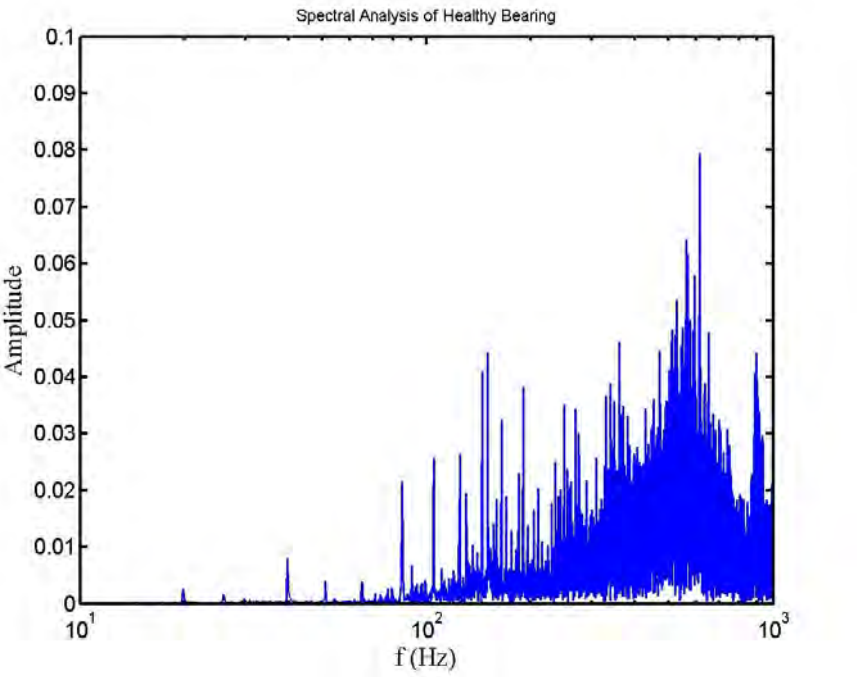



그림 2.5.34 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 정상적인 베어링의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 50 kHz

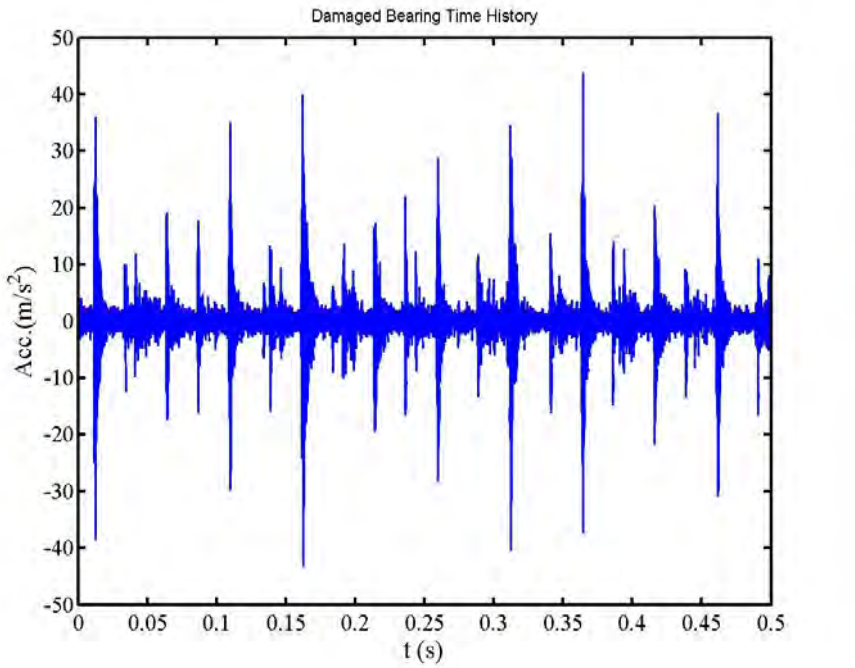



그림 2.5.35 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m1)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 50 kHz

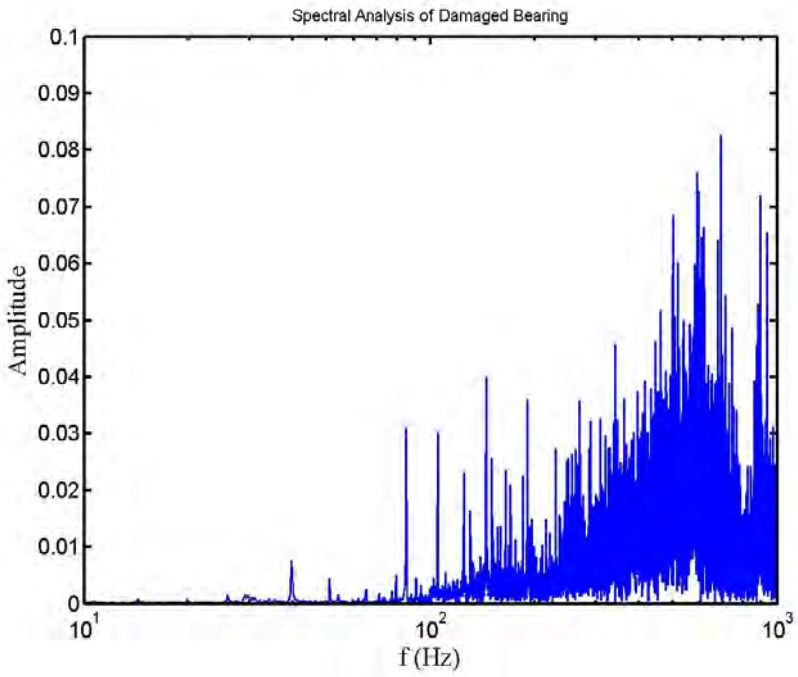



그림 2.5.36 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m1)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 50 kHz

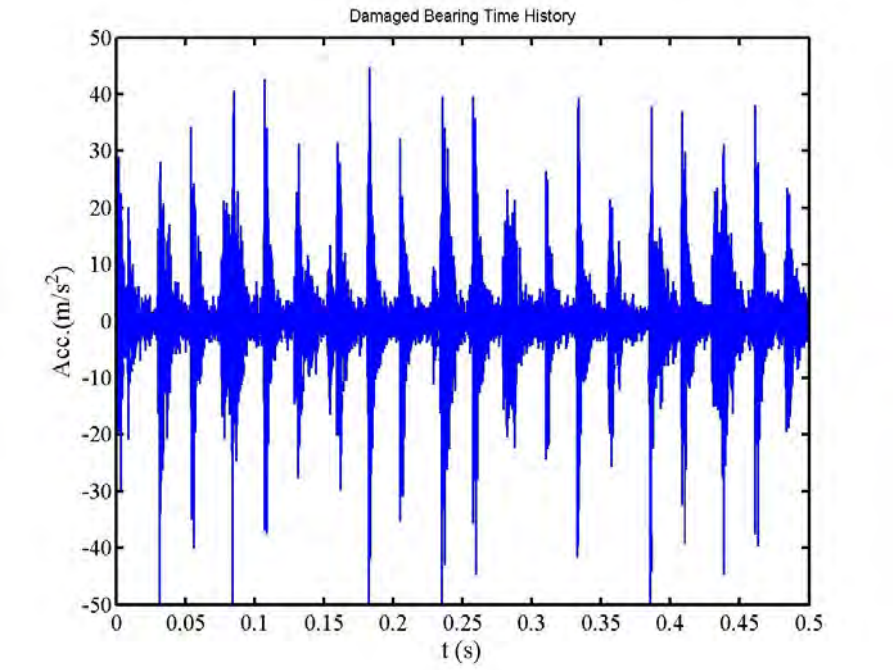



그림 2.5.37 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 50 kHz

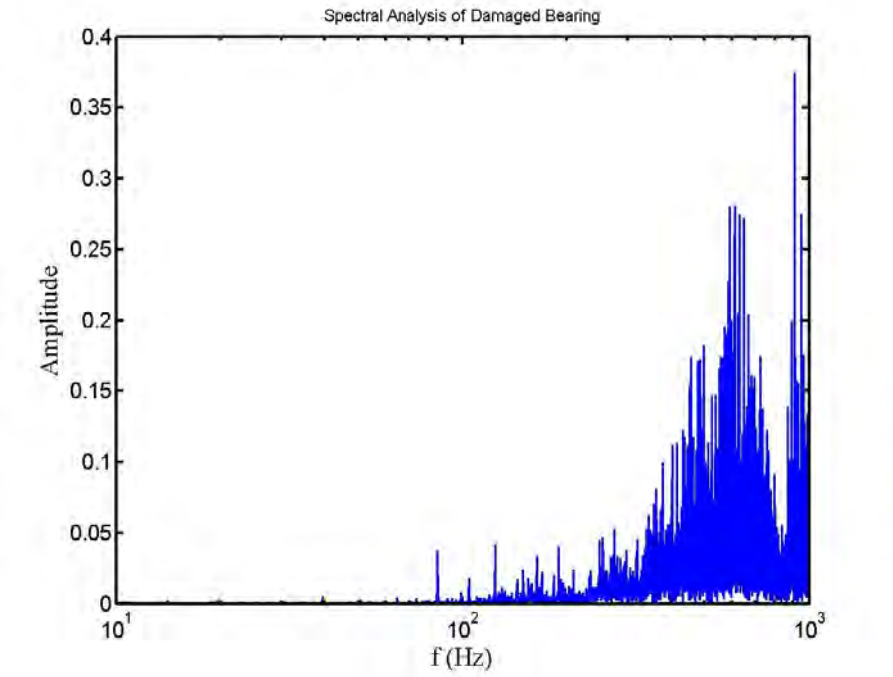



그림 2.5.38 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 50 kHz

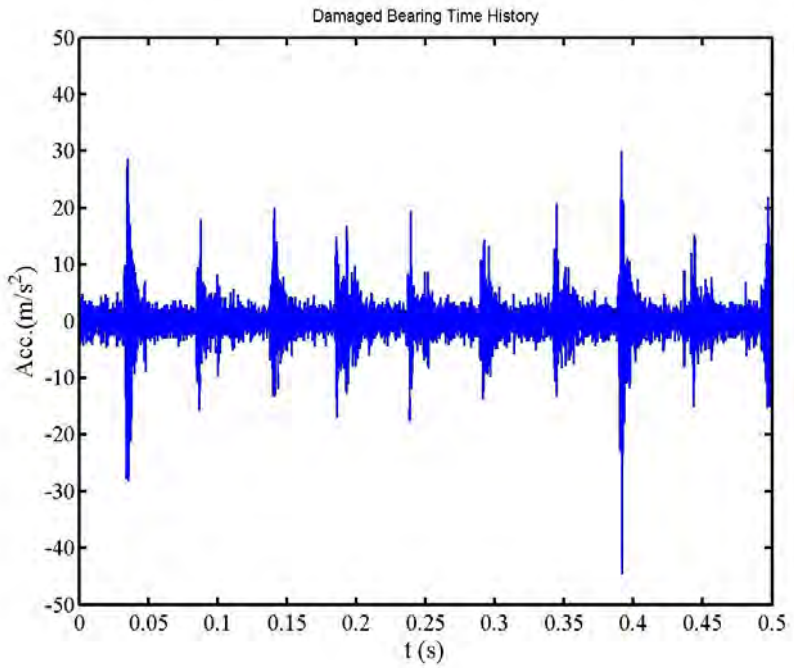



그림 2.5.39 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 50 kHz

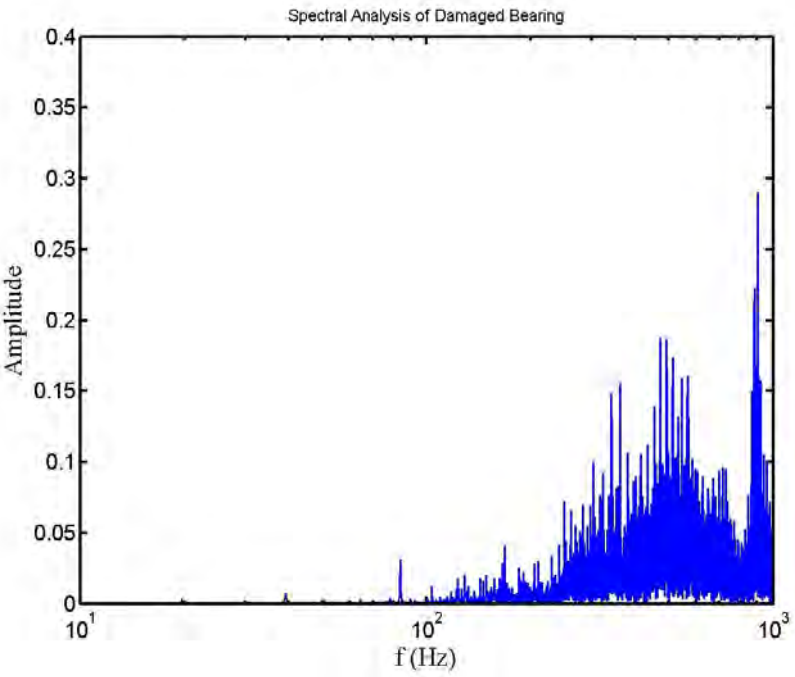



그림 2.5.40 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 50 kHz

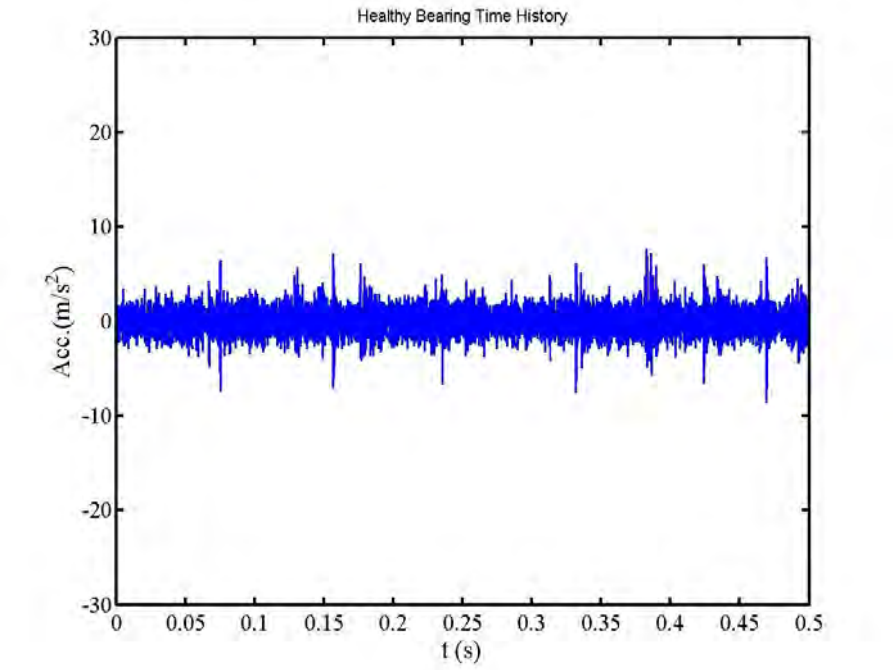



그림 2.5.41 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 정상적인 베어링의 가속도 데이터 : 샘플링속도 100 kHz

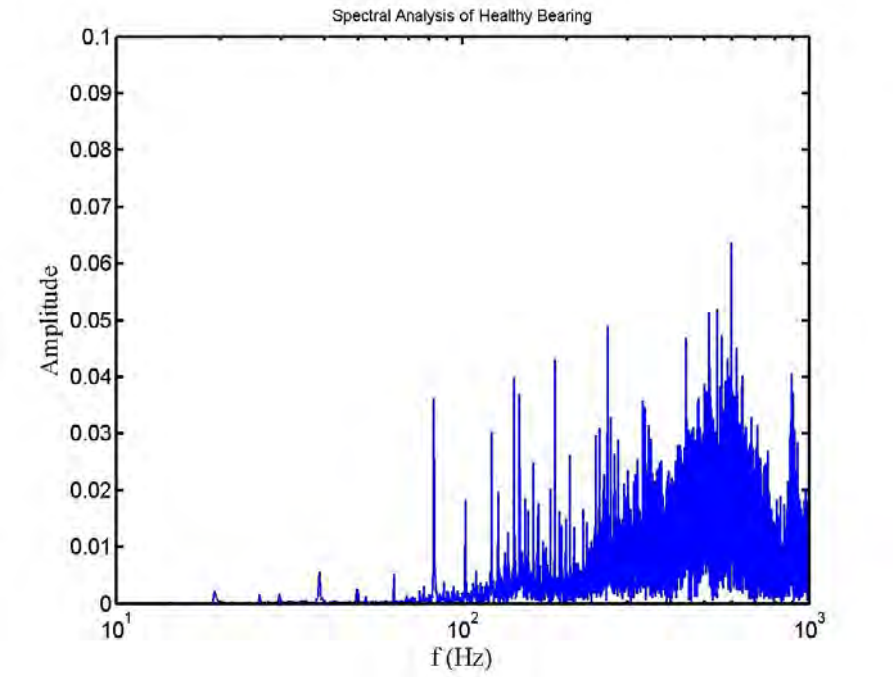



그림 2.5.42 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 정상적인 베어링의 가속도 데이터 FFT: 샘플링속도 100 kHz

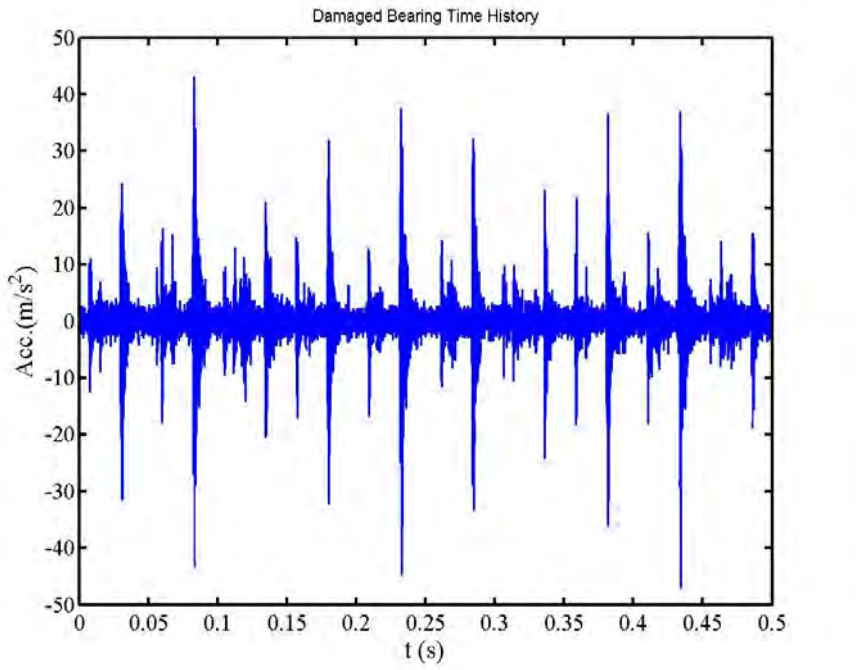



그림 2.5.43 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m1)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 100 kHz

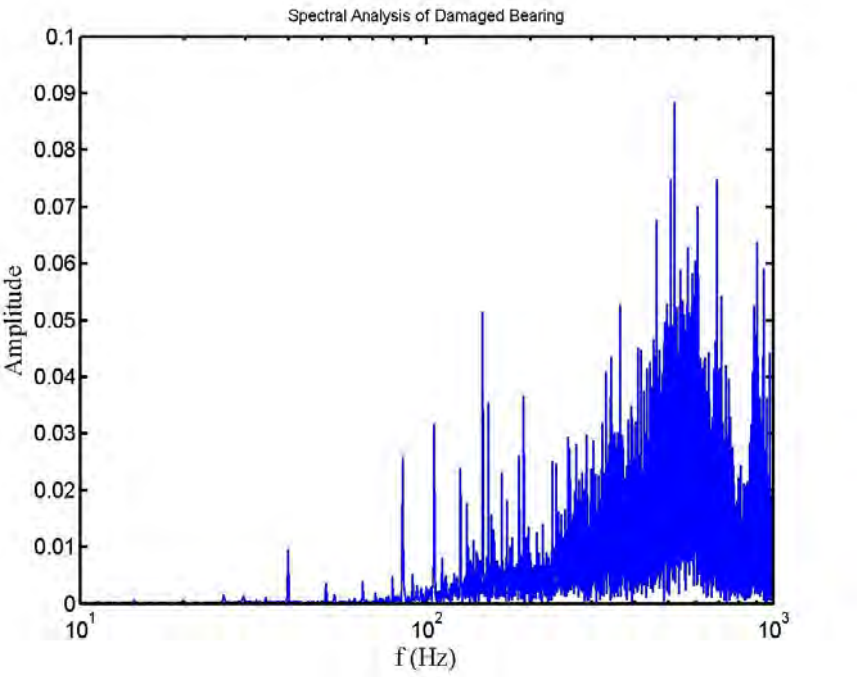



그림 2.5.44 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m1)의 가속도 데이터 FFT: 샘플링속도 100 kHz

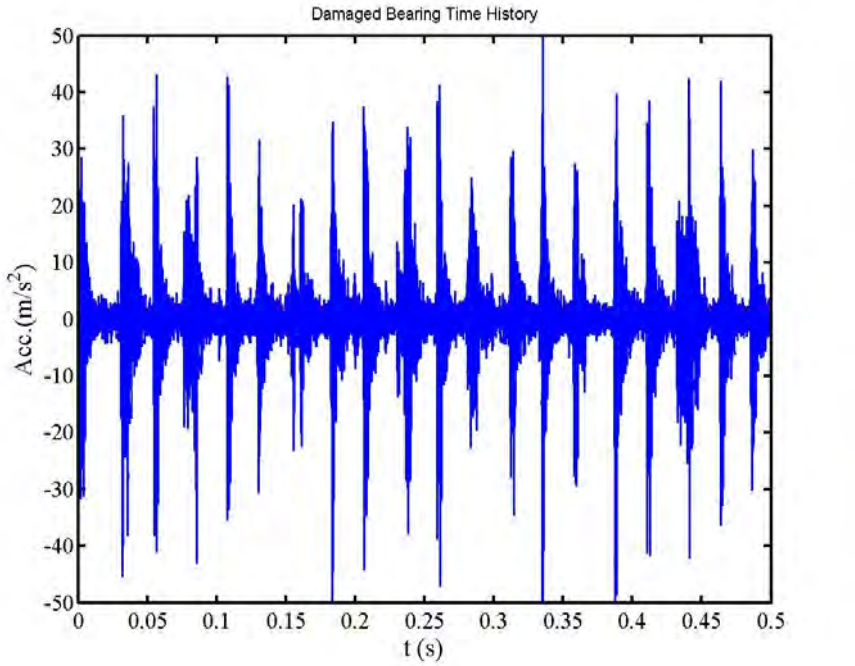



그림 2.5.45 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 100 kHz

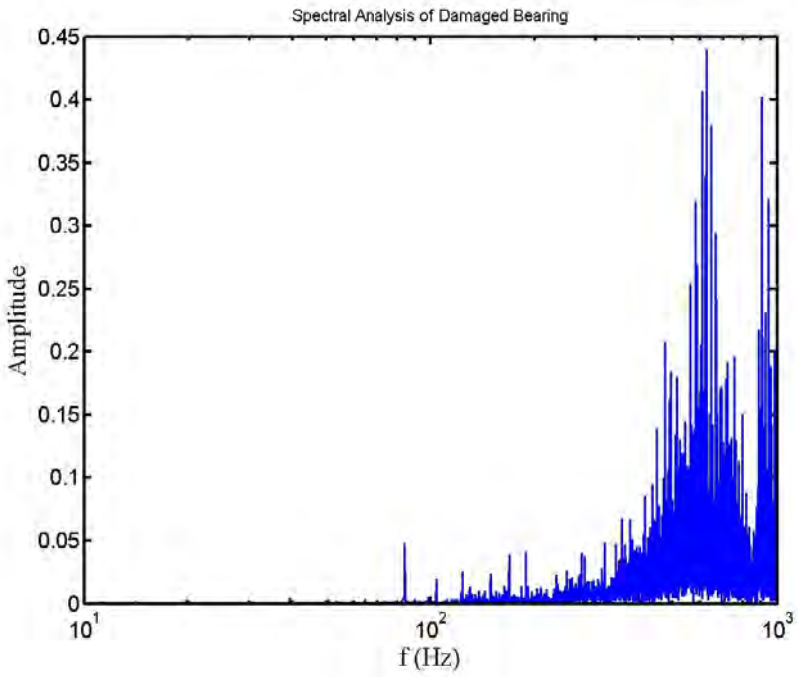



그림 2.5.46 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 100 kHz

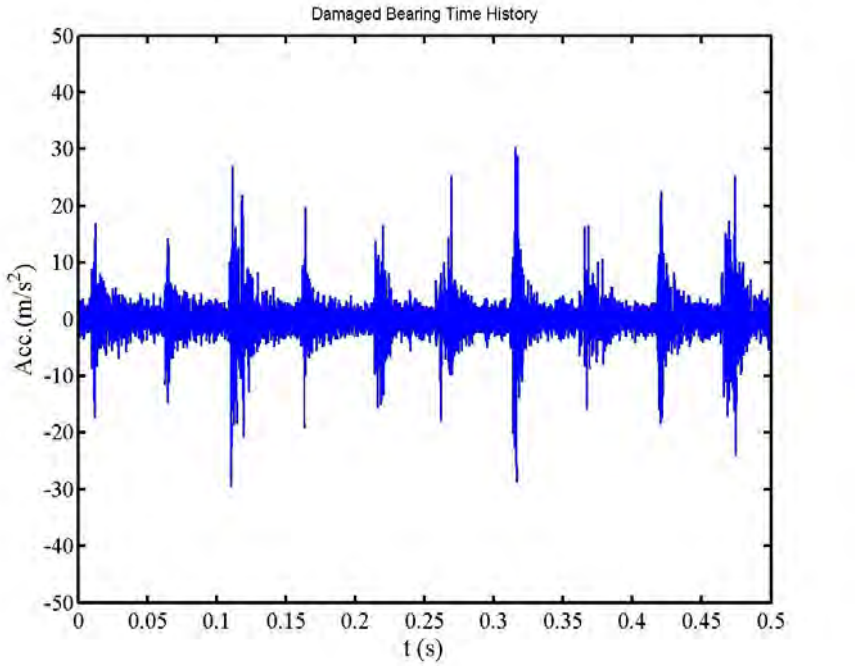



그림 2.5.47 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m3)의 가속도 데이터 : 샘플링속도 100 kHz

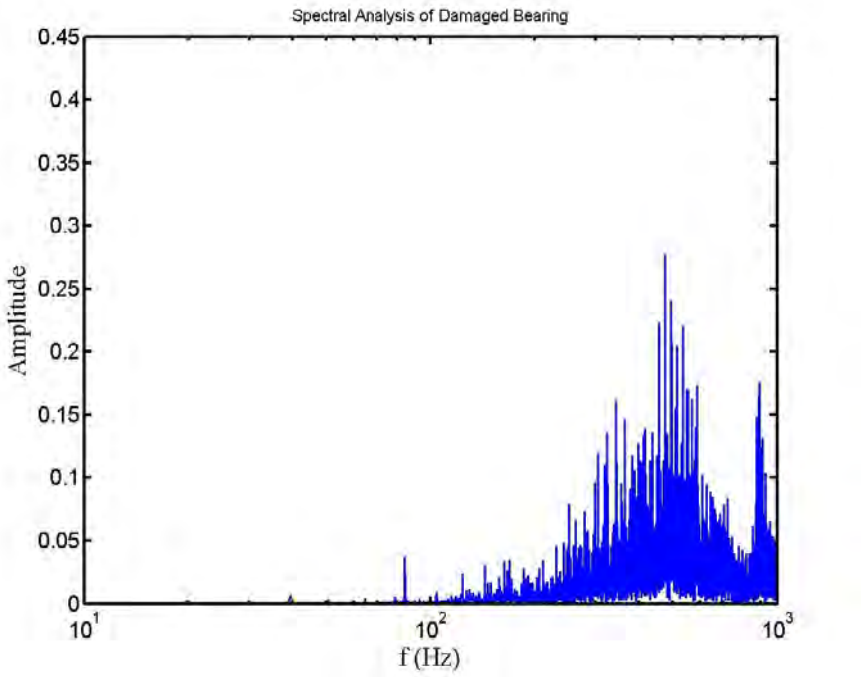



그림 2.5.48 수정된 실험장치를 이용한 1200RPM에서 손상된 베어링(m2)의 가속도 데이터 FFT : 샘플링속도 100 kHz

## 2. Wavelet을 이용한 베어링 결함신호의 분석결과

Wavelet 신호처리 기술을 활용한 기어박스 시스템의 결함 감지관련 연구개발은 최근에 많은 관심을 받아왔다. 대부분의 웨이블릿 방법에 기초한 시간 급수 모델링과 특성 추출은 주로 일정 하중 하에서 고려되었다. 일정 하중 가정은 진동 데이터의 변화가 기어 박스의 약화에 의해서만 야기된다는 것을 의미한다. 아래 그림 2.5.49는 베어링 실험 장치로부터 추출된 시계열데이터를 Wavelet으로 De-noising한 결과를 보여주고 있다.

그림 2.5.49는 결함을 포함하는 베어링으로부터 측정된 실험 데이터인데, 축의 회전에 따른 피크(peak)를 쉽게 확인할 수 있다. 결함에 의한 피크부분을 제외한 신호부에서 고주파수의 영역이 나타나는데, 이는 결함과 무관한 잡음으로 예상된다. 잡음제거를 위한 Wavelet De-nosing 과정을 통해서 그림 2.5.49 (b) 에서와 같이 결함에 의한 피크부분은 그대로 유지하면서, 고주파 잡음을 효과적으로 제거할 수 있음을 잘 보여주고 있다. 따라서, Wavelet 변환을 활용하면 베어링 결함에 의한 응력 충격파 (stress wave)에 영향을 주지 않으면서, 고주파 잡음을 제거할 수 있다. 이는 추후 진행될 베어링 및 기어부의 결함신호 분석에 효율적으로 활용될 것으로 판단된다.

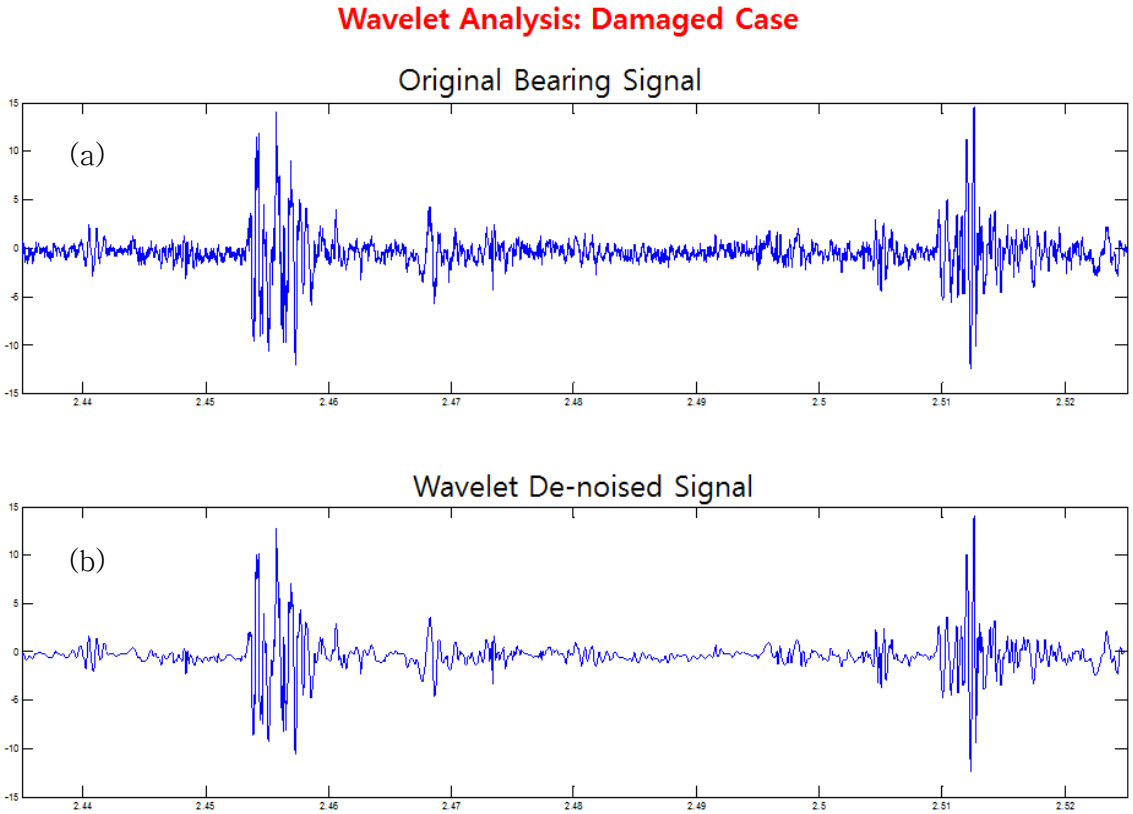



그림 2.5.49 베어링 결함 신호 : (a) 원신호 (b) wavelet을 이용한 고주파수 잡음 제거

## 3. Empirical Mode Decomposition 해석결과

시간-주파수(time-frequency) 해석의 대표적인 신호처리 알고리즘 중 하나인 EMD (Empirical Mode Decomposition) 기법은 임의의 신호를 각기 다른 기본 신호로 분해하는 방법이다. 모든 시계열 신호는 각각의 선형 혹은 비선형 모드가 극값과 부호 변환점을 가지고 있는데, 연속되는 함수의 부호 변환점 사이에는 단 한 개의 극대값 혹은 극소값이 존재하게 된다. 각각의 모드는 다른 모드들과 독립적이며, 이러한 방식으로 각각의 신호들은 다수의 IMF (Intrinsic Mode Function)로 분해될 수 있다. 그림2.5.50과 그림 2.5.51은 베어링 실험 장치로부터 추출된 가속도 데이터를 EMD를 활용하여 각각의 IMF로 분해한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 결함이 없는 베어링 시스템에서 측정된 신호는 IMF로 분해되는 과정에서 신호자체에 내포된 신호의 특성들이 각각의 모드별로 적절히 분해되어 표현될 수 있다. 원신호 (original signal)에서 확인할 수 없었던 모드 성분들이 동일한 time-frame 상에서 독특한 형상을 나타내고 있으며 이를 통해 신호를 구성하는 mono-component들의 조합을 선형적으로 표현할 수 있다.

특히, 그림 2.5.51과 같이 베어링에 결함이 존재할 때 각각의 IMF는 결함이 존재하지 않을 때와 비교해서 매우 특징적인 패턴을 보여준다. 특히, IMF 5와 IMF 9의 경우, 베어링에 존재하는 결함의 특징이 극명하게 나타나는 특정한 IMF에 베어링 결함의 패턴에 대한 정보가 결함의 존재여부 및 특성에 대한 결정적인 판단근거를 제시할 수도 있음을 보여주고 있다. 향후, 기어 및 베어링 시스템에 대한 EMD 분석을 통하여 단순 FFT분석으로 도출하지 못했던 결함신호를 추출할 수 있을 것으로 판단된다.

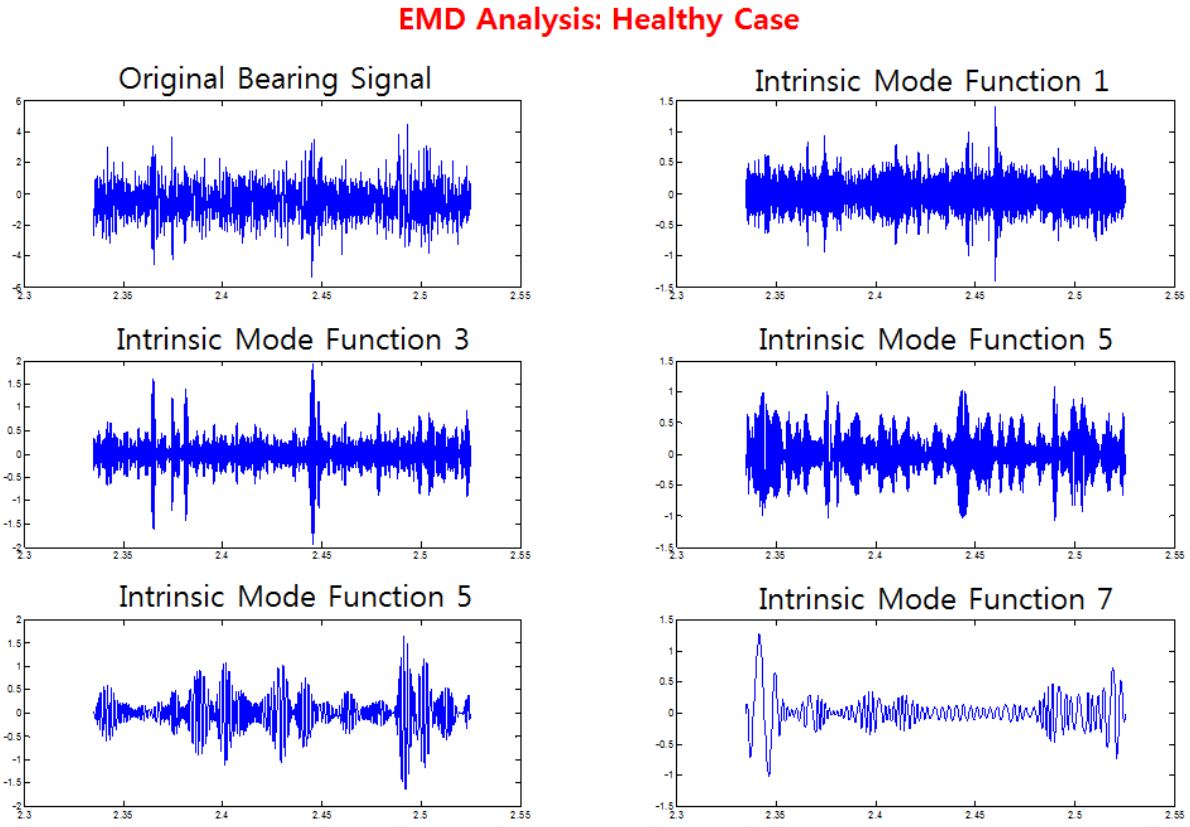



그림 2.5.50 베어링 결함이 없는 경우: time-domain 데이터가 EMD로 분해된 IMF

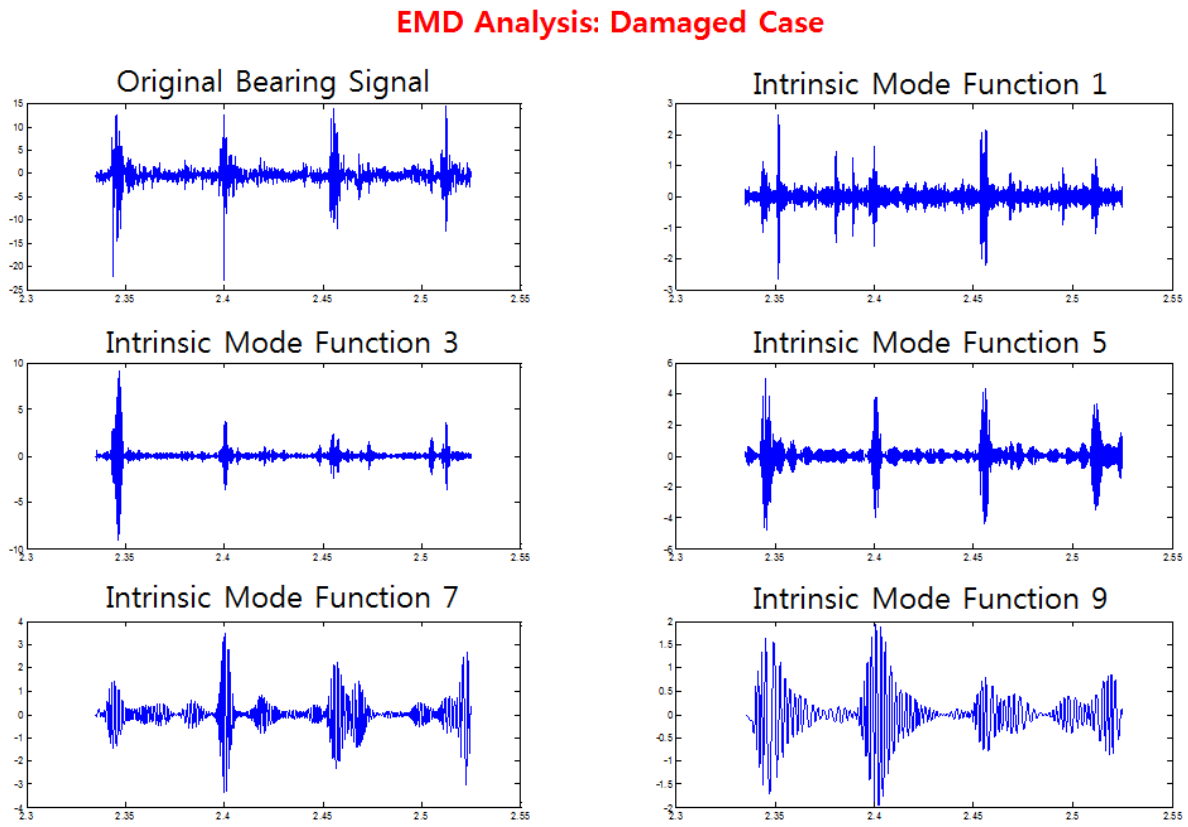



그림 2.5.51 베어링 결함이 존재하는 경우: time-domain 데이터가 EMD로 분해된 IMF

## 4. 웨이블(Wavelet)을 De-nosing을 통한 잡음 신호 저감

### 가. Wavelet De-nosing

베어링 시스템에 존재하는 결함에 의해 발생하는 진동신호에는 결함뿐만 아니라, 구동기 및 하우징 구조물에 의한 공진 등으로 발생하는 부차적인 잡음 신호들이 존재한다. 이러한 결함이외의 신호는 그 특징이 상당부분 과도응답 (transient response)과 유사하다. 따라서, 기존의 low-pass filter 등을 사용할 경우, 고주파 성분인 베어링 결함에 의한 충격파와 구별되기 쉽지 않다. 그러나, wavelet packet decomposition에 근거한 잡음제거 기법을 활용할 경우, 결함에 의한 고주파 성분을 손상시키지 않고 잡음 성분만 제거가 가능하여 회전체 결함탐지에 활용되고 있음을 다수의 해외 논문을 통해 확인할 수 있었다.



a) Healthy Bearing　　b) Damaged Bearing (Case 1)

그림 2.5.52 실험에 사용된 베어링 내륜

### 나. 베어링 신호 잡음 제거 결과

본 과제에서도 1차년에 완성된 롤러-베어링 실험 장치를 통해 측정된 진동신호를 활용하여 아래 그림과 같이 inner-race부에 dent-type 결함이 존재할 때, 잡음 신호의 제거 효과를 확인하였다.

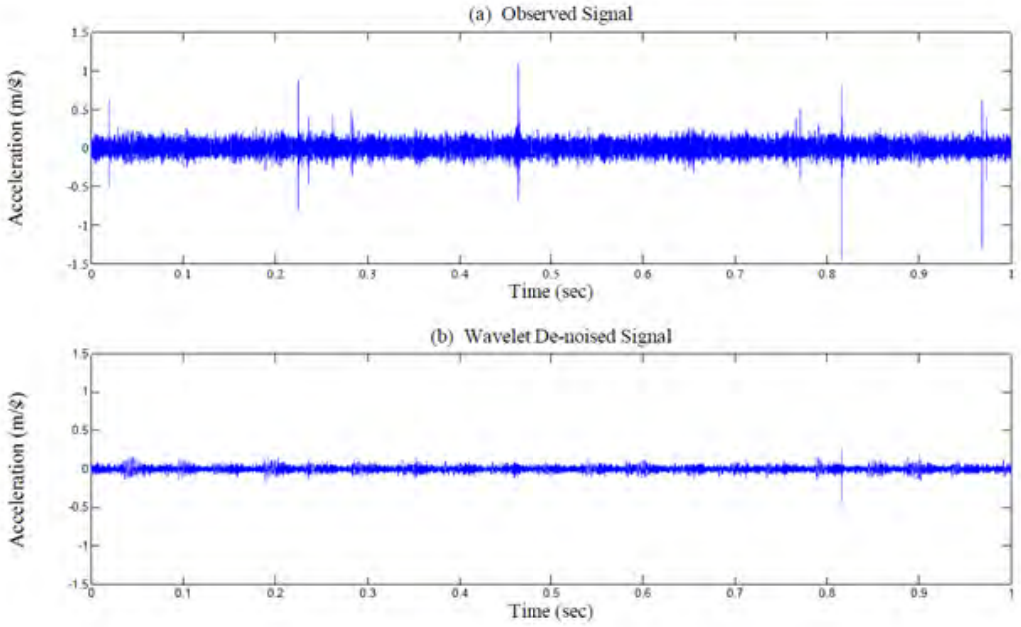



그림 2.5.53 (a) 비손상 베어링 신호 (b) 잡음이 제거된 비손상 베어링 신호

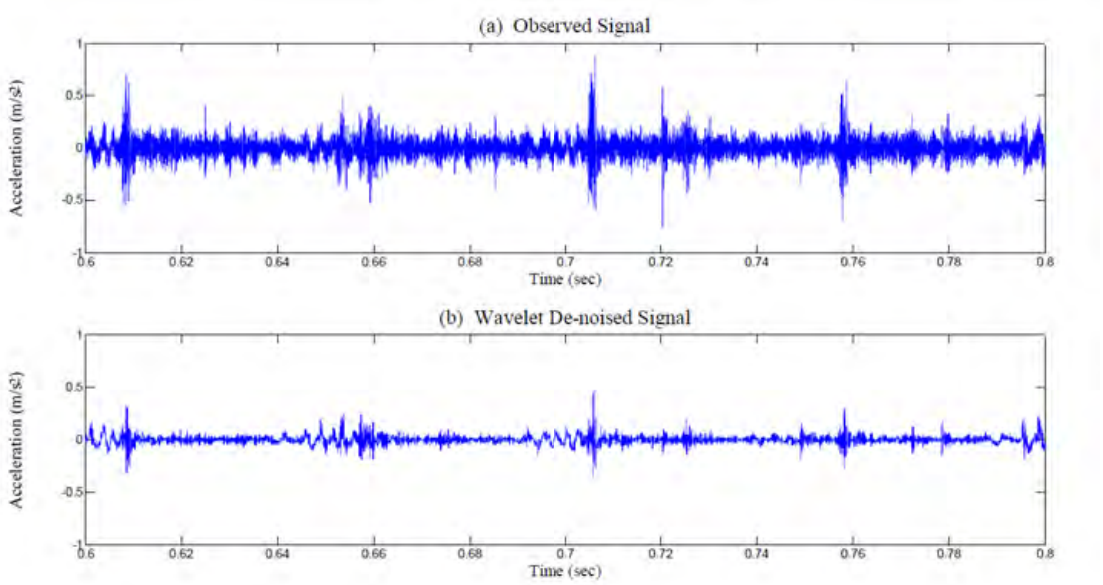



그림 2.5.54 (a) 손상 베어링 신호 (b) 잡음이 제거된 손상 베어링 신호

다. 진동 신호에 대한 MED분석을 통해 베어링 결함검출 능력 향상

(1) Minimum Entropy Deconvolution

MED(Minimum Entropy Deconvolution) 알고리즘은 선형 연산자(linear operator)를 활용하여 신호의 구성 성분(component)중 돌출(spike) 특성을 최대화하는 기법으로 Wiggins 에 의해 처음 제안되었다. 이후 Endo와 Randall은 기어(gear)나 베어링(bearing)의 결함으로부터 발생하는 시계열 데이터의 이상신호를 효과적으로 증폭시킬 필요가 있는 분야에 적용하였다. MED 알고리즘은 입력된 데이터에 적용되는 필터의 출력 결과가 "simple" 구조라 가정한다. 데이터 matrix 의 "simplicity" 는 multivariate analysis의 일종인 factor analysis의 중요한 부분 중 하나이다. 좀 더 구체적으로, matrix 의 "simple" 구조는 그것의 coefficients들이 대부분 0 이고, 일부분만 임의의 위치에 임의의 값을 가지는 것을 의미한다. 즉, "norm" 이라는 용어로 이를 통해서 임의의 matrix의 simplicity 정도를 측정할 수 있게 되었다. 그리고 norm 또는 simplicity의 기준에 대한 다양성이 고려되었다. 어떤 parameter에 의해서 변하는 무한의 matrix 중에서 큰 simplicity를 가진 matrix를 선택하는 것에 대한 문제는 이제 norm을 최소화 또는 최대화 시키는 문제로 바뀌게 되었다. Wiggins [2]는 matrix 에서 발견되는 varimax norm을 식 2.5.6과 같이 제안했다.

$$V(\widetilde{A}) = \Sigma_i V_i(\widetilde{A}),\ V_i(\widetilde{A}) = \Sigma_j \frac{a_{ij}^4}{(\Sigma_k a_{ik}^2)^2} \quad ---------(2.5.6)$$

위에서 기술된 것처럼 MED는 임의의 신호와 환경적인 요인에 의한 주변 신호사이의 convolution 된 요소를 다시 iteration 과정을 통해 분리(deconvolution)하는 신호처리 기법임과 동시에 신호의 무질서도(entropy)를 최소화하고, 첨도(kurtosis)를 최대화하는 알고리즘이라고 정의 할 수 있다.

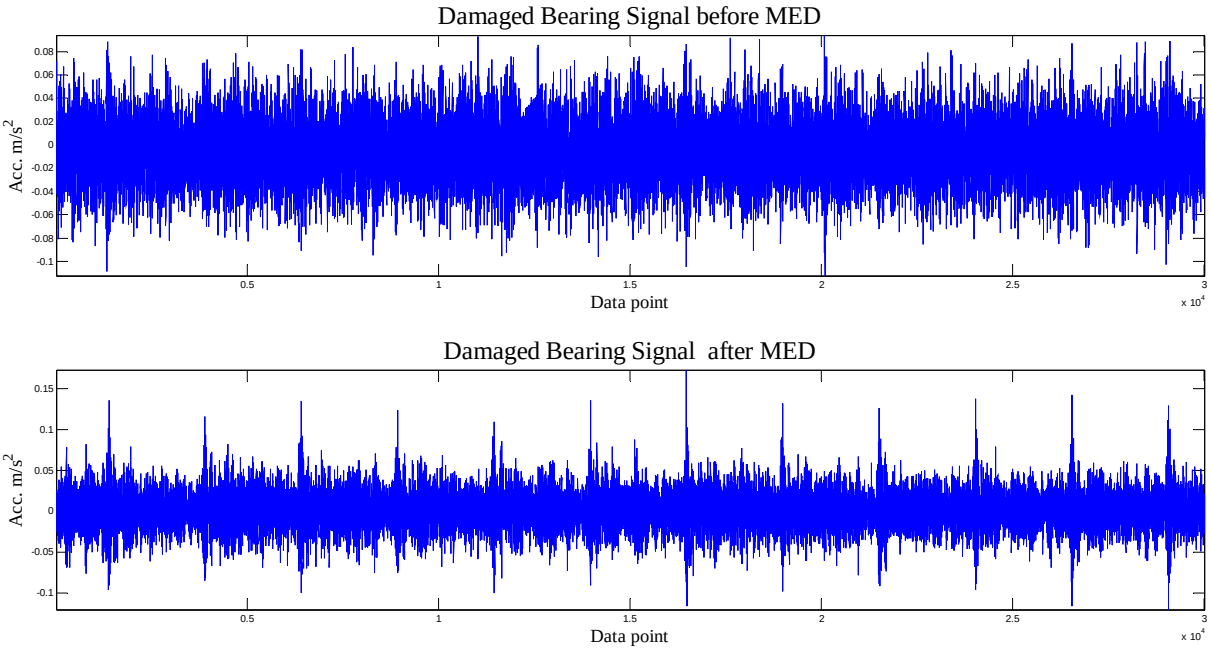



그림 2.5.55 베어링 결함 신호에 대해 : (위) MED 수행전 신호, (아래) MED 수행후 신호

(2) Kutosis

확률 및 통계학에서 kurtosis는 확률분포의 뾰족한 정도(peakedness)를 수치로 표현한 것으로 흔히 활용된다. 이것은 data의 4차 중심적률로 정의될 수 있다. 임의의 변수의 임의의 승에 대한 기댓값을 적률이라고 할때, 4차 중심적률을 kurtosis 또는 첨도라고 한다. Kurtosis는 데이터의 분포가 중심 위치 근처에서 상대적으로 솟아오른 정도를 의미하며, 일반적으로 정규분포의 경우 kurtosis값은 3이 된다. 따라서 kurtosis 값의 크기가 신호에 발생한 peak의 정도로 가늠할 수 있으므로 베어링이나 기어에 발생한 결함에 의한 신호의 특성을 정량화하는 지표로 많이 활용된다. 본 과제에서도 kurtosis를 베어링 결함 신호를 분석하는 지표로 사용하였다.

(3) MED를 활용한 베어링 결함신호 분석

베어링에 결함이 존재할 때 발생하는 이상 신호는 전형적으로 반복되는 스파이크(spike) 특성을 나타낸다. 이러한 반복 충격파는 전체 구조물의 공진파 및 잡음신호와 혼합되어 단순히 kurtosis로 분석하기 쉽지 않은 경우가 많이 있다. 특히, 그림 2.5.55 (위) 과 같이 베어링의 진동신호가 MED를 적용하지 않았을 때는 결함 특성을 전혀 내포하지 않고 있지만, MED 필터를 통과한 뒤에는 그림 2.5.55(아래) 과 같이 이전에 보이지 않았던 반복되는 돌출 특성이 현저히 나타남을 알 수 있다. 이는 그림 2.5.56에서와 같이 40회 정도의 iteration을 거치면서 kurtosis가 30%이상 현격히 증가하는 것으로 MED의 성능을 쉽게 파악할 수 있다. 여기서 사용된 MED 필터의 계수는 60개이고, Kurtosis 변화율 제한치를 0.001로 설정하였다.

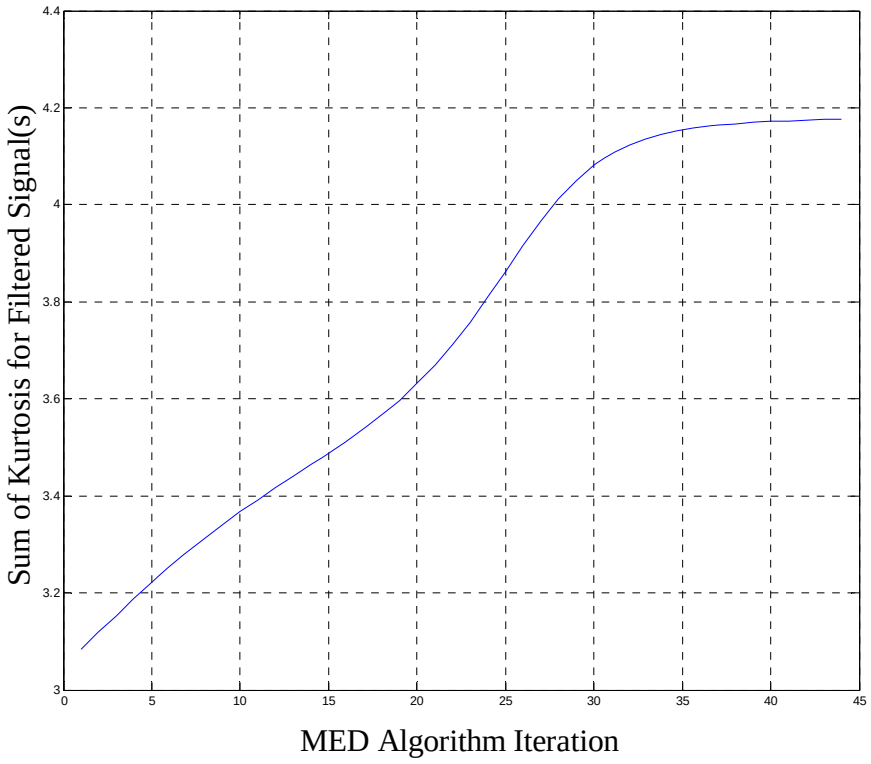



그림 2.5.56 MED에서 iteration증가에 따른 신호의 kurtosis변화

라. 진동신호에 대한 EMD 분석을 통해 베어링 결함검출 능력 향상

(1) Empirical Mode Decomposition

EMD(Empirical Mode Decomposition)기법은 Hilbert-Huang transform 과정의 일부로 Hilbert-Huang에 의해 제안되었다. Hillbert-Huang transform은 임의의 신호를 IMF(intrinsic mode function)로 분해하는 과정에 대해 설명하고 있다. EMD 기법은 어떤 형태의 신호도 서로 다른 intrinsic modes의 조합으로 이루어졌다는 가정에서부터 시작된다. 각각의 선형 혹은 비선형의 mode는 같은 수의 극값들(extrema)과 부호 변환 점(zero-crossings)을 가지고 있을 것이다. 또한, 연속하는 두 부호 변환 점 사이에는 단 하나의 극값이 존재한다. 이러한 조건들로부터 각각의 신호는 EMD를 통해 다수의 IMF로 분해될 수 있으며, 이를 만족시키기 위한 두 가지 조건들은 아래와 같다.

(조건 1) 모든 data set에 대하여, 극값들의 수와 부호 변환 점의 수는 같거나 그 차이가 1이어야 한다.

(조건 2) 임의의 점에서 극대값(local maxima)에서 구한 envelope의 평균값과 극소값(local minima)에서 구한 envelope의 평균값은 0이어야 한다.

(2) EMD를 통해 다수의 IMP로 분해된 베어링 신호 분석

IMF는 단순한 조화함수(simple harmonic function)와 비교할 때 단순한 진동모드(oscillatory mode)에 해당된다. EMD의 정의에 의해서 임의의 신호는 아래 그림 2.5.57과 같이 분해될 수 있다. 왼쪽은 결함이 없는 베어링 신호이고, 오른쪽은 결함이 존재하는 경우 진동신호를 EMD로 분해하였는데, 편의상 각각 처음 3개의 IMF만 보여주고 있다. 베어링에 발생한 결함의 특성상 가장 높은 주파수 영역에서 그 특징이 나타나는 데, 이를 기반으로 첫 번째 IMF가 결함에 가장 민감하다고 판단할 수 있다.

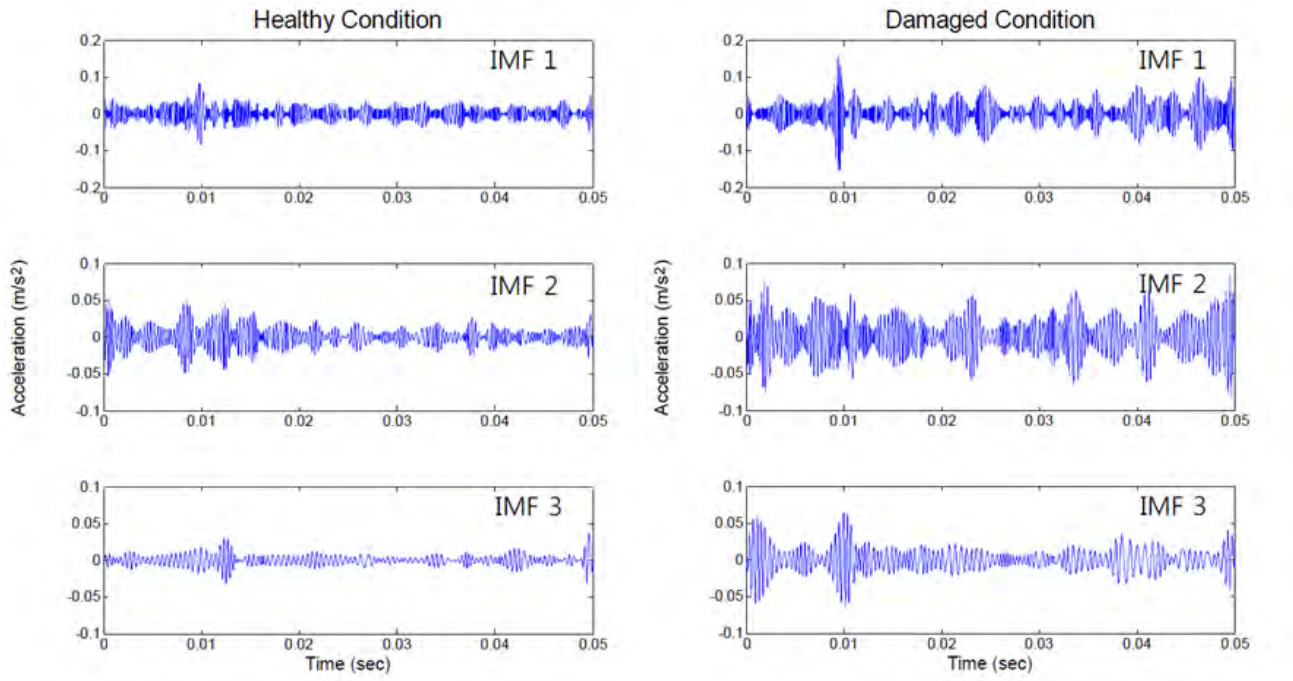



그림 2.5.57 EMD 통해 분해된 IMF : (좌) 비손상 신호의 IMFs (우) 결함 신호의 IMFs

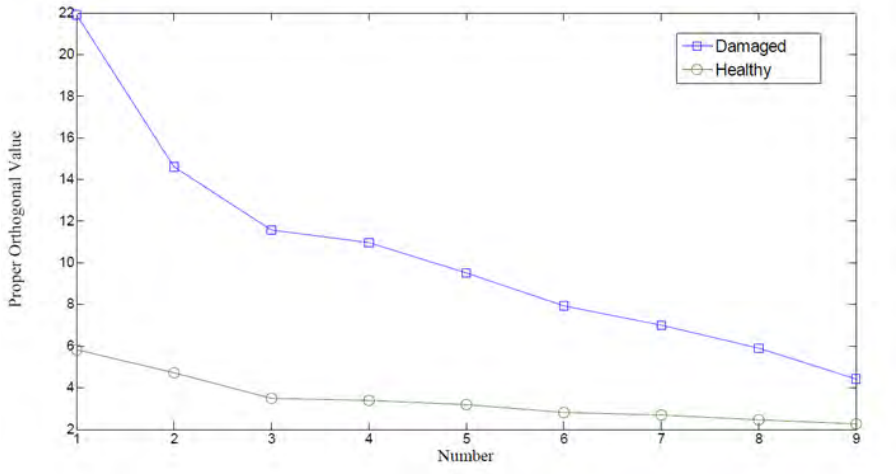



그림 2.5.58 두 신호의 첫 번째 IMF의 공분산행렬로부터 얻은 POV

따라서, 본 연구에서는 베어링에서 측정된 진동신호를 다수의 구간으로 나누어서 각각의 구간에 대해 EMD를 수행하였다. EMD를 통해 분해된 다수의 IMF 중 첫 번째 IMF만으로 이루어진 데이터 행렬를 구성한 뒤, 이 행렬의 covariance 행렬에 대해 Proper Orthogonal Value(POV)를 구하였다. 그림 2.5.58은 최초의 IMF로 구성된 데이터 행렬의 POV를 결함이 없는 (healthy) 베어링 신호와 결함이 존재하는 (damaged) 베어링 신호와 비교하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 서로 현격한 차이를 나타내고 있는데, 이를 통해 신뢰성 높은 베어링 결함 탐지능력을 확인할 수 있었다.

마. PCA-AR 기반 베어링 결함신호 분류 검증

(1) PCA-AR 개요

PCA-AR기법은 AR(Autoregressive Model)을 통하여 추출한 신호 자료의 특징(feature)들을 PCA(Principal Component Analysis)통하여 수집된 자료의 특성을 나타낼 수 있는 주성분(principal component)들로 나타내어 분석하는 통계적인 기법의 조합이다. 일반적으로 수집되는 진동 신호들을 AR을 통해 모사하면 높은 차수(order)의 AR 모델이 필요하게 되며, 이렇게 만들어진 AR 모델을 이루며 신호의 특징을 나타내는 AR 인수(Coefficient)의 양은 AR 모델의 차수만큼 많아지게 된다. 이렇게 많은 AR 인수를 분석하여 결함에 연관 있는 AR 인수를 찾아내기는 쉽지 않으나, PCA를 통해 결함에 크게 변화하는 인수들을 찾아낼 수 있다. AR모델의 기본적인 형태는 다음과 같으며

$$X_t = c + \sum_{i=1}^{p} \phi_i X_{t-i} + \epsilon_t \text{----------} (2.5.7)$$

이 때, $\phi_1$, $\phi_2$, …, $\phi_p$는 AR 모델의 인수이고 $c$는 상수, $\epsilon_t$는 잔차(또는 noise)이다. AR모델은 일반적으로 AR($p$)로 표현 되며, 이 때 $p$ 는 AR 모델의 차수(order)를 의미하며 $\phi$의 개수는 AR 모델의 차수와 같다. 이를 벡터 $\vec{\phi}$라 표현하면 앞서 구한 AR 인수벡터($\vec{\phi}$)는 수집된 결함신호의 분류(case)만큼 존재하며 이를 모아 하나의 행렬 $\Phi$로 나타낼 수 있고, 이 $\Phi$에 PCA를 수행하면 결함에 깊게 연관 있는 AR 인수들을 부각 시킬 수 있다. 일반적인 PCA의 주성분을 구하는 방법은 $\Phi$의 공분산 행렬(covariance matrix)의 고유벡터(eigenvectors)를 구하여 찾는다.

(2) 베어링 결함신호 분류 결과

분류할 베어링 신호의 종류는 결함이 없는 1종류(Healthy1~6)와 결함의 강도별 3종류(Damage1, Damage2, Damae3)로 총 4종류의 신호에 대해 분류를 시도하였다. 수집된 신호는 다음과 같다.

샘플링 속도 50 kHz로 수집한 자료이며 결함이 없는 case의 경우 비교를 위해 6종류의 결함이 없는 베어링(Healthy1~6)에 대해 수집하였고 그중 하나인 결함이 없는(Healthy 1)을 결함 베어링 신호(Damage1~3)와 비교를 위해 위와 같이 나타내었다. 그림 2.5.59에서 나타나듯이 결함의 정도가 가장 낮은 case가 그림 2.5.59 (b)Damage 1 이며 결함의 정도가 가장 심한 case가 그림 2.5.59 (d)Damage 3 이다. 모든 자료에 대해 AR(200)으로 모델을 만들고 원(original) 신호를 어느 정도 추정(estimation)하는지 살펴보았다.

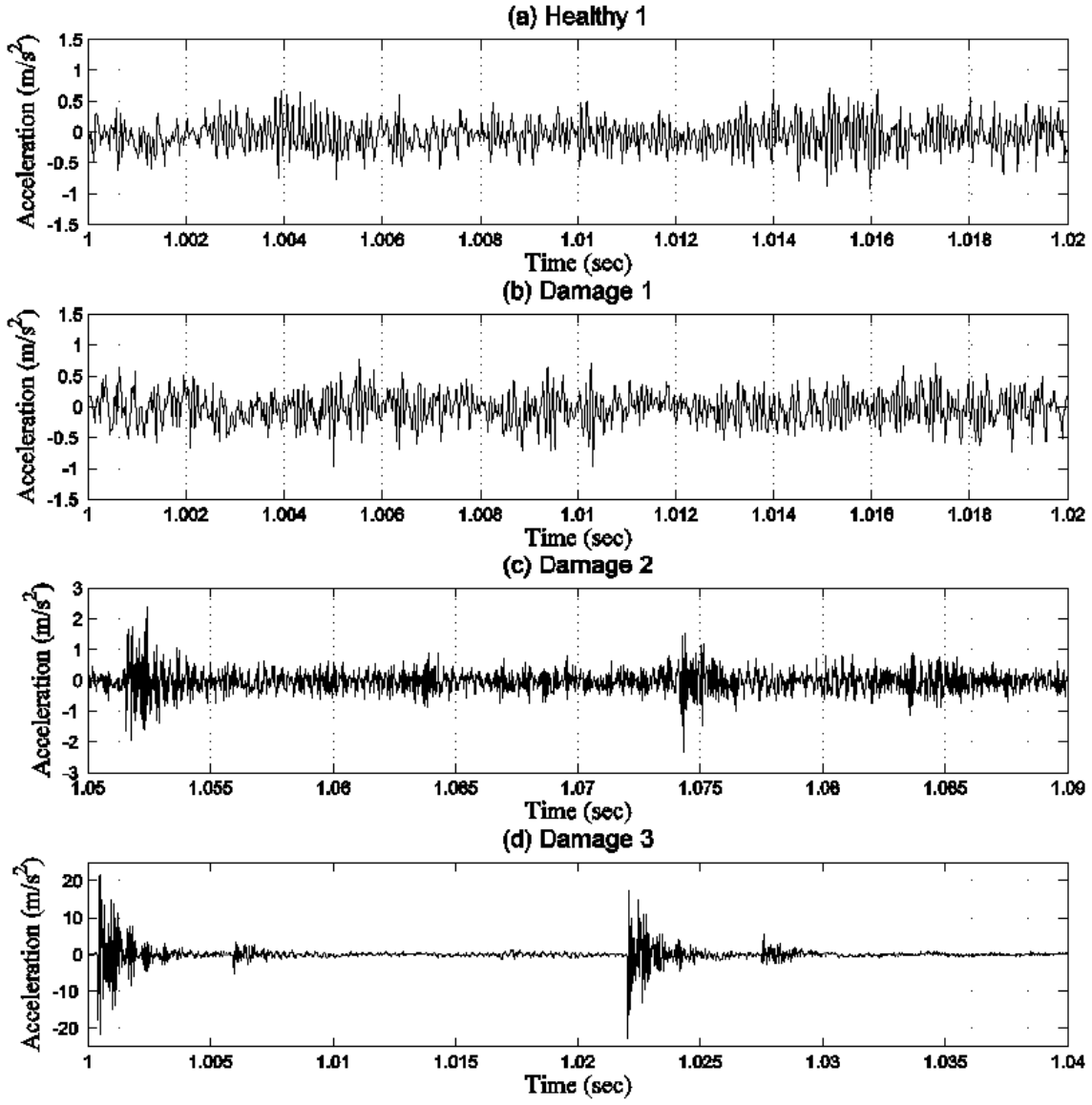



그림 2.5.59 (a)결함이 없는 베어링 신호 (b)(c)(d)결함이 있는 베어링 신호

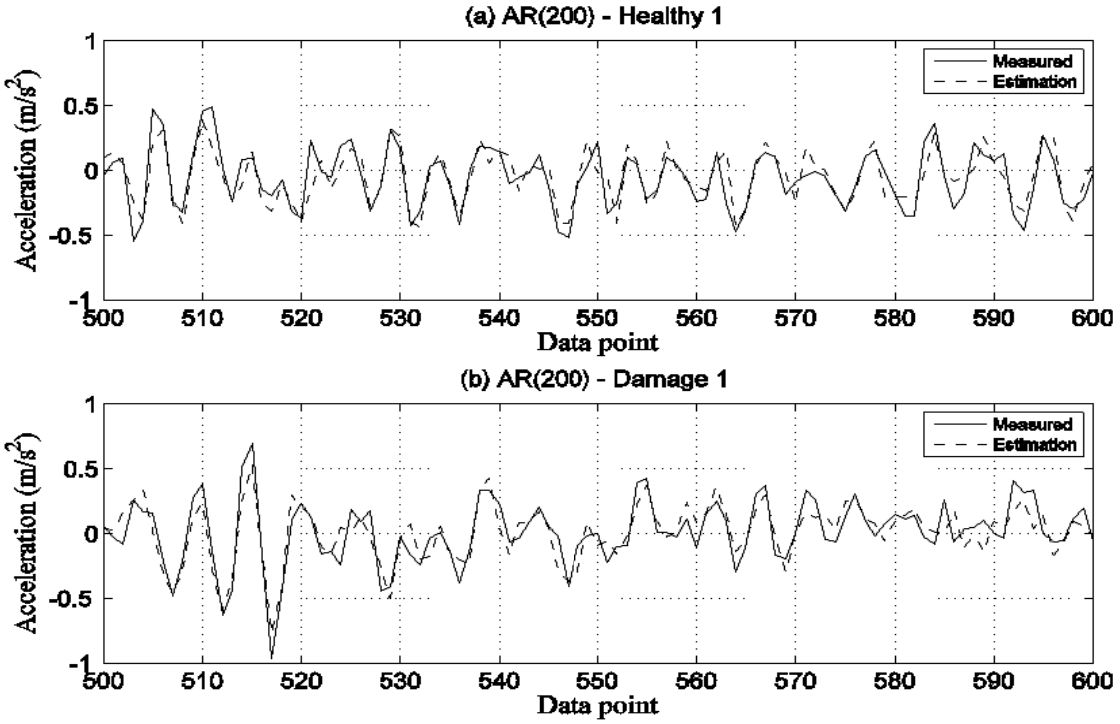



그림 2.5.60 (a)결함이 없는 베어링 신호(Healthy 1)와 그의 AR(200)으로 추정한 신호의 비교
(b)결함이 있는 베어링 신호(Damage 1)와 그의 AR(200)으로 추정한 신호의 비교

그림 2.5.60에서 보면 AR(200)으로 결함이 없는 신호(Healthy 1) 그림 2.5.60 (a) 와 결함이 있는 신호(Damage 1) 그림 2.5.60 (b)를 어느 정도 추정 할 수 있음을 알 수 있고, 이에 비추어 볼 때 AR(200)으로 각 실험의 결함 종류에 따른 신호특성을 포함 할 수 있음을 예상할 수 있다. 이에 따라 PCA로 AR(200)의 인수들을 분석하여 제일 영향력 있는 3개의 차원을 3차원으로 표시해 보면 그림 2.5.61 ~ 2.5.64와 같이 분류됨을 알 수 있다.

그림 2.5.61에서 결함 신호들(Damage2~3)과 비결함(Healthy1~6)의 경우는 극명하게 분류됨을 알 수 있으나 특정부분에서 Healthy1~6와 Damage 1이 매우 가까워 겹쳐있어 그 차이를 알 수 없어 보인다. 그러나 Healthy와 Damage 1만을 다시 분류해 보면 다음 그림 2.5.62와 같이 어떤 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 같은 결과를 볼 때 PCA-AR을 통한 결함 신호와 비결함 신호의 분류를 수행할 때 부분적인 비교 분류와 전체적인 비교분류가 동시에 수행되어져야 한다는 것을 뜻한다. 이에 따라 그림 2.5.63에서 6개의 비결함 신호들(healthy1~6)에 대해서 PCA-AR를 통해 분류해보면 비결함 신호는 서로 다른 비결함 베어링으로부터 수집된 신호이지만 비슷한 특성을 지니고 뭉쳐있는 것을 확인할 수 있다. 당연하게도 이는 비결함 베어링 신호는 PCA-AR을 통해 더 이상 분류 할 수 없음을 뜻한다.

위와 반대로 결함 신호들만을 PCA-AR로 분류해 보면 그림 2.5.64와 같이 명확한 차이를 보이는 결과를 볼 수 있으며 이에 따라 결함 신호들 사이에는 PCA-AR을 통해 더 이상 부분적인 분류를 수행할 필요성이 없다. 다시 처음으로 돌아가면 PCA-AR는 차이가 큰 결함과 미소결함이 비결함 신호와 혼재해 있을 때 미소 결함 신호와 비결함 신호와의 차이를 분명하게 보이지 못하는 한계가 있으며 이를 해결하기 위한 다음 차 년도 연구에서는 위의 여러 결함 탐지 기법들의 교차 적용을 수행할 필요성이 있다.

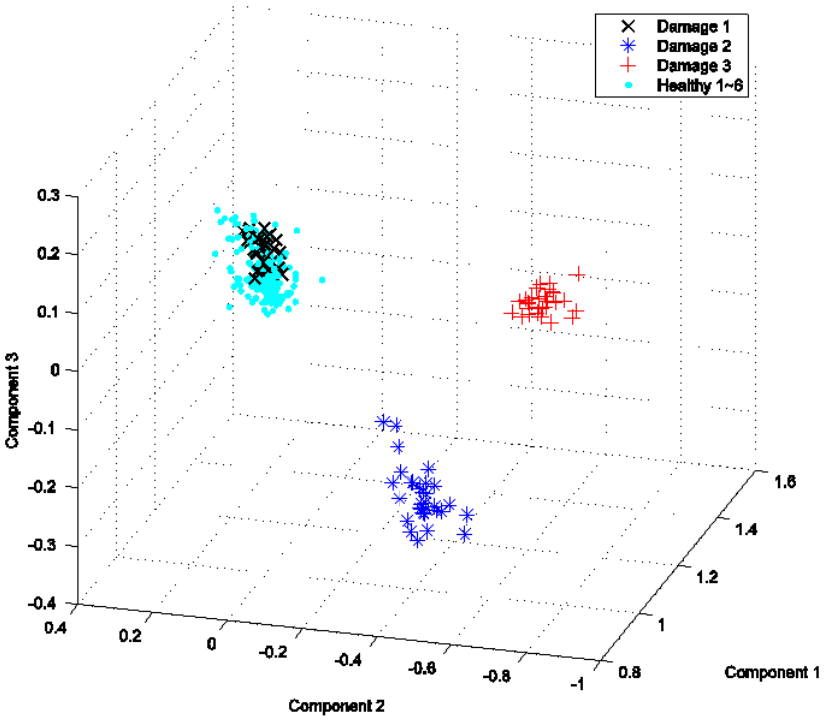



그림 2.5.61 각 신호들의 PCA-AR을 통한 분류 :
결함신호(Damage1~3)와 비결함 신호(Healthy1~6)의 분류

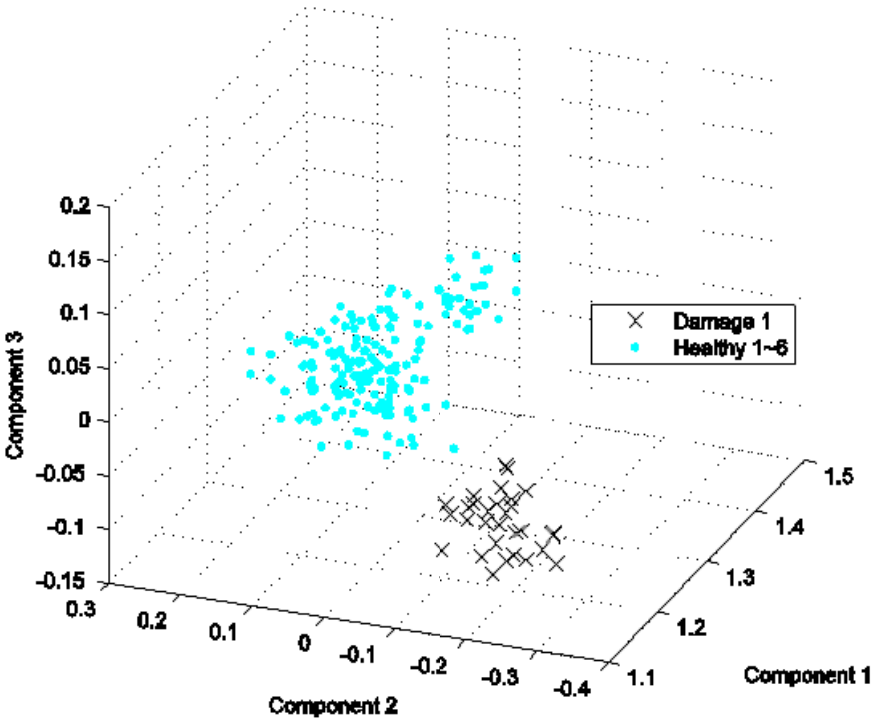



그림 2.5.62 신호의 PCA-AR을 통한 분류 : 결함신호(Damage1)와
비결함 신호(Healthy1~6)의 분류

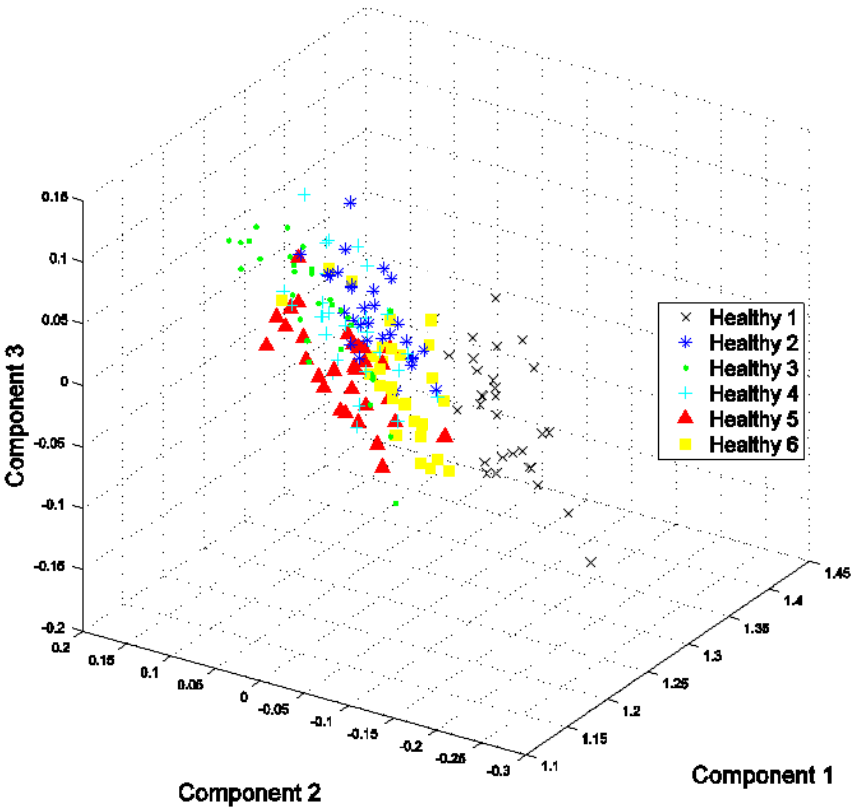



그림 2.5.63 비결함 신호들의 PCA-AR 분류

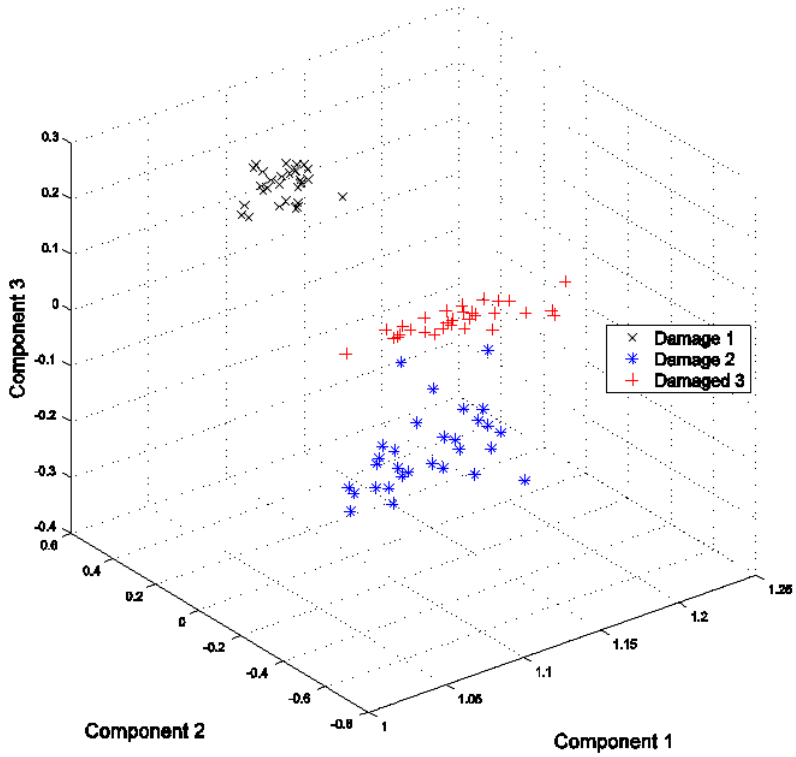



그림 2.5.64 결함 신호들의 PCA-AR 분류

이러한 결과와 같이 감속기 진동신호 분석기법에는 크게 2가지 알고리즘을 검증하였다. 첫째, MED 필터를 활용하여 롤러 베어링의 inner-race부에 발생한 아주 낮은 수준의 결함의 존재를 kurtosis값의 변화를 통해 확인하였다. 둘째, EMD를 통해 진동신호를 다수의 IMF로 분해한 뒤 결함이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 POV값을 비교해 보았다. 이를 통해, kurtosis값의 변화가 크게 없는 경우도 결함의 유무에 따라 POV값은 현격한 차이를 보일 수 있음을 발견하였다. 결국, MED나 EMD기법을 활용하면, 베어링이나 기어부에 발생한 아주 낮은 수준의 결함에 대해서도 높은 변별력을 가질 수 있어, 결함의 조기발견에 크게 기여할 것으로 판단된다. 또한, 감속기 진동신호를 AR 모델화 하여 결함의 유무에 따라 AR 모델 계수의 패턴변화를 PCA를 통해 3차원 공간상에서 시각화가 가능함을 확인하였다. 이는 결함신호의 인과관계보다는 상관관계를 강조하는 방식으로 다양한 형태의 결함 원인을 서로 구분하는 기법으로 활용될 수 있다.

## 5. 기어 시스템의 실험모델 와선 및 결함 신호분석

### 가. 기어 시스템 모델 설계

기어 시스템의 결함탐지를 위해 제작된 실험모델의 개략적인 크기는 540×200×204 (mm)이며 형상과 크기는 그림 2.5.65 에 나타나있으며 3D설계도는 그림 2.5.66 과 같다.

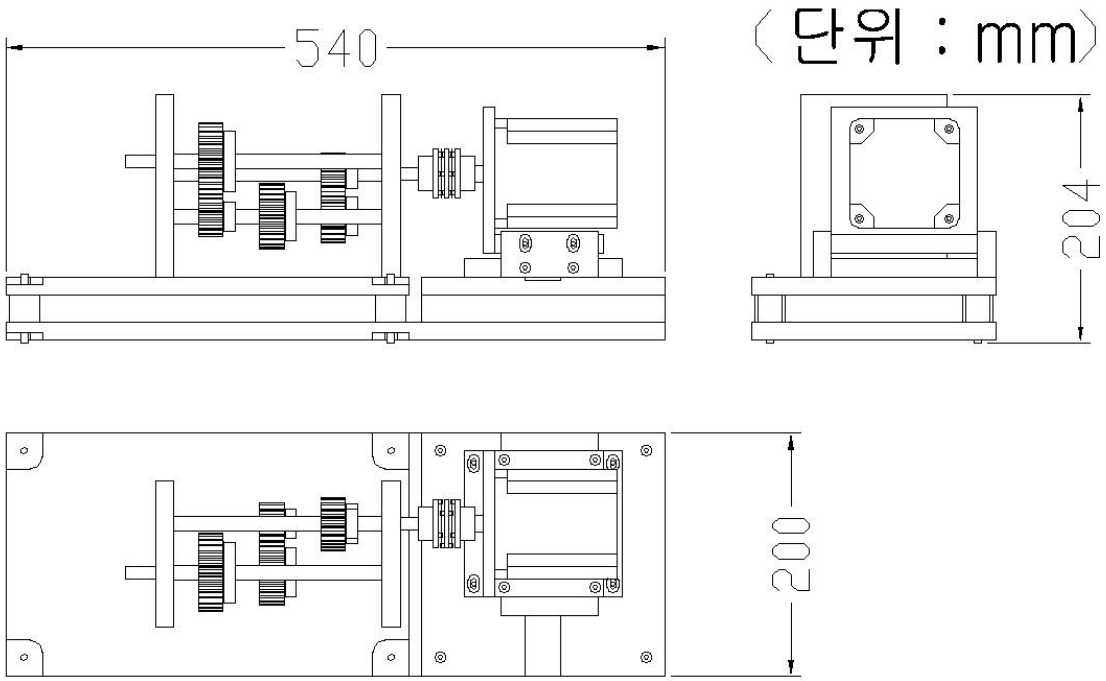



그림 2.5.65 기어시스템 실험모델의 2D모양과 개략적인 크기

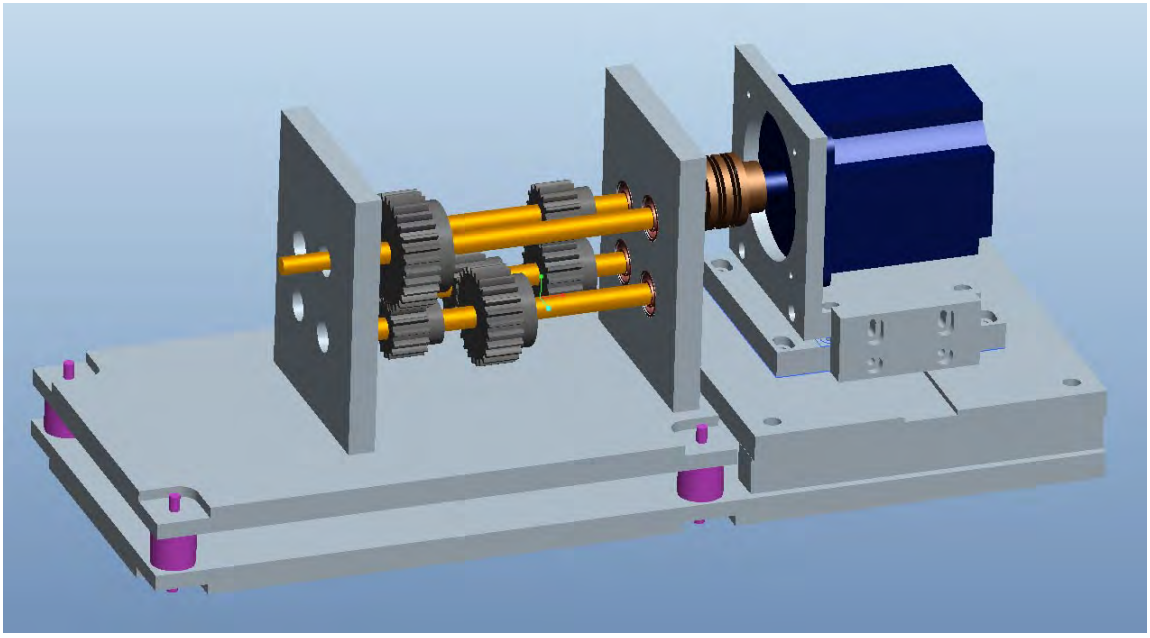


그림 2.5.66 Pro-E를 통해 설계한 기어시스템 실험모델의 3D모델

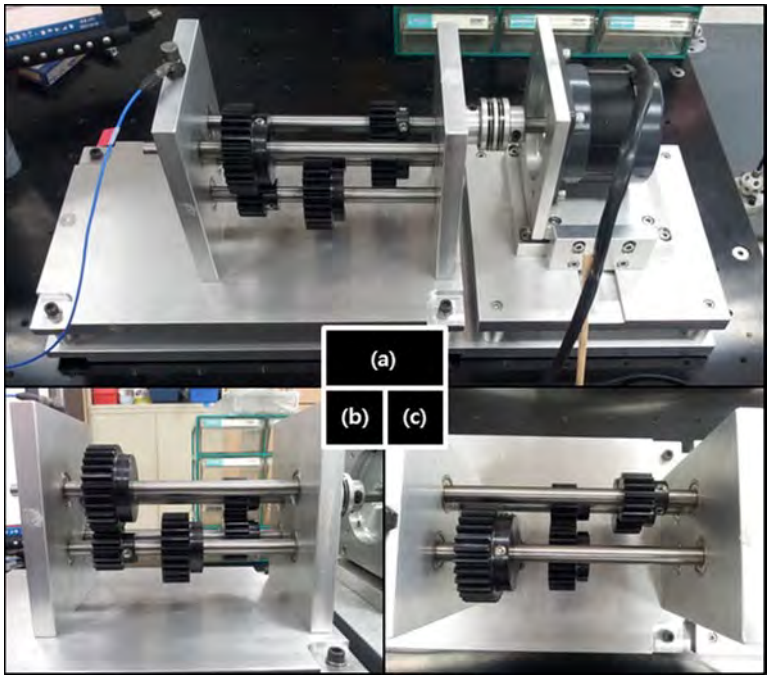



그림 2.5.67 (a)실험모델의 전체사진 (b)기어부 측면사진
(c)기어부 상부사진

완성된 기어 모델의 사진은 아래 완성된 기어 모델의 사진은 그림 2.5.67의 조합으로 입력축과 출력축 사이에 6개의 기어를 조합하여 3단 감속을 하도록 제작되었다.

실험 모델의 작동기로는 SEWOO社의 BLDC모터를 사용하였고, 기어의 KHK社의 SS시리즈 평기어(spur gear) 6개를 조합하여 사용하였다.

나. 기어 결함 신호 분석

기어 모델의 결함신호 분석을 위한 실험 구성은 그림 2.5.68 과 같으며 그림 2.5.69 에서 실제

구성된 실험 장치들을 볼 수 있다. 실험에 입력으로 사용되는 BLDC모터는 별도의 모터컨트롤러(SBDM-10A)를 이용하여 조정하며 모터에 내장된 인코더 펄스신호는 속도 모니터링을 위해 DAQ로 수집된다. 또한 실험 장치의 진동 신호 수집을 위해 사용되는 DAQ는 National Instrument社 의 NI 9205이며 본 실험에서 적용된 신호 수집 환경은 표 2.5.6 에 나타나 있다.

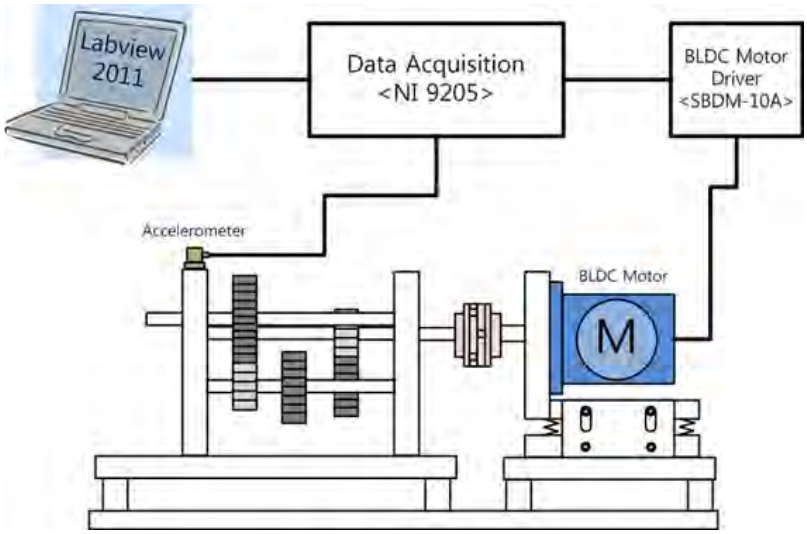



그림 2.5.68 실험 장치의 개략도

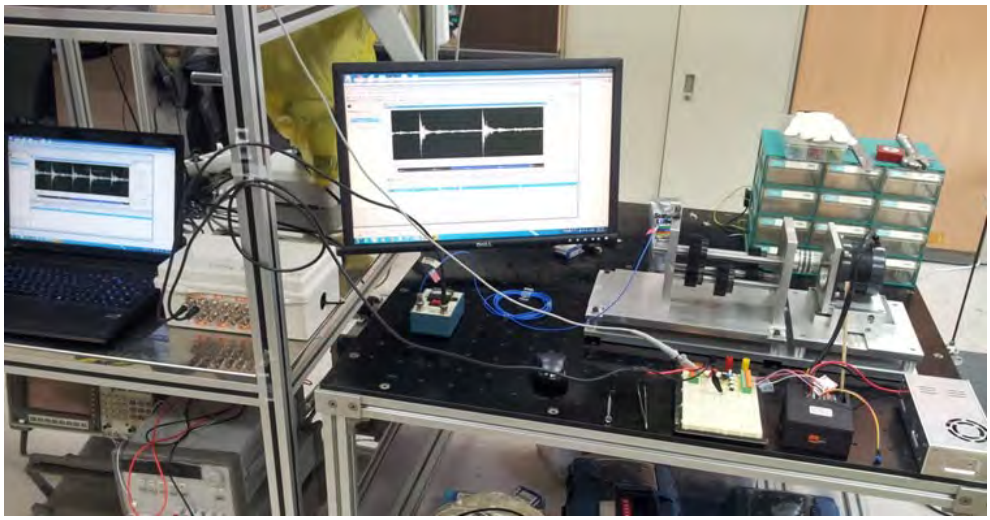


그림 2.5.69 기어 결함 신호 분석을 위해 구성된 실험 장치

표 2.5.6 기어 모델의 신호 수집을 위한 실험 장치의 설정

| DAQ | NI 9205 |
|---|---|
| Sampling rate | 50 kHz |
| Sampling time | 10 sec |
| Input speed | 1200 rpm (20Hz) |

| Shaft | Gear model | No. of teeth | Rotational Speed |
|---|---|---|---|
| N1 | SS2-15 | 15 | 20 Hz (1200 rpm) |
| N2 | SS2-20 | 20 | 15 Hz (900 rpm) |
| | SS2-15 | 15 | |
| N3 | SS2-25 | 25 | 9 Hz (540 rpm) |
| | SS2-15 | 15 | |
| N5 | SS2-30 | 30 | 4.5 Hz (270 rpm) |

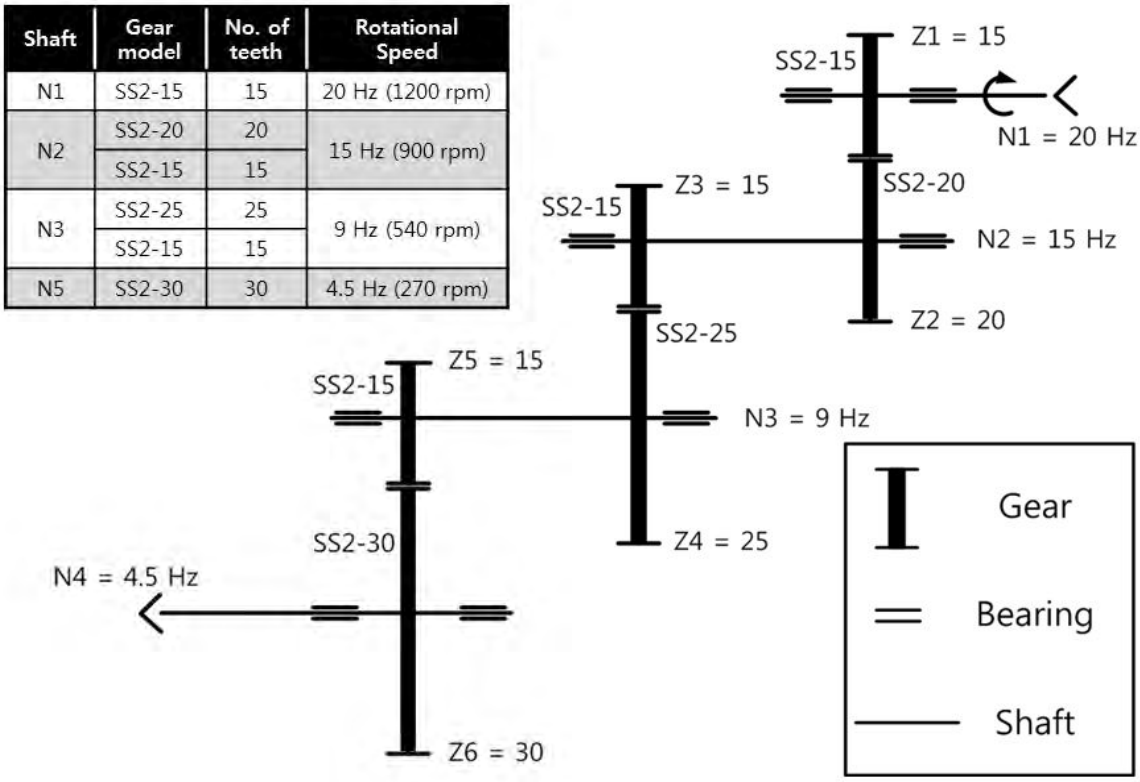



그림 2.5.70 실험 모델의 기어구성과 축 회전 속도의 전반적인 사항을 나타낸 개략도

그림 2.5.71과 같이 기어치 하나에 플라스틱 패치(Plastic patch)를 부착하여 가상의 결함을 발생시켰으며  플라스틱 패치는 출력축의 SS2-30기어의 기어치 하나에 부착되었다. 플라스틱 패치는 아래에 나타난 대로 두께별 5종류이며 총 실험 경우(case)는 결함이 없는 경우를 포함하여 6가지이다. 이 후 이들 6경우를 실험의 편의를 위해 결함이 없는 경우를 <g0>,두께의 정도에 따라 <g1>, <g2>, <g3>, <g4>, <g5>라 표기한다.

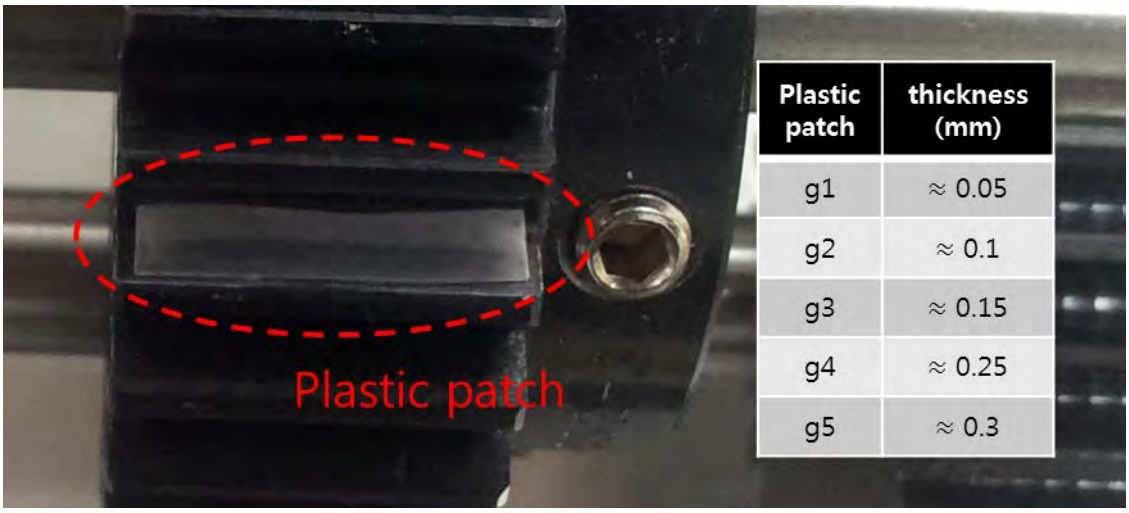



그림 2.5.71 기어 SS2-30에 부착된 플라스틱 패치의 형상과 종류별 두께

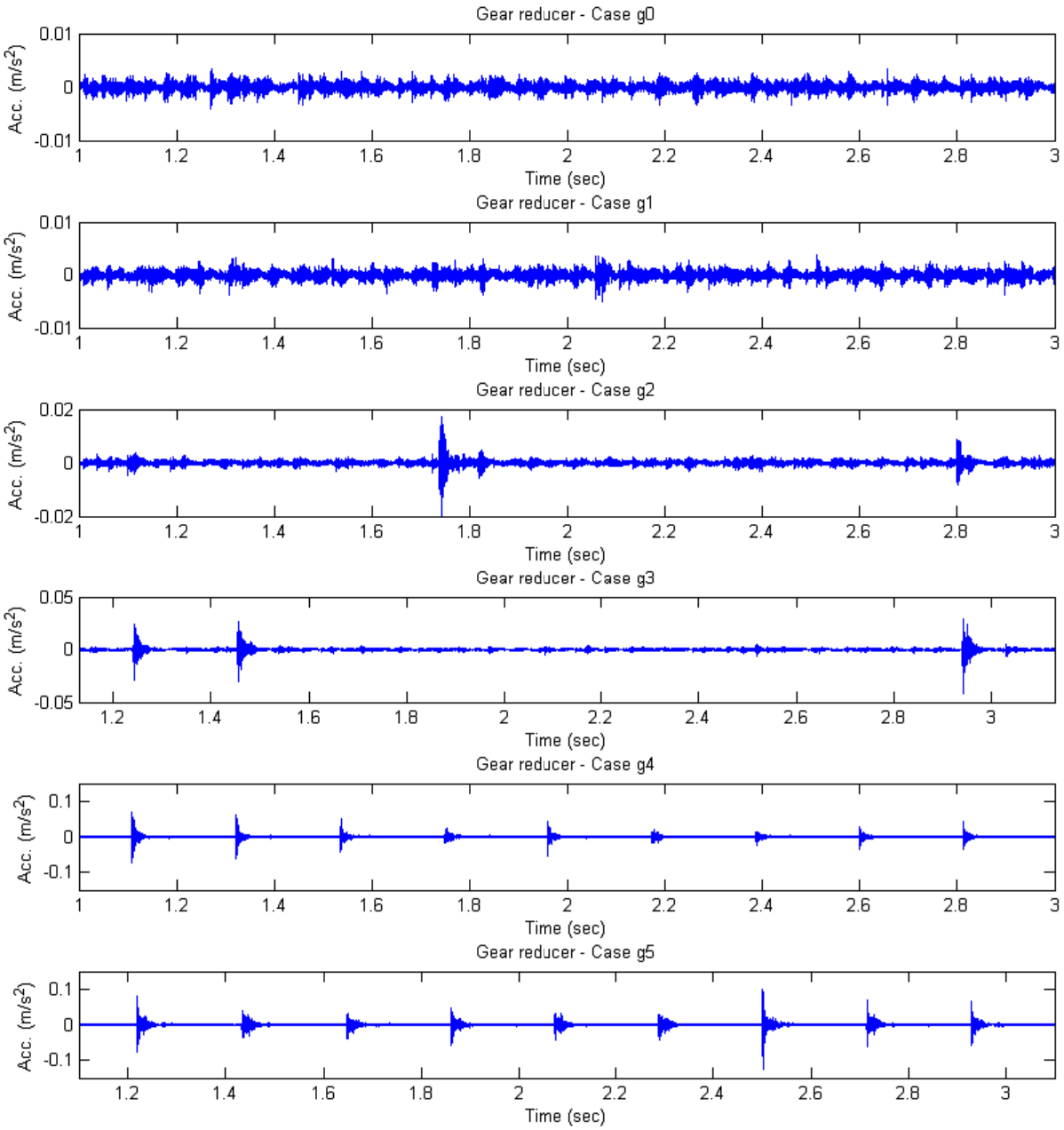



그림 2.5.72 실험 모델의 20Hz(1200 rpm) 회전 입력 조건에서 측정된 가속도 신호

그림 2.5.72 의 측정 신호를 살펴보면 <g0>과 <g1>은 큰 차이를 보이지 않으며 <g2>와 <g3>는 결함에 의한 불규칙적인 충격을 보이고 <g4>와 <g5>는 규칙적으로 결함 충격을 보여주고 있다. 이는 일반적으로 기어의 원활한 동작을 보장하기 위해 적용된 백래쉬(backlash)라 불리는 작은 틈새가 존재 하며 이 틈새의 거리는 일정 범위를 가지게 된다. 플라스틱 패치가 부착된 기어치가 다른 기어의 기어치와 맞물려 지날 때 플라스틱 패치의 두께에 따라 결함 충격 신호의 양상이 달라진다. 아래의 표 2.5.7에 사용된 기어들의 백래쉬가 표시되어 있으며 이 표 2.5.7의 백래쉬와 플라스틱 패치의 두께를 비교하면 백래쉬에 비해 두꺼운 <g2 ~ g5>에서 발생하는 결함 충격 신호를 이해할 수 있다.

표 2.5.7 실험 모델에 사용된 기어의 백래쉬 정보

| 제품명 | 백래쉬 (mm) |
|---|---|
| SS2-30 | 0.14 ~0.30 |
| SS2-25 | 0.14 ~0.30 |
| SS2-20 | 0.12 ~ 0.26 |
| SS2-15 | 0.12 ~ 0.26 |

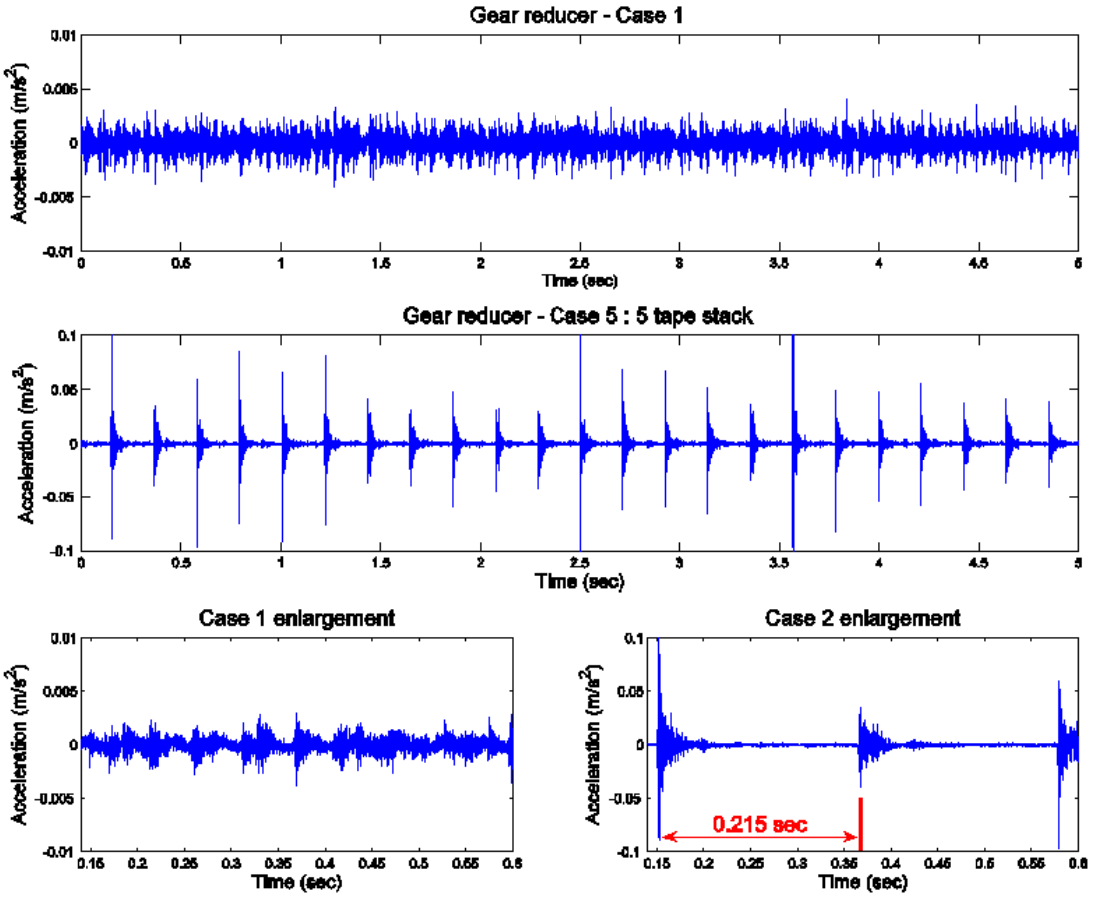



그림 2.5.73 <g0>와 <g5>의 신호 비교와 <g5>에 나타난 결함신호의 간격
그림 2.3.25

그림 2.5.70 에 표시된 정보를 보면 출력축의 기어(SS2-30)은 4.5Hz로 회전함을 알 수 있고 그림 2.5.72에 나타난 <g5>의 충격 신호 간격(0.215 초)와 일치함을 알 수 있다. 이 같은 사실은 후에 결함탐지를 시행함에 있어 기어 결함신호는 장치의 회전속도와 매우 밀접한 관계를 가질 것이라는 예측을 가능하게 한다. <g5>는 여타 결함 탐지 기법을 이용하지 않아도 결함이 존재함을 알 수 있으므로 현 단계에선 참고 수준의 자료이며 이후 기어 모델의 결함탐지는 그림 2.5.73에서 신호사이에 큰 차이가 없는 <g0>과 <g1>의 분류를 목적으로 진행될 것이다.

## 6. 감속기 모델 신호의 손상 주기 강조를 위한 MED 변수 튜닝

### 가. 감속기 모델 실험

감속기 실험 모델의 개략적인이 형상은 아래 그림 2.5.74와 같으며 각 기어의 기어치 개수는 motor pinion 27개, mid gear 41개, output gear 51개 이다. 이에 따라 샘플링 속도 20,480 Hz를 고려하여 실험속도에 따른 주기성분들의 간격을 샘플 개수 단위로 예측해 보면 아래 표 2.5.9와 같다.

표 2.5.8 감속기 요소별 회전속도

| RPM | spd 1 | spd 2 | spd 3 |
|---|---|---|---|
| N3 | 1,261.8 | 2,525.4 | 3,711.7 |
| N4 | 830.9 | 1,663.1 | 2,444.3 |
| N5 | 668.0 | 1,337.0 | 1,965.0 |

표 2.5.9 샘플 갯수로 환산한 회전속도와 GMF

| Samples | spd 1 | spd 2 | spd 3 |
|---|---|---|---|
| N3 | 974 | 487 | 331 |
| N4 | 1,479 | 739 | 503 |
| N5 | 1,840 | 919 | 625 |
| GMF (Hz) | 36 | 18 | 12 |

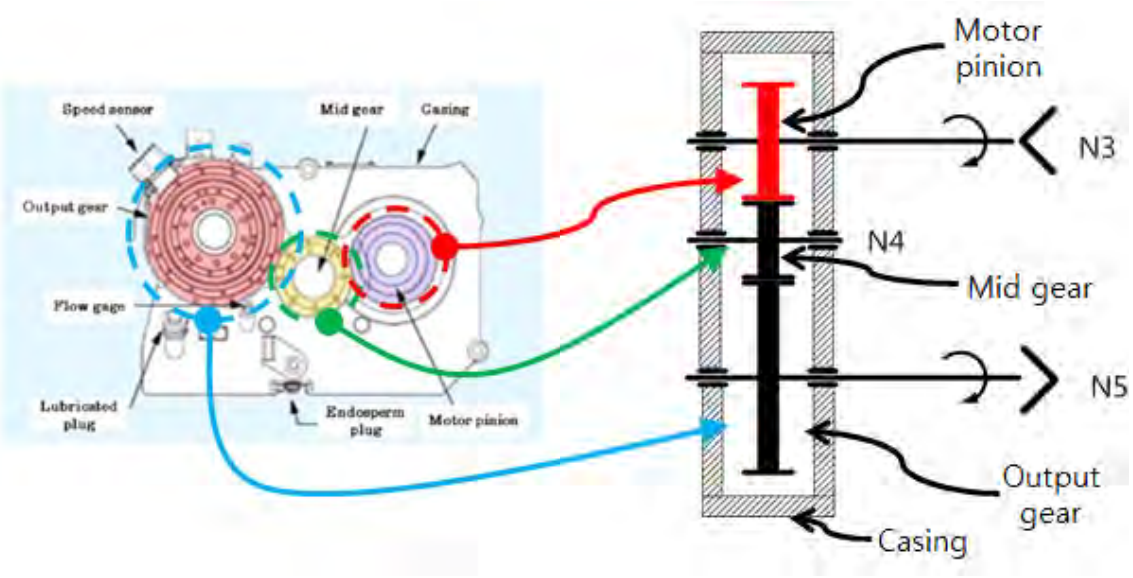



그림 2.5.74 감속기 회전 요소 개략도

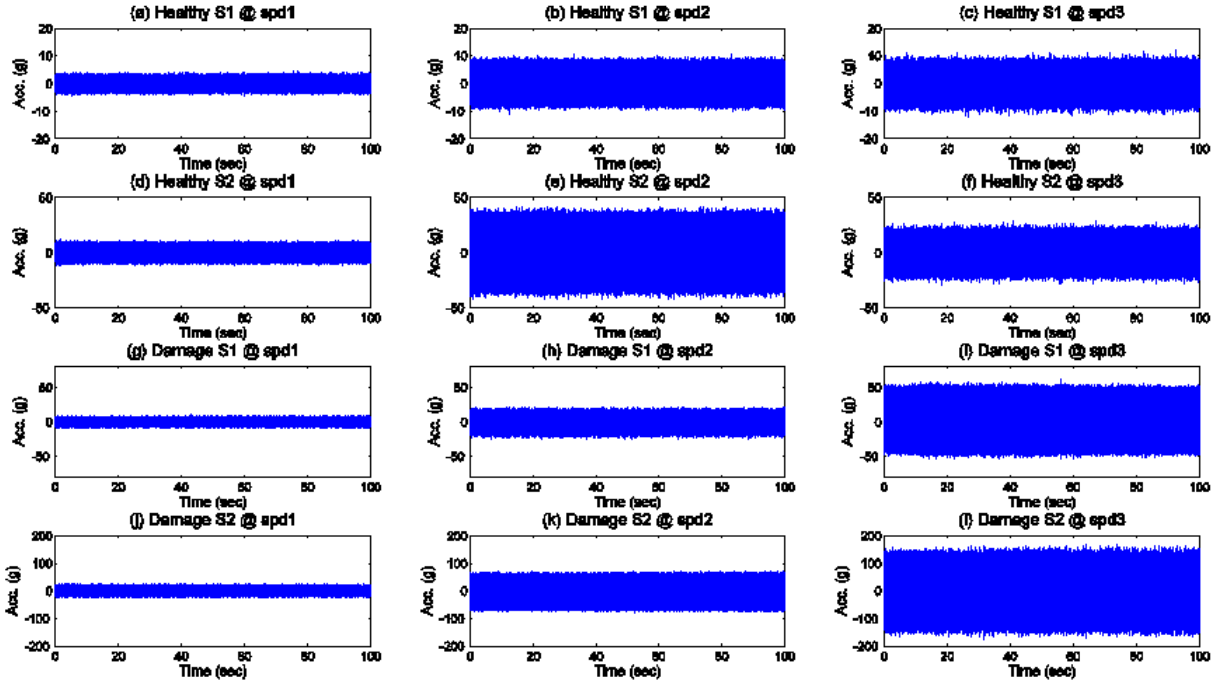



그림 2.5.75 등속 구간별 수집 신호

실험에서 정상(healthy)와 손상(damage)의 두 가지 다른 상황에 대해 실험되었으며, motor pinion의 기어치 하나가 손실된 경우를 손상 상황으로 하였다. 이 때 가속도 신호를 손상기어 상부(S1)지점과 출력축 기어 상부(S2)에 센서를 부착하여 수집하였다. 등속구간에 대해 수집한 자료는 아래 그림 2.5.75와 같고, 각각의 kurtosis 비교는 표 2.5.10과 같다.

kurtosis는 대체적으로 손상에 따라 증가하는 경향을 보이나, spd3(1965 RPM)에서는 정상의 경우가 손상에 비해 kurtosis가 높은 현상을 보인다. 이에 따라 MED를 적용해 보았다.

실험 데이터의 속도별 각 등속구간 1초 길이에 대해 필터 길이 100을 적용하여 MED를 수행하면 그림 2.5.78과 같다.

표 2.5.10 상황별 kurtosis비교

| kurtosis | Spd1 | Spd2 | spd3 |
|---|---|---|---|
| Healthy S1 | 2.63 | 1.94 | 2.69 |
| Damage S1 | **3.09** | **2.87** | **2.51** |
| Healthy S2 | 2.69 | 1.76 | 2.64 |
| Damage S2 | **3.04** | **4.11** | **2.18** |

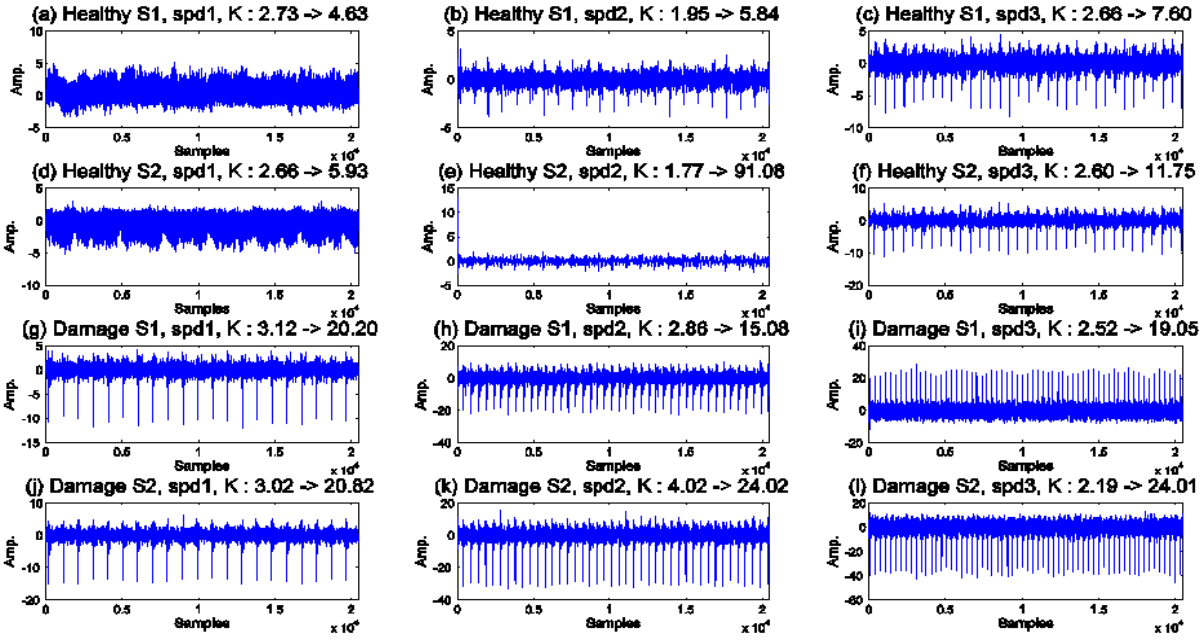



그림 2.5.76 MED(필터 길이 : 100) 적용 후 신호 변화

그림 2.5.76의 (a) ~ (f)는 정상 상태이며 (g) ~ (l)은 손상 상태이다. 각각의 kurtosis값은 K 옆에 표시되어 있으며 -> 표시의 좌측이 MED전 값, 우측이 MED후의 값이다. 전체적으로 MED 적용 후에 kurtosis값 증가뿐만 아니라 손상 주기특성이 강조되어 확연하게 정상과 손상이 구분되는 것을 알 수 있다. 그러나 (e)의 경우 정상임에도 매우 높은 kurtosis값을 보이는데, 이런 현상은 데이터를 잘라내어 처리할 때 잘라낸 데이터의 시작과 끝이 변화가 클 때 발생하는 현상으로 데이터에 windowing을 적용하여 제거할 수 있다. 그림 2.5.77은 hanning 윈도우를 적용하여 MED를 수행한 그림이다.

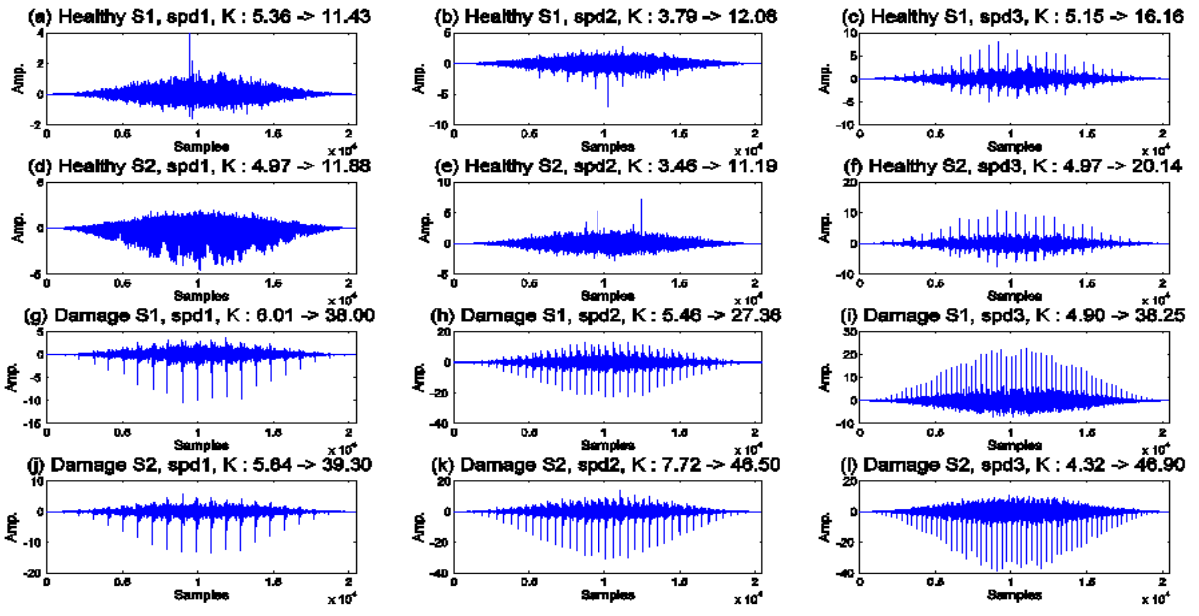



그림 2.5.77 윈도우을 적용하여 MED(필터 길이 : 100)를 수행

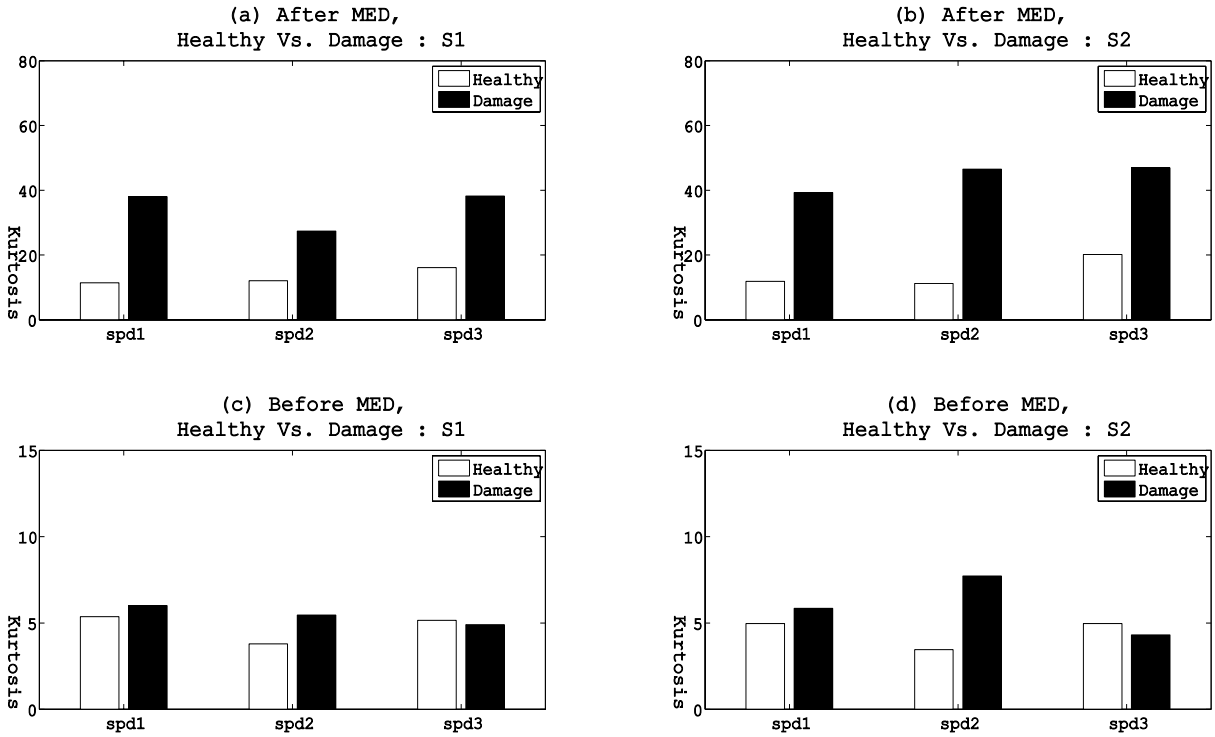



그림 2.5.78 MED 수행 전·후의 kurtosis 차이

윈도우를 포함한 MED의 경우 윈도잉의 영향으로 전체적인 kurtosis는 증가하나 이전 그림의 (e)와 같은 현상은 사라지며 정상과 손상의 kurtosis가 극명한 차이를 보이게 된다. 상기 결과들의 kurtosisfmf 다시 정리하면 그림 2.5.78과 같다.

그림 2.5.78을 살펴보면 MED수행 이전의 kurtosis 를 나타내는 아래 두 행 (c)와 (d)는 서로의 kurtosis가 큰 차이를 보이지 않으며, 심지어 spd3에서는 정상과 손상의 kurtosis가 역전되는 결과를 보인다. 그러나 MED를 수행 한 후의 결과인 상부의 두 행 (a)와 (b)의 결과를 보면 정상과 손상의 kurtotsis 값이 큰 차이를 보여 정상과 손상을 구분하기에는 충분한 kurtosis 차이를 보인다. 또한 센서 위치에 따른 차이를 보면 pinion mortor상부(S1)보다 출력측 상부(S2)의 결과가 서로 큰 kurtosis차이를 보이는 바 센서의 위치 또한 손상구분에 중요한 부분임을 확인할 수 있다. 이같이 수행된 결과들로 보면 MED는 현재의 감속기 모델의 손상에 대해서는 손상탐지를 위한 구분에 큰 역할을 할 수 있으리라 판단된다.

이어서 현재 손상탐지를 위해 사용되는 인수는 kurtosis, RMS, crest factor 등 예전부터 많이 사용되며 계산을 수행함에 있어 장치 프로세서에 큰 부하를 주지 않는 방법들이다. 이에 따라 MED를 포함하여 계산을 수행 할 때에 MED또한 장치 프로세서에 큰 부하를 주지 않아야 하며, 상황에 맞는 변수를 찾아야 하기에 MED의 조절가능한 주요변수인 처리할 데이터 길이와 사용할 필터 길이에 대한 기준이 필요하다. 하여 아래 그림들은 처리할 데이터 길이를 줄여가며 결과를 관찰한 그림이다.

그림 2.5.79 ~ 2.5.86의 결과를 살펴보면 데이터 길이 5,120개(0.25초)까지는 손상의 kurtosis가 정상보다 크게 나타나 구분이 가능하나 그 이하인 데이터 길이 2048개(0.1초)에서는 서로 구분이 불분명해진다. 추가로 주기적인 성분들 또한 식별이 점차 어려워지며 윈도잉까지 포함될 경우에 손상의 식별이 용이한 데이터 길이 한계는 10,240개(0.5초)로 보여 지며 살펴 볼 주기성분을 기준으로 고려하면 손상 주기 성분이 최소 10개는 포함되어야 한다고 보여 진다.

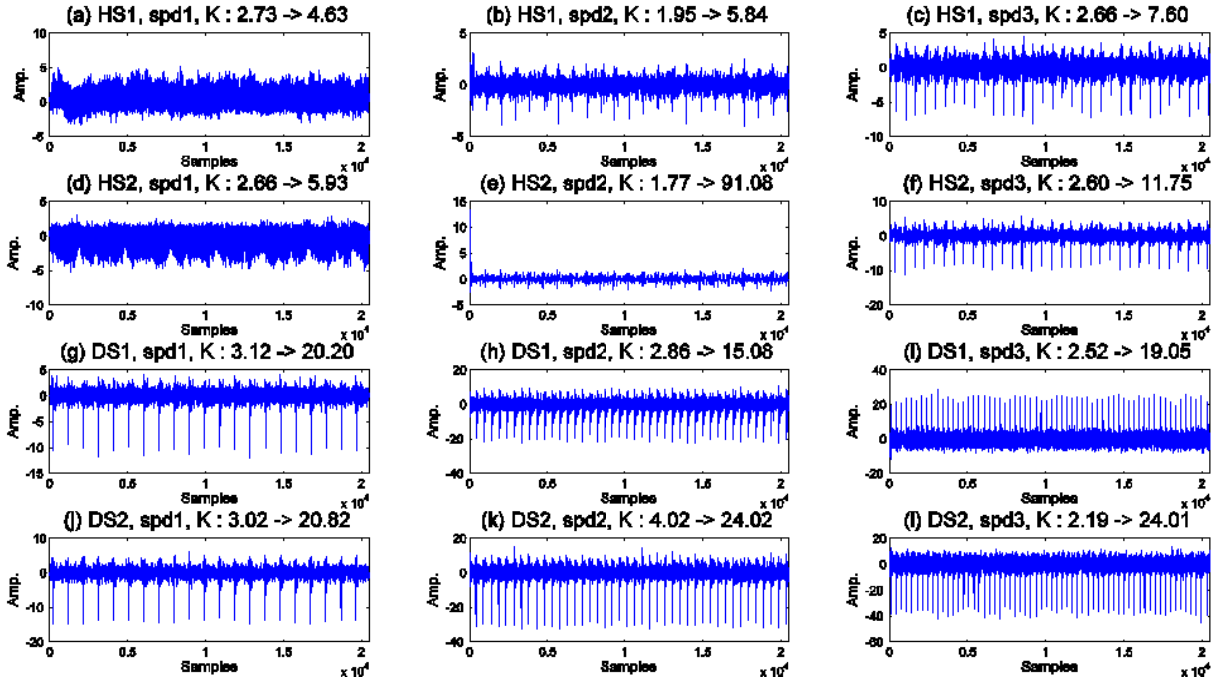



그림 2.5.79 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과

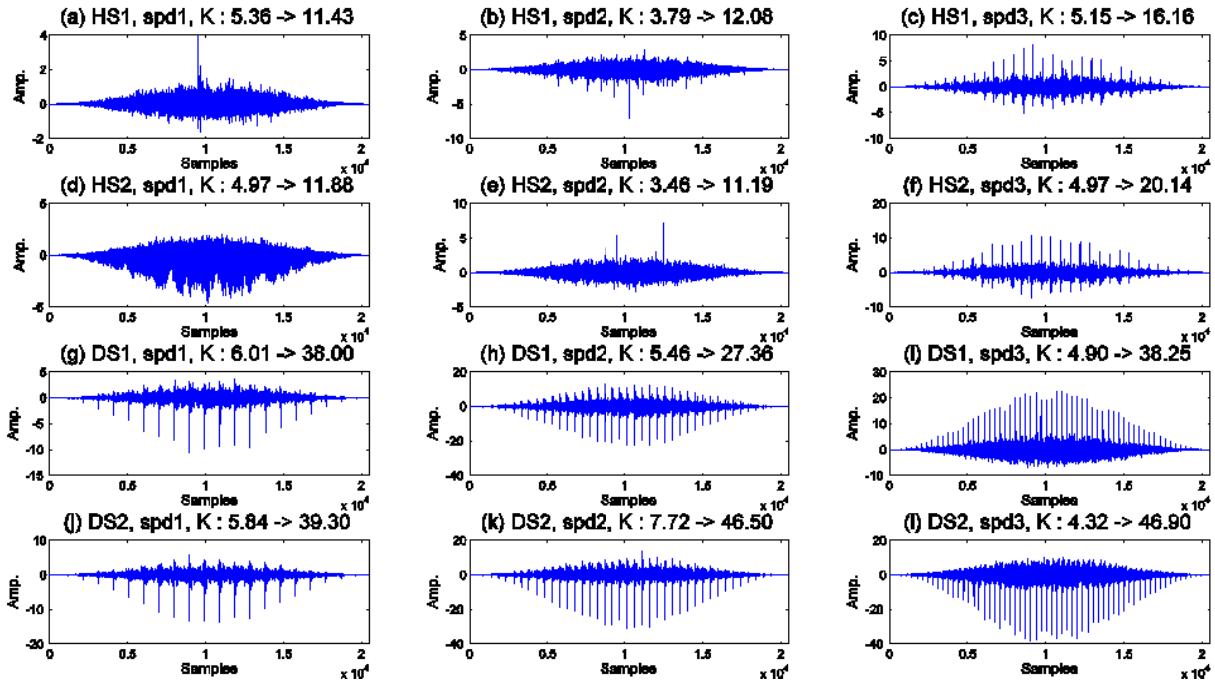



그림 2.5.80 윈도우를 적용한 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과

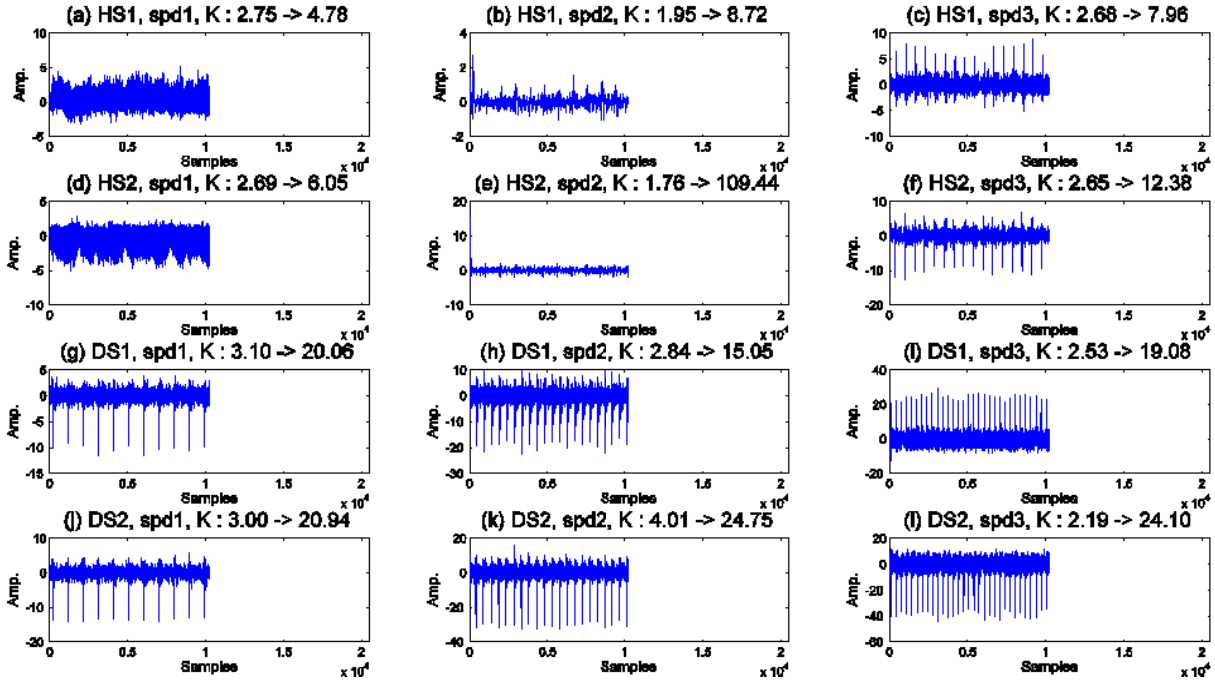



그림 2.5.81 데이터 길이 10,240개(0.5초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과

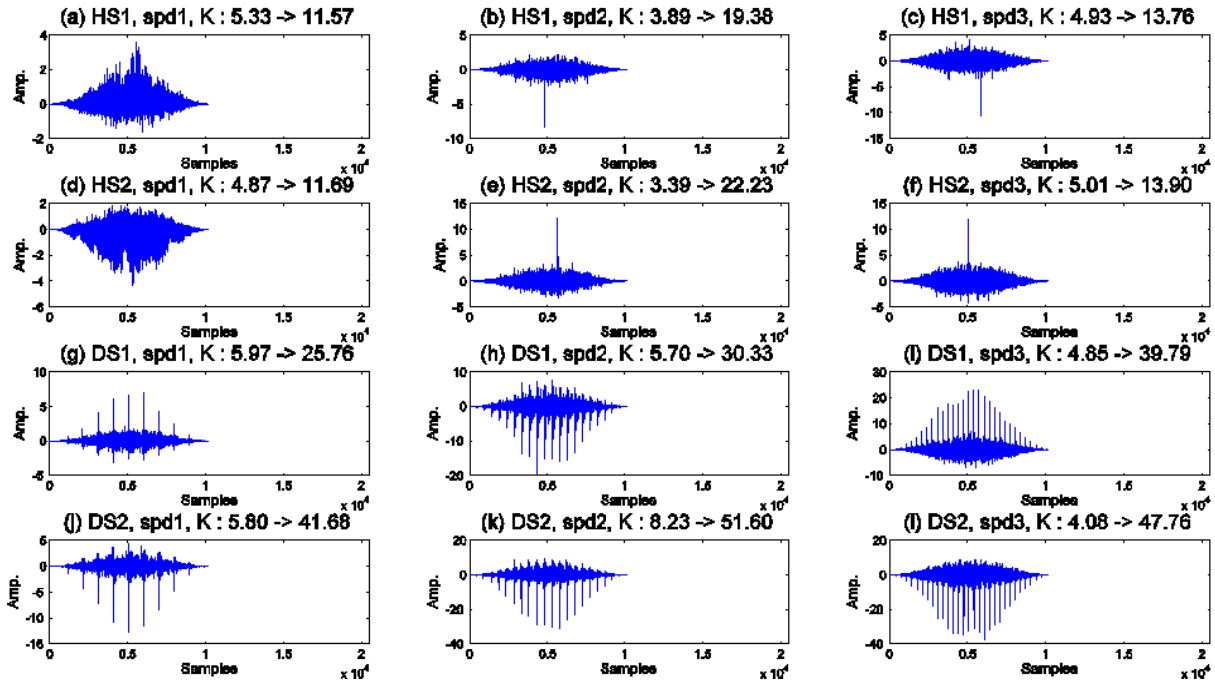



그림 2.5.82 윈도우를 적용한 데이터 길이 10,240개(0.5초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행

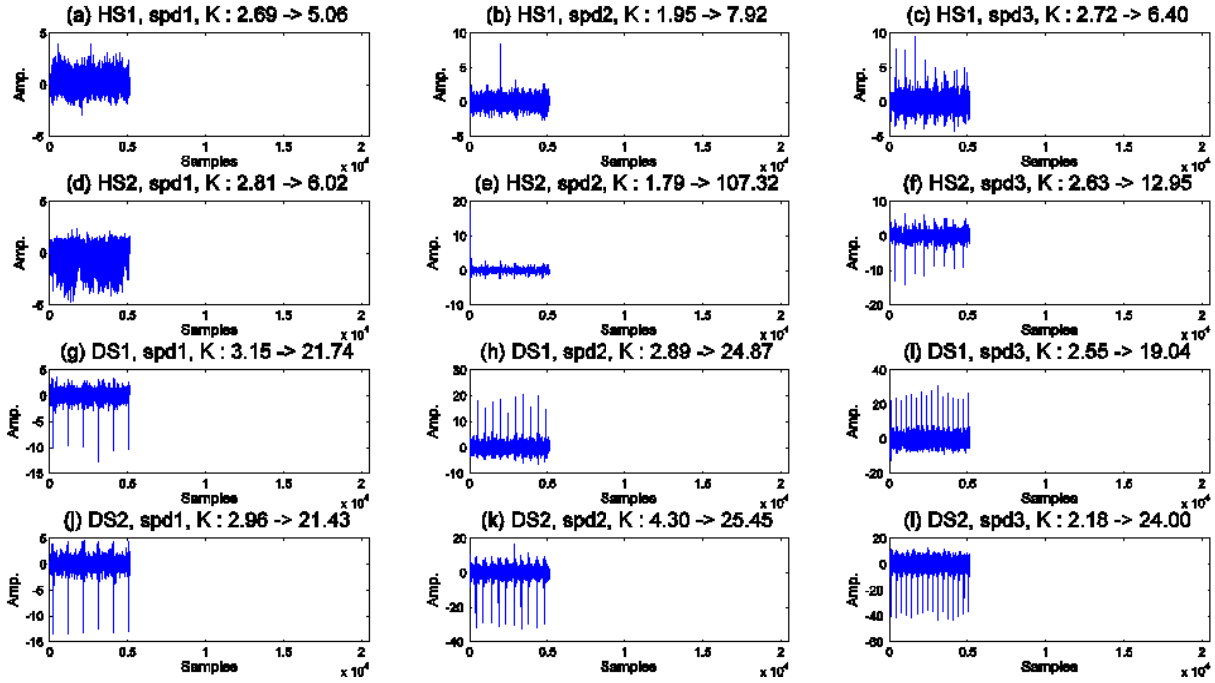



그림 2.5.83 데이터 길이 5,120개(0.25초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과

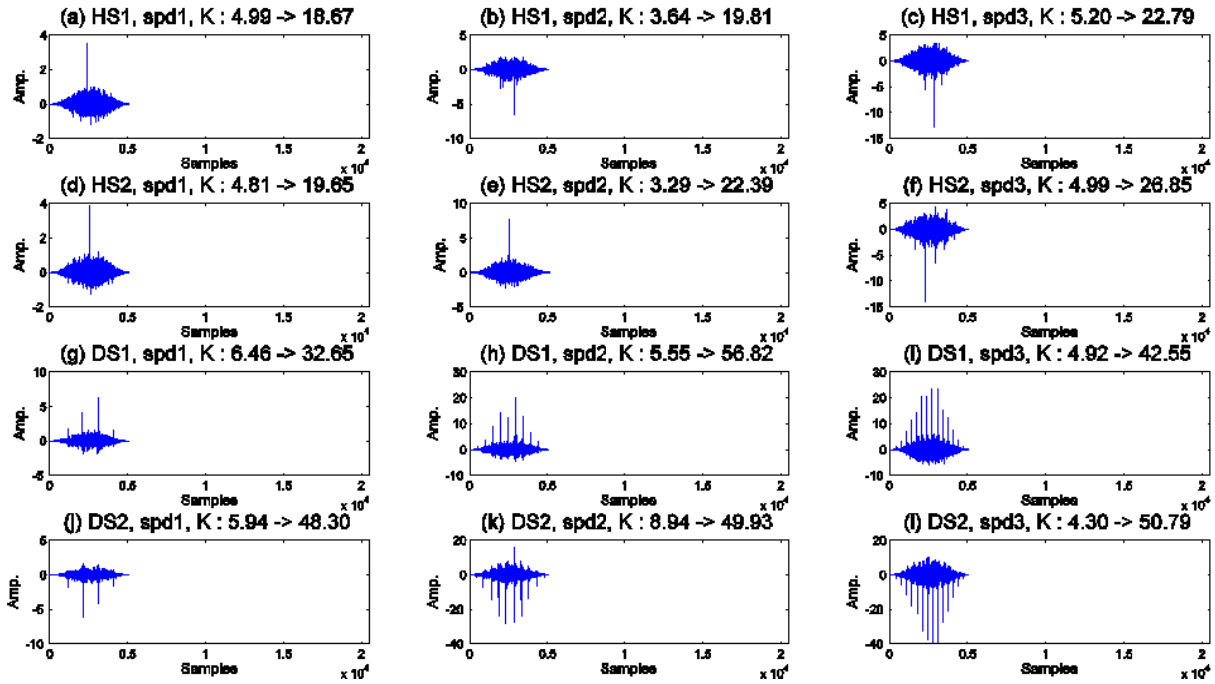



그림 2.5.84 윈도우를 적용한 데이터 길이 5,120개(0.1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과

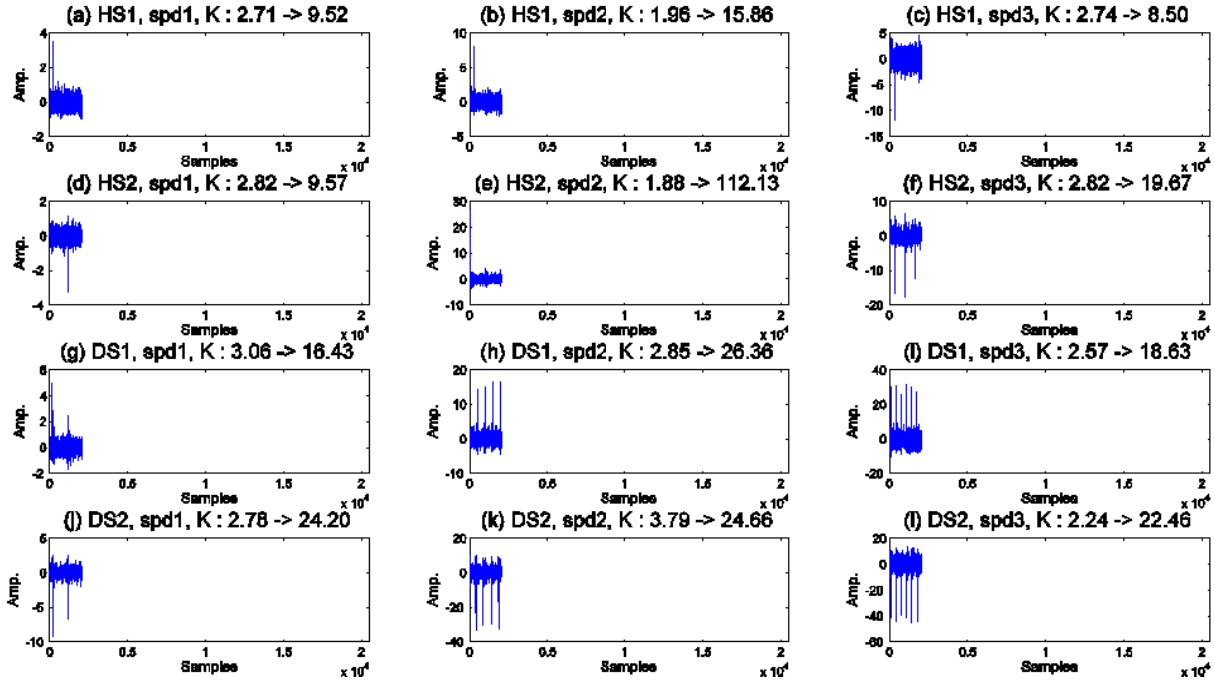



그림 2.5.85 데이터 길이 2,048개(0.1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과

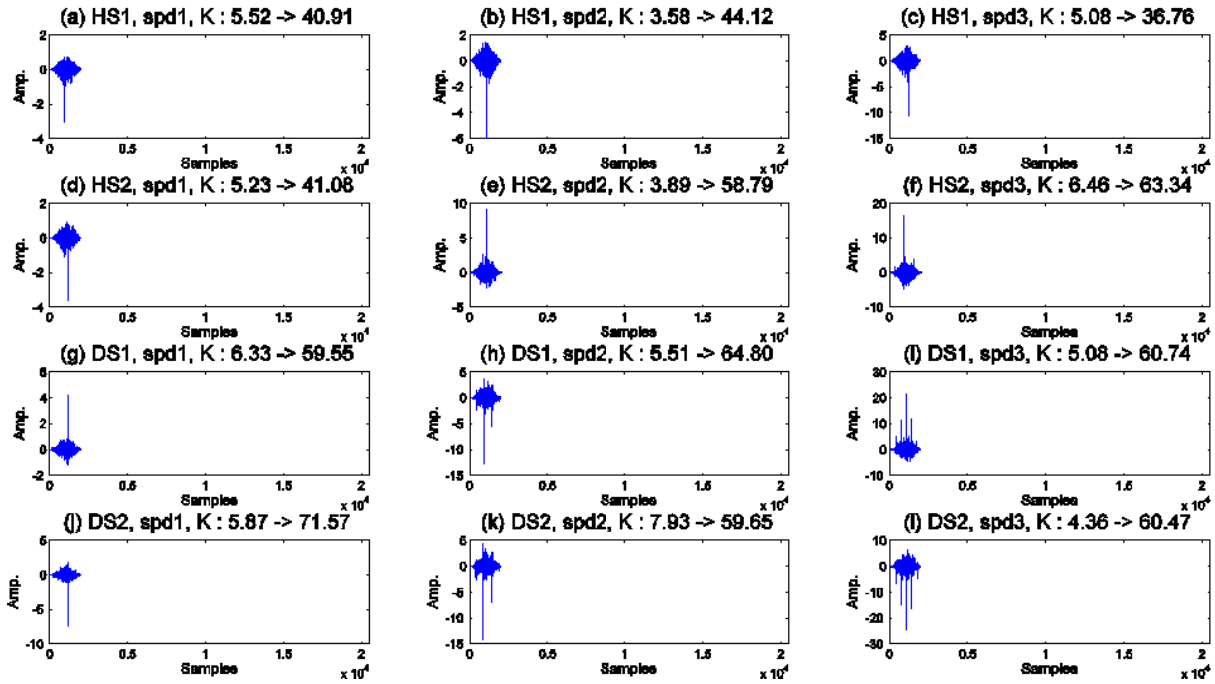



그림 2.5.86 윈도우를 적용한 데이터 길이 2,048개(0.1초)에 대해 MED(필터 길이 : 100) 수행 결과

그림 2.5.87 ~ 2.5.92는 필터길이를 줄여가며 살펴 본 자료이다. 필터 길이에 변화는 MED후의 kurtosis의 크기에 많은 영향을 미치는 것으로 보이며 필터 길이 10에서도 kurtosis 변화는 손상을 구분하는데 도움이 될 것으로 예상되나, 아래 두 열motor pinion상부(S1)에서의 결과들에서 정상과 손상의 kurtosis값 차이가 매우 빠르게 줄어들어 센서 MED의 필터길이는 센서의 위치에 따라 조심스럽게 설정되어야 한다고 보여진다. 여기서는 출력축 상부(S2)의 경우 필터길이 10까지도 가능한 것으로 보여지나 명확한 구분을 위해서는 필터길이는 제일 긴 손상주기의 최소 10% 이상이 되도록 하는 것이 손상을 구분하는데 안전하다고 여겨진다. 참고로 여기서 제일 느린 속도인 spd1에서 제일 긴 손상주기를 가지며 그 길이는 데이터 길이로 974개이며 이를 토대로 필터길이를 설정하면 약 100이 된다.

- 원본의 등속 구간별 kurtosis를 비교 했을 때 spd3의 경우를 제외하면, 데이터의 수집 위치에 상관 없이 Damage데이터가 Healthy데이터보다 높은 kurtosis를 가짐을 알 수 있다.

- RMS의 크기는 회전속도가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 보이고, Damage데이터가 Healthy데이터보다 대체적으로 높으나 spd2상황의 S2위치에서 Healthy데이터가 Damage데이터보다 미소하게 높은 현상을 보였다.

- EMD를 수행 후 비교에서는 분해된 IMF들의 kurtosis가 정상과 이상의 구분에 크게 유리한 방향으로 변화하지 않았으며, 몇몇 경우에서는 Healthy의 kurtosis가 높게 바뀌었다.

- MED를 수행 후 각 데이터의 kurtosis는 전체적으로 증가하는 변화를 보였으며 대체적으로 Damage가 Healthy 결과보다 높았으나, spd2상황의 S1위치의 Healthy 데이터에서 매우 크게 증가되는 현상을 보였다.

- 모든 데이터에 동일하게 해닝 윈도우를 적용하고 MED를 수행하여, MED 수행 후 Spd2상황의 S2위치의 Healthy 결과가 Damage 경우보다 매우 큰 kurtosis를 가지는 현상을 제거할 수 있었다.

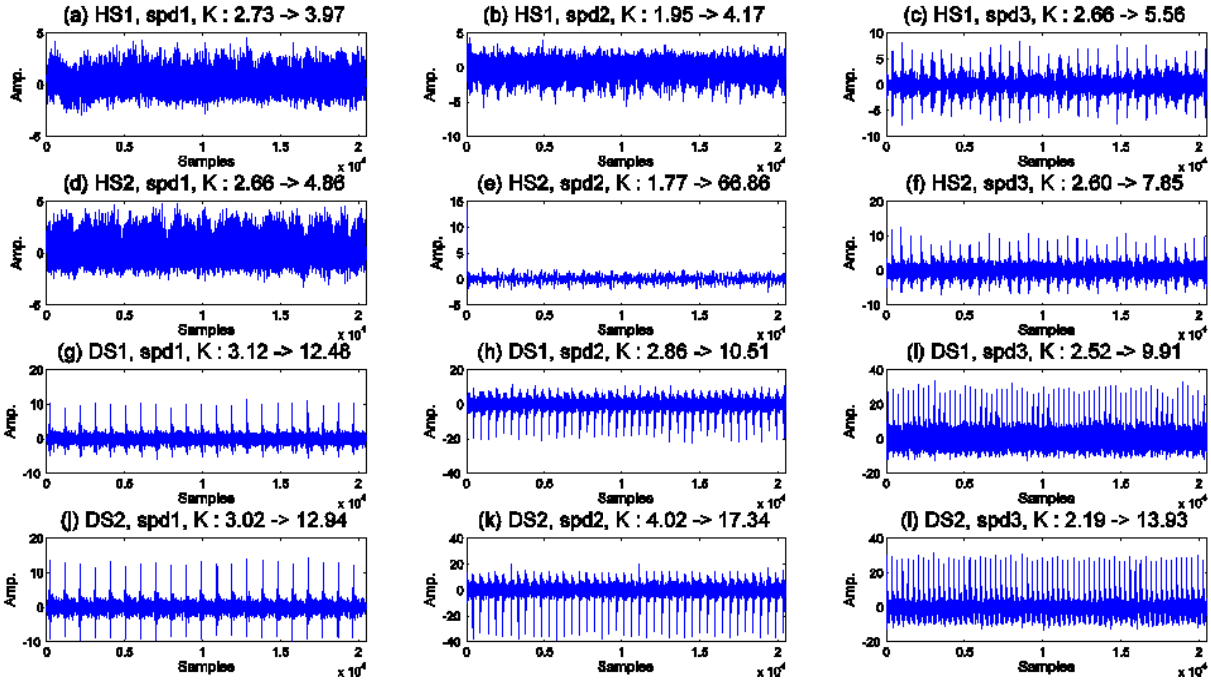



그림 2.5.87 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 50) 수행 결과

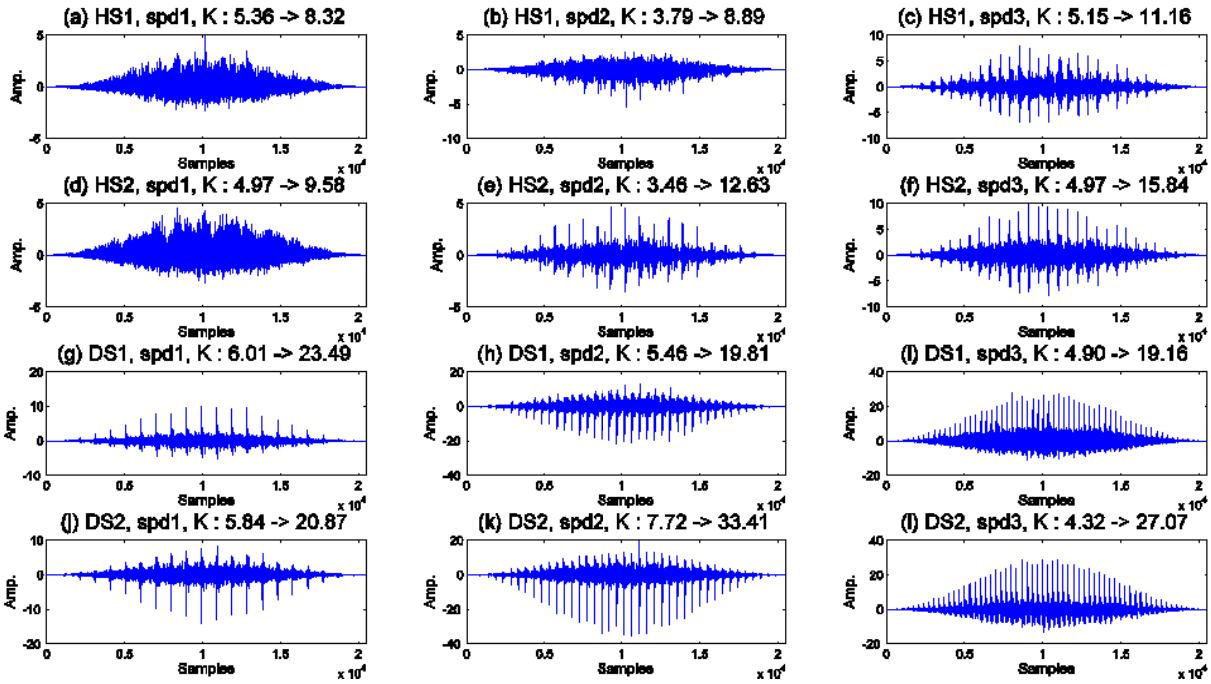



그림 2.5.88 윈도우를 적용한 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 50) 수행 결과

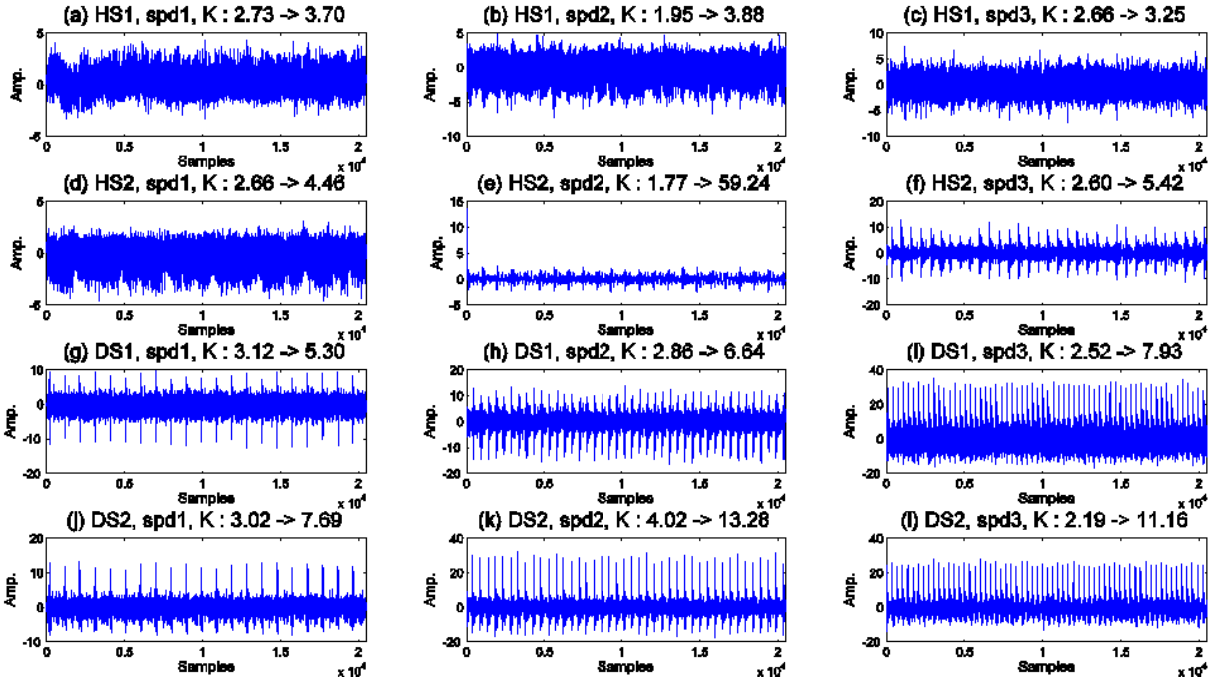



그림 2.5.89 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 30) 수행 결과

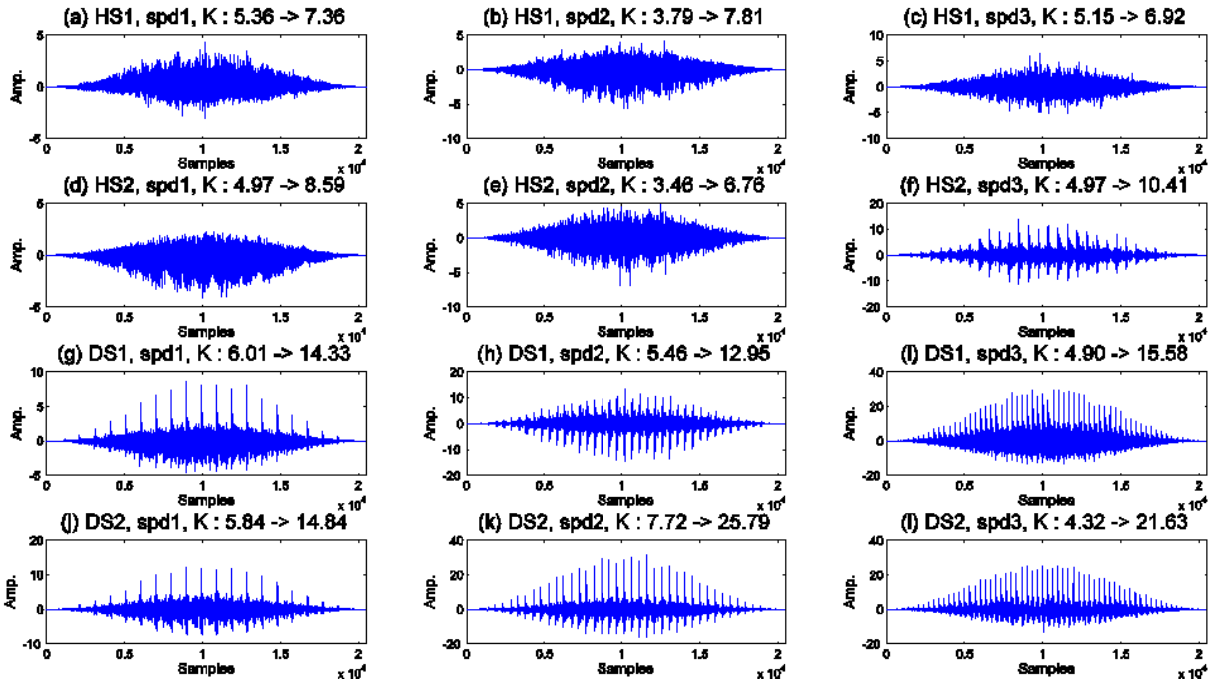



그림 2.5.90 윈도우를 적용한 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 30) 수행 결과

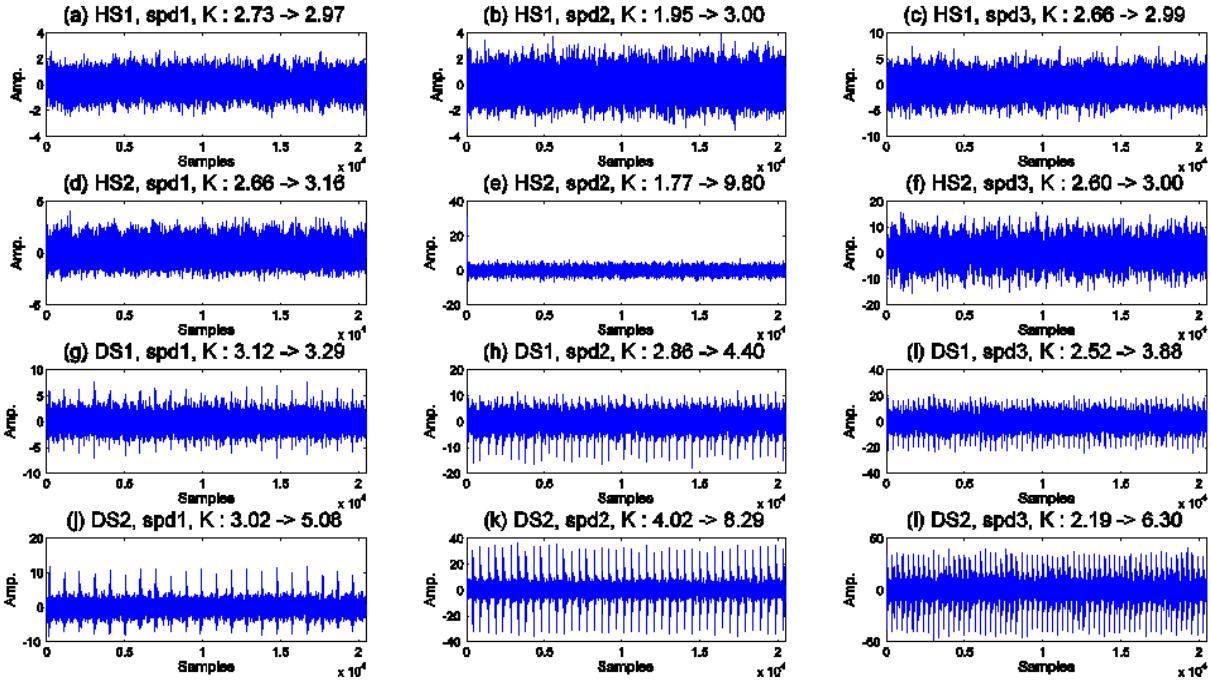



그림 2.5.91 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 10) 수행 결과

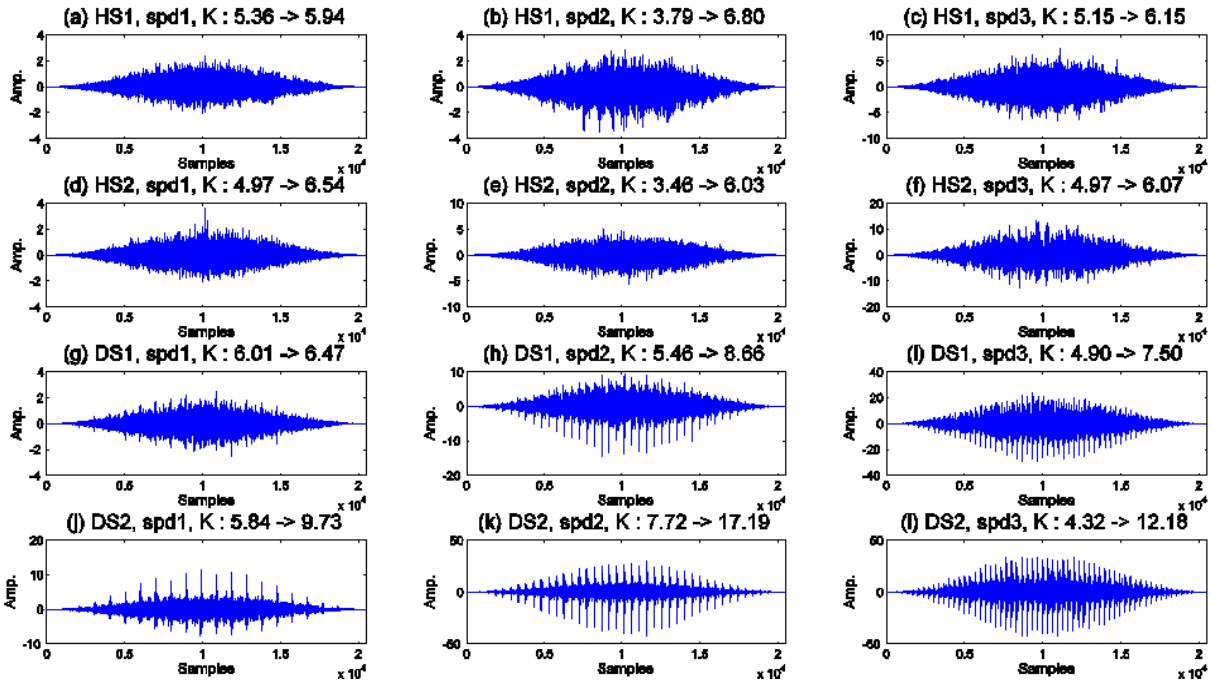



그림 2.5.92 윈도우를 적용한 데이터 길이 20,480개(1초)에 대해 MED(필터 길이 : 10) 수행 결과

나. 손상 주기 신호 측정을 위한 최적 MED 파라미터

본 실험 데이터를 기준으로 보았을 때 MED가 신호의 주기성을 잘 나타내는 데이터 길이와 필터 길이는 다음과 같다. 회전 요소에서 발생하는 손상 특성 신호의 주기신호 주파수를 $Ft$, 실험에서 사용된 샘플링속도를 $Fs$라 했을 때 한 주기의 데이터 길이는 $Fs/Ft$가 되며, 이 $Fs/Ft$ 를 기준으로 데이터 길이($DL$)는 10~30의 범위($DLr$)가 적절했고, 필터 길이($FL$)의 범위($FLr$)는 0.05~0.1의 범위가 신호의 손상 특성을 과도하지 키우거나 줄이지 않는 적절한 범위로 여겨진다. 이는 아래 식 2.5.8과 식 2.5.9로 표현할 수 있다.

$$DL = \frac{Fs}{Ft} \times DLr \quad (DLr : 10\sim30) \quad \text{----------} \quad (2.5.8)$$

$$FL = \frac{Fs}{Ft} \times FLr \quad (FLr : 0.05\sim0.1) \quad \text{----------} \quad (2.5.9)$$

다만 정상 신호에서도 어떠한 주기성분이 나타나는 경우가 있으나 이는 정상 상태를 나타나는 기준으로 사용될 수 있고 이 주기 성분의 크기가 커질 경우 손상이 해당 회전수를 가지는 기어가 손상이 있다고 말 할 수 있으며 정상에서 나타나지 않은 특정 주기성분이 나타날 경우 해당 회전수를 가지는 기어에 이상이 있다고 말할 수 있다.

각 경우의 샘플링주파수 나누기 특성 주기 주파수($Fs/Ft$)는 현 샘플링 주파수 상황에서의 특성 주파수의 peak to peak 간격의 sample 개수를 의미하며 이 값은 샘플링 주파수와 특성 주파수가 정해지면 고정된다. 이때 MED에서 사용할 필터 길이와 데이터 길이는 앞서 말한 범위와 아래 그림 2.5.93 에 나타난 주기적인 성분의 간격(periodic peak to peak length)와의 단순 곱이 된다.

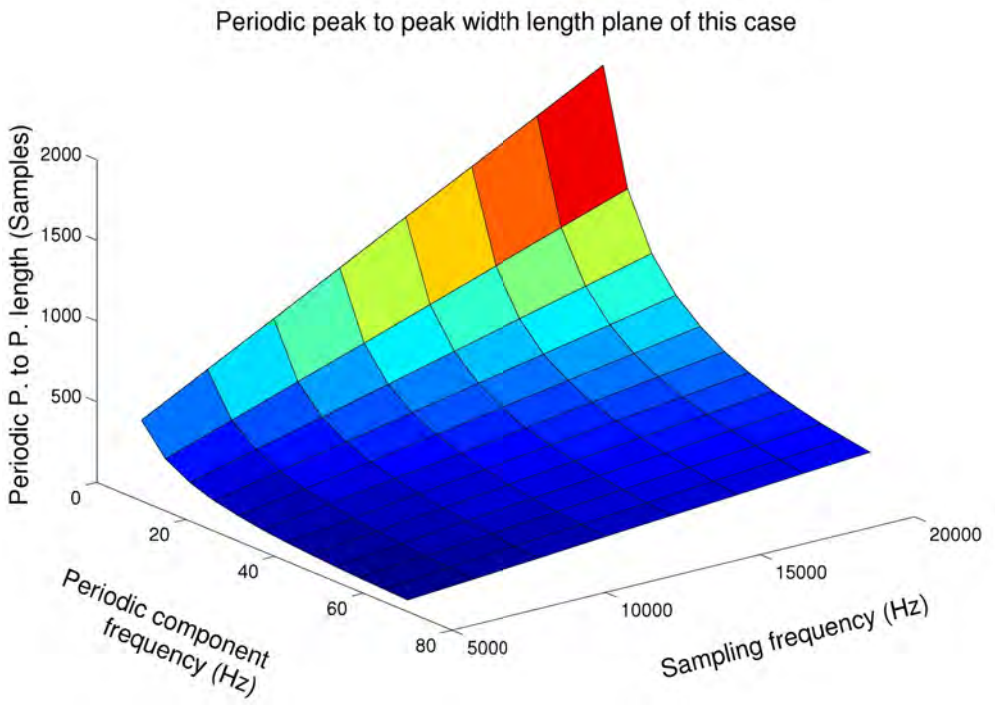



그림 2.5.93 상황별 주기적인 성분의 간격

그림 2.5.93 에서 주기 성분의 길이를 나타내는 평면은 실험의 대부분의 경우에서 완만하다. 이 때문에 특정 계수 범위를 곱하면 평면은 두께를 가지는 범위 공간을 가지는데, 기준이 되는 그림 2.5.93 의 평면이 완만하므로 전체적인 MED 파라미터의 범위는 겹치는 부분이 많게 된다. 이에 따라 MED 파라미터를 설정함에 있어 기준이 모호해 지는 경우를 방지하고자 앞서의 결과를 기반으로 아래의 표 2.5.11에 상황별 MED 파라미터 기준을 제시한다.

표 2.5.11에서 밝힌 MED 파라미터는 본 실험의 손상 상황에서 수집된 데이터에 대하여 MED를 수행하였을 때 손상 주기 성분이 강조되는 되는 파라미터 값이며, 동일한 조건의 정상 신호에 대해 MED를 수행하였을 때 특정한 주기성분이 나타날 수 있으나 손상 주기 성분에 비해 항상 낮은 kurtosis를 보였다. 간단한 예를 들어 좀 더 설명하면 본 실험에서 사용된 감속기의 제일 느린 기어는 spd1 상황에서의 출력축 기어로 약 11 Hz로 회전하며 가장 빠른 기어는 spd3 상황에서 motor pinion기어로 약 62 Hz로 회전한다. 샘플링 주파수는 20,480 Hz로 해당 예를 들어 MED 파라미터를 찾아보면 낮은 회전수인 11 Hz를 기준으로 타겟 주파수 10~20 Hz 행을 보고, 샘플링 주파수 20,480 Hz를 기준으로 샘플링 속도20,000~25,000 Hz 열을 보면 해당 예의 MED파라미터는 데이터 길이는 20,000 samples와 필터 길이 100이 됨을 알 수 있다.

표 2.5.11 실험을 기반으로 작성된 MED 파라미터 테이블

| 샘플링 속도(Hz) / 회전 주파수(Hz) | | 5,000~10,000 | 10,000~15,000 | 15,000~20,000 | 20,000~25,000 |
|---|---|---|---|---|---|
| 10~20 | DL | 5,000 | 10,000 | 15,000 | 20,000 |
| | FL | 30 | 50 | 50 | 100 |
| 20~30 | DL | 3,000 | 5,000 | 10,000 | 10,000 |
| | FL | 15 | 30 | 50 | 50 |
| 30~40 | DL | 2,000 | 3,000 | 5,000 | 10,000 |
| | FL | 10 | 20 | 30 | 30 |
| 40~50 | DL | 1,500 | 2,500 | 3,500 | 5,000 |
| | FL | 10 | 15 | 20 | 30 |
| 50~60 | DL | 1,500 | 2,000 | 3,000 | 5,000 |
| | FL | 10 | 10 | 20 | 30 |
| 60~70 | DL | 1,000 | 1,500 | 2,500 | 5,000 |
| | FL | 10 | 10 | 15 | 30 |

* DL : 데이터 길이(Samples) / FL : 필터 길이.

## 7. 실물 감속기 시험 데이터의 MED를 통한 주기 분석

### 가. 실물 감속기 시험 데이터

철도기술연구원의 실물 감속기 시험 데이터를 전달받아 이에 MED 알고리즘을 적용하여 주기 분석을 수행하였다. 앞의 감속기 모델 신호의 손상 주기 강조를 위한 MED 변수 튜닝에서 다룬 것과 동일한 감속기에서 수행된 시험의 데이터이나 시험 조건이 달라졌다. 시험 조건은 먼저 회전속도에 따라 2가지로 나눌 수 있다. 입력축 피니언기어의 회전속도가 1262 RPM 과 3712 RPM인 2가지 경우로 나누어지며, 100km/h의 운행속도를 상정했을 때가 1262 RPM이고 300km/h의 운행속도를 상정했을 때가 3712 RPM이 된다. 다음은 회전부하인 출력토크에 따라 2가지로 나누어지며 1,000 Nm와 3,000 Nm의 부하 상황이 있다. 마지막으로 기어 손상에 따른 5가지 상황이 존재한다. 손상이 없는 정상(healthy)상태, 기어의 치면에 피팅을 가한 피팅(pitting)상태, 기어치 한 개의 절반이 절단된 상태(tooth breakage 50%), 기어치 하나가 완전 절단된 상태(tooth breakage 100%), 기어치 두 개가 절단된 상태(tooth breakage 200%)의 5가지 상황이 있으며 이 중 회전부하가 3,000 Nm인 상황에서는 기어치 두 개가 절단된 상태에 대한 시험이 불가능하여 데이터가 수집이 불가능 하였다. 이들 시험 조건을 표로 정리하면 아래의 표 2.5.12와 같이 13 가지 상황으로 시험조건을 분류할 수 있다.

### 나. 실물 감속기 시험 데이터의 MED 적용

앞의 연구에서 작성된 MED 파라미터 테이블을 참고로 하여 MED를 수행하였으며, 연속된 신호의 일정 부분에 대해 MED를 수행 시 잘려진 자료의 양쪽 경계가 큰 변화를 보일 경우 자료경계를 하나의 피크성분으로 여겨 MED수행 후 자료의 양 끝 경계 중 어느 한쪽을 극대화 하는 의도치 않은 결과가 나타날 수 있어, 신호는 윈도우(hanning window)를 적용 한 후 MED를 수행하였다.

그림 2.5.94 ~ 2.5.99는 데이터와 그의 MED 수행 후 결과이다. 손상에 의해 발생한 피크성분은 운행 속도에 따라 다른 주기가 나타내며 아래 그림들에서는 운행속도에 따른 다르게 나타나는 주기가 서로 유사하게 보이도록 운행속도 100km/h는 1초 길이로 처리하였고 운행속도 300km/h 0.5초 길이로 처리하여 비교가 용이하도록 표시하였다.

표 2.5.12 실물 감속기 시험조건에 따른 분류

| Case group No. | Speed | Powering | Damaged conditions |
|---|---|---|---|
| 1 | 300 km/h (3,712 RPM) | 3,000 Nm | Healthy |
| | | | Piiting |
| | | | Tooth breakage 50% |
| | | | Tooth breakage 100% |
| 2 | 100 km/h (1,262 RPM) | 3,000 Nm | Healthy |
| | | | Piiting |
| | | | Tooth breakage 50% |
| | | | Tooth breakage 100% |
| 3 | 100 km/h (1,262 RPM) | 1,000 Nm | Healthy |
| | | | Piiting |
| | | | Tooth breakage 50% |
| | | | Tooth breakage 100% |
| | | | Tooth breakage 200% |

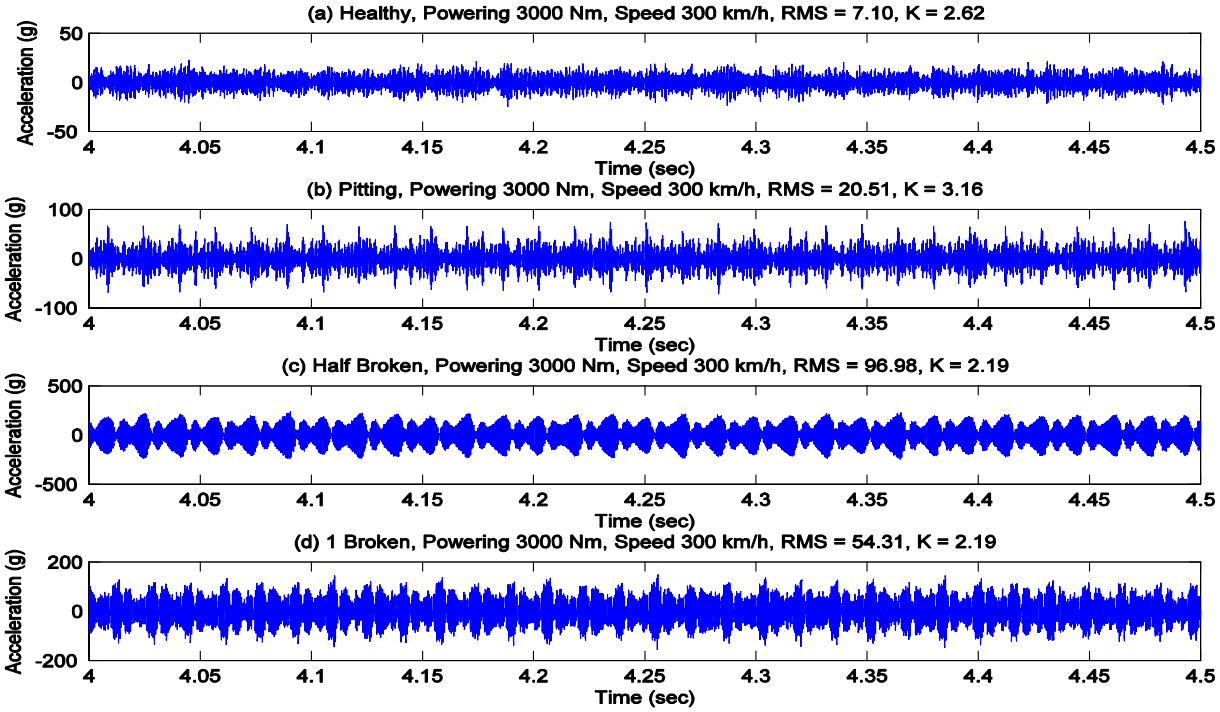



그림 2.5.94 상정 운행속도가 300km/h, 출력토크 3,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 : (a) 정상, (b) 피팅, (c) 1개 기어치 반파, (d) 1개 기어치 파손

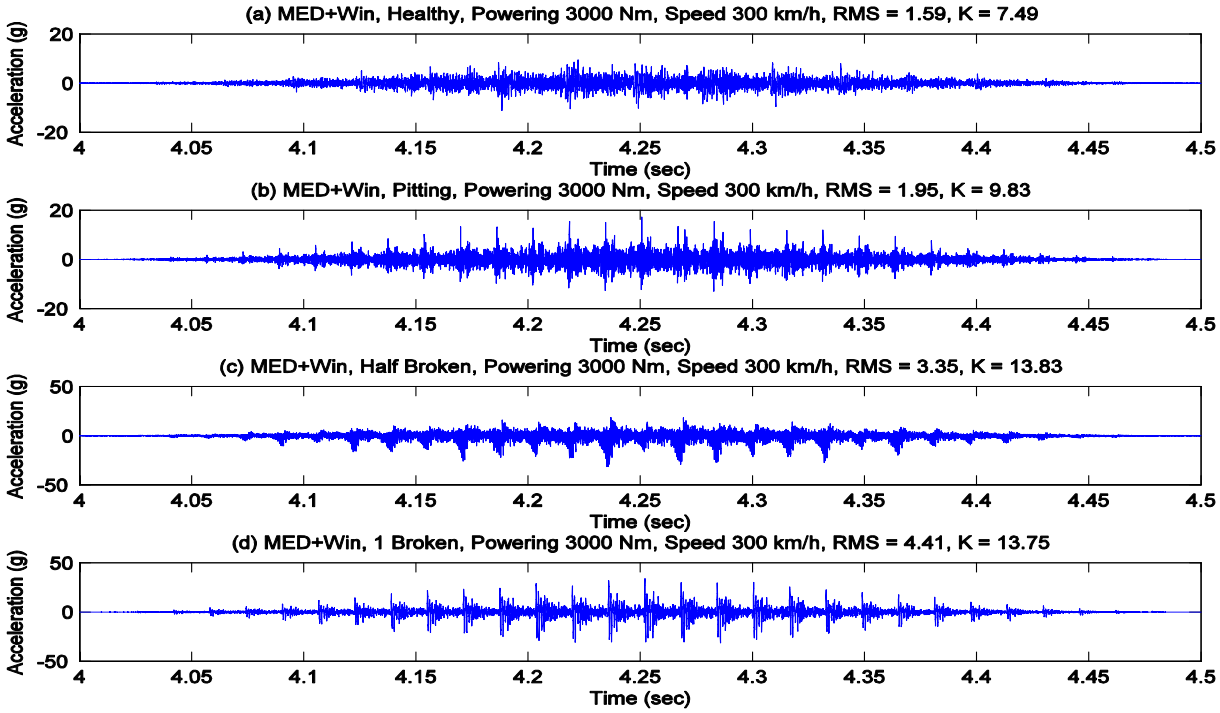



그림 2.5.95 MED가 적용된 상정 운행속도가 300km/h, 출력토크 3,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 : (a) 정상, (b) 피팅, (c) 1개 기어치 반파, (d) 1개 기어치 파손

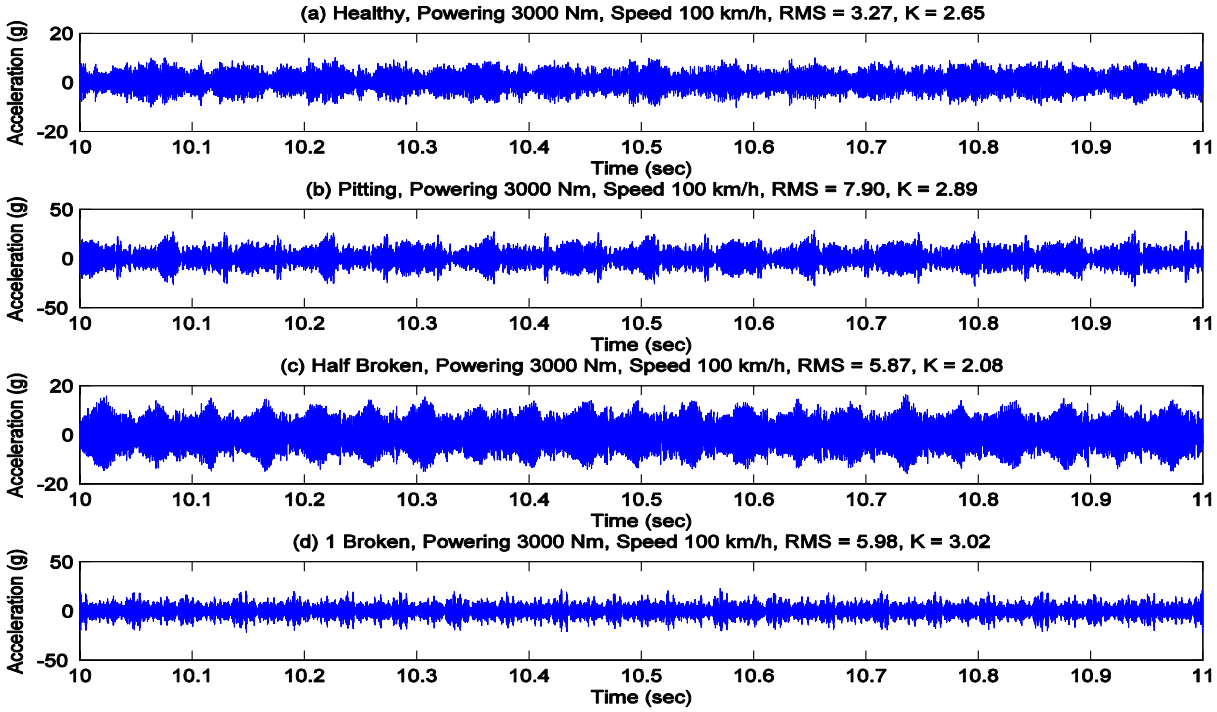



그림 2.5.96 상정 운행속도가 100km/h, 출력토크 3,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 : (a) 정상, (b) 피팅, (c) 1개 기어치 반파, (d) 1개 기어치 파손

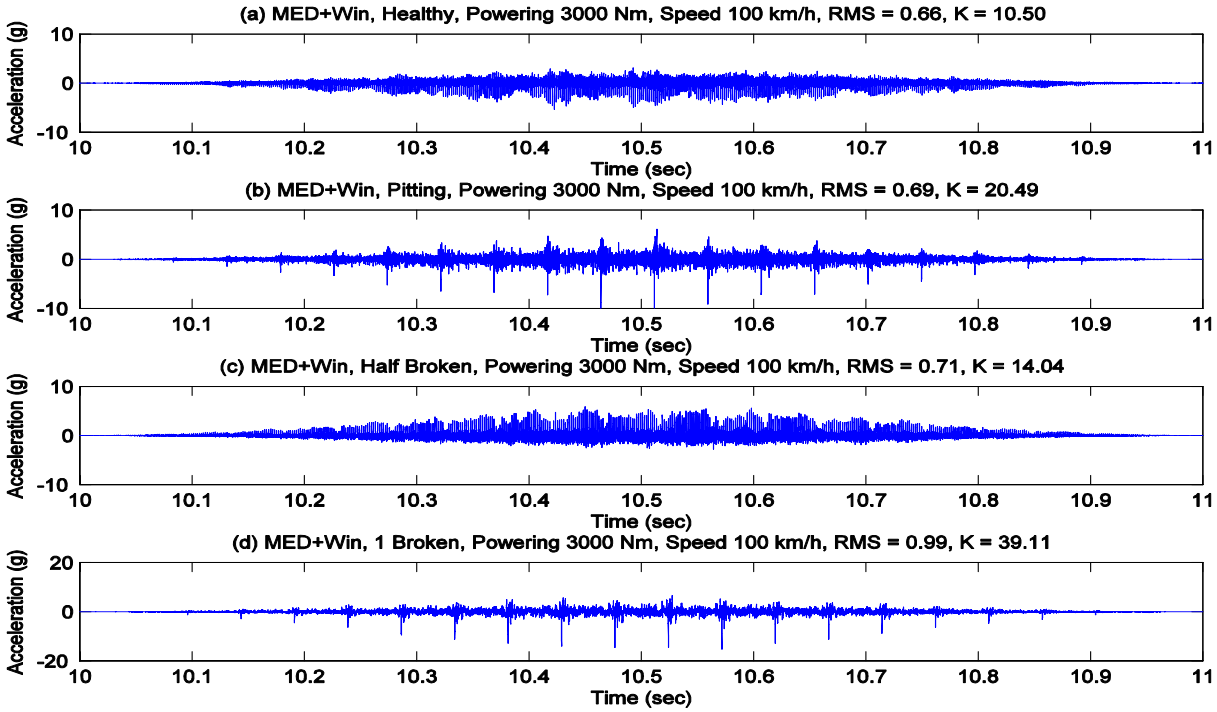



그림 2.5.97 MED가 적용된 상정 운행속도가 300km/h, 출력토크 3,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 : (a) 정상, (b) 피팅, (c) 1개 기어치 반파, (d) 1개 기어치 파손

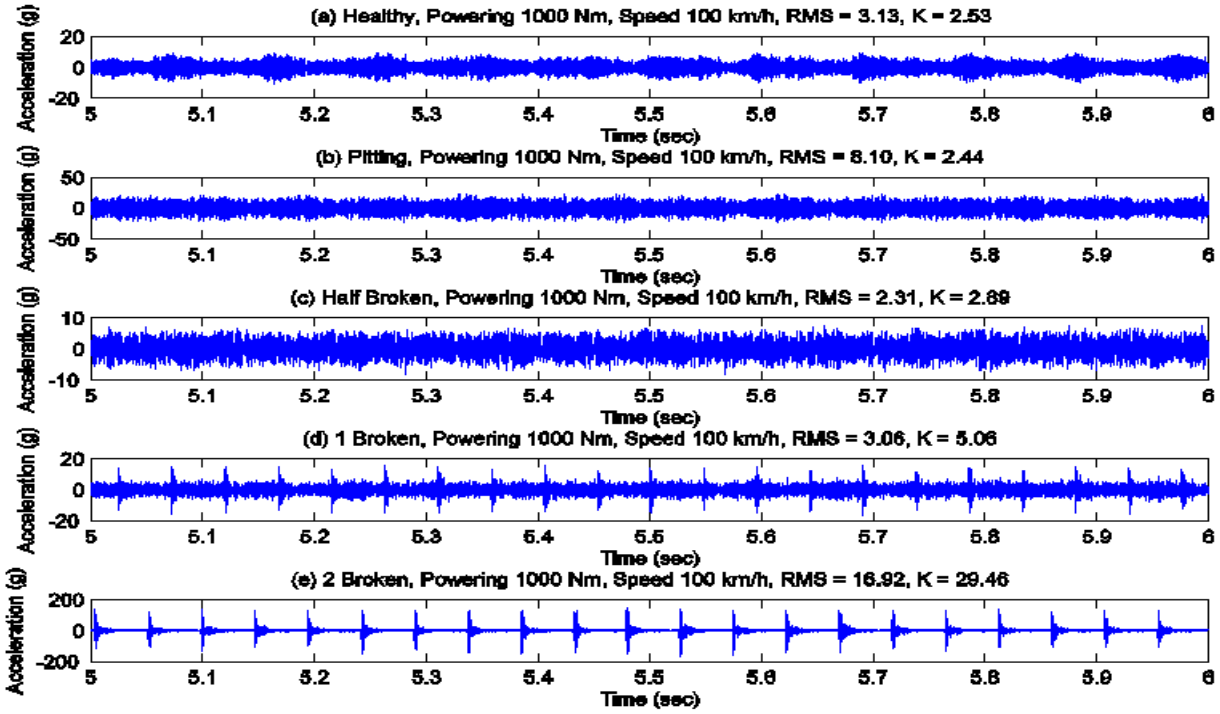



그림 2.5.98 상정 운행속도가 100km/h, 출력토크 1,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 : (a) 정상, (b) 피팅, (c) 1개 기어치 반파, (d) 1개 기어치 파손, (e) 2개 기어치 파손

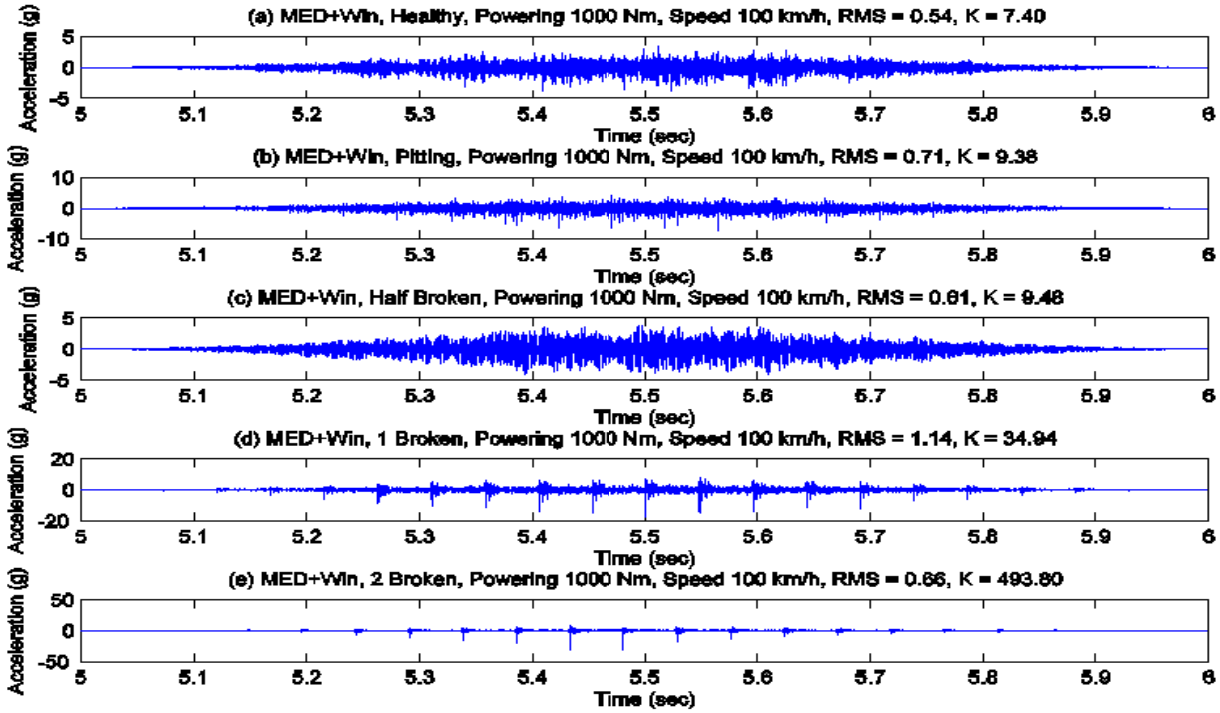



그림 2.5.99 MED가 적용된 상정 운행속도가 100km/h, 출력토크 1,000Nm인 실물 감속기 시험 가속도 신호 : (a) 정상, (b) 피팅, (c) 1개 기어치 반파, (d) 1개 기어치 파손, (e) 2개 기어치 파손

다. MED 적용 후 측정된 손상 피크성분의 주기

위의 결과들을 살펴보면 MED 수행 전에는 관찰이 힘든 손상 피크의 주기성분들이 MED 수행 후에는 대부분 명료하게 나타나게 된다. 그러나 그림 2.5.97과 그림 2.5.99 의 반파 상태(c)의 플롯을 살펴보면 특별한 주기 성분을 보이지 않는다. 분별이 가능한 결과에 대해 주기성분의 간격을 주파수로 표시하면 표 2.5.13과 같다. 운행속도 100 km/h일 때 손상기어의 회전속도는 1,262 RPM이며 주파수로 환산하면 21.0 Hz이며 운행속도 300 km/h일 때 손상기어의 회전속도는 3,712 RPM이며 주파수로 환산하면 61.9 Hz이다.

손상기어(피니언 기어)의 기어치가 접촉 시 마다 손상에 의한 충격이 발생하므로 강조된 피크들의 주기는 손상기어의 회전수와 일치 하여야 한다. 두 가지 속도상황 모두 정상에서 나타난 주기는 기어 손상과 관계없는 주기를 보이며, 3,712 RPM에서는 모든  손상에 대해 손상기어의 회전수와 주기가 모두 일치하는 결과를 보였다. 그러나 반파상황인 그림 2.5.97 의 그림을 살펴보면 뚜렷한 피크가 나타나지 않았다. 그러나 그 경향을 자세히 살펴보면 신호의 강도가 반복적으로 낮아지는 지점들이 보이며, 이 지점들의 간격은 손상 기어의 회전수와 유사하다. 이는 MED가 반복적인 피크-파를 축소시켜 상대적으로 그 외 신호의 크기가 증가되는 것이 신호 전체의 첨도를 증가시킬 경우에 발생하는 상황으로 보여진다. 살펴본 바와 같이 MED를 통한 피크 극대화는 손상신호 주기측정 용이하게 하여 기어 손상 진단에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다.

표 2.5.13 MED후 드러난 손상 피크의 주기

| Case group No. | Speed | Powering | Damaged Conditions | Primary Peak Period |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 300 km/h (3,712 RPM) | 3000 N · m | Healthy | 33 Hz |
| | | | Pitting | 61.9 Hz (Pinion gear) |
| | | | Tooth Breakage (50%) | 61.9 Hz (Pinion gear) |
| | | | Tooth Breakage (100 %) | 61.9 Hz (Pinion gear) |
| 2 | 100 km/h (1,262 RPM) | 3000 N · m | Healthy | 567.3 Hz (GMF) |
| | | | Pitting | 21.0 Hz (Pinion gear) |
| | | | Tooth Breakage (50%) | 566.9 Hz (GMF) |
| | | | Tooth Breakage (100 %) | 21.0 Hz (Pinion gear) |
| 3 | 100 km/h (1,262 RPM) | 1000 N · m | Healthy | None |
| | | | Pitting | 21.0 Hz (Pinion gear, Low) |
| | | | Tooth Breakage (50%) | 567.9 Hz (GMF) |
| | | | Tooth Breakage (100 %) | 21.0 (Pinion gear) |
| | | | Tooth Breakage (200 %) | 21.0 (Pinion gear) |

# 제6절 감속기 윤활유 모니터링 시스템 개발

## 1. 윤활유 열화요인 및 진단 방법

윤활유는 터빈유, 기어유, 엔진오일, 유압작동유 등 다양하며 기계요소 부품의 원활한 작동을 위하여 사용되는데 한국산업안전보건공단의 “윤활유 분석에 의한 고장진단 기술기침(KOSHA CODE M-22-2003)”에 정의된 윤활유의 주요 기능을 보면 다음과 같다.

▷ 마모방지작용 : 금속 마찰면 사이에 윤활유막을 생성시킴으로써 고체마찰이 액체마찰로 바뀌어져 마찰을 감소시키고 마찰면의 마모을 방지하는 작용을 한다.
▷ 냉각작용 : 마찰이 있는 부위에는 마찰열이 발생되고 이것이 축적되면 온도가 올라가 윤활유의 점도가 저하되고 유막이 얇게 되어 고장의 원인이 되므로, 윤활유를 순환주입 함으로써 발생된 마찰열을 제거하는 냉각작용을 하게 한다.
▷ 밀봉작용 : 작동부분에 유막을 형성하여 밀봉을 보조하는 작용을 한다.
▷ 방청작용 : 금속면이 부식되는 것은 물과 산소 때문이고 염분이 가해지면 부식은 더욱 심해진다. 윤활유는 금속표면에 유막을 만들고 공기와의 접촉을 방지함과 동시에 수분의 침입을 허용하지 않으므로 부식되는 것을 방지하는 작용을 한다.
▷ 세정작용 : 기계를 사용하면 윤활부위에 마모된 금속입자, 먼지, 미연소 탄소가루 등이 생성 또는 침투되므로, 윤활유는 이들을 용해 또는 분해하여 기름 속에 분산시켜서 마찰면을 청정하게 유지하는 작용을 한다.
▷ 응력분산작용 : 윤활부위에서 국부적 또는 순간적으로 고압이 걸리게 되면 접촉점에 큰 압력이 걸리고 금속내부에서는 큰 응력이 생긴다. 이것이 반복되면 금속이 피로하여 마모 또는 파손의 원인이 된다. 윤활유는 액체의 성질로서 국부압력을 액 전체에 균등하게 분산시키는 응력분산작용을 한다.

윤활유는 사용하는 동안 항상 금속표면에 접하게 되므로 금속간의 마찰이나 접촉에 의해 발생하는 열이나 금속 마모입자, 공기 중의 산소, 수분 등의 영향을 받아 점차 윤활유의 물리적 화학적 특성이 변하게 된다. 기어유의 경우 수분의 혼입이나 금속성 이물질에 의한 산화촉진 현상이 발생하면 오일 내에 포함된 수분 및 불순물 등과의 화학작용에 의한 마모가 발생하게 되기 때문에 수분을 제거하거나 기어유를 교체해 주어야 한다. 또한, 감속기 장치에 누유가 발생하여 기어유가 부족하게 되면 기어 접촉면에서 충분한 냉각이 이루어지지 않아 접촉면의 온도가 올라가게 되므로 고온에 의한 기어의 변색 및 경도저하로 인한 마모가 발생할 가능성이 커지게 된다.

윤활유의 사용한계는 산화 및 이물질의 혼입 정도에 따라 결정되는데 사용조건이 가혹한 터빈유, 엔진오일, 유압작동유 등의 경우는 오일이 열화되기 쉬울 뿐만 아니라 이물질이 혼입되기 쉬운 상태에서 사용되고 있으므로 사용 중에 점차 열화되어 그 특성이 저하하게 된다. 윤활유의 열화는 윤활유 자체의 화학적 변화와 외부 수분유입 등에 의해 발생한다. 윤활유 열화의 최대 원인은 윤활유의 산화인데 산화를 유발하는 촉매로는 오일내에 혼입된 이물질(금속마모분, 먼지, 수분 등)들로 이러한 이물질들은 오일에 용해되지 않는 슬러지를 만들고 이 슬러지는 기계장치 시스템 내부에 고착되거나 오일과 함께 순환하여 기계장치의 장애나 베어링의 마모, 녹아불음, 파손 등의 원인이 된다. 윤활유의 열화가 진행되면 점도변화, 산가의 증가, 슬러지 발생, 색상의 변화 등이 나타나며 윤활유의 산화속도는 온도, 공기와의 접촉, 윤활유의 종류 및 산화방지제의 종류 등에 의하여 변화하는데

다음은 윤활유 산화에 영향을 미치는 주요 인자들이다.

▷ 온도 : 고온조건에서 사용되는 경우 윤활유는 산화되어 가용성 및 불용성 생성물이 발생하는데 가용성 생성물은 오일의 점도를 상승시키게 되고 불용성 생성물은 초기 윤활유에 비해 마찰을 증가시켜 윤활기능을 저해한다.
▷ 산소 : 오일에 용해된 산소가 산화 반응을 일으킨다.
▷ 금속마모분 : 윤활유 산화는 일종의 화학반응이므로 촉매에 의하여 반응속도는 증가한다. 오일 내에 함유된 금속 마모분이 윤활유의 산화촉매제 역할을 할 수 있는데 대부분의 금속은 윤활유의 열화에 대한 촉매로 작용하며 Fe, Cu, Ni, Co, Mn 등이 일반적인 금속 마모분 성분이며 구리, 철 등은 촉매작용이 크다.
▷ 윤활유의 혼합 : 누유 등으로 인해 기어유를 보충을 할 경우는 열화유에 신유를  혼합하여 사용하게 되는 case 인데 이는 열화유에 함유된 각종 불순물이 촉매작용을 일으켜 오일의 열화속도를 빠르게 할 가능성이 크다.
▷ 수분 : 오일내의 수분은 금속 접촉면에서 오일을 제거하여 기계요소부품의 마모나 손상을 일으킬 뿐만 아니라 녹을 발생시키고 저온에서 오일 중의 불순물이나 열화 생성물과 결합하여 슬러지를 생성시켜 산화를 촉진시킨다.
▷ 함유슬러지 : 윤활유는 사용함에 따라 슬러지가 발생하게 되는데 사용 중의 오일에서 슬러지를 완전히 제거하기는 어려우며 오일에 용해되지 않는 슬러지는 불규칙한 기계작동 및 마모를 유발한다.
▷ 먼지 : 회전기계 장치의 주위환경이나 기계마모 및 수리 시에 유입되는 미세 이물질이 산화촉매제로 작용할 가능성이 있다. 이러한 미세 이물질 즉, 먼지는 오일의 순환을 원활치 못하게 하거나 금속 마찰면에 침입하여 윤활 작용 저해 및 금속 마찰을 증대시켜 마찰온도를 높이고 오일의 산화를 촉진시키게 된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 기계장치 내의 오염물질은 윤활유의 열화를 촉진시킬 뿐만 아니라 기계장치의 신뢰성과 수명에 지배적인 영향을 미치므로 윤활유내의 오염물질의 양을 적정 오염도 이하로 유지하기 위한 윤활유 오염관리를 하여야 한다. 윤활유 오염관리는 사용유 오염도의 정기적 측정 및 관리기준과의 비교 검토를 통해 지속적으로 윤활유의 상태를 모니터링하여 수행하는데 사용유의 열화 판정을 위해서는 사용유의 대표적 시료를 주기적으로 채취하여 분석하여야 한다. 윤활유 분석의 목적은 앞서 언급한바와 같이 윤활유의 계속사용 적정성을 판단하기 위한 조치일 뿐만 아니라 윤활유 내에 포함되어 있는 마모 금속입자의 수나 성분을 분석함으로써 여러 종류의 기계장치 손상을 장치의 분해 없이도 진동이나 온도에 의하여 감지되는 것보다 먼저 알 수 있기 때문이다. 윤활유의 열화를 방지하여 사용수명을 연장시키려면 윤활유의 산화를 촉진시키는 원인을 제거하고 윤활유 순환계통을 청결하게 유지함과 동시에 하여 사용 중에 발생하는 불순물이나 산화생성물 등의 신속한 제거 및 적절한 시기에 신유로 교환하거나 보충하여야 한다. 특히 신유로 교환할 때는 순환계통내의 오일까지 완전히 제거하여야 하는데 이는  열화유가 신유와 혼합되면 열화유속에 함유된 각종 이물질들이 산화 촉매 작용을 일으켜 윤활유의 열화 속도를 증가시키기 때문이다. 다음은 윤활유 분석시험에서 고려하여야 할 주요 항목을 나타낸 것이다.

▷ 점도 : 점도는 가장 중요한 윤활의 성질이며 높은 압력과 온도의 상태에서 유막을 유지할 수 있도록 충분한 점도를 가져야 한다. 점도의 증가는 산화되거나 먼지, 수분, 높은 점도유체에

오염되었을 때 나타나며 점도의 감소는 점도가 낮은 유체에 오염되었을 때 나타난다. 일반적으로 점도가 정상보다 10% 이상 변화되면 윤활유를 교환한다. 점도지수는 온도에 따른 점도의 변화를 나타내는 수치이며 일반적으로 온도가 올라가면 점도는 떨어진다. 윤활유의 사용 온도는 사용 조건에 의하여 변동될 수 있으므로 온도에 따른 점도 변화가 적은 것이 좋다. 중합체 첨가제는 점도·온도 관계를 조정하므로, 첨가제가 운전 중 변화되면 윤활유의 성능에 이상이 발생한다. 점도지수는 윤활유의 점도와 온도 관계를 지수로 나타내는 실험치로서 40℃와 100℃에서의 동점도를 비교한 값으로 점도지수가 높으면 온도에 대한 점도의 변화가 적다는 것을 나타낸다.

▷ 수분 : 수분은 공기 등 외부에서 윤활시스템에 침투되는데 일반적으로 수분함량이 0.2%보다 큰 경우에는 윤활유를 교환하여야 하며 기계장치에서 큰 하중을 받는  구름베어링의 경우에는 0.01%의 수분오염에도 수명이 절반으로 감소될 수 있다.

▷ 산화 : 기본적으로 윤활유에 포함되어 있는 첨가제가 산화를 방지하는 역할을 하고 있으나 일정 사용시간이 경과하여 첨가제가 소모되거나 변화되면 윤활유가 산화하기 시작하며 점차 윤활유의 막이 두꺼워지고 침전물과 부식성 물질이 생성된다.

▷ 전산가 (TOTAL ACID NUMBER) : 전산가는 윤활유에 포함되어 있는 산을 중화하는데 필요한 알칼리의 양으로 표시되며, 윤활유에 포함되어 있는 산의 양을 나타낸다. 이는 윤활유의 열화과정을 나타내는 기준이 되며, 전산가가 증대하면 윤활유의 변질이 촉진되는 것을 나타낸다. 전산가는 압축기, 유압기기, 터빈, 기어 등에서 일반적으로 사용되는 윤활유에 적합하며 정상 값의 두 배 정도가 일반적으로 허용되는 수준이다.

▷ 마모입자(철분 분포/입도 측정 및 분석) : 윤활유 속의 입자수를 측정하여 부품의 파손/손상 등 이상상태를 알 수 있다. 윤활유 시료를 자장이 걸려있는 유리관을 통과시키면 철분이 자장에 끌리게 되어 큰 입자는 강한 자장을 받아 먼저 침전되고 작은 입자는 나중에 침전되므로 유리관의 두 지점에 침전되어 있는 양을 측정하면 철분 분포를 알 수 있다. 철분분포측정을 정기적으로 시행하면 기계 마모 상태를 알 수 있다. 철분입도분석을 위해 윤활유 시료를 자장이 걸려있는 유리경사판을 통과시키면 자성 물질은 자장과 중력에 의해 큰 입자가 먼저 침전되고 작은 입자는 나중에 침전된다. 비자성물질의 경우는 중력에 의해서만 침전되므로 천천히 침전된다. 침전된 유리판을 마이크로스코프에서 검사하여 입자의 크기, 모양, 색상 등을 알 수 있고 기계의 고장상태에 대한 상세한 자료를 얻을 수 있다. 마모의 형태/구분을 보면, 마찰마모는 표면결이 없거나 적은 편평한 판상입자를 생성시킨다. 판상입자는 길이 5미크론 두께 1미크론을 넘지 않는다. 파괴가 일어나면 입자 길이가 15미크론을 넘게 되고 심각한 마모를 나타낸다. 미끄럼마모는 길이가 15미크론을 넘는 실모양의 표면을 가진 입자를 생성시키고 열처리 한 것 같은 색상을 보여주는데 이것은 형성도중 발생하는 열의 영향 때문이다. 절단마모는 드릴링이나 선반작업을 한 것 같은 모양의 입자를 생성 시킨다. 붉은 산화물 입자는 일반적으로 미끄럼 접촉 부위에 윤활이 부족함을 나타내고 두껍고 둥근 붉은 산화물 입자는 부식이 발생하고 있음을 나타낸다. 검은 산화물 입자는 검은색이나 회색의 조약돌 모양을 하고 있는데 붉은 산화물 입자와 비슷한 상태를 나타내고 있으나 좀더 심각한 상태이다.

▷ 시료윤활유의 현장시험 : 외관, 색, 냄새와 같이 간단하게 현장에서 감각으로 윤활유의 상태를 파악할 수 있지만 검사자의 주관적 판단에 의한 것이므로 신뢰성은 떨어진다. 간단한 현장시험 방법은 신유와 사용유 시료를 유리병 등에 담아 비교하는 것으로 초기에 투명했던 윤활유가 탁해지면 일반적으로 산화 또는 어두운 색조의 반응물에 오염되었음을 나타내며 색이 검어지면서 톡 쏘는 냄새가 나고 윤활유의 점도가 증가되면 심각한 산화를 나타내는 것이다. 윤활

유 시료 몇 방울을 120℃로 가열한 철판위에 떨어뜨렸을 때 거품이 발생하며 탁탁 소리를 내면 수분함량이 0.05% 이상 초과된 것을 나타낸다.

전술한 윤활유 관리 기법/분석을 통한 기계 상태의 진단은 현재 국내외 산업계에서 활발히 진행되고는 있으나 타 진단기법에 비해 비교적 기술수준이 제한되어 있는데 그 이유는 오일시료 샘플링을 통한 분석이 비교적 고가의 실험실 장비를 이용하여 제한된 공간에서 수행될 뿐만 아니라 시료가 가지는 윤활유 상태의 대표성이 어느 정도로 신뢰성을 가지는가에 대한 의문이 있고 시료 분석 자체도 시간이 소요되기 때문에 실제 기계 상태의 적기 분석이 어렵다는 문제도 있기 때문에 상대적으로 기술개발의 폭이 제한되어 있다. 그러나 최근 들어 이러한 문제점을 해결하고자 기계상태를 통합적으로 실시간 모니터링 할 수 있는 기술이 연구되고 있는데 이러한 기술은 대형 설비의 마모, 진동, 온도 등의 변수들을 통합하여 측정하고, 각 측정 변수들의 이상 발생에 따른 상호 상관관계를 규명함으로서, 기계설비의 상태를 효율적으로 모니터링 할 수 있는 장점이 있다.

KIST에서는 윤활유의 오염을 정량적으로 측정하기 위하여 광센서를 이용한 광자기량 변화를 측정하는 방식을 사용하여 오염된 오일을 모니터링하는 기술을 연구하였으며 오일 오염이 회전체 내부의 기계 요소 부품인 베어링, 축등의 파손에 영향을 미칠 가능성이 있다는 것을 예측하였다. 그림 2.6.1은 KIST의 기계상태진단을 위한 인-라인형 오일모니터링 시스템을 나타내고 있는데 화학적 열화, 오염도, 수분함량, 온도를 측정할 수 있으며 측정 프로브는 3개의 센서로 구성되어 있고 오일을 사용하는 장비에 직접 설치된다.

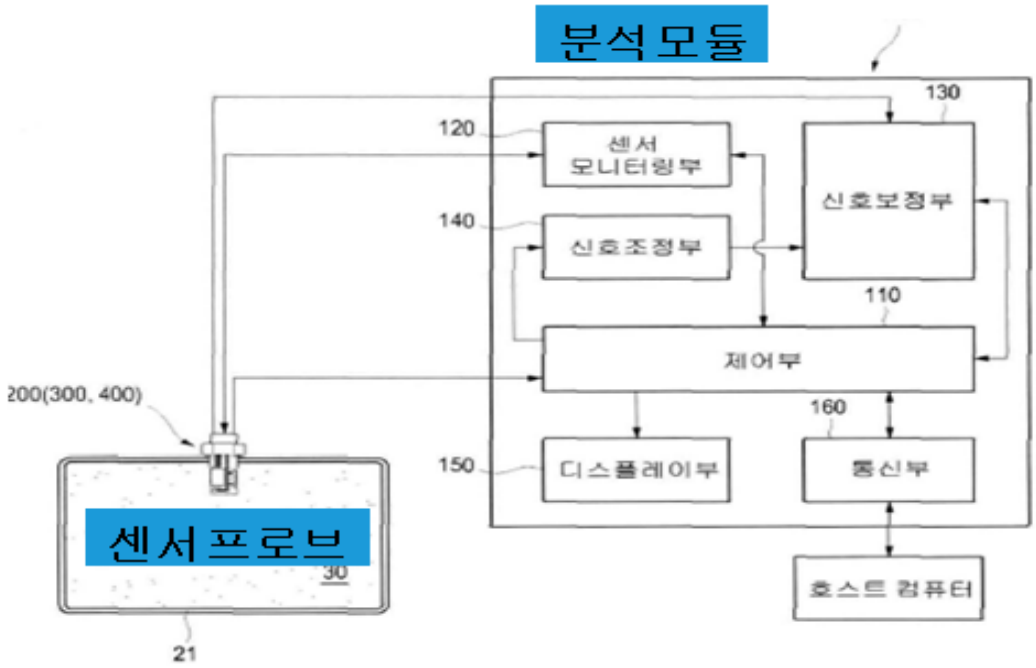



그림 2.6.1 기계상태 진단을 위한 인-라인 오일 모니터링시스템(KIST)

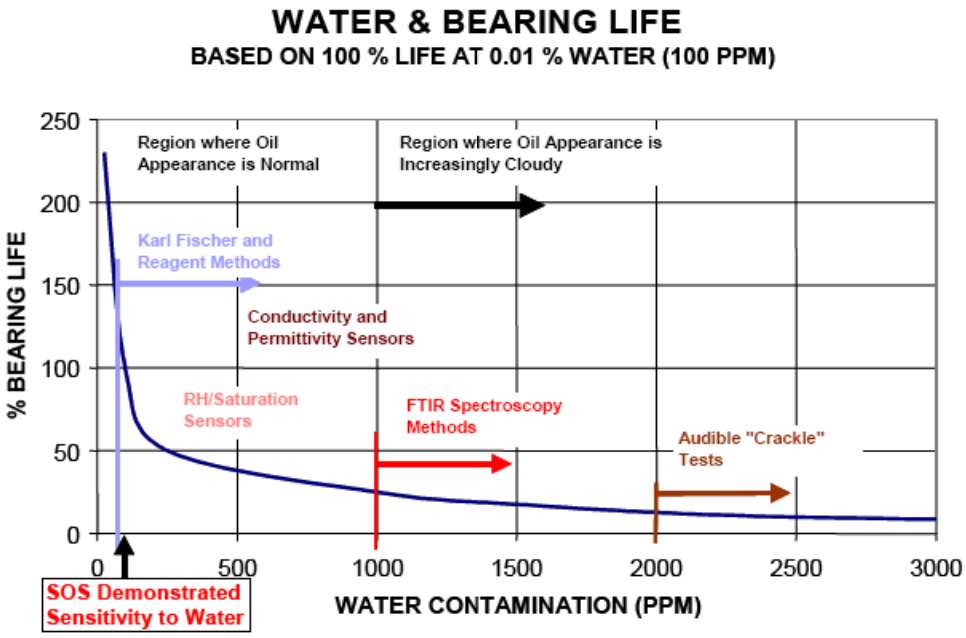



그림 2.6.2 Effect of water contamination on bearing life(Byington et al.)

고속철도 감속기의 경우, 차량의 안전운행을 위해 감속기 오일의 수분 및 철분(마모입자) 함유량을 일정수치 이하로 제한하고 있는데 이는 오일에 수분이 혼합되면 정상상태의 오일에 비해 점도 특성이 바뀌게 되어 기계의 정밀도 감소와 함께 기계요소 구성품을 녹슬게 하는 등 문제를 야기 할 수 있기 때문이다. 기어나 베어링과 같은 기계 요소부품은 정상 사용조건하에서도 재료의 기계적 강도 특성에 영향을 미치는 부식 등이 발생하면 초기 설계 수명보다 짧은 수준에서 파손이 발생할 가능성이 있는데 다음 그림은 수분 함유량이 베어링 수명에 미치는 영향을 나타낸 그림으로 수분 함유량이 베어링 수명에 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다(그림2.6.2).

이와 관련하여 광섬유 센서를 이용한 오일 내 수분량 모니터링 시스템에 대한 연구(충남대)도 일부 수행된바 있다(그림2.6.3)

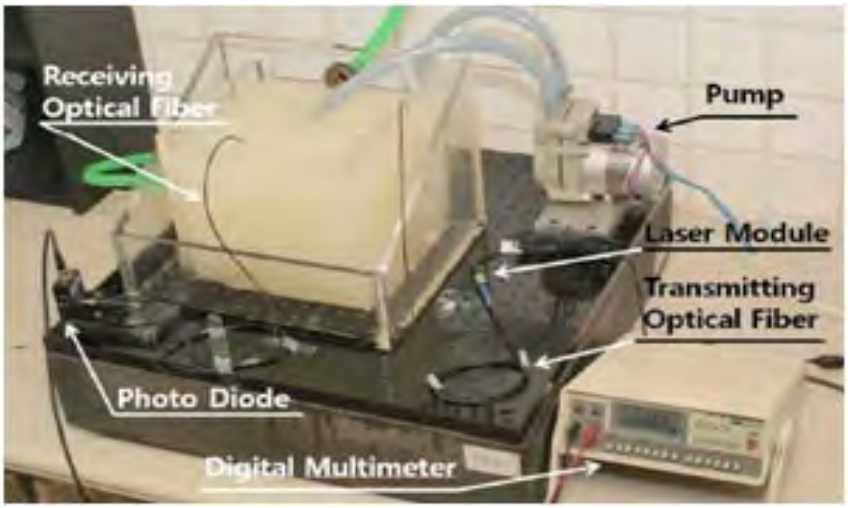



그림 2.6.3 광섬유 센서를 이용한 수분량 측정장치(충남대)

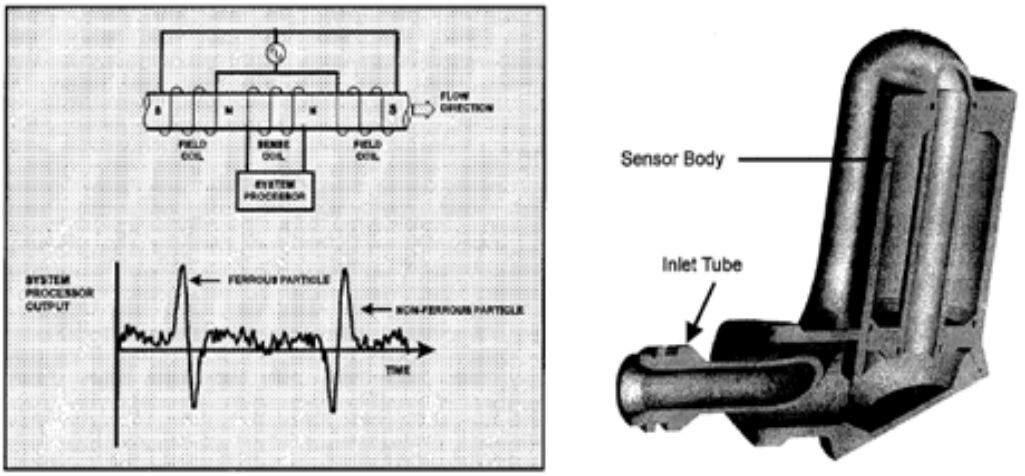



그림 2.6.4 ODM(미국 BFGoogrich Aerospace & 캐나다 GasTOP)

또한, 기어박스 내부에 발생하는 마모입자 모니터링 관련하여 미국 BFGoogrich Aerospace사와 캐나다 GasTOP 사는 군용 헬리콥터(AH-64)의 기어박스에 사용되는 오일에 포함되는 마모물질을 모니터링하기 위한 시스템 연구를 수행하였고 개발된 센서(ODM: Oil Debris Monitor)는 inductive measurement 방식을 사용. 기존의 magnetic chip detector를 대치하여 기어박스에 설치를 위한 별도의 홀 가공이 필요 없고 철금속 뿐만 아니라 비철금속 마모 입자까지도 감지 가능한 장점이 있는 것으로 나타났다(그림2.6.4).

이상에서 살펴본 바와 같이, 현재까지 개발되었거나 개발 중인 윤활유 모니터링 기술은 주로 항공 산업, 풍력발전기, 자동차 산업에 집중되어 있으며 고속철도 감속기 전용 윤활유 열화 감시 시스템의 경우는 전 세계적으로 아직 실제 차량에 상용화 적용된 사례는 없으므로 고속철도 차량의 운용 신뢰성을 높이고 고속철도의 경쟁력 확보를 위해서 감속기 상태 모니터링 관련 기술 개발이 필요하다.

## 2. 윤활유 샘플채취 및 분석

### 가. 고속철도 감속기 윤활유 검수기준

KTX 및 KTX-산천의 감속기 윤활유 검수기준은 고속철도차량은 운영 및 유지보수 주체인 한국철도공사에서 규정한 검수 기준에 따라 시행하고 있다. 고속철도차량의 검수 기준은 표 2.6.1에서 제시하고 있는 것을 따르고 있다.

표 2.6.1에서 보는 바와 같이 감속기윤활유 검수기준은 주행기어검수(RGI) 검수 시 시행토록 되어 있다. RGI 검수는 주행키로 기준 최대 20,000 km와 회기한도 기준 14일로 되어 있다. 현재 KTX 및 KTX-산천 차량이 RGI 검수 주기 동안 운행되고 있는 주행거리는 일반차량인 디젤기관차에 비해 2배가 넘는 상태로 운행 중에 있다. 감속기 윤활유 검수기준은 RGI 검수가 아닌 일반검수(GI)에서도 실시토록 되어있다. 이 경우에는 윤활유에 대한 성분 분석 검사가 아닌 차축감속기/모터감속기의 일반적인 상태검수는 예방유지보수를 시행하기 위해서 실시하는 검수이다. 일반 검수 사항에 대해서는 그림 2.6.5에서 보여주고 있다.

표 2.6.1 KTX 및 KTX-산천 검수 기준

| 검수 종별 | 약 호 | 검수 기준 | | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| | | 주행키로 | 회기한도 | |
| 기본검수 | ES | 5,000km(최대) | - | |
| 실내설비검수 | CE | 20,000km(최대) | 14일 | |
| 주행기어검수 | RGI | 20,000km(최대) | 14일 | |
| 체계검수 | SWT | 50,000~55,000km | - | |
| 계절검수 | S-SWT | 하절기 및 동절기 전과 기간 중 | - | |
| 기타주기검수 | P-SWT | 장치별 주기 도래시 | - | |
| 제한검수 | LI | 150,000~165,000km | 4개월 | |
| 일반검수 | GI | 300,000~330,000km | 8개월 | |
| 전반검수 | FGI | 600,000~660,000km | 16개월 | |
| 부품교환검수 | RBO | 부품조립체 ECO를 위한 교환 시 | - | |
| 부품분해검수 | ECO | 부품조립체 오버홀 도래 시(필요시) | - | |
| 미적대수선 | HLO | 8년 운행 필요시 : KTX<br>8년 운행 전후 : KTX-산천 | - | |
| 반수명대수선 | HLO | 15년 운행 전후(최대 +20%) : KTX<br>15년 운행 전후: KTX-산천 | - | |
| 임시검수 | T | 수시 | - | |
| 특종검수 | R | 수시 | - | |
| 차륜삭정 | WC | 차륜 삭정 시 | - | |

※ 약호에 대한 원어

ES : Examination
CE : Comfort Examination
RGI : Running Gear Inspection
SWT : Systematic Works on Trainset
S-SWT : Season - SWT
P-SWT : Period - SWT
LI : Limited Inspection
GI : General Inspection
FGI : Full General Inspection
RBO : Replace Component Overhaul
ECO : Equipment Component Overhaul
CEO : Comfort aEsthetic Operation
HLO : Half Life Operation

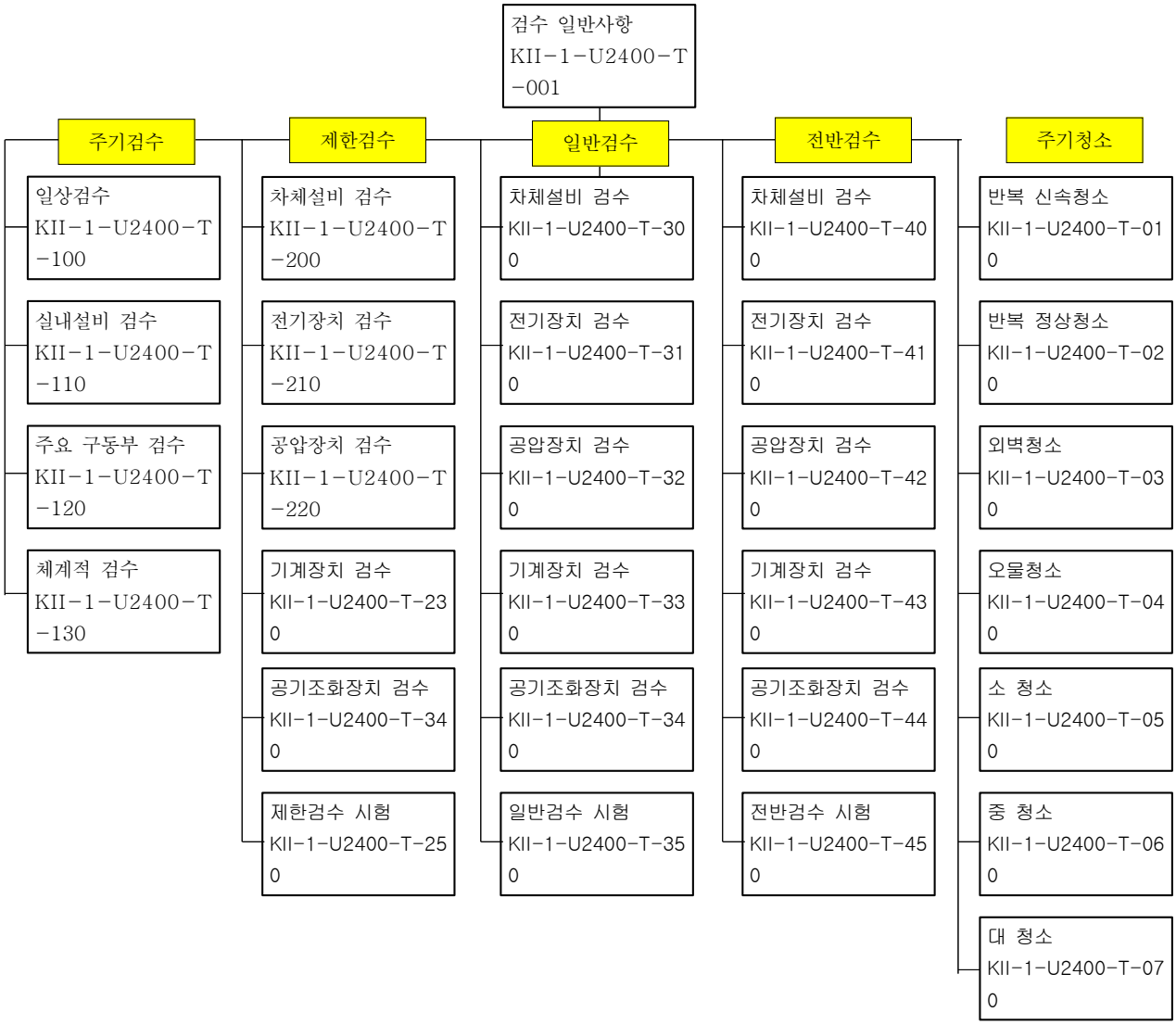



그림 2.6.5 KTX-산천 일반검수 사항 체계도

한국철도공사 기계장치 일반검수(GI) 지침서는 KTX 및 KTX-산천에 대한 예방유지보수를 시행하는 것으로 되어 있다. 차축감속기 및 모터감속기에 대한 GI 검수 항목 가운데 윤활유관련 사항은 다음과 같다.

유량 점검 창을 통하여 유량을 확인하는 것으로 되어 있다. 유량 점검 절차는 그림2.6.6와 같다. 그림 2.6.7에서 보여주고 있는 유량 점검 창을 통하여 유량을 확인하여 최대 오일 레벨에 있는지를 확인해야 한다. 만일 유량이 부족한 경우에는 그림2.6.8에서 보여주는 주유 밸브를 통해 최대 유위까지 보충을 해 주어야 한다.

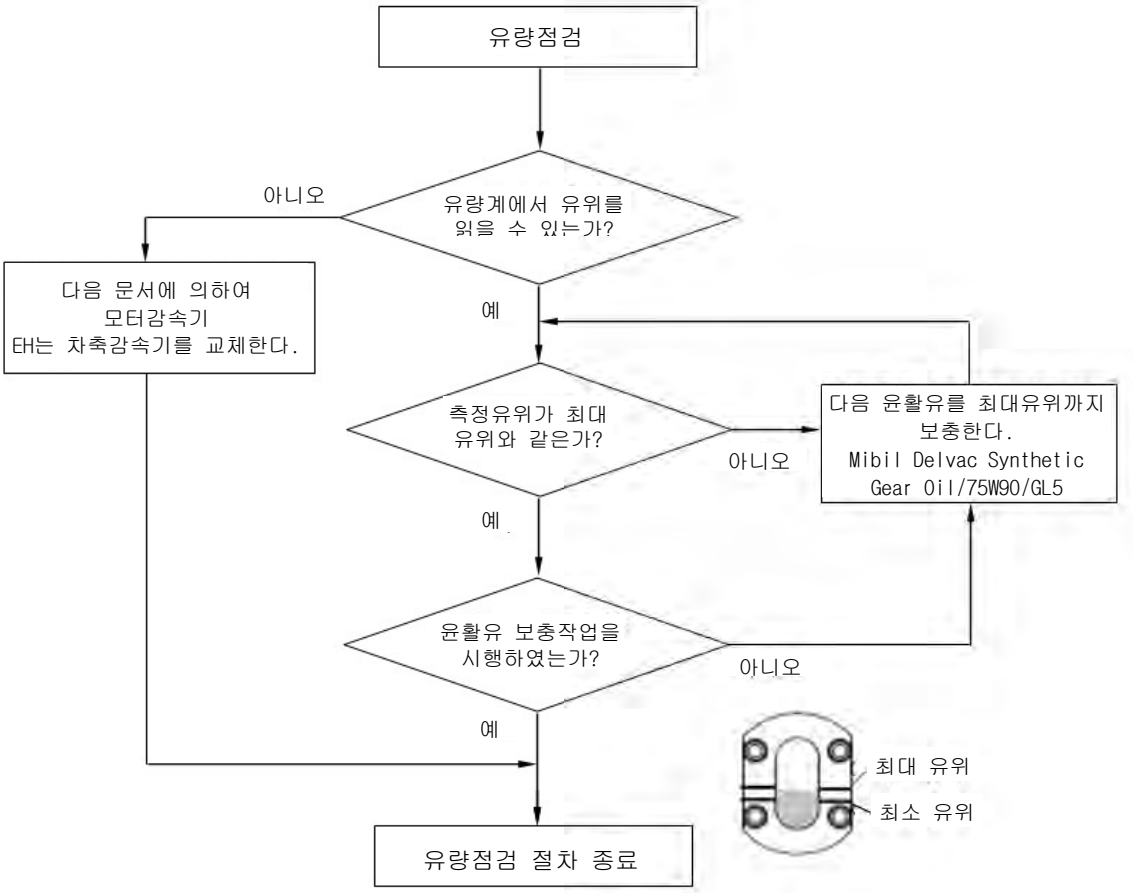



그림 2.6.6 감속기 유량 점검 절차

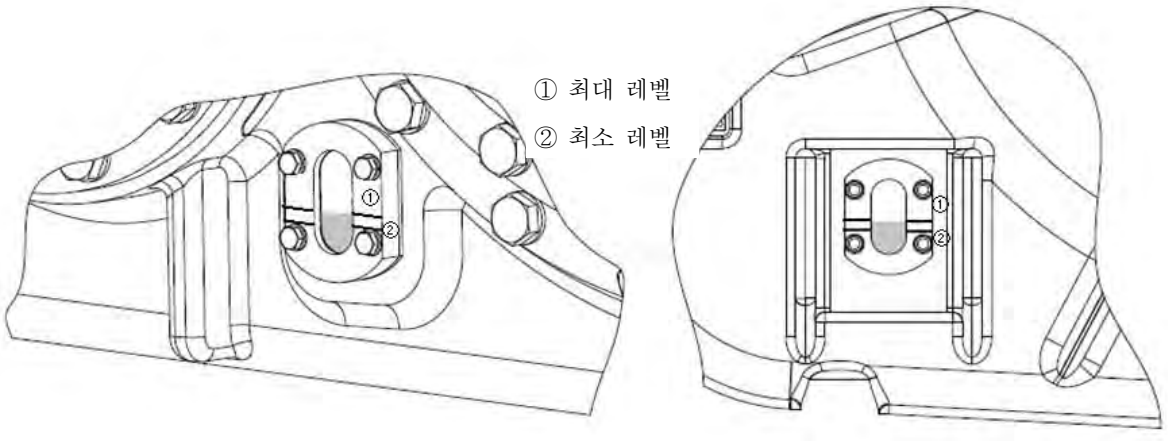
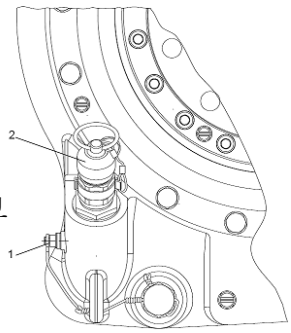



그림 2.6.7 모터감속기(좌측 모터감속기, 우측 차축감속기) 유량 점검창

1 : 주유 플러그
2 : 오일 충진 밸브




1 : 로킹 와이어
2 : 배유 플러그

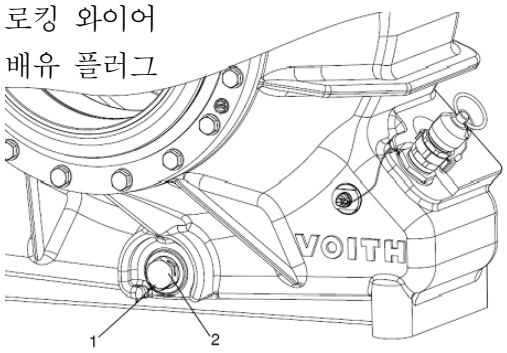



그림 2.6.8 모터감속기(좌측) 및 차축감속기 주유 및 배유 장치

나. 윤활유 샘플채취 및 분석

윤활유의 시료 채취는 매우 중요하다. 채취된 시료가 감속기 윤활유의 전체 상태를 대표할 수 있는 상태에서 채취해야 한다. 감속기 윤활유의 시료 채취 시기는 KTX 열차가 영업 운행을 마치고 차량기지로 입고 한 후 2시간 이내에 실시해야 함을 KTX 차량 계약문서번호 「KHRC-94-01/FP ; Rolling Stock Maintenance Guide Running Gear Inspection」에서 제시해 주고 있다. 시료 채취 위치에 대해서도 동 계약문서에서 감속기 유량을 재는 구멍을 통해 200 mm 정도 아래에서 주사기를 통해 채취토록 되어 있다. 시료 채취 주기는 주행기어검수(RGI) 검수 시행 시 실시토록 되어 있다. RGI 검수는 주행키로 기준 최대 20,000 km이고 회기 주기로는 14일 이내에 실시토록 되어 있다. 현재 KTX 및 KTX-산천 열차의 경우 일반적으로 고장이 없는 경우 회기 주기 보다는 주행키로 기준으로 시료 채취가 되고 있는 상태이다.

시료로 채취된 윤활유는 식별이 가능토록 채취 일자, 차량번호, 감속기번호 및 위치 등을 기록한 깨끗한 시료 용기에 채취한다. 시료 채취 용기 크기는 200 ㎖이다. 감속기 시료 채취 시 윤활유 색깔과 냄새를 통해 먼저 감속기 윤활유 상태를 확인 한 다음 시료를 채취한다. 첫 번째로 윤활유에서 타는 냄새가 나는 경우에는 모터 축(motor axle)과 감속기어장치(reduction gear unit)를 분리하여 감속기를 정밀 검사토록 한다.  두 번째로 윤활유에서 타는 냄새가 없는 경우에는 앞에서 언급한 방식대로 감속기 윤활유 시료를 채취하여 24시간 이내에 분석을 실시해야한다. 그림 2.6.9는 감속기 윤활유 시료 채취 및 분석에 대한 절차를 보여주고 있다.

채취 된 감속기 윤활유 시료는 형광 X선 분석(fluorescent X-ray analysis)를 통해 철(Fe) 함유량을 분석한다. 이 분석기법을 통해 철 함유량에 따라 윤활유를 보충 할 것인가 아니면 윤활유를 교환해야 할 것인가 결정하게 된다. 형광 X선 분석을 통한 시료 속의 철 함유량에 따른 오일 교환 판단 기준은 다음과 같다.

- 감속기어  Fe > 150 ppm
- 모터 축  Fe > 200 ppm

만일 형광 X선 분석상기 기준을 통해 시료 속의 철 함유량이 기준치 이하가 되면 해당 감속기에 윤활유(SHELL 3470)를 보충하여 사용하면 된다. 이와 반대로 윤활유 교환에 해당하는 철 함유량이 있는 것으로 형광 X선 분석 결과가 나오면, 해당 감속기의 윤활유를 전부 배출 한 후 새로운 윤활유로 교체 한 후 시료 채취를 다시 하여 형광 X선 분석 검사를 실시해야 한다. 이 경우에도 철

함유량이 기준치를 초과하게 되면 해당 감속기 장치를 분리하여 정밀 검사를 실시해야 한다. 실제 한국철도공사가 관리하는 철분 함유량 기준은 차량제작사의 추천 매뉴얼인 감속기어 300 ppm이하 모터 축 400 ppm 보다 훨씬 엄격하게 관리하고 있는 실정이다.

두 번째로 감속기 윤활유 시료 분석 중 중요한 것 중의 하나는 수분함유량(water content)이다. 이것은 감속기가 구동됨에 따라 여러 가지 요인으로 감속기 윤활유 속에 축적된 수분의 양을 측정하는 것이다. 이 분석으로 감속기 윤활유 속에 실제 감속기가 구동되는 동안 수분이 얼마나 침투했는가를 알 수 있다. 분석 방법은 시료와 용제를 플라스크 속에 넣고 트랩에 용제를 충분히 넣어서 가열 상태에서 수분이 없어질 때까지 열을 가해 증류를 계속한다. 시료의 최종 수분함유량은 시료 부피에서 트랩 속의 물의 부피를 계산하여 계산한다. 이에 대한 계산식이 아래와 같다.

$$\text{수분}(\%) = \frac{\text{트랩 속의 물의 부피}}{\text{시료의 부피}} \times 100 \quad \text{---------} \quad (2.6.1)$$

KTX 및 KTX-산천의 수분의 함유량 기준은 0.26% 이하로 관리하고 있다. 이 기준도 차량 제작사 계약 문서에 따른 추천 함유량 기준은 1% 미만으로, 실제 한국철도공사에서 관리하는 기준이 매우 엄격함을 알 수 있다.

마지막으로 KTX 및 KTX-산천 감속기 윤활유 추적관리 모니터링 분석 대상 차량은 KTX 2편성 및 KTX-산천 1편성으로 한정하였다. 다만, KTX 차량의 경우 주행기어검수(RGI) 시 마다 감속기 윤활유 상태 검사 및 형광 X선 분석 검사를 실시하고 있으므로 본 과제에서 수행하고자 하는 추적관리 모니터링에 적합성을 가지고 있다. 그러나 KTX-산천의 경우 일반검수(GI) 시기가 도래하는 회기 한도 8개월 또는 주행키로 300,000~330,000 도달 시 감속기 윤활유를 전부 교체하고 있어서 이에 대한 추적관리 모니터링이 적합한 지에 대한 판단이 요구되는 상태이다.

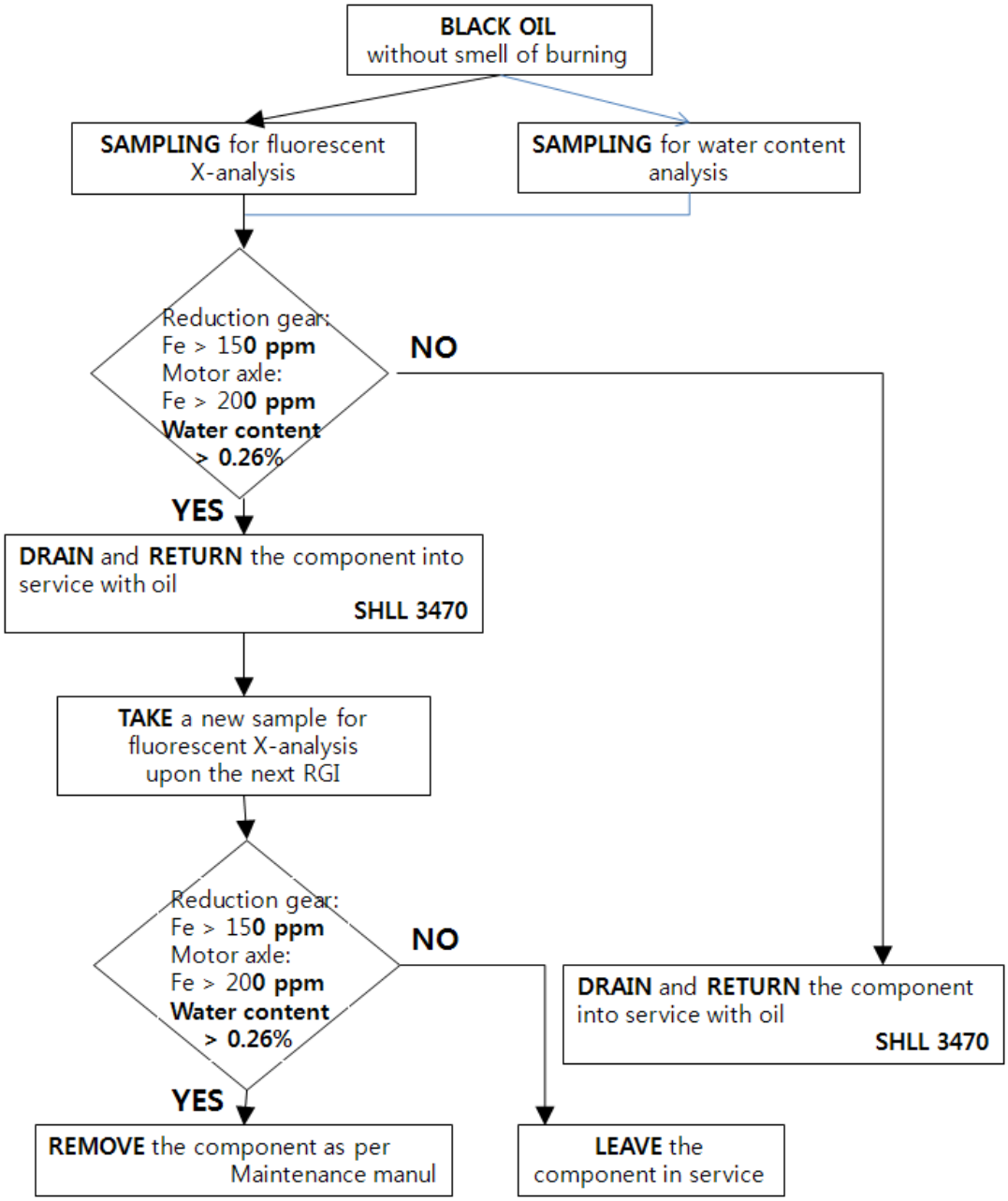



그림 2.6.9 KTX-산천 감속기 윤활유 성분 분석 절차서

## 3. 윤활유 모니터링시스템 기본설계

기계장치 윤활유의 상태를 지속적으로 모니터링 하는 것은 기계장치의 수명 연장 및 장애요소 사전검지뿐만 아니라 안정적 사용에 있어 매우 중요한 사항이다. 고속철도의 경우, 현재 한국철도공사 차량기지 유분석실에서 주기적으로 감속기 윤활유 시료를 채취하여 성분분석을 하고 있으나 주로 금속간의 접촉으로 인해 발생하는 마모성분인 철분함유량을 분석하여 이상상태를 파악하고 있다. 또한 이러한 실험실 분석기법은 분석을 위한 고가의 분석장비가 필요할 뿐만 아니라 분석자체에도 시일이 소요되므로 현장적용이 어렵고 장애의 조기 발견이 불가능하다는 문제가 있어 본 연구에서는 감속기에 열화센서를 취부 하여 실시간으로 윤활유의 이상상태를 모니터링 할 수 있는 시스템 기술을 개발하는 것이 주목적이다.

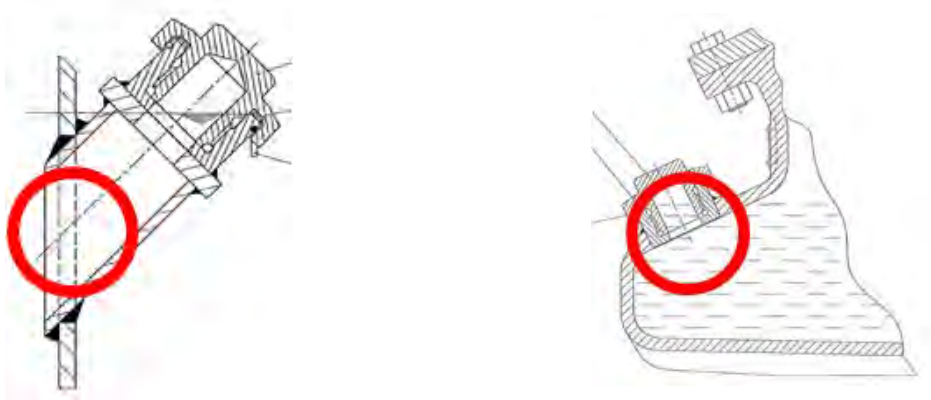
### 가. 센서 취부방법 검토

차축 및 모터감속기(1차 및 2차)의 구조를 검토한 결과 센서 취부를 위해 별도의 취부 공간 확보를 위한 가공 작업을 수행하지 않고 열화센서를 취부하려면 다음 그림 2.6.10과 같이 1, 2차 감속기 주유구가 센서취부 공간으로 적정한 것으로 판단되었다.

▷ 모터 축 1차 감속기 : 주유구가 파이프로 되어 있고, 직경 28 mm, 길이 150 mm 정도로 길어서 폐공간이 될 우려가 있음으로 적어도 깊이 200 mm 안쪽에서 열화를 감지해야 하나 현재 센서가 들어 갈 수 있는 깊이는 33.5 – 77.5 mm에 불과함.

▷ 차륜 축 2차 감속기 : 상용 모델로도 가능하나 취부 시 취부 나사부 변경 필요

현재 사용되고 있는 감속기에 상용으로 시판되고 있는 센서를 취부하기 위해서는 감속기에 별도의 가공이 필요하나 이는 일종의 설계/제작 변경으로 감속기 제작업체와의 기술보증 사항 및 문제 발생 시 책임소재 여부 등 기술적으로 어려운 점이 있기 때문에 감속기 자체에는 별도의 가공 없이 센서를 취부 가능하도록 하여야 한다. 따라서 1차 감속기 및 2차 감속기 모두 주유구에 맞춰 설치할 경우 이에 맞도록 특수 주문 제작 센서와 부착 핏팅 주문 제작이 필요하다.



a) 1차 감속기(M) 주유구　　b) 2차 감속기(A) 주유구

그림 2.6.10 1차, 2차 감속기 센서 취부 공간

나. 열화센서 성능시험 및 최적 선정

(1) 센서 사양 비교 검토

본 연구에서는 열화센서를 개발하는 것이 목적이 아니고 개발된 열화센서를 활용하여 궁극적으로는 고속철도용 감속기 윤활유를 모니터링하는 장치를 개발하는 것이 주목적이므로 현재 시판되고 있는 열화센서의 사양 및 기술에 대해 검토를 하였다(표2.6.2)(그림2.6.11).

표 2.6.2 열화센서 제작사

| 업체 | 본사 | 연락처 | 이메일 주소 |
|---|---|---|---|
| BOSCH | 독일 | +49 7121/35-30903 or 6585 | Automotive. Electronics@de.bosch.com |
| Delphi | USA | (1)248-813.2000 | - |
| HYDAC | 독일 | +49(0)681 7099-0 | electronic@hydac.com |
| Gill SENSORS | 영국 | +44(0) 1590 613 400 | info@gillsensors.co.uk |
| Active Spectrum | 프랑스 | +33(0)561 195 543 | sales@activespectrum.com |
| kittiwake | 영국 | +44(0) 1903 731470 | sales@kitiwake.com |
| ARGO HYTOS | 독일 | +49-7250-76-0 | infode@argo-hytos.com |
| measurement specialties | 프랑스 | +33(0)561 194 543 | fluid.sales@meas-spec.com |
| Internormen | 독일 | +49(0)6205-2094-0 | info@internormen.com |
| Lubrigard | USA | 800-268-2131 | info.sales@lubrigard.com |
| RMF | 네덜란드 | +31(0) 182 30 28 88 | info@rmffilter.com |




그림 2.6.11 열화 센서 종류

(2) 센서 선정기준 및 방법

고속철도용 감속기 열화센서를 선정하기 위한 고려사항은 다음과 같으며 센서의 측정 원리 및 측정항목, 센싱 길이, 무게, 작동압력, 적합한 오일 타입, 센서 적용 사례 및 재질, 전기적 연결, 출력신호 등을 종합적으로 검토 하였다(표 2.6.3).

- 유 열화센서 모니터링 항목 및 측정 원리
- 센서의 진동 및 충격 허용 범위
- 기어오일 사용 온도 및 주변 온도 허용 범위
- 기계적 설치 도면 및 사양
- 센서 적용 사례 : 산업체, 기차, 운송수단 포함
- 열화 Pilot test 결과 값
- 센서측정값과 기존 열화분석 항목사이 상관관계 데이터 및 시험 성적서

표 2.6.3 센서 사양 비교

| 메이커명 | | ARGO -HYTOS | RMF | kittiwake | HYDAC | BOSCH | internormen | DELPHI | measurement | Gill SENSORS | Active Spectrum | Lubrigard |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 측정 원리 (유전율, tan delta) | | 유전율 | 유전율 | tan delta | 유전 상수 | 유전율 | 유전 상수 | 유전 상수 | 유전 상수 | 유전 상수 | 마이크로웨이브공명 | 유전 특성 |
| 측정 항목 | | 온도,유전율, 상대 습도, 전도도 | Oil Quality , 온도 | Oil Quality, 온도 | 상대습도, 유전 상수 변화 ,온도, 점도 | 온도, 유면 , 유전율 | 상대 유전상수,Oil Quality | 점도, 유전 상수 | 밀도, 유전 상수,온도, 점도 | Oil Quality | Oil Quality | Oil Quality |
| 센싱 길이 (mm) | | 77 | 36 | 23 | 51.5 | - | 58 | - | 22.5 | 10.9 | - | 23 |
| 무게 (g) | | - | 160 | 250 | 205 | - | 370 | - | | 85 | - | 160g |
| Max. 작동 압력 (bar) | | 10 | 20 | 10(145)psi | <50bar | - | 25 | 15 | 25 | - | 100 | 10(150PSI) |
| 점도 범위 (cst) | 최저 | 1000 | 500 | 0 | 1 | 3 | 5 | 55 | 0 | - | - | - |
| | 최대 | 0 | 0 | 1000 | 1000 | 300 | 1000 | | 1003.9 | - | - | - |
| 진동 범위 (Grms) | 최저 | 100 | 0 | 0 | - | - | - | - | 0 | 0 | - | - |
| | 최대 | 0 | 50G | 50G | - | - | - | - | 20G | 15G | - | - |
| 적합한 오일 타입 | | 광유,합성기유,에스테르유체, 기어오일,기어박스 | 합성 오일, 광유, 합성기유 | 인산 에스테르 (점도 500cST 이상) ,광유, 합성유 | ESTER,HEES, HETG | 엔진 오일 | 유압및 윤활유 시스템 | 디젤 엔진 | 엔진오일,브레이크 , 유압 및 기어 오일 | 엔진오일, 트랜스 미션 오일장치 & 디젤, 중유 | - | 엔진오일 , 유압유, 기어박스 오일, 트랜스미션 , 압축기유 |
| 유체 작동온도 | 최저 | -20 | -20 | 30 | -25 | -40 | -40 | - | -40 | - | - | - |
| | 최대 | 100 | 120 | 100 | 100 | 150 | 130 | - | 150 | - | - | |
| 주변 사용 조건 | 온도(최저, 최대) ℃ | -20 80 | 0 120 | -25 85 | -25 80 | - | 0 70 | - | -40 150 | -40 125 | - | -10 110 |
| | 습도(최저, 최대) %RH | 0 95 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 저장 조건 | 온도(최저, 최대) ℃ | -20 80 | - | - | - | - | - | - | -50 150 | - | - | - |
| | 습도(최저, 최대) %RH | 0 95 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 전원 공급(VDC) | | 9...33 | 9...30 | 15...30 | 10....36 | 9V to 16V | 24 | 7...15 or 16...34 | 9...36 | 6...24 | 12...35 | 9...30 |
| Protection class | | IP67 | IP67 | IP67 | IP67 | | IP67 | - | - | IP68 | - | |
| 소비 전류(mA) | | <0,2 typ; <0,3Max | - | - | - | - | 100 | - | - | <10 | - | 10 |
| 출력신호 | Current outputs(mA) | 4...20 | 4...20 | 4...20 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 인터페이스 | RS232/CAN | CAN/RS232 | CAN/RS232 | - | BSS,PWM | USB | PMW,CAN SAE-J1939 | - | RS232 | - | - |
| | 광신호 처리 | RGB-LED | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 나사 연결 | | G 3/4 | Mechanial con1/2" BSPThread | 1/2" BSP male thread | 기계적 연결 G 3/4 DIN 3852 E | | - | - | - | - | - | 1/2" BSP |
| 전기적 연결 8 폴로 커넥터 | | M12×1 | - | - | M12×1, 5 pole | - | - | - | - | - | - | - |
| 측정범위 | 상대 유전율 (최저, 최대) | 1 7 | - | - | *기타 측정 항목 정확도 : ±3% FS max 유량속도 : 5m/S 캘리브레이션 정확도 : ±2% FS max 압력 저항 : <600bar | - | - | - | - | - | - | - |
| | 습도(최저, 최대) %RH | 0 100 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| | 전도도(최저, 최대) pS/m | 100 800000 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| | 온도(최저, 최대) ℃ | -20 120 | -20 120 | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| 측정 분해능 | 상대 유전율 | 1*10-4 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| | 상대 습도(%) | 0,1 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| | 전도도(ps/m) | 1 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| | 온도(K) | 0,1 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| 측정오차 | 상대 유전율 | ±0 , 015 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| | 상대 습도(%) | ±3 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| | 전도도(ps/m) | Typ<10 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| | 온도(℃) | ±2 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| 센서 적용 사례 | | 기어박스,트레인 | 열차에 적용된 예는 없음 적용된 사례 (풍력에너지,산업체 기어박스) | 기어박스, 터빈, 베어링, 펌프, 압축기 기차에 적용된 예는 없음 | - | - | - | - | 고속 차량, 압축기, 산업 장비, 터빈 | - | 산업 공정 | 유압,압력 터빈, 기어박스를 포함한 산업체, |
| 재질 | | Aluminum,HNBR,Epoxy | Stainless Steel AISI304 | 304 Staomless Steel | Stainless steel | - | Aluminum | - | - | - | - | 316 Stainless Steel |

(3) 사양 최적합 센서 2종 선정

앞서 기술한바와 같이 윤활유 열화정도를 측정하는 센서는 다양한 성능 및 형태의 제품으로 현재 시판되고 있다. 그러나 이들 센서들이 감속기 윤활유 모니터링을 위한 전용 센서로 개발된 것이 아니므로 본 연구에서 추구하는 목적에 맞는 센서를 선정하기 위해 현재 시판되고 있는 여러 센서의 사양을 종합적으로 비교 검토하여 Kittiwake(KT) 및 Argo-Hytos(AH) 센서 2종을 선정하였다. 다음은 고속철도 감속기 윤활유 모니터링의 적합성 여부를 판단하기 위한 열화 센서 선정기준이다(표2.6.4).

기어유 열화 감지 시스템 사용 조건에 부합하는 선정기준에 의거 검토한 결과 최종 제품 2종을 다음과 같이 결정하였다(표2.6.5).

▷ Kittiwake(KT): Oil Condition Sensor : tan delta (일정한 주파수의 교류의 전기장을 걸어 에너지 손실분의 비손실분에 대한 비율)를 측정하여 Oil Quality 값 (0 - 100)으로 오일의 열화도를 지시하고, 동시에 온도 데이터도 측정함.

▷ Argo-Hytos(AH): Lubcos H2Oplus II : 오일 온도와 함께 상대 유전률(Relative Permittivity), 전기 전도도(Conductivity), 상대습도(Relative Humidity)를 측정하고 이들 파라미터가 온도에 따라 변하므로 표준온도 값으로 나타내고, 이를 이용하여 RUL(유 잔존수명)값도 표시한다.

표 2.6.4 열화 센서 평가 기준

| | 센서 선정 기준 |
|---|---|
| 1 | 측정 원리 : 유전 상수 측정보다 유전율, tan delta가 반응속도가 빠름 |
| 2 | 측정 항목 : (Oil Quality : +5, 기타 +1) |
| 3 | 진동 충격에 견딜 수 있는 것 |
| 4 | 유체 온도 범위가 넓은 것 (55 - 70℃) |
| 5 | 주변 온도 범위가 넓은 것 (-20 - 70℃) |
| 6 | 기계적 설치 : 나사부 M42×2 (주문 제작 예정) |
| 7 | 점도 측정 범위 넓은 것 (기어 점도 기준 : 220cSt@40℃ ± 20% 허용 조건) |
| 8 | 길이 200mm 이상 (주유구를 이용 할 경우 깊이 200 mm이상 직경 28 mm 이내로 들어 갈 수 있는 특수 센서로 주문 제작 예정) |
| 9 | 기어 오일 적용 가능성 |
| 10 | 기술 자료 협조 업체(+10점 가산점) |

표 2.6.5 열화 센서 성능 비교

| 비교항목 (기준) | ARGO -HYTOS | | RMF | | kittiwake | | HYDAC | | BOSCH | | internormen | | DELPHI | | measurement | | Gill SENSORS | | Active Spectrum | | Lubrigard | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 | 사양 | 점수 |
| 측정원리 (유전율, tan delta) | 유전율 | 10 | 유전율 | 10 | tan delta | 10 | 유전상수 | 5 | 유전율 | 10 | 유전상수 | 5 | 유전 상수 | 5 | 유전상수 | 5 | 유전상수 | 5 | 마이크로 웨이브 공명 | 3 | 유전특성 | 5 |
| 측정 항목 | 온도,유전율, 상대습도, 전도도 | 4 | Oil Quality, 온도 | 6 | Oil Quality, 온도 | 6 | 상대습도, 상대유전 상수, 온도, 점도 | 4 | 온도,유면, 유전율 | 3 | 상대 유전 상수, Oil Quality | 6 | 점도, 유전상수 | 2 | 밀도, 유전상수 ,온도, 점도 | 4 | Oil Quality | 5 | Oil Quality | 5 | Oil Quality | 5 |
| 진동(G) | -0~100G | 10 | 50G | 10 | 50G | 10 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | 20G | 5 | 15G | 5 | - | 0 | - | 0 |
| 유체 온도 범위(℃) (55~70℃) | -20~100 | 10 | -20~120 | 10 | 30~100 | 10 | -25~100 | 10 | -40~150 | 10 | -40~130 | 10 | - | 0 | -40~150 | 10 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 주변 온도 범위 (-20~70℃) | -20~80 | 10 | 0~120 | 10 | -25~85 | 10 | -25~80 | 10 | - | 0 | 0~70 | 5 | - | 0 | -40~150 | 10 | -40~125 | 10 | - | 0 | -10~110 | 10 |
| 기계적 설치 (주문제작 예정) | G/3/4 | 0 | 1/2" BSP | 0 | 1/2" BSP | 0 | G 3/4 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 점도 측정 범위(cSt) 200cST@ 40℃±50%) | 0~1000 | 10 | - | | 0~1000 | 10 | 1~1000 | 10 | 3~300 | 10 | 5~1000 | 10 | 15~55 | 0 | 0~1003.9 | 10 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 센싱 길이 (mm) (200mm이상,직경 28mm이내) | 77 | 0 | 36 | 0 | 23 | 0 | 51.5 | 0 | - | 0 | 58 | 0 | - | 0 | 22.5 | 0 | 10.9 | 0 | - | 0 | 23 | 0 |
| 기어오일 적용 가능성 | 광유, 합성기유, 에스테르, 기어오일 | 10 | 합성오일, 광유, 합성기유 | 0 | 인산에스테르, 광유, 합성유 | 10 | ESTER, HEES, HETG | 0 | 엔진 오일 | 0 | 유압및 윤활유 시스템 | 0 | 디젤 엔진 | 0 | 엔진오일, 브레이크 유압 및 기어오일 | 10 | 엔진 오일, 트랜스 미션오일, 디젤, 중유 | 10 | - | 0 | 엔진오일 유압유, 기어박스 트랜스미션, 압축기류 | 10 |
| 기술자료 | ○ | 10 | ○ | 10 | ○ | 10 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 합계 | 74 | | 56 | | 76 | | 39 | | 33 | | 36 | | 7 | | 54 | | 35 | | 8 | | 30 | |

(4) 센서 성능시험 및 최적 센서 선정

(가) 열화센서 성능 비교 시험

사양서 검토에서 적합한 것으로 선정된 2종의 센서를 실험실에서 직접 성능 평가를 하였다. 성능 실험은 실험실에서 비커에 1,000 cc의 신유를 넣고, 온도실험, 수분실험, 철분실험, 산화실험을 실시하고 각 센서의 결과 값을 비교하여 성능의 양부를 판정하여 최적 센서를 선정하고자 하였다.

▷ KTX 감속기유 운전 조건
- 운전 유온 : 55 ~ 70℃
- 외기 온도 : −10 ~ 50℃
- 기어 윤활유 사양: Shell Engrenage 3470. ISO VG 220,
- 동점도 : 233cSt@40℃, 20.7cSt@100℃
- 비중 15/4℃ : 0.885,
- 점도 지수 : 106
- 유동점 : −18℃
- 인화점 : 296℃,
- 산가 : 0.3mgKOH/g
- FZG : > 12 stage

▷ 센서 최종 선정은 사양서 비교 검토 후 선정된 2종의 센서를 실험실에서 성능을 비교 실험한 후 오일 열화도와 상관성 계수*가 0.6 이상인 센서로 최종 선정.

▷ 성능실험 항목은 온도(점도), 철분, 수분, 산화실험이고 실험 장치는 다음과 같이 설치하였다. [1)]

▷ 실험방법 :
- 1,300 ml 비커에 1,000 ml의 신유를 넣고 각 2개의 센서, 총 4개의 센서를 비커 커버에 결합하여 유중에 센싱부가 잠기도록 넣는다
- 비커 내에 마그네틱 교반자를 넣고, 열판 위에서 실험에 필요한 소정의 온도로 가열한다.
- 유중의 온도를 Feedback 하여 가열 온도를 제어하고 판넬에 유온을 표시한다(그림 2.6.12)

1) * 상관성 계수 $R^2$: 센서 성능을 비교하기 위한 온도(점도). 수분, 철분 실험에서 오염물 투입량과 실제 센서 값 사이의 측정량의 상관성은 투입량을 xi, 측정량을 yi로 할 때, 이의 상관성 회귀곡선의 각 xm, ym 값 사이의 상관관계를 상관계수 $R^2$으로 나타낸 것이다.

$R^2 = \Sigma(xm-xi)(ym-yi)/\sqrt{(\Sigma(xm-xi)^2*\Sigma(ym-yi)^2)}$



a) 실험 비이커 및 센서 조립체



b) 데이터 수집 컴퓨터 및 배선

그림 2.6.12 실험 장비

(나) 윤활유 성능실험 결과

① 온도 (점도) 실험 :

온도를 45~75℃까지 가열하면서 5℃ 단위로 유전율과 전도도, OQ(Oil Quality)값을 측정하여 상관성을 비교하였다. Kittiwake Sensors(KT)의 경우, 60℃에서 0점을 교정하여 온도 변화의 영향이 감소되도록 하였으며 OQ는 온도와 2차 다항식의 상관성이 있으며, 상관성 계수는 0.838이다. Argo- Hytos Sensors(AH)는 유전률이 온도(점도)와 2차 다항식의 상관성이 있으며 상관성 계수는 0.998이다(그림2.6.13)

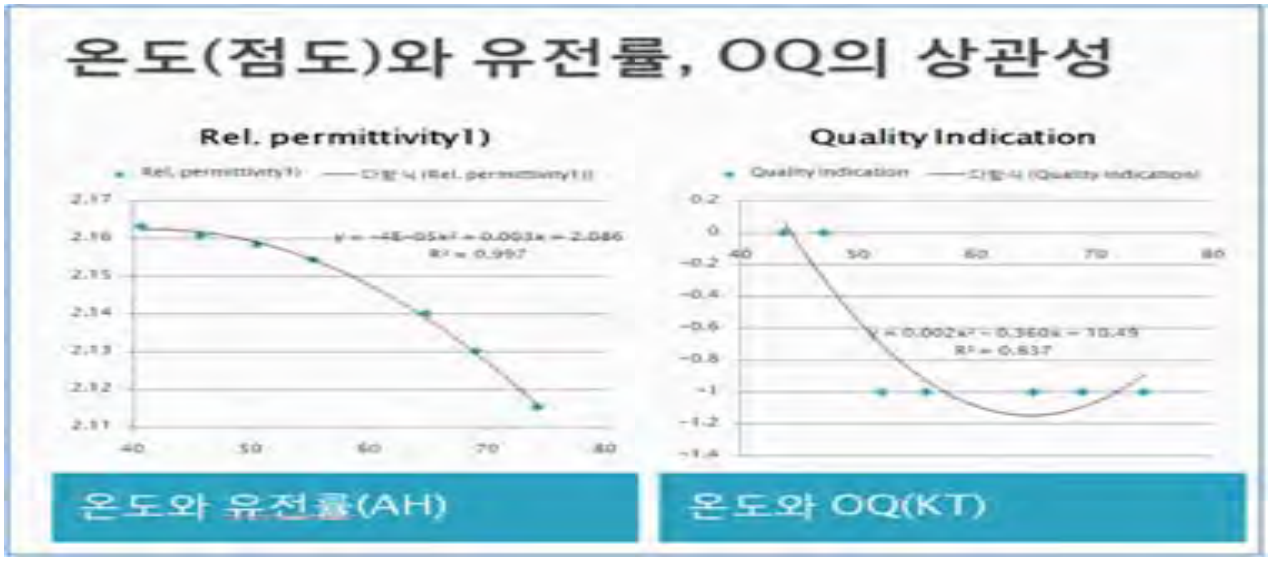



그림 2.6.13 온도(점도)와 유전률, OQ의 상관성

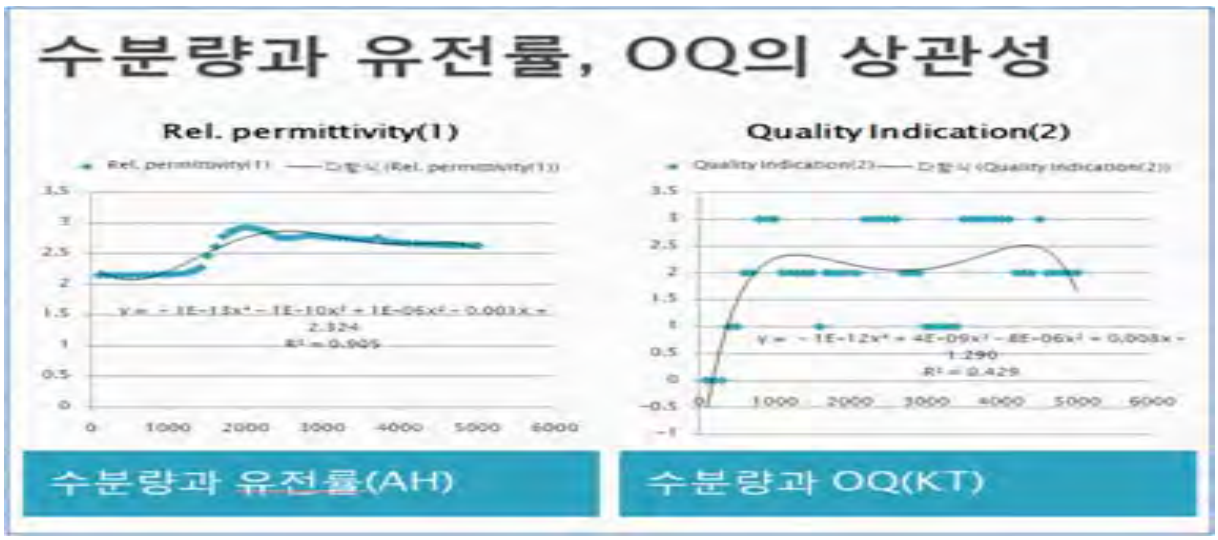



그림 2.6.14 수분량과 유전률, OQ의 상관성

② 수분 실험 :

오일 온도를 60℃로 유지하면서 수분을 1분~1분 30초 간격으로 50 ppm씩 1,000 ppm 까지 증가시키면서 센서 값을 측정하여 실험 하였다. KT1, KT2 센서는 0 ~ 3의 OQ를 나타냈는데 5차 다항식의 상관성을 보이며, 상관성 계수는 0.43이다. AH1, AH2 센서는 수분이 1300~1400 ppm, 상대습도 97.1%~100%에서 유전률 (2.16)이 상승하였고 수분 2000 ppm 이후에는 2.5 ~ 2.9로 상승하여 비교적 일정한 값 유지하였다. 절대 수분량과는 6차 다항식의 상관성을 보이며 상관성 계수는 0.90이다(그림2.6.14)

③ 산화실험 :

오일 온도를 125℃로 유지하면서 철분을 1,000 ppm 혼입시켜 산화실험을 계속하면서, 1~3일 간격으로 샘플링하여 유 분석으로 산가, 점도, MPC, Ruler를 측정하면서, 60℃에서의 센서의 측정값과 비교 하였다. KH1, KH2 센서는 OQ값이 0~73까지 변하면서 유의 산가와는 1차식의 관계가 있으며 상관성 계수는 0.576이다. AH1, AH2 센서는 유전률이 2.1592~2.1894로 변하면서 산가와는 1차식의 관계가 있으며 상관성 계수는 0.865이다(그림 2.6.15).

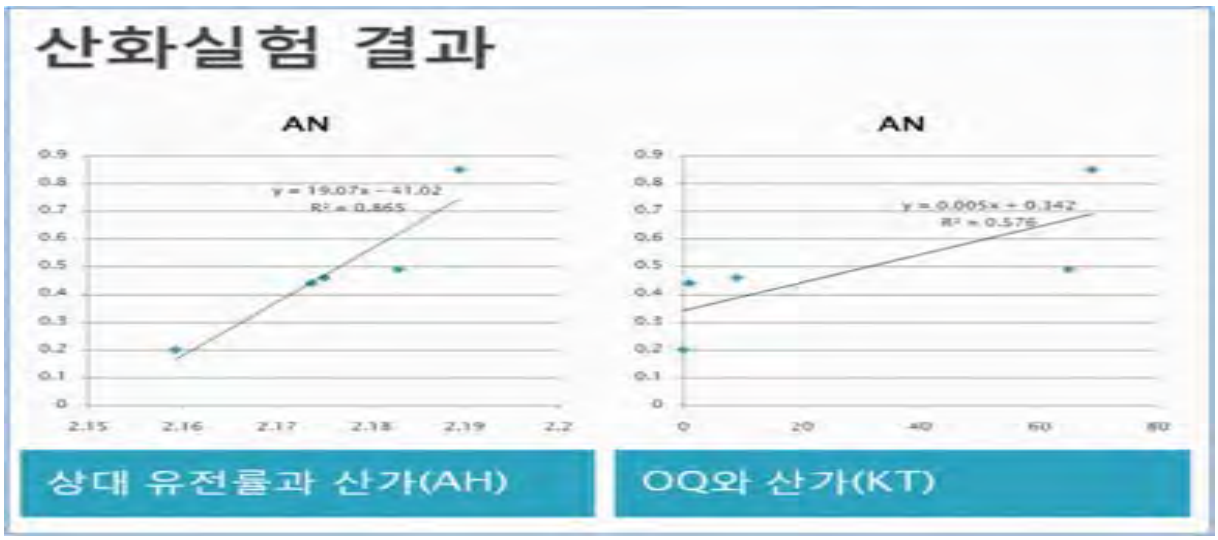



그림 2.6.15 산화시험결과

(다) 최적 열화센서 선정

Kittiwake 센서 및 Argo- Hytos 센서, 각각 2개씩을 동시에 동일한 비커에 담긴 윤활유시료에 투입하여, 온도(점도), 철분, 수분, 산화 실험을 한 결과, 각 시험에서 우수한 상관성을 보인 아르고 하이토스(AH) 센서의 Lubcos H2O+II 센서를 최종 선정 하였다(표 2.6.6)

표 2.6.6 최종 센서 선정을 위한 상관성 계수 결과값

| 센서 종류 | 온도 | 수분 | 철분 | 산화 |
|---|---|---|---|---|
| KT OQ | 0.83 | 0.43 | 0.54 | 0.576 |
| AH 유전률 | 0.99 | 0.90 | 0.97 | 0.865 |

* AH 센서는 유전률 외에도 온도, 상대습도, 전도도 값을 별도 파라미터로 측정하고, 온도 변화에 의한 영향을 상쇄하기 위해, 표준 온도로 환산하여 유전률, 상대습도, 전기 전도도 값을 제공하고 이를 이용하여 RUL값을 산출하여 제공한다.

(라) 선정 센서의 기술 사양

선정 센서의 주요 특징은 다음과 같고 자세한 사양은 일반적 기술 사양은 표 2.6.7과 같다.

- 측정 원리 : 유전률
- 측정 항목 : 온도, 상대 유전률 , 상대 습도, 전도도
- 센싱 길이 : 77 mm
- 최대 운전 압력 : 10bar
- 점도 범위 : 0~1000 cSt
- 유체 작동 온도 : -20~100 ℃
- 출력 신호 : 4...20 mA
- Protection class : IP67
- 인터페이스 : RS232/CAN
- 나사연결 : G 3/4

표 2.6.7 센서 사양표

| 센서 데이터 | 크기 | 단위 |
|---|---|---|
| 최대 운전 압력 | 10 | bar |
| 유체의 운전온도 범위[1] | −20 .... 100[2] | ℃ |
| 운전 환경 조건:<br>1) 온도<br>2) 습도 | <br>−20 .. 80<br>0 ... 95 | <br>℃<br>% RH |
| 저장 환경 조건:<br>1) 온도<br>2) 습도 | <br>−20 .. 80<br>0 ... 95 | <br>℃<br>% RH |
| 유압 유체 | HLP, HLPD, HVLP(DIN51524), HETG(트리글리세리드), HEES(합성 에스테르계), HEPR(PAO계) (DIN ISO 15380) | |
| 습도 센서 물질 | 얄루미늄, HNBR, 에폭시 수지 | |
| 공급 전압[3] | 9 ... 33 | V |
| 전력 소비 | 전형적으로 <0.2, 최대 <0.3 | A |
| 출력<br>전류 출력(2X)[4]<br>인터페이스<br>시각적 표시[9] | <br>4 ... 20<br>RS232/CAN<br>RGB−LED | <br>mA |
| 연결구 칫수<br>나사연결<br>전기적 8핀 커넥터 연결 | <br>G 3/4<br>M12 X 1 | |
| 측정 범위<br>상대 유전률<br>상대 습도<br>전기 전도도<br>온도 | <br>1 ... 7<br>0 ... 100<br>100 ... 800,000<br>−20 ... 120 | <br>−<br>%<br>pS/m<br>℃ |
| 측정 분해능<br>상대 유전률<br>상대 습도<br>전기 전도도<br>온도 | <br>0.0001<br>0.1<br>1<br>0.1 | <br>−<br>%RH<br>pS/m<br>K |
| 측정 정확도[7]<br>상대 유전률[5]<br>상대 습도[8]<br>전기 전도도<br>온도[8] | <br>±0.015<br>±3<br>전형적으로 <10<br>±2 | <br>−<br>%FS[6]<br>%<br>%FS[6] |

(주) 1)영구적, 2) 잠간 동안 120℃ 3) 전압 <8V 및 >36V에서 스위치 오프 4) 외부에서 공급되는 >50V펄스들에 대해서는 부하덤프 보호 5) 노르말 펜탄 25℃에서 교정 6) 전 범위의 스케일 7) 공장 교정 8) 공기 25℃에서 교정 9) 현재는 구현되지 않음

다. 윤활유 상태 모니터링 시스템 기본설계

(1) H/W 설계

하드웨어는 1, 2차 감속기의 윤활유 열화상태를 감지하는 센서부 및 데이터 수집장치로 구성되어 있으며 기본 설계개념은 다음과 같다(그림 2.6.16).

(가) 기계적 센서 취부

1차 감속기 주유구가 파이프로 되어 있어서 사용센서의 현재 길이 77 mm를 주유구 파이프 길이 150 mm보다 긴 200 mm로 연장하여 주문 제작하여야 하는데 다음 그림은 1차 감속기 주유구에 맞도록 주문 제작 할 Argo – Hytos 열화 센서의 도면을 나타낸다(그림 2.6.17, 그림 2.6.18)

2차 감속기의 경우는 현재 센서로도 사용 가능하나 주유구에 취부 가능하도록 특수 고정장치가 필요하다. 다음 그림은 Argo-Hytos 열화센서를 주유구에 취부 되도록 주유구 Cover를 개조하고 취부나사가 이완되지 않도록 고정하는 특수 와셔이다.




그림 2.6.16 하드웨어 기본 연결 배치

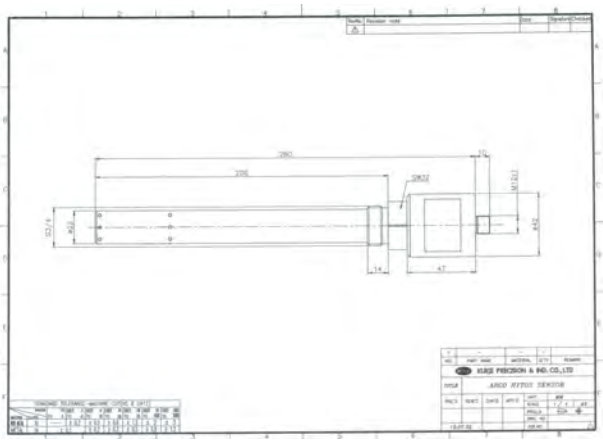


그림 2.6.17 Argo-Hytos 센서 개조

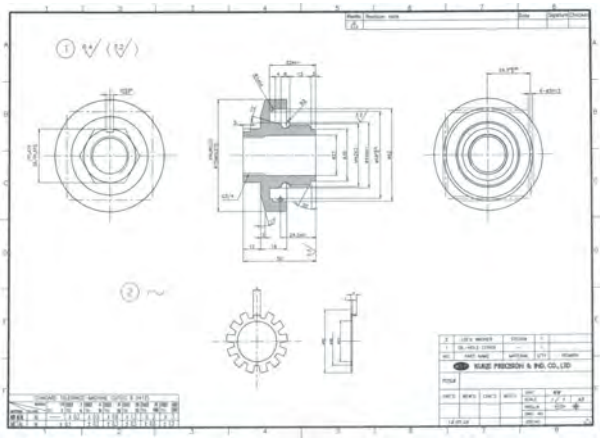


그림 2.6.18 주유구 개조 및 특수 와셔

(나) 센서의 전기 결선

센서의 전기적 연결은 그림 2.6.19와 같은 센서 케이블 단자에 M12 X 1의 8핀 커넥터로 연결되어 전력 공급과 신호 출력한다.

현재 KTM의 클라이언트 컴퓨터의 센서 신호 접속구가 아날로그 신호 1 채널만 수령하므로 6번과 8번 사이에 전류계 대신 클라이언트 컴퓨터의 전류 입력 단자를 연결하여 출력전류를 송신하는 것으로 한다(그림 2.6.20). 공급전압에 따른 부하저항 선정표(표 2.6.8)에 따라 클라이언트 컴퓨터에서 공급되는 전원의 공급전압이 10 V이므로 클라이언트 컴퓨터 전류 입력단자에 50ohm의 부하저항을 사용한다.

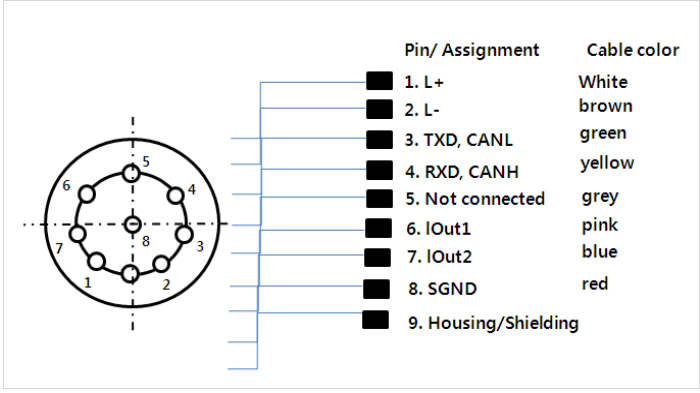



그림 2.6.19 센서 전기 결선

표 2.6.8 공급전압의 함수로서 부하저항을 결정하기

| $R_{max}$ [Ω] | $U_{supply}$ [V] |
|---|---|
| 25 | 9 |
| 50 | 10 |
| 100 | 12 |
| 150 | 14 |
| 200 | 16 |

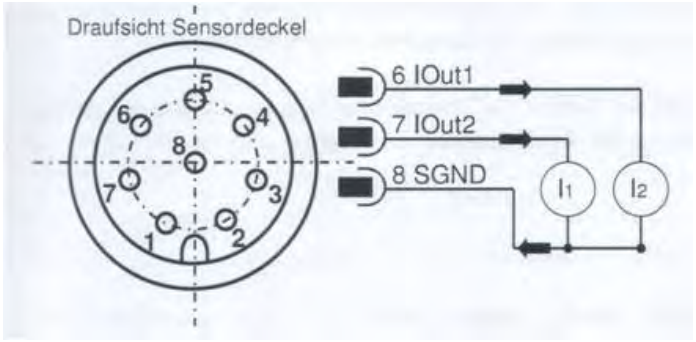



그림 2.6.20 아날로그 출력 전류 결선도

(다) 철도 대차 설치 전장품 진동 저항성 요구조건 검토 (KSC IEC 61373 및 KSC IEC 60077-1)

① 차량의 모든 기기는 정상 주행 중에 발생하는 진동과 충격이 가해져도 성능의 저하나 손상 없이 운용될 수 있도록 설계되어야 한다.
② 차량의 모든 기기는 KSC IEC 60077-1 및 KSC IEC 61373에 따라 진동 및 충격시험을 거쳐 성능을 입증해야 한다.
③ 전장품의 진동한계는 KSC IEC 60077-1 규격에 따르며, 차체나 대차, 또는 차축에 취부되는 구성품은 다음과 같은 진동 시험에 견뎌야 한다(표 2.6.9)

표 2.6.9 진동 시험조건

| 구분 (Peak to Peak) | 차체 | 대차 | 차축 |
|---|---|---|---|
| 기준 f: 5 ~ 500Hz | 0.4g | 4.0g | 10.0g |
| 센서사양 f: 9 ~ 200Hz | | | 10.0g |

④ 차체나 대차 또는 차축에 취부 되는 구성품은 취부점에 작용하는 다음과 같은 충격에 성능 악화 없이 충분히 견뎌야 하며 판정기준은 사용재질의 인장강도로 한다(표 2.6.10).

표 2.6.10 충격 시험조건

| 충격 피크 g | 차체 | 대차 | 차축 |
|---|---|---|---|
| 수직 | 2 | 20 | 50 |
| 좌우 | 2 | 10 | 20 |
| 전후 | 3 | 5 | 10 |

⑤ 차체의 고유진동수를 철도안전법에 의거, 시험 평가하고, 차량의 각부에 취부된 장비와 보조기기, 차체, 대차, 바닥, 내벽, 판넬, 의자 등 객실의 안락함에 영향을 미치는 이상진동 및 공진현상을 일으키지 않아야 하며, 이를 위해 대차와 차체의 고유진동 주파수는 다르게 분포되어야 한다.

(2) S/W 설계

(가) S/W 기본 설계

열화도 센서에 의해 검출되는 신호를 모니터링 하여 감속기 유를 관리하기 위한 한계치 관리 Rule은 다음과 같이 하고자 한다.

오일의 열화 정도를 센서 값으로 경향 관리할 수 있도록 센서로 신유 기준선을 측정한 후 이를 기준으로 관리 한계치를 설정하여 경향 관리하면서 한계치 초과 시 경보를 발령하고, 주의 한계 초과 시 유 분석으로 원인을 확인하고 필요한 조치를 취하여 원인을 제거하며, 위험 한계치 초과 시 갱유 및 분해 수리한다.

사용유 분석값 일반 관리 기준: ▷ 산가 : 주의치 (신유 산가 + 0.5)
위험치 (신유 산가 + 1.0)
▷ 점도 : 주의치 (신유 점도 ± 5%)
위험치 (신유 점도 ± 10%)

주의: ① 본 열화센서에 의한 감속기 유 상태 모니터링은 기존의 오프라인 XRF 분석에 의한 철분 분석을 보조하기 위한 것이며 이를 대체하는 것은 아니다.
② 상기 센서 경향 관리 한계치는 실제 감속기 사용유 분석 데이터베이스 및 파이롯 감속기 시험 데이터베이스에 의해 검정 및 조정이 필요하다.

(나) 플로우 차트

이를 관리 플로우 차트로 표시하면 그림 2.6.21과 같다.

- 1단계: 센서로 신유 기준선 측정 및 관리 한계치를 설정하여 센서값에 의한 경향 관리 준비
- 2단계: 센서 값이 관리 한계치를 초과하여 주의 단계: 원인 추적 및 제거, 위험 단계: 유 갱유 및 분해수리.
- 3단계: 관리 한계치 이내이면 센서값 경향 관리를 지속적으로 한다.

(다) 윤활유 상태 분석 시스템  소프트웨어 선정

상태분석 시스템 소프트웨어는 통합시스템 구현 소프트웨어인 LabView로 통일하여 다양한 기능을 최대한 활용하여 사용 편의성을 증대시킨다.

▷ 다양한 동작의 구현이 가능하다
▷ 하드웨어 성능 최적화
▷ 기계 쪽에 특화된 라이브러리 제공
▷ 시스템 호환성 ( 산업 기계 쪽 화면은 대부분 랩뷰로 프로그램 구성)
▷ 데이터 시각화 용이 (3D 표현 그래프, 차트, 강도 그래프, 막대 그래프)
▷ 외부 인터페이스 연결 용이(API, Active X , NET, OPC, TCP/IP)

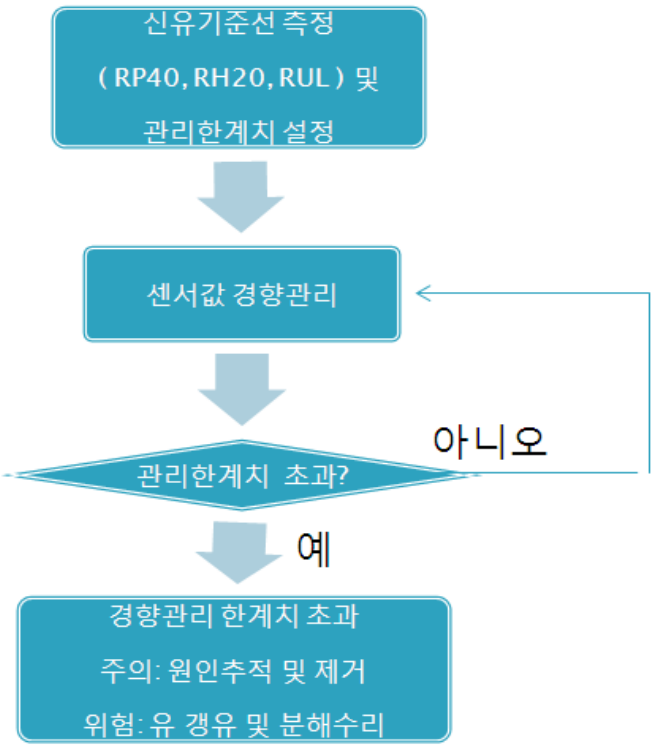



그림 2.6.21 모니터링 데이터 관리 플로우 차트

(3) 통신 부분

(가) 센서 출력단자 아날로그 설정변경

센서 아날로그 출력전류를 클라이언트 컴퓨터의 입력 전류 단자에 연결한 후, 내부 저항 50[ohm]을 거치면 전압으로 변환되고, 이 전압값은 센서 데이터 변환 공식에 의해서 해당 디지털 값을 얻을 수 있다(표 2.6.11). 2채널의 아날로그 출력의 표준설정으로는 온도와 상대습도만 표시된다.

그러나 측정하고자 하는 모든 항목(온도, 유전률(P), 상대습도(RH), 전도도(C), P40, C40, AP)을 아날로그 1채널로 표시하기 위해서는 RS232 명령으로 설정을 변경하여 Pre-Set 한다. 해당 Pre-Set 명령어는 SAO1x[CR] or SAO2x[CR]에서 x = 40으로 설정한다(표 2.6.12). 이렇게 프리세트 되어 출력되는 아날로그 전류 출력 신호의 형태는 그림 2.6.22와 같다.

표 2.6.11의 식들에서 출력 전압은 U[V], 부하저항은 R[ohm]으로 대입하여 계산하면 각 매개변수 X의 값을 얻을 수 있다(표2.6.12).

표 2.6.11 센서 매개변수 계산법

| 출력 크기 X | 출력 범위 | 계산식 | 식 번호 |
|---|---|---|---|
| T [℃] | −20 ~ 120℃ | $X = \frac{U}{R} \bullet 8750 - 55$ | (2.6.2) |
| RH [%] | 0 ~ 100 % | $X = \frac{U}{R} \bullet 6250 - 25$ | (2.6.3) |
| H20 [%] | 0 ~ 100 % | $X = \frac{U}{R} \bullet 6666.67 - 33.33$<br>$4mA$ : 학습 | (2.6.4) |
| AH [ppm] | 0ppm~<br>AHScl | $X = \frac{U}{R} \bullet \frac{AHScl}{0.0016} - \frac{AHScl}{4}$ | (2.6.5) |
| P; P40 | 2 ... 5 | $X = \frac{U}{R} \bullet 200 + 1$<br>$< 5mA$ : 학습혹은센서일부공기중 | (2.6.6) |
| C; C40<br>[pS/m] | 100....<br>300100<br>[pS/m] | $X = \frac{U}{R} \bullet 20000000 - 99900$<br>$< 5mA$ : 학습 | (2.6.7) |
| AP [%] | 0 ... 100% | $X = \frac{U}{R} \bullet 6250 - 25$ | (2.6.8) |

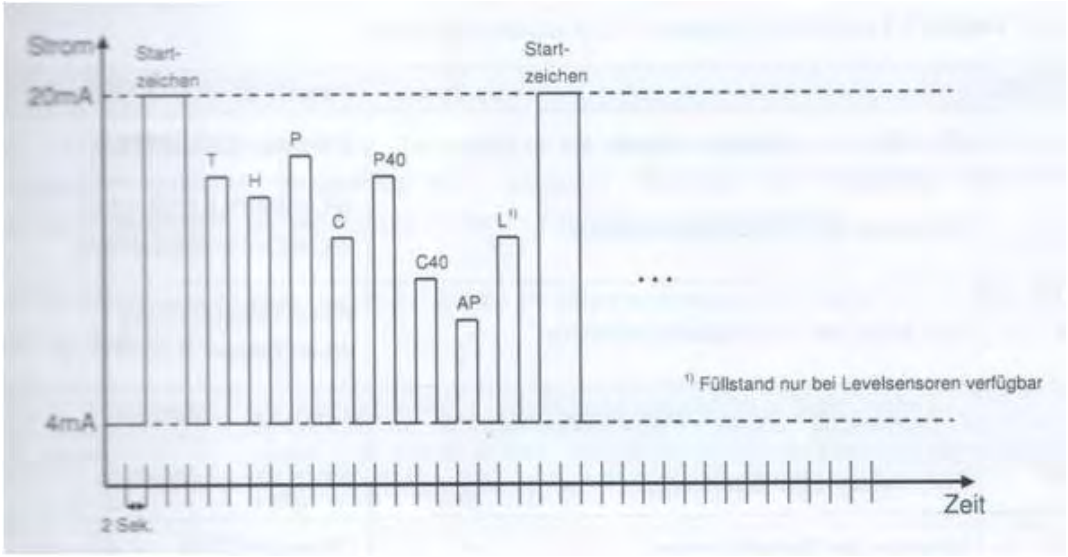



그림 2.6.22 아날로그 인터페이스를 통한 순차적인 출력형태

표 2.6.12 전류 출력들의 출력 매개변수들의 숫자 부호

| 숫자 부호 x | 매개변수 |
|---|---|
| 0 | 온도 (T) |
| 1 | 상대습도(RH) |
| 2 | 절대습도(AH) |
| 3 | 열화진행(AP) |
| 4 | 상대 유전률 (P) |
| 5 | 상대 유전률@40℃ (P40) |
| 6 | 전기 전도도(C) |
| 7 | 전기 전도도@40℃ (C40) |
| 8 | 상대 습도@20℃ (H20) |
| 9 | 상대 습도@40℃ (H40) |
| 10 | 유면 |
| 30 | 경보<br>4 mA = 경보 무<br>200 mA = 유면이 너무 낮음(레벨 센서에 대해서 센서가 공기 중에 있거나 유면이 서정된 최소치 보다 작다) 혹은 자유 수분(>95%) 혹은 아주 높은 수분가(>75%) 혹은 설정된 최대 유온을 초과하였다. |
| 40 | 온도(T), 상대 습도, 상대유전률, 전기 전도도, P40, C40, AP 및 L의 순차적인 출력 |
| 100 | 4 mA로 고정된 출력 |
| 101 | 12 mA로 고정된 출력 |
| 102 | 20 mA로 고정된 출력 |

(나) 통신 시나리오

센서 출력 아날로그신호를 KTX 동력 대차 상에 있는 KTM의 NI 9201 클라이언트에 입력하여 A/D 변환하여 서버로 통신한다. (열차 1편성에서 연결되는 클라이언트는 총 6대이다).(그림 2.6.23)

* NI 9201 KTM (주관기관: KTM 클라이언트) 사양
  - 구분 : CompactRIO Module
  - 측정타입 : 전압
  - 측정신호 범위 : ±10 V
  - 분해능 : 500 KS/s
  - 해상도 : 12bit
  - 채널수 : 8개
  - 커넥터 타입 : 스크루 터미널
  - 채널수 : 윤활 4ch + 온도 4ch (Total 8ch) → Input 전압 : Voltage
  - 윤활 센서의 아날로그 신호를 A/D 변환기에 의해서 디지털 신호로 변환

서버(KTM 주관기관 서버)는 클라이언트에서 오는 시리얼 신호를 받는다.
서버의 Software 프로그램에 의해서 받은 디지털 신호를 감속기 유를 관리하기 위한 한계치 관리 rule에 의해 관리 한계치를 초과 하였을 시 주의, 위험 등으로 경보를 발생한다.

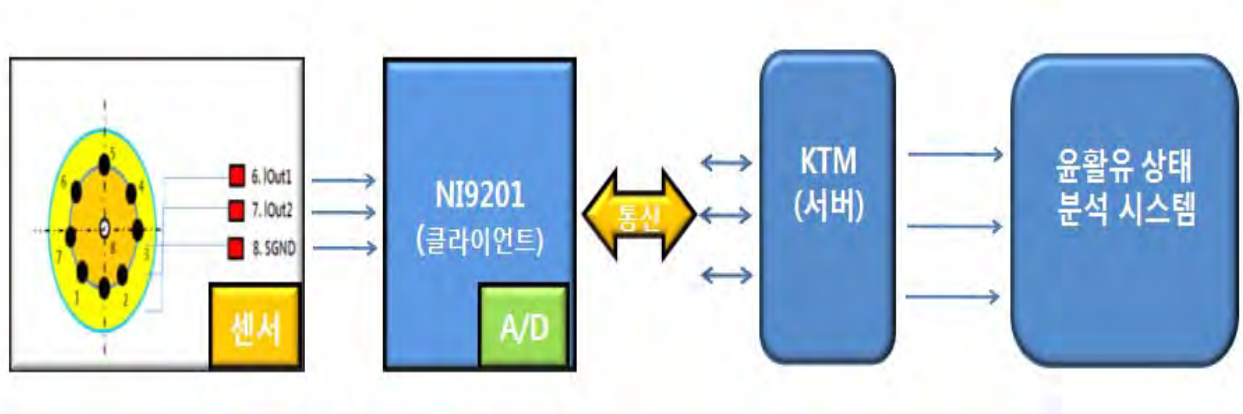



그림 2.6.23 윤활유 상태 분석 시스템 기본 구성도

## 4. 윤활유 열화감지시스템 제작

### 가. 센서 데이터 모니터링 소프트웨어 개발

센서 실물 실험 적용 및 센서 반복성 및 재현성 실험에 사용 되어질 6개 센서 데이터 감시 소프트웨어를 개발 하였다. 개발 언어는 랩뷰8.0, 운영체제는 윈도우XP이고 개발 내용은 다음과 같다.

▷ 센서 데이터 감시 화면 6개(그림2.6.24)
- 데이터 18개 항목 수집
- 2개 데이터 선택 그래프 표시 및 관리 한계치 입력 가능(그림2.6.25)
- 에러신호 구분 표시 : 센서고장, 오염물 침입경보, 일반 정보 구분 색 표시

▷ 센서 명령어 기능 표시
- CMEM 기능 표시 : 진행 버퍼내의 모든 데이터를 지움
- RID 기능 표시 : 센서 ID를 읽은 후 합을 체크(CRC)
- SONew : 현재 상태를 신유로 학습하며, 모든 매개변수들(온도 구배, 기준값, 학습된 값)을 리셋, 유 나이는 0h으로 설정되고 학습 절차가 개시된다.(기간 : 약 10 ~ 250운전 시간), 데이터 버퍼는 유지

▷ 수집 데이터 과거 이력 조회 가능
- PC 저장 시 엑셀로 확인 가능

▷ 서버(KTM 주관기관 서버)는 클라이언트에서 오는 시리얼 신호를 받는다.

▷ 서버의 Software프로그램에 의해서 받은 디지털 신호를 감속기 유를 관리하기 위한 한계치 관리 Rule에 의해 관리 한계치를 초과 하였을 시 주의, 위험 등 경보 발생

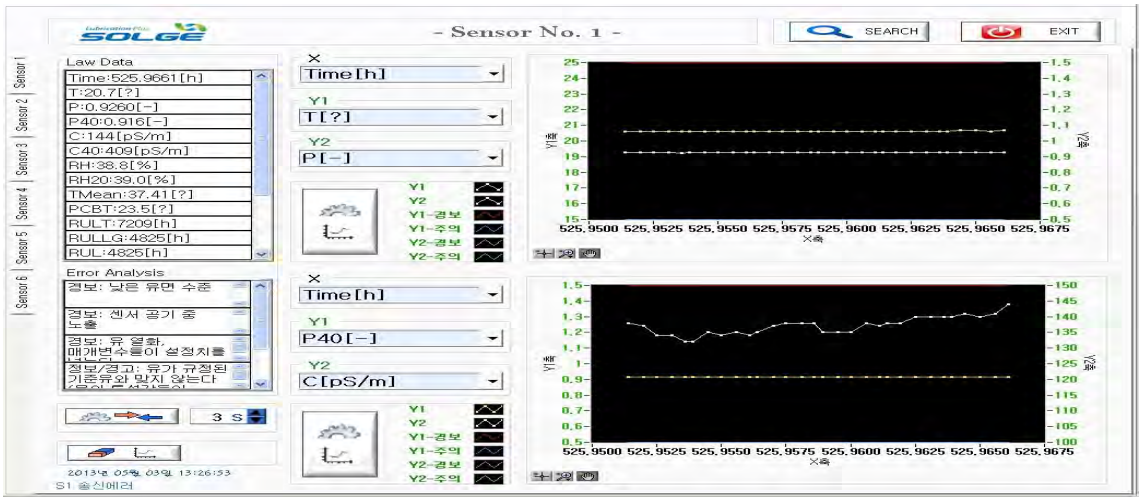



그림 2.6.24 센서 측정 화면

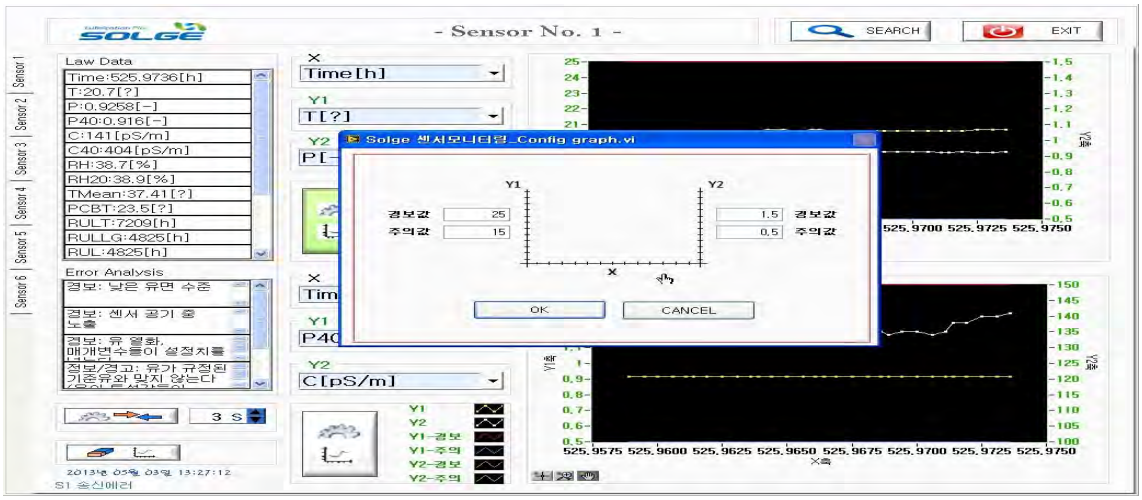
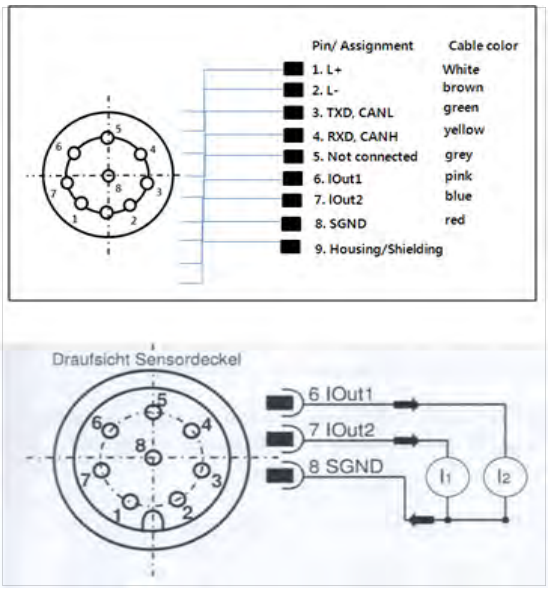



그림 2.6.25 오일 관리 기준 입력



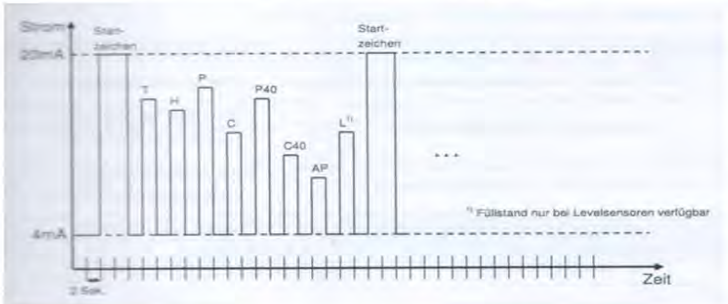

- M12 X 1의 8핀 커넥터 연결: 전력 공급과 신호 출력을 한다.
- Power Supply를 연결하여 24 VDC, 0.625A를 공급

아날로그 출력 신호: 6,, 8 번 선로 이용

- NI 9203 클라이언트 컴퓨터: 아날로그 신호 1 채널만 수령(6번을 클라이언트 컴퓨터 전류 입력단자에 연결하여 출력전류를 송신하고, 8번을 그라운드와 연결)

그림 2.6.26 전기 연결

- 출력된 저항값은 센서 데이터 변환 공식에 의해서 해당 값을 얻을 수 있다.
- 측정하고자 하는 모든 항목 (온도, 유전률(P), 상대습도(RH), 전도도(C), P40, C40, AP)을 표시하기 위해서는 RS232 명령으로 설정을 변경하여 Pre- Set 한다.
  Pre- Set 명령어 : SAO1x[CR] or SAO2x[CR]에서 x = 40




센서 출력 전압 시퀀셜 형태

- 2초 간격 펄스로 1 데이터 출력 및 1 사이클당 38초 주기로 1 데이터세트 출력
- 온도(T), 습도(H), 유전률(C), 전기전도도(P); 유전률@40°C(P40), 전기전도도 @40°C (C40), 열화도(AP), 유면(L) 순으로 8가지 매개변수 출력

그림 2.6.27 센서 출력 전압 시퀀셜 형태

나. 센서 취부 지그 제작

감속기 주유구에 센서를 취부하기 위해서 기존의 주유구 마개에 센서 취부 나사 가공 후 특수 와셔 제작 조립품 3 Set를 제작하였다.(그림2.6.28)

다. 센서 개조

1차 감속기 주유구: 주유구가 파이프로 되어 있어서 센서의 현재 길이 77 mm를 주유구 파이프 길이 150 mm보다 길게 200 mm로 연장하여 제작하였다(그림 2.6.28 오른쪽).

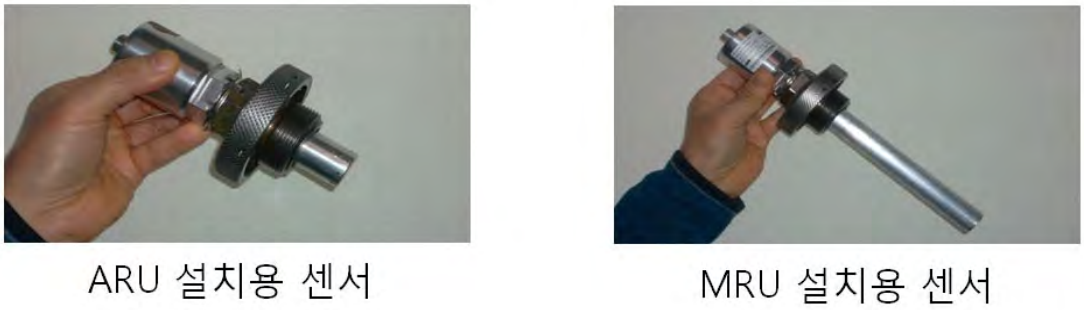



그림 2.6.28 감속기 센서 결합용 지그

## 5. 윤활유 열화감지 시스템 성능실험

윤활유 열화감지 시스템은 실차 장착 시에는 각 감속기 주유구에 Argo-Hytos의 오일 컨디션 센서를 1개씩 장착하여 여기서 나오는 8가지 파라미터들을 아날로그 시퀜스 신호로 수령하여 NI9201에 접속하여 디지털 신호로 바꾸어 유 열화관리 모니터링 규칙에 의하여 관리하게 설계 되어있다.

실험실에서 시뮬레이션 실험 중에는 감속기 열 부하 및 사용조건을 열판 가열 혹은 항온조에서 온도를 시뮬레이션하고, 오염 상태를 산화철분 투입, 증류수 투입, 고온 가열 산화 시험 등으로 시뮬레이션하면서 센서의 각 파라미터 값의 변화 경향과 오염물 투입량과의 상관성을 실험하였다. 이하에 각 실험의 방법과 측정결과를 기술한다.

### 가. 센서 성능 시험

#### (1) 센서 신유학습

센서를 사용하기 위해서는 사용할 오일의 여러 특성(유전율, 전도성 등)이 신유일 때 어떤 값을 보이는지와 온도에 따라 파라미터가 변하는 경향을 사전에 센서에 기억시키는 작업을 신유 학습이라 한다.

▷ 실험장치 준비: 열판 위에 1,300 mL 비이커를 놓고, 여기에 1,000 mL의 신유를 넣고 2개의 센서를 비커 커버에 설치하여 유중에 센싱부가 잠기도록 한다. 유중에 마그네틱 교반자를 넣는다. 유 중의 온도를 피드백 제어하여 열판 가열온도를 제어하고 판넬에서 가열온도를 설정하고 현재 오일 온도를 표시한다. 판넬에서 마그네틱 교반자의 회전속도를 설정하고 현재의 교반 회전 속도를 표시한다.(그림2.6.29)



그림 2.6.29 신유 학습 시험

▷ 실험실시: 열판 위에서 비이커 내의 자기 교반자를 230 rpm으로 회전시키고, 비이커 내의 기어유를 일정 온도에서 최소 15분을 유지하고 다음 온도로 변화시키는데 전체 온도 변화 폭은 50℃ 이상이어야 한다. 본 시험에서는 그림 2.6.30과 같은 조건으로 신유 학습하였다. 오일 온도를 25℃, 30℃, 40℃, 50℃, 60℃, 70℃에서 각각 2시간을 유지한 후 다음 온도로 변화시켰다. LubCosH2O 센서와 LubCosLevel200센서는 크기가 서로 다르기 때문에 다른 시험 비이커에서 신유 학습하였다. LubCosH2O 센서는 2개(S1, S2)이며 LubCosLevel200센서는 3개(LS1, LS2, LS3)이다. 센서 신유 학습시 센서 데이터는 표 2.6.13에 나타내었다.

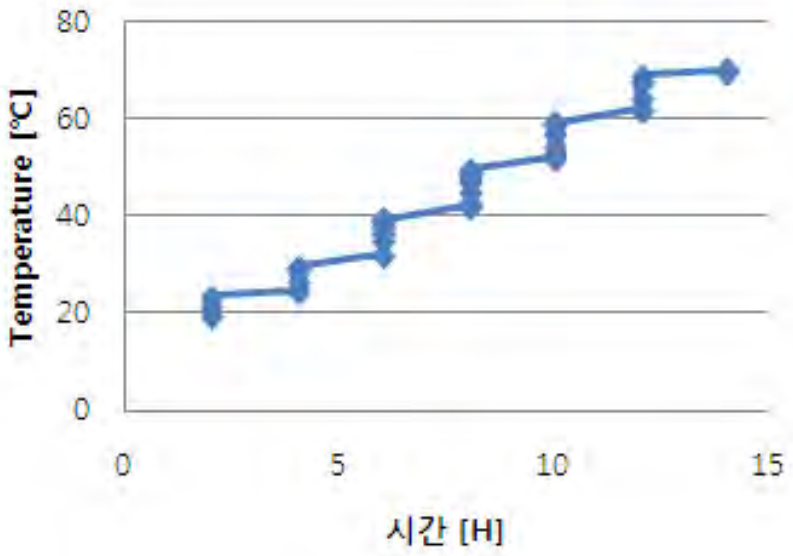



그림 2.6.30 신유 학습 조건

표 2.6.13 센서 정보 및 데이터

센서 정보

| 센서 | 센서 넘버 |
|---|---|
| S1 | LubCosH2O+;SN:200944;SW:1.15.12;CRC:V |
| S2 | LubCosH2O+;SN:200946;SW:1.15.12;CRC:T |
| LS1 | LubCosLevel200 SN:000030SW : 1.23.12 CRC : ? |
| LS2 | LubCosLevel200 SN:000031 SW :1.23.12 CRC : ? |
| LS3 | LubCosLevel200;SN:000032;SW:1.23.12;CRC: |

| 센서 | S1 | S2 | LS1 | LS2 | LS3 |
|---|---|---|---|---|---|
| 센서 넘버 | SN:200944 | SN:200946 | SN:000030 | SN:000031 | SN:000032 |
| 가열 스팀온도 | 6.6℃ | 6.6℃ | 6.0℃ | 6℃ | 6℃ |
| 센서 측정온도 | 4.6℃ | 4.7℃ | 3.0℃ | 4℃ | 4.2℃ |
| RH[%] | 6.8[%] | 9.2[%] | 23.7[%] | 26.5[%] | 26.8[%] |
| RH20[%] | 1.7[%] | 3.4[%] | 13.9[%] | 16.7[%] | 18.4[%] |
| 수분분석 | 15.55ppm | 15.55ppm | 48.73ppm | 48.73ppm | 48.73ppm |

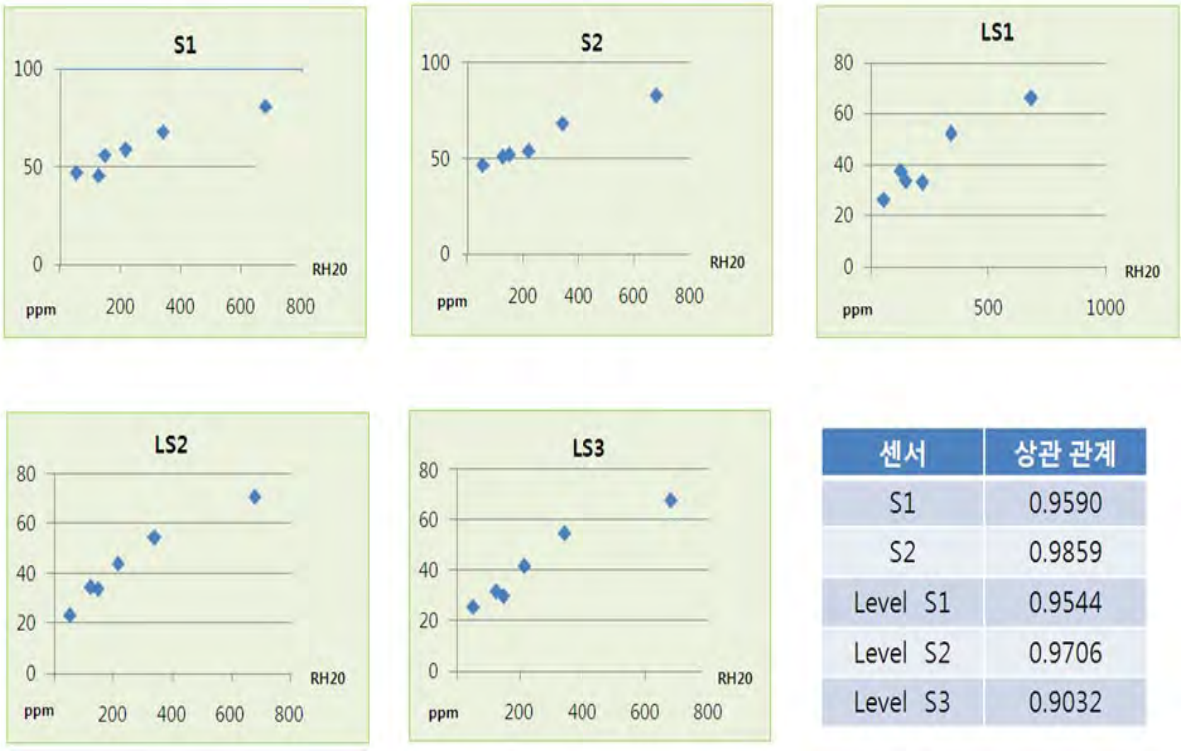
(2) 수분 측정

센서의 수분함량 측정 성능을 평가하였다. 기어유에 일정량의 물을 넣은 시료를 사전에 제조하였다. 물은 함량은 시료 마다 다르게 하였고, 실험실에서 Karl Fisher법으로 분석하였다. 시료는 6개 준비하였다. 실험실에서 측정한 수분 함량과 센서로 측정한 수분 양을 표 2.6.14와 그림 2.6.31에 나타내었다.

표 2.6.14 수분 측정 데이터

*센서 평균값은 안정화 된 데이터를 기반으로 산출

| 시료 | 수분 함량 | S1(평균) | S2(평균) | LS1(평균) | LS2(평균) | LS3(평균) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | RH20 | RH20 | RH20 | RH20 | RH20 |
| 1 | 53.28 | 46.5 | 46.56 | 26.08 | 23.12 | 25.66 |
| 2 | 147.21 | 55.58 | 52.36 | 33.52 | 33.42 | 29.54 |
| 3 | 127 | 45.34 | 50.84 | 37.62 | 34.6 | 31.62 |
| 4 | 217 | 58.4 | 53.88 | 32.84 | 44.2 | 41.86 |
| 5 | 340.39 | 67.56 | 67.84 | 52.24 | 54.24 | 54.72 |
| 6 | 682.25 | 80.6 | 82.44 | 66 | 70.64 | 67.8 |




| 센서 | 상관 관계 |
|---|---|
| S1 | 0.9590 |
| S2 | 0.9859 |
| Level S1 | 0.9544 |
| Level S2 | 0.9706 |
| Level S3 | 0.9032 |

그림 2.6.31 시료 수분함량과 센서 측정값의 상관관계

본 시험에 사용한 센서는 정전용량 변환기(Capacitive Transducer)를 사용해서 상대습도를 측정한다. 정전용량형 습도 센서는 상대습도를 0-100% 사이의 측정범위로 감지한다. 자유수분(free water) 혹은 유화수분(emulsion)이 존재하면, 센서는 100%를 나타낸다. 습도 센서는 유중에 직접 설치되므로, 주변 유체의 전기 전도도가 3 $\mu$S/m를 초과하면 에러 값을 낼 수 있다.

상대습도는 실제 유중에 포함된 수분량($\rho$w)을 윤활유의 포화 수분량($\rho$w,max)에 대비하여 나타낸 값이다.

$$\phi = \frac{\rho_w}{\rho_{w,\max}} \cdot 100\,(\%) \text{----------} \quad (2.6.9)$$

윤활유의 포화 수분량, 즉 수분의 최대 흡수 가능량 $\rho_{w,\max}$는 온도에 따라 변한다. 오일 중의 절대 수분량이 일정하게 유지되더라도, 상대습도는 온도에 따라 변한다. 일반적으로, 오일은 포화한계치에 도달하기 까지, 온도가 증가하면 더 많은 수분을 용해 흡수할 수 있다.

수분의 온도 영향을 줄이기 위해 온도 영향을 보상한 값 RH20으로 수분 함량을 비교하였다. RH20은 각기 다른 온도에서 수분 함량이 측정되더라도 20℃에서의 상대 습도로 변환되어 나타낸다.

5개의 센서 각각은 기어유 중의 수분 함량과 센서 상대 습도(RH20)와의 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 기어유 중의 수분량을 상대 습도로도 충분히 모니터링할 수 있음을 보여준다.

다만 수분 함량이 같은 시료에 대해 각 센서가 다른 습도 값을 보이는 것은 센서의 신유 학습 과정이 달랐기 때문으로 추정된다.

(3) 산화 모니터링 시험

(가) 실험방법

1,000 mL 신유 비커 3개를 항온조에 넣고, 125 °C로 유지하면서 37일(239Hr) 간 실험하면서, 2 ~ 3일 간격으로 비커를 추출하여 70 °C로 냉각 후 센서 2개를 비커에 담근 후 60±15분간 측정하고 시료를 샘플링 하여 산가 분석을 의뢰한 후 다시 항온조에 넣고 가열을 계속하고, 센서는 10분 간격으로 측정 실시하였다.

(나) 측정 결과

산가와 센서 매개변수 상관성 측정결과 표 2.6.15와 같이 상대유전률 P40과 전기 전도도 C40은 좋은 것으로 나타났다. 이를 통해 오일 산화로 인한 산가 증가와 센서로 측정하는 오일 파라미터 즉 상대유전율과 전기전도도 간에 상관관계가 있음을 확인하였다(그림 2.6.32).

표 2.6.15 산가와 측정 파라미터의 상관성 계수

| 센서 | AN-P40 | AN-C40 |
|---|---|---|
| AH-1 | 0.7831 | 0.9017 |
| AH-2 | 0.5357 | 0.9416 |

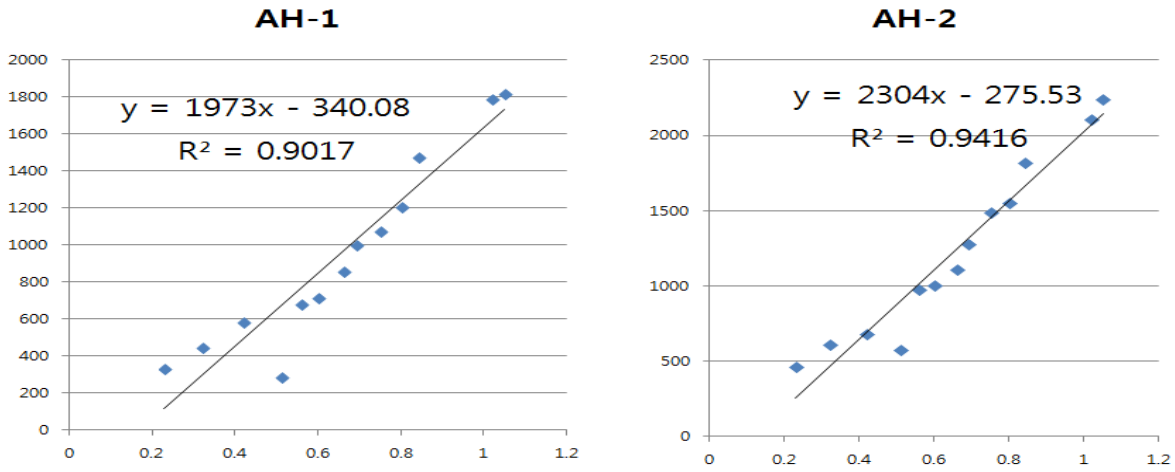



그림 2.6.32 산가와 전기 전도도의 변화 경향

나. 감속기 기어유 열화 경향 연구

감속기 기어유의 윤활관리는 정기적으로 샘플링하여 실험실에서 분석하여 관리기준과 비교하여 상태를 판정하고 조치를 하는 것이 보통이다. 기어유는 기어박스 내의 기어와 베어링을 유욕 비산식 혹은 순환식으로 윤활하고 있으나. 고속열차의 경우는 유욕 비산식 윤활이다.

기어 윤활은 치면의 어덴덤과 디덴덤 면에서 유체동력학적 윤활에 의한 유막이 이루어져야 연마마모 및 응착마모를 방지할 수 있고, 치면의 피치선에서는 탄성유체동력학적 윤활에 의한 유막이 형성되어야 피로마모를 방지할 수 있다.

베어링 윤활은 구름요소 베어링으로 되어 있어서 탄성유체동력학적 윤활에 의한 유막이 형성되어야 한다.

이러한 기어유의 사용한계는 보통 성상분석으로서 동점도와 산가로 관리하는데, 신유의 성상값을 기준으로 일정 범위 내의 변화만 허용한다. 일반적으로 기어유가 열화하면 동점도와 산가는 증가되고 부식성을 띄게 된다. 또한 마모의 원인이 되는 것으로 입자오염도와 수분가를 분석하여 오일의 청결도가 관리기준 이내가 되도록 관리하는 것이 중요하다. 또한 기어 윤활유를 분석하면 윤활면의 마모에 의해서 발생되는 마모분도 분석이 되어서, 유욕 비산식 윤활의 경우 일정한 속도로 증가되는데, 이 증가속도가 각 윤활조건에 따라 다르므로 각 개소별로 경향 관리하여 그 정상치를 파악해서 관리해야 하고, 이 증가속도가 급격히 증가될 때, 비정상 마모고장으로 파국적 고장이 임박한 것으로 된다.

감속기 오일 열화센서는 이러한 윤활유 열화기구 중에서 산화에 의한 유기산의 발생과 산가 증가, 점도 상승과 수분, 마모 철분 등의 오염물이 증가할 경우에 유전률(permittivity)과 전기전도도(conductivity)의 변화를 근거로 오일의 열화정도를 알아낸다. 그러나 센서로 측정한 오일 파라미터는 실제 윤활유 내의 여러 가지 인자(기유 종류, 첨가제, 온도, 수분, 금속 마모분, 산화물, 산가)에 의해서 달라지므로 센서를 윤활유 상태 판정에 활용하기 위해서는 센서 파라미터와 실제 오일 열화 메커니즘과의 상관관계 정립이 우선 필요하다.

온라인 센서의 파라미터 값에 의해서 24시간 감시 시스템을 설치하여, 관리 기준 (주의, 위험)을 초과할 시에는 바로 유를 샘플링 및 정밀분석을 의뢰하여 고장의 원인을 찾아서 이 원인을 제거하는 선행보전을 실시하여야, 대형 고장을 예방할 수 있게 된다.

감속기 기어유의 열화 패턴을 파악하고 기어유의 열화 모니터링 관리 기준을 선정하기 위해 수도

표 2.6.16 사용유 시료 정보

| 시료번호 | 열차 번호 | 감속기 S/N | 감속기 주행거리(천km) |
|---|---|---|---|
| 1 | K36B21B | 061 | 1,800 |
| 2 | 미기재 | 469 | 2,000 |
| 3 | K15B22A | 125 | 2,050 |
| 4 | K11BO3A | 569 | 1,900 |
| 5 | K11BO1B | 267 | 1,800 |
| 6 | K14BO3A | 168 | 1,800 |
| 7 | K14BO1B | 146 | 1,900 |
| 8 | K24B22A | 147 | 1,900 |
| 9 | 미기재 | 187 | 1,800 |

권 철도 중정비단에서 감속기 사용유를 채취하였다. 중정비단에서 사용유 채취는 2회에 나누어 실시하였으며 각각 채취 시료에 대한 기어유의 성상분석과 센서를 활용하여 기어유 상태를 모니터링 하였다.

열화 센서가 감속기 사용유의 상태를 진단할 수 있는 확인하는데 사용할 기어유 사용유는 표 2.6.16과 같다. 사용유의 사용 시간은 알 수 없었고, 해당 사용유의 감속기기 사용 시간은 주행거리로 표시하였다.

사용유에 대한 센서 측정 시험은 표 2.6.17의 조건과 방법으로 수행하였다.

표 2.6.17 센서 측정 조건

| 항목 | 내용 |
|---|---|
| 측정 온도 | 25±1℃ |
| 측정 시간 | 40 – 50분 |
| 데이터 저장 간격 | 1분 |
| 세부 측정 절차 | – 1리터 시료병에 700 ml 사용유를 담은 후 2회에 걸쳐 센서의 파라미터를 측정함<br>– S1과 S2 동시 측정, LS1, LS2, LS3 동시 측정<br>– 측정 간에 석유에테르 센서 세척<br>– 하이퍼 터미널 통신으로 해당 데이터 값 액셀 파일로 다운로드. |

표 2.6.18 사용유 분석결과

| 시료 번호 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 열차 및 감속기 위치 | K36B21B | 미기재 | K15B22A | K11B03A | K11B01S | K14B03A | K14B01B | K24B22A | 미기재 |
| 감속기 번호 | 061 | 469 | 125 | 569 | 267 | 168 | 146 | 147 | 187 |
| 감속기 사용시간 (주행거리, 천km) | 1,800 | 2,000 | 2,050 | 1,900 | 1,800 | 1,800 | 1,900 | 1,900 | 1,800 |
| 산가 [mgKOH/g] | 1.1 | 0.8 | 0.6 | 1.0 | 1.0 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.9 |
| 점도@40℃ [sSt] | 248.7 | 246.7 | 242.9 | 246.2 | 245.0 | 234.8 | 231.4 | 237.6 | 249.7 |
| 수분 [ppm] | 72 | 75 | 68 | 79 | 230 | 68 | 82 | 61 | 77 |
| 금속원소, Ca, ppm | | | | | | | | | |
| Ca | 8 | 8 | 6 | 4 | 4 | 11 | 10 | 2 | 10 |
| P | 366 | 368 | 405 | 321 | 365 | 404 | 441 | 410 | 359 |
| Zn | 19 | 23 | 10 | 22 | 15 | 8 | 9 | 7 | 25 |
| Si | 1.2 | 2.2 | 2.2 | 3.5 | 6.0 | 4.7 | 3.4 | 3.6 | 2.6 |
| Fe | 34.5 | 54.5 | 18.2 | 25.3 | 133.4 | 16.0 | 16.2 | 17.9 | 35.6 |
| Cr | 0.3 | 0.7 | 0.1 | 0.3 | 1.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 |
| Pb | 0.1 | | 0.2 | 0.6 | 1.5 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.9 |
| Cu | 19.1 | 19.5 | 9.8 | 25.3 | 15.4 | 5.0 | 5.4 | 6.7 | 25.2 |
| Al | 0.3 | 0.2 | | 0.1 | 0.8 | | | | |
| Ni | 0.1 | 0.6 | | 0.1 | 1.5 | | 0.2 | | 0.1 |
| Mo | | | | 0.2 | | | | | |

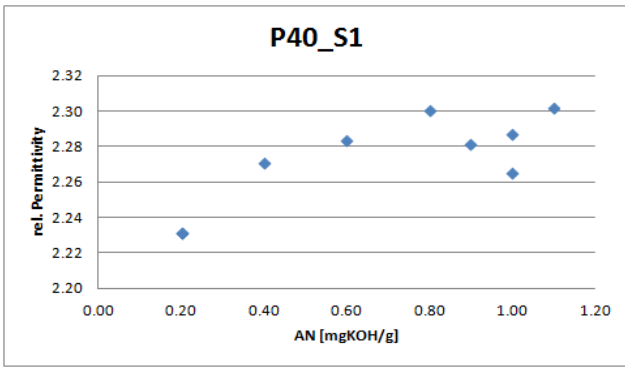
센서 시험에 사용한 사용유의 성상 분석결과는 표 2.6.18과 같다. 총 9종 시료의 산가 분포는 0.2에서 1.1로 다양하여 센서 측정 파라미터와 상관관계가 있는지를 확인하는 것에 매우 적합하다.

상기 시료 9종에 대해 센서 5개로 오일 파라미터를 측정한 결과는 표 2.6.19와 그림에 나타내었다.

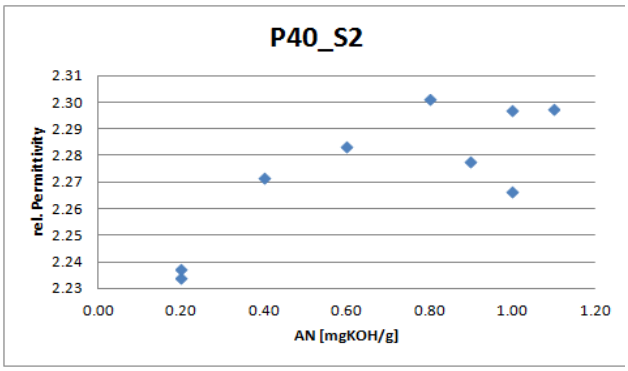
표 2.6.19 오일 파라미터 측정 결과

| 센서 | pamameter | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | P40 | 2.302026 | 2.300834 | 2.283833 | 2.265665 | 2.287588 | 2.232076 | 2.231738 | 2.271009 | 2.282253 |
| | C40 | 716.125 | 780.8375 | 464.875 | 478.7 | 702.7875 | 341.875 | 479.475 | 392.35 | 506.85 |
| | RH20 | 39.5625 | 30.3125 | 45.625 | 30.225 | 65.8625 | 47.45 | 67.95 | 37.1125 | 32.85 |
| S2 | P40 | 2.297558 | 2.300965 | 2.283428 | 2.266496 | 2.296769 | 2.233819 | 2.237156 | 2.271593 | 2.277891 |
| | C40 | 589.875 | 593.775 | 451.4625 | 492.5625 | 662.2 | 321.6375 | 405.9125 | 356.55 | 399.6857 |
| | RH20 | 35.95 | 27.9125 | 41 | 28.9375 | 66.05 | 46.0875 | 66.075 | 34.8 | 31.55714 |
| LS1 | P40 | | 2.277866 | 2.259181 | 2.245203 | 2.274584 | 2.207578 | 2.232578 | 2.253629 | 2.239521 |
| | C40 | | 325.85 | 296.4125 | 299.9875 | 348.925 | 214.9833 | 230.25 | 241.425 | 241.3625 |
| | RH20 | 28.2375 | 28.9375 | 34.75 | 32.8625 | 63.2 | 41.56667 | 61.7 | 28.875 | 27.925 |
| LS2 | P40 | | 2.288498 | 2.272149 | 2.254445 | 2.287354 | 2.217548 | 2.24378 | 2.262419 | 2.252251 |
| | C40 | | 331.4625 | 281.325 | 303.5125 | 350.3875 | 220.0875 | 245.175 | 258.2125 | 265.55 |
| | RH20 | 27.075 | 28.9375 | 31.3625 | 25.3375 | 61.675 | 40.55 | 60.4875 | 25.1125 | 24.475 |
| LS3 | P40 | | 2.281206 | 2.262653 | 2.248284 | 2.282476 | 2.211532 | 2.2595253 | 2.256044 | 2.252828 |
| | C40 | | 400.975 | 360.975 | 384.0625 | 436.1875 | 244.5167 | 259.9 | 324.8125 | 315.2375 |
| | RH20 | 29.0375 | 29.075 | 31.075 | 28.1125 | 61.275 | 41.23333 | 60.0125 | 26.9125 | 26.575 |

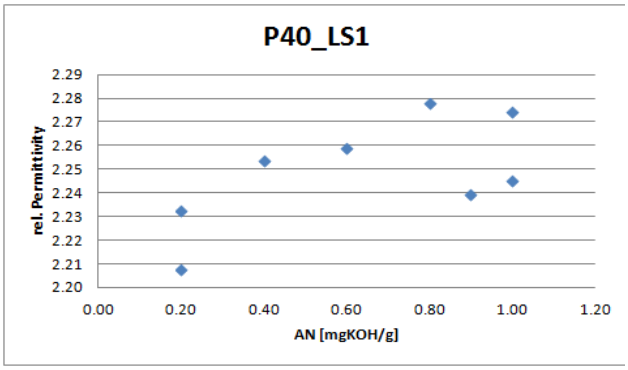
윤활유가 사용되면서 열화되면 산가(acid number)가 증가한다. 실제 KTX 감속기에 사용된 열화된 기어유 시료의 산가와 센서로 측정한 오일 파라미터-상대 유전율(relative Permittivity), 전기전도도(conductivity)-간에 상관관계가 있음을 그림 2.6.33와 그림 2.6.34에서 알 수 있다. 이는 기어유의 산화 시험에서와 같은 경향이다.



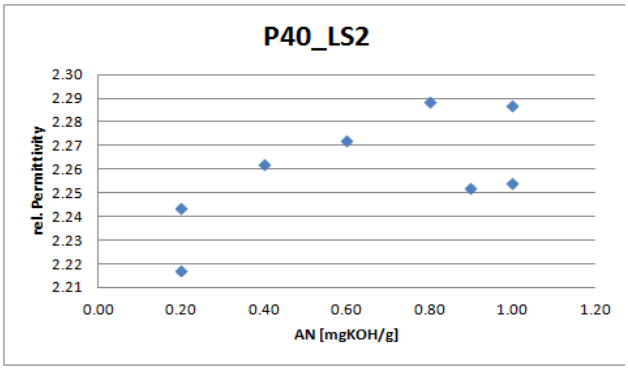

(1)



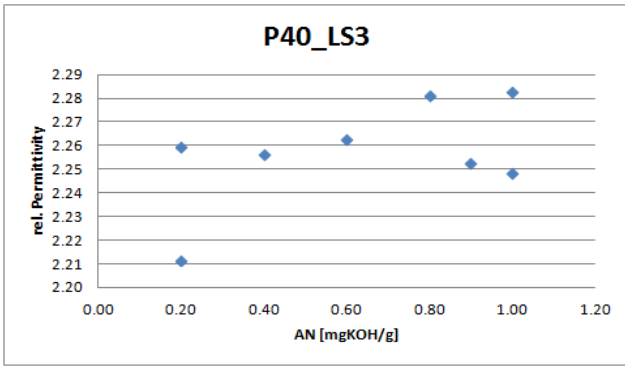

(2)




(3)

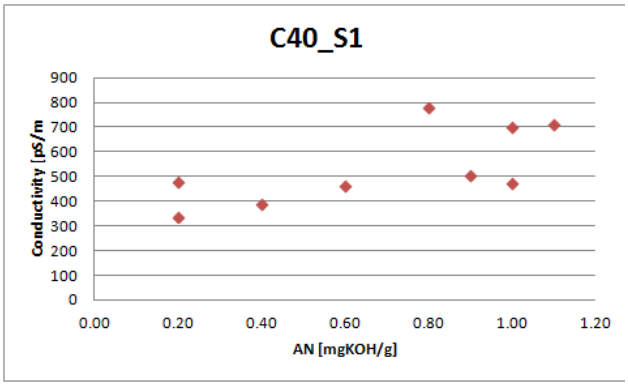



(4)

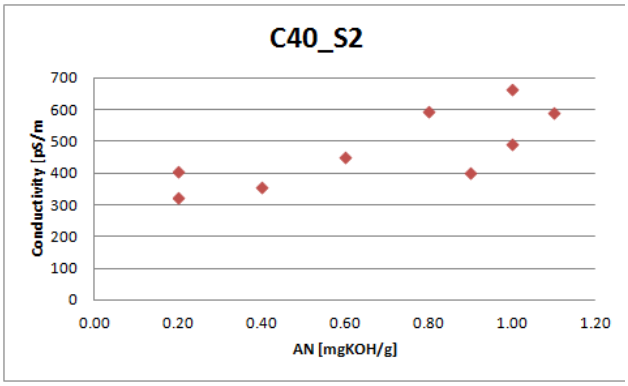



(5)

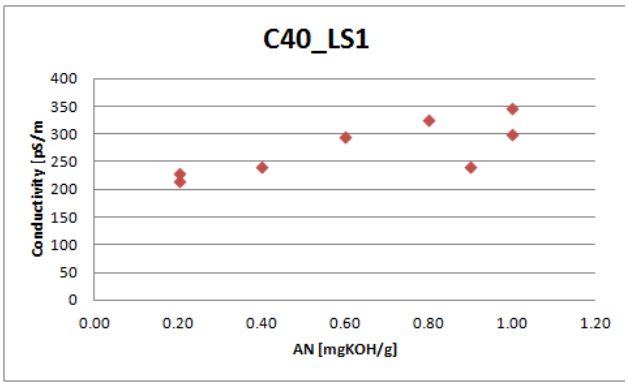
그림 2.6.33 사용유에 대한 센서 측정 결과(상대유전율)



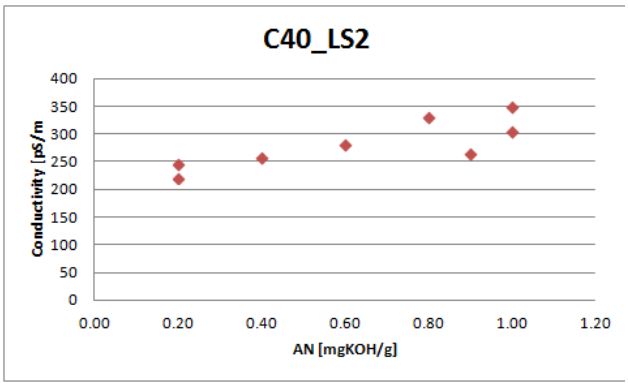

(1)



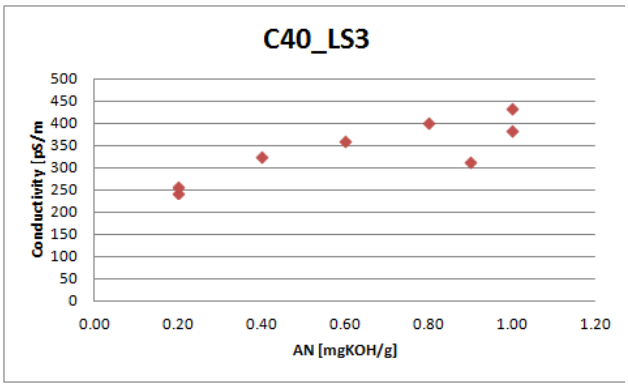

(2)




(3)




(4)




(5)

그림 2.6.34 사용유에 대한 센서 측정 결과(전기전도도)

다. 진동 충격 테스트

현재 선정센서는 9~200 Hz, 10 g 의 진동시험을 거쳤으나 요구사양의 진동시험과 충격시험은 하지 않았으므로, 1차 감속기용 센서의 개조 모델은 대차 기준, 2차 감속기용 상용 모델은 차축 기준에 맞추어 검증시험을 하였다.

KTM 엔지니어링과 공동으로 그림 2.6.35과 같이 지그를 제작하였고 5월 ~ 7월 까지 한국 건설 환경 실험 연구원에서 진동 충격 테스트를 진행 하였다. 시험 성적서는 그림 2.6.36 ~ 그림 2.6.38에 나타내었다.



그림 2.6.35 진동 충격 시험 지그



전자문서서비스

# 시험성적서

1. 성 적 서 번 호 : CT14-085383
2. 의뢰자
   - ○ 업 체 명 : 케이티엠엔지니어링(주)
   - ○ 주 소 : 경기도 성남시 중원구 상대원동 190-1 SK테크노파크 비즈센터 1416호
   - ○ 의뢰일자 : 2014.08.12
   - ○ 시험발급일 : 2014.08.19
3. 시험성적서의 용도 : 거래처 제출
4. 시료명 : 고속철도용 통합 감시 모니터링 시스템 서버랙
5. 시험방법

(1) KS C IEC 61373:2002 1종 A

6. 시험환경 : 온도:(25.5±0.5) ℃, 습도:(59±1) % R.H.
7. 시험결과

| 시험 항목 | 시험 결과 |
|---|---|
| 모의 장기 수명 시험 | 외관상 이상 없음 |
| 충격 시험 | 외관상 이상 없음 |
| 기능 랜덤 시험 | 외관상 이상 없음 |

| 확인 | 작성자 성 명 | 최성문 | 최성문 | 기술책임자 성 명 | 남궁연 | |
|---|---|---|---|---|---|---|

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

한국인정기구 인정 한국건설생활환경시험연구원장

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

가산시험연구동 : 153-803 서울특별시 금천구 가산디지털로 199 02-2102-2500
결과문의 : 포장물류팀 ☎ (02)2102-2775

1 페이지 중 1페이지

양식QP-20-01-01(2)

그림 2.6.36 진동충격시험결과서 1

# 시험성적서

성적서번호 : CT14-072906

7.1 시험 내용

7.1.1 모의 장기 수명 시험

| 시 험 조 건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 진동방향 | 진동주파수 (Hz) | ASD Level ($(m/s^2)^2/Hz$) | Slope (dB/ootave) | 가속도 (RMS Value $m/s^2$) | 시험시간 (h) |
| 상하 | 5 | - | 9 | 42.5 | 5.0 |
| | 10 | 11.83 | - | | |
| | 100 | 11.83 | - | | |
| | 250 | | -6 | | |
| 좌우 | 5 | - | 9 | 37.0 | 5.0 |
| | 10 | 8.96 | - | | |
| | 100 | 8.96 | - | | |
| | 250 | - | -6 | | |
| 전후 | 5 | - | 9 | 20.0 | 5.0 |
| | 10 | 2.62 | - | | |
| | 100 | 2.62 | - | | |
| | 250 | - | -6 | | |

7.1.2 충격 시험

| 시 험 조 건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 충격방향 | | 피크 가속도 ($m/s^2$) | 정규지속시간 (ms) | 파형 | 반복횟수 |
| 상하 | + | 300 | 18 | 반정현파 | 3 |
| | - | | | | 3 |
| 좌우 | + | 300 | 18 | 반정현파 | 3 |
| | - | | | | 3 |
| 전후 | + | 300 | 18 | 반정현파 | 3 |
| | - | | | | 3 |

그림 2.6.37 진동충격시험결과서 2

# 시험성적서

성적서번호 : CT14-072906

7.1.3 기능 랜덤 시험

| 시 험 조 건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 진동방향 | 진동주파수 (Hz) | ASD Level ($(m/s^2)^2/Hz$) | Slope (dB/ocotave) | 가속도 (RMS Value $m/s^2$) | 시험시간 (min) |
| 상하 | 5 | - | 9 | 5.4 | 15 |
| | 10 | 0.190 | - | | |
| | 100 | 0.190 | - | | |
| | 250 | | -6 | | |
| 좌우 | 5 | - | 9 | 4.7 | 15 |
| | 10 | 0.144 | - | | |
| | 100 | 0.144 | - | | |
| | 250 | - | -6 | | |
| 전후 | 5 | - | 9 | 2.5 | 15 |
| | 10 | 0.0414 | - | | |
| | 100 | 0.0414 | - | | |
| | 250 | - | -6 | | |

7.2 결과 판단 기준

시료를 사용시와 유사하게 진동 테이블에 고정하고 KS C IEC 61373 : 2002 2종의 시험조건으로 가진 하여 시료의 균열, 파손 등 외관상의 손상 유무를 확인함.

7.3 시험기기

| 시험기기명 | 제조사 | 모델명 | 비고 |
|---|---|---|---|
| 진동시험기 | IMV CO.(Japan) | CV-700 | - |
| | IMV CO.(Japan) | I240S/SA5M | |

그림 2.6.38 진동충격시험결과서 3

라. 실차 감속기 윤활유 샘플채취 및 분석

KTX 감속기는 구동모터에 직결된 모터축 감속기(MRU)와 이 감속기의 출력축에 연결된 차륜축 감속기(ARU)로 구성되어 있다. 이 감속기의 윤활에 사용되는 기어유는 Shell Engrenage 3470으로서 ISO VG 220이며 사양은 표 2.6.20과 같다.

이들 감속기는 유욕 비산식(Oil Bath and Splash Lubrication)으로 윤활되고 있다. 유 샘플링 대상 감속기는 KTX 21편성의 1A, 2B, 3B 동력대차의 ARU 및 MRU 감속기와 KTX 8편성의 1A, 2B, 3B의 ARU 및 MRU 감속기들이다. KTX - 산천은 유 교체가 8개월 정도에 이루어져 분석대상에서 제외되었다.

유 샘플링은 4개월에 1회 정도로 감속기의 Dip Stick 유면 점검구 겸 샘플링 구에서 샘플링 호스를 삽입하여 진공식 펌프로 채취하는 Drop Tube 방식으로 300 mL 정도를 채취하여 점도, 수분가, 산가, 입자오염도, 원소분석, Ruler, 철분 PQ를 분석하고, 유 열화센서로 40℃ 상대유전률 및 전기전도도, 상대습도 RH를 측정하였다. KTX 21 편성은 3회 정도 샘플링이 이루어졌고, KTX 8 편성은 1회만 샘플링 되었다.

(1) 실차 사용유 분석

분석결과는 유 성상분석인 점도 및 산가는 신유에서 그다지 변하지 않아 유 열화는 아직 발생하지 않은 것으로 판단된다.

유 산화열화의 촉매와 기어 및 베어링의 피로마모의 원인이 될 수 있는 입자오염도는 위험기준을 초과하고 있지만 아직 마모수준은 아직 양호한 수준에 있으므로 외부 분진침입방지와 신유 보충시의 주유도구 오염에 의한 입자상 오염물의 침입을 예방하고 사용유의 마이크로 필터링을 통해서 ISO18/16/13 이하의 청결도를 유지하면 기어 수명연장과 유 열화를 예방할 수가 있다. 수분가는 200ppm 이하로 잘 유지되고 있으며, 수분 역시 유의 산화 촉매와 기기 내부 녹발생의 원인이 되므로 될 수 있는 한 낮게 관리하는 것이 필요하며, 외부 습기의 침투를 방지하고 유중의 수분을 제거할 필요가 있으며 낮게 유지할수록 유와 감속기의 수명이 향상된다.

표 2.6.20 감속기 기어유 Engrenage 3470 사양

| 유 성상 항목 | 단위 | 성상값 | 비고 |
|---|---|---|---|
| 유종명 | Shell | Engrenage3470 | ISO VG220 |
| 동점도 | cSt@40℃ | 233 | |
| | cSt@100℃ | 20.7 | |
| 비중 | @15/4℃ | 0.885 | |
| 점도지수 | | 106 | |
| 유동점 | ℃ | −18 | |
| 인화점 | ℃ | 296 | |
| 산가 | mgKOH/g | 0.3 | |
| FZG | stage | >12 | |

유 열화를 촉진하여 유 수명을 단축시키는 열오염을 방지할 필요가 있으며, 유는 온도가 10℃ 상승마다 수명이 반으로 감소된다는 Arrhenius 법칙이 적용되므로 유온은 될 수 있는 한 낮게 유지하는 것이 유 수명을 연장하고 감속기의 윤활면의 마모를 감소시키는 방법이다.

원소분석 결과는 마모분 발생, 첨가제 감소, 외부오염물의 성분 분석 등을 할 수 있는 방법이고, 일반적으로 사용 중에 마모분 금속(철, 크롬, 니켈, 등 기어 및 베어링의 성분금속)은 증가하고 외부 분진침입이 있을 경우 분진성분원소(실리콘, 알루미늄)도 증가된다. 첨가제 성분(인, 아연, 칼슘, 마그네슘 등)은 감소된다. 사용 중에 누설이 발생할 경우 신유를 보충하면 마모분 금속은 감소하고 첨가제 성분은 증가하는 경우도 있다.

철분 PQ 분석은 큰 철분 마모입자가 발생할 경우 원소분석으로 검출되지 않는 경우가 많아서 이를 보완하는 분석방법이고, 철분 마모 입자크기가 클수록 양이 많을수록 PQ 값이 높게 나온다. 따라서 PQ값이 증가할수록 심각한 마모가 진행되는 것으로 볼 수 있다.

이런 각 감속기의 사용유 분석결과 중 KTX 21 편성에 대한 입자오염도, 수분, 철분에 대한 비교를 표 2.6.21에 나타내고 관리기준에 대비한 상태를 색상으로 표시하였다.

KTX 8편성에 대한 유분석 결과 중 입자오염도, 수분, 철분, 산가에 대한 비교를 표 2.6.22에 나타내었다.

표 2.6.21 21편성의 유 분석 결과

| 항목 | 관리기준 | | 채취 일시 | MRU | | | ARU | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1A | 2B | 3B | 1A | 2B | 3B |
| PC ISO | 18/16/13 | | 8.16. 2012 | 22/19/13 | 22/19/14 | 21/18/14 | 23/20/14 | 22/19/15 | 22/19/14 |
| | 20/18/15 | | 12.18.2012 | 21/19/14 | 21/19/14 | 21/19/14 | 21/18/12 | 21/18/14 | 21/18/12 |
| | | | 4.11.2013 | 22/19/14 | 21/18/13 | 20/17/11 | 21/18/12 | 20/17/13 | 22/20/16 |
| 수분 ppm | 100ppm | | 8.16. 2012 | 118.73 | 104.77 | 114.43 | 111.69 | 125.64 | 121.00 |
| | 200ppm | | 12.18.2012 | 41.09 | 158.06 | 48.60 | 57.24 | 39.50 | 48.55 |
| | | | 4.11.2013 | 37.39 | 39.37 | 29.57 | 33.61 | 34.50 | 34.69 |
| Fe ppm | RDE | <150 | 8.16. 2012 | 21.5 | 17.0 | 13.4 | 38.7 | 6.8 | 8.7 |
| | | <300 | 12.18.2012 | 26.9 | 19.1 | 17.5 | 46.4 | 17.9 | 35.5 |
| | | | 4.11.2013 | 36.3 | 28.0 | 18.7 | 47.7 | 36.3 | 39.4 |
| | RFS | <300 | 8.16. 2012 | 2956.0* | 1188.0* | 544.0* | 2888.0* | 570.0 | 420.0 |
| | | <600 | 12.18.2012 | 610.0 | 400.0 | 372.0 | 618.0 | 730.0 | 660.0 |
| | | | 4.11.2013 | 588.0 | 208.0 | 322.0 | 378.0 | 336 | 312.0 |

표 2.6.22 KTX 8편성의 유 분석결과

| 항목 | | 관리기준 | | MRU | | | ARU | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 주의 | 위험 | 1A | 2B | 3B | 1A | 2B | 3B |
| PC(ISO) | | 18/16/13 | 20/18/15 | 21/17/12 | 25/23/17 | 24/22/15 | 22/19/14 | 22/19/12 | 22/19/14 |
| Fe | RDE | >150 | >300 | 6.9 | 55.9 | 13.8 | 7.0 | 10.4 | 9.7 |
| | RFS | >300 | <600 | 208 | 6758 | 2322 | 444 | 658 | 626 |
| 수분 | | >100 | >200 | 23.48 | 25.31 | 30.83 | 49.55 | 42.85 | 34.61 |
| 산가 | | >0.5 | >1.3 | 0.19 | 0.2 | 0.21 | 0.23 | 0.25 | 0.25 |

(2) 오일 열화 센서의 측정

오일 열화센서로 사용유를 측정하는 방법은 사용유를 100 mL 유리병 혹은 플라스틱 병에 채취하여 항온조에서 70℃로 1시간 가열한 후에 대기 중에서 냉각시키면서 센서를 사용유에 넣어 30분간 2분 간격으로 데이터를 측정하였고 측정결과의 평균치를 구하여 나타낸 것이 KTX 21편성이 표 2.6.23(센서 AH-1) 및 표2.6.24(센서 AH-2)이며, KTX 8편성이 표 2.6.25(센서 AH-1) 및 표 2.6.26(센서 AH-2)이다.

표 2.6.23 KTX 21편성의 센서 1 측정

| 항목 | 신유기준 | | 샘플 일시 | MRU | | | ARU | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 마모 | 수분 | | 1A | 2B | 3B | 1A | 2B | 3B |
| P40 2.1466 | 2.1383 | 2.1852 | 8.16 | 2.1513 | 2.1576 | 2.1507 | 2.1441 | 2.1603 | 2.1510 |
| | 2.1395 | 2..2711 | 12.18 | 2.1586 | 2.1549 | 2.1373 | 2.1221 | 2.1515 | 2.1503 |
| | | | 4.11 | 2.1003 | 2.1694 | 2.1689 | 2.1622 | 2.1556 | 2.1681 |
| 수분 RH20 | 60% | | 8.16 | 26 | 12 | 12 | 59 | 20 | 20 |
| | 80% | | 12.18 | 8 | 33 | 12 | 7 | 7 | 10 |
| | | | 4.11 | 34 | 37 | 35 | 32 | 38 | 35 |
| 산화 C40 277 | >283 | | 8.16 | 261. | 231. | 230 | 321 | 208 | 205 |
| | >2225 | | 12.18 | 228. | 220 | 201 | 204 | 160 | 198 |
| | | | 4.11 | 231 | 261 | 243 | 197 | 186 | 236 |

표 2.6.24 KTX 21 편성의 센서 2 측정결과

| 항목 | 관리 기준 | | 샘플링 일시 | MRU | | | ARU | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 마모 | 수분 | | 1A | 2B | 3B | 1A | 2B | 3B |
| P40 2.1114 | 2.1255 | 2.1388 | 8.16 | 2.1303 | 2.1244 | 2.1291 | 2.1347 | 2.1261 | 2.1105 |
| | 2.1274 | 2.1536 | 12.18 | 2.1370 | 2.1194 | 2.1082 | | 2.1274 | 2.1143 |
| | | | 4.11 | 2.1452 | 2.1369 | 2.1245 | 2.1282 | 2.1165 | 2.1292 |
| 수분 RH20 | 60% | | 8.16 | 40 | 29 | 29 | 55 | 24 | 24 |
| | 80% | | 12.18 | 25 | 33 | 22 | | 22 | 23 |
| | | | 4.11 | 34 | 39 | 38 | 39 | 41 | 36 |
| 산화 C40 277 | >571 | | 8.16 | 370 | 440 | 399 | 3020* | 392 | 391 |
| | >2717 | | 12.18 | 387 | 331 | 303 | | 271 | 296 |
| | | | 4.11 | 447 | 426 | 341 | 388 | 331 | 350 |

표 2.6.25 KTX 8 편성 센서 1 측정결과

| 항목 | | 관리기준 | | MRU | | | ARU | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 주의 | 위험 | 1A | 2B | 3B | 1A | 2B | 3B |
| 마모 | P40 | 2.1470 | 2.1487 | 2.2289 | 2.2239 | 2.1881 | 2.2257 | 2.2239 | 2.2292 |
| 수분 | P40 | 2.1852 | 2.2711 | 2.2289 | 2.2239 | 2.1881 | 2.2257 | 2.2239 | 2.2292 |
| | RH20 | >60 | >80 | 28 | 33 | 32 | 18 | 33 | 29 |
| 산화C40 | | 283 | 2225 | 157 | 129 | 132 | 119 | 142 | 129 |

표 2.6.26 KTX 8 편성 센서 2 측정결과

| 항목 | | 관리기준 | | MRU | | | ARU | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 주의 | 위험 | 1A | 2B | 3B | 1A | 2B | 3B |
| 마모 | P40 | 2.1255 | 2.1274 | 2.1848 | 2.1910 | 2.1567 | 2.1944 | 2.1466 | 2.1456 |
| 수분 | P40 | 2.1388 | 2.1536 | 2.1848 | 2.1910 | 2.1567 | 2.1944 | 2.1466 | 2.1456 |
| | RH20 | >60 | >80 | 21 | 31 | 28 | 31 | 33 | 34 |
| 산화C40 | | 571 | 2718 | 324 | 273 | 264 | 288 | 283 | 315 |

## 6. 윤활유 열화 모니터링 관리기준 설정

가. 감속기 기어유 열화 패턴 조사

기어유 열화 상태를 모니터링하기 위해서는 기어유의 열화 패턴을 알고 열화 패턴으로 부터 열화 감시 항목과 관리기준을 선정해야 한다. 이를 위해 KTX열차 감속기에 사용 중인 기어유와 사용 후 중정비단에서 교체된 사용유를 분석하였다.

먼저 감속기 기어유의 사용에 따른 기어유의 열화 현상을 알기 위해 2회에 걸쳐 18편성과 23편성 열차에서 감속기 기어유 사용유 시료를 각각 12개씩 채취하였다. 사용 시간(주행거리)에 따른 윤활유의 성상 변화를 파악하기 위해 15만킬로미터 사용한 18편성의 감속기유와 53만킬로미터 사용한 23편성 감속기유를 대상으로 선정하였다.

표 2.6.27 감속기 사용유 시료 정보

| 시료정보 | | | | | | 시료 성상 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 번호 | 열차 | 감속기 위치 | 감속기 S/N | 오일 사용 거리(km) | 오일 사용시작일 | 산가 [mgKOH/g] | 점도 [cSt] |
| 1 | 18편성 | 01A-M | 294 | 149,947 | '14.3.18. | 0.49 | 227.6 |
| 2 | 18편성 | 01A-A | 652 | 149,947 | '14.3.18. | 0.20 | 221.9 |
| 3 | 18편성 | 01B-M | 227 | 149,947 | '14.3.18. | 0.29 | 226.4 |
| 4 | 18편성 | 01B-A | 684 | 149,947 | '14.3.18. | 0.18 | 221.1 |
| 5 | 18편성 | 02A-M | 296 | 149,947 | '14.3.18. | 0.44 | 228.6 |
| 6 | 18편성 | 02A-A | 169 | 149,947 | '14.3.18. | 0.19 | 224.4 |
| 7 | 18편성 | 02B-M | 503 | 149,947 | '14.3.18. | 0.38 | 225.0 |
| 8 | 18편성 | 02B-A | 512 | 149,947 | '14.3.18. | 0.20 | 227.2 |
| 9 | 18편성 | 03A-M | 746 | 149,947 | '14.3.18. | 0.48 | 229.8 |
| 10 | 18편성 | 03A-A | 2 | 149,947 | '14.3.18. | 0.45 | 221.2 |
| 11 | 18편성 | 03B-M | 211 | 149,947 | '14.3.18. | 0.18 | 228.3 |
| 12 | 18편성 | 03B-A | 602 | 149,947 | '14.3.18. | 0.16 | 231.6 |
| 13 | 23편성 | 1A-M | 308 | 141,827 | '14.3.24. | 0.48 | 227.8 |
| 14 | 23편성 | 1A-A | 378 | 530,809 | '13.5.29. | 0.24 | 230.2 |
| 15 | 23편성 | 1B-M | 191 | 530,809 | '13.5.29. | 0.90 | 246.0 |
| 16 | 23편성 | 1B-A | 304 | 530,809 | '13.5.29. | 0.09 | 229.5 |
| 17 | 23편성 | 2A-M | 369 | 530,809 | '13.5.29. | 0.56 | 245.9 |
| 18 | 23편성 | 2A-A | 496 | 374,904 | '13.9.13. | 0.20 | 225.1 |
| 19 | 23편성 | 2B-M | 34 | 530,809 | '13.5.29. | 0.84 | 246.0 |
| 20 | 23편성 | 2B-A | 327 | 530,809 | '13.5.29. | 0.20 | 228.5 |
| 21 | 23편성 | 3A-M | 121 | 530,809 | '13.5.29. | 0.29 | 232.5 |
| 22 | 23편성 | 3A-A | 507 | 530,809 | '13.5.29. | 0.16 | 224.7 |
| 23 | 23편성 | 3B-M | 56 | 530,809 | '13.5.29. | 0.84 | 247.7 |
| 24 | 23편성 | 3B-A | 323 | 141,827 | '14.3.4. | 0.11 | 221.2 |

통상적으로 윤활유는 사용 기간이 늘어나면 산화되어 점도와 산가가 증가한다. 하지만 표 2.6.27과 그림 2.6.39에 나타난 바에 의하면 일부 사용유는 53만km 주행 후 점도가 약 10% 상승하고, 산가가 0.6~0.7 정도 증가하는 등 심하게 열화 되기도 하지만 일부 시료는 신유와 다름없는 성상을 보이고 있다. 이런 현상에는 다음 원인에 기인하는 것으로 보인다. 기어유가 정상적으로 사용되어도 오일이 크게 열화 되지 않는다는 것이다. 감속기에 따라 사용조건이 달라서 동일 주행 거리 53만킬로미터를 사용했지만 어떤 감속기에 사용된 오일은 성상이 양호하고, 다른 감속기에 사용된 오일은 심하게 열화되었을 수 있다. 이는 감속기 설치 위치에 따라 냉각 효율이 달라서 오일이 받는 열부하에 차이가 있거나 기어 회전수로 대표되는 사용 조건의 차이에 기인할 수 있다.

이를 확인하기 위해 사용유를 감속기 종류별 즉 모터측 감속기(MRU)와 차축측 감속기(ARU)로 나누어 기어유의 열화 패턴을 분석하였다. 그림 2.6.40와 그림 2.6.41에서 보면 MRU 기어유가 ARU 기어유에 비해 점도 및 산가 상승이 크다는 것을 알 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이 MRU와 ARU의 기어유는 사용조건이 다르며 이로 인해 기어유의 열화 패턴도 다름을 확인했다. MRU가 ARU에 비해 기어유의 사용 조건이 훨씬 가혹하다.

이를 근거로 볼 때 주행거리만으로 오일 교환주기를 결정하는 것은 낭비적인 요인이 있다. 교환주기가 60만킬로미터로 일률 적용하면 상태가 비교적 양호한 ARU 기어유도 일률적으로 교체되기 때문이다.

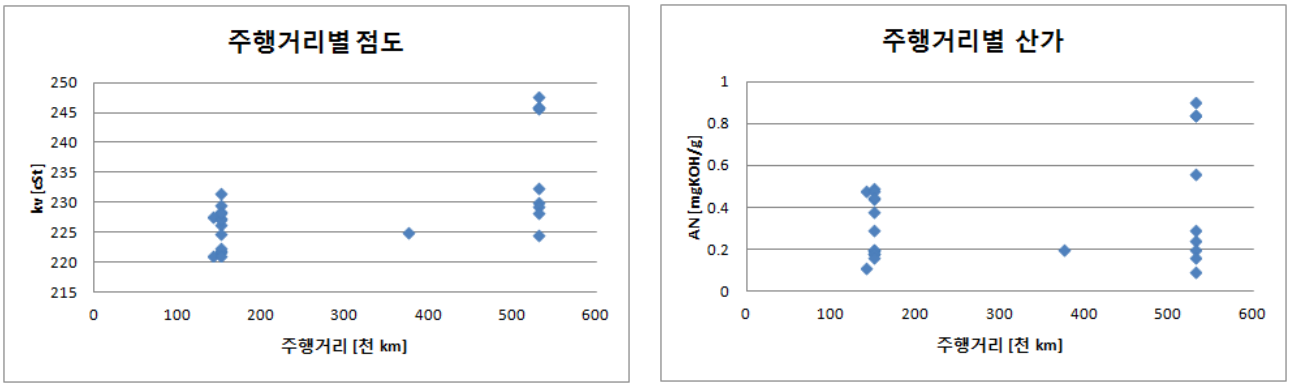



그림 2.6.39 주행거리별 감속기유 성상 추이

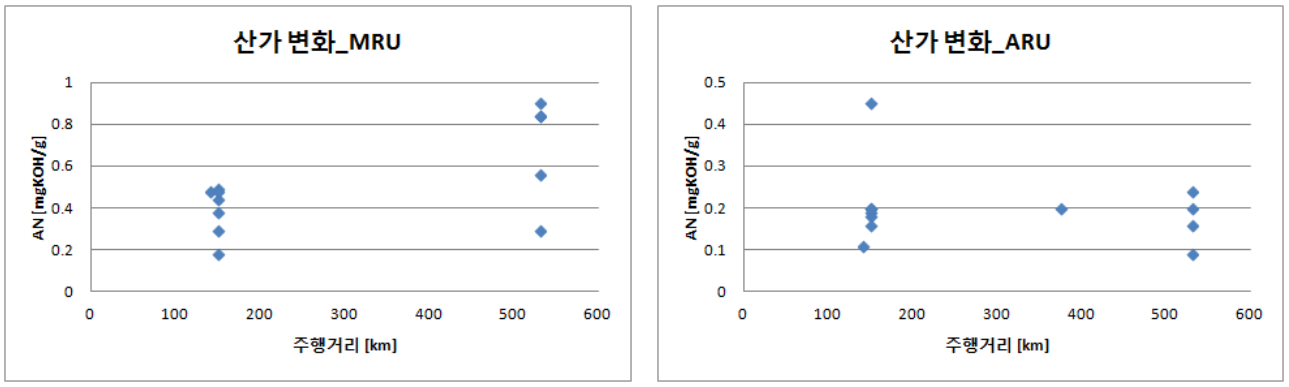
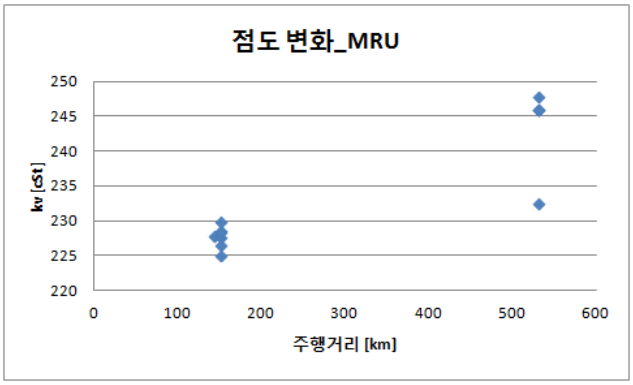



그림 2.6.40 감속기 종류별 주행거리에 따른 기어유 산가 추이



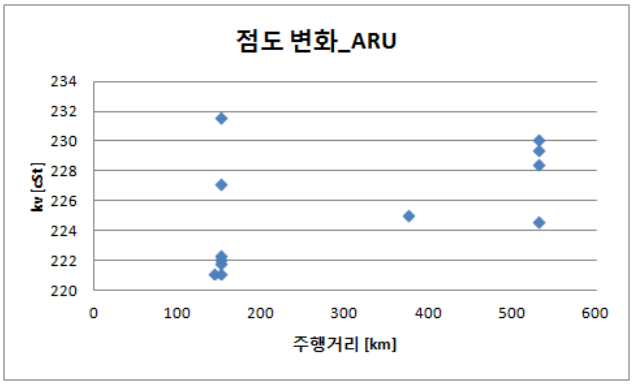




그림 2.6.41 감속기 종류별 주행거리에 따른 기어유 점도 추이

나. 감속기 기어유 관리 기준 설정

다음은 수도권철도중정비단에서 감속기의 정기 보수 시 교환된 오일을 이용하여 오일 성상과 센서의 측정값 간의 상관관계를 수립하였다.

사용유 시료 현황은 다음 표와 같다. 감속기가 3년간 사용되면서 수시로 윤활유가 교환되어 윤활유의 정확한 사용 기간은 알 수 없었다.

대신 감속기유의 경우 통상적으로 사용기간이 증가하면 산가와 점도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 실험실의 산화시험을 통해 확인할 수 있다. 오일이 산화되면서 산가와 점도가 증가한다. 일반적으로 윤활유의 열화 상태 모니터링하기 위해서 산가와 점도를 사용한다. 오일이 산화되면 즉 열을 받아 오일의 구성물질인 탄화수소가 산소와 결합하면 산성생성물이 생성되면서 산가(acid number)가 상승한다. 산가의 증가는 센서의 parameter를 모니터링할 수 있다. 산가 모니터링을 위한 센서 파라미터로는 상대 유전율(relative Permittivity)와 전기전도도를 사용한다.

유체의 상대 유전률은 그 유체의 극성(Polarity)의 척도이다. 기유와 첨가제 패키지의 화학적인 상이함과 제조자의 차이 때문에 극성에서 차이가 생긴다. 극성과 극성-온도 곡선은 어떤 경계조건들, 배치(batch) 간의 변동을 고려한 상태에서, 이와 같이 부정확한 유종, 오일의 혼합 및 오일의 보충 등을 확인하는 데 사용될 수 있다.

윤활유는 대부분 열화의 과정 중에 극성이 변한다. 극성의 변화를 감지할 수 있다면 윤활유의 열화과정을 감시할 수 있다. 상대 유전률의 측정 범위는 1 ~ 7 사이이다.

상대 유전률은 온도 의존성이기 때문에, 센서가 40℃ 기준온도로 내부적으로 변환을 수행한다. 온도구배 변환을 수행할 때, 이 매개변수는 위에 언급된 대로 유를 특성화 짓는 데 사용될 수 있는 하나의 부가적인 가치로서 사용된다.

윤활유는 신유 상태에서 각 오일마다 고유의 전기전도도를 나타낸다. 전기전도도는 제조상의 차이 때문에 오일마다 다르므로, 오일을 구분하는 하나의 기준이 될 수 있다. 그러나 전기전도도에 근거해서 오일을 구분하기 위해서는 특정 온도에서 전기전도도가 현저히 차이가 나거나 혹은 온도 변화에 따른 전기전도도의 변화가 현저히 하여야 한다.

그 외에도 전기전도도는 외부 이물질(고체/액체)의 혼입을 감지할 수 있다. 이는 주어진 온도에서 전기 전도도의 변화나 온도의 함수로서 전기전도도의 변화가 발생했을 경우이다. 윤활유 교환, 윤활유 혼합 및 오염 등이 이와 같이 규정된 경계조건들 하에서 전기전도도에 근거해서 감지될 수 있다. 단, 배치(batch)간의 변화 및 오일 열화는 전기 전도도 상에 충격을 준다는 것을 또한 고려해야 한다.

전기전도도는 윤활유의 다양한 열화의 결과에 따라 변화하기 때문에 전기전도도의 변화를 근거로 윤활유의 열화 곡선을 추적할 수 있다. 전기 전도도 측정 범위는 <100 ~ 800,000 pS/m에 걸쳐 있다.

전기 전도도는 온도 의존성이 높기 때문에, 센서가 40℃ 기준온도로 내부적으로 변환을 수행한다. 온도구배 변환을 수행할 때, 이 매개변수는 위에 언급된 대로 유를 특성화 짓는 데 사용될 수 있는 하나의 부가적인 가치로서 사용된다.

감속기 기어유 사용유의 열화 정도를 센서로 측정하기 위해 수집한 사용유는 총 28개이며 시료 정보와 윤활유 분석결과는 다음 표 2.6.28과 같다. 사용유의 분석결과를 보면 산가(Acid Number)가 0.14mgKOH/g에서부터 1.26mgKOH/g까지 분포되어 있고, 점도(동점도 40℃)는 224.4cSt에서 248.3cSt까지 분포되어 있다. 신유의 산가는 0.21mgKOH/g이며 점도는 230.7cSt이므로 산가는 신유대비 −0.06 ~ 1.06 의 변화가 있었고, 점도는 신유 대비 −2.8%에서 7.6%점도 변화가 있다(표 2.6.29).

점도가 신유 보다 감소한 것은 기어의 고속 운전조건에서 기유가 전단되어 분자량이 줄어들었기 때문이다. 일정량 감소했던 점도는 오일의 산화로 다시 증가한다. 전산가는 신유일 때는 주로 첨가제에 의해 나타나는데 윤활유가 기계 장치에 주입되면 일부 첨가제가 기계 부품의 표면에 달라붙어 오일에서 소모되기 때문에 줄어든다. 오일이 산화되면 다시 증가하는 경향을 보인다.

표 2.6.28 사용유 시료 정보 및 오일 성상

| 시료 정보 | | | | | 시료 성상 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 번호 | 시료수거일 | 열차 번호 | 감속기 번호 | 감속기 주행거리 [천km] | 산가 [mgKOH/g] | 점도 [cSt] |
| 1 | 2014.5 | K13B23B | 237 | 750 | 0.20 | 227.8 |
| 2 | 2014.5 | K04 | 748 | 700 | 0.21 | 225.3 |
| 3 | 2014.5 | K24B023 | 563 | 500 | 0.44 | 240.2 |
| 4 | 2014.5 | K12B03B | 185 | 1,600 | 0.87 | 246.1 |
| 5 | 2014.5 | KTX36호 | 002 | 1,800 | 0.18 | 230 |
| 6 | 2014.5 | KTX24호 | 017 | 1,000 | 0.57 | 241.1. |
| 7 | 2014.5 | K08B02B | 465 | 750 | 0.28 | 224.4 |
| 8 | 2014.5 | K07B23A | 269 | 950 | 1.02 | 244.2 |
| 9 | 2014.5 | K23B03A | 453 | 800 | 0.80 | 248.3 |
| 10 | 2014.5 | K20B02A | 257 | 690 | 0.20 | 228.3 |
| 11 | 2014.5 | KTX13B01A | 289 | 1,100 | 0.25 | 229.3 |
| 12 | 2014.5 | K09B03A | 261 | 1,000 | 0.84 | 247.1 |
| 13 | 2014.5 | KTX21호 | 737 | 1,800 | 0.36 | 237.5 |
| 14 | 2014.5 | K01B21B | 355 | 950 | 0.85 | 245.6 |
| 15 | 2014.5 | K22B22A | 114 | 1,100 | 1.05 | 244.8 |
| 16 | 2014.5 | K22B21B | 012 | 850 | 1.1 | 245.8 |
| 17 | 2014.5 | | 361 | 500 | 0.21 | 228.8 |
| 18 | 2014.5 | K36 | 567 | 1,800 | 1.05 | 247.4 |
| 19 | 2014.7 | | 424 | | 0.48 | 234.4 |
| 20 | 2014.7 | K09B03B | 272 | 1,470 | 1.24 | 248.0 |
| 21 | 2014.7 | | 207 | | 1.26 | 244.6 |
| 22 | 2014.7 | K10B01A | 285 | 1,800 | 0.46 | 237.5 |
| 23 | 2014.7 | | 92 | 159 | 0.21 | 233.3 |
| 24 | 2014.7 | K09B03A | 525 | 208 | 0.23 | 235.5 |
| 25 | 2014.7 | | 127 | 430 | 0.14 | 232.7 |
| 26 | 2014.7 | K08B22B | 233 | 560 | 0.27 | 230.8 |
| 27 | 2014.7 | | 201 | 578 | 1.01 | 247.0 |
| 28 | 2014.7 | K22B22A | 046 | 160 | 0.25 | 229.6 |

표 2.6.29 기어유 성상 변화

| | 산가 [mgKOH/g] | 산가 변화 [mgKOH/g] | 점도 [cSt] | 점도 변화 [%] |
|---|---|---|---|---|
| 신유 | 0.20 | | 230.7 | |
| 최대 | 1.26 | 1.06 | 248.3 | +7.6% |
| 최소 | 0.14 | −0.06 | 224.4 | −2.8% |

표 2.6.30 센서 측정 조건

| 항목 | 내용 |
|---|---|
| 측정 온도 | 25±1℃ |
| 측정 시간 | 40 – 50분 |
| 데이터 저장 간격 | 1분 |
| 세부 측정 절차 | – 1리터 시료병에 700 ml 사용유를 담은 후 2회에 걸쳐 센서의 파라미터를 측정함<br>– S1과 S2 동시 측정, LS1, LS2, LS3 동시 측정<br>– 측정 간에 석유에테르 센서 세척<br>– 하이퍼 터미널 통신으로 해당 데이터 값 액셀 파일로 다운로드. |

기어유 사용유의 산가 변화에 따른 상대 유전율과 전기전도도의 상관관계를 파악하기 위해 사용유 28종에 대해 센서로 상대유전율과 전기전도도 및 습도 온도 등 오일 파라미터를 측정하였다. 측정 방법은 표 2.6.30과 같고, 측정 결과는 표 2.6.31과 그림 2.6.42에 나타내었다.

열화 센서의 모니터링 관리기준은 윤활유 분석 관리기준을 근거로 정하였다. 먼저 기어유의 열화 경향을 모니터링하는 항목으로 산가를 선정했다. 감속기 주행거리가 증가하면 기어유가 산화되면서 산가가 증가한다. 통상적으로 산가가 신유 대비 0.5 증가하면 “주의” 판정을 하고 신유 대비 1.0을 증가하면 “경고” 판정을 내린다. 주의는 윤활유의 상태가 신유처럼 양호하지는 않지만 당장 교환해야 할 정도로 나쁜지는 않은 수준이다. 경고는 즉각 오일을 교환해야 할 정도로 오일 상태가 좋지 않음을 보여 주다. 주의 단계에서는 다른 오일 관리 항목에 대한 시험 결과 등을 종합하여 판정한다.

윤활유 산가와 상관관계가 있는 것으로 판명된 상대 유전율과 전기전도도의 관리 기준을 감속기 기어유의 사용유 분석과 센서 파라미터 측정을 통해 구하였다.

그림 2.6.42를 보면 산가가 증가함에 따라 상대유전율과 전기전도도가 증가함을 알 수 있다. 상대유전율과 전기전도도의 경우 측정 시의 온도에 따라 값이 변하는 온도 의존성이 있다. 하지만 28종 시료의 경우 25±1℃의 일정한 온도에서 측정하여 온도 보상한 P40 또는 C40을 사용하지 않고도 산가의 변화에 따른 오일 파라미터의 변화를 파악할 수 있다.

표 2.6.31 감속기 사용유 시료 정보 및 오일 파라미터(LS3 센서)

| 오일 사용 정보 | | | 오일 성상 | | 센서 측정 오일 파라미터 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 열차 번호 | 감속기 번호 | 감속기 주행거리 [천km] | 산가 [mgKOH /g] | 점도 @40℃ [cSt] | T [℃] | P | P40 | C [pS/m] | C40 [pS/m] | RH [%] | H20 [%] |
| K24B023 | 563 | 500 | 0.44 | 240.2 | 24.72 | 2.88505 | 2.264508 | 143.81 | 207.93 | 50.92 | 52.33 |
| K12B03B | 185 | 1,600 | 0.87 | 246.1 | 25.05 | 2.390886 | 2.370964 | 827.78 | 1367.51 | 89.83 | 91.35 |
| KTX36호 | 002 | 1,800 | 0.18 | 230 | 24.28 | 2.220218 | 2.2035 | 60.5 | 101 | 51.96 | 53.23 |
| KTX24호 | 017 | 1,000 | 0.57 | 241.1. | 24.15 | 2.291808 | 2.269359 | 162.95 | 260.15 | 50.45 | 51.67 |
| K08B02B | 465 | 750 | 0.28 | 224.4 | 24.84 | 2.247667 | 2.228466 | 117.86 | 172.02 | 51.32 | 52.67 |
| K07B23A | 269 | 950 | 1.02 | 244.2 | 25.08 | 2.33771 | 2.317814 | 230.91 | 379.65 | 49.42 | 50.93 |
| K23B03A | 453 | 800 | 0.80 | 248.3 | 23.31 | 2.306432 | 2.27953 | 158.84 | 255.52 | 48.95 | 49.95 |
| K20B02A | 257 | 690 | 0.20 | 228.3 | 23.8 | 2.259267 | 2.240407 | 158.89 | 258.56 | 52.91 | 54.04 |
| K13B01A | 289 | 1,100 | 0.25 | 229.3 | 24.7 | 2.239778 | 2.224788 | 88.25 | 155.98 | 52.67 | 54.1 |
| K09B03A | 261 | 1,000 | 0.84 | 247.1 | 25.11 | 2.306627 | 2.262514 | 251.22 | 359.94 | 49.66 | 51.22 |
| KTX21호 | 737 | 1,800 | 0.36 | 237.5 | 25.01 | 2.301497 | 2.273645 | 205.82 | 259.32 | 48.34 | 49.84 |
| K01B21B | 355 | 950 | 0.85 | 245.6 | 24.28 | 2.320191 | 2.293576 | 247.96 | 358.46 | 47.94 | 49.21 |
| K22B22A | 114 | 1,100 | 1.05 | 244.8 | 23.55 | 2.316762 | 2.288897 | 206.72 | 314.15 | 47.88 | 48.96 |
| K22B21B | 012 | 850 | 1.1 | 245.8 | 25.28 | 2.307354 | 2.278229 | 193.49 | 252.63 | 46.49 | 48.03 |
| | 361 | 500 | 0.21 | 228.8 | 23.98 | 2.11352 | 2.195316 | 76.89 | 122.98 | 51.11 | 52.3 |
| K36 | 567 | 1,800 | 1.05 | 247.4 | 25 | 2.32594 | 2.281636 | 280.12 | 397.38 | 48.09 | 49.59 |
| | 424 | | 0.48 | 234.4 | 25.1 | 2.215794 | 2.182728 | 111.58 | 174.48 | 54.1 | 55.62 |
| K09B03B | 272 | 1,470 | 1.24 | 248.0 | 25.19 | 2.312837 | 2.269122 | 242.59 | 341.65 | 50.26 | 51.81 |
| | 207 | | 1.26 | 244.6 | 24.54 | 2.31288 | 2.265656 | 216.58 | 309.05 | 50.49 | 51.87 |
| K10B01A | 285 | 1,800 | 0.46 | 237.5 | 25.05 | 2.289085 | 2.244878 | 263.73 | 378.5 | 52.96 | 54.48 |
| | 92 | 159 | 0.21 | 233.3 | 25.25 | 2.245423 | 2.217259 | 137.43 | 197.74 | 51.4 | 52.94 |
| K09B03A | 525 | 208 | 0.23 | 235.5 | 24.33 | 2.275974 | 2.23233 | 123.14 | 192.85 | 55.22 | 56.5 |
| | 127 | 430 | 0.14 | 232.7 | 25.37 | 2.255794 | 2.231487 | 122.93 | 169.36 | 51.15 | 52.74 |
| | 201 | 578 | 1.01 | 247.0 | 24.83 | 2.33684 | 2.28792 | 322.48 | 428.4 | 49.35 | 50.79 |
| K22B22A | 046 | 160 | 0.25 | 229.6 | 25.36 | 2.267731 | 2.242543 | 126.75 | 171.49 | 52.92 | 54.51 |

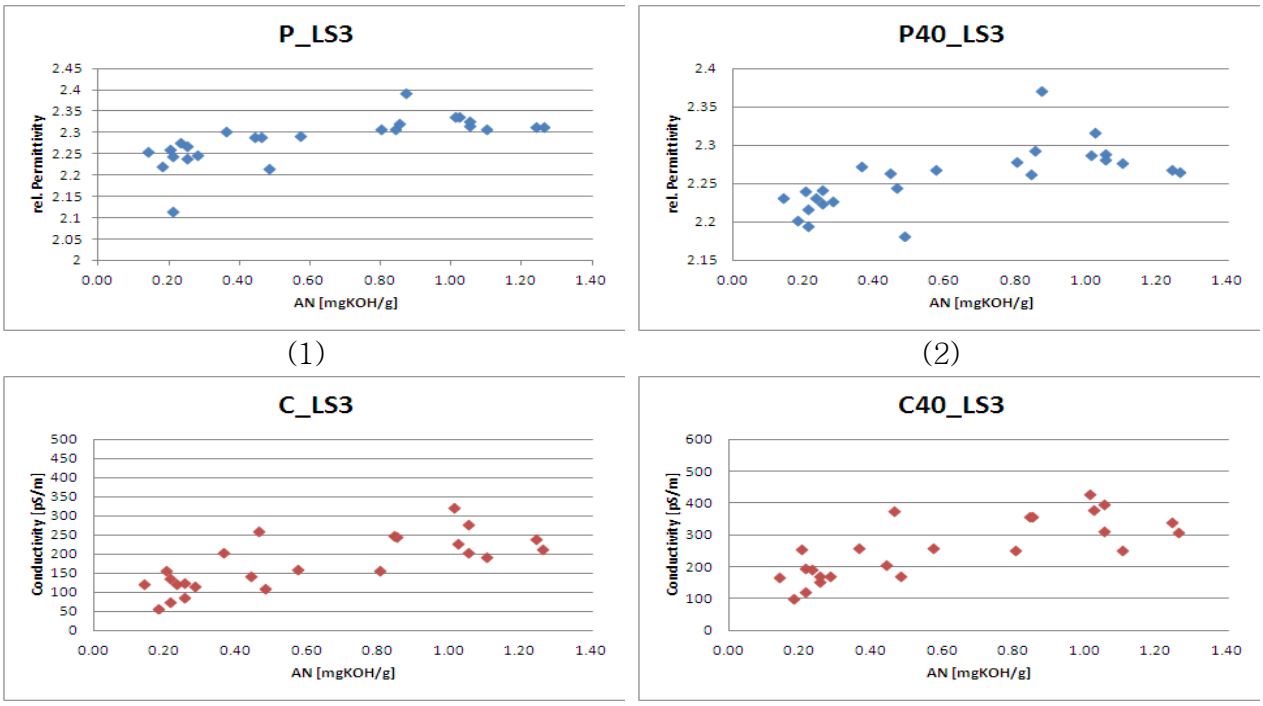



그림 2.6.42 사용유의 산가 변화에 따른 파라미터 추이

사용유의 전산가 변화에 따른 상대 유전율 및 전기전도도의 추이를 근거로 사용유의 관리 기준을 표 2.6.32와 같이 정하였다.

오일 열화센서의 모니터링 관리한계치는 오일 분석 관리한계치를 기준으로 센서 측정치와의 상관성 그래프를 이용하여 산출하고, 열화에 대해서 관리한계치를 설정하였다. 하지만 각기 사용 환경이 다른 사용유 시료를 채취하여 센서로 실험실에서 오일 파라미터를 측정하는 과정을 거쳤기 때문에 관리 기준 설정에서 명확한 구분을 짓기는 어려운 점은 있었다.

파라미터가 주의 기준을 넘으면 오일의 상태가 나빠지고 있으며 상태 악화 예방을 더 짧은 주기의 일상 모니터링과 실험실적 오일 분석이 필요하다. 경고 값을 넘으면 오일 열화로 인한 기계적 손상이 우려되어 즉각 오일을 교체하는 것이 좋다.

실험실에서 성능 실험을 통해서 산화 조건을 시뮬레이션 실험하고, 실제 사용유에 대해 오일 파라미터를 측정했을 때, 오일 파라미터와 오일 열화간에 일정한 상관성을 보이지만 실제 감속기 사용조건에서는 철분마모, 수분오염, 산화반응이 복합적으로 진행된다. 따라서 실제 사용 조건에서 센서를 설치하고 오일의 주입 시부터 교환 때까지 생애 주기로 오일 파라미터를 모니터링하면서 관리 기준을 미세 조정하는 과정이 필요하다. 센서를 KTX 실차 감속기에 설치한 후 정상 운전상태에서 신유학습을 통한 신유 기준치 설정과 이를 종합한 열화진행도와 실차시험에서 오일의 사용한계를 종합하여 오일 상태를 판정하게 하는 것이다.

표 2.6.32 열화오일 상태 관리 기준 열화 센서의 관리 기준

| | 주의 | 경고 |
|---|---|---|
| 상대유전율 P40 | 2.25 | 2.30 |
| 전기전도도 C40 [pS/m] | 300 | 400 |
| 상대습도 H20 [%] | 75 | 95 |

다. 실물 감속기 시험

고속철도용 감속기 다이나모미터 활용하여 실제 사용 환경 모사조건에서 윤활유 열화 감지 센서의 정상 작동을 점검하고 센서의 데이터 수집 시스템의 정상 작동 확인하며 감속기 상태 점검 위한 센서 파라미터 활용 방안 연구하기 위해 실물 감속기를 활용하여 센서의 오일 파라미터 측정시험을 실시하였다.

(1) 1차 시험

▷ 시험일 – 2014. 6.12. ~ 13.

▷ 시험내용

- 센서 Lubcos Level 200를 MRU 감속기 주유구에 장착하고 감속기를 사전에 정한 모드로 운전하며 오일 파라미터를 센서 통해 수집하였다
- 센서 데이터 정밀도 점검 위해 동일 모드로 2회 시험하였다

▷ 운전 조건

- 시험 시간: 80분
- 동일 시험 조건 확보 위해 시험 간에 감속기 기어 박스의 온도를 동일하게 맞추어 시험 시작하였다.
- 시험 기어 속도와 운전조건은 그림 2.6.43와 그림 2.6.44엔 나타내었다
- 그림 2.6.43: 1차 시험
- 그림 2.6.44: 2차 시험

▷ 시험 결과

- 각 센서 측정 오일 파라미터를 상대유전율, 전기 전도도 등 파라미터 별로 그래프로 그려 그림 2.6.45, 그림2.6.46에 나타내었다.
- 감속기유 열화 모니터링으로 감속기 가동 중에 오일 parameter 측정 및 데이터 수집을 정상적으로 수행할 수 있음을 확인하였다.
- 센서로 측정한 oil parameter는 감속기의 회전 속도에 직접적인 영향을 받지 않았고, 오히려 감속기 운전 모드에 따라 변하는 오일 온도에 영향을 받는다.
- 감속기의 운전 중에 회전수의 감소와 같은 급작스런 운전 조건의 변동을 오일 파라미터로 추정할 수 있다 .

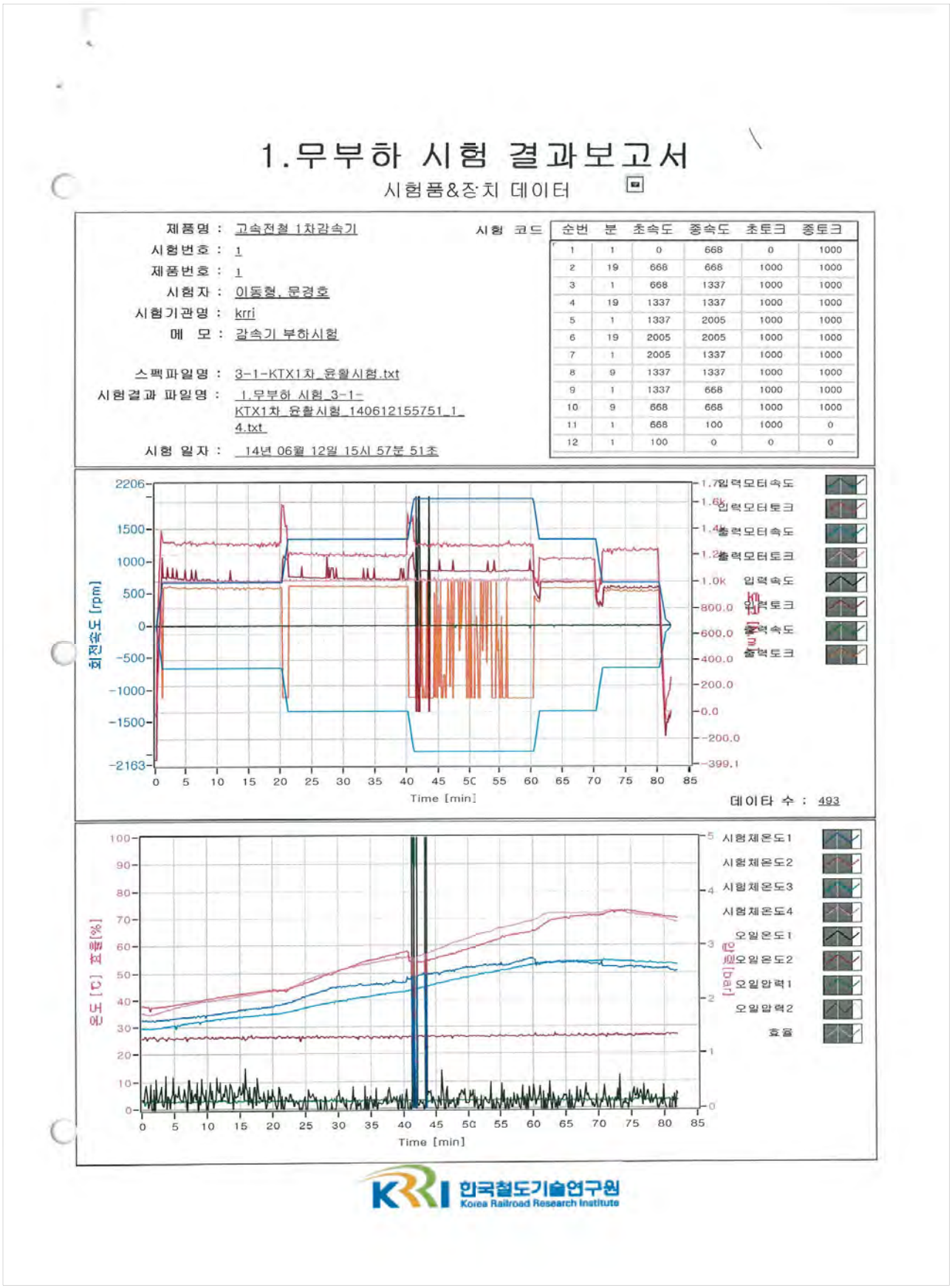



그림 2.6.43 실물 감속기 시험 모드(1_1차)

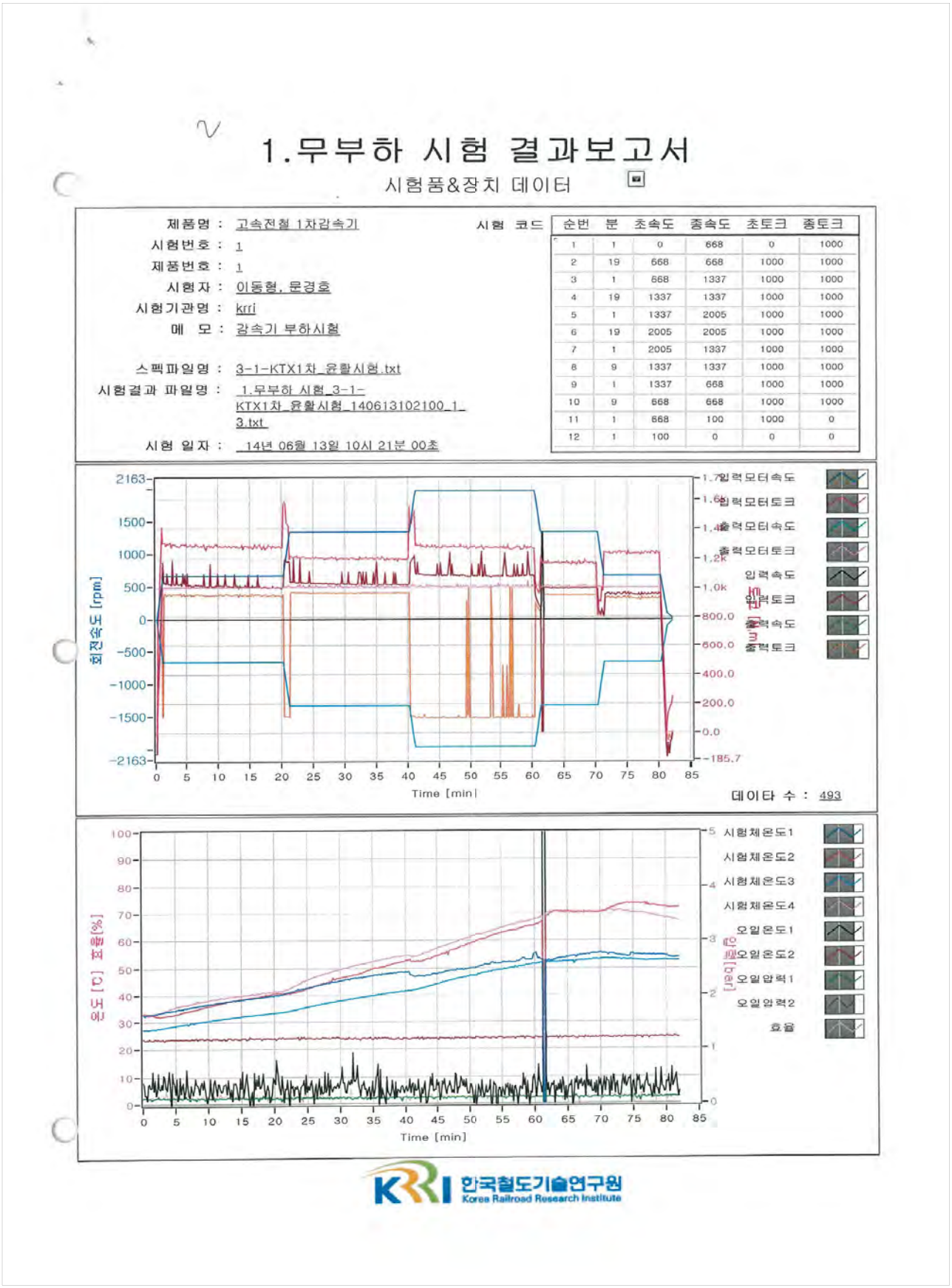
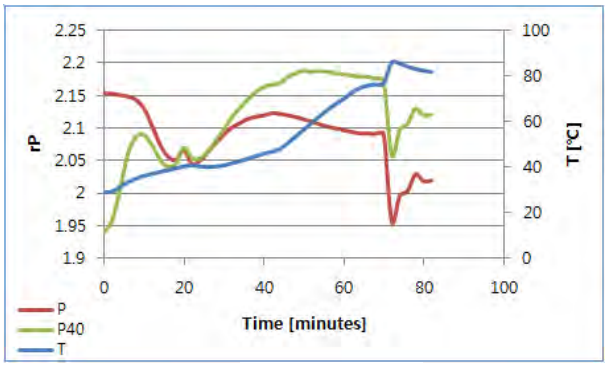
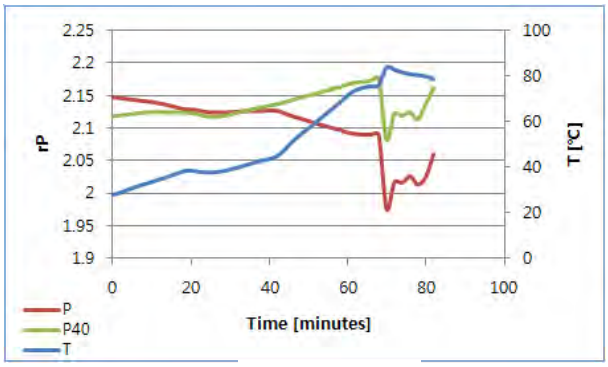



그림 2.6.44 실물 감속기 시험 모드(1_2차)

rel. Permittivity

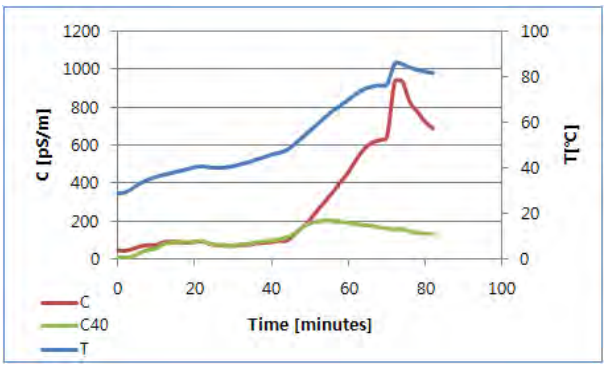



( 1 )

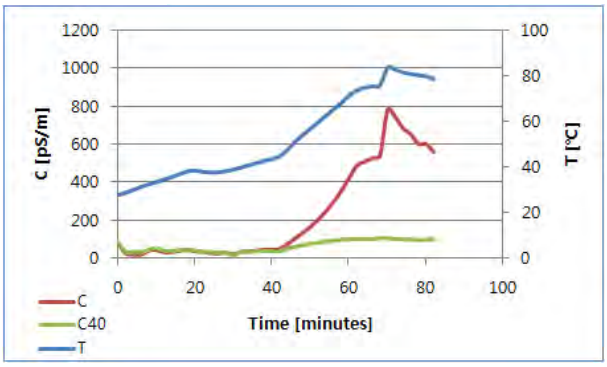



( 2 )

Conductivity

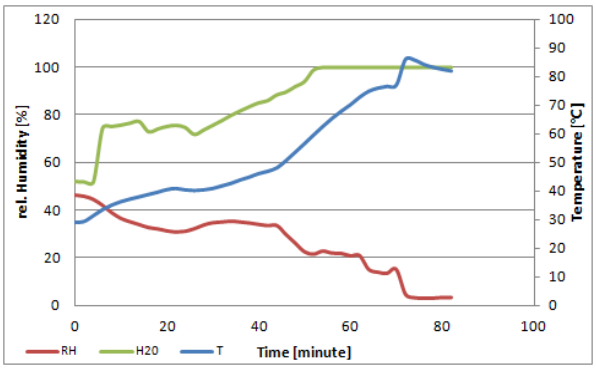



( 3 )

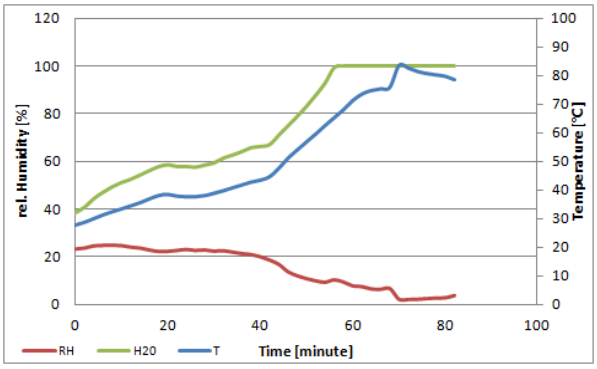



( 4 )

relative Humidity

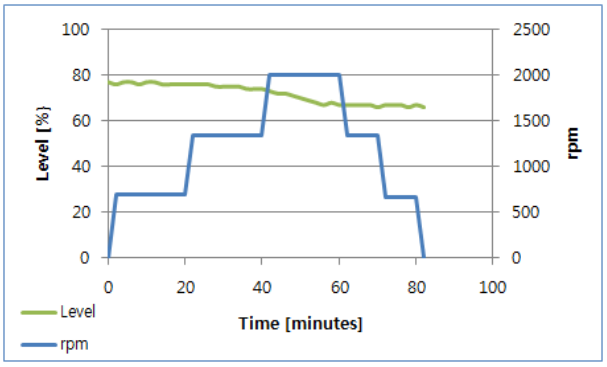



( 5 )

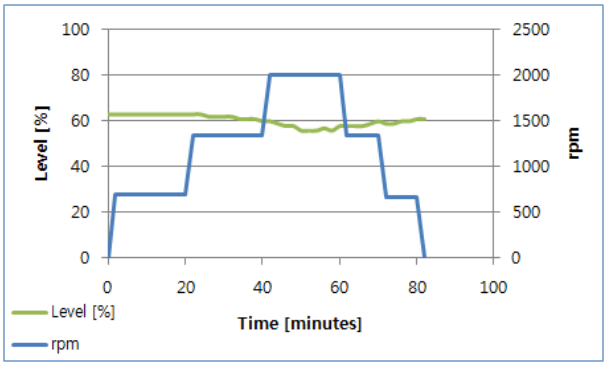



( 6 )

Oil Level



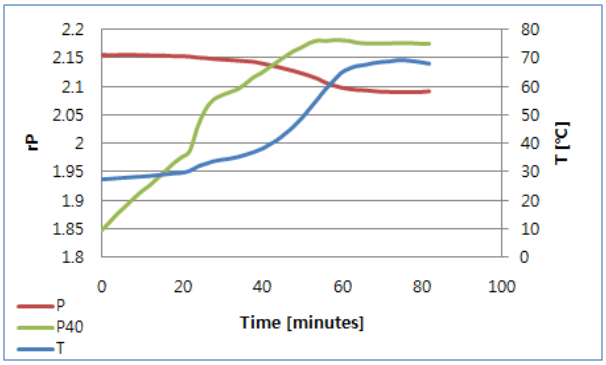

( 7 )



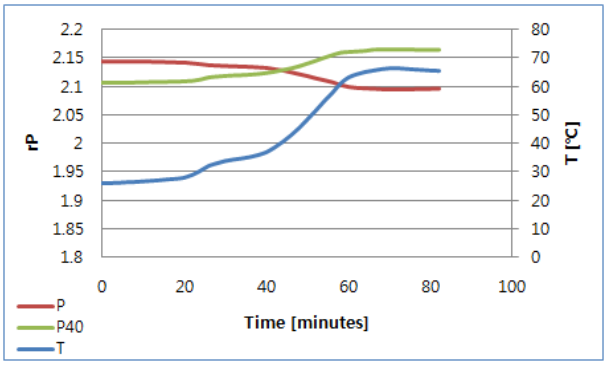

( 8 )

그림 2.6.45 실물 감속기 시험에서 오일 파라미터 변화(열화 센서 LS2)

rel. Permittivity

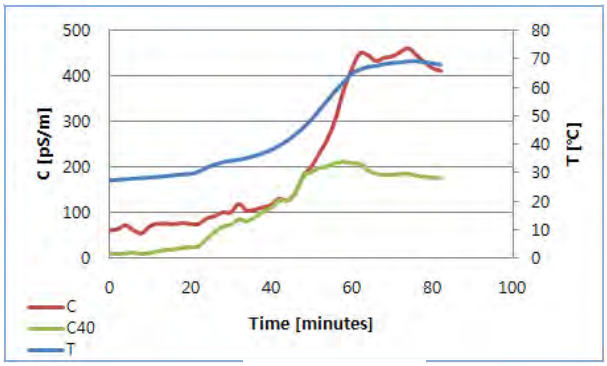



( 1 )

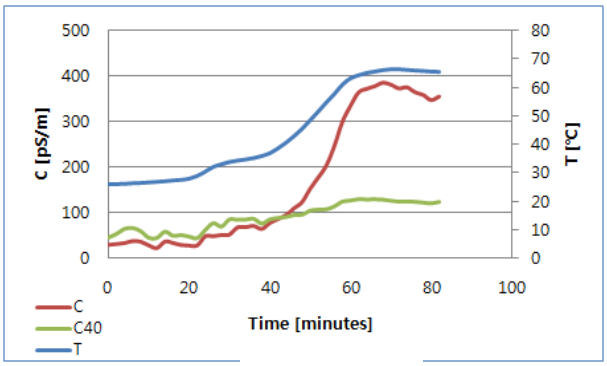



( 2 )

Conductivity

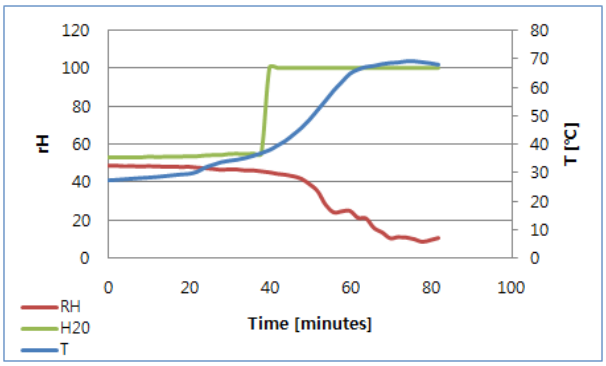



( 3 )

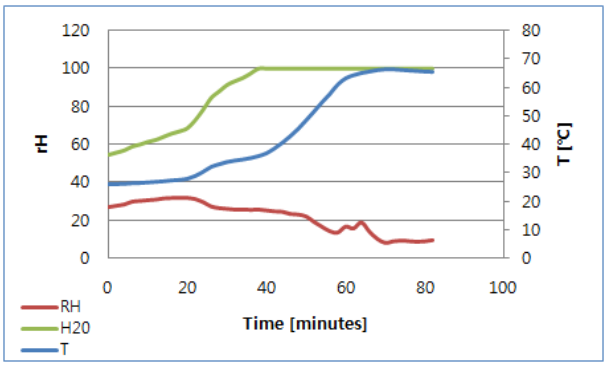



( 4 )

relative Humidity

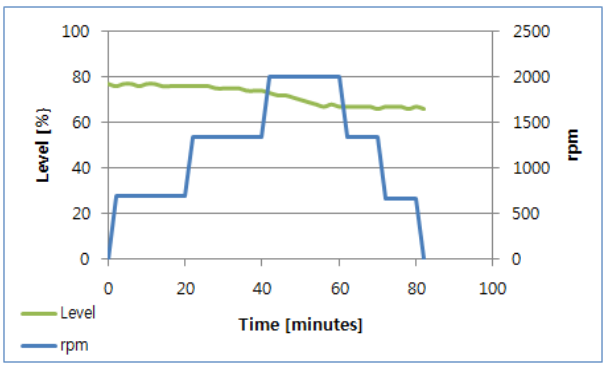



( 5 )

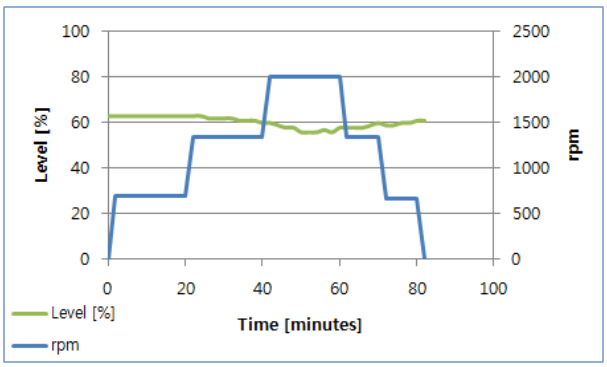



( 6 )

Oil Level




( 7 )




( 8 )

그림 2.6.46 실물 감속기 시험에서 오일 파라미터 변화(열화 센서 LS3)

(가) 2차 테스트

▷ 목적

- 고속철도용 감속기 다이나모미터  활용 실제 사용환경 모사조건에서 윤활유 열화 감지 센서의 작동 시험
- 감속기 정속 주행 하에서 오일 파라미터의 변화 추이 관찰
- 감속기 정지, 주행 간의 오일 파라미터 변화 폭 측정

▷ 시험일

- 2014. 9.11.~12. 9.19.

▷ 시험내용

- 센서 Lubcos Level 200를 MRU 감속기 주유구에 장착하고 운전하며 오일 파라미터를 센서 통해 수집
- 1차: 정속 주행(KTX의 최고 주행 속도 모사)
- 2차: 오일 온도 일정 유지
- 3차: 센서가 오일 환경에 충분히 접촉 후 측정 감도 확인 시험

▷ 운전 조건

- 시험 시간: 80분
- 동일 시험 조건 확보 위해 시험간 기어 박스 온도 일치
- 시험 프로파일: 그림 2.6.47, 그림 2.6.48, 그림 2.6.49, 그림 2.6.50

▷ 시험 결과

- 그림 2.6.51, 그림 2.6.52, 그림 2.6.53에 나타냄
- 3회의 각기 다른 시험모드에서 온도 보상된 상대유전율(P40)과 전기전도도(C40)는 온도 변화가 있음에도 안정된 값을 보임
- 온도 보상 상대 습도(H20)의 경우도 센서가 오랜 기간 오일과 접하고 충분한 온도 변화를 접한 후인 3차 시험부터 정상적인 값을 보이기 시작함.

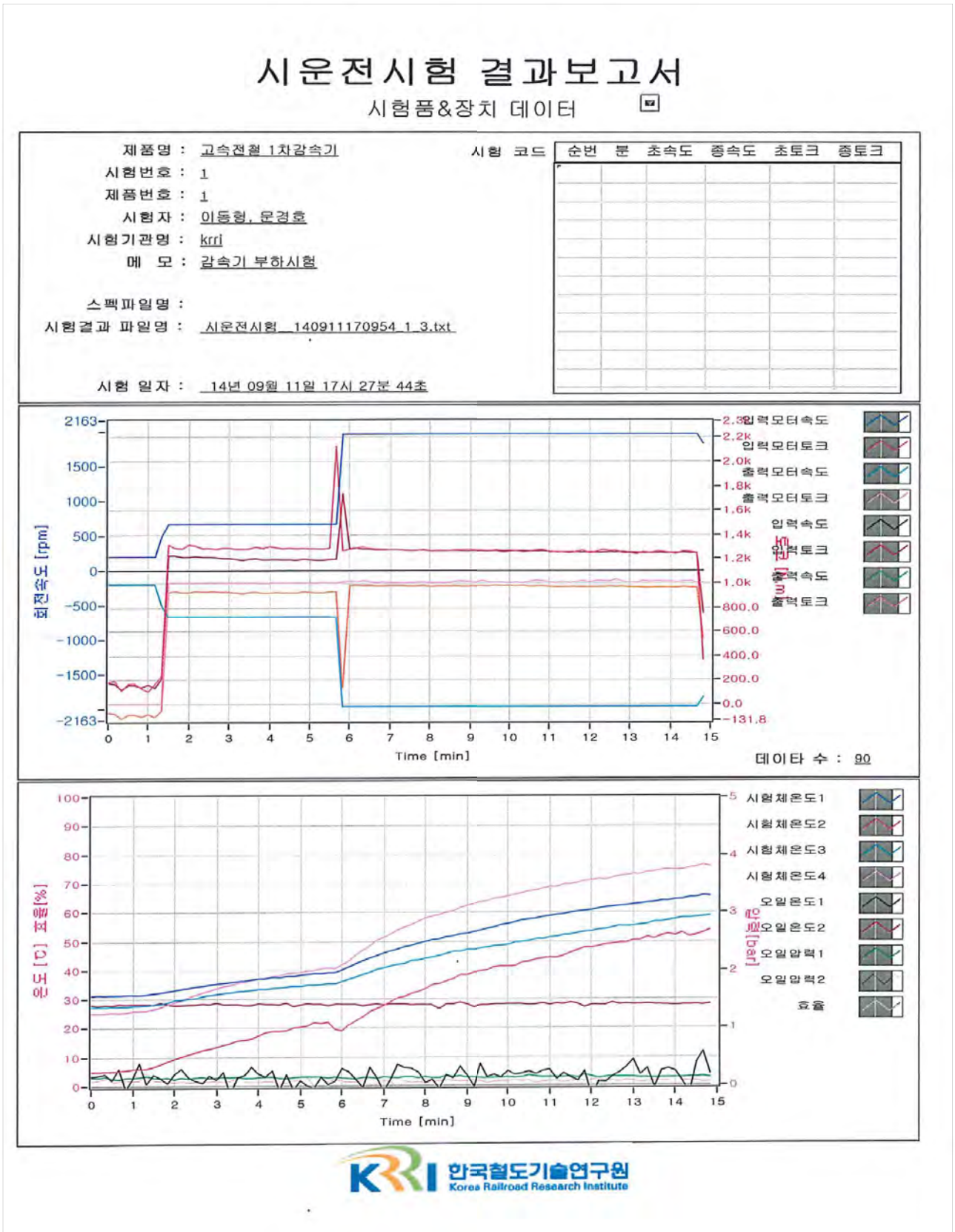



그림 2.6.47 실물 감속기 시험 모드(1차)

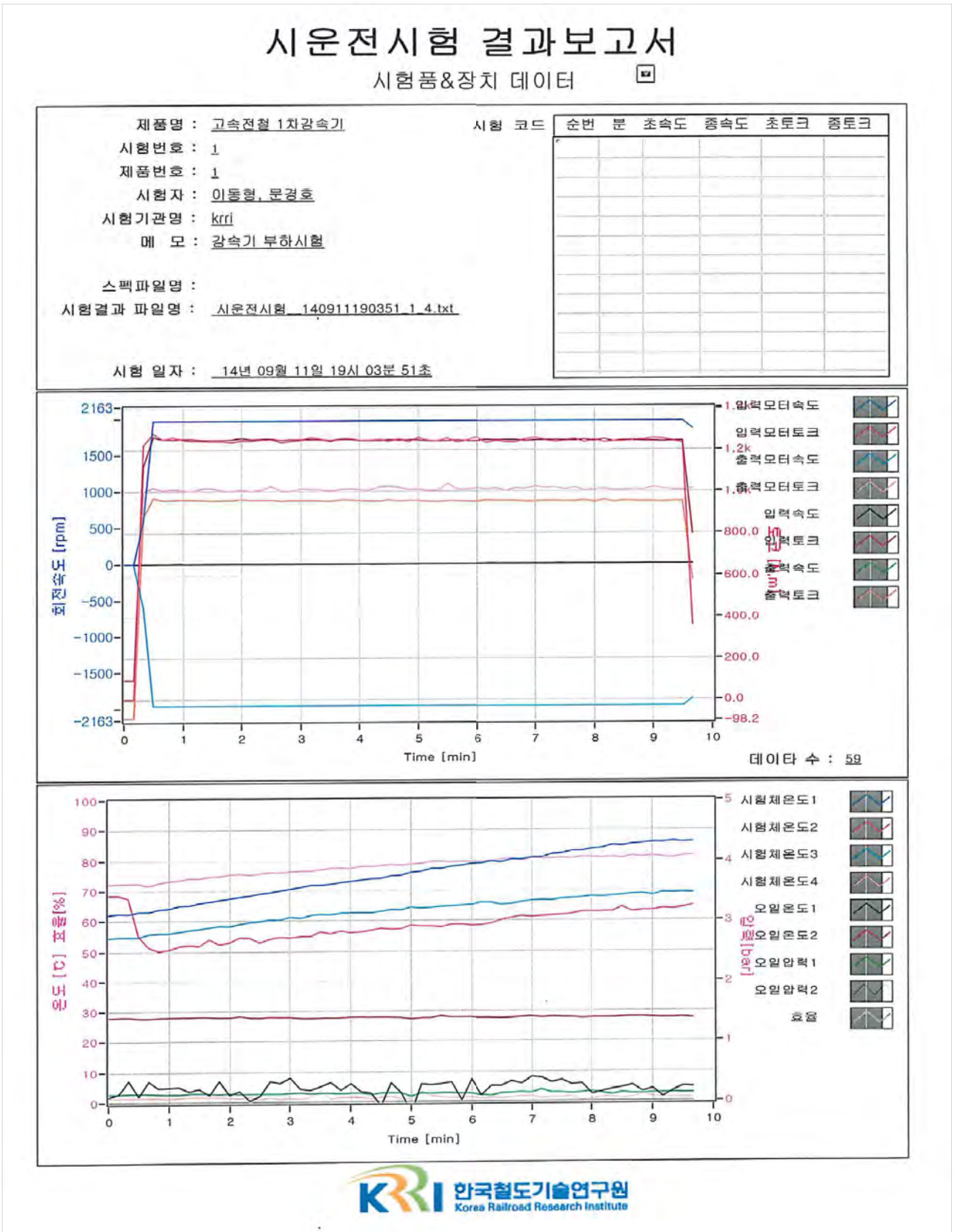



그림 2.6.48 실물감속기 시험모드(1차 계속)

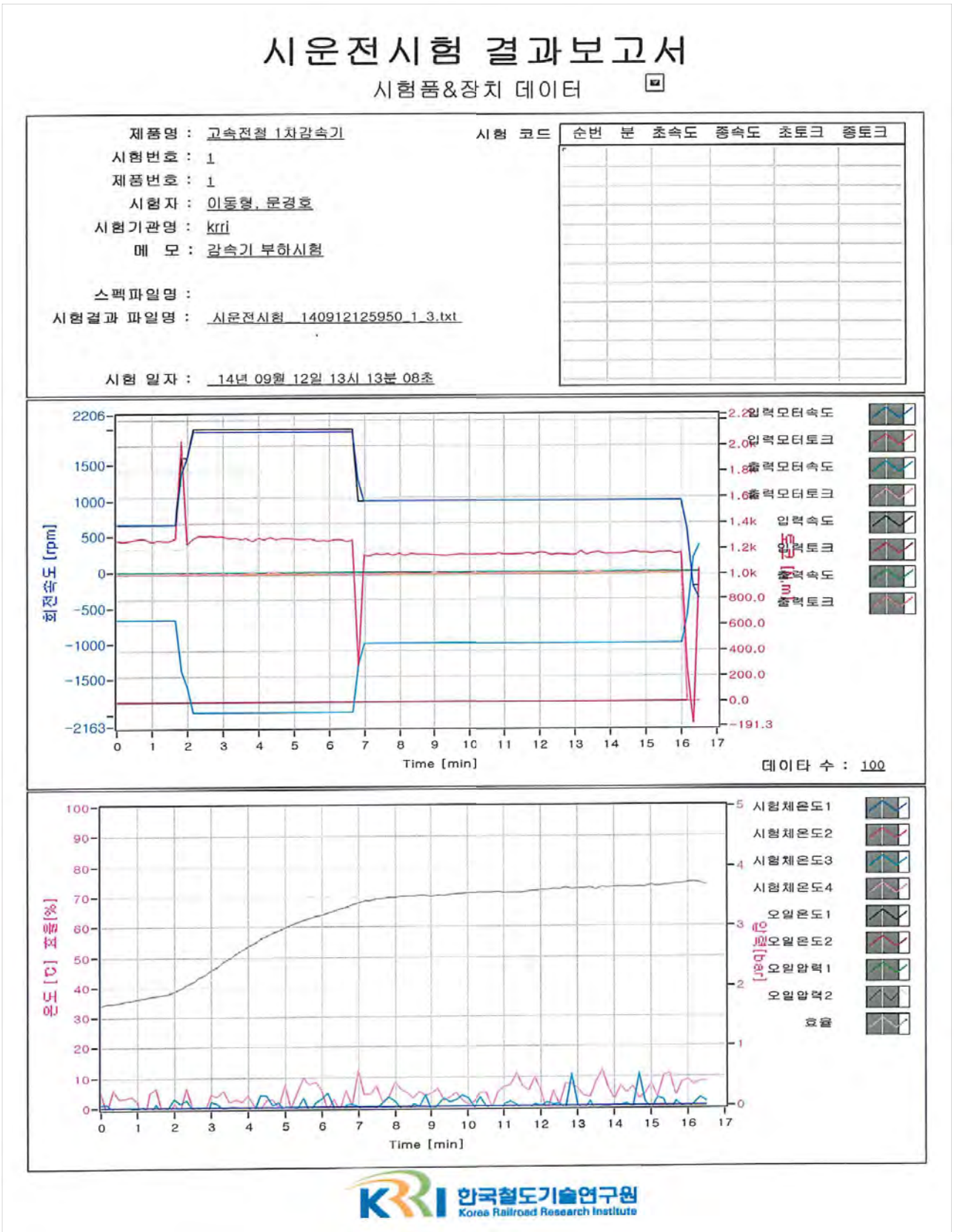



그림 2.6.49 실물 감속기 시험 모드(2차)

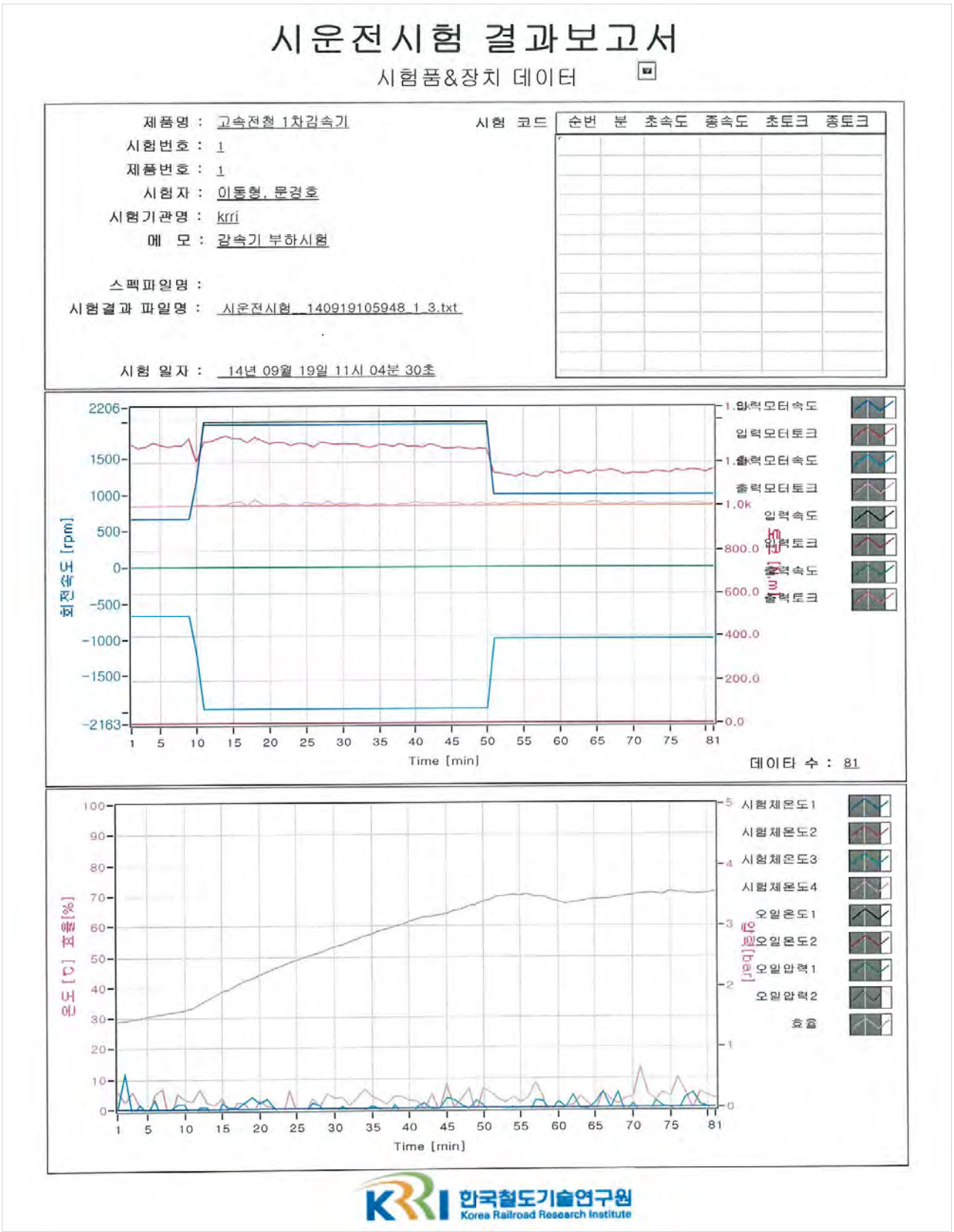
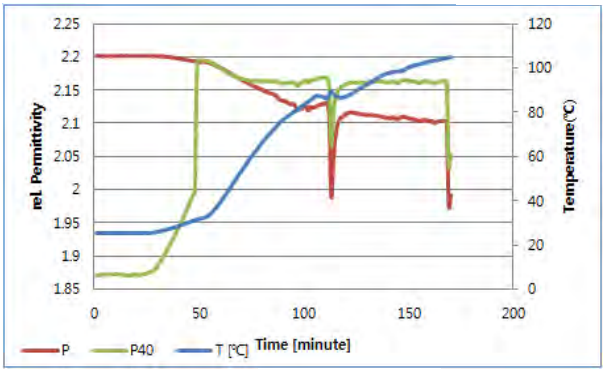
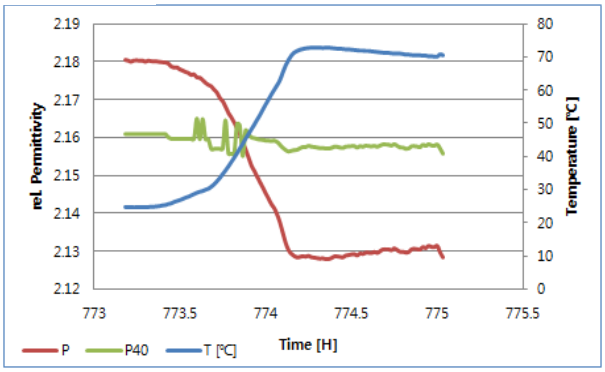



그림 2.6.50 실물 감속기 시험 모드(3차)

rel. Permittivity

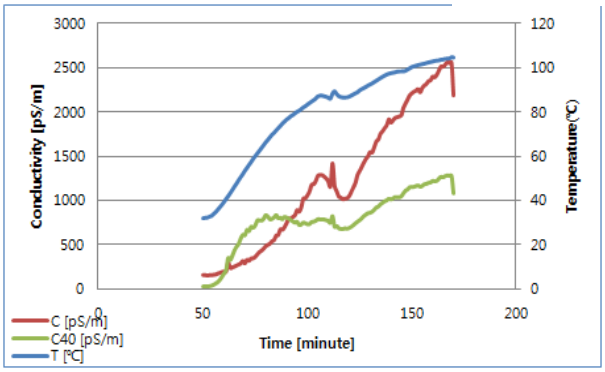



( 1 )

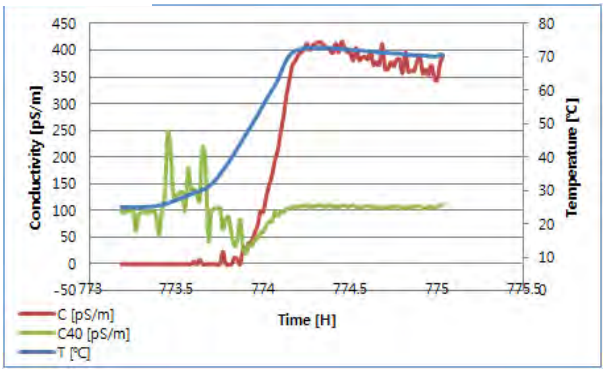



( 2 )

Conductivity

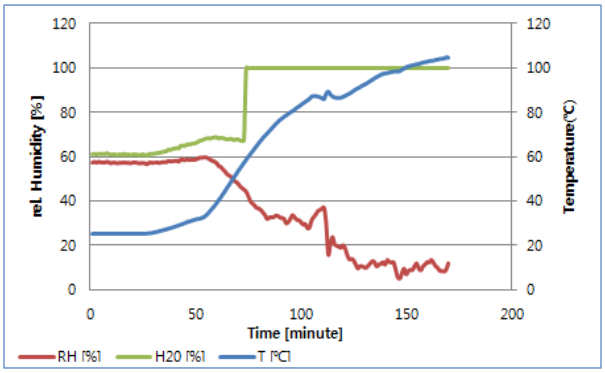



( 3 )

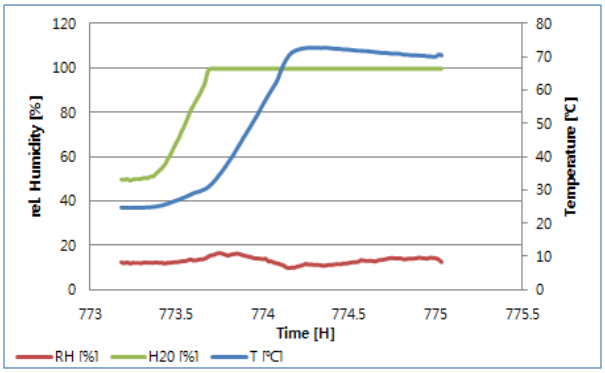



( 4 )

rel. Humidity

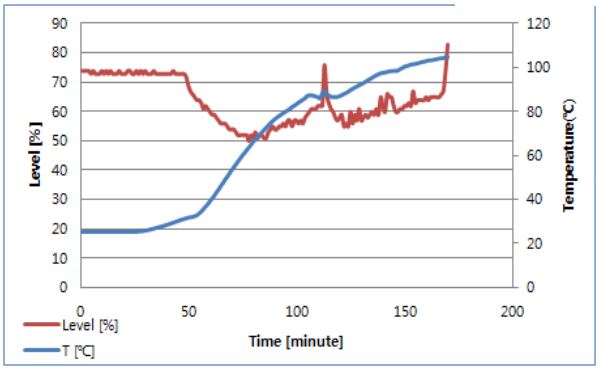



( 5 )

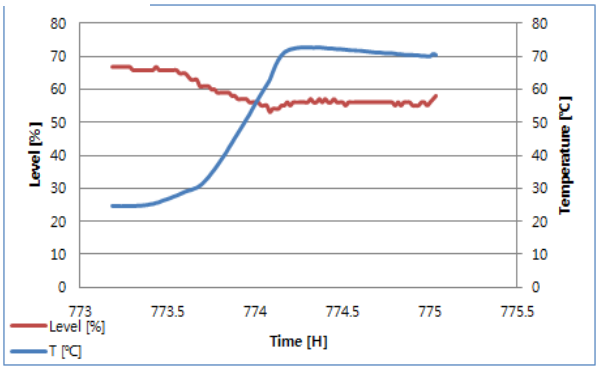



( 6 )

Oil Level



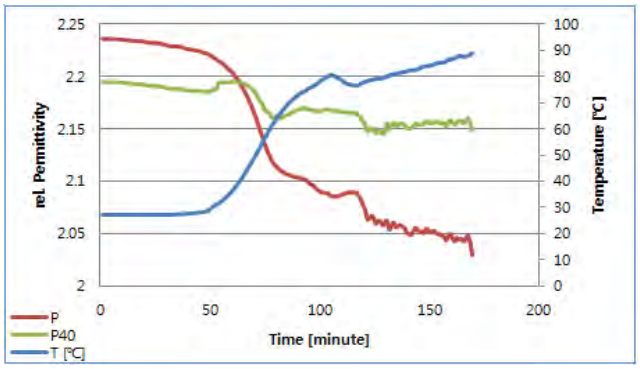

( 7 )



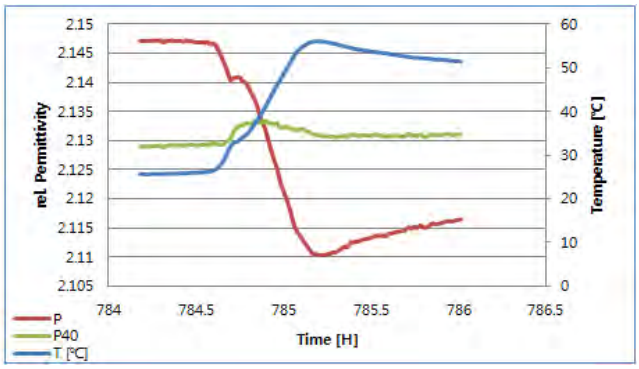

( 8 )

그림 2.6.51 실물 감속기 시험 결과, LS1 센서 1~2차 시험

rel. Permittivity

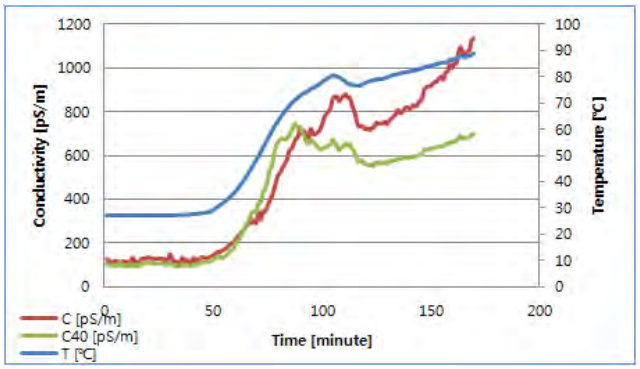



( 1 )

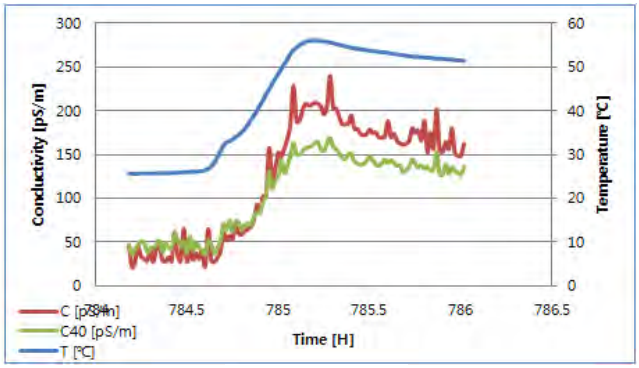



( 2 )

Conductivity

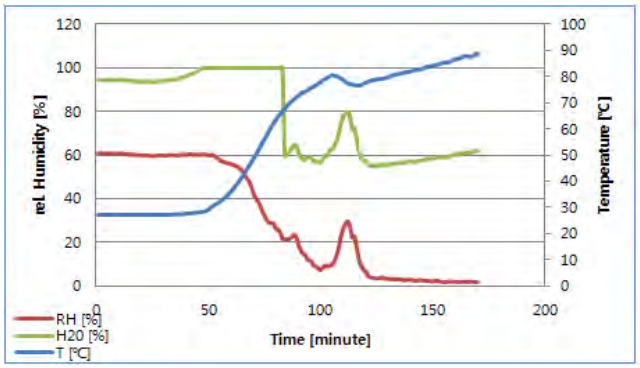



( 3 )

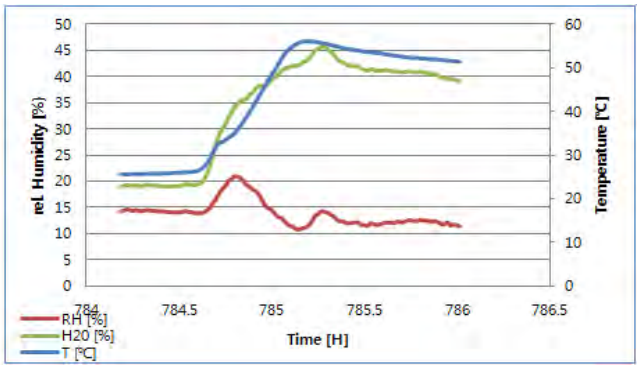



( 4 )

rel. Humidity

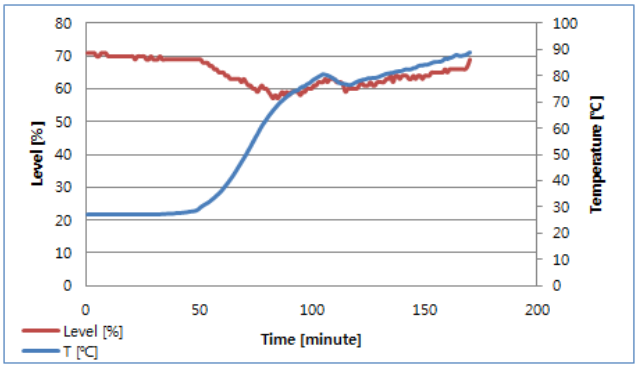



( 5 )

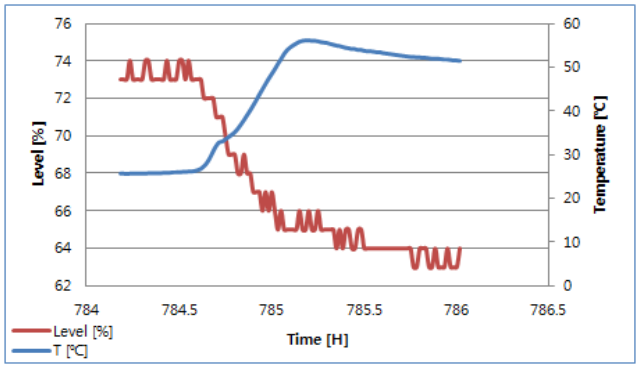



( 6 )

Oil Level



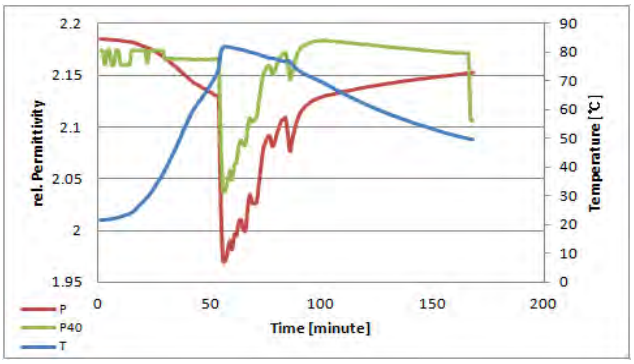

( 7 )



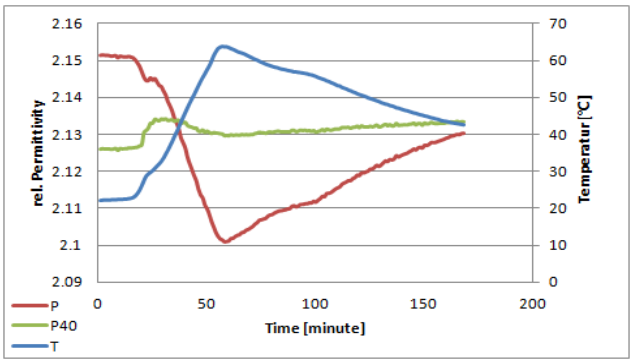

( 8 )

그림 2.6.52 실물 감속기 시험결과, LS3 센서 1~2차 시험

rel. Permittivity

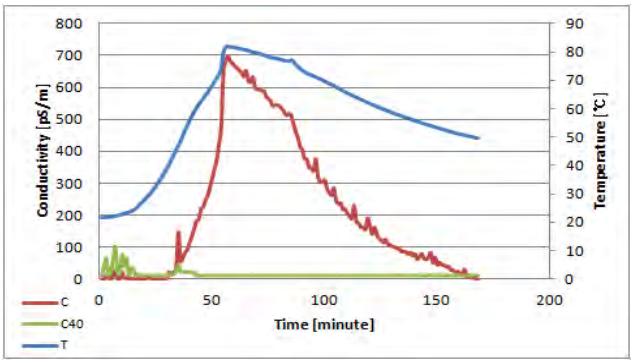



(1) LS1_3rd

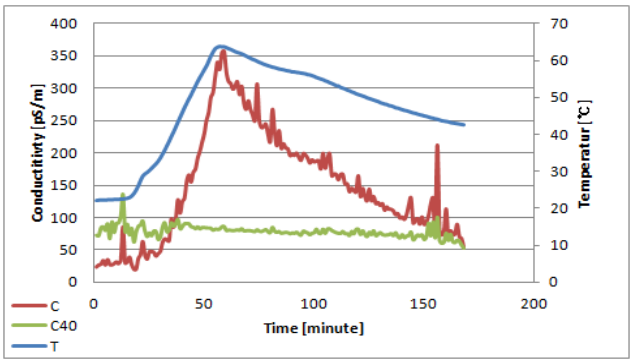



(2) LS3_3rd

Conductivity

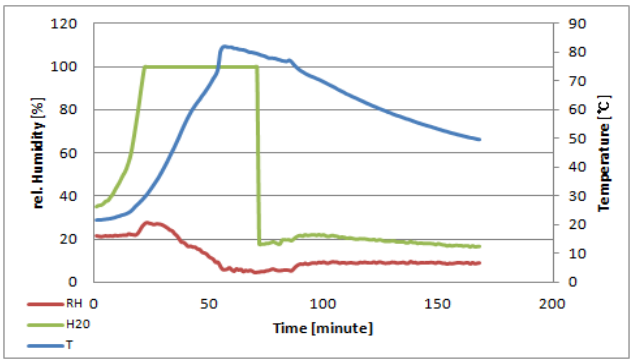



(3) LS1_3rd

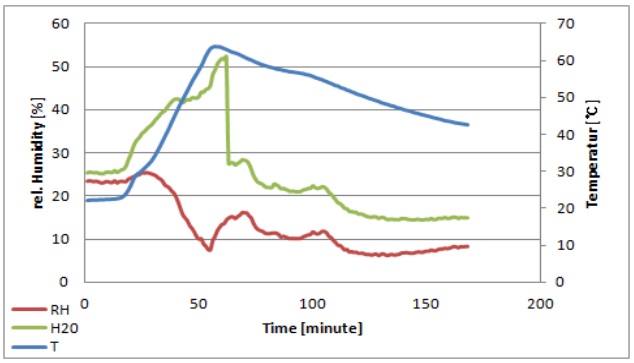



(4) LS3_3rd

rel. Humidity

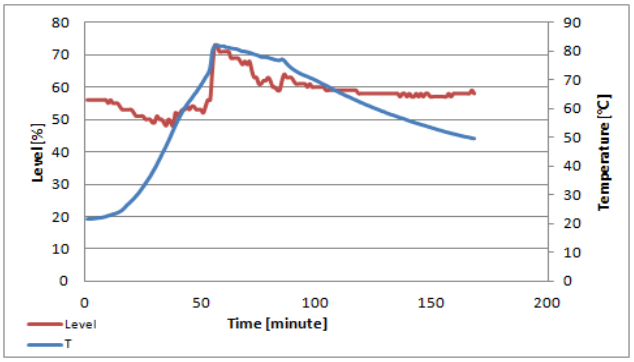



(5) LS1_3rd

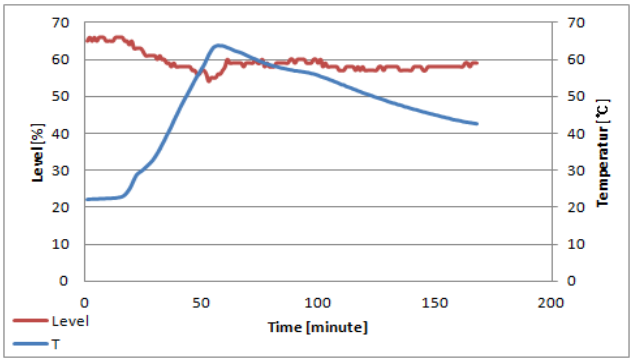



(6) LS3_3rd

Oil Level




(7) LS1_3rd




(8) LS3_3rd

그림 2.6.53 실물 감속기 시험 결과 LS1, LS2 센서 3차 시험

(2) 실물 감속기 시험 결론

▷ 시험 결론

- LS 센서와 개발한 데이터 수집 시스템으로 실제 상황에서 오일 parameter 측정 및 데이터 정상 수집이 가능함을 확인하였다
- 센서로 측정한 oil parameter는 감속기의 회전 속도에 직접적인 영향을 받지 않았다
- 오히려 감속기 운전 모드에 따라 변화되는 오일 온도에 영향을 받았다.
- 온도 보상 파라미터(P40, C40, H20)은 온도 변화에 무관하게 안정된 값을 보여 감속기유의 열화를 모니터링 할 수 있는 항목으로 활용 가능하다.
- 센서가 안정화되기 위해서는 오일과 충분히 접할 시간이 필요하다는 사실을 확인하였다.
- 감속기의 운전 중에 회전수의 급작스런 변화와 같은 운전 상황의 변화를 오일 파라미터로 추정할 수 있다.

라. 실차 시험

(1) 실차 시험 개요

▷ 시험 목적

- KTX 실차 운행 상태에서 윤활유 열화 감시 시스템과 센서의 정상 작동 점검
- KTX 감속기의 윤활유 사용 환경 조사

▷ 시험일 : 2014.12.22. ~ 12.24

▷ 시험 내용

- 정비 후 시험 가동 예정인 KTX 15편성에 윤활유 열화 감지 센서를 장착하여 시험 구간 운행 중 오일 파라미터 수집 및 윤활유 열화 모니터링 시스템의 작동 상태 점검
- 사용 센서
  - MRU용: Lubcos Level 200 2기
  - ARU용: Lubcos H2O 2기
  - 감속기(ARU)에 센서 장착한 그림 2.6.54



그림 2.6.54 KTX ARU에 장착한 센서(원내)

▷ KTX 운행 기록

| 운행시간 | 출발역 | 도착역 | 비고 |
|---|---|---|---|
| 22일 21:22 | 고양기지 | | 21:32 전원 차단<br>21:37 전원 공급 재개 |
| 22일 23:17 | | 서대전 | |
| 23일 05:27 | 서대전 | | |
| 23일 06:27 | | 광명 | |
| 23일 07:02 | 광명 | | |
| 23일 09:52 | | 부산 | |
| 23일 10:52 | 부산 | | |
| 23일 12:45 | | 대전 | |
| 23일 14:44 | 대전 | | |
| 23일 16:48 | | 고양기지 | |
| 24일 09:23 | 고양기지 | | 9:25~9:40 정차 |
| 24일 11:16 | | 서대전 | |
| 24일 11:54 | 서대전 | | |
| 24일 13:42 | | 고양기지 | |

(2) 시험 결과 검토

▷ 시험결과
- 2개의 ARU와 2개의 MRU에서 측정한 parameter
- 데이터는 그림 2.6.55-2.6.58에 그래프로 나타냄

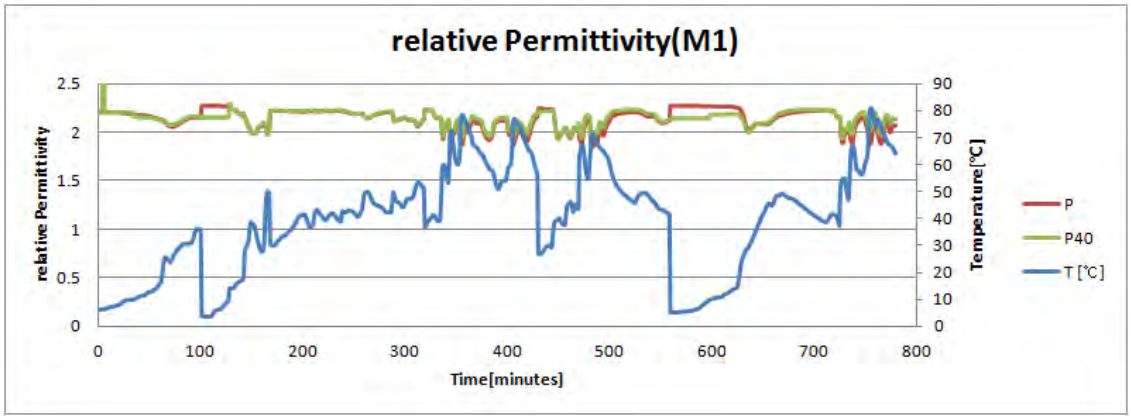
▷ 온도
- ARU와 MRU의 윤활유 온도에 차이가 있음
- MRU는 ARU 보다 윤활유의 최고 온도가 약 40℃ 높아 사용 조건이 훨씬 가혹함을 보여줌
- MRU 사용유가 ARU보다 동일 주행 거리에서 더 심하게 열화된 것은 바로 윤활유 온도로 대표되는 사용조건이 더 가혹하기 때문

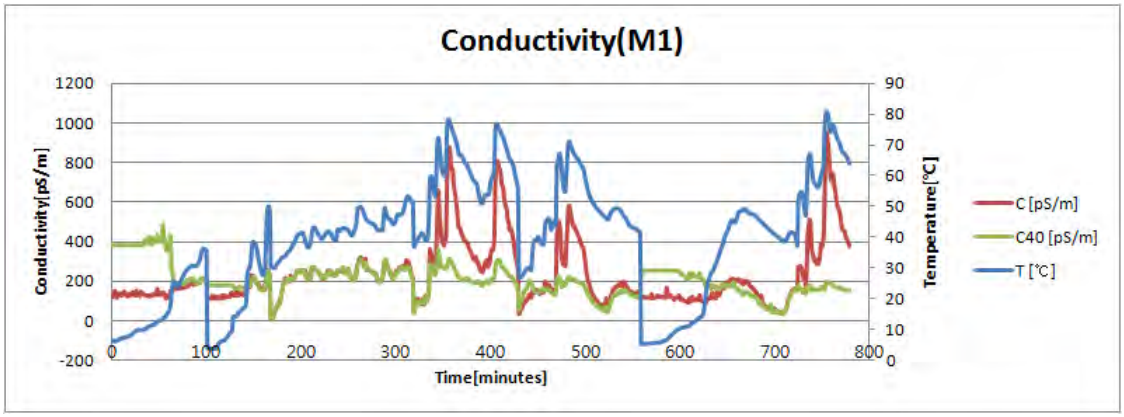
▷ 상대유전율(relative Permittivity)
- MRU와 ARU에 장착한 센서에서 모두 정상 범위의 상대 유전율을 나타냄

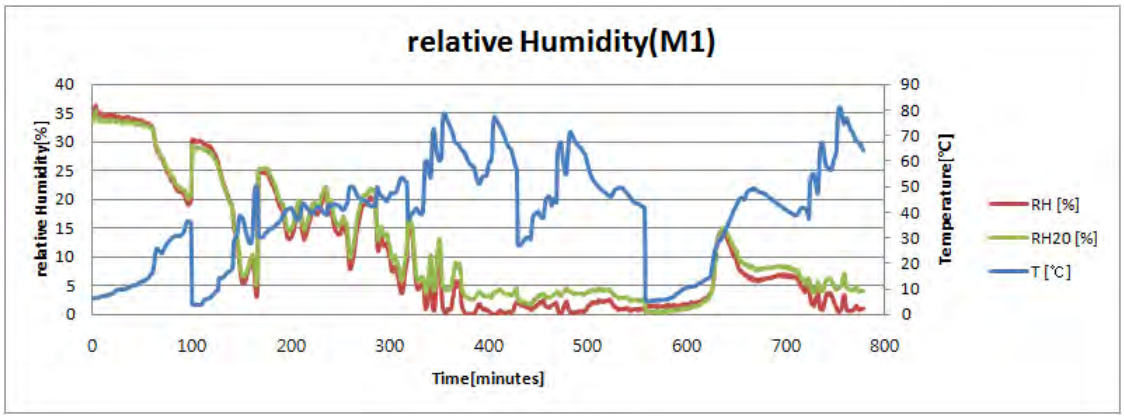
▷ 전기전도도(Conductivity)
- MRU와 ARU에 장착한 센서서 모두 정상적인 전기전도도 값을 보임

(3) 시험 결론

▷ 시험 결론
- 실차에서도 두 종류의 오일 열화 감지 센서는 오일 parameter 측정 및 데이터 정상 수집이 가능함을 확인하였다.
- 온도 보상 파라미터(P40, C40, H20)은 온도 변화에 무관하게 안정된 값을 보여 감속기유의 열화를 모니터링 할 수 있는 항목으로 활용 가능함을 보여주었다.
- 감속기의 운전 중에 회전수의 급작스런 변화와 같은 운전 상황의 변화를 오일 파라미터로 추정할 수 있다.



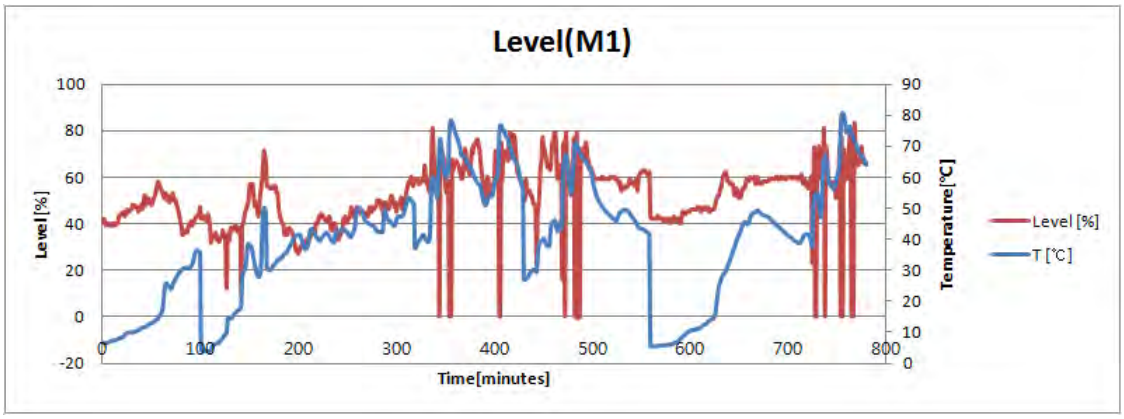
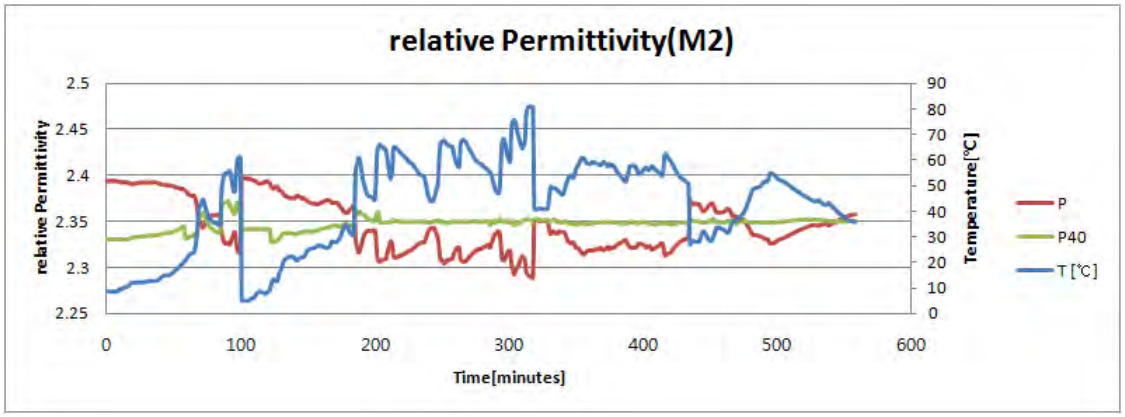
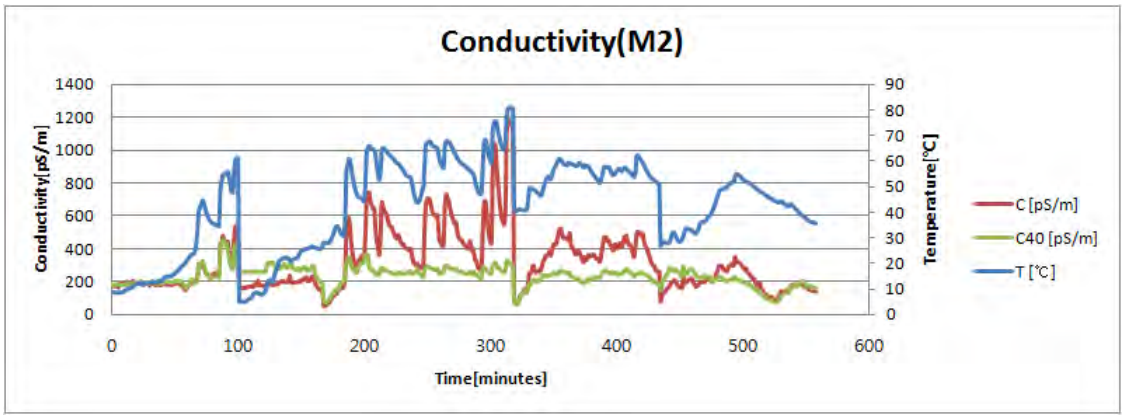
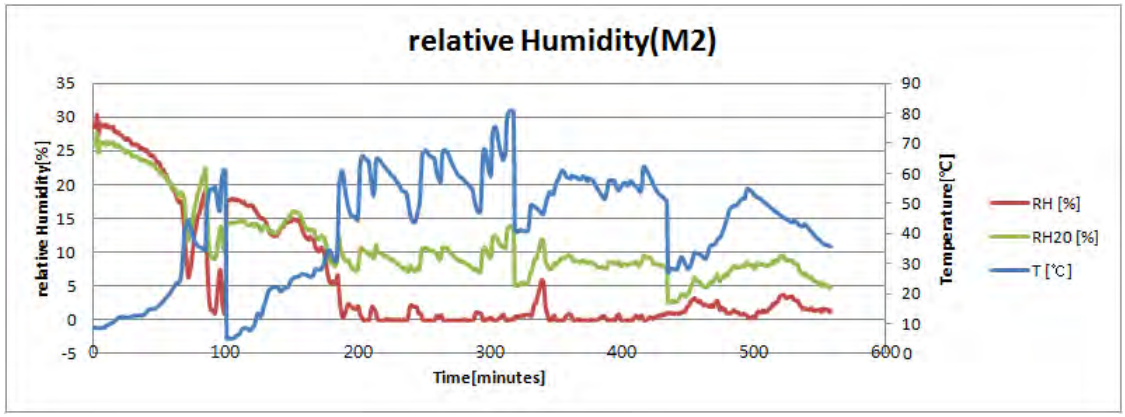




그림 2.6.55 MRU 1의 오일 파라미터 측정 결과



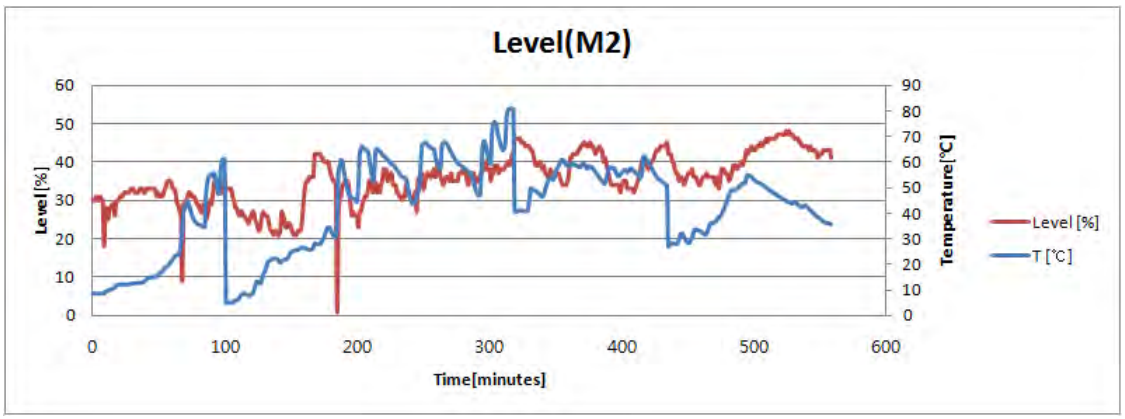




그림 2.6.56 MRU 2의 오일 파라미터 측정결과

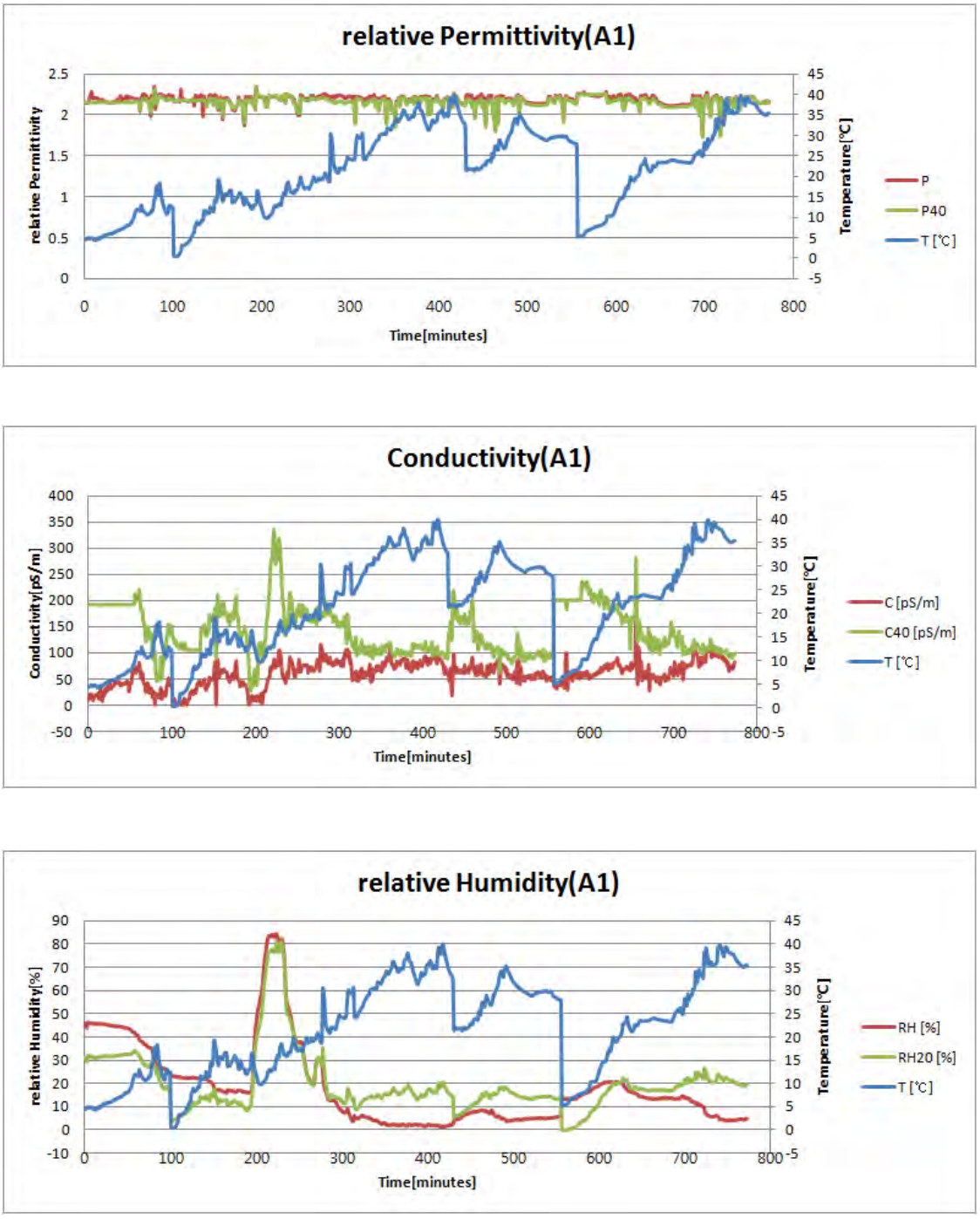
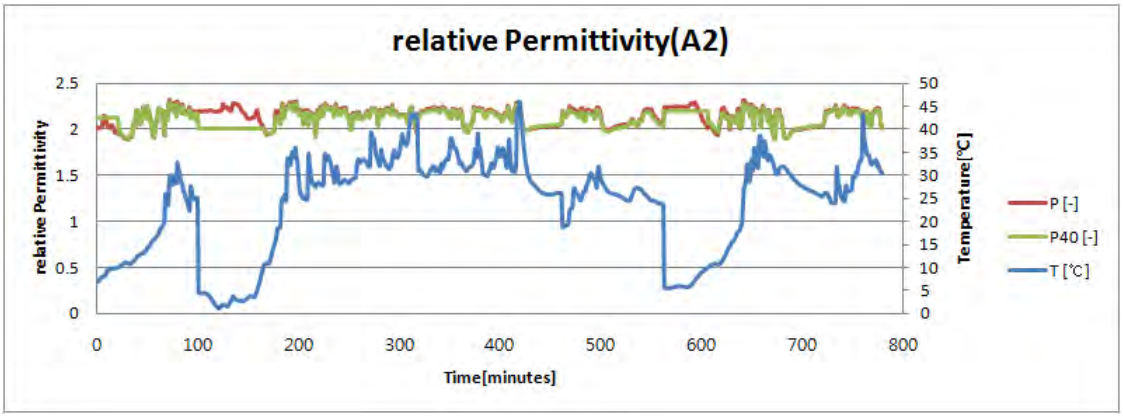
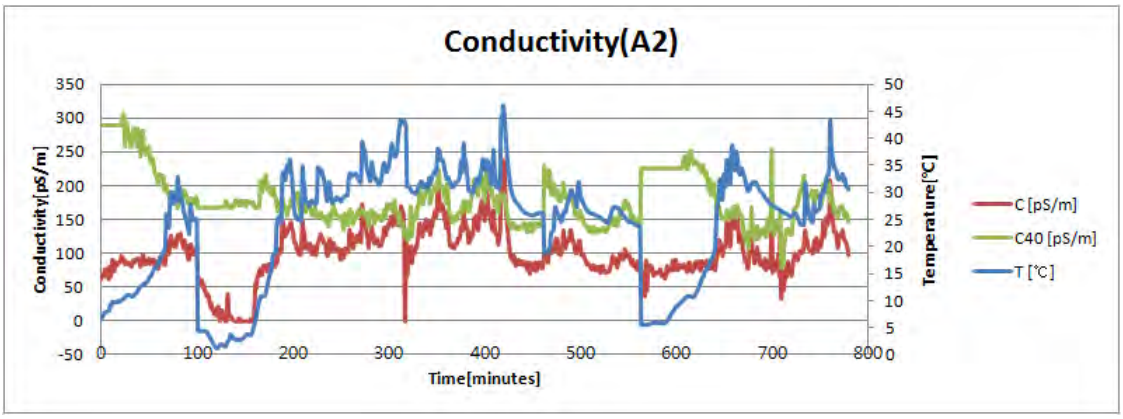



그림 2.6.57 ARU 1의 오일 파라미터 측정 결과



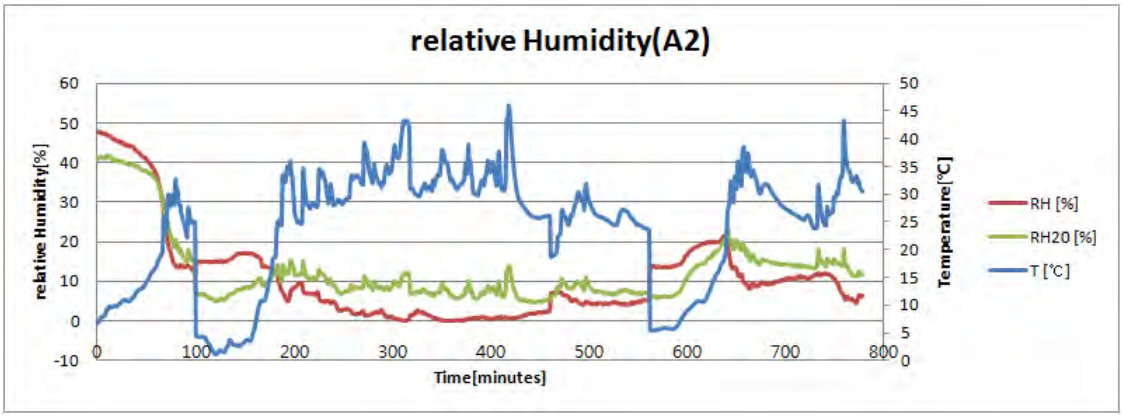




그림 2.6.58 ARU 2의 오일 파라미터 측정 결과

## 7. 소결론

고속 열차의 신뢰성에 결정적 역할을 하는 감속기의 원활한 작동과 고장 방지를 위해서는 윤활유의 상태를 정기적으로 점검하고 필요시 적당량의 오일 보충과 교환을 해주는 윤활관리가 필수적이다.

일반적으로 윤활유 품질(상태)은 사용되면서 점점 나빠진다. 윤활유의 열화는 마모 방지 또는 산화 방지 기능을 하는 첨가제의 소진 또는 물과 먼지 등 외부 이물질의 오염과 오일 자체의 산화에 의해 일어난다. 윤활유의 열화를 조기 감지하여 적절히 조치하지 못하면 감속기 기어 또는 베어링의 손상을 유발하여 재난 수준의 고장을 유발할 수도 있다.

주기적으로 감속기 윤활유 시료를 채취하여 외양을 관찰하고 원소분석으로 철 마모분을 모니터링하는 방법을 현재 사용하고 있다. 그러나 통상적인 점검으로는 윤활유의 열화 상태를 파악하는 것은 불가능하며 오염이라든지 열화에 의해 순간적으로 윤활유의 상태가 변화되는 것을 감지해 내는 것을 어렵다.

본 연구에서 이런 문제를 해결하기 위해 윤활유 열화 감지시스템을 개발하였다. 윤활유 열화감지 시스템을 구성하기 위해서 가장 기본이 되는 오일 컨디션 센서를 사양 비교를 통해서 2개 제품을 선정하고, 이를 실험실에서 윤활유 분석 데이터와의 상관성 실험을 통해서 성능이 우수한 센서로 Argo-Hytos의 Lubcos H2OplusII 센서를 선정하였다. 센서를 감속기 종합 모니터링 시스템에 적용하기 위한 기계적 부품과 전기적 설치 및 개조를 포함한 설계 및 제작을 하였다. 센서의 데이터를 동시 받을 수 있는 소프트웨어 시스템도 개발하였다.

감속기 윤활유의 오일 상태를 모니터링하기 위해 실제 감속기에 사용된 기어유를 분석하여 열화 경향을 파악하였다. 감속기유는 모터 감속기(MRU)에서 차축 감속기(ARU) 보다 훨씬 가혹한 조건에서 사용됨을 확인하였다. 주행 시간(거리) 기준인 현행 오일 관리 지침을 양 감속기에 일률 적용하면 오류가 발생될 수 있다. 즉 상태가 비교적 양호한 ARU는 오일 상태가 양호하여 더 사용할 수 있음에도 교환되어지는 것이다.

열화 센서를 감속기 상태 감시에 적용하기 위해 감속기 사용유에 대해 센서로 상태 측정 시험을 하였다. 사용유의 열화 지표라고 할 수 있는 산가(acid number)와 센서로 측정한 오일 파라미터인 상대 유전율(relative permittivity)과 전기전도도(conductivity) 간에 상관관계 있음을 확인하고 관리 기준을 설정하였다.

실물 감속기 시험을 통해 열화 센서가 감속기 가동 중에 정상적인 데이터 측정이 가능함을 확인하였다. 센서로 측정한 오일 파라미터의 변화를 통해 주행 중인 감속기의 급작스런 회전 수 변화와 같은 운전 조건의 움직임을 감시할 수 있다는 사실을 밝혔다.

감속기에 사용되었지만 사용 조건이 조금씩 다른 기어유 사용유를 대상으로 열화센서로 오일 파라미터를 구하였기 때문에 윤활유의 관리기준이 명확하지 않은 점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 실제 감속기에 센서를 설치하고 장시간 운행하며 데이터를 수집하고 분석하여 관리기준을 미세 조정할 필요는 있다.

금번 연구에서 개발한 윤활유 열화 감지 시스템은 윤활유 특성을 연속적으로 측정하여 기록할 수 있다. 윤활유가 사용 중에 어떤 변화가 생기면 센서 측정값에도 변화가 나타난다. 센서 측정값이 통상적인 값에서 벗어나는 정도와 경향을 이미 설정한 기준과 비교하여 오일의 상태를 판정하고 되돌릴 수 없는 상황에 이르기 전에 조치한다.

본 열화 감지 시스템은 윤활유의 특성 외에도 습도와 온도, 오일의 충진정도(유면레벨)도 하나의 인터페이스를 통해 동시에 측정할 수 있다. 센서를 통해 측정된 오일 파라미터의 변화로부터 오일

의 열화, 신유 보충, 오일 교환과 수분 혼입 등과 같은 윤활유 상태 변화를 유추할 수 있다. 이를 통해 오일 또는 설비의 고장을 조기에 감지하여 심각한 기계의 고장을 예방할 뿐만 아니라 설비의 정비 간격을 늘릴 수 있고 윤활유 수명을 연장할 수도 있다. 또 측정된 오일 파라미터와 파라미터의 변화는 정비가 잘 되었는지 여부와 오일이 제대로 주입되었는지에 대한 정보도 제공한다.

## 제7절 고속열차 감속기 모드시험 및 시험평가

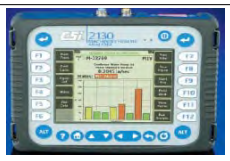
본 절에서는 감속기 모니터링 시스템 개발에 앞서 감속기의 구성부품에서 발생될 수 있는 손상사례 조사, 각 구성요소의 단품조건, 감속기 시스템이 차량에 조립되어 있는 조건 및 현차시험조건에서의 진동특성을 분석하기 위한 모드시험을 수행하고 수집한 데이터를 분석하였다. 아울러 개발된 모니터링 시스템을 대상으로 차세대고속열차(HEMU-430X)에 적용 후 모니터링 시스템의 성능을 확인하는 과정도 수행되었다.

### 1. 감속기 구성부품 모드시험

감속기의 진동시험은 각 구성부품, 차량에 조립되어 있는 조건 및 운행 중인 상태를 포함한 3가지 차원에서 수행할 수 있다. 본 연구에서는 먼저 감속기를 구성하는 구성부품 및 차량조립 상태에서의 타격시험을 수행하여 데이터를 분석하고자 하였다. 앞서 언급한대로진동특성을 파악하고자 하는 가장 큰 목적은 감속기 시스템의 동적 거동을 예측하는 데 있어 매우 중요한 요소로 취급되는 고유진동수를 확인하는 것이다. 감속기가 차체에서 분리된 경우와 조립되어 있는 상태에서의 진동특성은 다소 변화할 수 있으나 대차시스템에 조립된 상태에서 열차가 운행을 하게 되므로 차체에 조립된 상태에서 진동시험을 수행하는 것이 바람직한 것으로 판단하였다. 감속기에 대한 모드시험을 수행하기 위하여 가속도 센서를 포함한 계측 장비를 활용하였다. 감속기의 특정 부위를 타격하는 장비인 Impact hammer의 경우 머리 부분에 힘 변환기(force transducer)가 내장되어 있는 것이 일반적이며 구조물을 가진시키는 데 사용되었다. 또한, Impact hammer로 타격할 경우 구조물에서 발생되는 신호를 감지하는 1축 가속도 센서를 활용하여 데이터를 수집할 수 있도록 하였다. 표 2.7.1에 감속기의 모드시험 수행을 위한 계측장비를 나타내었다.

그림 2.7.1은 감속기의 구성부품에 대하여 충격 가진시험을 위한 측정위치를 나타낸다. 모터감속기를 구성하는 중간기어, 출력기어, 입력기어 등의 부품 및 차축감속기와 조립되는 차륜, 차축, 대차, 트리포드 부품 등을 측정시험 대상부품으로 선정하였으며, 부품의 무게로 인하여 시험 시 끈을 활용하여 지지한 후 측정시험을 수행하였다.

표 2.7.1 KTX 감속기 모드시험을 위한 계측장비

| 구 분 | 가속도 센서 | Impact Hammer | FFT 분석기 & Laptop |
|---|---|---|---|
| 모델명 | IMI629A31 | PCB086D20 | CSI 2130 A3, CSI 6500 24ch |
| 형 상 |  |  |   |
| 수 량 | 4개 | 2개 | 2Set |

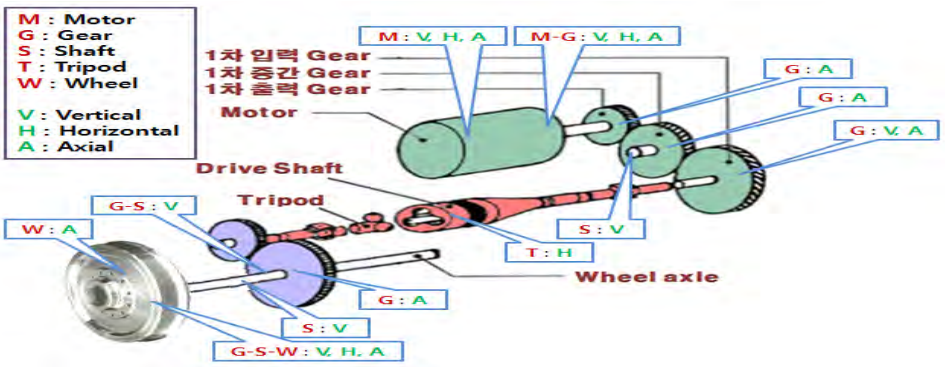



그림 2.7.1 감속기 구성부품 별 측정위치

그림 2.7.2~2.7.6은 견인전동기, 출력기어, 중간기어 축, 차축, 트리포드를 대상으로 가진시험을 수행하는 과정을 보여준다. 본 시험을 통하여 모터감속기, 차축기어 감속기와 조립되는 각 구성부품의 고유진동수 를 확인하고, 특정 주파수 대역에서 거동하는 Mode shape을 통하여 주파수 대역별로 서로 다른 영향을 받는 감속기의 동적 특성을 분석할 수 있다. 또한 속도 증가에 따른 공진과의 연관성 및 모니터링 시스템 구축을 위한 감속기의 주요 결함 주파수도 파악할 수 있다.



그림 2.7.2 구성부품 별 가진시험(견인전동기)



그림 2.7.3 구성부품 별 가진시험(출력기어)



그림 2.7.4 구성부품 별 가진시험(중간기어 축)



그림 2.7.5 구성부품 별 가진시험(차축)



그림 2.7.6 구성부품 별 가진시험(트리포드)

또한, 감속기가 차체에 조립되어 있는 상태에서 견인전동기, 모터감속기, 차축기어 감속기, 차륜 플랜지의 적절한 부위에 가속도 센서를 부착한 후 차축을 충격하여 넓은 범위의 주파수 대역에 걸쳐 구조물을 가진하였다. 시험 대상차량(KTX-17호)은 무가압 상태로 유지하였으며, 센서를 활용한 시험임을 고려하여 가능한 주변 소음을 차단하고자 하였다. 시험수행을 통해 취득된 데이터는 신호 분석기(Analyzer)를 활용하여 아날로그 시간영역의 신호를 디지털 주파수 영역 정보로 전환하여 분석과정을 거치게 된다. 감속기에 대한 모드시험은 고유진동수를 파악하는 것과 더불어 시스템이 특정 주파수 대역에서 모드특성을 확인하는 중요한 과정에 해당하며 이를 구하기 위하여 주파수 응답함수(Frequency Response Function)를 산출하였다. 그림 2.7.7은 감속기가 차체에 조립된 상태에서의 진동측정위치를 나타내며, 그림 2.7.8은 시험수행 활용한 대략적인 계측장비의 구성을 나타낸다.

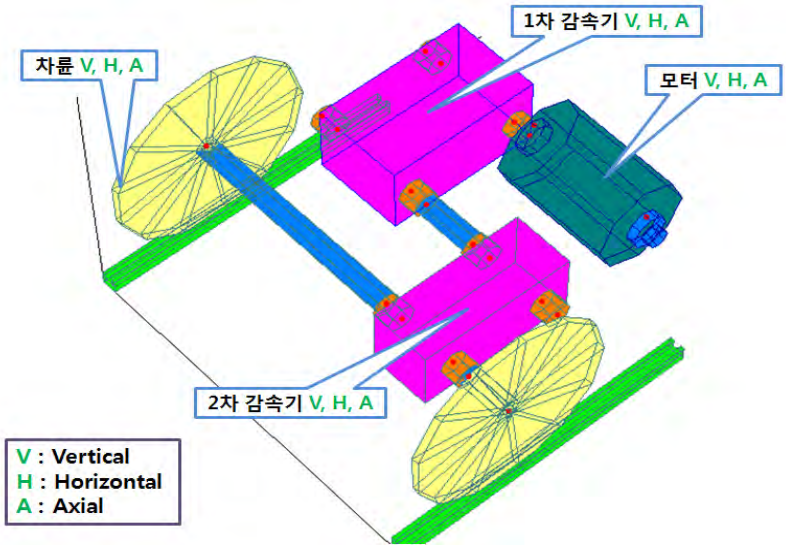



그림 2.7.7 차량 조립조건에서의 진동 측정위치

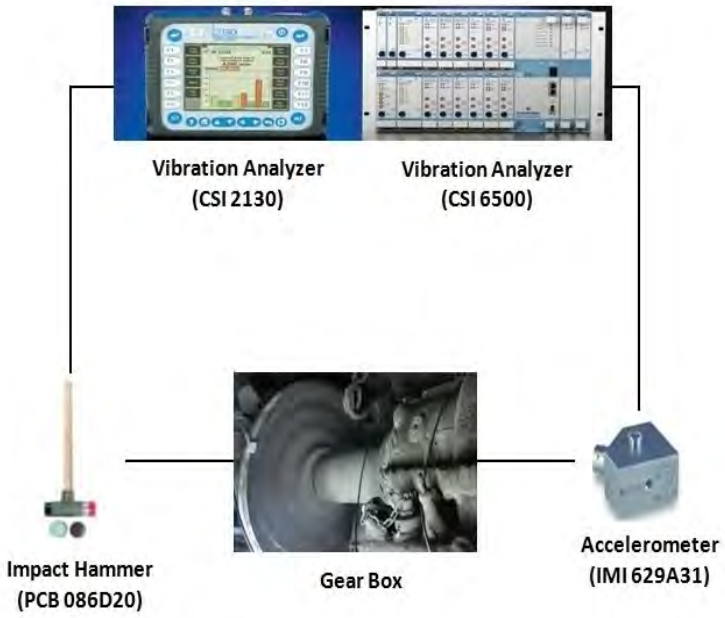



그림 2.7.8 진동시험용 계측장비 구성

가. 고유진동수 해석

진동시험 측정데이터를 활용하여 고유진동수 데이터를 산출하였다. 고유진동수는 주파수 응답함수(Frequency Response Function), 기여도(Coherence), 위상(Phase) 데이터를 기반으로 산출하게 된다. 그림 2.7.9은 차축기어 감속기와 조립되는 차축의 고유진동수를 표시한 결과이다. 주요 고유진동수는 220Hz, 570Hz, 960Hz 수준임을 확인할 수 있다.

그림 2.7.10은 감속기와 연관되는 부품별 고유진동수를 표시한 결과를 나타낸다. 모터감속기를 구성하고 있는 기어류와 트리포드(Tripod) 부품의 경우 1000Hz 이상의 고주파 대역으로 분석되었다. 반면에 차축기어 감속기와 조립되는 차축 및 각 구성부품 대부분의 경우 1000Hz 이하의 주파수 대역을 나타내고 있다. 이러한 분석결과는 정상적인 구성부품과 점검을 필요로 하는 상태에서 고유진동수의 변동수준을 파악할 수 있는 기본 자료로 활용이 가능하다.

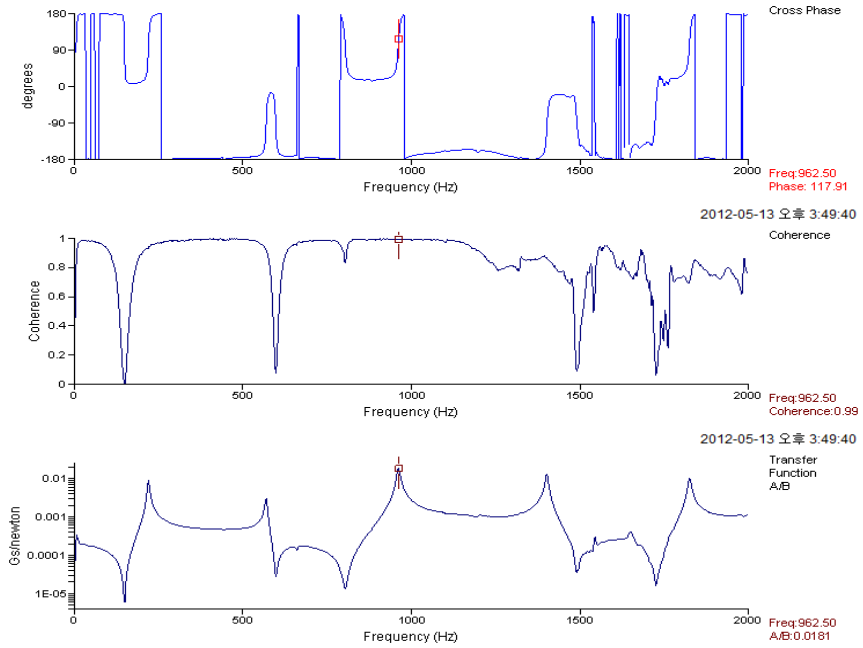



그림 2.7.9 고유진동수 분석결과(차축)

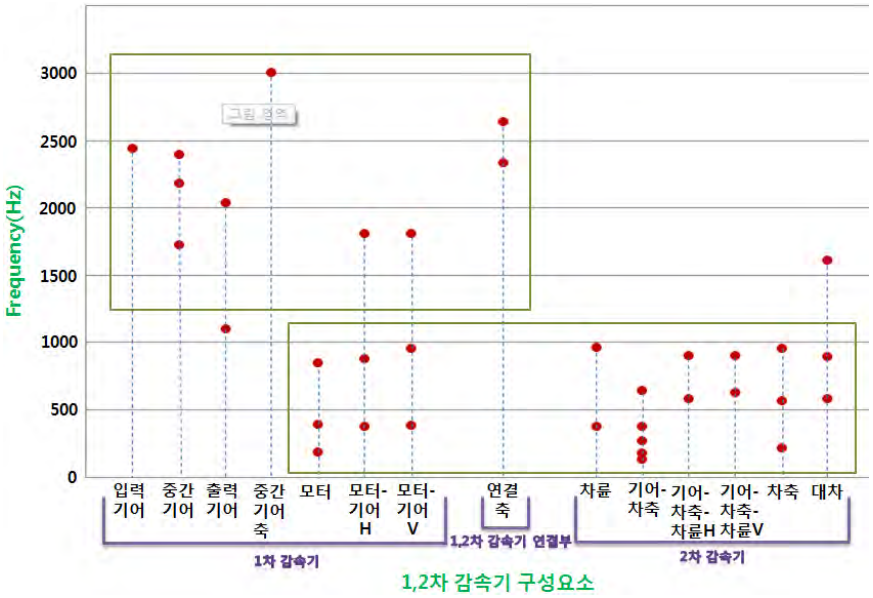



그림 2.7.10 구성부품 별 고유진동수 분석 결과

그림 2.7.11~2.7.14는 감속기가 차체에 조립된 상태에서 충격 가진시험 실시 후 수집데이터를 분석한 결과를 나타낸다. 그림 2.7.11은 모터감속기 분석결과(Vertical)를 보여주며 주요 고유진동수는 790Hz, 1517Hz, 1835Hz 수준임을 확인할 수 있다. 그림 2.7.12는 차축(Vertical)에 해당하는 결과로 주요 고유진동수는 540Hz, 717Hz임을 나타낸다. 그림 2.7.13은 차륜(Horizontal)에 대한 분석결과로 주요 고유진동수는 722Hz, 872Hz, 1848Hz임을 나타내며, 그림 2.7.14는 차축기어감속기(Vertical) 분석결과로 주요 고유진동수는 690Hz, 1622Hz, 1705Hz임을 알 수 있다. 차체 조립상태에서의 고유진동수는 각 구성부품의 고유진동수와 유사한 경향을 보이지 않았다. 이러한 현상은 각 부품들이 서로 조립된 이후 연성(Coupling)효과에 의한 것으로 생각할 수 있다.

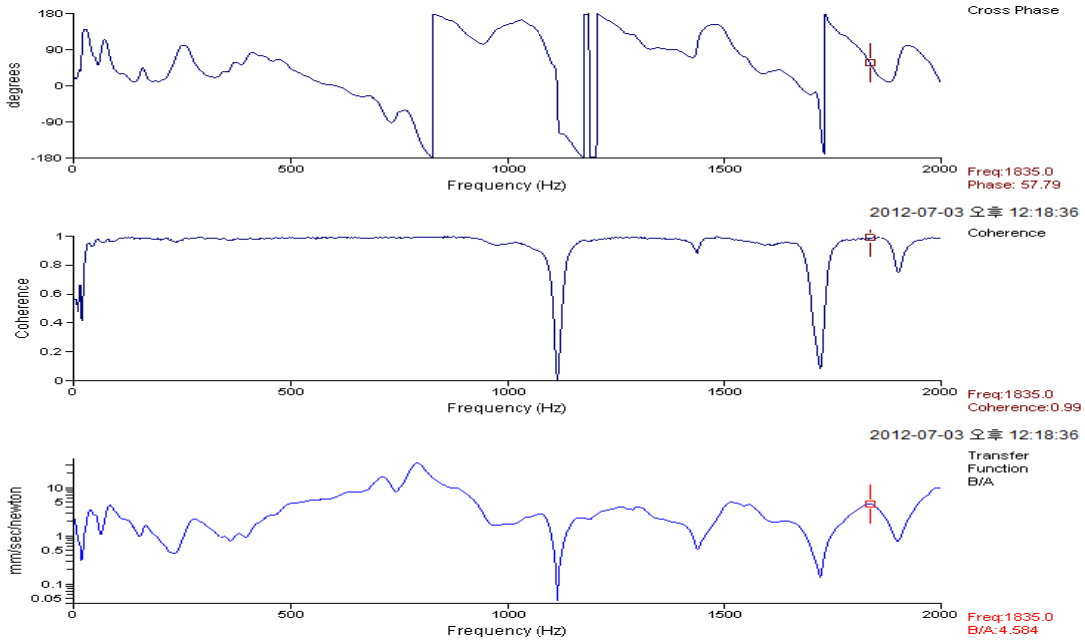



그림 2.7.11 조립조건에서의 고유진동수 분석결과(모터감속기-Vertical)

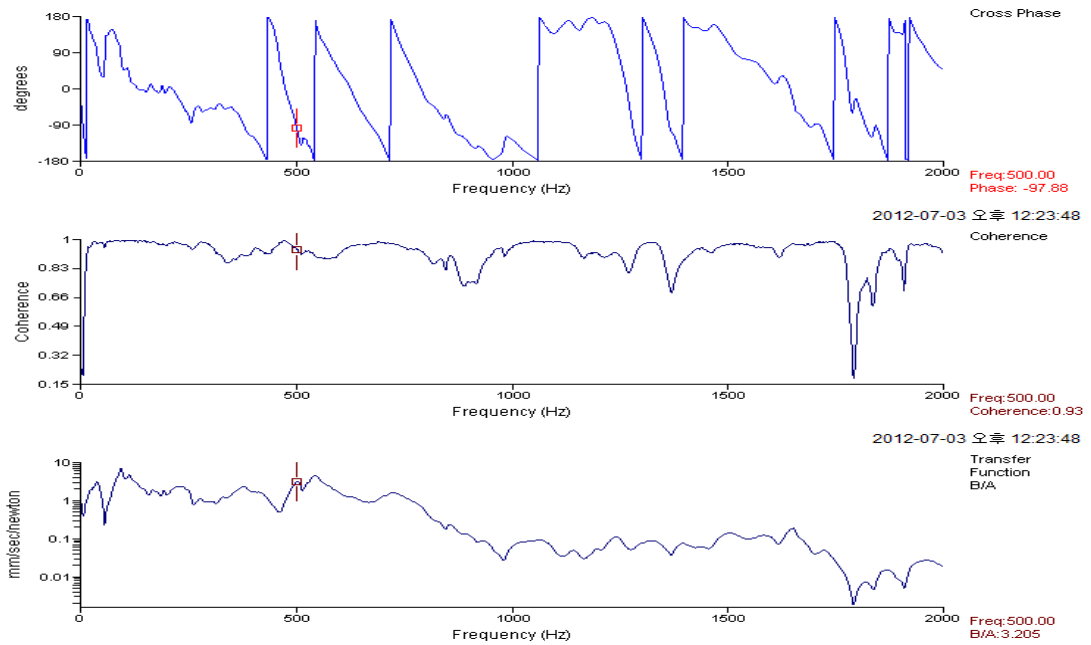



그림 2.7.12 조립조건에서의 고유진동수 분석결과(차축-Vertical)

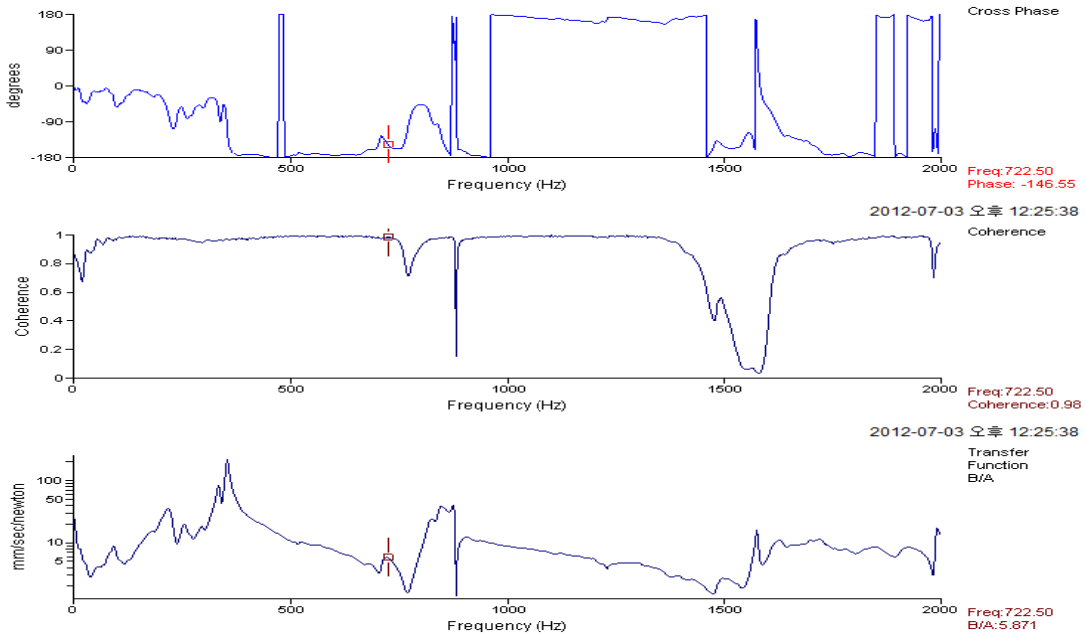



그림 2.7.13 조립조건에서의 고유진동수 분석결과(차륜-Horizontal)

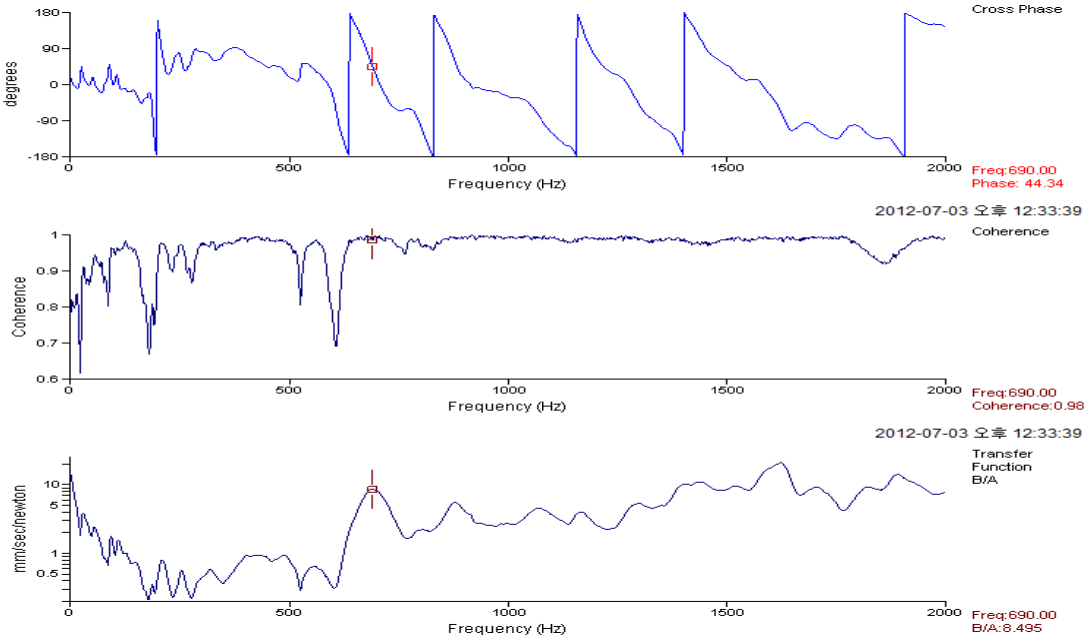



그림 2.7.14 조립조건에서의 고유진동수 분석결과 (차축기어감속기-Vertical)

나. 모드특성 분석

감속기가 차량에 조립되어 있는 상태에서 충격시험 실시 주파수 응답함수로부터 고유진동수를 파악하였다. 이어 상용 모달해석(Modal Analysis) S/W인 MEscope ODS v.4.0을 활용하여 모드해석을 수행하였다. 이는 감속기의 특정 주파수가 운행 중 감속기에 미치는 영향을 간접적으로 확인하는 과정에 해당한다. 감속기에 대한 대략적인 모델을 구현한 이후 주파수 응답함수를 MEscope ODS v.4.0로 불러들여 해석을 수행하였다. 그림 2.7.15~2.7.20은 감속기의 주요 주파수에 따른 모드해석 결과를 나타낸다. 해석결과 특정주파수가 고려될 경우 모터감속기의 거동이 빈번함을 확인할 수 있었다. 이는 중간기어 이탈, 기어 손상 등 모터감속기의 성능에 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 향후 열차 주행속도에 따라 수시로 변화하는 가진주파수와의 연관성을 파악할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 750Hz, 910Hz, 1370Hz 주파수 성분은 12channel Spectrum 분석시 가장 진동량이 큰 3개의 대표 주파수를 산출해 Mode shape를 해석한 시뮬레이션이다. 특정 주파수가 감속기에 미치는 영향을 알아보기 위함을 목적으로 해석한 결과 3개의 주파수 대역 모두 거동이 매우 심하게 흔들리는 현상이 나타났다. 해당 주파수와 정확히 일치하는 고유 주파수 대역은 산출되지 않았지만, 근접한 주파수 대역이 있는 것으로 보와 미약한 공진가능성도 배제할 수 없다고 사료된다. 그러나 기타 외적인 요인에 기인한 진동량 상승도 가능성이 있기 때문에, 정확히 어떠한 원인으로 인해 특정 주파수대역의 진동량이 상승했다라고 단정 짓기엔 무리가 있다고 판단된다. 차후 높은 진동량을 갖는 원인을 파악해 내야할 주요 주파수들로 생각할 수 있다.

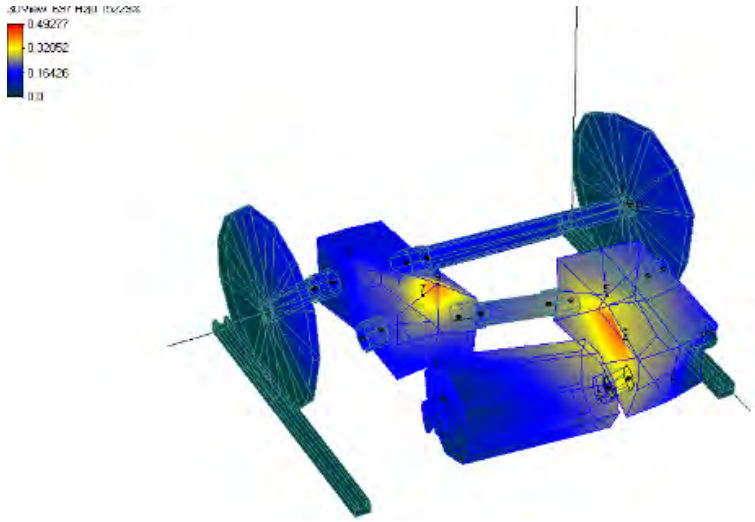



그림 2.7.15 모드해석 결과(697Hz)

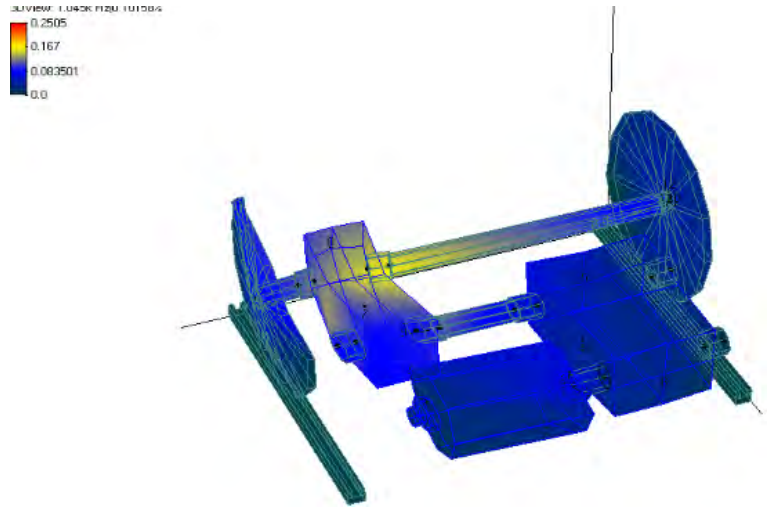



그림 2.7.16 모드해석 결과(1045Hz)

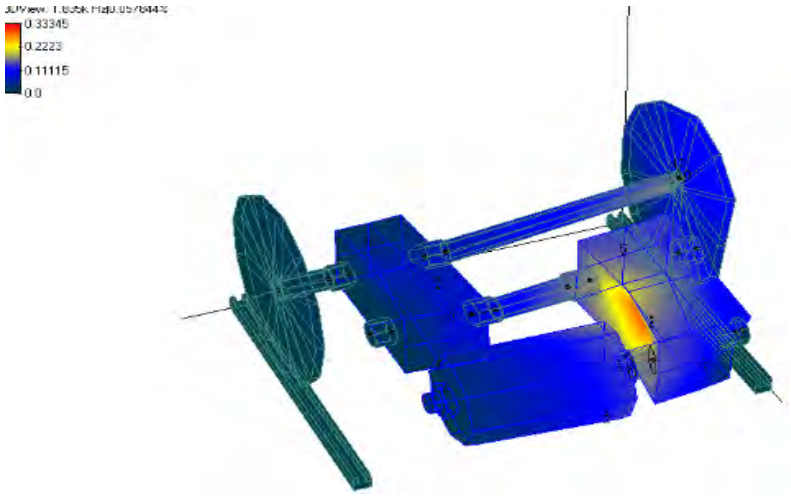



그림 2.7.17 모드해석 결과(1835Hz)

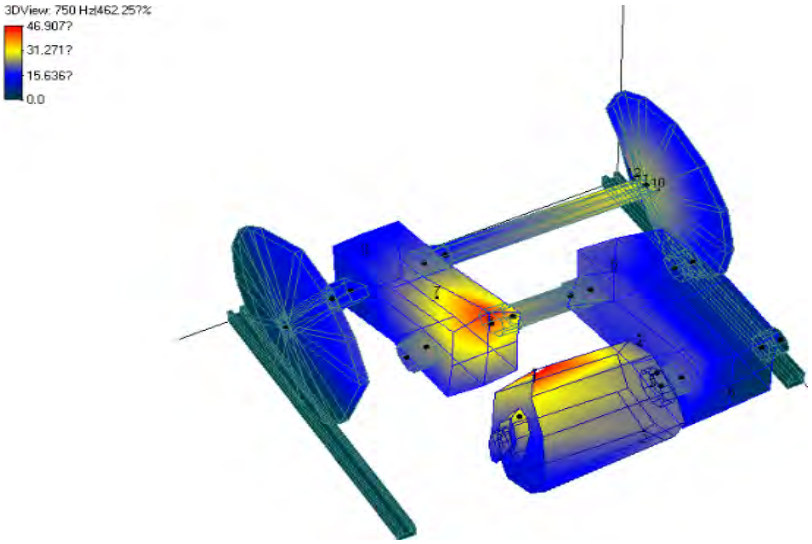



그림 2.7.18 모드해석 결과_특정주파수 관련거동(750Hz)

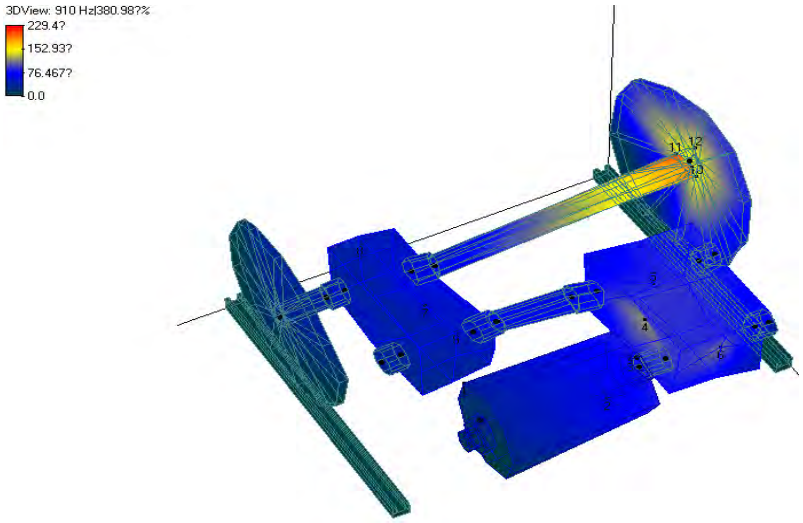



그림 2.7.19 모드해석 결과_특정주파수 관련거동(910Hz)

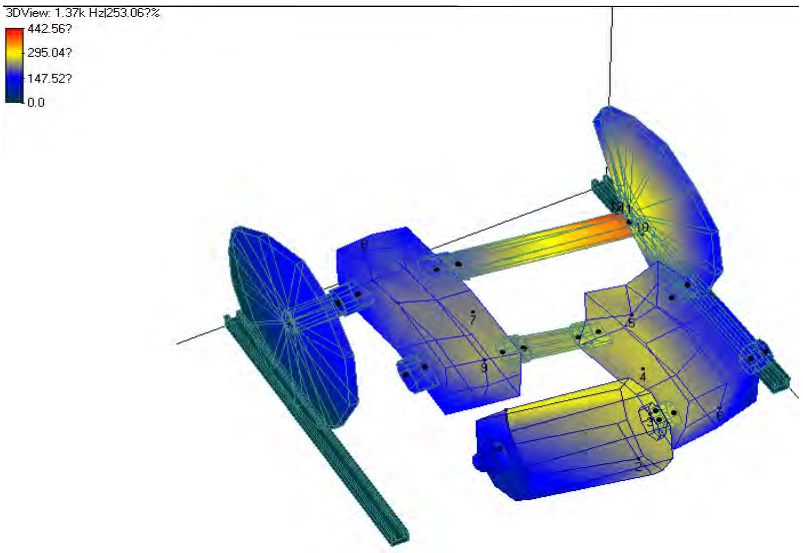



그림 2.7.20 모드해석 결과_특정주파수 관련거동(1370Hz)

## 2. 견인전동기 현차 진동시험

견인전동기는 KTX 열차 주행을 위한 동력을 발생시키는 구동장치로 유도전동기가 사용된다. 전동기는 터빈이나 압축기에 비하여 비교적 간단한 구조를 가지고 있으나 기계적, 전기적인 원인에 의해 발생하는 진동 및 소음의 특징은 매우 복잡하고 넓은 주파수 대역의 성분을 가지고 있다. KTX용 견인전동기의 제어방식은 전압형 VVVF 인버터 제어방식으로 동력대차에 각 2Set가 설치되며 KTX 1편성 당 총 12Set가 모터감속기와 조립된다. 출력은 1,130 kw이며 최대회전속도는 4,000rpm 수준이다. KTX 열차 운행 중 견인전동기에 대한 진동시험 수행을 위하여 가속도 센서 등 진동측정 시스템을 구성하는 계측장비를 별도로 활용하였다. 우선 견인전동기의 베어링 In/Out board 측의 적절한 위치에 3축 가속도 센서 2개를 설치하였다. 또한, 견인전동기와 조립되는 모터 감속기와 구동력을 전달받는 차축감속기의 하우징 부위에 동일한 가속도 센서를 부착하여 차량 운행 중 발생하는 진동신호를 수집하였다. 열차의 운행속도를 확인하고자 차륜부위에 레이저 타코센서를 부착하였으며 데이터를 저장하고 분석할 수 있는 다채널 진동분석기 및 노트북을 활용하여 신호를 수집하고 분석하였다. 표 2.7.2는 KTX용 견인전동기의 진동시험을 수행하기 위하여 활용한 계측장비를 나타내며, 그림 2.7.21에 진동신호 측정위치를 나타내었다.

표 2.7.2 KTX 견인전동기 현차시험을 위한 계측장비

| 구 분 | 가속도 센서 | 다채널 진동분석기(1) | 다채널 진동분석기(2) |
|---|---|---|---|
| 모델명 | PCB356B18 | CSI6500 | Alta Solution |
| 형 상 |  |  |  |
| 수 량 | 4개 | 1Set | 1Set |

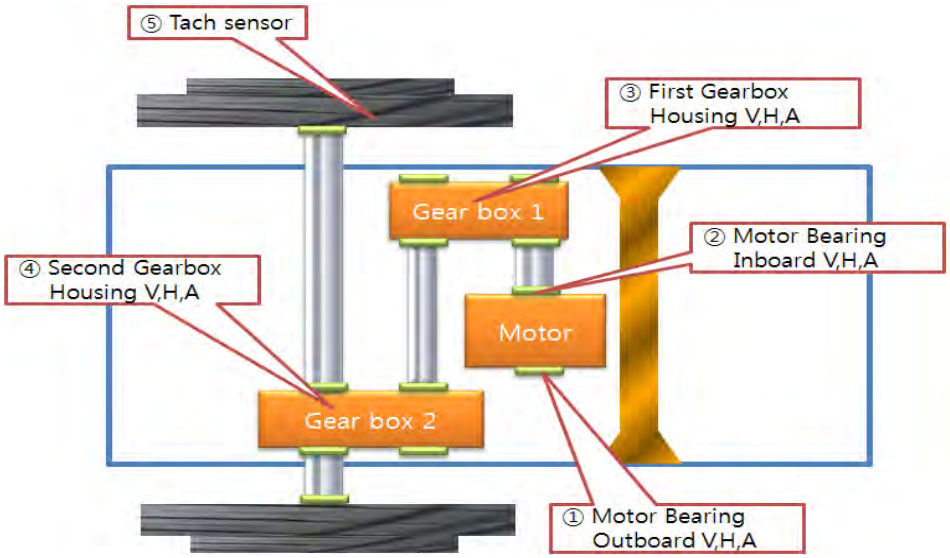



그림 2.7.21 KTX 견인전동기 진동신호 측정위치

가. 주요 가진주파수

견인전동기는 모터감속기와 조립하도록 되어 있으며, 열차 주행 시 발생할 수 있는 차륜과 레일 간의 충격 진동주파수를 제외한 가진주파수에는 모터 및 감속기의 회전주파수, 감속기의 각 축에서 발생하는 회전주파수, 차륜의 회전주파수, 기어맞물림 주파수 등으로 구분할 수 있다. 가진주파수는 열차의 운행속도에 따라 수시로 변화하며 견인전동기와 조립되어 있는 감속기 종합구성체의 공진현상과의 관계를 간접적으로 확인해야 할 필요가 있다.

표 2.7.3은 견인전동기에서 발생할 수 있는 가진 주파수들을 상용 주요 속도인 120km/h와 290 km/h의 두 가지의 속도별로 계산한 주파수 계산표이다. 본 연구에서는 견인전동기의 동특성 해석을 위하여 KTX 열차 운행 중 발생하는 주파수 형태와 진동상태를 분석하였다. 견인전동기의 회전속도 증감에 따른 주파수 변화 및 ODS 해석을 통하여 일정 주파수 대역에서 발생하는 공진현상 및 감속기에 가해지는 영향에 대한 분석결과를 도출하였다.

표 2.7.3 상용속도 구간에서 견인전동기 시스템의 결함주파수

| Frequency | 120km/h | 290km/h |
|---|---|---|
| 1X Drive | 25.3 Hz | 61.1 Hz |
| NU2220 BPFI (1X) | 231.3 Hz | 558.6 Hz |
| NU2220 BPFO (1X) | 173.5 Hz | 419.0 Hz |
| NU2220 BSF (1X) | 86.7 Hz | 209.5 Hz |
| NU2220 FTF (1X) | 10.8 Hz | 26.2 Hz |
| NU216 BPFI (1X) | 229.9 Hz | 555.3 Hz |
| NU216 BPFO (1X) | 174.9 Hz | 422.3 Hz |
| NU216 BSF (1X) | 91.3 Hz | 220.5 Hz |
| NUP216 FTF (1X) | 10.9 Hz | 26.4 Hz |
| QJ215 BPFI (1X) | 230.6 Hz | 557.0 Hz |
| QJ215 BPFO (1X) | 174.2 Hz | 420.6 Hz |
| QJ215 BSF (1X) | 72.8 Hz | 175.9 Hz |
| QJ215 FTF (1X) | 10.9 Hz | 26.3 Hz |

나. Isolate 조건에서 고유주파수 분석

KTX 열차 운행 중 진동시험을 수행하기에 앞서 견인전동기 시스템에 대하여 임팩트 햄머 및 가속도 센서를 활용하여 모드시험을 수행하였으며, 표 2.7.4~2.7.6에 견인전동기 시스템의 Isolate 조건에서의 주파수 분석결과를 나타내었다.

표 2.7.4 고유주파수 분석결과(견인전동기_Vertical)

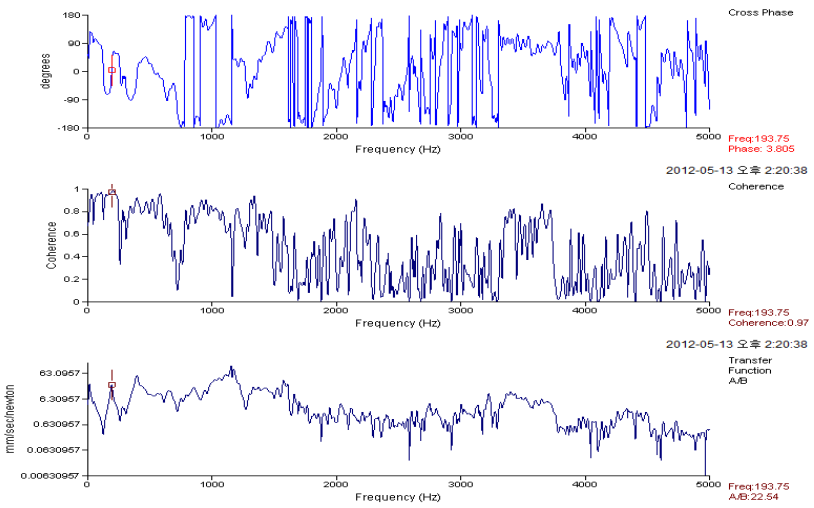
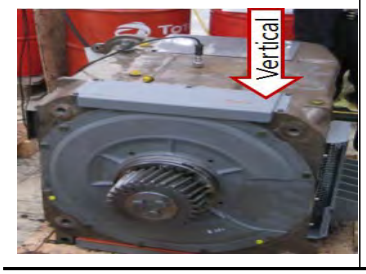
| Main 고유주파수 | 견인전동기(Vertical) |
|---|---|
| 193Hz |  |
| 393Hz | |
| 851Hz | |
|  | |

표 2.7.5 고유주파수 분석결과(감속기_견인전동기_기어_Vertical)

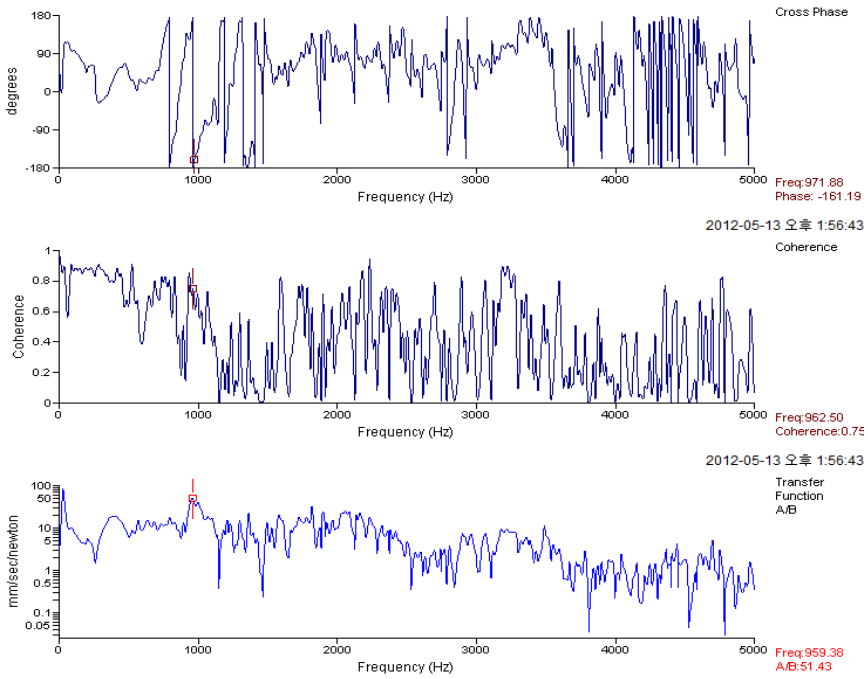
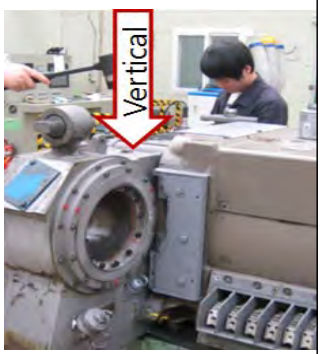
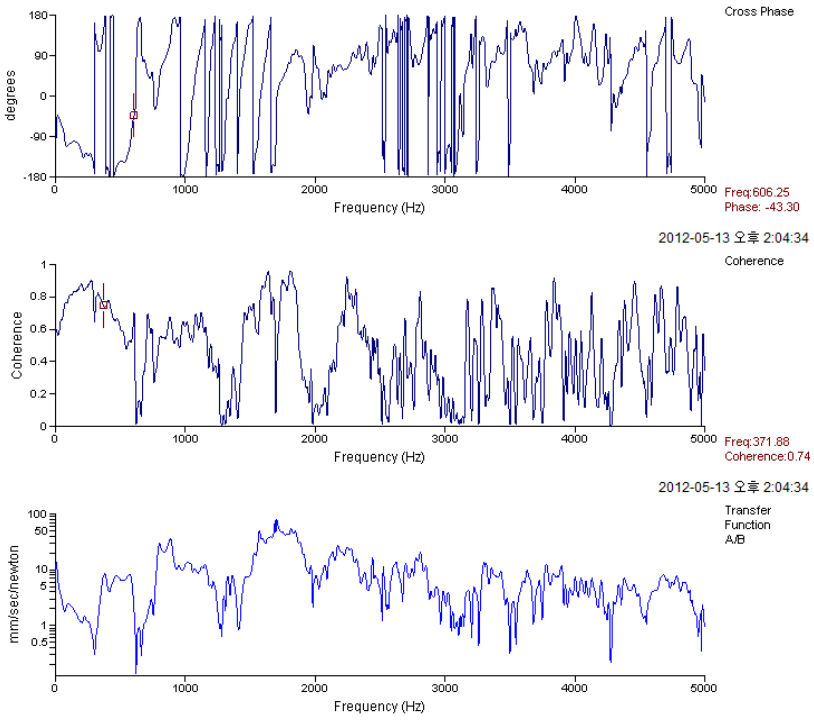
| Main 고유주파수 | 1차 감속기 견인전동기-기어(Vertical) |
|---|---|
| 390Hz |  |
| 962Hz | |
| 1818Hz | |
|  | |

표 2.7.6 고유주파수 분석결과(감속기_견인전동기_기어_Horizontal)

| Main 고유주파수 | 1차 감속기 견인전동기-기어(Horizontal) |
|---|---|
| 378Hz |  |
| 881Hz | |
| 1815Hz | |
|  | |

다. 실차 조립조건에서 고유주파수 분석

KTX 견인전동기 시스템의 단품 조건에 이어 열차 운행상태가 아닌 차량 조립조건에 대한 주파수 분석 결과를 표 2.7.7~2.7.9에 나타내었다. 표 2.7.10 에 견인전동기 시스템에 대한 고유진동수 분석결과를 요약하여 나타내었다.

표 2.7.7 고유주파수 분석결과(견인전동기_Vertical)

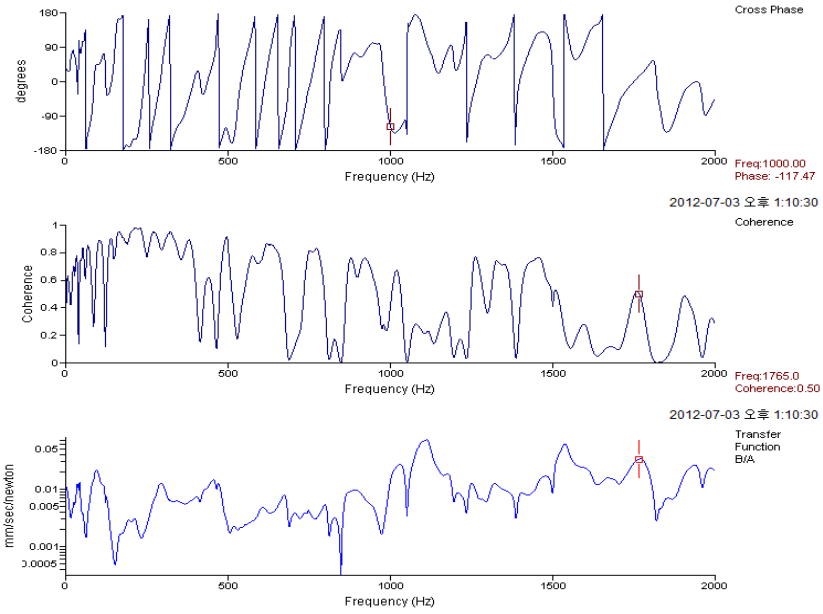
| Main 고유주파수 | 견인전동기(Vertical) |
|---|---|
| 1025Hz |  |
| 1765Hz | |

표 2.7.8 고유주파수 분석결과(견인전동기_Horizontal)

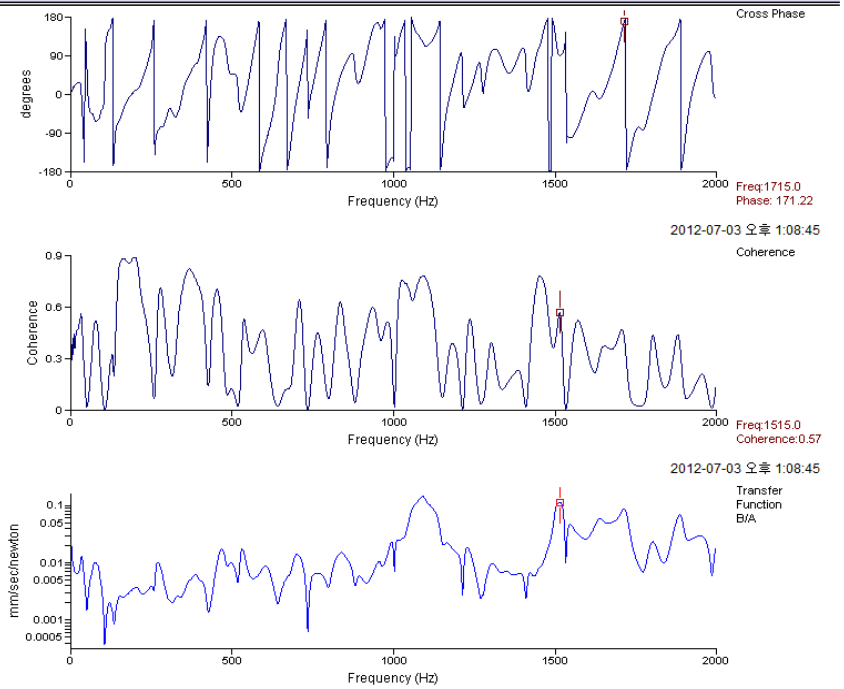
| Main 고유주파수 | 견인전동기(Horizontal) |
|---|---|
| 1090Hz |  |
| 1515Hz |  |

표 2.7.9 고유주파수 분석결과(1차 감속기_Horizontal)

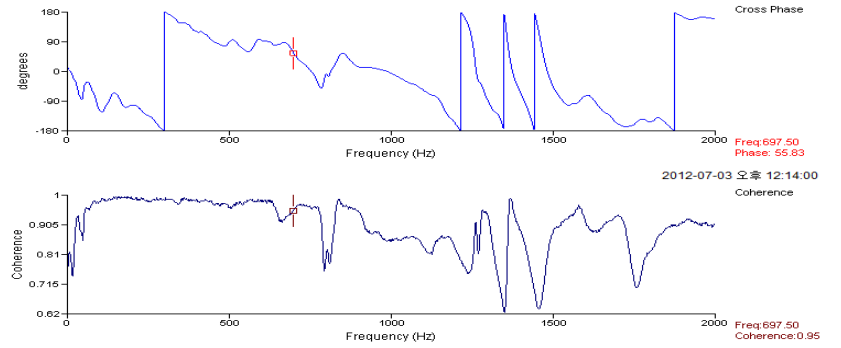
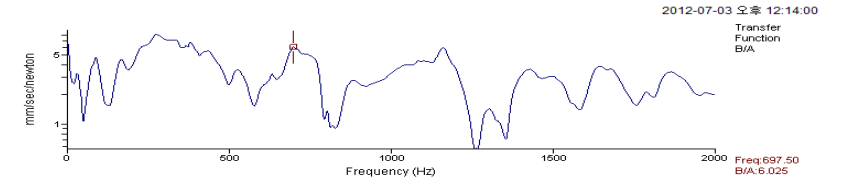
| Main 고유주파수 | 1차 감속기(Horizontal) |
|---|---|
| 697Hz |  |
| 1872Hz |  |

표 2.7.10 견인전동기 시스템 고유진동수 분석결과

| 구분 | Frequency(Vertical) | | | Frequency(Horizontal) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Traction Motor(단품조건) | 193Hz | 393Hz | 851Hz | 378Hz | 881Hz | 1815Hz |
| Traction Motor(조립조건) | 1025Hz | 1765Hz | - | 1090Hz | 1515Hz | - |

그림 2.7.22는 110~266km/h의 가/감속 구간에 대한 폭포 스펙트럼 선도(Waterfall Spectrum Plot) 차륜-레일간 충격진동에 의해서 발생하므로 KTX 열차 속도와 관계없이 특정 주파수대역에서 진동량이 일정하게 형성되며 가진주파수와 중첩시 크게 상승하는 대역이 공진점으로 판단되며 697Hz, 1090Hz가 이에 속한다. 697Hz는 1차 Modal test결과와 상호 비교해본 결과 1차 감속기의 Horizontal방향 공진주파수와 일치한다. 이는 견인전동기 Inboard측이 Gear측과 근접하기 때문에 감속기의 공진주파수가 Motor측에서도 나타난 것으로 추정되고 한편, 1090Hz는 Motor 공진주파수와 일치한다. 약 192km/h속도로 달릴 때 진동량이 크게 상승하고 192km/h속도를 벗어나면 다시 진동량이 감소하는 것으로 보아 1090Hz가 Motor의 공진점이라 판단된다. 60Hz 이상 Harmonics주파수는 전기적인 Noise 또는 모터측에 가해지는 누설전류에 의한 진동주파수로 판단된다.

그림 2.7.23~2.7.24는 123km/h-697Hz, 192km/h-1090Hz 조건에서의 Mode shape해석 결과를 나타낸다. 697Hz는 모터감속기의 고유진동수로 123km/h조건으로 열차 운행시 모터감속기 부분의 움직임이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. Motor 또한 1090Hz에 해당하는 고유주파수 대역의 속도로 열차가 달리는 조건일 때 견인전동기 시스템의 거동에 변화가 발생함을 확인할 수 있다. 실차 주행측정에서 확인된 고유주파수는 모터감속기의 고유주파수인 697Hz 및 모터측 1090Hz로 나타났으며, 모터를 중심으로 분석해 볼 때 모터측에서 발생가능한 가진주파수와 직접적인 관련이 없는 것을 분석되었으나 192km/hr로 주행할 경우에는 모터감속기의 GMF와 중첩되는 것을 확인하였다.

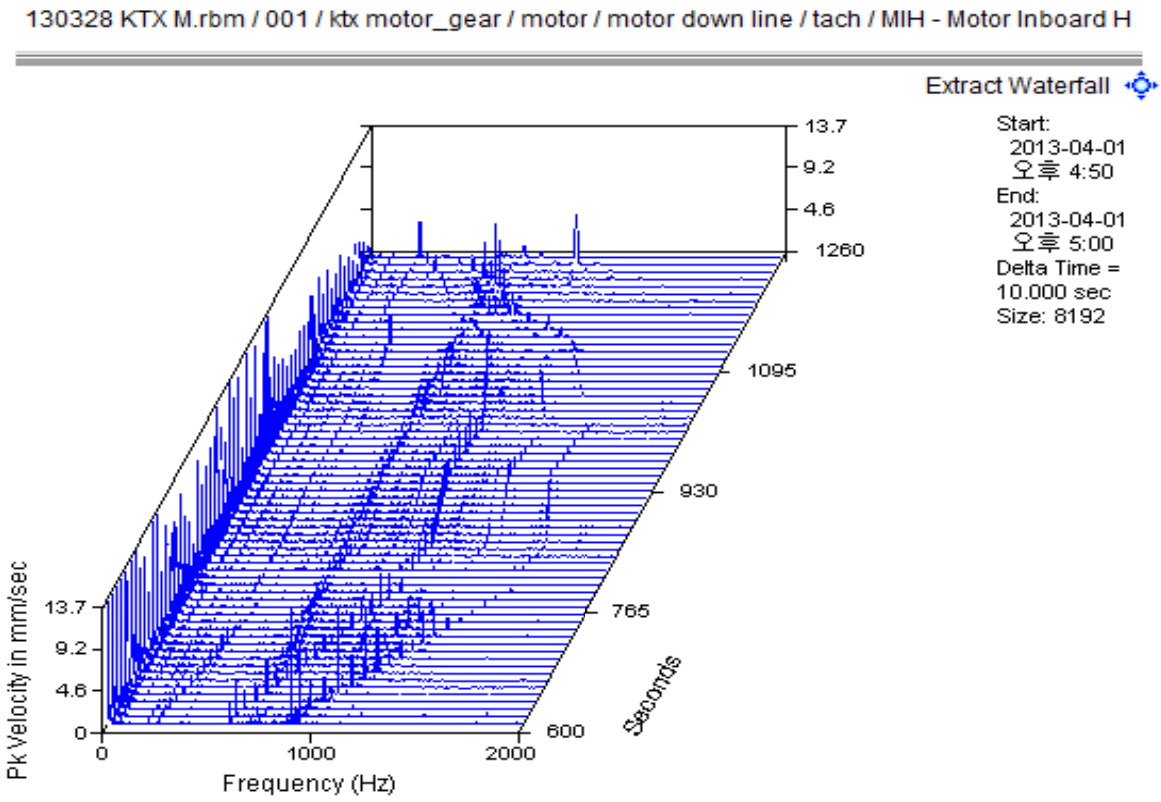



그림 2.7.22 견인전동기 시스템의 과도응답

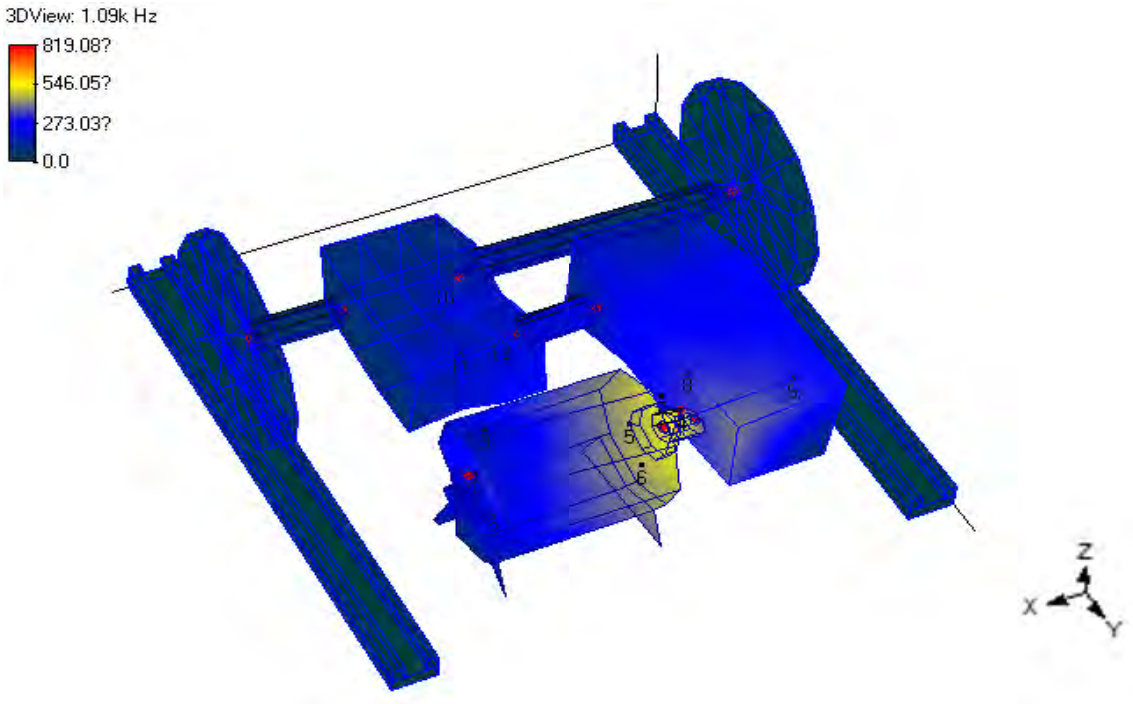



그림 2.7.23 모드해석 결과(1090Hz)

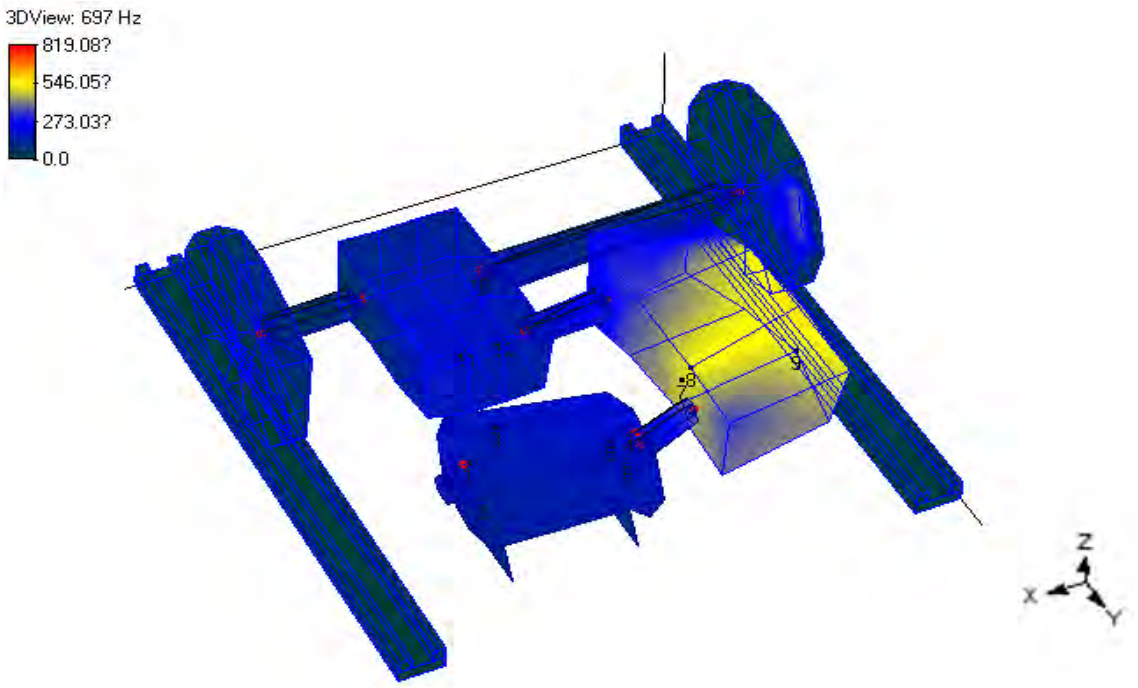



그림 2.7.24 모드해석 결과(697Hz)

아울러 고속열차 감속기를 대상으로 본선 시운전 시험 수행을 수행하기 위하여 연구기간 중 총 3편성의 차량을 섭외하여 현차시험을 추진하였다. 1회차(2012년도) 및 2회차(2013년도)의 경우 영업노선에 투입되고 있는 차량을 섭외하였으며, 3회차(2014년도) 시험의 경우, 중정비를 마치고 본선 시운전시험에 투입예정이던 차량을 섭외하여 감속기 모니터링 시스템에 대한 성능시험을 수행하였으며, 표 2.7.11은 시험열차의 운행 다이아를 나타낸다.

표 2.7.11 현차시험 운행 다이아

| 회차 | 시험일 | 운행구간 | 비고 |
|---|---|---|---|
| 1 | 2012.6.19.(화) | (KTX 111열차) 서울역(07:30) → 부산역(10:07)<br>(KTX 128열차) 부산역(07:30) → 서울역(13:43) | KTX-17호 |
| | 2012.6.20.(수) | (KTX 603열차) 용산역(07:50) → 광주역(10:56)<br>(KTX 608열차) 광주역(12:00) → 용산역(15:01) | |
| 2 | 2013.4.01.(월) | (KTX 141열차) 서울역(13:15) → 부산역(15:52)<br>(KTX 160열차) 부산역(16:40) → 서울역(19:18) | KTX-16호 |
| 3 | 2014.12.22.(월) | (KTX 시험차량)고양기지(21:42) → 서대전역(23:17) | KTX-15호 |
| | 2014.12.23.(화) | (KTX 시험차량)서대전(05:22) → 광명역(06:11)<br>(KTX 시험차량)광명역(07:13) → 부산역(09:36)<br>(KTX 시험차량)부산역(10:55) → 고양기지(14:23) | |
| | 2014.12.24.(수) | (KTX 시험차량)고양기지(09:46) → 부산역(13:16)<br>(KTX 시험차량)부산역(15:37) → 고양기지(18:54) | |

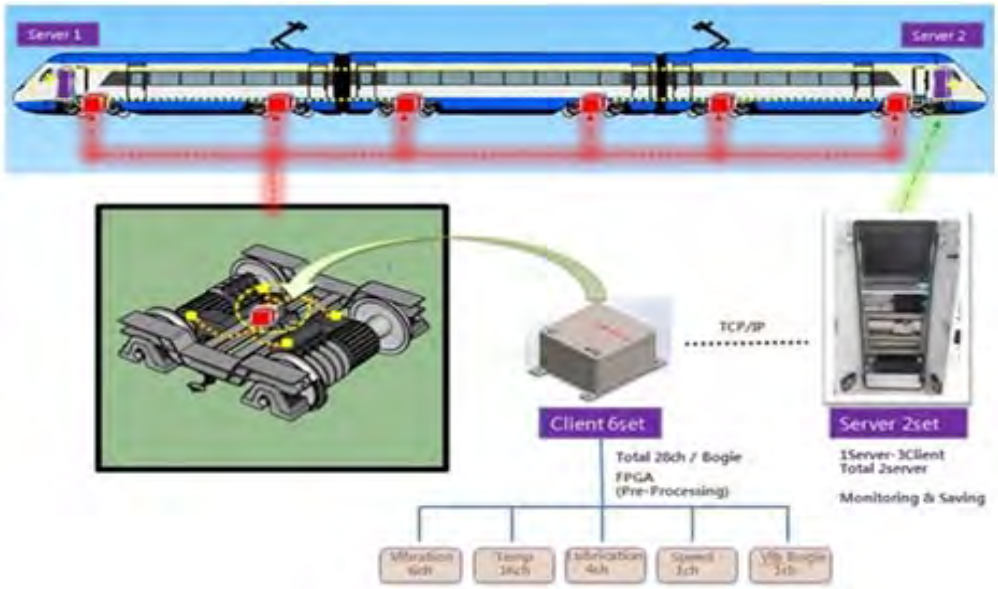



그림 2.7.25 클라이언트 다이어그램 및 서버 네트워크

## 3. 차세대고속열차(HEMU-430X) 현차 진동시험

차세대 고속열차(HEMU-430X) 차량 하부 구동부에 감속장치 모니터링 시스템인 T-GMS를 설치하여 설비진단 측면에서 열차 운행 중 발생되는 진동신호를 수집하고 분석하고자 하였다. 대차 하부 구동부의 센서로부터 객차 내부로 신호 케이블의 동선이 길고 복잡하여 이를 간소화하는 것에 초점을 두어 대차 하부에는 클라이언트(Client)를 상부에는 서버 시스템을 설치하는 방법으로 구성하였다. 클라이언트에서는 모든 신호연산처리를 완료하고 이 신호를 서버에 TCP/IP 프로토콜로 간단하게 전송하므로 이미 연산된 데이터가 케이블 노이즈의 영향이 없을 뿐만 아니라 서버는 그래픽과 클라이언트 네트워킹 운용만 담당하므로 시스템의 안정성이 높다.

### 가. 시험방법

차세대 고속열차(HEMU-430X) 차량편성 중 동력차(M-car) 하부에는 모터(Motor)와 단일 기어상자(Gearbox) 구조가 하나의 단위로 구성된 감속장치(Axle Gear Reduction Unit)가 탑재되어 있다. 차량의 감속기 진동 발생은 감속장치 내 기어나 베어링의 결함에 의해 발생하는 경우가 대부분이며 그림 2.7.26과 같이 감속장치 4 단위의 견인 감속기와 견인모터를 상호 비교할 수 있도록 설치하였다. 진동 센서는 총 8개로 3축 방향 가속도계를 사용하였고 주행 중 주요한 비교자료를 취득하기 위해 수직방향(Vertical)과 열차진행의 횡방향인 유닛의 축방향(Axial)을 모니터링 하였다. 이와 같은 설치 및 데이터 수집 방법으로 감속장치의 진동을 계측하여 주요 진단 파라미터인 Overall, Trend, Kurtosis, Crest factor, GMF, 1X, 2X, 3X, BPFI(Bearing pass frequency Inner race)등을 모니터링 하였다.

### 나. 진동진단 파라미터

감속기 모니터링시스템의 진동 진단 파라미터는 진동량을 나타내는 RMS와 Peak, 기어의 부하상태를 설명하는 GMF(Gear Mesh Frequency)의 1X, 2X, 3X(X=Order), 각 베어링의 결함주파수 중 7배수 (BPFI, BPFO)와 각 축(Shaft)의 회전수 1X, 2X(X=Turning speed)를 대표값으로 모니터링 하였다. 샘플링주파수(Sampling frequency)는 1초 간격의 Long term trend data로 축적하여 감속기와 관련된 부품의 진동 상태모니터링 진단하였다.

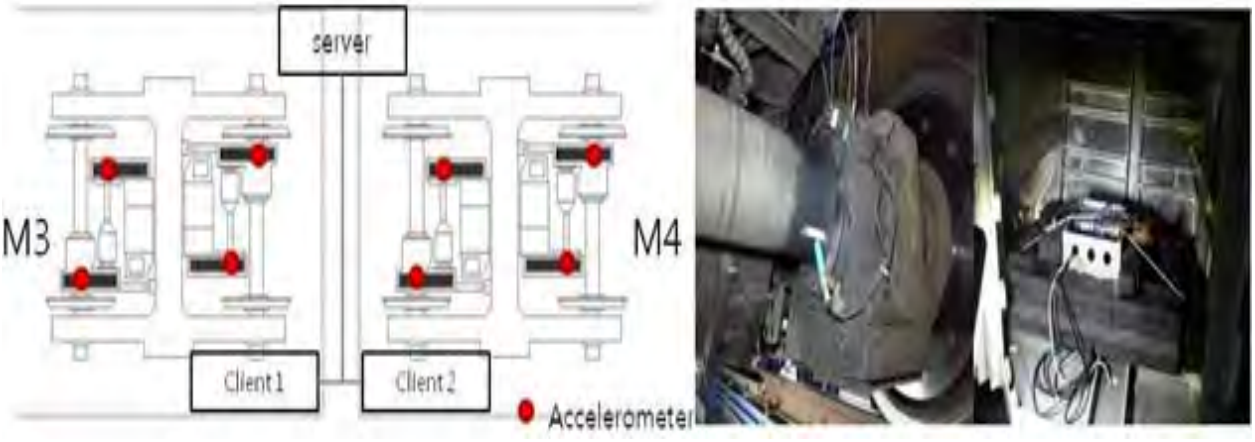



그림 2.7.26 모니터링 장치 설치위치

다. 시험결과

그림 2.7.28~2.7.29는 고속열차 주행중의 수직방향과 축방향의 속도(상), 진동 RMS(중), GMF1X(하)의 시간기반 데이터를 나타낸 것이다. 기어 수직방향(Vertical)이 축방향보다 진동 RMS값이 크고 250km 기준 2G(1client평균) 최고 40G(2Client)를 나타내고 있으며 결과와 같이 2번 Client가 감시하는 감속기의 진동이 크다.

그림 2.7.30~2.7.31은 감속기 수직방향에서의 BPFI 7X와 Kurtosis의 시간기반 데이터를 나타낸 것이다. 위 그래프를 통해 기어의 진동량(RMS)을 주도하는 주파수를 감시하는 주요 파라미터 중 BPFI7X는 첨예도(Kurtosis)보다 감속기와 베어링 진동의 진동 발생 정도를 잘 나타낸다고 할 수 있다. 이러한 결과는 정상파와 충격파의 비교인 실험실과 실차 데이터의 차이에서도 나타나듯이 파고율(Crest factor)과 첨예도(Kurtosis)보다 GMF와 BPFI가 실제 감속기의 진동상태를 보여주기에 적합한 것으로 판단된다.

그림 2.7.32는 회전수(RPM) 1X 파라미터의 시간기반 데이터로 차축의 회전속도와 상관성이 있어 보이나 전체적인 진동RMS 데이터 형태와는 일치하지 않는다. 그러나 (RPM) 1X 파라미터는 기어진동과 관련성이 적으므로 차축과 차륜의 불량상태 발생시에는 가장 좋을 지시치일 것으로 판단된다. 그림 2.7.33은 모터의 진단파라메터의 시간기반 데이터로 진동량은 기어의 진동량에 비해 1/30수준이며 진동 RMS값의 기여도는 기어의 GMF와 BPFI7가 높은 상관성을 나타내므로 모터의 수명은 기어의 진동량 감소와 연관이 있을 것으로 판단된다.

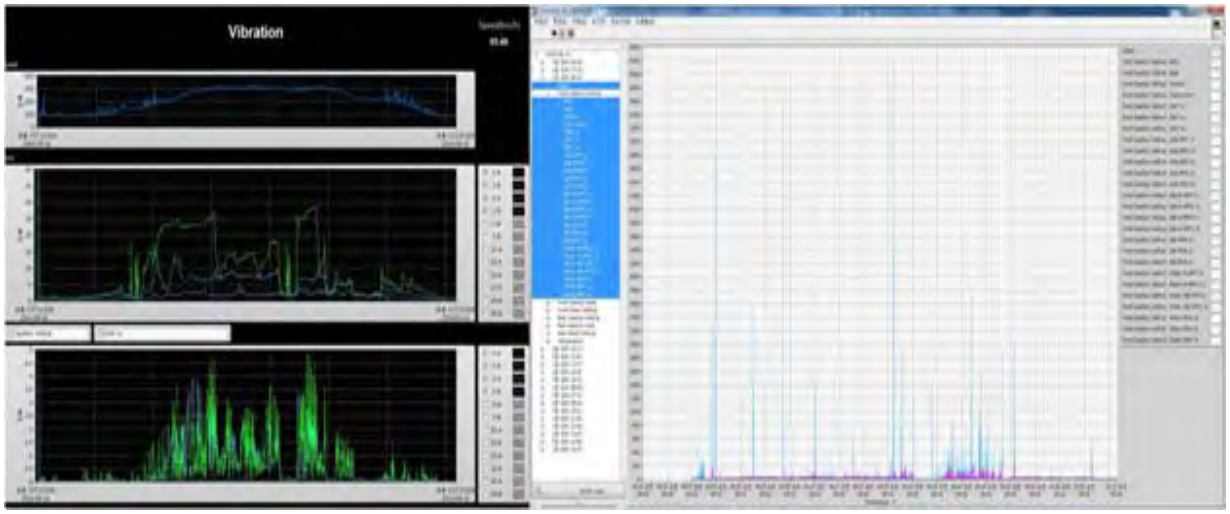



그림 2.7.27 모니터링 성능 시험화면 및 수집 데이터

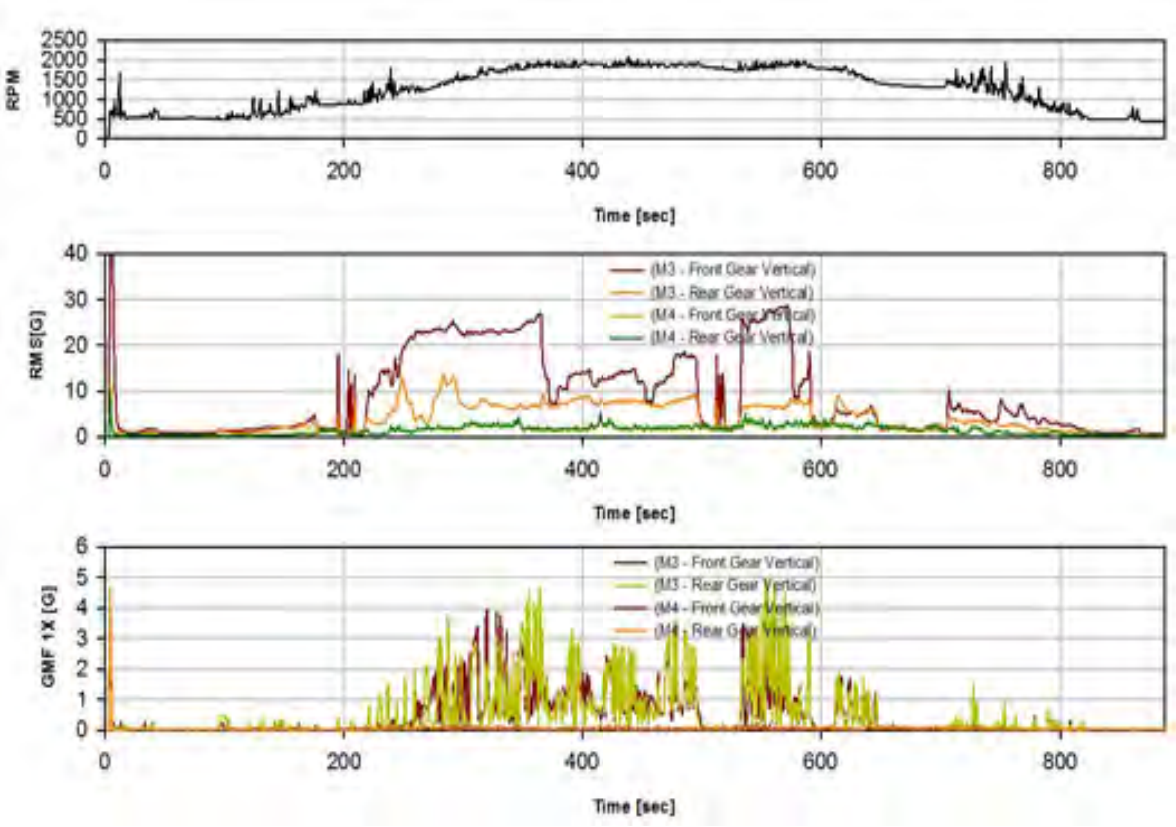



그림 2.7.28 RPM & RMS 비교[GMF1X(vertical)]

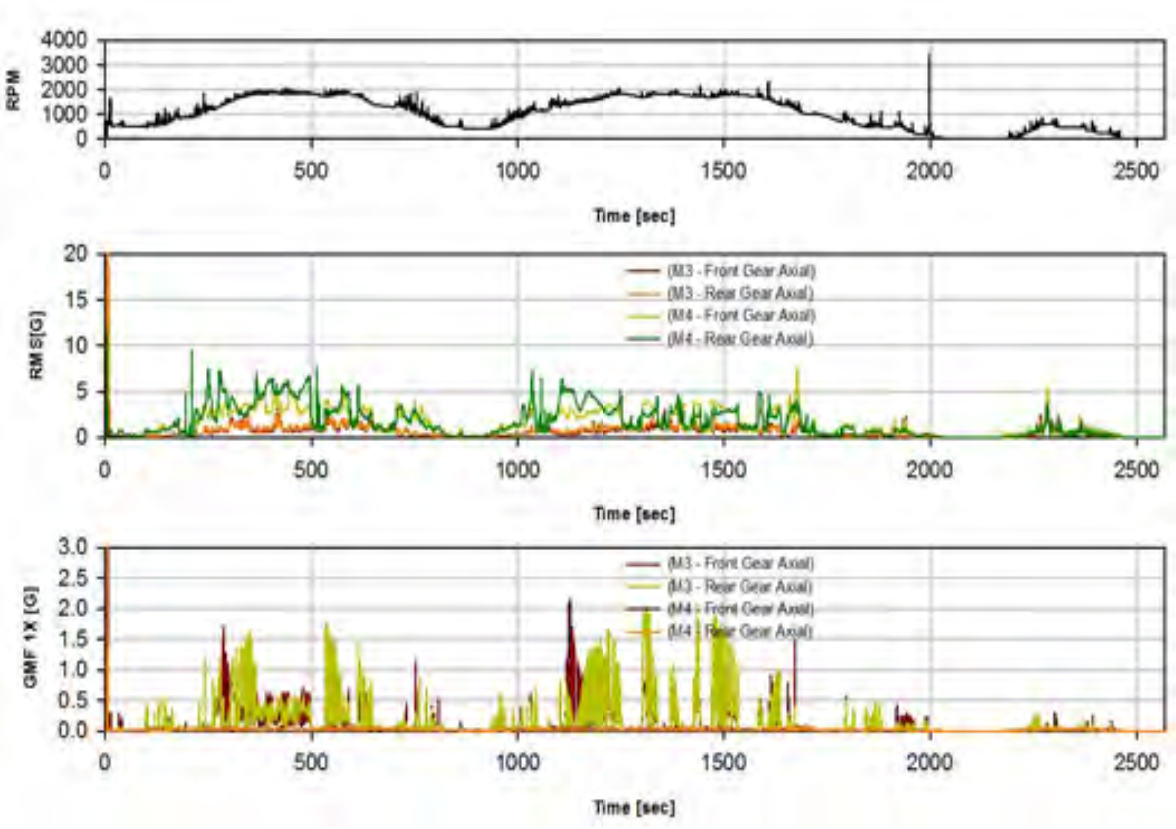



그림 2.7.29 RPM & RMS 비교[GMF1X(axial)]

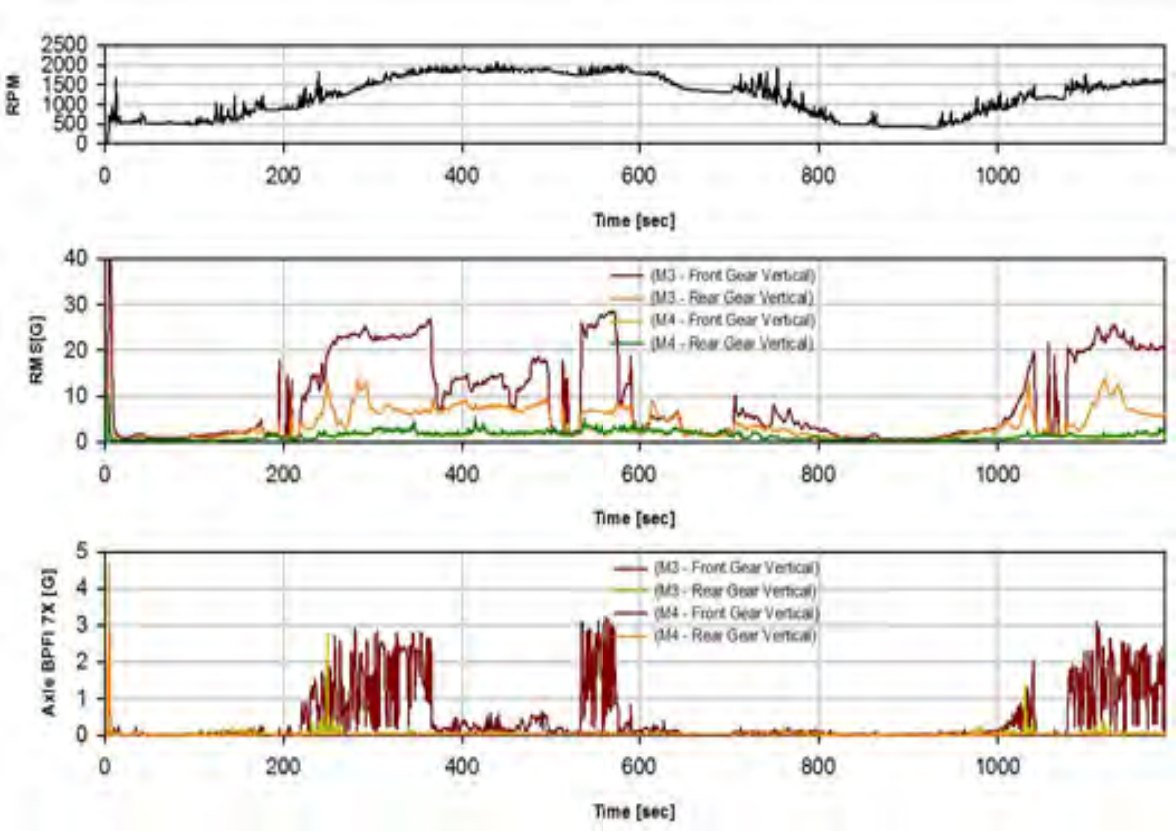



그림 2.7.30 RPM & RMS 비교[BPFI7X]

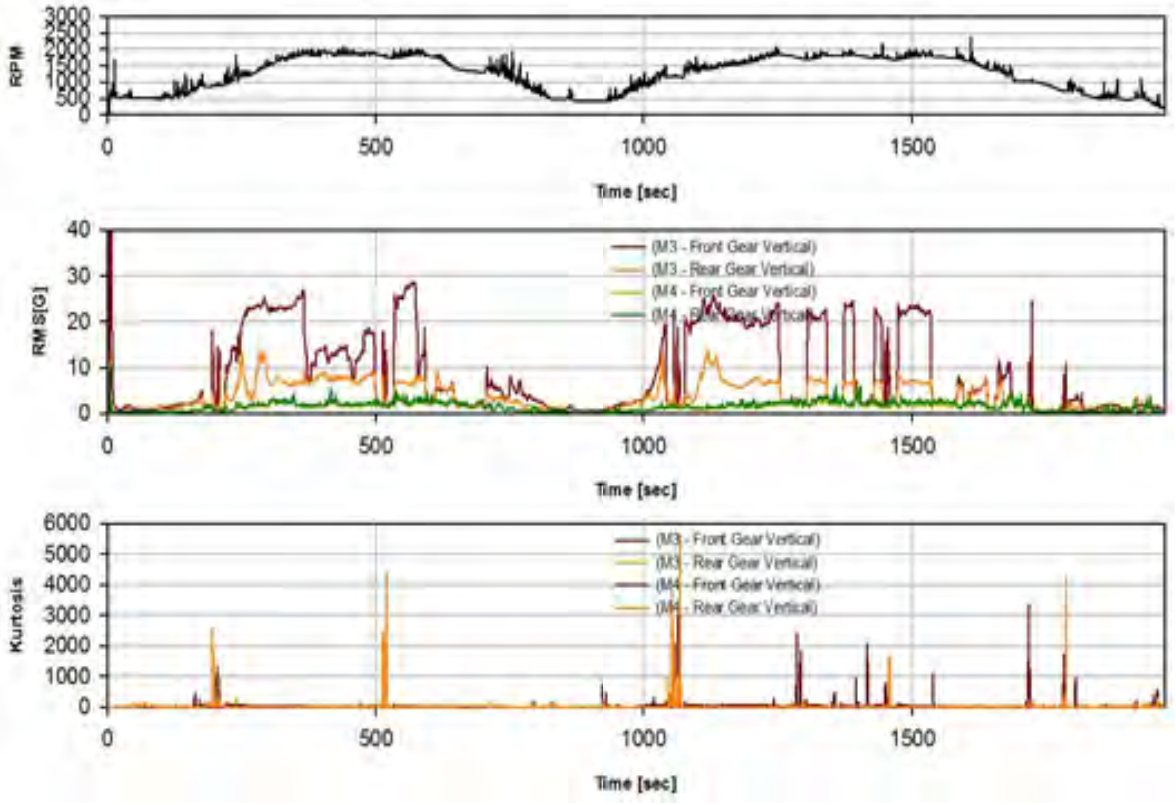



그림 2.7.31 RPM & RMS 비교[Kurtosis]

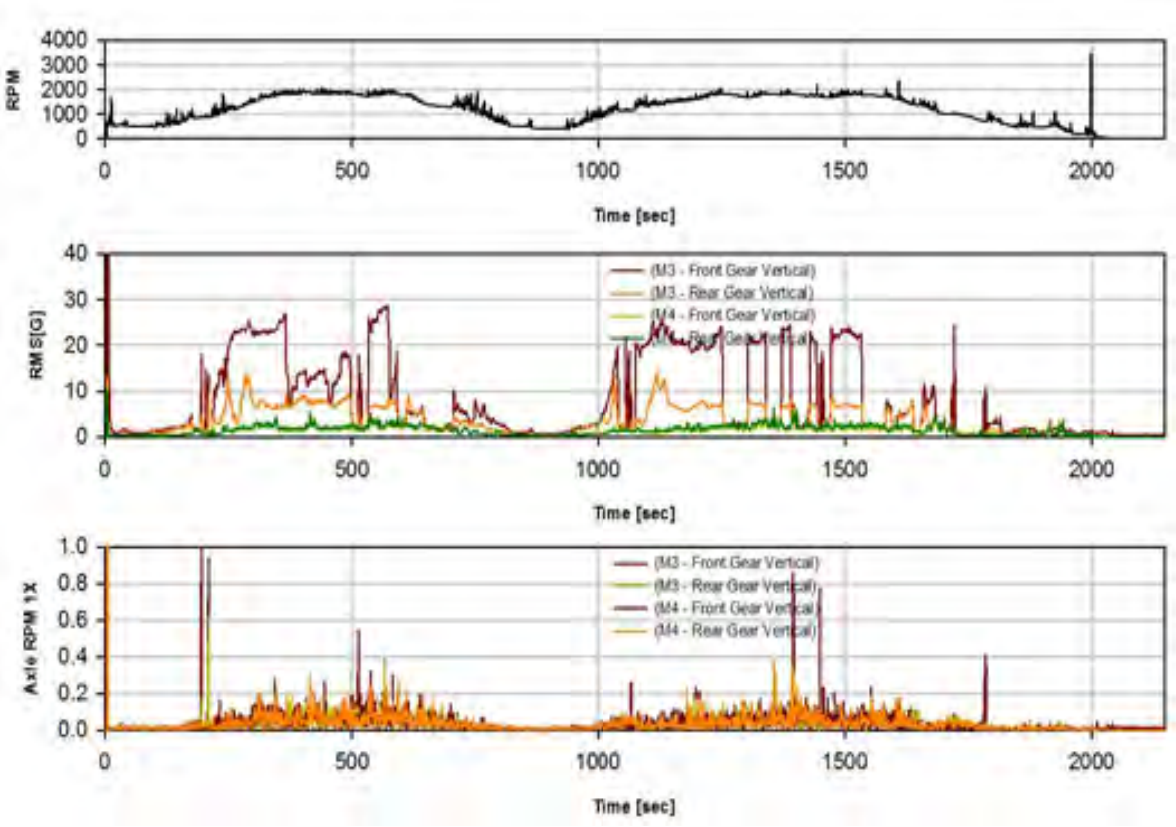



그림 2.7.32 RPM & RMA 비교[Axle PRM 1X]

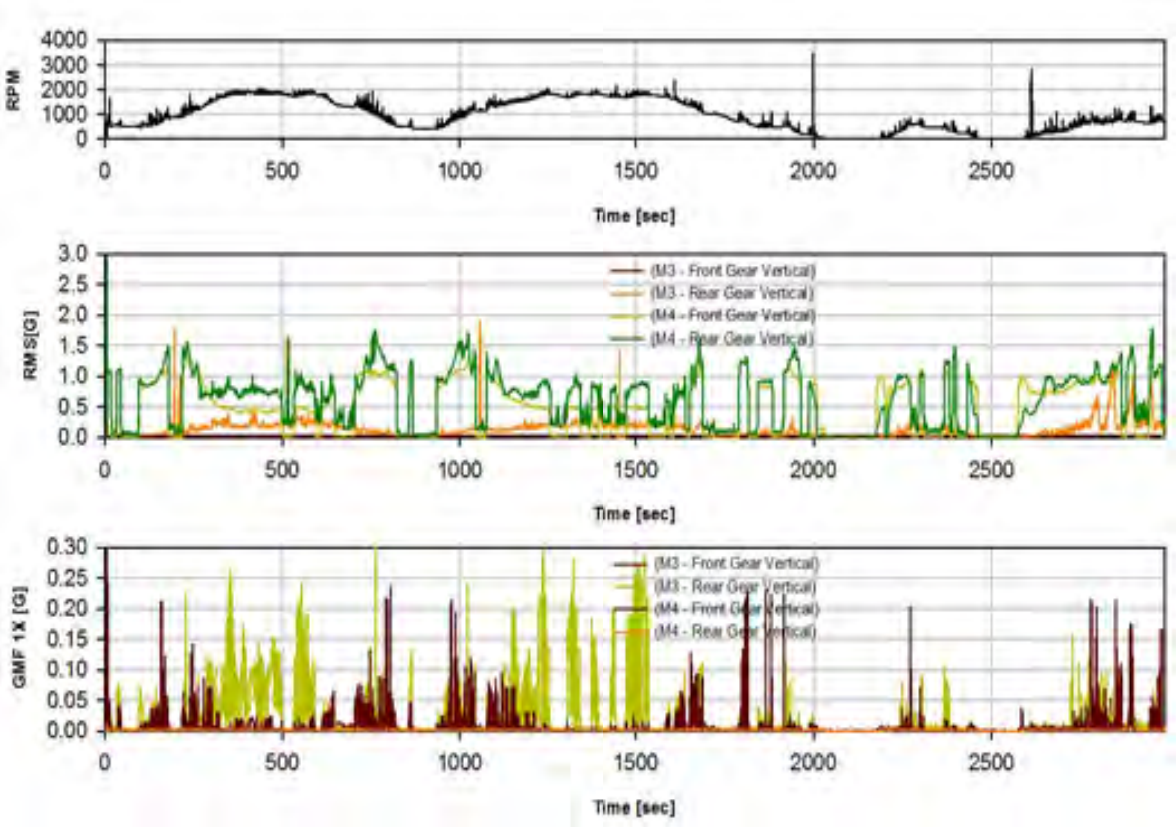



그림 2.7.33 RPM & RMA 비교[GMF1X 7X]

## 4. 모니터링시스템 고속열차 OBCS와의 연계성

KTX(Korea Train eXpress) 열차는 고속주행이 가능한 각 장치들을 통해 영업 최고속도 300Km/h로 운행하는 여객열차로, 견인 및 전기제동장치와 공기제동장치, 공기조화장치, 차체장치, 기계장치등으로 구성되어 있으며 이를 제어하고 감시하는 차상컴퓨터(OBCS) 장치가 설치되어 있다.

OBCS(On Board Computer System) 장치는 차상컴퓨터 또는 차량에 설치된 컴퓨터 장치라고 말하며 "차량의 컴퓨터와 컴퓨터를 연결한 산업용 LAN 방식의 TORNAD*(Token Ring Network Alstom Device Star) 네트워크와 시리얼 링크로 연결된 컴퓨터와 주변장치 그리고 명령 제어선을 통한 열차상태와 차량의 저전압 입출력 제어선을 통한 차량의 제어 및 감시, 유지보수지원을 위한 고장수리 안내 등의 기능을 수행하는 중요한 장치이다. OBCS는 그림 2.7.34와 같이 4종류의 제어랙과 18종의 보드의 조합으로 구성되어 차량의 위치별 기능을 구현하도록 되어 있으며 2개의 서브네트워크를 통한 네트워크 통신으로 연결되어 장대열차의 제어 및 열차 감시한다.

OBCS를 통한 차량의 기초 정보수집은 그림 2.7.35와 같이 OBCS장치와 유지보수 노트북을 연결하는 시리얼 케이블을 통해 수집이 이루어진다. 각 차상컴퓨터 장치에는 KADP/T 보드에 9핀 시리얼포트가 있어 해당 차량의 OBCS 입/출력정보 및 네트워크 정보를 수집하여 유지보수자에게 차량의 상태 정보와 고장정보 및 이벤트 발생에 대한 컨텍스트 정보를 현시하도록 되어 있으므로 기존 시스템을 기준으로 감속기 모니터링 시스템에서 수집되는 정보(진동, 온도, 윤활 등)와의 호환성 여부를 검토할 필요가 있다.

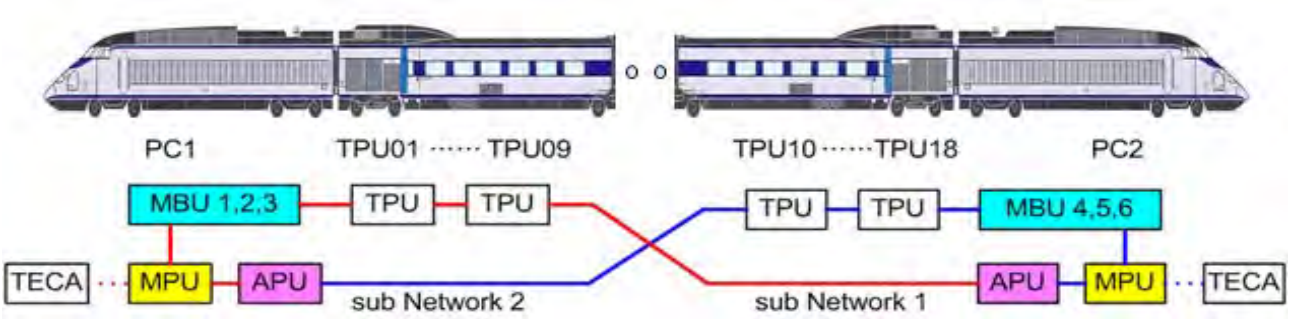



그림 2.7.34 차량 네트워크 구성도

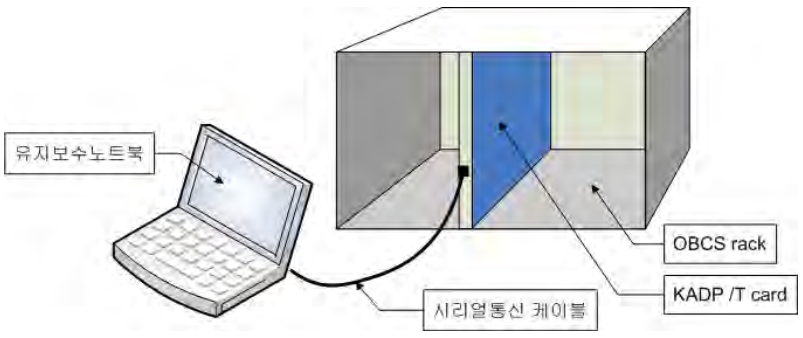



그림 2.7.35 OBCS 상태정보수집 장비 Setting

차량의 고장정보는 차상컴퓨터에 의해 체계화된 고장코드로 기록되고 CSV 포맷의 Data file로 저장되며 감속기를 포함한 차량의 고장정보를 그림 2.7.36과 같이 DEP-xp 소프트웨어 Tool을 통해 저장 및 분석이 가능한 지 여부를 검토할 필요가 있으며, 호환성을 위해 다음과 같은 항목이 검토되어야 한다.

- 감속기 시스템에 대한 고장정보 기록 및 전송 가능하도록 고장분류가 가능한 코드 생성

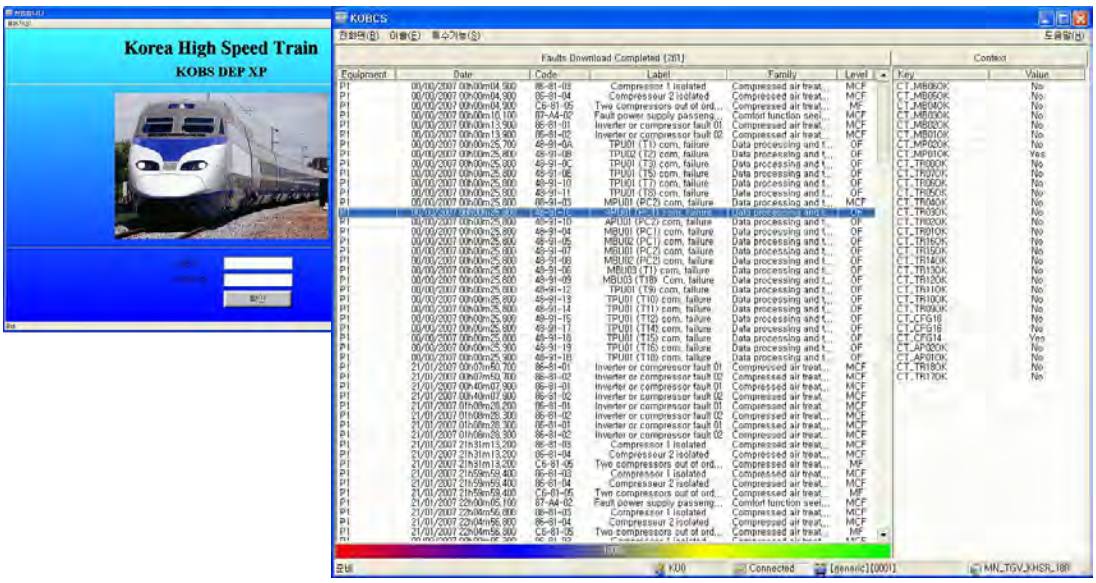



그림 2.7.36 KTX DEP-xp

- Wring 및 주요 계전기 그리고 Plug_In 형태의 FRB의 입출력 신호를 BSS 보드의 입출력 신호로 감시할 수 있으므로 감속기 시스템에서 발생하는 오류 정보를 BSS 입출력 보드를 통해 정적 및 동적상태에서의 차량정보 확인이 가능하도록 하는 방안 연구 필요
  ☞ 차량의 제어명령어는 BSS(Bus Series Specializes) 출력보드의 출력신호에 의해 차량에 전달

표 2.7.12 BSS 보드 입/출력 상태확인(예)

```
E:MES3t>bss show board        --- Bss Board 입출력 상태 호출명령
MEL : 0x0f                    --- 10slot MELP 입력보드
   Connect :  00000100000000000000000000011000000000001111111100000000101101111111110001
   Value :    00000000000000000000000000010000000000001110000000000000011000101010000
   AlwaysOn : 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
   AlwaysOff :00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MEL : 0x0e                    --- 12slot MELP 입력보드
   Connect :  11111111000011111111100000011001011100011011111111100001111100010001000000
   Value :    00101011000010001011000000110000000000110111100000000100110001000100000
   AlwaysOn : 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
   AlwaysOff :00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
INR : 0x0b                    --- INRP 보기헌팅 감지 보드
   Connect :  1100
   Value :    0000
   Test :     0000
 ..... OBCS Rack 별 구성에 따른 보드구성
```

| | |
|---|---|
| Connect | --- 하드웨어 입력포인트 |
| Value | --- 활성화된 입력포인트 |

- MPU의 하부장치인 TECA를 통해 운전자에게 차량의 상태정보 및 감속기 등의 고장조치에 대한 정보 현시 가능한 방안 및 고장 발생 시 조치방안 생성에 대한 검토가 필요함. 이에 대한 장치의 유지보수는 프로토콜 분석기를 이용한 기능점검을 시행할 수 있으며, 화면에 따른 동작상태를 확인하고 작동여부확인을 위하여 TRACE 명령을 응용한 입출력 데이터의 접근이 가능함

표 2.7.13 TECA 시리얼데이터 점검

```
OBS-P1>CX DATA 256
OBS-P1>CX TRACE RX ON                                  <--- TECA 데이터 출력(MPU 입력) 시작
OBS-P1>CX TRACE TX ON                                            <--- MPU 데이터 출력(TECA 입력) 시작
OBS-P1>CX 0000001609 9D TX 100 E3-48-E3                <--- 데이터 송/수신 주소
CX FF 36 FF FF FF FF 00 5C 01 02 00 00 00 00 00 00 .6.....₩.........
CX 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ................
CX 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ................
CX 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ................
CX 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ................
CX 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ................
CX 00 00 00 00 00                                               ....
OBS-P1>CX 0000001744 9D RX 100 E3-44-E3                          <--- 데이터 송/수신 주소
CX FF FF FF FF FF FF 00 5C 01 02 00 00 00 00 00 00 .......₩.........
CX 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ................
```

# 제3장 최종 연구성과 및 적용실적

## 제1절 학술지 게재 논문

학술지 게재 논문에 대한 최종 연구성과는 아래 표와 같이 총 7건으로 계획서상의 목표치 3건의 230%를 달성하였다. 학술지별로는 한국철도학회에 1건, 한국소음진동공학회에 1건, 한국정밀공학회에 4건, 국외저널(Applied Mechanics and Materials) 1건을 게재하였다.

<연구성과 (학술지 게재 논문)>

| 게재연도 | 논문명 | 저자 | | | 학술지명 | Vol.(No.) | 국내외 구분 | SCI 구분 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 주저자 | 교신저자 | 공동저자 | | | | |
| 2012.6 | KTX-산천 열차용 모터감속기 고정대의 피로 수명 평가 | 이찬우 | 이찬우 | 이동형 | 한국 정밀공학 회지 | 29(6) | 국내 | X |
| 2013.2 | 고속철도차량 감속구동장치의 이상진단을 위한 진동특성분석 | 지해영 | 지해영 | 이강호, 김재철, 이동형, 문경호 | 한국철도 학회 논문집 | 제16권 제1호 | 국내 | X |
| 2013.4 | 고속열차 감속기의 상시감시시스템 설계 및 가변속주행시 안정성 향상을 위한 동특성 해석 | 박병수 | 박병수 | 김진우, 최상락, 송영천 | 한국소음 진동 공학회 논문집 | 제23권 제4호 | 국내 | X |
| 2013.7 | 고속철도차량 감속구동장치 진동특성 분석 | 문경호 | 문경호 | 이동형, 김재철, 지해영 | 한국정밀 공학회 논문집 | 제30권 제7호 | 국내 | X |
| 2013.7 | 고속철도차량 감속기 결함진단을 위한 진동 파라미터 분석 | 김재철 | 김재철 | 지해영, 이강호, 문경호, 서정원 | 한국정밀 공학회 논문집 | 제30권 제7호 | 국내 | X |
| 2013.7 | 고속열차용 감속기 모니터링 시스템 개발 | 이동형 | 이동형 | 권석진, 박병수, 조덕영, 김진우 | 한국정밀 공학회 논문집 | 제30권 제7호 | 국내 | X |
| 2015.1 | Comparison of Vibration Signal Analysis Methods for effective Gear Fault Detection | Lee, Woong-yong | Lee, Dong-Hyong | Ji, Hae-Young | Applied Mechanics and Materials | Vo.l. 709 | 국외 | X |

한국정밀공학회지 제 29권 6호 pp. 626-631 June 2012 / 626
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 29, No. 6, pp. 626-631

◆ 특집 ◆ 레일방식 철도차량의 고속화 기술

# KTX-산천 열차용 모터 감속기 고정대의 피로 수명 평가

## Fatigue Life Evaluation of Motor Block Bracket Units for KTX-Sancheon Trains

이찬우 [1,✉], 이동형 [1]
Chan Woo Lee[1,✉] and Dong-Hyong Lee[1]

1 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)
✉ Corresponding author: cwlee@krri.re.kr, Tel: 031-460-5204

Manuscript received: 2012.4.13 / Accepted: 2012.4.27

*In this study, fatigue life of the motor block bracket units for KTX-Sancheon trains was assessed. Design evaluation for railway structures was performed based on the UIC 566 regulation, and test and evaluation of fatigue life in welded parts was performed in accordance with standard ERRI B 12/RP17 and ERRI B 12/RP60. The actual vehicle dynamic stress testing was executed in KTX-Sancheon service line with the service operating speed. The dynamic stress was measured with commercial data acquisition system (MGC plus). The cumulative damage was evaluated by applying standard BS 7608 - Class F and cycle counting was used rain-flow counting method. As a result, the motor block bracket units for KTX-Sancheon trains was designed to fit the regulation and the safety of fatigue life for 30 years, assuming that KTX-Sancheon trains travels 600,000km annually, were confirmed under current operating conditions.*

Key Words: Dynamic Service Stress (실동응력), Motor Block Bracket Units (모터 감속기 고정대), Fatigue Life Evaluation (피로 수명 평가)

### 기호설명

$T_{max}$ = max. torque of axle gear reduction system
$F_{ine}(z,y,x)$ = directional inertia weight of axle gear reduction system
$\sigma_y$ = yield strength(MPa)
$\sigma_t$ = tensile strength(MPa)
$\sigma_D$ = dynamic service stress(MPa)
$\sigma_p$ = permissible stress(MPa)
R1 = driving gear 1(axle-gear)
R2 = driving gear 1(tripod shaft-gear)
S = safety factor

### 1. 서론

KTX-산천(KTX-Sancheon)은 국내 연구진들이 1996 년 12 월부터 2002 년 10 월까지 총 6 년 동안 G7 선도기술개발 사업의 일환으로 개발된 시험차량 HSR-350x 의 기술을 이용하여 만들어진 고속열차이다. KTX-산천은 KTX-1 열차가 20 량 편성인 것에 비해 승객수요에 맞추어 운행할 수 있도록 10 량 1 편성으로 구성되어 있고, 증련 운전으로 20 량까지 확대편성을 할 수 있도록 만들어진 국내 순수기술로 제작된 고속차량이다. KTX-산천 차량의 영업 최고속도는 305 km/h 이고, 설계 최고속도는 330 km/h 로 되어 있다. 이 차량의 설계수명

한국철도학회논문집 제16권 제1호 ▌pp. 26-31 (2013년 2월)
JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY VOL.16, NO.1 ▌pp.26-31 (February 2013)
pISSN 1738-6225

# 고속철도차량 감속구동장치의 이상진단을 위한 진동특성분석

# Fault Diagnosis of a High-speed Railway Reduction Unit Using Analysis of Vibration Characteristics

지해영* · 이강호 · 김재철 · 이동형 · 문경호
Hae Young Ji · Kang Ho Lee · Jae Chul Kim · Dong Hyoung Lee · Kyoung Ho Moon

**Abstract** The reduction unit is one of the most important components for railway vehicles because the torque of the motor must be transmitted to the wheels of the vehicle by the reduction unit. The faults in the reduction units of high-speed trains are caused by damage such as gear, fatigue. These have serious impacts on safety of the train during operation. To address this development of a system for monitoring, fault diagnosis of the reduction unit is needed to keep the vehicle running safely. Before that can be accomplished, it is most important to understand the vibration characteristics of the reduction unit in a normal state. Vibration diagnosis technology using characteristic-analysis of vibration waveform and frequency is known to be the most effective method for fault diagnosis. In this paper, we analyzed the vibration characteristics of the reduction units two Korean high-speed trains (KTX and KTX II), under normal conditions, by two test methods (driving gear test, full-vehicle test).

***Keywords*** : Reduction unit, Fault diagnosis, Vibration characteristics, High-speed railway

**초 록** 감속구동장치는 모터에 회전력을 차륜에 전달하는 중요한 장치로써 가장 큰 고장원인 중 하나는 기어의 접촉 피로손상에 의한 것이다. 이로 인해 주행 시 심각한 영향을 비칠 수 있기 때문에 주행안전성 확보를 위한 이상진단 모니터링시스템 기술이 요구되고 있으며, 이상진단을 위한 모니터링 시스템 개발을 위해 고장이 없는 감속구동장치의 기초 데이터 분석이 중요하다. 기어의 주요 이상진단방법 중 고장원인파악 및 조기진단에 주로 사용되는 진동신호분석법을 적용하여, 본 논문에서는 고장이 없는 고속철도차량(KTX, KTX II) 감속구동장치를 대상으로 실물시험과 실차시험을 수행함으로써 고장이 없는 감속구동장치의 이상진단에 필요한 진동특성분석을 실시하였다.

**주요어** : 감속구동장치, 이상진단, 진동특성, 고속철도차량

## 1. 서 론

철도차량의 감속구동장치는 구동모터의 회전력을 차륜에 전달하는 장치이며, 고속운행 시 감속구동장치에 가해지는 부하가 매우 크기 때문에 기어의 안전성 및 내구성 등이 매우 중요하다[1]. 실제 감속구동장치의 운행거리, 고장발생횟수 및 보수정비 등을 고려한 신뢰성(Reliability) 및 유지보수성(Maintainability)분석[2]을 통해 관리가 가능하지만, 감속구동장치의 주요 고장원인 중 하나는 내부 기어의 접촉피로손상에 의한 고장이며, 이러한 이유로 조기에 파손유무를 발견함으로써 손상 이나 고장으로 인한 피해를 미연에 방지하기 위해 이상 진단 모니터링시스템이 필요한 실정이다.

기어에 대한 이상진단방법으로는 진동신호를 이용한 측정 및 분석기술[3,4]이 많이 사용되며, 이상진단을 위해서는 기본적으로 고장이 없는 경우의 진동특성파악이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 고속철도차량 감속구동장치 이상진단 모니터링 시스템을 위한 기초단계로, 고장이 없는 상태의 감속구동장치 진동특성을 분석하였으며, 일반적으로 고속열차 주행 시 차륜/레일에 의한 진동이 윤축 및 대차에 전달되어 감속구동장치의 진동에 영향을 비칠 수 있기 때문에 시험기 시험 및 실차시험을 수행하여 이상진단에 필요한 진동특성을 분석하였다.

*Corresponding author.
Tel.: +82-31-460-5578, E-mail : young0085@krri.re.kr
©The Korean Society for Railway 2013
http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.1.026

## 2. 본 론

### 2.1 고속철도차량 감속구동장치 진동특성분석

고속철도차량 감속구동장치는 1차, 2차 감속구동시스템으로 구성되어 있으며 2개의 기어박스안에 입력측과 출력측으로 나뉘어있다. 진동측정은 기어박스와 베어링 케이스 외부에서 측정하였으며, 진동신호의 처리는 기어와 베어링의 결함진단에 사용되는 데이터통계분석방법 중 파고율(Crest factor)과 커토시스(Kurtosis)를 이용한 시간영역분석[5,6]과 기어 맞물림주파수($f_m$)와 차수분석(order)을 통한 주파수영역분석을 실시하였다.

Transactions of the KSNVE, 23(4) : 301~307, 2013
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.23.4.301

한국소음진동공학회논문집 제 23 권 제 4 호, pp. 301~307, 2013
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

# 고속열차 감속기의 상시감시시스템 설계 및 가변속주행시 안정성 향상을 위한 동특성해석

# Dynamic Characteristics Analysis for the Online Monitoring System Designing KTX MRU and Improvement of the Stability Related Variable High Speed

박 병 수† · 김 진 우* · 최 상 락* · 송 영 천**
Byung Su Park, Jin Woo Kim, Sang Rak Choi and Young Chun Song

(Received July 18, 2012 ; Revised January 17, 2013 ; Accepted March 18, 2013)

**Key Words** : Gear Mesh Frequency(기어맞물림주파수), MRU(모터감속기), EMA(experimental modal analysis), Transient Analysis(과도해석), Gear Box(기어박스)

## ABSTRACT

MRU(motor reduction unit) for KTX is a assembled complex structure that is equipped with a lot of parts at the express train KTX and that is the core power source operating variable speeds. This study is recorded the dynamic characteristics analysis results tested by EMA which is done through the parts and assembly test, transient analysis and stoped train test in order to design the online monitoring system for KTX MRU. And the mode shapes result from critical vibration frequency explain the relation with variable speeds of express train over 250 km/hr. Also these variable speeds make variable operational frequencies at pinion, axle gear mesh frequency and normal bearing fault frequencies. As the specified speed can make resonance with natural frequencies of the MRU, for the train operating stability, this study also presents the MRU's critical speeds calculated by the each train speed.

## 기 호 설 명

1X : 1차회전수
2X : 2차회전수
Bd : 볼 또는 롤러의 지름
BPFI : 내륜통과주파수
BPFO : 외륜통과주파수
BSF : 볼통과주파수
FTF : 케이지주파수
GMF : 기어맞물림주파수
Nb : 볼의 수
Pd : 피치지름
Rs : 열차속도
S : 초당 회전수
Wd : 차륜직경
# : 기어의 이수

## 1. 서 론

대한민국의 고속철도차량은 프랑스TGV와의 기술협약에 이은 1세대 KTX에 이어 'KTX-산천', 최근

† Corresponding Author ; KTM engineering Inc.
E-mail : ktme@ktme.com
Tel : +82-31-776-2200, Fax : +82-31-776-3119
* KORAIL Research Institute Technology Research Department
** Member, KTM engineering Inc.

‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

한국정밀공학회지 제 30 권 7 호 pp. 694-701
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 7, pp. 694-701
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.7.694

◆ 특집 ◆ 철도차량 구동장치의 모니터링 기술

# 고속철도차량 감속구동장치 진동특성 분석

# Analysis on the Vibration Characteristics of Reduction Gear Units for High-speed Trains

문경호[1,✉], 이동형[2], 김재철[2], 지해영[3]
Kyung Ho Moon[1,✉], Dong-Hyong Lee[2], Jae Chul Kim[2], and Hae Young Ji[3]

1 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 (Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute)
2 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)
3 과학기술연합대학원 철도시스템공학과 (Department of Railway System Engineering, Science & Technology Univ.)
✉ Corresponding author: khmoon@krri.re.kr, Tel: +82-31-460-5211

Manuscript received: 2013.4.19 / Accepted: 2013.6.20

*The gear-reduction units of Korean high-speed trains consist of a motor reduction unit, an axle gear box reduction unit, and a tripod joint shaft. A reduction gear unit is a gearbox used to reduce the rotational speed of the input shaft to a slower rotational speed on the output shaft. This reduction in output speed helps to increase torque. Defective reduction gear units in high-speed trains are caused by damage to the gear or by gear fatigue. To diagnose potential problems, it is important to know the vibration characteristics of the reduction gear units. In this study, we analyzed the vibration characteristics of reduction gears under various conditions. The test setup included a full-scale test rig to evaluate reduction gear under both normal and extreme operating conditions.*

Key Words: Reduction gear unit (감속구동장치), Fault diagnosis (결함진단), Vibration characteristics (진동특성), High-speed train (고속철도)

## 기호설명

V = speed of train(km/h)
Z = number of teeth
D = wheel diameter(m)
R = gear ratio
$f_m$ = gear mesh frequency(Hz)

## 1. 서론

철도차량의 감속구동장치는 빠르게 회전하는 구동모터의 회전력을 출력축인 차륜으로 회전속도를 감속시켜 전달하는 장치이며, 출력속도를 감속시켜 출력토크를 증대시키는 것이 목적이다. 열차 운행시 고속철도용 감속구동장치에 가해지는 부하가 매우 크기 때문에 기어의 안전성 및 내구성, 각 부품의 신뢰성 등이 매우 중요하다.[1] 철도운영기관은 운행거리, 고장발생횟수 및 보수정비 등을 고려한 신뢰성(Reliability) 및 유지보수성(Maintainability) 분석을 통해 감속구동장치를 관리하고 있다.[2] 그러나 감속구동장치 구조상 분해하지 않고는 베어링, 기어 등의 손상이나 고장상태를 알 수 없기 때문에 감속구동장치의 손상 상태 및 고장 발생여부 등을 사전에 파악하고 조치를 취할 수 있도록 안전장치가 필요하며, 이러한 안전장치로서 모니터링 시스템이 많이 개발되어지고 있다. 베어링 및

한국정밀공학회지 제 30 권 7 호 pp. 679-686
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 7, pp. 679-686
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.7.679

◆ 특집 ◆ 철도차량 구동장치의 모니터링

# 고속철도차량 감속기 결함진단을 위한 진동 파라미터 분석

# Analysis of Vibration Parameters for the Fault Diagnosis of Reduction Unit for High-speed Train

김재철 [1,✉], 지해영 [2], 이강호 [1], 문경호 [1], 서정원 [1]
Jae Chul Kim[1,✉], Hae Young Ji[2], Kang Ho Lee[1], Kyung Ho Moon[1], and Jung-Won Seo[1]

1 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-speed Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute)
2 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학과 (Department of Railway System Engineering, Science & Technology Univ.)
✉ Corresponding author: jckim@krri.re.kr, Tel: +82-31-460-5206

Manuscript received: 2013.4.15 / Revised: 2013.6.24 / Accepted: 2013.6.25

*The reduction unit is one of the most important components in railway cars, due to the transmission of torque from the motor to the wheels. Faulty reduction gears in high-speed trains result from excessive wear on the gear or damage to the gear. These types of gear defects have a significant effect on high-speed rail operation and safety; thus, a diagnosis system for the reduction unit is needed. Vibration diagnosis technology is one of the most effective diagnostics. In this paper, the vibration parameters of a reduction unit were evaluated during a driving-gear test and a full-vehicle test, using kurtosis and the crest factor. These tests were performed under normal operating conditions; a specimen tester was used to diagnose problems in defective gears.*

Key Words: High-Speed Train (고속철도차량), Reduction Unit (감속기), Fault diagnosis (결함진단), Vibration Parameter (진동 파라미터)

## 1. 서론

철도차량의 감속기는 구동모터의 회전력을 차륜에 전달하는 주요한 장치로서, KTX 차량과 같이 고속운행 시 감속기에 가해지는 부하가 매우 크기 때문에 차량의 주행 안전성 확보를 위해서는 감속기에 대한 안전성 및 내구성은 매우 중요하다. 따라서, 현재 운행되는 KTX 차량의 감속기는 운행거리, 고장발생횟수 및 보수정비 등을 고려한 신뢰성 및 유지보수성 분석을 통해 관리되고 있다.[1] 이러한 KTX감속기의 주요 고장원인 중 하나는 기어 내부의 접촉피로 손상에 의한 기어결함에 의한 고장으로 나타나고 있다. 이러한 기어의 결함을 초기에 발견함으로써 감속기 고장에 의한 피해를 미연에 방지하기 위해서는 결함을 초기에 진단할 수 있는 시스템이 절실히 요구되고 있다.

일반적으로 기어와 같은 회전체의 결함진단 방법은 진동신호를 분석하는 기술이 가장 많이 이용되고 있으며, 이러한 방법은 펌프, 압축기, 터빈 및 발전기등과 같은 기계에 적용되어 많은 연구가 수행되었다.[2,3] 그러나 아직 국내 철도분야에서 차량의 감속기 등과 같은 주요 부품에 대해서 결함진단이 적용된 사례는 없다. 따라서, 본 연구에서는 KTX 차량 감속기의 진동신호를 이용하여 결함을 진단하기 위한 시스템 개발을 위해서 진동 파라미터를 분석하였다.

한국정밀공학회지 제 30 권 7 호 pp. 667-672 July 2013 / 667
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 7, pp. 667-672 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.7.667
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

◆ 특집 ◆ 철도차량 구동장치의 모니터링 기술

# 고속열차용 감속기 모니터링 시스템 개발

# Development of Condition Monitoring System for Reduction Unit of High-speed Rail

이동형 [1,✉], 권석진 [1], 박병수 [2], 조덕영 [3], 김진우 [4]
Dong-Hyong Lee[1,✉], Seok Jin Kwon[1], Byoung-Su Park[2], Duk-Young Cho[3], and Jin-Woo Kim[4]

1 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-speed Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute)
2 케이티엠엔지니어링㈜ 연구소 (Research Center, KTM Engineering Inc.)
3 ㈜솔지 연구소 (Research Center, Solge)
4 한국철도공사 기술연구처 (Research Center, KORAIL)
✉ Corresponding author: dhlee@krri.re.kr, Tel: +82-31-460-5246

Manuscript received: 2013.5.20 / Accepted: 2013.6.20

*This paper presents the development of a condition monitoring system that monitors the operating conditions of a reduction unit, such as the bearing temperature, gearbox vibration, and gear oil deterioration, and notifies the operator of potential problems or abnormal conditions. A series of field tests on high-speed rail and conventional lines was performed to identify the characteristics of temperature rise and vibration levels on the reduction unit during operation. The monitoring system was designed based on the proper sensor selection, measurement method, and signal analysis to optimize the interface with the operating system of high-speed trains. Application of this monitoring system to high-speed trains will play an important role in their proper maintenance and safe operation.*

Key Words: Condition Monitoring (상태 감시), Reduction Unit (감속기), Abnormal Condition (이상상태), High-speed Rail (고속철도), Vibration (진동)

## 1. Introduction

The reduction unit or gearbox is equipment used for high speed railway vehicles to transmit motor's torque to the wheelset, and is one of the major devices permitting the vehicle to run at high speed.

The load applied to the reduction unit during high speed train operation is very large, so the safety and durability of the gears and the reliability of each component are very important. If some faults occur with the reduction unit, the vehicle operation must be stopped. Daily maintenance is thus required and the components of reduction unit must be completely disassembled every 3 years for repair to prevent accidents.

A safety system is installed in the high speed rail to warn of major equipment failure and provide data on the vehicle operating condition. However, there is no safety system concerning the reduction unit, so a risk of accidents always exists. Therefore, recently, a system to monitor abnormal conditions of reduction unit and bogie system in high-speed trains is under development.[1]

The Multilog Online System[2] is an online monitoring system for railway vehicles developed by SKF, based on the online condition monitoring system applied to wind

*Applied Mechanics and Materials Vol. 709 (2015) pp 456-459*
*© (2015) Trans Tech Publications, Switzerland*
*doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.709.456*

*Submitted: 30.09.2014*
*Accepted: 22.10.2014*

# Comparison of Vibration Signal Analysis Methods for effective Gear Fault Detection

Lee, Woong-yong[1, a], Lee, Dong-hyong[1, b], and Ji, Hae-Young[2, c]

[1]Korea Railroad Research Institute

176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea

[2]University of Science and Technology

217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

[a]yg1114@krri.re.kr, [b]dhlee@krri.re.kr, [c]young0085@krri.re.kr

**Keywords:** Vibration, Gear faults, Sideband, Monitoring

**Abstract.** Reduction unit for high-speed train is an important component. However if faults of reduction unit occurred, the damages such as material and human damage have been caused. To prevent the damage, it is necessary to study reduction unit monitoring for high-speed train. We conducted spur gear specimen test which was crack, breakage and pitting tests and analyzed FFT, Sideband energy ratio (SER), RMS, crest factor, and kurtosis. There was not distinct difference between no-fault and pitting condition at RMS, crest factor and kurtosis. But SER increased depending on crack condition. In breakage test, all parameters had difference between no-fault and breakage condition.

## Introduction

Reduction unit for high-speed train is an important component that transmits rotatory power of driving motor to a wheel. However if faults of reduction unit occurred, the damage such as cost and time etc. were caused. To prevent the damage in advance, it is necessary to study reduction unit monitoring for high-speed train.

Monitoring diagnosis has various analysis methods such as vibration, oil, and temperature etc. Vibration of them is the most prevalent method and has advantages of being able to monitor machine condition immediately as well as compare with the other methods. [1] Harry J. Decker studied crack detection for aerospace quality spur gears by using FM0, FM4, and RMS etc. [2] J. RaFiee et al. introduced an automatic feature extraction system for gear and bearing fault diagnosis using wavelet-based signal processing. [3]

We conducted spur gear specimen test like crack, breakage, and pitting tests and analyzed characteristics of vibration parameters such as RMS and crest factor etc. to apply them to high-speed train.

## Analysis Method

**Sideband Energy Ratio (SER).** SER is the ratio between center mesh frequency amplitude and around sidebands' amplitudes, and is expressed to Eq. (1). In healthy gear condition, SER is low because sidebands have small amplitude. However, in faulty gear condition, the number of sideband and its amplitude increase so that SER become high.

$$\text{SER} = \sum(\text{6 Sideband amplitudes}) / \text{Center mesh frequency amplitude.} \quad (1)$$

**Crest factor.** Crest factor is the simplest measure of impulsiveness and expressed as Eq. 2. Crest factor indicates how peaky signal is. Crest factor has 2 ~ 6 in healthy condition but value of unhealthy condition is higher than 6.

$$C = |x|_{peak} / x_{rms}. \quad (2)$$

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of TTP, www.ttp.net. (ID: 1.241.69.200-11/12/14,11:19:47)

## 제2절 학술지 발표 논문

학술지 발표 논문에 대한 최종 연구성과는 아래 표와 같이 총 23건으로 계획서상의 목표치 10건의 230%를 달성하였다. 총 학술지 23건 발표 중에 국내 학술대회의 경우 16건, 국제 학술대회에 7건을 발표하였다.

| 발표일 | 발표명 | 저자 | 학술대회명 | 국내외 구분 |
|---|---|---|---|---|
| 2012.5.30 | 고속철도 감속기의 온도 모니터링을 위한 진단기법 | 황지성 | 한국정밀공학회 2012년 춘계학술대회 | 국내 |
| 2012.5.30 | 고속철도 및 전동차용 감속구동장치 진동 특성 비교 | 문경호 | 한국정밀공학회 2012년 춘계학술대회 | 국내 |
| 2012.5.30 | 고속철도 감속기 적용을 위한 윤활유 모니터링 기술 동향 분석 | 김형진 | 한국정밀공학회 2012년 춘계학술대회 | 국내 |
| 2012.9.17 | Experimental Validation of the Fault Classification and Condition Monitoring Technique for Roller Bearing System | 고봉환 | STECH'12 | 국제 |
| 2012.9.17 | Noise Dose-Response Curve of Elevated Urban Railway by Jury Evaluation | 지해영 | STECH'12 | 국제 |
| 2012.9.17 | The method for the temperature monitoring in a reduction gear of the high-speed railway | 황지성 | STECH'12 | 국제 |
| 2012.10 | 국내 철도차량 감속기 진동특성 분석 | 지해영,김재철,이동형,문경호,이강호 | 2012년 소음진동학회 추계학술대회논문집 | 국내 |
| 2012.10 | 철도차량 감속구동장치 이상진단을 위한 진동특성분석 고찰 | 지해영,김재철,이동형,문경호,이강호 | 2012년 철도학회추계학술대회 논문집 | 국내 |
| 2013.5 | 고속철도차량 감속기 결함진단을 위한 기어의 진동특성 분석 | 김재철,이강호,지해영,문경호,이동형 | 한국정밀공학회 2013년 춘계학술대회논문집 | 국내 |
| 2013.5 | 웨이블릿 주파수분석을 통한 고속철도차량 감속구동장치 이상진단방법의 실험적 고찰 | 지해영,이강호,문경호,이웅용,이동형,김재철 | 한국정밀공학회 2013년 춘계학술대회논문집 | 국내 |
| 2013.5 | KTX 견인전동기의 실험적 진동해석 | 김진우,박병수,김대식,정연일,최상락 | 한국철도학회 2013년 춘계학술대회논문집 | 국내 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2013.10 | 고속철도 감속기용 무선온도 모니터링 시스템 | 권석진,이동형 | 한국정밀공학회 2013년 추계학술대회논문집 | 국내 |
| 2013.4 | 베어링시스템 결함 모니터링을 위한 신호처리 및 데이터 분류에 관한 연구 | 안종효,곽대호,양동호,곽문규,고봉환 | 소음진동공학회 2013 춘계학술대회(여수) | 국내 |
| 2013. 4 | Minimum entropy deconvolution을 이용한 회전체 시스템의 결함 모니터링 (학생우수발표상) | 곽대호,안종효,고봉환 | 소음진동공학회 2013 춘계학술대회(여수) | 국내 |
| 2013. 8 | Condition monitoring of bearing system using POV of IMF covariance matrix | 고봉환,안종효,곽대호,양동호 | The 7th World Congress on Biomimetics, Artificial Muscles and Nano-Bio (BAMN2013) | 국제 |
| 2013. 10 | WPD와 EMD를 이용한 베어링 결함신호 비교분석 연구 | 이동한,안종효,고봉환 | 한국정밀공학회 2013 추계학술대회 (부산) | 국내 |
| 2014.05.16 | 시간-주파수 분석 기법을 이용한 감속기 진동 특성 분석 | 이웅용,이동형,지해영,문경호,김재철 | 한국정밀공학회 2014년도 춘계학술대회 | 국내 |
| 2014.06.26 | Vibration Characteristics between Lab Test and Field Test of 2nd Reduction Unit of KTX in Constant Speed | 이웅용,이동형,지해영,문경호,김재철 | International Symposium on Green Manufacturing and Applications (ISGMA 2014) | 국제 |
| 2014.08.05 | Application of Vibration Signal Processing for Gear Fault Detection | 이웅용,지해영,이동형,김재철 | The 12th International Conference on Motion and Vibration (MOVIC 2014) | 국제 |
| 2014.10.18 | Comparison of Vibration Signal Analysis Methods for effective Gear Fault Detection | 이웅용,이동형,지해영 | The 3rd 2014 International Conference on Mechanical Design and Power Engineering | 국제 |
| 2014.10.29 | 평기어 이 절손이 전달오차에 미치는 영향 | 이동형,권석진,문경호,서정원 | 한국정밀공학회 2014 추계학술대회 | 국내 |
| 2014.10.29 | Sideband Energy Ratio를 이용한 감속기 결함 분석 | 이웅용,이동형,문경호,지해영 | 한국정밀공학회 2014 추계학술대회 | 국내 |
| 2014.10.29 | 시간동기평균을 이용한 감속기 결함 진단 | 문경호 | 한국정밀공학회 2014 추계학술대회 | 국내 |

# 제3절 특허출원/등록

특허출원 및 등록에 대한 연구성과로는 아래 표와 같이 총 4건의 특허를 출원하였으며, 계획서상의 목표치 3건과 비교하여 133%의 성과를 달성하였다. 각각의 특허 출원된 기술적 내용의 요약은 다음과 같다.

| No | 특허명 | 출원(등록)번호 | 출원<br>(등록)일 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 전동열차의 진동측정 시스템 {System for Monitering Vibration of Electric Train } | 10-2012-0157298 | 2012.12.28 | |
| 2 | 전동 열차의 진동 측정 장치 {Apparatus for Measuring Vibration of Electric Train } | 10-2013-0011654 | 2013.02.01 | |
| 3 | 진동 센서에 의한 오작동 탐지 장치 | 10-2013-0035250 | 2013.04.01 | |
| 4 | 고속 전동 열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템 | 제2014-0074559호 | 2014.06.18 | |

## 1. 전동열차의 진동 측정 시스템

본 특허는 고속 전동열차의 설치된 감속기의 진동 측정 및 그에 따라 감속기의 상태를 감시할 수 있도록 하는 진동열차의 진동측정 시스템에 관한 것이다.

### 가. 기술 내용 요약

일반적으로 고속철도란 여객 철도의 일종으로 기존의 철도 차량에 비하여 빠른 차량을 의미하고 200 km/h 이상 또는 250 km/h 이상의 속도로 운행될 수 있도록 설계된 철도를 말한다. 철도는 철 차륜으로 이루어지거나 또는 자기 부상 방식으로 이루어질 수 있다. 철 차륜으로 운행되는 고속철도는 전동기로 차륜을 회전시켜 궤도를 달리는 방식이 사용되고 전차선에서 전력을 공급받아 차량으로 전달하는 팬터그래프(pantograph), 전차선에서 공급받는 전력의 전압을 변환시켜 전동기의 고정자 및 회전자에 전달하는 주변압기, 주변압기에서 전달되는 전압을 전동기 고정자에 전달하여 회전 자장을 발생시키는 모터 블록 및  모터 블록의 전력을 회전자를 통해 차륜으로 전달하는 보조 블록으로 이루어진 전동차; 모터 블록으로부터 전달되는 전류 및 주파수에 따라 출력을 발생시키는 견인 전동기(traction motor), 플렌지를 이용하여 견인 전동기와 결합된 감속기, 차체와 대차 사이의 상대 운동을 허용하도록 감속기와 차축 기어 감속 장치 사이에 위치하는 트리포드(tripod) 및 입력 기어와 차축 기어로 이루어지고 동력을 차축으로 전달하는 차축 치자 감속 장치로 이루어진 동력 대차; 그리고 차체의 하중을 지지하면서 견인력과 제동력을 전달하기 위한 관절 대차를 포함할 수 있다.

고속 철도는 전기에 의하여 운행되고 운행 시스템이 기간산업 형태가 되므로 차량 상태 또는 운행 상태에 대한 감시는 대형 안전사고의 발생을 방지하기 위하여 필수적으로 이루어져야 하고 자동으로 이루어지는 것이 유리하다. 그리고 이와 같은 감시는 실시간으로 이루어지는 것이 유리하다.

고속 철도의 전동 대차에 사용되는 감속 장치의 경우 주기적으로 점검하여 운행 과정에서 발생될 수 있는 결함을 방지하도록 하고 있다. 그러나 점검 주기에 비하여 부품이 빠르게 손상이 되면 운행 위험이 발생될 수 있고 그리고 부품 마모가 느리게 진행되면 불필요하게 부품이 교체될 수 있다는 문제점을 가진다.

철도 차량의 장치 또는 운행의 감시와 관련된 다양한 기술이 개발되었고 특허공개번호 제2001-0111905호 '철도의 대차 감시 시스템과 그 감시방법' 은 센서를 사용하여 철도 차량의 대차를 감시하는 시스템에 대하여 개시하고 있다. 상기 선행기술은 차축 온도, 대차의 균열 상태, 바퀴 마모, 바퀴 편마모의 대차 상태를 감시하기 위해 부착된 대차 상태 감시 센서부; 상기 대차상태감시 센서부로부터 출력된 신호들을 수집 및 분석하여 경로를 출력하거나 데이터베이스화하여 데이터를 저장장치에 기록하는 주 제어반부를 구비한 대차감시 시스템부; 상기 대차감시 시스템부로부터 통신선을 통해 시리얼 통신으로 대차의 현상태와 기록된 데이터를 전송받아 대차의 검수를 지원하는 철도차량 모니터링 시스템부를 포함하는 철도의 대차 감시 시스템에 대하여 개시하고 있다.

철도 차량의 감시와 관련된 다른 선행기술로 특허공개번호 제2006-0077593호 '전기철도차량의 전동기 진동 가속도 측정 시스템' 이 있다. 상기 선행기술은 철도의 차륜에 설치되어 철도 차량의 주행 중 차륜의 회전수에 부응하는 펄스 신호를 발생시키는 속도 센서와; 상기 속도 센서를 통해 검출되는 단속 펄스의 주파수를 전압으로 변환하여 주는 주파수/전압 변환부와; 상기 주파수/전압 변환부에서 출력되는 아날로그의 철도 차량 속도 전압을 디지털 신호로 변환시켜 주는 A/D 변환부와; 상기 A/D 변환부의 출력 신호를 입력받아 철도 차량의 현재 주행 속도를 검출하는 차속 검출부와; 상기 속도 센서를 통해 검출되는 단속 펄스를 계수하는 카운터와; 상기 카운터의 출력 신호를 입력받아 펄스의 수에 대응되는 철도 차량의 주행 거리를 산출하여 그 위치를 검출하는 위치 정보 검출부와; 기관사에 의해 조작되는 마스콘이 추진측으로 작동되는지를 검출하는 추진신호 검출부와; 기관사에 의해 조작되는 마스콘이 제동측으로 작동되는지를 검출하는 제동신호 검출부와; 기관사에 의해 마스콘이 추진 또는 제동측으로 작동될 때 펄스폭 변조 방식을 통해 그 위치 및 조작량에 부응하여 최대 동력 대비 %로 읽어들이는 PWM값 입력부와; 상기 추진 및 제동신호 검출부에서 직류 전압으로 출력되는 추진 및 제동 전압을 컴퓨터가 인식할 수 있는 직류 전압으로 변환시켜 주는 DC/DC 변환부와; 상기 PWM 값 입력부에서 출력되는 추진 및 제동 신호를 100분율로 환산하여 변환시켜 주는 신호변환기와; 각 차량에 설치되어 있는 전동기에서 전후, 좌우 및 상하 방향에 대한 진동 가속도 값을 디지털 신호로 변환시켜 주는 제2 A/D 변환부와; 상기한 각부의 출력 신호를 실시간으로 입력받아 각 차량의 전동기에서 발생되는 전후, 좌우, 상하 방향에 대한 진동 가속도와 마스콘의 상태 및 주행 속도와 위치 정보를 기억함과 동시에 해당 정보를 출력하는 컴퓨터로 구성된 전기 철도 차량의 전동기 진동 가속도 측정 시스템이 있다.

철도 차량이 감시와 관련된 다른 선행기술로 특허공개번호 제2010-0021327호 '궤도틀림 실시간 감시시스템' 이 있다. 상기 선행기술은 철도 차량에 탑재되어 철도의 궤도 틀림을 검측하고 이상을 감시하기 위하여 좌우측 차륜의 상하 움직임과 함께 각각 운동하는 축상 부재의 일측에 고정 장착하여 차륜의 상하방향 운동을 검측하는 좌우 두 개의 상하 진동센서와; 차륜의 좌우 방향 움직임과 함께 운동하는 축상 부재의 일측에 고정 장착하여 차륜의 좌우 운동을 검측하는 좌우진동센서와; 상기 축상의 부재에 고정 장착되어 휠셋과 양측 궤도간의 수평거리를 측정하는 수평거리감지수단으로 궤도검측 수단을 구성하고, 차륜 또는 차륜과 연계하여 회전운동하는 부재의 회전속도

를 감지하여 차량의 속도를 검측하는 차량속도센서와; 침목 또는 노반에 설치되며 궤도 정보를 내장하고 있는 RFID TAG와, 철도 차량에 탑재하여 이 TAG를 가까이 지나갈 때 무선으로 TAG의 내장 정보를 받아들이는 RFID READER와, 이 정보를 처리하는 RFID 프로세서로 구성되어 궤도상의 차량위치를 자동으로 인식하는 RFID 시스템을 가지며; 이들 수집된 자료로부터 궤도의 틀림량을 계산하고 측정자료지점의 궤도상의 위치를 계산해주는 데이터처리장치와; 데이터를 실시간으로 궤도관리시스템으로 전송하는 무선통신장치로 구성하여; 주행하는 철도차량에 탑재되어 각 차량위치에서의 궤도 틀림 상태를 비접촉식으로 검측하여 실시간으로 무선으로 송신하여 궤도 관리에 활용하는 궤도 틀림 실시간 감시시스템에 대하여 개시하고 있다.

상기 선행기술은 철도 차량 일반에 적용될 수 있는 기술에 해당하지만 정밀하게 관련 장치로부터 발생되는 신호를 측정하여 처리하기 어렵고 센서로부터 측정되어 전달되는 신호의 신뢰성이 낮다는 문제점을 가진다. 아울러 구체적으로 관련 장치에 대한 정보를 얻기 위하여 요구되는 탐지 대상이 명확하지 않으면서 이와 동시에 탐지 대상의 작동 상태와 관련성이 작다는 단점을 가진다.

본 발명은 선행기술이 가진 문제점을 해결하기 위한 것으로 아래와 같은 목적을 가진다.
다음 그림 3.2.1은 특허 출원 관련 그림이다.

나. 본 특허의 효과

본 발명에 따른 진동 측정 시스템은 전동 대차로부터 발생되는 진동과 관련된 신호를 실시간으로 다양한 매개 변수를 기초로 처리하는 것에 의하여 탐지의 신뢰성이 향상될 수 있도록 한다는 이점을 가진다. 또한 탐지된 신호가 자동으로 처리되면서 운행자에 의하여 관리가 될 수 있도록 하는 것에 의하여 시스템의 효율성이 향상될 수 있도록 한다는 이점을 가진다. 추가로 본 발명에 따른 시스템은 고속철도의 관리 자동화가 가능하도록 하면서 운행의 안전성이 향상될 수 있도록 한다는 장점을 가진다.

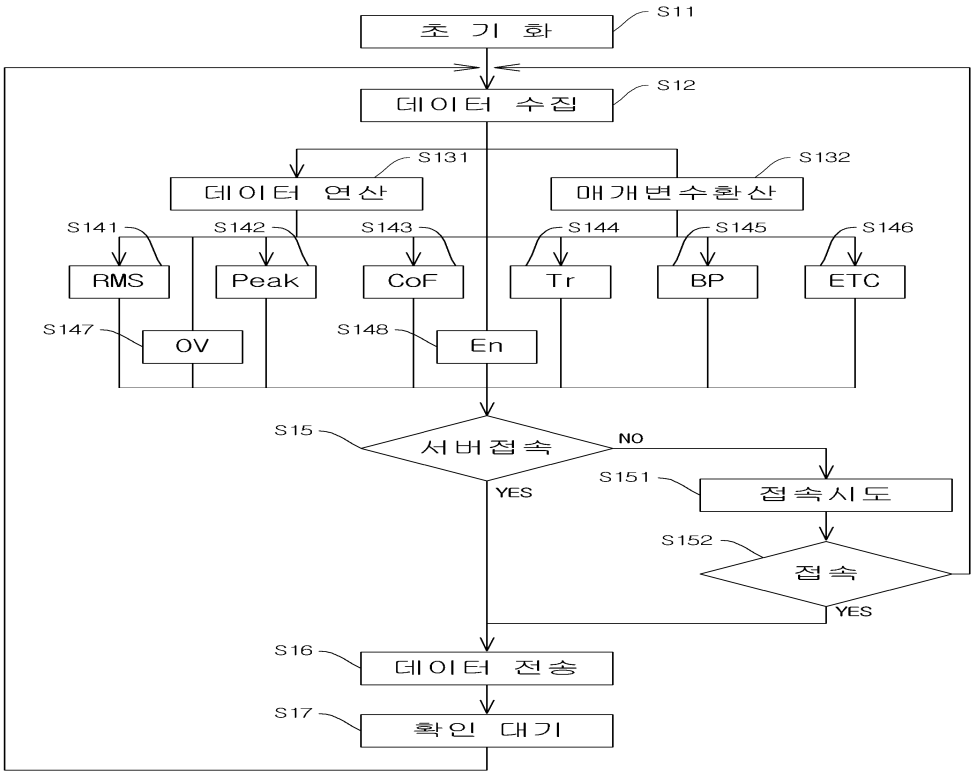



그림 3.2.1 전동열차의 진동 측정 시스템 특허 출원 관련 청구 도면

## 2. 전동열차의 진동 측정 장치

### 가. 기술 내용 요약

본 발명은 전동 열차의 진동 측정 장치에 관한 것이고, 구체적으로 고속 전동 열차의 동력 대차에 설치되어 주행 과정에서 발생되는 진동을 측정하여 고속 전동 열차의 실시간 진단이 가능하도록 하는 전동 열차의 진동 측정 장치에 관한 것이다.

### 나. 배경 기술

일반적으로 고속 철도란 여객 철도의 일종으로 기존의 철도 차량에 비하여 빠른 차량을 의미하고 200 km/h 이상 또는 250 km/h 이상의 속도로 운행될 수 있도록 설계된 철도를 말한다. 철도는 철 차륜으로 이루어지거나 또는 자기 부상 방식으로 이루어질 수 있다. 철 차륜으로 운행되는 고속 철도는 전동기로 차륜을 회전시켜 궤도를 달리는 방식이 사용되고 전차선에서 전력을 공급받아 차량으로 전달하는 팬터그래프(pantograph), 전차선에서 공급받는 전력의 전압을 변환시켜 전동기의 고정자 및 회전자에 전달하는 주변압기, 주변압기에서 전달되는 전압을 전동기 고정자에 전달하여 회전 자장을 발생시키는 모터 블록 및  모터 블록의 전력을 회전자를 통해 차륜으로 전달하는 보조 블록으로 이루어진 전동차; 모터 블록으로부터 전달되는 전류 및 주파수에 따라 출력을 발생시키는 견인 전동기(traction motor), 플렌지를 이용하여 견인 전동기와 결합된 감속기, 차체와 대차 사이의 상대 운동을 허용하도록 감속기와 차축 기어 감속 장치 사이에 위치하는 트리포드(treepod) 및 입력 기어와 차축 기어로 이루어지고 동력을 차축으로 전달하는 차축 치자 감속 장치로 이루어진 동력 대차; 그리고 차체의 하중을 지지하면서 견인력과 제동력을 전달하기 위한 관절 대차를 포함할 수 있다.

고속 철도는 전기에 의하여 운행되고 운행 시스템이 기간산업 형태가 되므로 차량 상태 또는 운행 상태에 대한 감시는 대형 안전사고의 발생을 방지하기 위하여 필수적으로 이루어져야 하고 자동으로 이루어지는 것이 유리하다. 그리고 이와 같은 감시는 실시간으로 이루어지는 것이 유리하다. 고속 철도의 전동 대차에 사용되는 감속 장치의 경우 주기적으로 점검하여 운행 과정에서 발생될 수 있는 결함을 방지하도록 하고 있다. 그러나 점검 주기에 비하여 부품이 빠르게 손상이 되면 운행 위험이 발생될 수 있고 그리고 부품 마모가 느리게 진행되면 불필요하게 부품이 교체될 수 있다는 문제점을 가진다. 고속 철도의 안전은 다양한 요인에 의하여 영향을 받을 수 있고 그리고 다양한 방법으로 고속 철도의 상태가 탐지될 수 있다. 고속 철도에서 발생되는 진동은 고속 열차의 진단에 필요한 다양한 정보를 제공할 수 있다.

진동 측정과 관련된 선행기술로 미국특허공보 US 7,487,679 '차량 진동 분석기(VEHICLE VIBRATION ANALYZER)'가 있다. 상기 선행기술은 차량 또는 산업 장비에서 발생되는 선형 또는 비틀림 진동을 측정하여 구동 라인을 따른 진동의 발생 원인을 정확하게 식별할 수 있도록 하는 진동 측정 장치에 대하여 개시하고 있다.

진동 측정과 관련된 다른 선행기술로 WO 2006/064303 '철도 트랙을 감시하기 위한 휴대용 장치(A PORTABLE APPARATUS FOR MONITORING RAILWAY TRACK)'이 있다. 상기 선행기술은 철도 차량 및 철도 트랙의 수직 및 수평 가속을 탐지 및 기록하기 위한 마이크로 컨트롤러 및 트랜스듀서 어셈블리, 분리 가능한 프린터 유닛, 전기 로터리 펄스 발생 장치, 사건 마커 유닛

및 외부 전력 공급원으로 이루어진 진단 장치에 대하여 개시하고 있다.

진동 측정과 관련된 다른 선행기술로 특허등록번호 제1066095호 ‘진동신호분석기법을 이용한 기어검사장치’ 가 있다. 상기 선행기술은 베드, 베드에 설치된 이송 레일에 설치되는 기어 장착 암, 검사하고자 하는 기어가 결합되는 검사 기어 스핀들, 베드의 상면에 장착되고 검사 기어와 맞물려 회전하는 상대 기어, 상대 기어에 적절한 부하가 걸리게 하는 부하 장치, 검시 기어 스핀들을 회전시키는 기어 구동 모터 및 진동 센서가 감지한 진동 신호를 분석하여 기어의 가공 이상 여부를 판단하는 컨트롤러로 이루어진 기어 검사 장치에 대하여 개시하고 있다.

선행기술에서 개시된 진동 측정과 관련된 시스템은 다양한 형태의 신호를 처리하기 어렵고 특정 구성 요소의 진단만 가능하다는 문제점을 가진다. 진동 측정 장치는 다양한 부위에서 발생되는 다양한 형태의 진동을 측정 및 분석하여 관련 장치 전체의 진단할 수 있도록 하는 것이 유리하다.

본 발명은 선행기술이 가진 문제점을 해결하기 위한 것으로 아래와 같은 목적을 가진다.

다음 그림 3.2.2는 이번 특허 출원에 관련된 청구도면 이다.

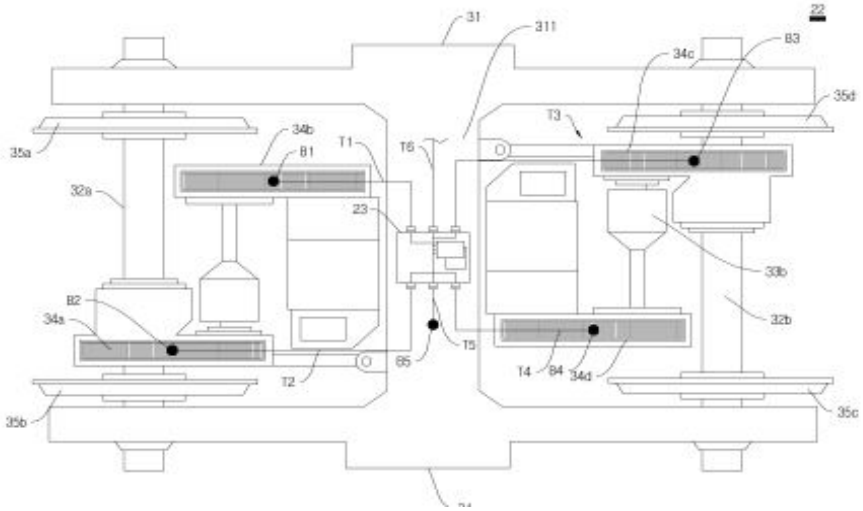



그림 3.2.2 전동열차의 진동측정 장치 청구도면 (1)

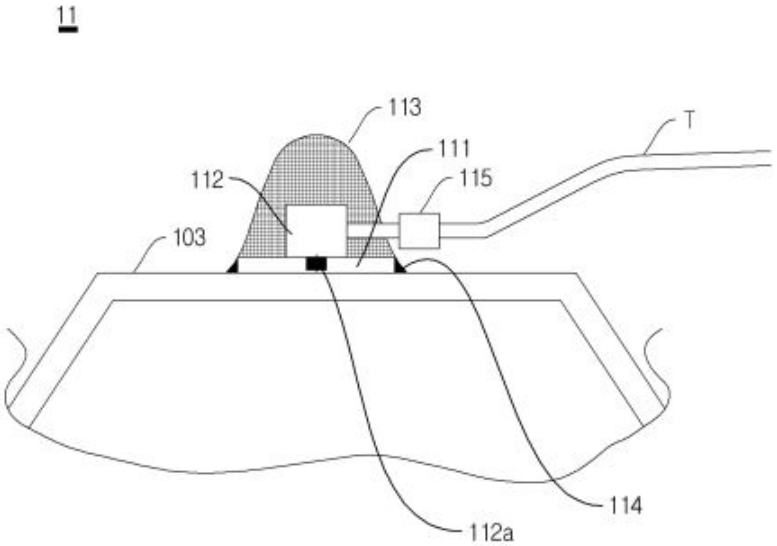



그림 3.2.2 전동열차의 진동측정 장치 청구도면 (2)

## 3. 진동 센서에 의한 발광식 오작동 탐지 장치

### 가. 기술 분야

본 발명은 진동 센서에 의한 오작동 탐지 장치에 관한 것이고, 구체적으로 점검 대상이 되는 장치 또는 설비로부터 발생되는 진동으로부터 장치 또는 설비의 작동 상태를 분석하고 분석 결과에 기초하여 오작동 여부를 판단하여 필요한 경보를 발생시킬 수 있도록 하는 진동 센서에 의한 오작동 탐지 장치에 관한 것이다.

### 나. 배경 기술

물체의 위치 또는 전류의 세기와 같은 것이 규칙적으로 변하는 현상을 진동이라고 하고 모든 물체는 외부에서 충격이 가해지면 진동을 발생시키게 된다. 기계, 장치 또는 설비는 작동 과정에서 진동을 발생시키게 되고 대부분의 경우 일정한 오차 범위 내에서 정해진 형태의 진동을 발생시키게 된다. 기계, 장치 또는 설비에서 발생하는 진동이 정해진 형태에서 벗어나는 경우 기계, 장치 또는 설비 자체의 작동에 이상이 발생하였거나 또는 외부의 일시적인 충격에 기인한 것일 수 있다. 진동이 미리 정해진 형태 또는 패턴과 다르고 그리고 일정 시간 지속이 되면 기계, 장치 또는 설비의 작동 오류에 기인할 가능성이 높다. 그러므로 기계, 장치 또는 설비 자체로부터 발생되는 진동을 분석하여 작동 오류가 여부가 탐지될 수 있다.
진동 구조물의 진단과 관련된 선행기술로 특허공개번호 제2005-0077181호 '진동센서 자동 고정 장치 및 진동 구조물의 진단장치' 가 있다. 상기 선행기술은 진동 구조물의 측정 장치에 압착되어 진동 신호를 검출하며 진동 신호를 분석하는 진동 분석기에 연결된 진동 센서; 한쪽 끝에 진동 센서가 고정되는 고정구와 다른 끝에 공압이 작용하는 피스톤이 형성된 로드; 공압에 의해 이동되도록 피스톤을 안내하는 공압 실린더; 상기 공압 실린더에 공압을 공급하는 공압 작동부; 및 상기 공압 실린더에 작용하는 공압을 제어하고 상기 진동 센서를 진동 구조물에 압착되도록 제어하는 제어기를 포함하는 진동센서 자동 고정 장치에 대하여 개시하고 있다.
다음 그림 3.2.3은 청구 도면 항목이다.

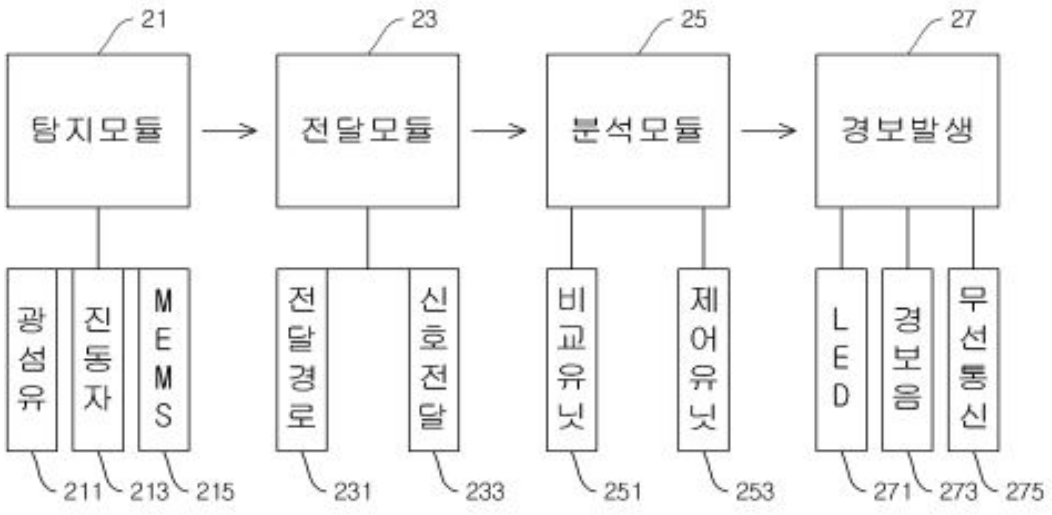



그림 3.2.3 발광식 계측장비 청구 도면

## 4. 고속전동 열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템

### 가. 기술 분야

본 발명은 고속 전동 열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템에 관한 것이고, 구체적으로 실시간으로 고속 전동 열차에서 발생되는 진동을 분석하여 위험의 예측이 가능하도록 하는 위험 예방 시스템에 관한 것이다.

### 나. 배경 기술

일반적으로 고속철도란 여객 철도의 일종으로 기존의 철도 차량에 비하여 빠른 차량을 의미하고 200 km/h 이상 또는 250 km/h 이상의 속도로 운행될 수 있도록 설계된 철도를 말한다. 철도는 철 차륜으로 이루어지거나 또는 자기 부상 방식으로 이루어질 수 있다. 철 차륜으로 운행되는 고속 철도는 전동기로 차륜을 회전시켜궤도를 달리는 방식이 사용되고 전차선에서 전력을 공급받아 차량으로전달하는 팬터그래프(pantograph), 전차선에서 공급받는 전력의 전압을 변환시켜 전동기의 고정자 및 회전자에 전달하는 주변압기, 주변압기에서 전달되는 전압을 전동기 고정자에 전달하여 회전 자장을 발생시키는 모터 블록 및 모터 블록의 전력을 회전자를 통해 차륜으로 전달하는 보조 블록으로 이루어진 전동차 모터 블록으로부터 전달되는 전류 및 주파수에 따라 출력을 발생시키는 견인 전동기(traction motor), 플렌지를 이용하여견인 전동기와 결합된 감속기, 차체와 대차 사이의 상대 운동을 허용하도록 감속기와 차축 기어 감속 장치 사이에 위치하는 트리포드(tripod) 및 입력 기어와 차축 기어로 이루어지고 동력을 차축으로 전달하는 차축 치자 감속 장치로 이루어진 동력 대차 그리고 차체의 하중을 지지하면서 견인력과 제동력을 전달하기 위한 관절 대차를 포함할 수 있다. 고속 철도는 전기에 의하여 운행되고 운행 시스템이 기간산업 형태가 되므로 차량 상태 또는 운행 상태에 대한 감시는 대형 안전사고의 발생을 방지하기 위하여 필수적으로 이루어져야 하고 자동으로 이루어지는 것이 유리하다. 그리고 이와 같은 감시는 실시간으로 이루어지는 것이 유리하다.

고속 철도의 전동 대차에 사용되는 감속 장치의 경우 주기적으로 점검하여 운행 과정에서 발생될 수 있는 결함을 방지하도록 하고 있다. 그러나 점검주기에 비하여 부품이 빠르게 손상이 되면 운행 위험이 발생될 수 있고 그리고 부품 마모가 느리게 진행되면 불필요하게 부품이 교체될 수 있다는 문제점을 가진다.

열차 차축 감시와 관련된 선행기술로 특허공개번호 10-2013-0060816 광섬유 에프비지 센서를 이용한 연속식 열차 차축 감시 시스템 및 방법이 있다. 상기 선행기술은 열차의 축 상에서 발생한 온도 및 진동을 측정하는 FBG 센서로 이루어진 측정 수단과, 상기 측정 수단에서 측정된 광섬유 FBG 센서의 브래그 격자의파장 변화량을 진동에 의한 동적 변형율과 온도로 환산하여 지상의 열차 축상 관리서버로 전송하는 신호처리수단을 포함하는 연속식 열차 차축 감시 시스템에 대하여 개시한다. 철도 차량용 대차의 감시와 관련된 선행기술로 특허공개번호 10-2009-0069471 철도 차량용 대차의 피로도 감시 장치 및 이를 이용한 철도 차량 보호방법이 있다. 상기 선행기술은 철도 차량용 대차의 각 구성요소에 설치되는 다수개의 가속도 센서와, 상기 가속도 센서에서 측정된 가속도 값을 디지털화하는 입력신호 변환부와, 상기 입력신호 변환부에서 디지털화된 가속도 값을 주파수 영역의 진동특성으로 변환하는 디지털 신호 처리부와, 상기 디지털 신호 처리부를 통해 입

력된 진동 특성을 분석하는 마이크로프로세서를 포함하는 철도 차량용 대차의 피로도 감시 장치에 대하여 개시한다.

실질적으로 진동은 다양한 위치에서 다양한 형태로 발생될 수 있고 진동의 발생원의 선정 및 각각의 진동 발생원으로 발생되는 진동의 분석 방법이 실시간 위험 예측을 위하여 주요한 인자가 될 수 있다. 상기 선행기술은 진동원에 따른 진동 분석 및 그에 따른 위험 예측 방법에 대하여 개시하지 않는다.

다음 그림 3.2.4는 이번 특허의 청구 도면 내용이다.

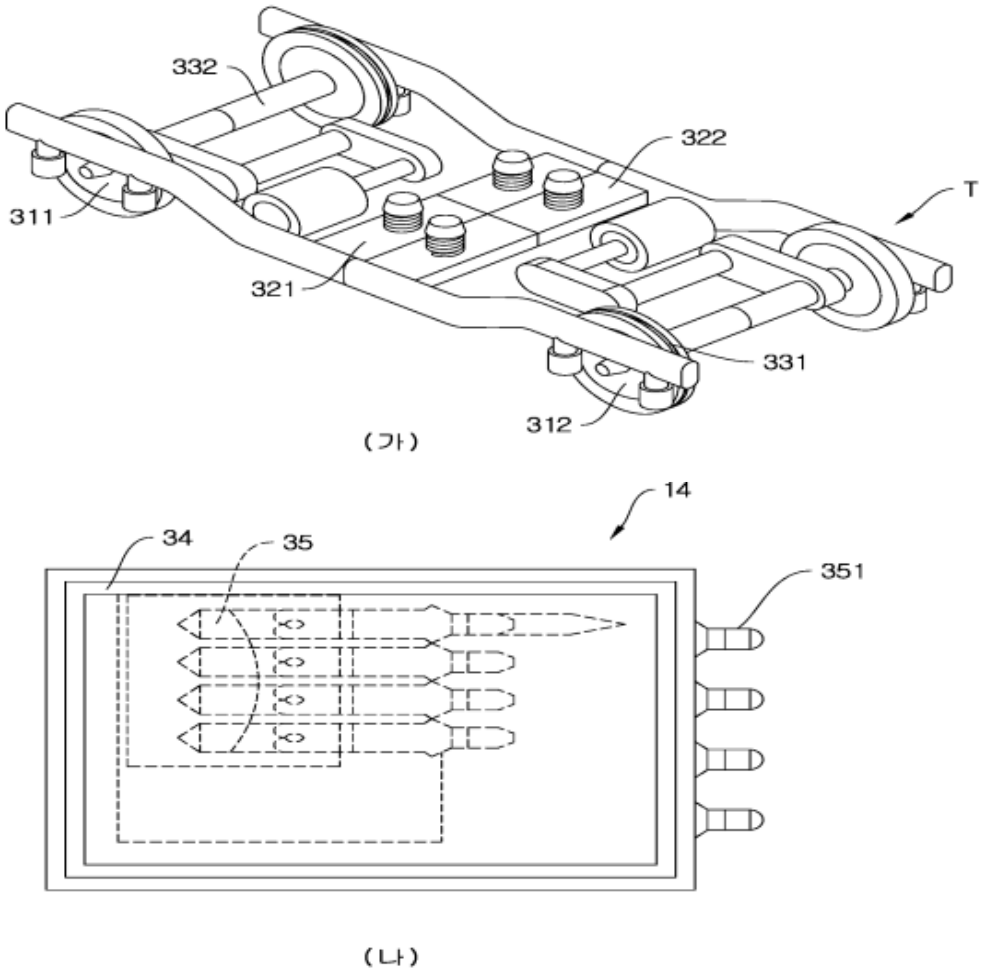



그림 3.2.4 고속열차의 안전 예방을 위한 진동 측정 시스템 청구 도면(1)

## 제4절 S/W 등록

소프트웨어 등록에 관한 연구성과로는 아래 표와 같이 총 3건의 프로그램을 등록하였고, 계획 2건과 대비하여 150%의 성과를 달성하였다.

| No | 특허명 | 출원(등록)번호 | 등록일 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 감속기 이상상태 진단 표시기(NA6) 계산 프로그램 | C-2014-23713 | 2014.9.25 | |
| 2 | TSA처리 전과 후의 첨도(kurtosis) 계산 프로그램 | C-2014-23714 | 2014.9.25 | |
| 3 | T-GMS(티-지엠에스) | C-2014-024616 | 2014.10.1 | |



제 C-2014-023713 호

프 로 그 램 등 록 증

1. 프로그램의 제호 (명칭) 감속기 이상상태 진단 표시기(NA6) 계산 프로그램
2. 저작자 성명 (법인명) 한국철도기술연구원 경기도 의왕시 철도박물관로
3. 생년월일 (법인등록번호) 135221-0000076
4. 창작연월일 2014년07월23일
5. 공표연월일 -
6. 등록사항 저작자 : 한국철도기술연구원, 창작 : 2014.07.23
7. 등록연월일 2014년09월25일

「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2014년 09월 26일

한 국 저 작 권 위 원 회

그림 3.4.1 프로그램등록증 (감속기 이상상태 진단 표시기(NA6) 계산 프로그램)



제 C-2014-023714 호

프 로 그 램 등 록 증

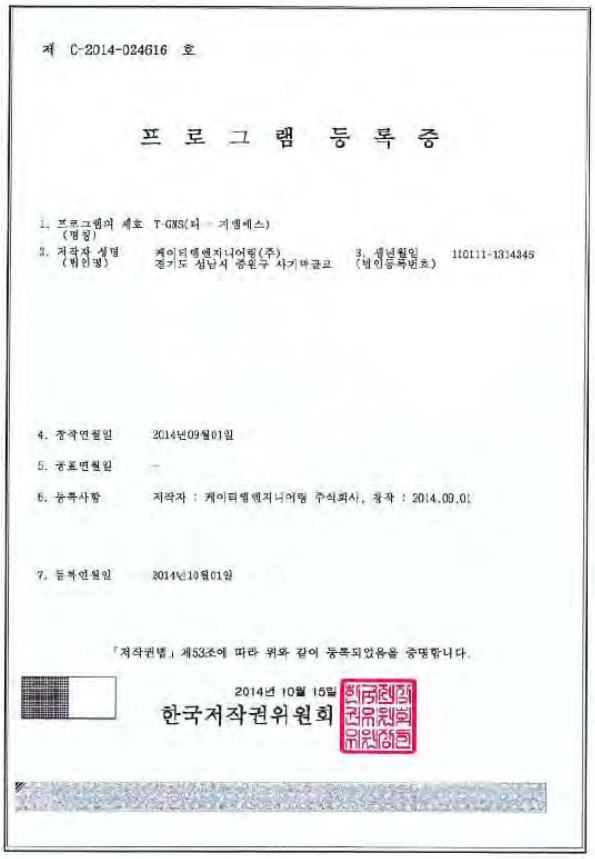
1. 프로그램의 명칭: 시간동기평균(TSA) 처리 전과 후의 첨도(kurtosis) 계산 프로그램
2. 저작자 성명 (법인명): 한국철도기술연구원 / 경기도 의왕시 철도박물관로
3. 생년월일 (법인등록번호): 135221-0000076
4. 창작연월일: 2014년09월04일
5. 공표연월일: -
6. 등록사항: 저작자 : 한국철도기술연구원, 창작 : 2014.09.04
7. 등록연월일: 2014년09월25일

「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2014년 09월 26일

한 국 저 작 권 위 원 회

그림 3.4.2 프로그램등록증 (TSA처리 전과 후의 첨도(kurtosis) 계산 프로그램)



제 C-2014-024616 호

프 로 그 램 등 록 증

1. 프로그램의 명칭: T-GMS(티-지엠에스)
2. 저작자 성명 (법인명): 케이티엠엔지니어링(주) / 경기도 성남시 중원구 사기막골로
3. 생년월일 (법인등록번호): 110111-1314345
4. 창작연월일: 2014년09월01일
5. 공표연월일: -
6. 등록사항: 저작자 : 케이티엠엔지니어링 주식회사, 창작 : 2014.09.01
7. 등록연월일: 2014년10월01일

「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2014년 10월 15일

한국저작권위원회

그림 3.4.3 T-GMS(티-지엠에스)

## 제5절 모니터링시스템 시제품 제작

고속열차용 감속기 모니터링시스템 기술개발을 통하여 감속기의 이상상태를 모니터링 하고 진단할 수 있는 시제품을 제작하였다. 시제품의 주요한 기능 설명 및 하드웨어, 소프트웨어의 주요 기능 및 동작 내용은 다음과 같다.

### 가. 감속기 모니터링 시스템 (T-GMS)

#### (1) 시스템 설명

고속열차용 감속기 모니터링 시스템(T-GMS, Train Gearbox Monitoring System)은 다양한 감속기의 상태(진동, 온도, 윤활) 진단 기술을 적용하여 실시간으로 예지보전기법의 진단 파라미터를 제공함과 아울러 위험신호를 감지하는 역할을 수행한다. T-GMS는 철도차량의 대차 구조상 차량 하부에 서버 시스템(Sever System) 탑재가 어렵고 대차 하부 구동부의 센서로부터 객차 내부로 신호 케이블의 동선이 길고 복잡하여 이를 간소화하는 것에 초점을 두어 대차 하부에는 클라이언트(Client)를 상부에는 서버 시스템을 설치하는 방법으로 구성하였다. 위와 같은 구성은 클라이언트에서는 모든 신호연산처리를 완료하고 이 신호를 서버에 TCP/IP 프로토콜로 간단하게 전송하므로 이미 연산된 데이터가 케이블 노이즈의 영향이 없을 뿐만 아니라 서버는 그래픽과 클라이언트 네트워킹 운용만 담당하므로 시스템의 안정성이 높다. 다음 그림 3.5.1은 T-GMS 시스템의 시스템 구성 내용이다.

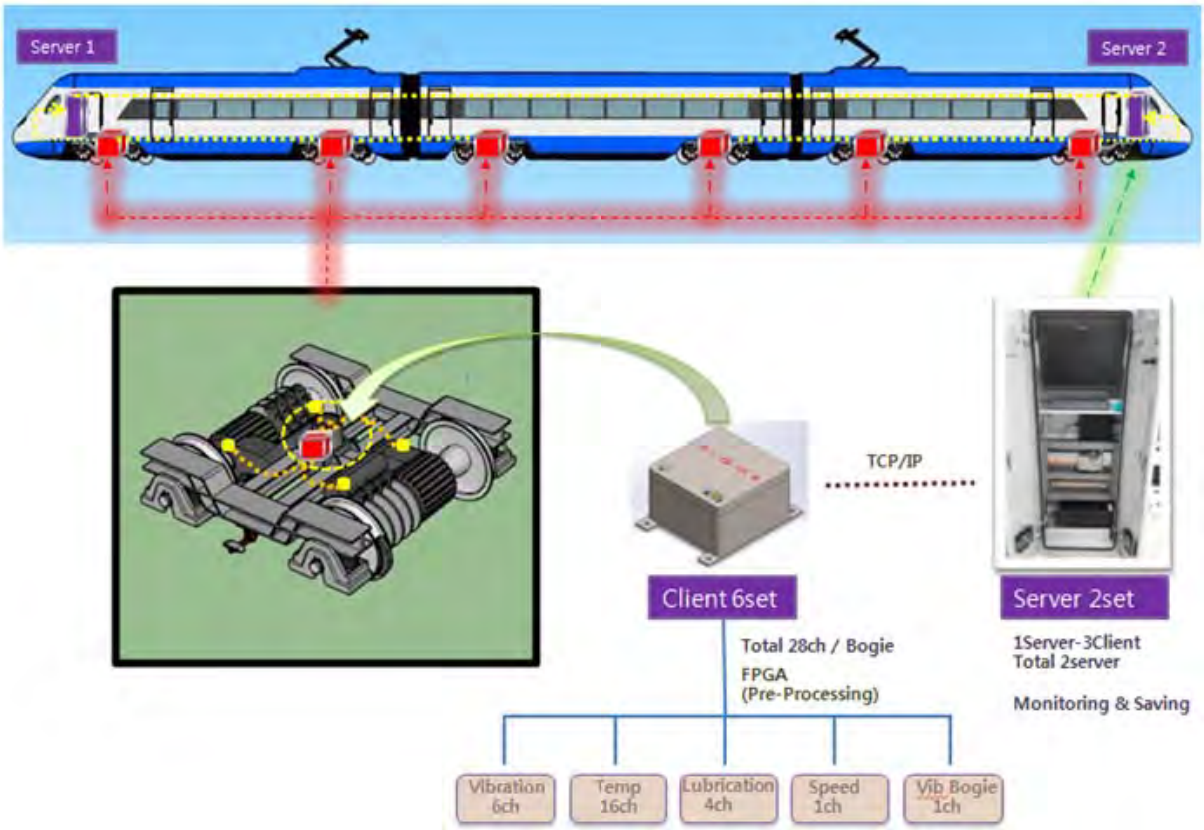



그림 3.5.1 T-GMS 시스템 개요

(2) 하드웨어 주요 기능 및 동작

구축 하드웨어 Client는 KTX 열차 1편성 당 총 6대를 설치할 수 있도록 설계 하였다. 주요 기능으로는 각각의 동력대차와 감속기의 진동 상태를 감시하고 서버와의 통신을 이용하여 진동데이터를 즉시 전달을 해주는 기능을 담당하게 된다. 이때 데이터의 수집이 매우 중요한 요소로 작용을 하게 되는데 속도 데이터의 경우 각 감속기에서 1개의 데이터를 가져오며 진동 데이터는 4개의 감속기에서 7채널에서 데이터를 수집하여 저장을 한다. 온도데이터는 2개의 구동축에서 각각 7채널 앞 차량과 뒤 차량 각각 외부 온도 2개의 채널로 총 16개의 채널로 구성이 되었다. 데이터를 취득하는 과정은 카운터 입력용 모듈을 통하여 전달되어진 Pulse 신호를 이용하여 각각의 Gear의 회전수를 산출해낸다. 수집된 센서 데이터를 이용하여 대차와 감속기 해당 부위의 진동 파라미터를 분석하여 진동 정보를 열차 운용자에게 디스플레이 하는 구조로 시스템은 작동하게 된다. 이때 분석하는 진동 파라미터는 RMS, Overall, Peak-to-Peak, 1x은, GMF, Crest Factor, Kutosis, BPFI, BPFO 등이 있다. 진동 모니터링 시스템의 서버 스토리지 구성은 열차 1편성에 총 2대를 설치할 예정이다. 서버는 상행/하행 구간으로 분리가 되어 열차를 관리하게 된다. 유의 할 점은 1대의 서버는 연산기능과 터미널 기능을 동시에 수행을 하게 되며 다른 1대의 서버는 터미널 기능만을 수행하게 된다. 이유는 취득되는 데이터를 확인하는 운용자는 1곳으로 둘 다 연산기능을 수행할 필요는 없다 그러나 시스템의 과부하와 데이터 취득량에 대한 문제가 발생할 수 있기 때문에 2대로 운용을 할 수 있도록 설계를 하였다. 통신 방식은 TCP/IP 방식으로 클라이언트와 통신을 하게 되며 이더넷 방식으로 데이터를 수집하게 된다. 분석하는 진동 파라미터는 위에서도 언급 하였듯이 RMS, Overall, Peak-to-Peak, 1x, GMF, Crest Factor, Kutosis, BPFI, BPFO 등이 있다. 서버에는 별도로 GPS를 장착하여 열차의 운행 위치 정보를 전송할 수 있도록 시스템을 구성하였다. GPS 통신은 USB포트를 이용하여 RS-232 통신을 활용하는 방안으로 시스템을 설계 하였다. 다음 표 3.5.1은 제작된 시스템 하드웨어 클라이언트와 서버 스토리지 이다.

| 클라이언트 | 서버 | |
|---|---|---|
|  |  |  |

표 3.5.1 모니터링 시스템 클라이언트 & 서버

(3) 소프트웨어 주요 기능 및 동작

모니터링 시스템 소프트웨어는 FPGA, FFT, RMS를 측정 및 진단을 하는 기능을 탑재를 하였다. 하드웨어에서 진동 신호의 진원지를 파악하여 데이터를 축적을 하면 진동 신호를 설계된 알고리즘에서 분석을 하고 감속기의 이상을 진단하여 출력을 하는 구조로 동작을 수행하게 된다. 이때 발생되는 알람 신호는 단계별 출력으로 운전자에게 Display 되는 구조로 데이터의 안정성과 저장 공간에 대한 문제가 없도록 구현을 하였다. 구동 소프트웨어의 진동, 온도, 윤활 각 화면에 그림 3.5.2와 같이 알람 화면으로 즉시 화면에 표시가 되어 운전자가 즉시 이상부위에 대하여 확인이 가능할 수 있도록 구성을 하였다. 6개의 대차가 각각 확인이 가능할 수 있도록 GUI를 구성하여 수시로 언제든지 각 대차의 상태 확인이 가능할 수 있도록 최대한 실무자의 편의성을 고려하였다. 감시 진단 GUI에서는 진동, 윤활, 온도의 계측되는 값이 화면에 수치로 바로 표현이 되며 측정된 데이터 값이 저장이 되어 언제든지 수치 값을 확인이 가능하도록 설정 하였다. 초기 소프트웨어 구동 전 각 파라미터에 대한 기준값을 설정을 할 수 있도록 시스템을 구성 하였다. Kurtosis 카운트시간과 기준값을 세팅하고 위험도 기준치를 설정하여 열차 운행 시 설정된 기준값에 대하여 감시진단 화면에서 위험도를 체크하여 즉시 디스플레이 할 수 있는 구조로 시스템을 설계 하였다. 열차 운행 중 알람이 발생하게 되면 그림과 같이 빨간색 표시 화면이 깜빡 거리면서 이상 부위에 대하여 지속적으로 운전자에게 정보를 디스플레이 할 수 있도록 프로그램을 설계 하였다.

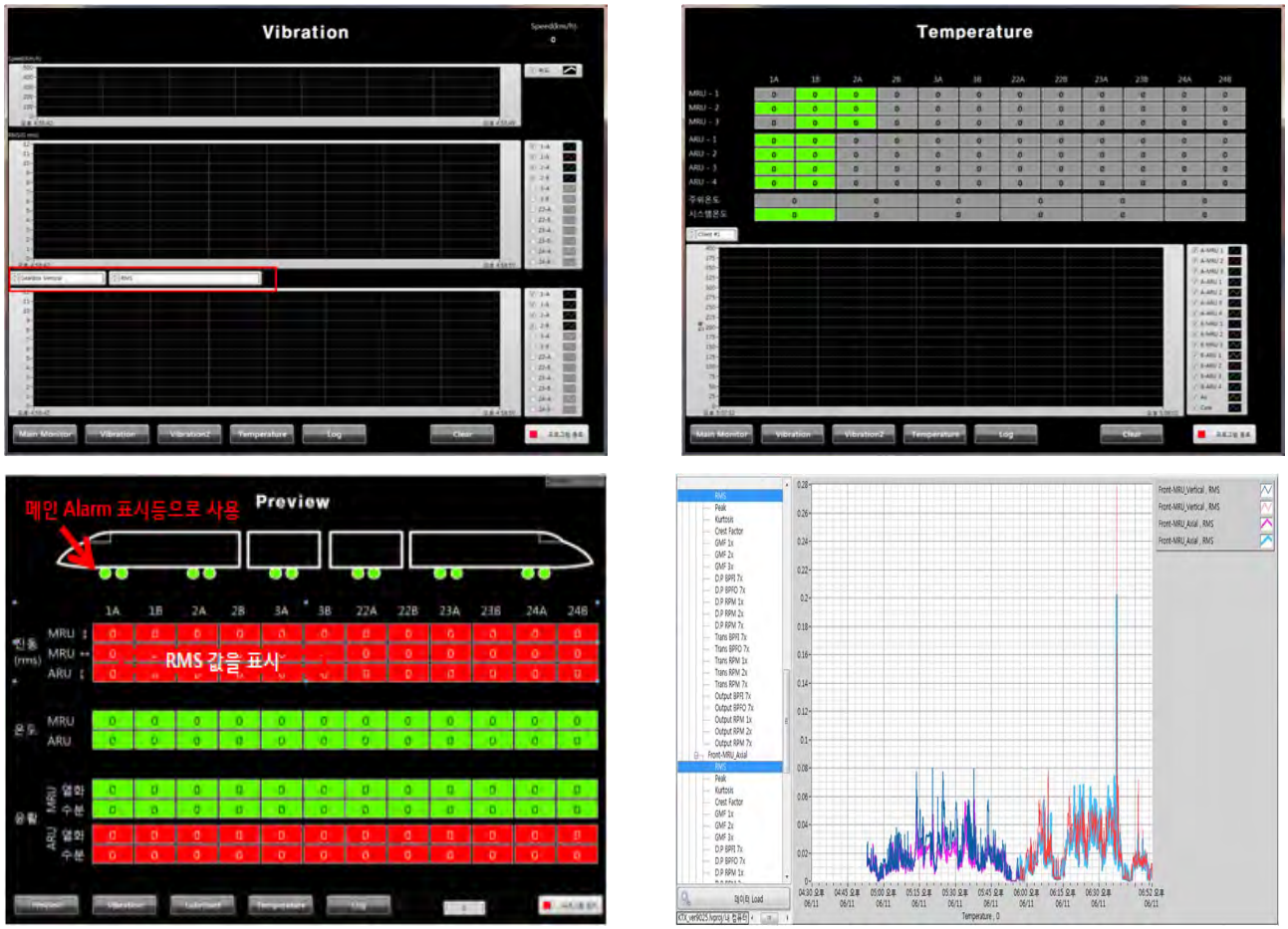



그림 3.5.2 소프트웨어 구성 화면

## 제6절 대형 실물시험기 활용

본 과제 수행시 감속기 손상에 따른 진동특성 평가 및 감속기 결함 및 이상상태 평가를 위하여 KTX용 1차 및 2차 감속기, 전동차용 감속기 실물을 이용하여 무부하, 부하시험을 수행하였다. 아래 표는 총 12차례에 대형 실물시험기를 활용한 연구성과에 대하여 정리한 내용이다.

| No | 성과명 | 일시/장소 | 주요내용 | 참석자 | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2012.3.7.- 2012.3.8./ 한국철도기술연구원 | 전동차 감속기 무부하시험 | 박병수 외 3 | |
| 2 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2012.3.21.- 2012.3.22./ 한국철도기술연구원 | 전동차 감속기 부하별 진동특성 시험 | 문경호 외 2 | |
| 3 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2012.7.26/ 한국철도기술연구원 | 고속전철 2차감속기 무부하시험 | 박병수 외 3 | |
| 4 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2012.10.8.- 2012.10.12/ 한국철도기술연구원 | 고속철도 2차감속기 실물 진동시험 | 이동형 외 1 | |
| 5 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2013.4.29.- 2013.4.30/ 한국철도기술연구원 | 고속철도 1차감속기 실물 진동시험 | 이동형 외 2 | |
| 6 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2013.5.23/ 한국철도기술연구원 | 고속철도 1차감속기 실물 온도/윤활시험 | 김형진 외 2 | |
| 7 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2013.9.4.- 2013.9.5/ 한국철도기술연구원 | 고속철도 1차감속기 정상상태 진동특성시험 | 이동형 외 2 | |
| 8 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2014.4.16.- 2014.4.21/ 한국철도기술연구원 | 1차감속기 결함상태(기어 1개, 1/2 절손) 실물시험 | 문경호 외 2 | |
| 9 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2014.5.15.- 2014.5.20/ 한국철도기술연구원 | 1차감속기 결함상태(기어 2개, 절손) 실물시험 | 이동형 외 1 | |
| 10 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2014.6.03.- 2014.6.13/ 한국철도기술연구원 | 1차감속기 윤활모니터링 시제품 성능시험 | 김형진 외 3 | |
| 11 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2014.9.11.- 2014.9.19/ 한국철도기술연구원 | 1차감속기 윤활모니터링 시제품 성능시험 (2차시험) | 김형진 외 3 | |
| 12 | (6-3) 대형실물시험기 활용건수 | 2014.12.15.- 2014.12.17/ 한국철도기술연구원 | 2차감속기 윤활 및 통합모니터링 시제품 성능시험 | 이동형 외 5 | |

# 제7절 신기술인증

본 연구개발 결과인 감속기 모니터링시스템 시제품을 한국산업기술진흥협회에 신기술인증 신청을 하였다. 신기술인증 신청 핵심 요소기술은 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템 구축 기술, 감속기 모니터링 특성화 파라미터 적용 기술, 고속철도 감속기에 최적화된 진단인디케이터 기술로 구분하였으며, 신기술인증 신청에 대한 상세 내용은 다음과 같다.

■ 산업기술혁신 촉진법 시행규칙 [별지 제1호서식] <개정 2013.3.23>

## 신기술 인증 신청서

※ [ ]에는 해당되는 곳에 √표시를 합니다. (앞쪽)

| 접수번호 | 접수일 | 처리기간 | 120일 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 신청인 | 기관(업체)명 한국철도기술연구원 | | 대표자 김기환 | |
| | 주 생산품 연구개발, 연구용역 | | 업종 서비스 | |
| | 종업원 수 297 명 | 자본금 2,701 백만원 | 매출액(2013년 결산기준) 1,148 억원 | 수출액 만$ |
| | 기업유형 [ ]대기업 [ ]중견기업 [ ]중소기업 [ ]국공립(연) [✔]정부출연(연) [ ]대학 | | 사업자등록번호 138-82-02013 | |
| | 주소 437-757 경기도 의왕시 철도박물관로 176 | | | |
| 업무 담당자 | 소속 부서 고속철도연구본부 | 직위 책임연구원 | 성명 이동형 | |
| | 전화 031-460-5246 (휴대전화) 010-7108-3616 | 전송 031-460-5814 | 전자우편 dhlee@krri.re.kr | |

| | | |
|---|---|---|
| 신청 기술 | 기술 명칭 고속열차용 감속기 모니터링시스템 기술 | 신청분과 [ 수송기계 ]위원회<br>※ [ ]에는 뒷면 신청서 작성요령을 참고하여 신청분과 1개를 선택하여 기재합니다. |
| | 적용제품 명칭 고속열차용 감속기 모니터링시스템 | 모델 명칭 T-GMS |
| | 기술핵심단어 [ 철도 ] [ 기계 ]<br>[ 기타 (감속기) ] [ 모니터링 ]<br>※ [ ]에는 뒷면 신청서 작성요령을 참고하여 기술핵심단어를 선택하여 기재합니다. | |
| | 국제표준화 지원 필요성 (○, ×) | |

「산업기술혁신 촉진법」 제15조의2제4항, 같은 법 시행령 제18조제1항 및 같은 법 시행규칙 제2조제1항에 따라 위와 같이 신청합니다.

2014년 12월 일

신청인 기관(업체)명 한국철도기술연구원
대표자 김 기 환 (서명 또는 인)

한국산업기술진흥협회 귀하

| | | |
|---|---|---|
| 제출서류 | 1. 「산업기술혁신 촉진법 시행규칙」 별지 제2호서식의 신청기술 설명서(세부 기재내용은 산업통상자원부장관이 정하여 고시하는 바에 따라 작성합니다)<br>2. 「품질경영 및 공산품안전관리법」 제2조제2호에 따른 품질경영체제를 갖추고 있는지에 대한 설명자료 또는 국제표준화기구(ISO)의 인증서<br>3. 산업재산권 및 국내외 공인된 인증기관의 인증실적자료 또는 한국인정기구(KOLAS)에서 인정한 시험기관의 시험성적서가 있는 경우 그 자료<br>4. 공동연구를 하거나 기술이전을 받은 경우에는 그 증빙자료 | 수수료<br>서류·면접심사 : 200,000원<br>현장심사 : 500,000원 |
| 한국산업기술진흥협회 확인사항 | 사업자등록증 | |

### 행정정보 공동이용 동의서

본인은 이 건 업무처리와 관련하여 한국산업기술진흥협회가 「전자정부법」 제36조제2항에 따른 행정정보의 공동이용을 통하여 위의 한국산업기술진흥협회 확인사항을 확인하는 것에 동의합니다. *동의하지 아니하는 경우에는 신청인이 직접 사업자등록증 사본을 제출하여야 합니다.

신청인 (서명 또는 인)

### 처리절차

| 신청서 작성 | → 접 수 | → 서류·면접 심사 | → 현장심사 | → 종합심사 | → 결과 통보 |
|---|---|---|---|---|---|
| 신청인 | 한국산업기술진흥협회 | 전문분과위원회 | 전문분과위원회 | 종합심사위원회 | 산업통상자원부 |

210mm×297mm[백상지 80g/㎡(재활용품)]

■ 산업기술혁신 촉진법 시행규칙 [별지 제1호서식] <개정 2013.3.23>

# 신기술 인증 신청서

※ [ ]에는 해당되는 곳에 √표시를 합니다. (앞쪽)

| 접수번호 | 접수일 | 처리기간 | 120일 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 신청인 | 기관(업체)명 케이티엠엔지니어링 | | 대표자 송영천 | |
| | 주 생산품 센서, 계측기 | | 업종 제조업, 도소매 | |
| | 총업원 수 18 명 | 자본금 100 백만원 | 매출액(2013년결산기준) 79 억원 | 수출액 만$ |
| | 기업유형 [ ]대기업 [ ]중견기업 [ √ ]중소기업 [ ]국공립(연) [ ]정부출연(연) [ ]대학 | | 사업자등록번호 220-81-38166 | |
| | 주소 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124 skn 테크노파크 비즈 센터 1416호 | | | |
| 업무 담당자 | 소속 부서 기업부설연구소 | 직위 부장 | 성명 박병수 | |
| | 전화 031-776-2200 (휴대전화) 010-3356-0706 | 전송 031-776-2317 | 전자우편 ktmeng@ktme.com | |

| | | |
|---|---|---|
| 신청 기술 | 기술 명칭 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템 기술 | 신청분과 [ 수송기계 ]위원회 |
| | 적용제품 명칭 고속열차용 감속기 모니터링 시스템 | 모델 명칭 T-GMS |
| | 기술핵심단어 [ 철도 ] [ 기계 ] [ 기타(감속기) ] [ 모니터링 ] | |
| | 국제표준화 지원 필요성 (○, ×) | |

「산업기술혁신 촉진법」 제15조의2제4항, 같은 법 시행령 제18조제1항 및 같은 법 시행규칙 제2조제1항에 따라 위와 같이 신청합니다.

2015 년 1 월 5 일

신청인 기관(업체)명 케이티엠엔지니어링(주)
대표자 송 영천 (서명 또는 인)

**한국산업기술진흥협회** 귀하

| | | |
|---|---|---|
| 제출서류 | 1. 「산업기술혁신 촉진법 시행규칙」 별지 제2호서식의 신청기술 설명서(세부 기재내용은 산업통상자원부장관이 정하여 고시하는 바에 따라 작성합니다)<br>2. 「품질경영 및 공산품안전관리법」 제2조제2호에 따른 품질경영체제를 갖추고 있는지에 대한 설명자료 또는 국제표준화기구(ISO)의 인증서<br>3. 산업재산권 및 국내외 공인된 인증기관의 인증실적자료 또는 한국인정기구(KOLAS)에서 인정한 시험기관의 시험성적서가 있는 경우 그 자료<br>4. 공동연구를 하거나 기술이전을 받은 경우에는 그 증빙자료 | 수수료<br>서류 · 면접심사 200,000원<br>현장심사 : 500,000원 |
| 한국산업기술진흥협회 확인사항 | 사업자등록증 | |

## 행정정보 공동이용 동의서

본인은 이 건 업무처리와 관련하여 한국산업기술진흥협회가 「전자정부법」 제36조제2항에 따른 행정정보의 공동이용을 통하여 위의 한국산업기술진흥협회 확인사항을 확인하는 것에 동의합니다. *동의하지 아니하는 경우에는 신청인이 직접 사업자등록증 사본을 제출하여야 합니다.

신청인 (서명 또는 인)

## 처리절차

| 신청서 작성 | → | 접 수 | → | 서류 · 면접 심사 | → | 현장심사 | → | 종합심사 | → | 결과 통보 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 신청인 | | 한국산업기술진흥협회 | | 전문분과위원회 | | 전문분과위원회 | | 종합심사위원회 | | 산업통상자원부 |

210mm×297mm[백상지 80g/㎡(재활용품)]

# 신기술 인증을 위한
# 기술 설명서

[고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템 기술]

2014. 12

Korea Railroad Research Institute 한국철도기술연구원/ KTM Engineering Inc

# 목 차

**1. 기술개발 핵심내용 ····· 529**

가. 핵심 요소기술 주요내용 및 특징 ····· 530

1) 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템 구축 기술

2) 감속기 모니터링 특성화 파라미터 적용 기술

3) 고속철도 감속기에 최적화된 진단 인디케이터 기술

나. 기존 기술과의 차별성 ····· 534

1) 고속철도용 감속기 진동 모니터링시스템 구축 기술

2) 감속기 모니터링 특성화 파라미터 적용 기술

3) 고속철도 감속기에 최적화된 진단 인디케이터 기술

다. 적용제품에 대한 성능 및 기능 향상 내용 ····· 548

라. 관련산업 파급효과 ····· 556

**2. 기술개발자원 투입 및 개발방법 ····· 559**

**3. 신청기술에 대한 산업재산권 및 인증실적 현황 ····· 560**

가. 산업재산권 출원・등록 현황

나. 공인(시험)기관 시험실적・품질인증기관 인증실적 현황

다. 타인의 산업재산권과의 관계

**4. 국내외 유사.경쟁 기술과의 특징비교 ····· 560**

**5. 개발기술 적용제품의 개요 ····· 561**

가. 제품의 사진 또는 개략도, 구성도

나. 제품의 용도

다. 제품의 성능

라. 예상 시장규모

# 신청기술 설명서



## 1. 개발기술 핵심내용

○ 기술개발 배경

- 고속열차용 감속기는 구동모터의 회전력을 차륜에 전달하는 차량 구동을 위한 핵심장치(그림 1)이며, 일반적인 감속기와는 달리 높은 토오크 전달과 고속회전이 번갈아 발생하고 레일로부터 충격하중을 지속적으로 받고 있음
- 감속기는 결함 발생 시 운행을 중지해야 하는 중요 장치이므로, 안전성을 위하여 3일마다 감속기 오일 및 결함상태를 체크하는 일상정비(ES)를 실시하고 있고, 3년 주기로 부품을 완전 분해하여 검수를 실시하고 있음
- 고속철도 운행 중 주요장치 고장 발생 시 차량의 상태를 시각적으로 제공하는 안전장치가 설치되어 있으나, 감속기 고장에 대한 안전장치는 설치되어 있지 않아 사고 위험 존재함
- 따라서 감속기 손상에 의한 차량 사고를 사전에 방지하고, 현재 기술개발 진행 중인 상태기반 유지보수(condition based maintenance)의 기반을 마련하기 위하여 감속기 모니터링 기술을 개발함

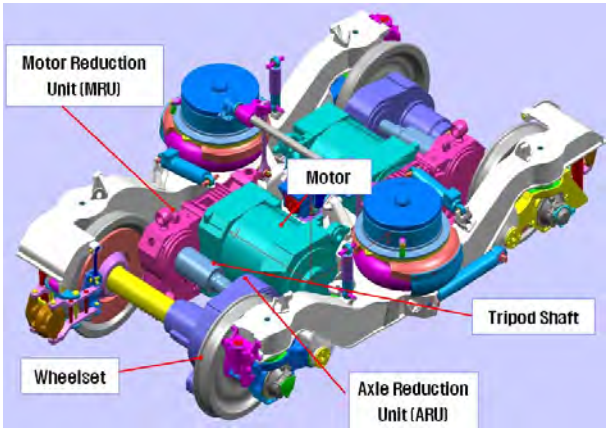



그림 1. 고속열차용 동력대차 및 감속기 구조

○ 신청기술 범위

- 고속열차용 감속기 모니터링 시스템(T-GMS)은 고속열차 감속기에서 발생하는 신호(온도, 진동, 윤활유 상태)를 모니터링하고 실시간 분석, 진단하여 이상발생 시 기관사에게 즉시 통보되는 감속기 이상 상태 모니터링시스템임 (그림 2)
- 신청기술은 고속열차용 감속기의 안전성 및 유지보수 효율성을 높일 수 있는 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템 기술로서, 진동 모니터링시스템 구축 기술 및 특성화 파라미터 적용 기술, 진단 인디케이터 및 기준 설정 기술로 구분할 수 있음

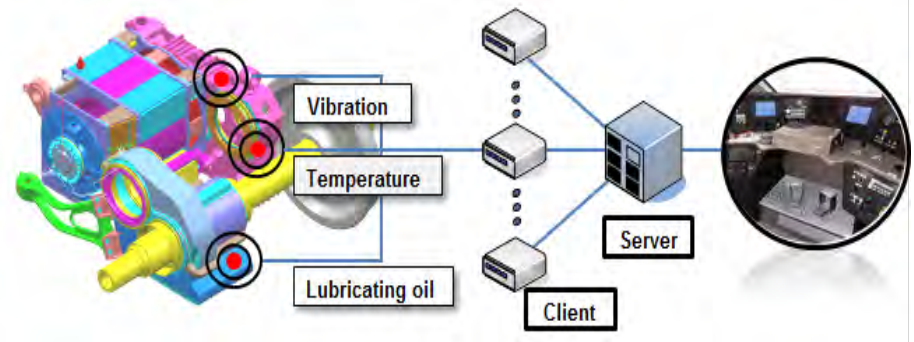



그림 2. 고속열차용 감속기 모니터링 시스템 개념도

### 가. 핵심 요소기술 주요내용 및 특징

#### 1) 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템 구축 기술

- 운행 중인 고속열차의 감속기 진동을 실시간 측정, 분석하여 감속기 상태를 진단하는 진동 모니터링시스템(H/W 및 S/W)을 구축한 기술로서 이 기술을 활용한 철도차량 감속기 전용의 진동 모니터링시스템은 세계 최초 개발품임
- 진동 모니터링시스템 구축 기술은 감속기 진동 특성을 가장 잘 획득하기 위한 센서의 최적 설치 위치 선정 및 대차에서 차체로 연결되는 선을 최소화하고 실시간 파라미터 및 진단 인디케이터 분석을 수행할 수 있는 클라이언트-서버 구조, 실시간 파라미터의 경향을 파악할 수 있고 진단 인디케이터를 이용한 이상상태 진단을 수행하는 서버로 구성됨(그림 3). 이 시스템은 진동뿐만 아니라 온도 및 윤활 상태를 동시에 모니터링이 가능함
- 현재 개발된 철도차량 대차 모니터링시스템(Bogie Condition Monitoring) 기술(SKF)은 감속기의 진동을 측정한 후 분석하여 이상상태를 판단하지만, 본 기술은 실시간으로 진동을 측정, 분석하여 이상상태를 판단할 수 있음
- 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템 구조와 적용 기술
  - ① 클라이언트-서버 구조
  - ② 감속기 특성화 파라미터 적용 및 실시간 감시
  - ③ 이상상태 진단을 위한 진단 인디케이터

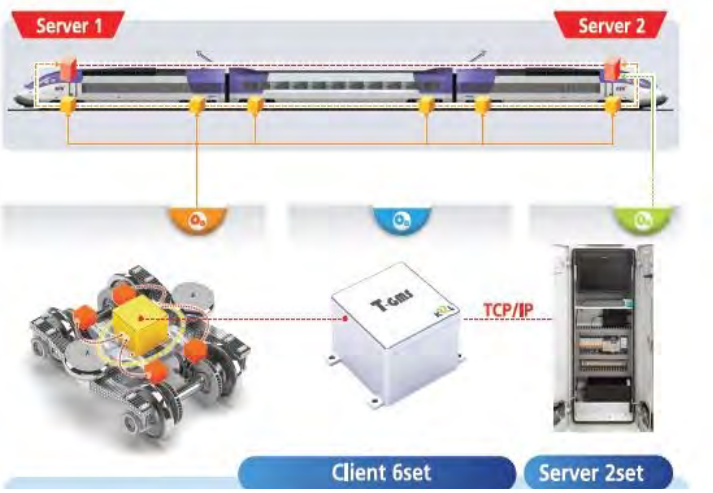



그림 3. 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템 구조

- 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템 주요 특징 및 장점

- 고속철도 감속기 진동 모니터링시스템은 감속기의 상태를 실시간으로 모니터링 할 수 있다.
- 철도차량 감속기의 손상을 진단할 수 있는 세계 최초의 철도차량 감속기 전용 모니터링 시스템이다.
- 철도차량 감속기의 온도 및 진동, 오일의 상태를 감시하고 이상상태를 진단하여 기준을 초과할 경우 이상상태를 운영자에게 통보한다.
- 동적인 진동데이터를 실시간 주파수 분석을 통하여 베어링 및 기어의 상태를 구분할 수 있고 진단이 가능하다.
- 감속기 이상상황을 진단하여 큰 고장이 발생하기 전에 통보하여 운용자들이 상태기반 유지보수를 수행할 수 있게 한다.
- 대차의 진동 측정, 저장 및 데이터 백업이 가능하다.
- 최고속도 400 km/h 까지 적용가능하다.

### 2) 감속기 모니터링 특성화 파라미터 적용 기술

- 감속기 모니터링 특성화 파라미터 적용 기술은 감속기의 이상상태 원인 분석을 위한 주요 파라미터를 선정하여 클라인언트에서 실시간 분석 가능하도록 적용한 기술
- 감속기 특성화 파라미터는 감속기의 구동상태 및 이상상태 원인을 가장 잘 분석할 수 있는 항목을 선정하여 적용하였으며 파라미터별 주요 특징은 표 1과 같음

표 1. 감속기 진동 특성화 파라미터 및 특징

| Parameters | 설 명 |
|---|---|
| GMF | 기어의 이빨이 맞물리는 부분 상태를 의미하는 것으로 기어의 편심, 치형 마모, 과도 백래시의 상태를 진단하기 위하여 선정 |
| GMF 2X, 3X | 기어의 Misalignment 등을 진단하기 위하여 선정 |
| BPFI 7X | 베어링 내, 외륜 주파수 7배 성분, 베어링의 외륜. 내륜에 손상이 가면 베어링 주파수의 특성은 고주파에서 주파수가 감지가 되어 점차 저주파수로 옮겨가면서 주파수가 나타나며 초기 베어링 결함을 감지하기 위하여 선정 |
| BPFO 7X | |
| 1X Shaft | 고속열차 감속기 축에서 Unbalance, Angle Misalignment, 치의 절손 등이 발생하게 되면 1x의 주파수가 발생 |
| 2X Shaft | 감속기 축에서 Offset Misalignment가 발생하면 shaft 2~3X의 주파수가 발생 |
| 7X Shaft | 감속기 축에서 기계적 조립상태에 문제가 있을 때 Looseness가 발생하며 shaft 3~8X의 주파수가 발생 |

- 일반적인 진동 모니터링 시스템은 실시간 데이터 취득 후 후처리 프로그램을 이용하여 이상상태 원인 분석에 필요한 파라미터를 분석(그림 4)하여야 하지만, 본 기술은 주요 파라미터를 클라이언트에서 실시간 분석하여 서버에 전송함으로써 비전문가라도 회전 속도에 따라 변화하는 파라미터를 쉽게 분석(그림 5)할 수 있을 뿐만 아니라 주요 파라미터의 트랜드 변화를 쉽게 파악 할 수 있음
- 주요 파라미터의 트랜드 변화 데이터는 감속기의 이상 원인을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 이상이 발생하는 시기를 파악할 수 있으므로 상태기반 유지보수(CBM)의 기초 자료로 활용 가능함

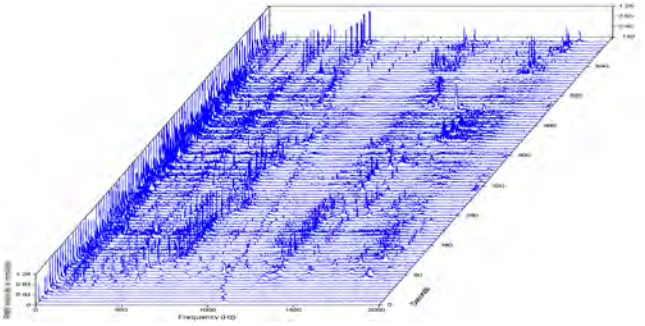


그림 4. 진동 Waterfall 분석 결과




그림 5. 모니터링시스템 사용자 인터페이스(진동 파라미터 화면)

### 3) 고속열차 감속기에 최적화된 진단 인디케이터 기술

- 고속열차 감속기 진단 인디케이터 기술은 고속열차 감속기의 실시간 진단에 적합한 인디케이터(indicator, 표시기)를 선정 또는 개발하고 진단 인디케이터의 실시간 분석 값을 수치화하여 감속기의 이상상태를 진단하는 기술임

- 고속열차 진단 인디케이터는 시편시험 및 실물시험을 통하여 손상 상태별 진단 인디케이터 변화량을 분석한 결과로 기어 손상을 가장 잘 감지하고 적용성이 우수한 RMS, Kurtosis를 활용하였고 기어 손상 진단에 특화된 NA6 진단 인디케이터를 개발함 (표 2)
- 개발한 NA6 진단 인디케이터는 첨도를 계산하기 위해서 기어 맞물림 주파수(Gear mesh frequency)의 사이드 밴드는 그대로 두고 맞물림 주파수 성분을 제거한 residual signal을 사용하는 것으로 손상을 더 잘 감지할 수 있도록 분산의 평균과 6차 모멘트를 적용하여 peak에 더 민감하도록 제안한 방법임 (그림 6)
- 고속열차 감속기 진동은 속도에 따라 민감하게 변화하므로 속도에 무관한 kurtosis와 NA6는 절대기준으로 적용하고, 속도에 따라 변하는 RMS는 상호기준으로 적용함으로서 절대기준 및 상호기준을 서로 보완하게 하여 고속철도 감속기 이상상태 진단에 최적화함 (표 2)

표 2. 최적화된 진단 인디케이터와 기준

| Parameters | 설 명 | 이상상태 기준(위험) |
|---|---|---|
| RMS | 선정 주파수대역의 진폭을 파워 합산 한 에너지이며 진동의 크기를 나타내는 지표 | 5배 이상 |
| Kurtosis | 베어링과 기어에서 발생하는 충격진동의 파형의 첨도(尖度)를 나타내는 것으로 파라미터 선정 | 20 이상 |
| NA6 | 기어 손상 시 발생하는 peak를 감지하며 값이 클수록 기어 손상이 심하다는 것을 의미 | 1,000 이상 |

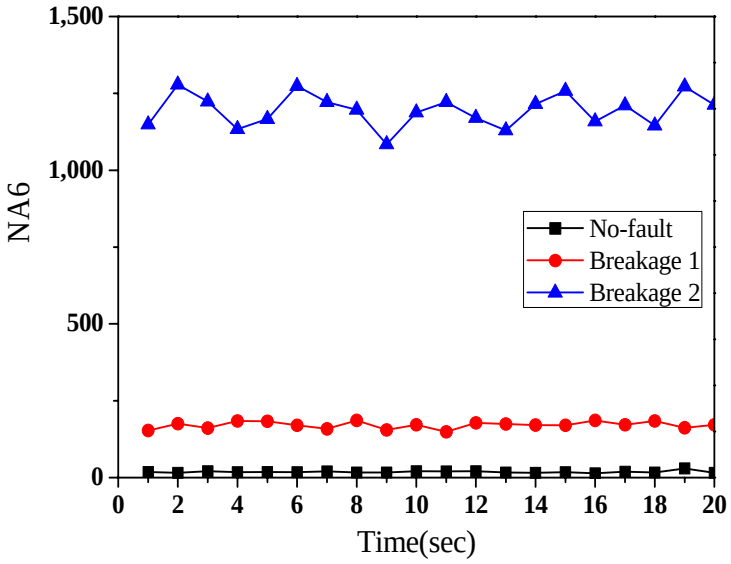



그림 6. 고속열차용 감속기 진동 모니터링 시스템의 NA6 적용 결과 (Breakage 1 – one tooth broken, Breakage 2 – two tooth broken)

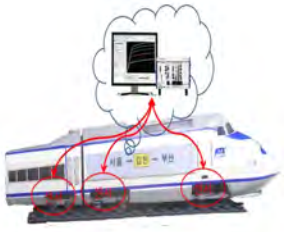
## 나. 기존 기술과의 차별성

### 1) 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템(H/W, S/W) 구축 기술

○ 시스템 구성

- 고속열차용 감속기 진동 모니터링시스템은 세계 최초로 철도차량에 적용하는 장기간(1년 이상) 실시간 감시 및 저장 데이터의 리뷰가 가능한 클라이언트-서버식 온라인 모니터링 시스템 구조임
- 진동 모니터링시스템의 구성은 주요 연산 프로세서(클라이언트)가 열차 하부에 장착되어 있는 형태로 센서와 가까운 위치에서 데이터를 수집하여 디지털로 변환, 연산 처리후 최소한의 데이터를 서버로 전송하게 되므로 실시간으로 트랜드(Trend) 데이터(진단 파라미터)를 분석하는데 매우 유리한 장점이 있음 (표 3)
- 서버 연산의 경우 아날로그 케이블 30ch이상을 확보해야 하므로 직경 20mm*2선 이상의 케이블이 서버에서 감속기 근처에까지 연결이 되어야 한다는 점이 있으나, 클라인언트 연산방식에서는 센서 근처 클라이언트까지 2mm*3선만 연결되는 구조이고 서버로 디지털 신호만을 전송하므로 철도차량 적용에 매우 적합한 구조임
- 아날로그 연산처리 과정에서 축적되는 데이터는 실시간 저장소에 저장이 되고 무정전전원장치(UPS) 전원을 각 구성장치에 공급을 하여 열차 운행 중 전원이 차단이 될 수 있는 위험을 방지할 수 있도록 고안

표 3. 철도차량 모니터링 시스템 구조의 특징 및 장단점 비교

| | NI Compact RIO 개별 동작 방식 (Client연산방식) (본 기술 채택 방식) | NI PXI 이용 연결 방식 (Server연산방식; H/W) | NI 센서&통신 모듈 작동 방식(Server연산방식; S/W) |
|---|---|---|---|
| 개념도 |  |  |  |
| 특징 | • Client 개별동작 방식 : 독립적인 모듈로 감속기 부착(Client H/W; NI Crio 연산방식)<br>• 센서 → Client Box → PC 연결 작동 방식 | • PC와 센서 직접 연결 작동 방식(Server H/W; NI PXI 연산방식)<br>• 센서 -> Junction box -> PC | • Main Controller 작동 방식<br>• NI 센서와 컨트롤러 서버 작동 방식(S/W연산 방식)<br>• 센서 ->Junction box ->PC |
| 장점 | • Client에서 사전연산을 거치고 Server로 전송하므로 연산 작업이 안정되며, Server의 부하를 줄일 수 있음<br>• Server는 데이터 분산처리 후 처리된 데이터를 수집/저장 및 사용자에게 알리는 형태로 구현<br>• 대차단위로 독립시킬 수 있어 정비에 편리 | • 시스템의 구성이 이해하기 편리<br>• PC와 동일한 환경에서 직접적인 센서 데이터 취득이 가능하므로, 직관적인 시스템 구현 | • 상대적으로 가격 저렴<br>• 크기가 작아 설치작업이 간단<br>• 형상과 구조가 비교적 간단하여 관리 편리 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | • 개별 동작 방식으로 진행이 되어 데이터 과부하의 위험이 없어 안정적으로 데이터 수집이 가능<br>• 각 Client로 연결 배선 간단<br>• 디지털 신호전송으로 신호노이즈 최소화 가능 | | |
| **단점** | • 구성가격 비교적 고가<br>• Client의 보호함 내부에 과진동 안전장치가 필요 (H/W의 기본내진특성은 50G에 견딜 수 있음) | • Junction box-PC간 연결 배선관경이 크고 (90P*3 20mm*2선/1client당, 하부로의 대형 Hole필요) 처리가 어려움<br>• 중앙 집중 시스템으로 연산 부하 위험이 매우 높음<br>• 구성 가격 매우 고가<br>• 대차 하부에 Junction Box의 설치가 별도로 필요<br>• 배선 및 커넥터 고가 | • 연산 부하가 심하게 걸려 통신 끊김 현상이 발생할 위험이 높음<br>• 시스템의 크기에 비하여 배선 작업이 어려움<br>• 대차 하부에 Junction Box의 설치가 필요 |

○ 시스템 하드웨어

- 모니터링 시스템은 가속도 센서에서 취득한 데이터를 메모리 버퍼(FIFO)로 전송하고 신호를 처리하는 연산 프로세스를 통하여 TCP/IP 통신으로 서버에 전송 하는 방식임. 이렇게 전송된 복합적인 신호는 서버에서 설정된 이상 진단 기준에 의하여 감속기 이상상태를 고속철도 차량의 운전자에게 디스플레이 되는 타입으로 구성됨 (그림 7)

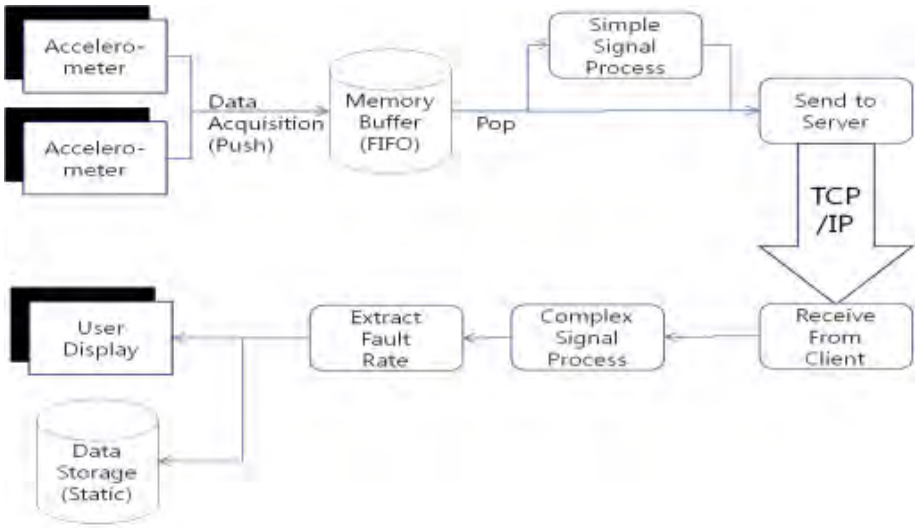



그림 7. 시스템 하드웨어 구성 및 흐름도

- 클라이언트 하드웨어는 12.8 ks/s의 데이터 샘플링 및 각종 파라미터, 진단 인디케이터 데이터 전송 (최대 400 km/h)이 가능하도록 하여 고속 열차의 특성을 반영함. 고속열차 감속기에서 취득되는 방대한 데이터는 10분주기로 데이터 파일로 저장할 수 있으며, 데이터 전송은 실시간(Real time) 전송 방식으로 감속기와 대차의 진동 데이터를 측정, 저장 할 수 있음. (그림 8, 표 4)

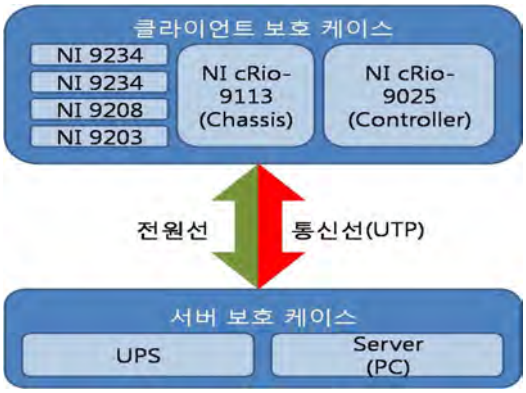



그림 8. 모니터링 시스템 하드웨어 구성도

표 4. 하드웨어 시스템 주요 사양

| 구분 | 기능 | 내용 |
|---|---|---|
| Client | 센서 데이터 수집 및 데이터 연산 | • Real-time OS가 탑제된 임베디드 시스템 (NI cRio-9025 : 800MHz CPU, 512Mb RAM)<br>• 데이터 전처리(Pre-Processing)를 담당하는 FPGA<br>• Chassis (NI cRio-9113Vertex-5 LX50)<br>• 진동 데이터 취득용 모듈 x 2 (NI 9234, IEPE 지원, Max 51.2KS/s, 4채널)<br>• 시스템 보호 케이스 |
| Server | 데이터 저장, 위험상태진단, 사용자 경보 | • 고성능 컴퓨터 (Intel I7 2600, 4Gb RAM, 2Tb HDD)<br>• UPS<br>• 클라이언트 전원공급 시스템<br>• 시스템 보호랙 케이스 |

- 최소한의 진동 센서로 최적의 데이터를 취득하기 위하여 실물시험 및 분석을 수행하였고, 진동 데이터를 가장 잘 취득할 수 있고 센서의 안정성 및 유지보수에 편리한 최적의 측정위치를 선정함. 그림 9및 표 5는 진동 측정 위치 및 진동 센서 사양을 나타냄. 진동 센서는 감속기 부위에 10 mV/g (Measurement range 500 g shock limits 5,000 g) 사양의 7채널로 구성을 하였고, 대차부는 100 mV/g (Measurement range 50 g shock limits 500 g)의 사양의 1채널로 시스템을 구성함

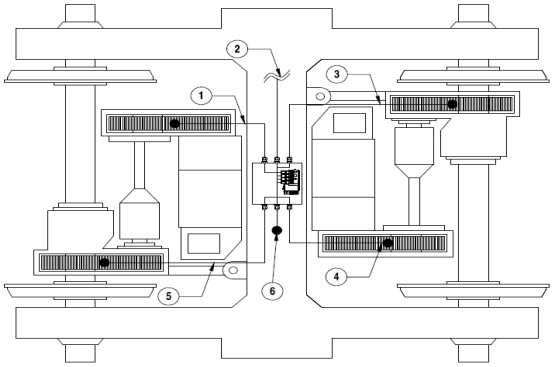



그림 9. 진동 센서 및 보호박스 설치 위치

표 5. 진동 센서 적용 위치 및 방향

| 위치 | 측정 사양 |
|---|---|
| ① 선단 1차 감속기 (2 Direction) | • 10 mv/g, ~ 6,400 Hz<br>• 측정 방향 : 횡방향(X), 축방향(Z) |
| ③ 후단 2차 감속기 (1 Direction) | • 10 mv/g, ~ 6,400 Hz<br>• 측정 방향 : 축방향(Z) |
| ④ 후단 1차 감속기 (2 Direction) | • 10 mv/g, ~ 6,400 Hz<br>• 측정 방향 : 횡방향(X), 축방향(Z) |
| ⑤ 선단 2차 감속기 (1 Direction) | • 10 mv/g, ~ 6,400 Hz<br>• 측정 방향 : 축방향(Z) |
| ⑥ Bogie 대차 (1 Direction) | • 100 mv/g, ~ 500 Hz<br>• 측정 방향 : 횡방향(X) |

- 진동 모니터링 시스템의 클라이언트는 고속열차 1편성 당 총 6대를 설치할 수 있도록 설계 함. 클라이언트는 각각의 동력대차와 감속기의 진동 데이터를 취득하고 분석하여, 진동 데이터 및 분석 데이터를 서버로 즉시 전달 해주는 기능을 담당함. 카운터 입력용 모듈로 취득한 Pulse 신호를 이용하여 각각의 Gear 회전수를 산출해내고, 측정된 대차와 감속기 해당 부위의 진동 데이터를 특성화된 파라미터 및 진단 인디케이터로 분석하여 감속기 진동 특성 정보를 열차 운용자에게 디스플레이 하는 구조로 시스템은 작동함. 이때 분석하는 특성화 파라미터는 Overall, Peak-to-Peak, 1x, GMF, BPFI, BPFO 등이며, 진단 인디케이터는 RMS, Kutosis, NA6 임

- 진동 모니터링 시스템의 서버는 고속열차 운행이 상행/하행 구간으로 구분되기 때문에 전부 및 후부에 총 2대(고속열차 1편성당)가 설치됨. 1대의 서버는 연산기능과 터미널 기능을 동시에 수행을 하게 되며 다른 1대의 서버는 터미널 기능만 수행함. 통신 방식은 TCP/IP 방식으로 클라이언트와 통신을 하게 되며 이더넷 방식으로 데이터를 수집함. 데이터 표시 및 저장하는 파라미터는 클라이언트에서 전송한 특성화 파라미터와 진단 인디케이터로 그림 10은 클라이언트의 데이터 취득 과정 및 서버의 파라미터 저장과 이상상태 판단을 나타낸 개념도임

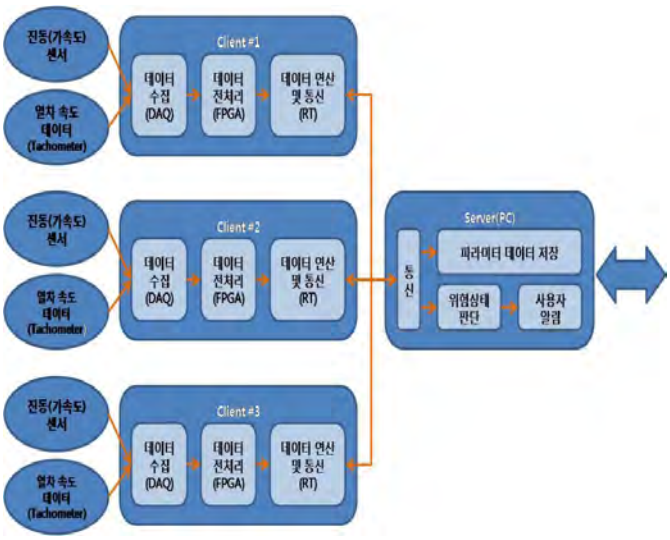



그림 10. 진단 시스템 동작 개념도

○ 시스템 소프트웨어

- 소프트웨어의 주요 기능은 클라이언트에서 감속기와 대차에 설치가 되어 있는 센서에서 데이터를 실시간으로 취득하고 특성화 파라미터 및 진단 인디케이터를 연산하여 그 결과를 서버에 전송하는 기능과, 서버에서 특성화 파라미터 실시간 표시 및 진단 인디케이터 기준값으로 입력된 알람기준의 값에 도달하게 되면 알람을 발생시키는 기능, 발생된 알람을 데이터 정보화 하여 열차 차량 운전자에게 전달을 하는 기능으로 구분됨. 그림 11 및 그림 12는 개발된 알고리즘과 프로세스 명세서 내용을 바탕으로 작성된 각 구성 장치 프로그램 연산 데이터 처리 흐름도를 나타냄

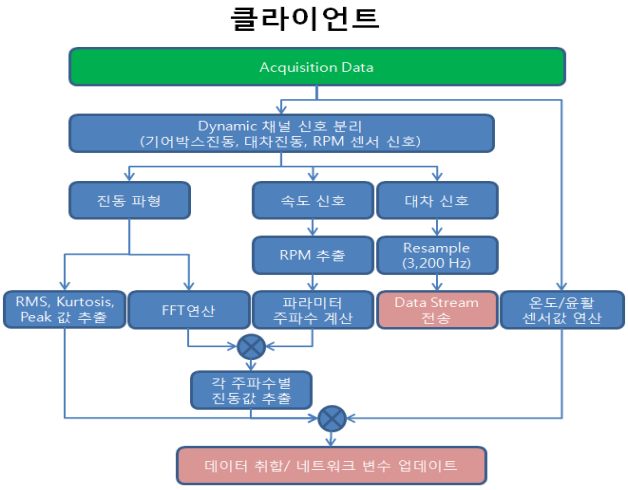



그림 11. 클라이언트 프로그램 설계 구성도 및 흐름도

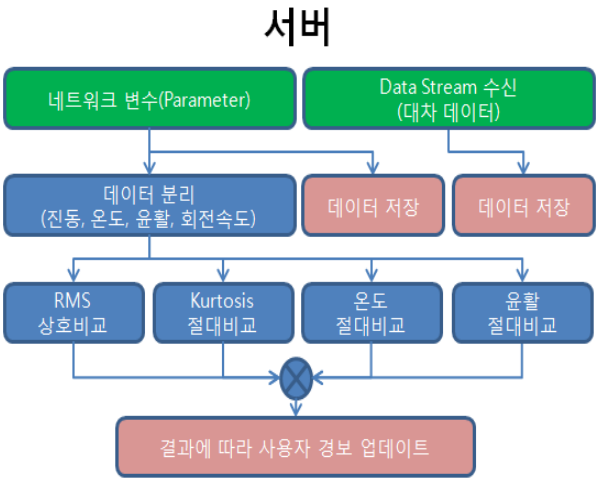



그림 12. 서버 프로그램 설계 구성도 및 흐름도

- 사용자 인터페이스(GUI)는 메인 화면(그림 13)에 진단 인디케이터가 정상상태일 경우 녹색 배경의 수치로, 이상상태일 경우 주황색(주의) 또는 적색(경고) 배경의 수치로 화면에 표시가 되어 운전자가 즉시 이상부위에 대하여 확인이 가능할 수 있도록 구성. 세부화면으로 진동 파라미터 화면(그림 14)은 그래프를 이용하여 실시간으로 열차속도, 진동량 등 각 파라미터별 진동 수치를 표시를 해주고 변화 추이를 계속 확인이 가능하도록 하여 사용자의 편의성을 최대한 고려함

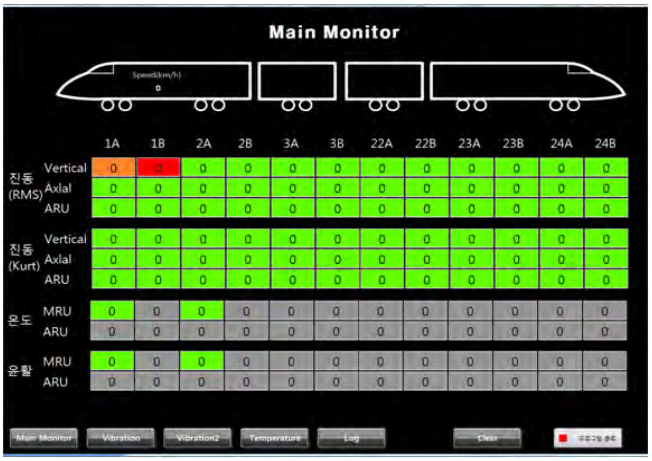



그림 13. 사용자 인터페이스(GUI): 메인 화면




그림 14. 사용자 인터페이스: 진동 파라미터 화면

- 사용자 인터페이스 프로그램 하단의 버튼들은 공통메뉴로 어느 화면에서나 동일하게 나타나고 동작하는 기능을 가지고 있으며, 각각의 기능은 아래와 같음

① Main : 진동, 윤활, 온도에 대한 전반적인 부분을 한눈에 볼 수 있는 메인화면으로 전환

② Vibration : 진동에 대한 변화추이를 볼 수 있는 그래프 화면으로 전환

③ Vibration2 : 실시간으로 전달되는 센서별 진동데이터를 조합하여 동일주파수 항목끼리 비교해 확인할 수 있는 화면으로 전환

④ Lubricant : 감속기에 설치된 센서를 통해 실시간으로 전달되는 윤활정보를 한눈에 확인할 수 있는 표와 채널을 선택하여 변화추이를 확인할 수 있는 그래프가 배치된 화면으로 전환

⑤ Temperature : 감속기에 연결된 온도센서를 통해 전달되는 온도정보를 한눈에 확인할 수 있는 표와 채널을 선택하여 변화추이를 확인할 수 있는 그래프가 배치된 화면으로 전환

⑥ Log : 현재 운행중인 상황에서 발생했던 주의/경고 이력을 볼 수 있는 화면으로 이동

⑦ Clear : 현재 메모리 내부에 저장된 센서데이터 버퍼를 초기화시켜 그래프를 지움.(데이터는 프로그램에서 수신과 동시에 파일로 저장하기 때문에 후에 Viewer 프로그램을 이용해서 다시 조회 가능)

⑧ 프로그램 종료 : 프로그램을 종료

- 위험도 측정 알고리즘 : 감속기 각각의 측정 위치 클라이언트 메모리에 파라미터 및 진단 인디케이터 데이터를 누적시키는 방법으로 알고리즘을 설계함. 메모리에 데이터를 누적시킬 때 10분주기 연산으로 누적된 값 중에서 진단 인디케이터 기준치를 초과한 횟수를 파악하여 총 데이터 개수 대비 초과된 개수의 비율을 산출하여 위험도를 추출할 수 있도록 하였으며 추출한 위험도가 기준치를 초과할 경우 사용자에게 경보를 보여주는 방법으로 알고리즘을 구축함

- 데이터 처리효율의 상승을 위하여 각각 별도의 데이터 처리 Thread를 할당하여 프로세서의 효율을 높이고, 향후 소프트웨어 개선이 용이하도록 주요 프로그래밍의 함수 블록화 구현 (표 6)

표 6. 함수 블록화 내용

| 함수 블록화 구간 | 설명 |
|---|---|
| Client / FPGA | - 데이터 취득부 : 센서에서 취득한 데이터를 가져오는 블록 (실시간 처리)<br>- 데이터 전달부 : Real-Time 시스템에서 데이터를 요청하면 데이터를 전달해주는 블록 |
| Client / Real-Time System | - 데이터 수신부 : FPGA에 데이터를 요청해서 가져오는 기능을 수행하는 블록<br>- 데이터 연산부 : 가져온 데이터를 연산처리 하는 블록<br>- 통신 처리부 : Server컴퓨터에 접속을 시도하고, 데이터 통신을 담당하는 블록 |
| Server / Server Computer | - 데이터 처리부 : 연결된 Client들에서 데이터를 수신하고 저장하는 기능을 수행하는 블록<br>- 통신 연결부 : TCP/IP 통신방식을 통해 접속을 시도하는 Client에게 통신을 허용하는 블록 |

- 데이터 기록 규칙 : 데이터 기록은 1초 동안 수집한 진동 데이터를 바탕으로 추출해낸 각종 진동 파라미터(1X GMF, Overall, BPFI, 등등)의 수치와 측정시간, 모터의 분당회전수(RPM), 필요시 온도센서 데이터, 윤활센서 데이터, GPS 데이터를 함께 저장하도록 설정함. 이 때 저장할 파일은 2진(binary) 파일형식을 선택

하여 저장하며 대차 진동의 경우 별도의 파일에 원본데이터(raw data)를 저장할 수 있도록 소프트웨어를 구축함

- 저장된 데이터의 조회 : 각 파라미터에 대한 데이터를 시간별로 조회를 할 수 있고 감속기 이상 데이터의 이력관리가 가능함(그림 15).

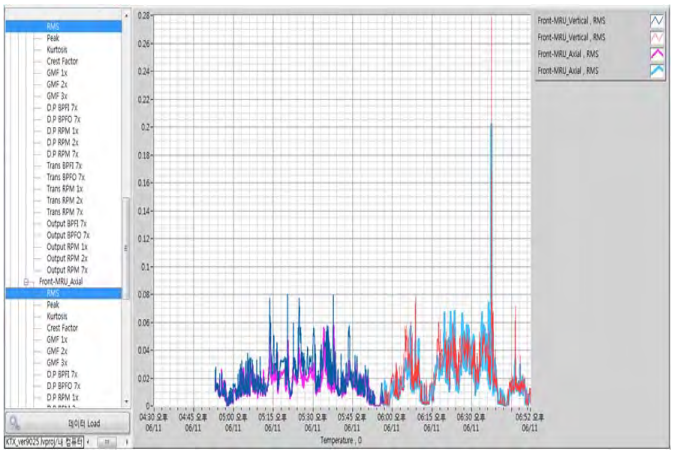


그림 15. 과거 이력 데이터 조회용 소프트웨어 화면

○ 관련 특허출원 (첨부 참조)

- 전동열차의 진동 측정 시스템 : 고속 전동열차에 설치된 감속기의 진동 측정 및 그에 따라 감속기의 상태를 감시할 수 있도록 하는 전동열차의 진동 측정 시스템에 관련된 특허
- 전동열차의 진동 측정 장치 : 고속 전동 열차의 동력 대차에 설치되어 주행 과정에서 발생되는 진동을 측정하여 고속 전동 열차의 실시간 진단이 가능하도록 하는 전동 열차의 진동 측정 장치에 관한 것
- 고속전동 열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템 : 실시간으로 고속 전동 열차에서 발생되는 진동을 분석하여 위험의 예측이 가능하도록 하는 위험 예방 시스템에 관한 것

○ 기존기술과의 차별성 비교

- 고속열차 감속기 전용의 모니터링시스템은 존재하지 않으므로 대차 모니터링 시스템(SKF사) 및 풍력 발전기용 모니터링시스템과 기술 및 장단점 비교 (표 7)

표 7. 고속열차 감속기 모니터링시스템과 기존기술과의 비교

| 분류 | 고속열차 감속기 진동 모니터링시스템(T-GMS) | 국내 | 선진국 |
|---|---|---|---|
| | | SM | SKF |
| H/W 채널 | - 진동 : 9 Channel<br>- 온도 : 16 Channel<br>- 윤활 : 4 Channel<br>- 속도 : 1 Channel<br>(1 Client 기준) | - 진동 : 12 Channel<br>- AI : 8 Channel<br>- 온도 : 4 Channel<br>- DI : 8 Channel<br>(1 Client 기준) | - 온도 : 8 Channel<br>- 진동 : 8 Channel<br>- 속도 : 4 Channel<br>(1 Client 유사기준) |
| 주요 용도 | - 철도차량 변속기어박스 기본설계(발전, 철강, 타이어, 시멘트 적용 가능) +모든 정속설비 모니터링 가능. | - 풍력발전기(산업용 변형) | - 철도차량 베어링 및 대차용(제지, 철강, 산업용 변형) |
| 측정 가능 주파수 | - 12.8 ks/s 샘플링 데이터 FFT 데이터, RMS 데이터 전송(최대 400km/h)적용가능 | - Vibration RMS 산출 (0.1-100Hz, 10-1000Hz) | - 최대 250km/h 적용 가능 주파수 |
| 주요 측정 진동 | -FFT, RMS 측정 및 진단<br>-6.4khz, 5~120 line resolution<br>- 대차 진동 측정<br>- 감속기 진동 측정<br>-10시간(1일기준)진동파형 저장 (Raw Data)<br>-포인트당 진동파라미터(44개)<br>-특수 파라미터 (Na6-철도레일 노이즈 최소) | -order analysis :10분 평균<br>- HFBP (1k~10kHz) 산출<br>- 10분 주기 데이터 파일 저장<br>- Trigger에 의한 시간 파형 저장<br>-10분 평균 order spectrum<br>-포인트당 진동파라미터(7개)<br>-특수파라미터(Envelope band power-베어링수명) | - Hot Axle Box 베어링 온도 상승시 기차 운행 정지<br>- Boogie hunting Detection<br>- TSI 파라미터 에서 Relay 기능<br>- 철도차량의 안정성 측정<br>-포인트당 진동파라미터(5개이내)<br>-특수파라미터(DPE-베어링수명) |
| 가격 | - 약6천~8천, 1client기준<br>- 약3억(KTX 1편성기준) | - 약 1억~1억5천, 1client기준<br>- 약6~10억(KTX 1편성기준) | - 약8천~1억, 1server기준<br>- 약5억~6억(KTX 1편성기준) |
| 장점 | 1. Server-Client식 구조<br>(복식구조:Client6+2Server; 빠른연산, 노이즈최소, 다양한 센서 연결용이)<br>2. 다양한 감시 파라미터<br>(실시간감시 및 상태 모니터링 44개 파라미터)<br>3. 절대기준과 상대기준에 의한 병행평가 및 감시<br>(RMS, 열차최적 NA6, Kurtosis, 감속기별 상태비교평가) | -Server-Client식.<br>-가변속 회전설비 적용가능.<br>-실시간감시 및 상태 모니터링기능 있음 (10개이내 감시파라미터)<br>-무선방식 채용가능(철도는 불가) | -대차 및 기어박스 모두 모니터링 + 이외에 다양한 추가 감시기술, 센서 연결이 가능.<br>-철도차량 최적 내구성 성능입증(250km/hr)<br>-베어링결함 감시 전용 파라미터 채용.(DPE) |
| 단점 | -상용시험필요. (정책적 결정)<br>-차량제작시 설계반영 필요. (정책적 결정) | -풍력발전 시스템 적용대상.<br>구조(단일구조:Client1+1Server)<br>-현재의 시스템으로 열차에 적용불가(주파수한계 및 내구성) | -Server식 구조(배선이 초기 설계치에만 적용. 추가변경 어려움)<br>-한정된 파라미터 (진동량 및 베어링전용 파라미터 5개이내) |

### 2) 감속기 모니터링 특성화 파라미터 적용 기술

○ 특성화 파라미터 선정

- 고속열차 감속기 모니터링 특성화 파라미터를 선정하기 위하여 감속기 부품별 고유진동수 측정 및 운행상태의 감속기 진동 측정시험 및 분석 수행

- 감속기를 구성하는 단일구성요소 및 결합구성요소의 고유진동수 산출과 KTX 실차에 결합되어 있는 상태에서 충격을 가해 추출한 진동 데이터를 바탕으로 특정 주파수대역에서 고유진동수의 영향을 받는 감속기의 모드형상(Mode shape)을 해석함. 고유진동수 경향은 전반적으로 1차감속기의 기어 맞물림에 해당하는 단일구성요소들 및 Tripod(1,2차 감속기 연결축)는 고유주파수가 1,000Hz 이상의 고주파수 대역으로 나타나고 있고, 모터를 포함한 1,2차 감속기 결합구성요소는 1,000Hz 이하의 저주파수 대역으로 나타나고 있음 (그림 16)

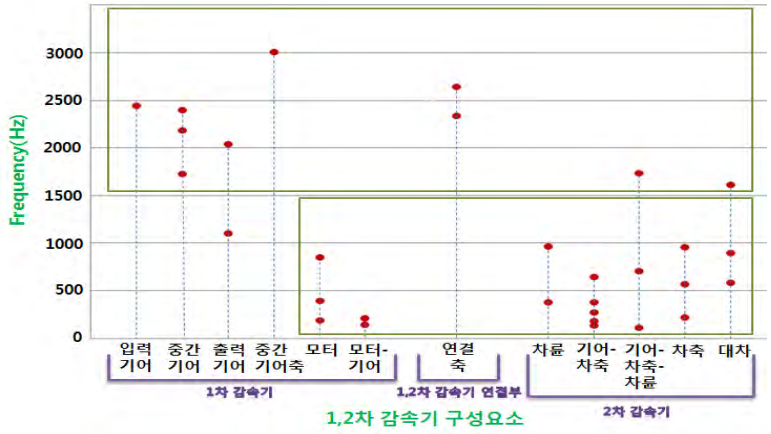



그림 16. 감속기 주요 부품별 고유진동수(Hz)

- 고속열차의 저속 및 고속 운행상태에서 감속기 진동 측정시험 결과 기어 맞물림주파수(GMF) 및 하모닉 성분, 사이드밴드 와 베어링 주파수, 축의 회전 주파수 등이 지배적으로 나타남 (그림 17)

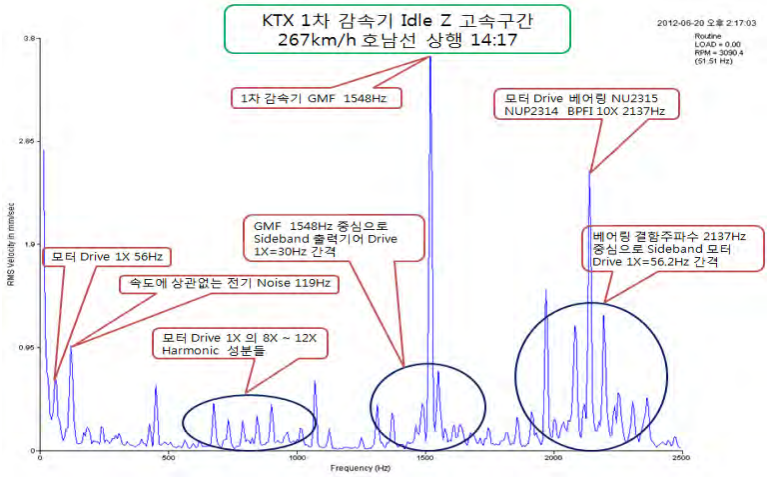



그림 17. 고속 운행상태 감속기 진동 분석

- 감속기 부품별 고유진동수 측정 및 운행상태의 감속기 진동 측정 결과를 기반으로 감속기의 구동 상태 및 이상상태 원인을 가장 잘 분석할 수 있는 특성화 파라미터를 선정 (표 8)

표 8. 감속기 진동 특성화 파라미터

| Parameters | 설 명 |
|---|---|
| GMF | 기어의 이빨이 맞물리는 부분 상태를 의미하는 것으로 기어의 편심, 치형 마모, 과도 백래시의 상태를 진단하기 위하여 선정 |
| GMF 2X, 3X | 기어의 Misalignment 등을 진단하기 위하여 선정 |
| BPFI 7X | 베어링 내, 외륜 주파수 7배 성분, 베어링의 외륜. 내륜에 손상이 가면 베어링 주파수의 특성은 고주파에서 주파수가 감지가 되어 점차 저주파수로 옮겨가면서 주파수가 나타나며 초기 베어링 결함을 감지하기 위하여 선정 |
| BPFO 7X | |
| 1X Shaft | 고속열차 감속기 축에서 Unbalance, Angle Misalignment, 치의 절손 등이 발생하게 되면 1x의 주파수가 발생 |
| 2X Shaft | 감속기 축에서 Offset Misalignment가 발생하면 shaft 2~3X의 주파수가 발생 |
| 7X Shaft | 감속기 축에서 기계적 조립상태에 문제가 있을 때 Looseness가 발생하며 shaft 3~8X의 주파수가 발생 |

○ 특성화 파라미터 적용

- 각 동력대차에 설치된 클라이언트에서 회전수와 진동 데이터를 취득하고 Pulse 신호를 이용하여 각각의 Gear의 회전수를 산출해내고, 측정된 대차와 감속기 해당 부위의 진동 데이터를 특성화된 파라미터로 분석하여 서버로 전송

○ 기존기술과의 차별성

- 일반적인 진동 모니터링 시스템은 실시간 데이터 취득 후 후처리 프로그램을 이용하여 이상상태 원인 분석에 필요한 파라미터를 분석하여야 하지만, 본 기술은 주요 파라미터를 클라이언트에서 실시간 분석하여 서버에 전송함으로써 비전문가라도 회전 속도에 따라 변화하는 파라미터를 쉽게 분석할 수 있을 뿐만 아니라 주요 파라미터의 트랜드 변화를 쉽게 파악 할 수 있음

- 주요 파라미터의 트랜드 변화 데이터는 감속기의 이상 원인을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 이상이 발생하는 시기를 파악할 수 있으므로 상태기반 유지보수(CBM)의 기초 자료로 활용 가능함

### 3) 고속철도 감속기에 최적화된 결함 진단 인디케이터 기술

○ 진단 인디케이터

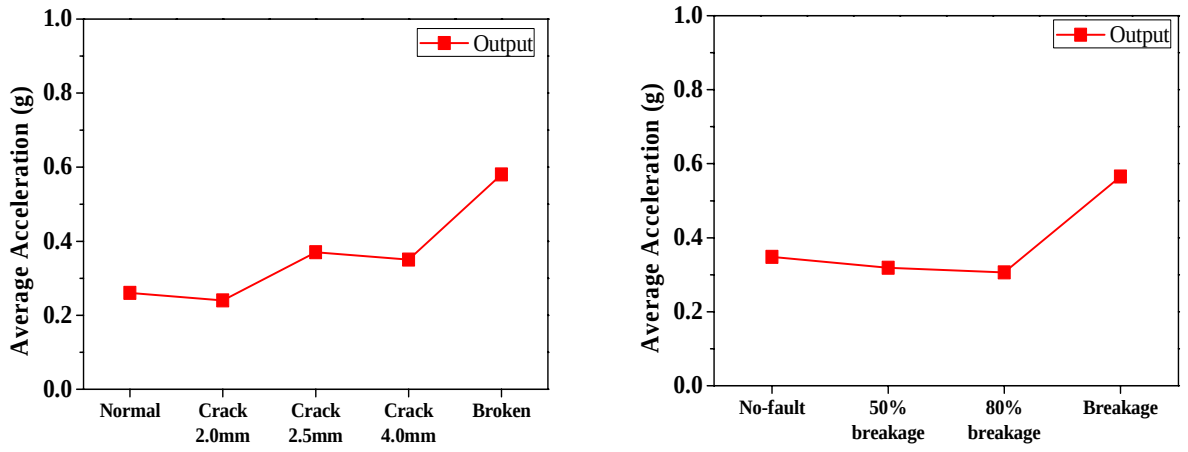
- 고속열차 감속기 진단 인디케이터 기술은 고속열차 감속기의 실시간 진단에 적합한 인디케이터(indicator, 표시기)를 선정 또는 개발하고 진단 인디케이터의 실시간 분석 값을 수치화하여 감속기의 이상상태를 진단하는 기술임

- 고속열차 진단 인디케이터는 시편시험 및 실물시험을 통하여 손상 상태별 진단 인디케이터 변화량을 분석한 결과로 기어 손상을 가장 잘 감지하고 적용성이 우수한 RMS, Kurtosis를 활용하고

기어 손상 진단에 특화된 NA6 진단 인디케이터를 개발하였으며, 상세 내용은 아래와 같음

㉮ RMS

RMS는 감속기 상태 진단 시 진동의 크기를 나타내는 지표이면서 기본적인 진단 파라미터로서 기어 시편 실험과 감속기 실물 실험을 통해서 기어 결함에 따라서 RMS가 변화한다는 것을 확인하였음 (그림 18). RMS 진단 인디케이터의 단점은 열차와 같이 속도가 변화할 경우 RMS 크기가 변화하므로 손상상태에 따른 절대기준치를 설정하기 어려움

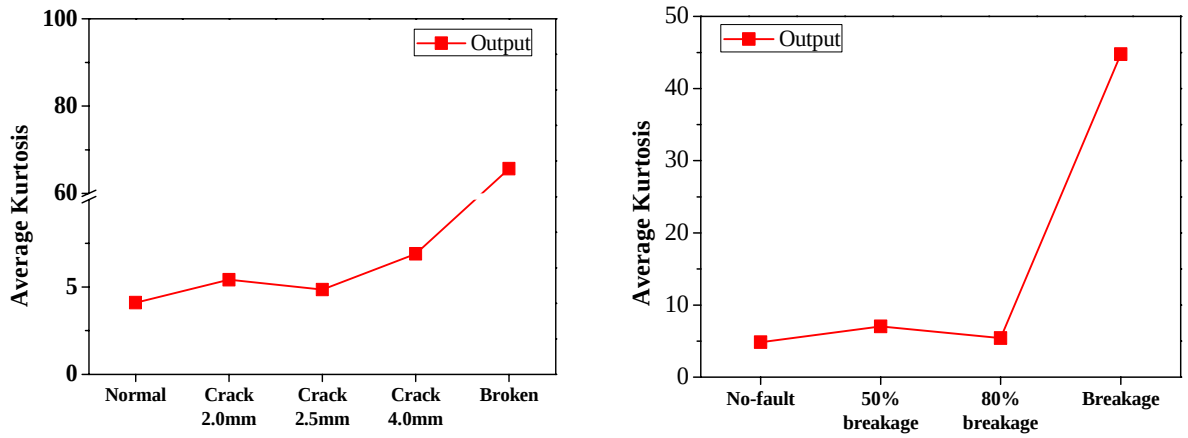



a) 평기어 시편 b) 헬리컬 기어 시편

그림 18. 기어 손상에 따른 진동(RMS)의 변화 (속도 500rpm)

㉯ Kurtosis

베어링 혹은 기어장치에 국부적인 결함이 있으면 충격성 진동이 발생하며, 확률밀도함수를 이용하여 진동 파형이 불규칙한 진동 파형을 통계적으로 취급한 Kurtosis를 통해서 충격성 진동 특성을 검출할 수 있음. 그림 19는 기어 시편 실험결과로서 기어 손상에 따라 변화하는 Kurtosis의 특성을 나타냄




a) 평기어 시편 b) 헬리컬 기어 시편

그림 19. 기어 손상에 따른 첨도(Kurtosis) 변화 (속도 500rpm)

㉰ NA6

NA6는 첨도를 계산하기 위해서 그림 20과 같이 기어 맞물림주파수의 사이드 밴드는 그대로 두고 맞물림주파수 및 하모니 오더만 제거한 residual signal을 사용하는 것으로 손상을 더 잘 감지할 수 있도록 분산의 평균과 6차 모멘트를 적용하여 peak에 더 민감하도록 고안하여 제안한 방법임.

수식으로 표현하면 $NA6 = \frac{N^2 \cdot \sum_{i=1}^{N}(r_i - \bar{r})^6}{\left[\sum_{i=1}^{N}(r_{ij} - \bar{r}_j)^2\right]^3}$ 이며, 여기서, $r_i$은 residual signal의 시간 기록에서의 i 번째 점, $\bar{r}$은 residual signal의 평균, N은 시간신호에서 데이터들의 총 개수임.

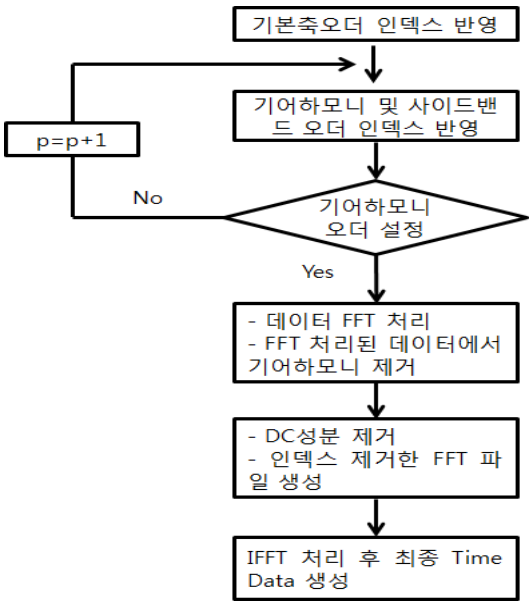



그림 20. Residual signal 알고리즘

그림 21은 고속철도용 감속기 기어 손상에 따른 진동 인디케이터 비교 그래프로서 NA6가 다른 진단 파라미터보다 기어 결함에 따른 경향이 명확하게 나타내고 있으므로 진단 인디케이터로 적합하다는 것을 나타냄

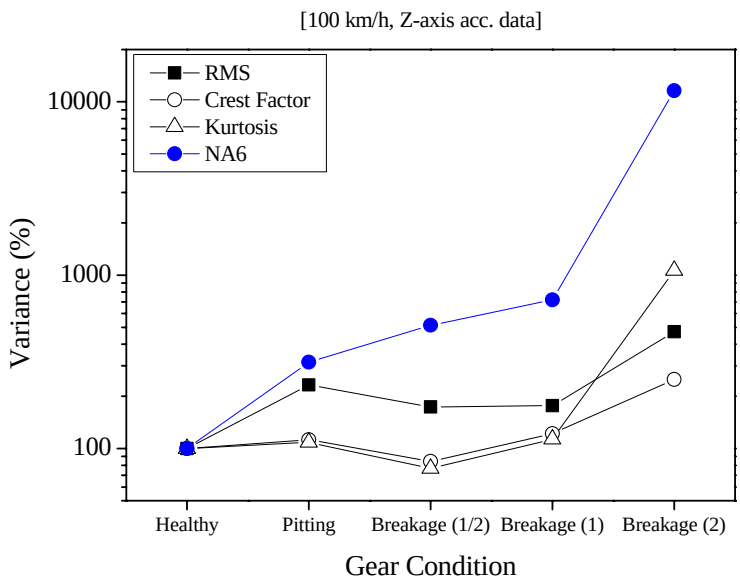



그림 21. 기어 상태변화에 따른 진단 인디케이터의 변화

○ 진단 인디케이터 이상상태 기준 설정

- 고속열차 감속기의 이상상태를 진단하기 위하여 모니터링시스템에는 열차 속도에 무관한 kurtosis와 NA6는 절대기준을 적용하였으며, 실험결과를 바탕으로 수치화(그림 22, 그림 23)하여 진단기준을 설정하였음. 표 9는 kurtosis와 NA6 진단 인디케이터의 이상상태 진단 기준으로 진단 기준은 정상, 주의, 위험으로 나누며 1초 간격으로 각 인디케이터들의 값을 모니터링함. 주의는 1분 동안 주의 값이 90% 이상 발생시 주의 알람을 주며 위험은 1분 동안 90% 이상 위험 기준 값이 지속 시 위험 알람을 주도록 함

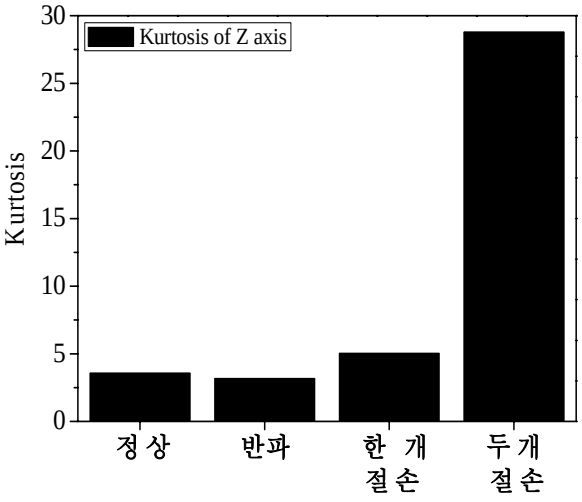



그림 22. 고속철도 감속기(MRU) 실험 결과 (토크1,000Nm 속도 100km/h)

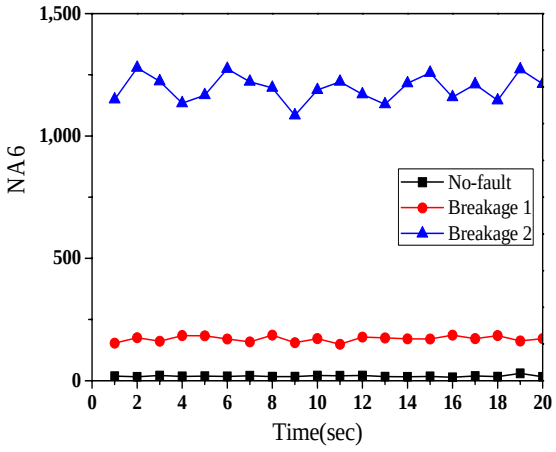



그림 23. 고속열차용 감속기 진동 모니터링 시스템의 NA6 적용 결과 (Breakage 1 – one tooth broken, Breakage 2 – two tooth broken)

표 9. 첨도 및 NA6에 의한 이상상태 진단 기준

| 첨도(kurtosis) 값 | NA6 값 | 상태 |
|---|---|---|
| 4 이하 | 30 이하 | 정상 |
| 10 이상 | 30~1,000 | 주의 |
| 20 이상 | 1,000 이상 | 위험 |

- 고속철도용 감속기는 절대기준만으로 판단하기 어려울 경우 이를 보완하기 위해서 상호기준을 적용하였음. 상호기준은 동일 클라이언트로 연결된 동일 감속기들의 평균 RMS를 기준으로 하며, 실험결과(그림 24)를 바탕으로 수치화하여 표 10과 같은 진단 기준을 적용하여 어떤 감속기에 이상이 발생했는지를 판단함. 상호기준은 절대 기준과 같은 방법으로 정상, 주의, 위험으로 나누며 1초 간격으로 각 인디케이터들의 값을 모니터링하며 주의는 1분 이상 주의 기준 값이 지속시 주의 알람을 주고 위험은 1분 이상 위험 기준 값이 지속 시 위험 알람을 주도록 함

- 진단 파라미터로 EMERSON은 peakvue, SKF는 BPFO, BPFI with enveloping을 사용하지만 본 기술에서는 진단 인디케이터로 RMS, Kurtosis, NA6를 사용하여 기어 및 베어링 손상에 따른 진동의 영향을 더 민감하게 검출 가능함

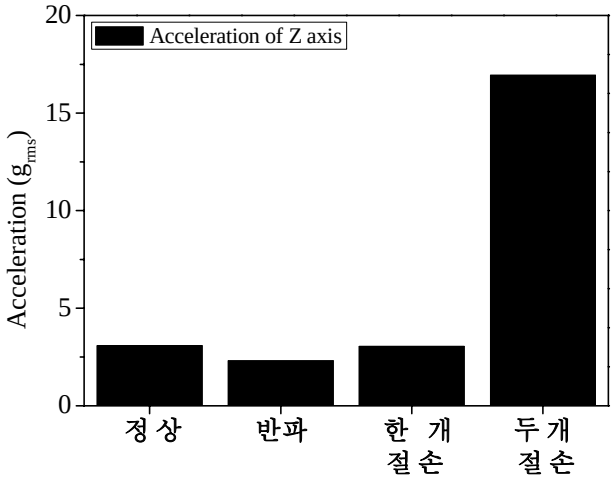



그림 24. 고속철도 감속기(MRU) 실험 결과
(토크1,000Nm 속도 100km/h)

표 10. RMS 이상상태 진단 기준

| RMS 값 | 상태 |
|---|---|
| 2배 미만 | 정상 |
| 2~5배 | 주의 |
| 5배 이상 | 위험 |

**다. 적용제품에 대한 성능 및 기능 향상 내용**

**1) 고속철도용 감속기 진동 모니터링시스템 성능**

○ 본 신청 기술을 적용하여 개발한 모니터링시스템을 철도차량에 적용 할 경우 고장 난 기어와 베어링의 위치를 손쉽게 분해하지 않고도 파악을 할 수 있고, 동시에 고장 결함의 수준을 파악할 수 있음. 이러한 결과를 바탕으로 감속기 정비 시점을 정확하게 예측을 할 수 있는 점, 사전 예측에 의하여 돌발 고장에 대한 방지가 가능하게 되어 고장률을 감소시킬 수 있는 점, 정비 효율을 극대화를 통한 정비 신뢰성과 운행효율을 증가시킬 수 있는 점이 본 기술의 성능과 기능 향상의 핵심사항임

○ 본 신청 기술의 주요 시스템 성능 요약 (그림 25)

- 데이터 샘플링 (Data sampling)

  진동 모니터링시스템은 실시간 진동신호를 취득시 12kHz이상의 샘플링 주파수(6kHz이상의 최대주파수, 0.000083초 이하의 샘플링시간)으로 측정이 가능함.

- 진동 측정 정밀도

  본 신청 기술은 주파수 측면에서 보면 클라이언트에서 12.8 Ks/s의 샘플링 데이터와 FFT 데이터를 최대 400km/h 까지 적용이 가능한 6,400 Hz이내의 고장 기어의 결함 주파수를 감지할 수 있는 기능을 탑재하고 있어 기존 산업용 설비에서는 감지할 수 없는 고속 회전 주파수에서도 높은 측정 정밀도를 가질 수 있는 장점이 있음. 진동 측정 정밀도 시험은 절대치 비교시험은 과 상대치 비교시험으로 구분함 (진동측정 정밀도 절대측정 5%이내, 상대측정 3%이내).

- 실시간 감시 파라미터 표시기능 및 저장기능 (분산처리기법에 의한)

  본 시스템 소프트웨어는 운행 상태에서 각 측정 포인트의 진동감시파라미터(RMS, Kurtosis, BPFI, 1X, Peak, Crest factor 등)를 메뉴에서 확인할 수 있으며 실시간으로 변동 표기(Trending) 및 저장이 가능함. 또한 각 대차당 1개의 클라이언트는 자체적으로 데이터 수집 및 연산을 담당하게 되어 분산 처리 기법을 적용하여 기존에 유사한 형태의 제품보다 많은 위험 요소를 실시간 감시가 가능 할 수 있음. 이 때 감시하는 포인트는 대차 1대당 122개의 진동파라미터, 16개의 온도측정 포인트, 8개의 윤활파라미터를 감시하며, 대차의 횡진동 1ch에 대한 원시데이터를 저장할 수 있음

- 이상상태 신호발생(Alert, Warning) -절대기준과 상호기준의 적용.

  열차 운행 중 각 측정 포인트에서 취득된 신호를 분석 한 후, 이상이 감지되었을 때 설정된 절대기준과 비교하여 주의(Alert) 및 위험(Warning) 알람을 발생하며 또한 각 감속기별로 측정된 RMS 값을 평균값 대비 상호 비교하여 열차의 운전자에게 감속기 상태를 알 수 있게 함.

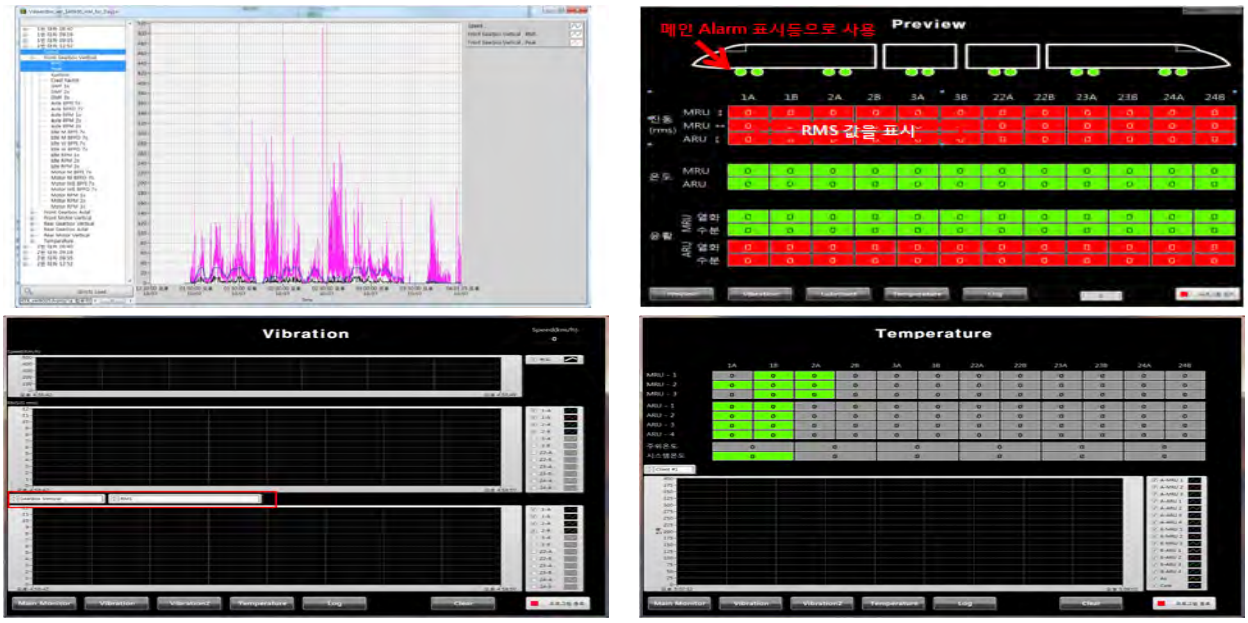



그림 25. 감속기 모니터링시스템 구동 화면

### 2) 감속기 진동 모니터링시스템 데이터 취득 성능 (성능시험결과 위주)

○ 열차가 400km/h로 주행할 경우 나타날 수 있는 최대 기어 맞물림 주파수는 2,200 Hz영역으로 12.8 kS/s의 속도로 샘플링한 진동데이터를 스펙트럼으로 변환하면 6,400Hz 의 주파수 범위까지 확인할 수 있어 2~3배수의 하모닉스 성분까지 측정 가능함. 베어링 주파수 역시 400km/h로 주행할 경우 나타날 수 있는 최대 주파수는 770Hz 영역이고, 8배수의 하모닉스 성분까지 확인할 수 있으며 12.8kS/s로 데이터를 수집 할 경우 차후 데이터 연산량이 늘어나도 CPU 사용량에 여유가 있으므로 연산부하에 대한 문제(과부하에 의한 연산정지, 시스템 다운)가 발생할 확률이 적도록 시스템이 설계됨(그림 26)

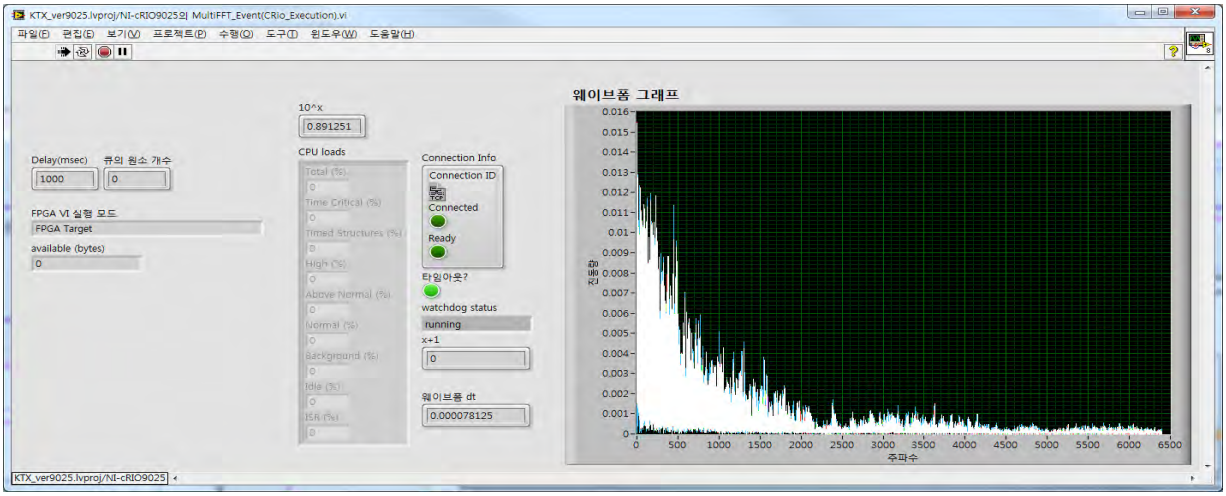



그림 26. 최대 데이터 샘플링 및 주파수분석 성능

○ 본 시스템을 이용하여 진동을 측정하고 RMS 및 Kurtosis 분석한 결과를 기존 상용품과 비교 하였을 때, 개발 제품과 상용제품의 데이터 취득 경향은 매우 유사한 형태로 취득이 되는 것을 확인할 수 있음

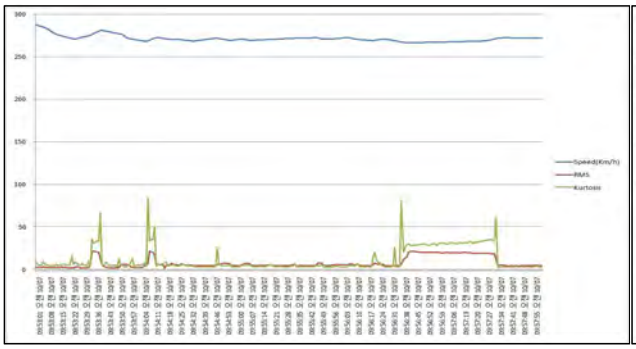


그림 27. 개발 제품 데이터 취득 경향

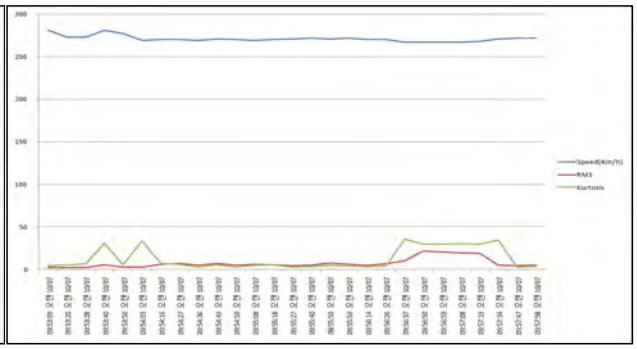


그림 28. 상용품 제품 데이터 취득 경향

○ 상용품인 풍력 발전소 모니터링 시스템과 성능 비교를 하였을 때, 저속 회전 설비에 특화된 풍력 발전용 모니터링 시스템을 철도차량에 적용한 결과 시스템 다운 현상이 발생하였으나, 본 신청 기술 개발 제품은 정상적으로 잘 동작을 하는 것을 확인함.

○ 데이터 수집 성능

- 소프트웨어의 세밀한 검증을 위하여 1초 동안의 진동파형을 이용하여 RMS, Peak, Crest Factor, Kurtosis 값을 추출한 후 데이터 비교 분석 작업을 진행함. 그림 29는 데이터 비교 분석 내용으로 그림에서와 같이 각 진동 파형의 요소들이 유사한 파형을 그리면서 전개되는 것을 확인 할 수 있었음. 이러한 내용을 바탕으로 개발 소프트웨어의 성능은 상용품과 동등하다는 결론을 도출함

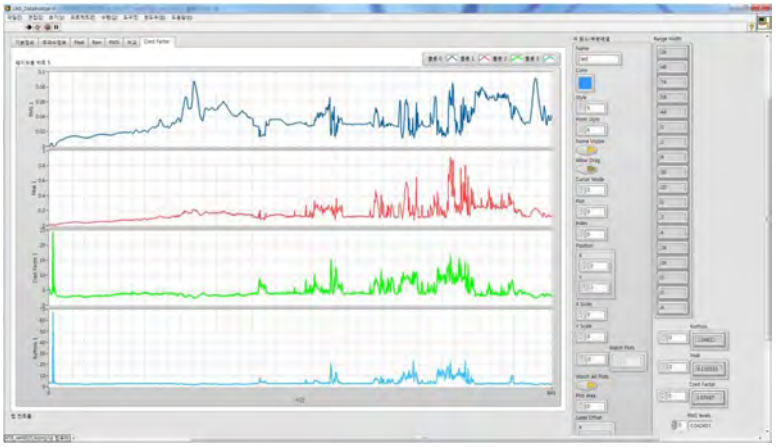


그림 29. 주파수 추적 검증

### 3) 차세대 고속전철 감속기 진동 모니터링 시스템 실차 성능시험 (제3자 인증 내용)

○ 본 시스템을 이용하여 차세대 고속전철(HEMU)의 감속기를 대상으로 제3자 인증 성능 실차시험을 수행하였고 H/W, S/W를 모두 포함하여 시스템의 정상적 성능작동여부를 확인하였음. 성능시험 수행내용 및 결과는 다음과 같음.

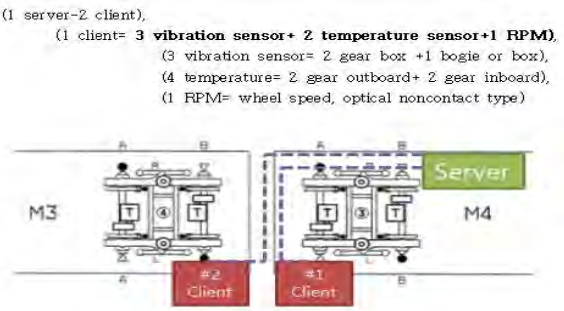


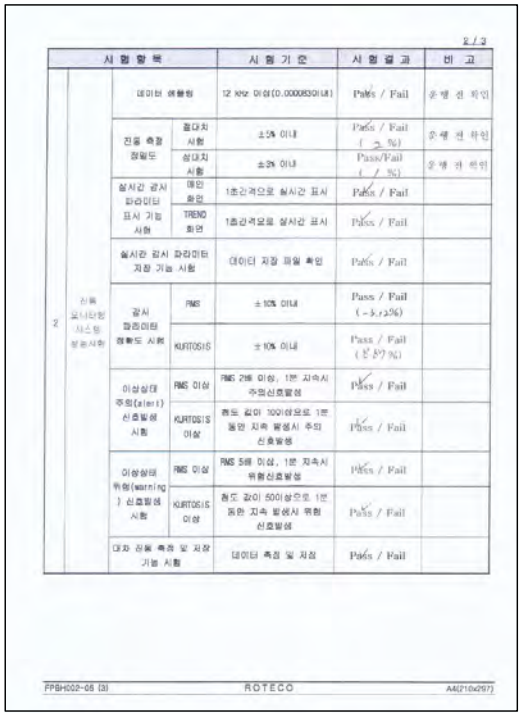

그림 30. 차세대 고속전철 감속기 모니터링시스템 시험 시스템 설치 개요도




그림 31. 실차 성능시험 프로그램 구동화면

○ 시험항목 및 기준, 시험결과

- 모든 세부시험에서 성능시험이 적합판정을 받았으며 다음과 같은 데이터의 저장이 유효함을 확인함.



| 시험항목 | 시험기준 | 시험결과 | 비고 |
|---|---|---|---|
| 데이터 레코딩 | 12 KHz 이상(0.000083이내) | Pass / Fail | 운행 전 확인 |
| 진동 측정 정밀도 시험 | 절대치 시험 | ±5% 이내 | Pass / Fail | 운행 전 확인 |
| | 상대치 시험 | ±2% 이내 | Pass/Fail | 운행 전 확인 |
| 실시간 감시 파라미터 표시 기능 시험 | 메인 화면 | 1초간격으로 실시간 표시 | Pass / Fail | |
| | TREND 화면 | 1초간격으로 실시간 표시 | Pass / Fail | |
| 실시간 감시 파라미터 저장 기능 시험 | | 데이터 저장 파일 확인 | Pass / Fail | |
| 감시 파라미터 경보도 시험 | RMS | ±10% 이내 | Pass / Fail | |
| | KURTOSIS | ±10% 이내 | Pass / Fail | |
| 이상상태 주의(alert) 신호발생 시험 | RMS 이상 | RMS 2배 이상, 1분 지속시 주의신호발생 | Pass / Fail | |
| | KURTOSIS 이상 | 최소 값이 100이상으로 1분 동안 지속 발생시 주의 신호발생 | Pass / Fail | |
| 이상상태 위험(warning) 신호발생 시험 | RMS 이상 | RMS 5배 이상, 1분 지속시 위험신호발생 | Pass / Fail | |
| | KURTOSIS 이상 | 최소 값이 500이상으로 1분 동안 지속 발생시 위험 신호발생 | Pass / Fail | |
| 대차 진동 측정 및 저장 기능 시험 | | 데이터 측정 및 저장 | Pass / Fail | |

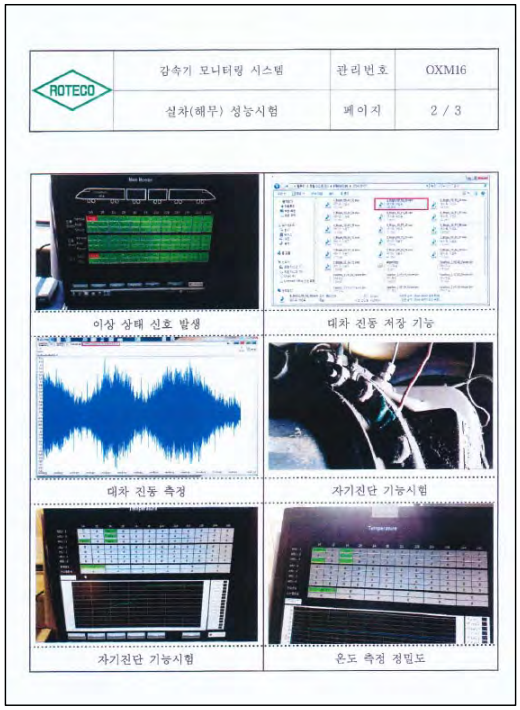



그림 32. 차세대 고속전철 감속기 진동 모니터링 시스템 실차 성능시험 결과 및 기록>

### 4) KTX 고속전철 감속기 진동 모니터링 시스템 실차 성능시험

○ 시험항목 및 시험기준

| 시 험 항 목 | | | 시 험 기 준 |
|---|---|---|---|
| 진동 모니터링 시스템 성능시험 | 데이터 샘플링 | | 12 kHz 이상(0.000083이내) |
| | 진동 측정 정밀도 | 절대치 시험 | ±5% 이내 |
| | | 상대치 시험 | ±3% 이내 |
| | 실시간 감시 파라미터 표시 기능 시험 | 메인 화면 | 1초간격으로 실시간 표시 |
| | | TREND 화면 | 1초간격으로 실시간 표시 |
| | 실시간 감시 파라미터 저장 기능 시험 | | 데이터 저장 파일 확인 |
| | 감시 파라미터 정확도 시험 | RMS | ±10% 이내 |
| | | KURTOSIS | ±10% 이내 |
| | 이상상태 주의(alert) 신호발생 시험 | RMS 이상 | RMS 2배 이상, 1분 지속시 주의신호발생 |
| | | KURTOSIS 이상 | 첨도 값이 10이상으로 1분 동안 지속 발생시 주의 신호발생 |
| | 이상상태 위험(warning) 신호발생 시험 | RMS 이상 | RMS 5배 이상, 1분 지속시 위험신호발생 |
| | | KURTOSIS 이상 | 첨도 값이 20이상으로 1분 동안 지속 발생시 위험 신호발생 |
| | 대차 진동 측정 및 저장 기능 시험 | | 데이터 측정 및 저장 |

○ 시험결과

- 본 시스템은 KTX 고속전철을 대상으로 자체 성능 실차시험을 수행하였고 H/W, S/W를 포두 포함하여 시스템의 정상작동여부를 확인하였음. 아래 그림(그림 33, 그림 34)과 같이 실차 시험을 통하여 각종 특성화 파라미터 및 진단 인디케이터, 대차 진동 데이터 등이 실시간 감시 및 저장이 되는 것을 확인 하였고, 열차 외부에 클라이언트를 장착 하였음에도 데이터 수집이 이상 없이 수행되는 것을 확인 할 수 있었음

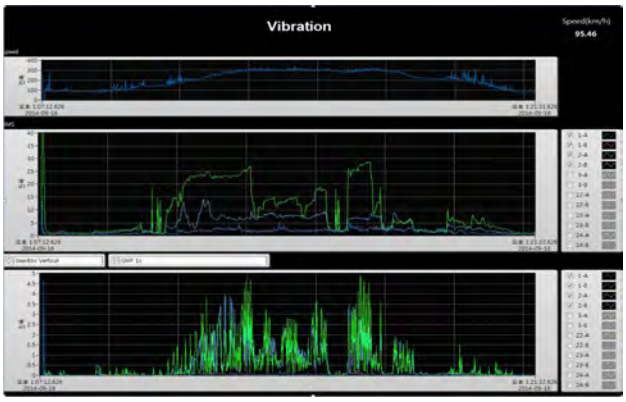



그림 33. 시험 중 진동 Trend 데이터 취득 화면

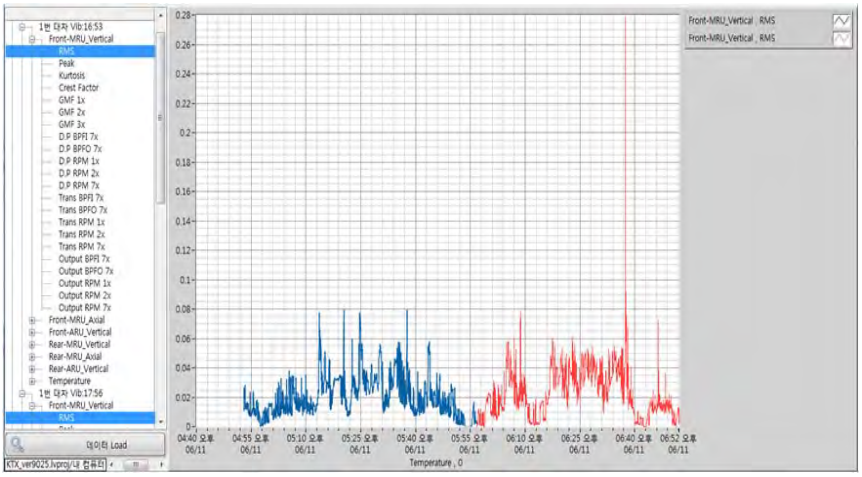


그림 34. 특성화 파라미터 계측 결과 예(MRU, Vertical 방향 진동 RMS 데이터)

5) 감속기 진동 모니터링시스템 신뢰성 성능시험 (공인인증시험)

감속기 진동 모니터링시스템의 신뢰성 성능시험으로 진동 및 충격시험, 전자파시험, 환경시험, 제3자 실차성능시험을 수행하였으며 성능이 표준 및 정의와 적합함을 판정받았음.

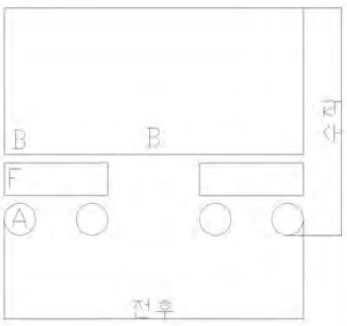
○ 진동 및 충격시험

KS C IEC 61373 철도차량 진동 및 충격 시험을 기준(그림 35)으로 모의 장기 수명 시험, 충격 시험, 기능 랜덤 시험 3가지 항목으로 구분을 하여 시험을 진행을 하였음. 시험 결과의 판단 기준은 시료를 시스템 사용 시 지그에 고정을 하고 클라이언트는 KS C IEC 61373 2종 대차, 서버는 1종 차체 내부 조건으로 시험전문기관인 한국건설생활환경시험연구원 인증센터에서 시험을 진행(그림 36)하였고, 적합함을 판정받았음

| 시험단계 및 항목 | 규 격 |
|---|---|
| 기능랜덤진동시험 | KS C IEC 61373 1종 B |
| 장기수명시험 | KS C IEC 61373 1종 B |
| 충격시험 | KS C IEC 61373 1종 B |

| 진동 측정 기준 | 차체 | 대차 | 차축 |
|---|---|---|---|
| 진동 : 5~500Hz 일 때 g-peak to peak | 0.4 | 4.0 | 10.0 |

| 충격 : shock-peak g | 차체 | 대차 | 차축 |
|---|---|---|---|
| 수직 | 2 | 20 | 50 |
| 좌우 | 2 | 10 | 20 |
| 전후 | 3 | 5 | 10 |




〈측정기준점〉

그림 35. 철도차량 진동 및 충격시험 관련 규격 기준

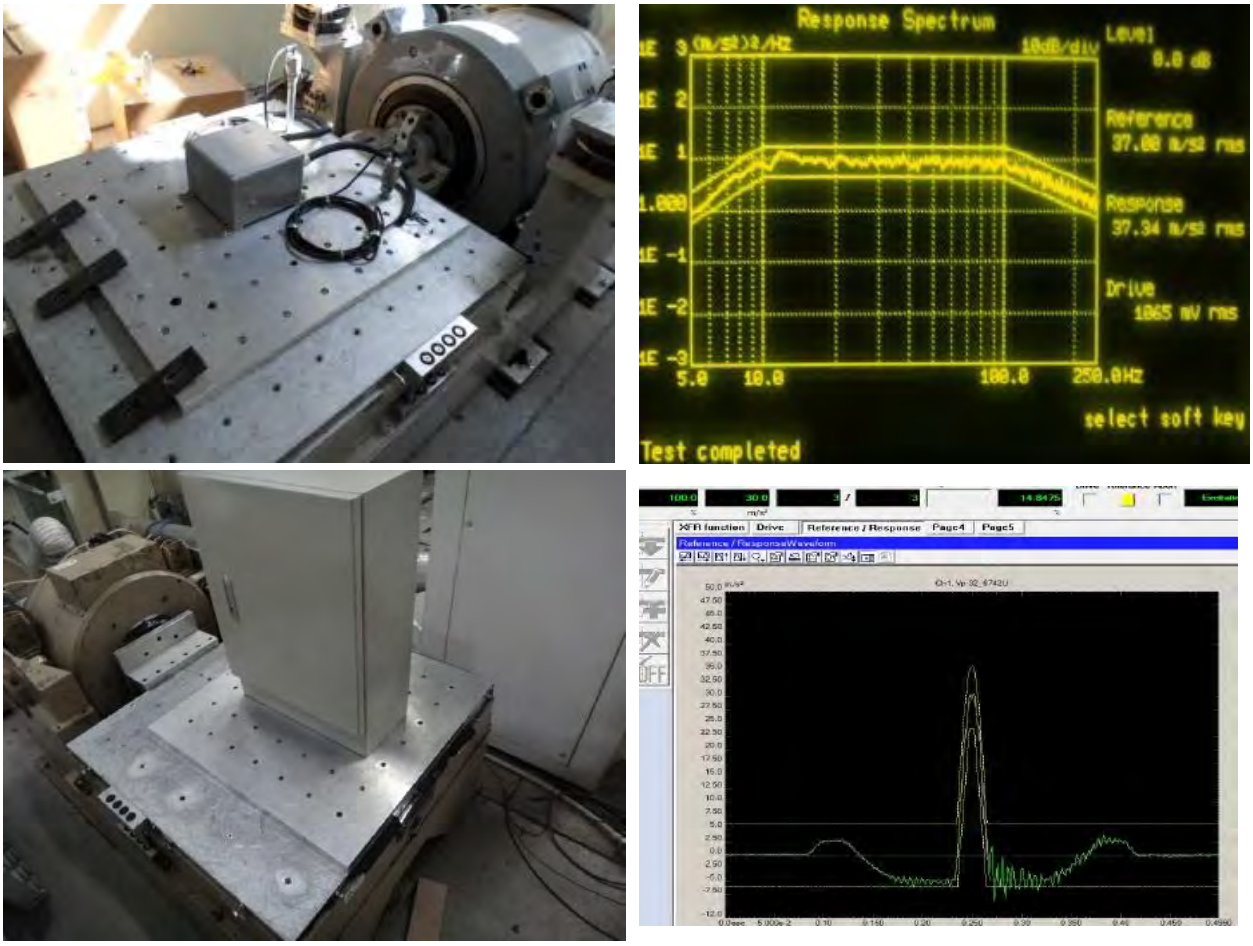



그림 36. 시제품 진동 및 충격시험 모습

○ 환경부하시험

환경부하시험으로 시험 항목은 내한, 내열, 온도-사이클 시험 3가지를 한국전자부품연구원 인증센터에서 진행을 하였음. 선정한 시험의 시험조건 및 결과는 다음과 같음.

| 시험항목 | 저온시험, 고온시험, 온습도 싸이클시험 | | | |
|---|---|---|---|---|
| 시험방법 | KS C 규격사용 | | | |
| 시험결과 | 시험 전 · 후 육안 관철시 외관상 특이사항 없음 | | | |
| 시험기간 | 2014.10.08. ~ 2014. 10 .14 | | | |
| 시험소환경 | 온도 | (25±10)℃ | 습도 | 75% R.H. 이하 |

○ 전자파시험

전자파 방사에 관련된 공인 시험을 전자파 공인 인증 시험 기관인 KRL에서 진행을 하였음. 시험 조건 및 결과는 다음과 같음.

<모니터링시스템(클라이언트)의 전자파 시험내용 및 결과>

| 내용 | 적용규격 | | 적용 여부 | 시험결과 |
|---|---|---|---|---|
| 전도성 방해시험 | KN 50:2010 | | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 프로세스 측정 및 제어포트의 전도성 방해 전압 허용기준 | KN 50:2010 | | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 방사성 방해 시험 | KN 50:2010 | | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 정전기방전 내성시험 | KN 51 : 2008 | KN 61000-4-2:2013 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 방사성 RF 전자기장 내성시험 | | KN 61000-4-3:2011 | - | 해당사항없음 |
| EFT/버스트 내성시험 | | KN 61000-4-4:2011 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 서지 내성시험 | | KN 61000-4-5:2008 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 전도성 RF 전자기장 내성시험 | | KN 61000-4-6:2013 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 전원 주파수 자계 시험 | | KN 61000-4-8:2013 | - | 해당사항없음 |

<모니터링시스템(서버)의 전자파 시험내용 및 결과>

| 내용 | 적용규격 | | 적용 여부 | 시험결과 |
|---|---|---|---|---|
| 전도성 방해시험 | KN 50:2010 | | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 프로세스 측정 및 제어포트의 전도성 방해 전압 허용기준 | KN 50:2010 | | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 방사성 방해 시험 | KN 50:2010 | | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 정전기방전 내성시험 | KN 51 : 2008 | KN 61000-4-2:2013 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 방사성 RF 전자기장 내성시험 | | KN 61000-4-3:2011 | - | 해당사항없음 |
| EFT/버스트 내성시험 | | KN 61000-4-4:2011 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 서지 내성시험 | | KN 61000-4-5:2008 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 전도성 RF 전자기장 내성시험 | | KN 61000-4-6:2013 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 전원 주파수 자계 시험 | | KN 61000-4-8:2013 | - | 해당사항없음 |

○ 차세대고속전철(HEMU) 실차시험 (제3자 인증성능시험)

- 고속철도 시스템의 실차성능시험으로써 모니터링시스템을 차세대고속전철(HEMU)에 설치하고 제3자 인증을 수행하는 방식으로 진행하였으며, 제3자 인증기관으로 한국철도차량엔지니어링에서 검사진행을 하였음
- 시험결과로 설치검사, 성능 및 작동검사 결과 항목에 양호함을 판정받았음

**라. 관련산업 파급효과**

1) 주요 활용계획

○ 고속철도, 일반철도, 도시철도 차량의 감속기 모니터링 및 상태기반유지보수(CBM)에 활용

○ 차축 베어링의 온도 모니터링 및 진단, 차축 및 대차, 차체의 진동 모니터링 진단 기술에 활용

○ 일반 산업체의 감속기 모니터링 시스템 개발에 응용

2) 주요 기대효과

○ 감속기의 모니터링 기술의 확보로 감속기의 효율적 관리를 위한 유지보수 기술 향상 (유지보수 주기, 방법 등의 기술향상)

○ 감속기 고장으로 인한 운행정지 사고로 인한 경제적 손실비용(330억/년, 1건 기준) 저감

○ 진단시스템 구축으로 인한 KTX 차량 가용성 증가로 확보해야 할 예비편성 수량 감소로 편성 당 약 400억의 비용절감

3) 관련산업 파급효과

○ 철도차량의 감속기의 결함을 조기에 찾아서 고장 발생 원인을 규명하여 올바른 대처가 가능해지게 되어 새로운 설비 진단 기술에 대한 관련 기업의 니즈와 연계될 것으로 판단되어 향후 관련 분야의 기술개발이 더욱 촉진될 것으로 판단됨

- 본 신청 기술은 기계적 장치에 센서를 설치하여 발생되는 이상신호를 탐지하고 수집된 신호를 분석하여 장치의 정상 작동 여부를 판단하면서 간단하게 철도차량 관리자에게 정보를 제공할 수 있음. 또한 철도 산업 설비 현장에 바로 적용이 가능하며 설비 관리 비용을 최소화 할 수 있어 철도차량 관리 회사와 국가에 막대한 이익을 가져올 수 있음
- 가전제품, 자동차, 건설 현장 등 현재 거의 모든 산업 분야에서 진동에 대한 문제점이 발생하고 있고 이를 개선하기 위한 활동이 끊임없이 수행되고 있음. 이러한 이유로 인하여 이번 개발 제품은 산업 설비 현장에만 한정하여 생각할 수 없으며 건축, 토목건설 현장 뿐 아니라 세탁기 같은 가전제품, 설비를 제작하는 제조업에서도 적용이 가능할 것으로 판단됨

○ 진동에 의한 감속기의 모니터링기술은 꾸준히 연구되고 있고 본 기술로 제작된 T-GMS(고속열차용 감속기 모니터링시스템)은 감속기의 수명과 생산활동에 밀접한 관련이 있는 산업 분야(시멘트 산업, 타이어산업, 발전산업, 철강산업 등)에도 연관 시키면 그 파급력이 확산 될 것으로 판단됨.

이 부분에서 특히 강점으로 택할 부분은 철도차량의 감속기의 특성은 '가변속이며 다양하고 복잡한 충격파형'이 빈번하므로 오히려 다른 산업분야에 적용하기에 쉽다는 것임.



<산업분야 감속기>

○ 본 개발 제품을 철도 산업현장에 적용하여 감속기 설비의 가동정지를 사전에 예방을 할 수 있도록 조치하면 결국 철도차량 운행 저하의 문제를 예방하는데 도움이 될 수 있고 결국 각 회사와 국가의 예산 낭비를 예방할 수 있어 결과적으로 막대한 이익을 창출할 수 있을 것이라 판단됨

○ 감속기의 이상 상태 감시는 주기적인 검사에 비하여 많은 장점을 가지고 있으며 이상 상태감시 시스템은 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상의 감시에 효과적이며, 주기적 검사 비용 및 철도 운행 중단에 따른 경제적인 손실을 최소화 할 수 있음. 국내에서 특히 발전소의 일반기계 및 대형 설비에는 모니터링 및 진단 기술은 활발하게 연구가 되어 실용화 단계에 있지만 철도차량의 감속기 모니터링 기술은 연구 및 실용화가 미흡한 실정이며 해외에서는 기계의 설비진단 기술의 발달로 자동검사기술과 정밀측정, 품질관리 등을 통하여 철도차량의 부품을 최적의 상태로 관리하고 있는 실정을 신속히 반영할 필요가 있으므로 본 개발 기술로 인하여 한국철도 차량의 감시 기술력 상승이 가능할 것으로 판단됨. 기타 본 시스템의 철도차량에 대한 직접적인 활용도를 간단히 요약하면 다음과 같음

- 고속철도차량 실시간 감속기 진동감시 시스템(KTX Realtime Gearbox Vibration monitoring system)
- 고속철도차량 감속기 상태 모니터링 시스템(KTX Gearbox condition monitoring system)
- 철도차량 동력부 종합 상태 모니터링 시스템(Train Engine condition monitoring system)
- 철도차량 차량하부 종합 측정 시스템(Train Bogie Measurement Terminal system)

<개발 기술의 응용분야 및 파급효과>

| 구 분 | | 내 용 |
|---|---|---|
| 응용분야 | 제조산업<br>(시멘트, 타이어, 철강 및 제지) | • 전동기 및 감속기를 사용하는 제조공장의 설비 진단 및 모니터링시스템 |
| | 전력산업 | • 발전기 및 감속기를 사용하는 전력설비의 설비 진단 및 모니터링시스템 |
| 파급효과 | 기술적측면 | • 진단 장비의 소형화를 통해 설치의 용이성 제공<br>• 철도차량 설비 결함의 진단-분석-경고를 통합하여 기술적 경쟁력 확보 |
| | 경제·산업적 측면 | • 철도 산업설비의 결함을 조기에 발견함으로써 설비관리비용의 절감과 가동률의 향상에 따른 생산비용 절감.<br>• 고가의 수입 설비진단 장비의 대체를 통한 수입대체 및 수출 증대. |

210mm×297mm[백상지 80g/㎡(재활용품)]

2. 기술개발자원 투입 및 개발방법

| 연구개발비(참여인력 인건비 포함) | 연구개발 기간 |
|---|---|
| 2,158 백만원 | 2011 년 12 월 ~ 2014년 12 월 |

기술개발 방법(복수응답 가능)

[ ]자체(단독)개발 [O]공동개발 [ ]위탁개발 [ ]기술도입 [ ]기술지도

*자체개발 외의 방법이 포함된 경우 대상기관(업체)명 및 소요비용 기재

대상기관(업체)명 케이티엠엔지니어링(주) 소요비용 555 백만원(연구개발비에 포함금액)

총개발 참여자 14명

핵심개발 참여자 7명

| 소속기관(업체)명 | 직위 | 성명 | 참여분야 | 비 고 |
|---|---|---|---|---|
| 한국철도기술연구원 | 책임 | 이동형 | * 감속기 진동 모니터링 시스템 개발 총괄 | |
| 한국철도기술연구원 | 책임 | 문경호 | * 감속기 진단 파라미터 알고리즘 개발 및 이상 진단 기준 연구 | |
| 한국철도기술연구원 | 연구원 | 이웅용 | * 감속기 진단 파라미터 알고리즘 개발 및 이상 진단 기준 연구 | |
| 케이티엠엔지니어링 | 부장 | 박병수 | * 감속기 진단 시스템 설계 및 해석 | |
| 케이티엠엔지니어링 | 대리 | 정성환 | * 감속기 진단 시스템 제작 및 인터페이스 | |
| 케이티엠엔지니어링 | 대리 | 한종원 | * 감속기 진단 시스템 설계 및 해석 | |
| 케이티엠엔지니어링 | 대리 | 윤영태 | * 감속기 진단 시스템 설계 및 해석 | |

공동개발 또는 위탁개발의 경우 기관·방법별 담당부문 및 개발내용(해당하는 경우에만 적으며, 증빙자료를 첨부합니다)

| 기관 | 담당부문 및 개발내용 |
|---|---|
| 한국철도기술연구원 | - 시스템 엔지니어링, 개발 요구사항 작성<br>- 직접 감속기 모니터링 시스템 시험설비 구축 및 운영<br>- 진단 인디케이터 개발 및 이상상태 기준 설정<br>- 감속기 모니터링 시스템 시험<br>- 감속기 모니터링 시스템 성능검증 |
| 케이티엠엔지니어링 (주) | - 감속기 모니터링 시스템 설계 및 해석<br>- 감속기 모니터링 시스템 제어알고리즘 및 제어기 설계 제작<br>- 감속기 모니터링 시스템 단품 동작시험<br>- 감속기 모니터링 시스템 조합 |

개발과정상 기술도입, 용역도입이 있는 경우 그 내용과 본 기술과의 관계(해당하는 경우에만 적으며, 증빙자료를 첨부합니다)

<해당없음>

3. 신청기술에 대한 산업재산권 및 인증실적 현황

가. 신청기술에 직접 해당되는 산업재산권 출원・등록 현황(해당 증빙자료가 있는 경우 반드시 첨부)

| 구분 | 출원번호<br>(등록번호) | 출원일자<br>(등록일자) | 출원명칭<br>(등록명칭) | 권리권자 |
|---|---|---|---|---|
| 산업재산권 | 2012-0157298<br>(10-1381226) | 2012.12.28<br>(2014.3.28) | 전동열차의 진동측정 시스템 | 한국철도기술연구원<br>케이티엠엔지니어링 |
| 산업재산권 | 2013-0011654 | 2013.2.1 | 전동열차의 진동 측정 장치 | 한국철도기술연구원<br>케이티엠엔지니어링 |
| 산업재산권 | 2014-0074559 | 2014.6.18 | 고속전동열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템 | 한국철도기술연구원<br>케이티엠엔지니어링 |
| 소프트웨어등록 | C2014-024616 | 2014.10.1 | T-GMS(소프트웨어) | 케이티엠엔지니어링 |
| 소프트웨어등록 | C-2014-23713 | 2014.9.1 | 감속기 이상상태 진단 표시기(NA6) 계산 프로그램 | 한국철도기술연구원 |
| 소프트웨어등록 | C-2014-23714 | 2014.9.1 | TSA처리 전과 후의 첨도(kurtosis) 계산 프로그램 | 한국철도기술연구원 |

나. 신청기술에 직접 해당되는 공인기관의 시험실적・인증실적 현황(해당 증빙자료가 있는 경우 반드시 첨부)

| 시험일자<br>(인증일자) | 시험기관<br>(인증기관) | 시험내용<br>(인증내용) | 시험결과<br>(인증결과) |
|---|---|---|---|
| 2014.8.12<br>(2014.8.19) | 한국건설생활환경시험연구원 | KS C IEC 61373 1종 | PASS |
| 2014.7.7<br>(2014.7.11) | 한국건설생활환경시험연구원 | KS C IEC 61373 2종 | PASS |
| 2014.9.2~9.5<br>(2014.9.24) | K.R.L | KN50, KN51(클라이언트) | PASS |
| 2014.9.2~9.5<br>(2014.9.24) | K.R.L | KN50, KN51(서버랙) | PASS |
| 2014.10.06~10.07 | 한국철도차량엔지니어링 | T-GMS 성능 신뢰성 시험 | PASS |
| 2014.10.8~10.14 | 한국전자부품연구원 | 저온시험, 고온시험,<br>온습도싸이클시험 | PASS |

다. 타인의 산업재산권과의 관계(자체개발 이외 또는 산업재산권 분쟁중인 경우에만 적습니다)

<해당없음>

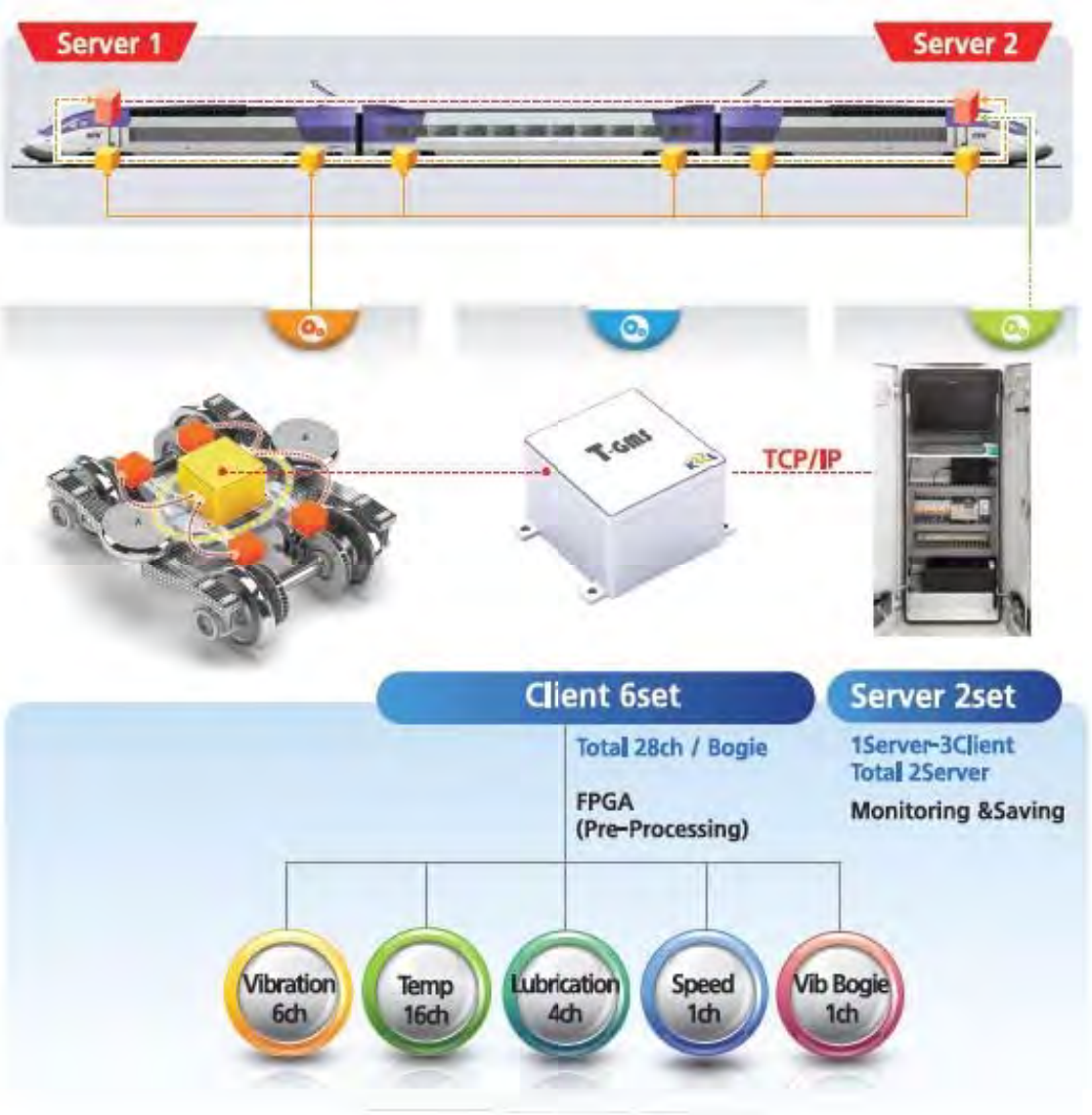
4. 국내외 유사・경쟁 기술과의 특징 비교(해당 증빙자료가 있는 경우 첨부)

| 비교항목 | 감속기 진동 모니터링 시스템<br>신청기술 (T-GMS) | 풍력발전용 모니터링 시스템<br>(국내 S사) | 발전소 설비 모니터링 시스템<br>(Emerson) |
|---|---|---|---|
| 주요용도 | 철도차량 전용, 변속기어박스 전용 | 풍력발전기(산업용 변형) | 산업용 터빈, 발전기, 기어, 블로워 |
| 데이터 수집 및 전송 | - Real time 데이터 전송 | - Real time 데이터 전송 | - Real time 데이터 전송 |

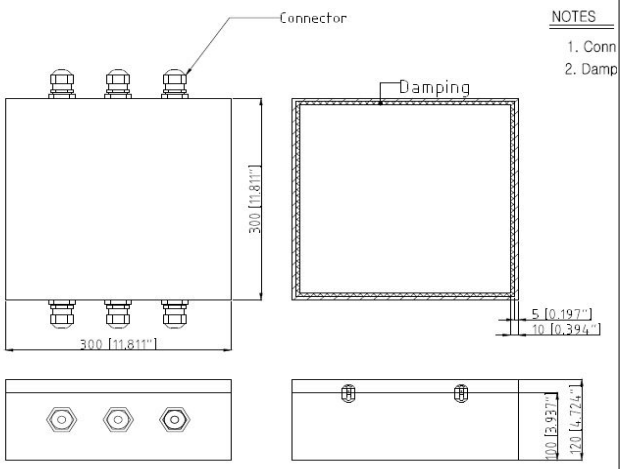
| | | | |
|---|---|---|---|
| | - 이더넷을 이용한 서버-클라이언트 구조 | - FTP 통신 이용 측정 데이터 자동 전송 | - Hub and Nic 이더넷 통한 서버 전송 |
| 측정가능 주파수 | - 12.8 ks/s 샘플링 데이터 FFT 데이터, RMS 데이터 전송(최대 400km/h)적용가능 | - Vibration RMS 산출 (0.1-100Hz, 10-1kHz) | - 2ch 모니터 0-40 kHz |
| 기술개발완료시기 | 2014 년 12월 | 2012 년 6 월 | 2009 년 5 월 |
| 판매개시 예정일 | 2015 년 12월 | 2013 년 7 월 | 2010년 2 월 |

**5. 개발기술 적용제품의 개요**

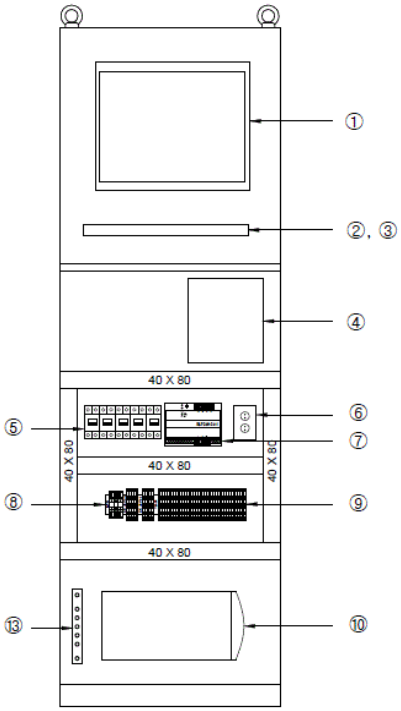
가. 제품의 사진 또는 개략도, 구성도



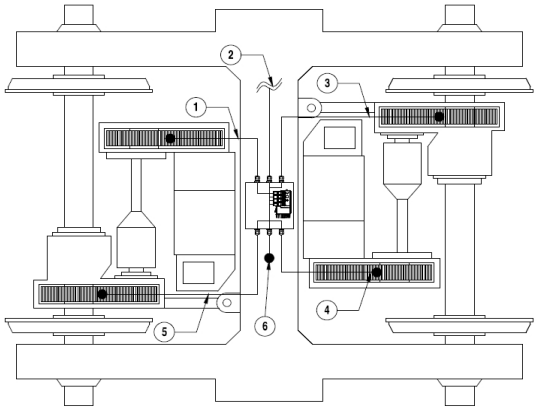

<고속열차 감속기 모니터링시스템 개략도>




Client 설계 내용




Server rack & System layout




Sensor & Client layout



Server



Client



<NI Compaq Rio
-Client core >

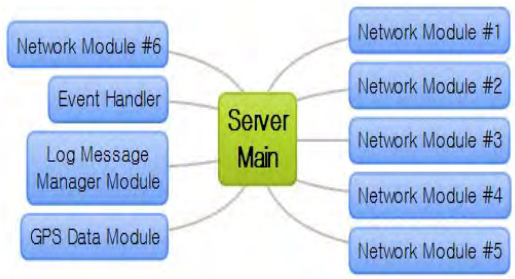


Sensor

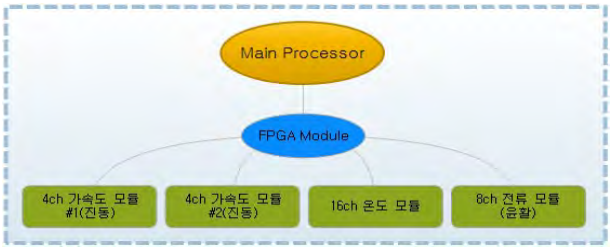
<시스템 하드웨어 구성>




(a) 최종 소프트웨어 시스템 구성도




(b) 서버프로그램의 내부 모듈 구성도




(c) Client 물리적 구성도(H/W)




(d) Client S/W 내부 모듈 구성도




(e) 실차 측정 중 S/W Main화면



(f) 실차 측정 중 S/W 진동 Trending 화면

<시스템 소프트웨어 구성>

나. 제품의 용도

본 개발 제품(T-GMS)은 다음과 같은 4가지 시스템으로서 독립적 혹은 병행으로 활용 가능함

1) 고속철도차량 실시간 감속기 진동감시 시스템(KTX Realtime Gearbox Vibration monitoring system)

-본 제품은 고속철도차량(KTX, KTX산천, HEMU) 감속기의 각 위치별, 방향별 진동상태를 실시간(Data streaming)으로 모니터링 하여 감속기의 안전성을 확인 할 수 있는 시스템. 또한 본 제품은 열차시스템에 적합한 진동 파라미터를 적용하고 저장하며 시험을 통해 입증된 절대기준 및 상호기준의 적용으로 감속기의 건전성 및 이상상태를 즉각 확인 할 수 있는 기능을 가지고 있음

2) 고속철도차량 감속기 상태 모니터링 시스템(KTX Gearbox condition monitoring system)

-본 제품은 고속철도차량(KTX, KTX산천, HEMU) 감속기의 각 위치별, 방향별 진동상태를 열차시스템에 적합한 진동 파라미터로 저장하며 다양한 예지보전용 데이터를 장기간 저장, 출력할 수 있는 기능을 가지고 있음. 또한 모든 기능은 열차의 종류에 관계없이 S/W상으로 간단히 변형하여 적용할 수 있는 시스템임

3) 철도차량 동력부 종합 상태 모니터링 시스템(Train Engine condition monitoring system)

-본 제품은 철도차량(모든 열차)의 동력부(감속기, 차륜, 차축베어링, 모터 등)의 각 위치별 각종 진단 기술(진동, 윤활, 온도, 소음, 응력, 전류 등)을 추가로 연결함으로써 현재의 상태를 실시간으로 모니터링이 가능하며, 또한 열차시스템에 적합한 각종 파라미터를 저장하며 다양한 예지보전용 데이터를 저장, 출력할 수 있는 기능을 가지고 있는 시스템.

4) 철도차량 차량하부 종합 측정 시스템(Train Bogie Measurement Terminal system)

-본 제품은 철도차량 하부의 동력부, 고정부, 현가부 등의 각 위치별 각종 진단에 필요한 신호(진동, 윤활, 온도, 소음, 응력, 전류 등)를 클라이언트 터미널 박스에 연결함으로써 주행 중에 열차하부의 상태를 실시간 측정, 연산과 저장이 가능한 시스템으로 열차하부 종합 데이터 측정 및 축적을 위한 시스템.

다. 제품의 성능

1) 진동 데이터 샘플링 12kHz 이상(0.000083이내), RMS데이터 전송 (속도 최대 400km/h 적용가능)

2) 진동측정 정밀도 절대측정 5%이내, 상대측정 3%이내.

3) 10분 주기 데이터 파일 저장 기능 탑재 및 실시간(1초) 데이터 전송 및 Trend 확인

4) Alert와 Warning신호의 정확도 및 감시성능.

| | | |
|---|---|---|
| 감시 파라미터 정확도 | RMS | ±10% 이내 |
| | KURTOSIS | ±10% 이내 |
| 이상상태 주의(alert) 신호발생 | RMS 이상 | RMS 2배 이상, 1분 지속시 주의신호발생 |
| | KURTOSIS 이상 | 첨도 값이 10이상으로 1분 동안 지속 발생시 주의 신호발생 |
| 이상상태 위험(warning) 신호발생 | RMS 이상 | RMS 5배 이상, 1분 지속시 위험신호발생 |
| | KURTOSIS 이상 | 첨도 값이 20이상으로 1분 동안 지속 발생시 위험 신호발생 |

5) 대차(Bogie)신호 Raw data저장(Data streaming)

6) 포인트별 44개(수직22개+축방향22개) 진동 특성화 파라미터 및 진단 인디케이터

| 진단 인디케이터 및 시간데이터 | GMF | Diving Pinion | Transmission | Output |
|---|---|---|---|---|
| RMS, Peak, Kurtosis, NA6 | 1X, 2X, 3X | BPFI 7X, BPFO 7X<br>RPM 1X, 2X, 7X | BPFI 7X, BPFO 7X<br>RPM 1X, 2X, 7X | BPFI 7X, BPFO 7X<br>RPM 1X, 2X, 7X |

7) 가속도센서 Sensitivity 10mV(최대500g 감속기용), 100mV(최대50g 대차용)

라. 예상 시장규모 (철도시장없음, 유사용도 발전 및 풍력모니터링시스템 적용)

| 구 분 | 2014 | 2015 | 2016 |
|---|---|---|---|
| 국내(억원) | 350 | 385 | 400 |
| 해외(백만$) | 1,043 | 1,113 | 1,188 |

* 소재, 부품 등 파악이 곤란한 경우에는 적용제품과 용도가 같은 품목의 시장규모를 감안하여 산출

# 제4장 연구목표 달성 및 효과

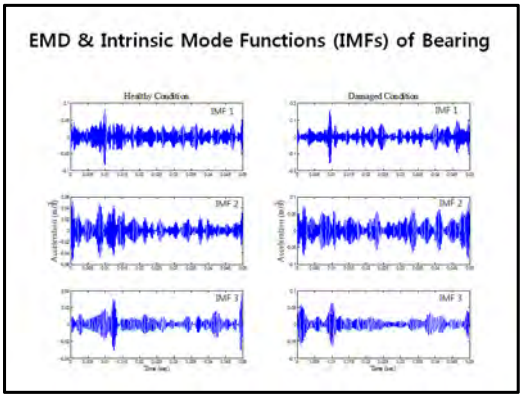
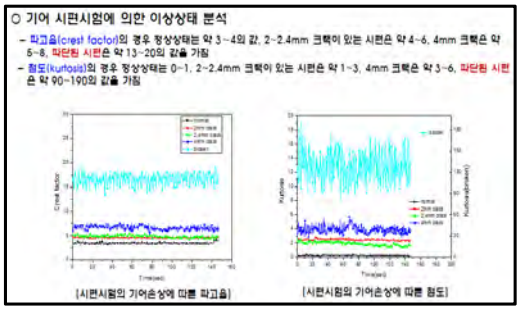
# 제1절 연구개발 최종목표 달성도

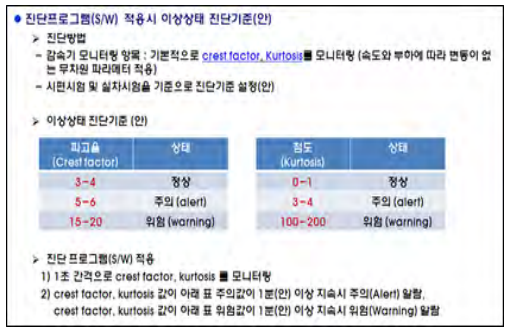
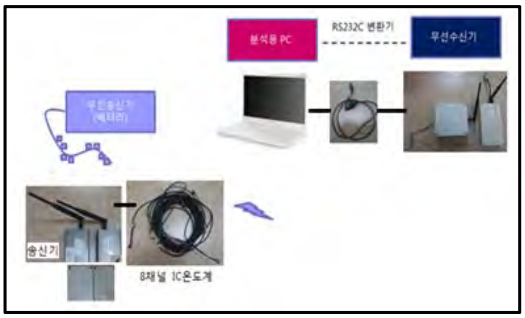
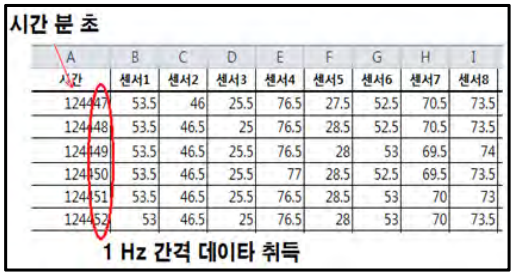
## 1. 연구개발 최종목표

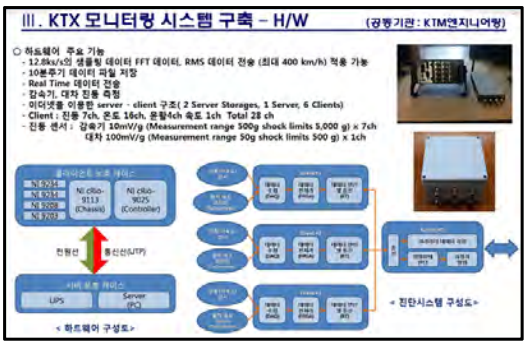
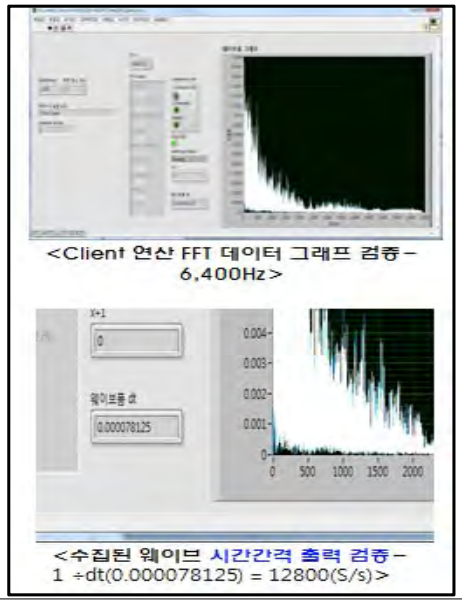
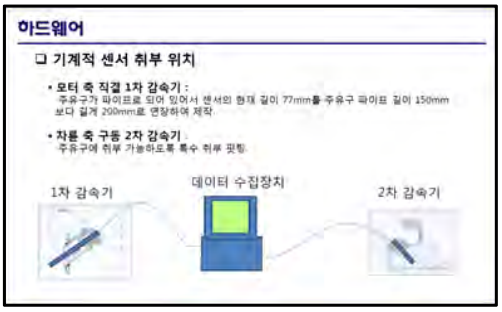
○ 감속기에서 발생하는 신호(온도, 진동, 윤활유 상태)를 상시 모니터링하고 실시간 분석, 진단하여 이상발생시 기관사에게 즉시 통보되는 감속기 이상 상태 모니터링시스템 기술개발

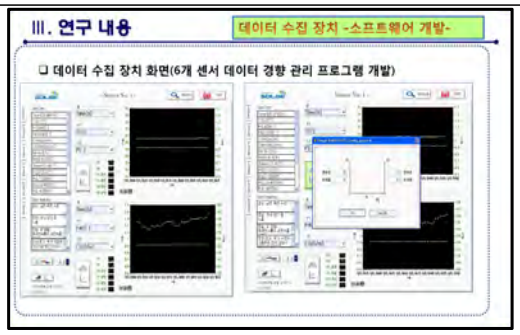
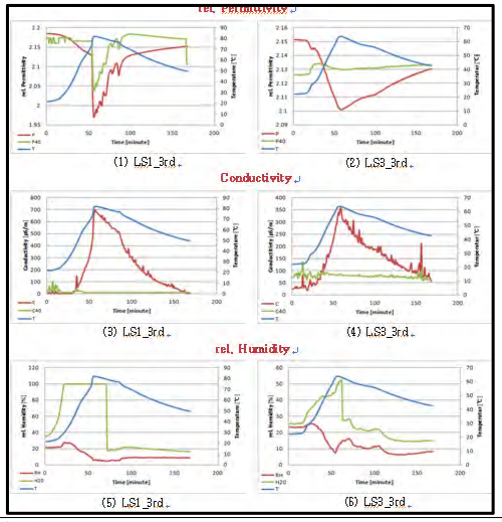
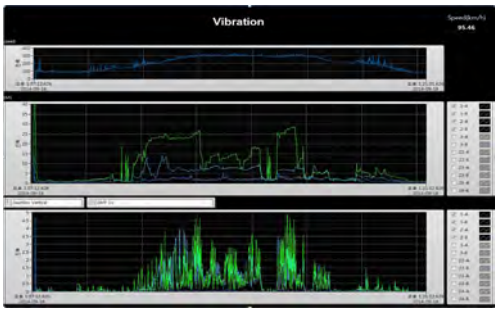
- 베어링/기어/윤활유 손상별 이상상태 데이터베이스 구축
- 온도/진동/윤활유 이상상태 진단기준 정립
- 온도를 이용한 감속기 이상상태 감시 및 진단시스템 개발
  (샘플링 1㎐, 오차범위 ±1℃)
- 진동을 이용한 감속기 모니터링 및 진단시스템 개발(최고 샘플링 12㎑ 이상)
  (대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함)
- 윤활유 상태 분석을 통한 감속기 이상상태 감시 및 진단시스템 개발
- 최고속도 400㎞/h까지 적용 가능 (실차 검증속도 300㎞/h)
- 주요 고장에 대한 이상상태 모니터링 및 진단시스템 신뢰도 95% 이상

## 2. 연구개발 최종목표 달성도

| 최종목표 | 세부목표 | 추진실적 | 달성율 |
|---|---|---|---|
| 감속기 이상 상태 모니터링시스템 기술개발 | 베어링/기어/윤활유 손상별 이상상태 데이터베이스 구축 | •베어링 이상상태 데이터베이스 구축<br><br>•기어 이상상태 데이터베이스 구축<br><br>•윤활유 이상상태 데이터베이스 구축 | 100% |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | |  | |
| | 온도/진동/윤활유 이상상태 진단기준 정립 | •온도 이상상태 진단기준 정립<br><br>•진동 이상상태 진단기준 정립<br><br>•윤활유 이상상태 진단기준 정립 | 100% |
| | 온도를 이용한 감속기 이상상태 감시 및 진단시스템 개발 (샘플링 1Hz, 오차범위 ±1℃) | •온도 모니터링시스템 개발<br><br>•온도 모니터링시스템 성능시험<br> | 100% |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 진동을 이용한 감속기 모니터링 및 진단시스템 개발(최고 샘플링 12㎑ 이상)(대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함) | •진동 모니터링시스템 개발<br><br><br><br><br>•진동 모니터링시스템 성능시험<br><br> | 100% |
| | 윤활유 상태 분석을 통한 감속기 이상상태 감시 및 진단시스템 개발 | •윤활유 모니터링시스템 개발<br><br> | 100% |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | <br><br>•윤활유 모니터링시스템 성능시험<br><br> | |
| 최고속도 400㎞/h까지 적용 가능 (실차 검증속도 300㎞/h) | | •실차 검증 300km/h<br><br><br>[실차 시험: 진동 데이터 취득 화면]<br>•최고속도 시험검증 : 최대 데이터 샘플링 검증 | 100% |
| 주요 고장에 대한 이상상태 모니터링 및 진단시스템 신뢰도 95% 이상 | | •환경부하시험<br>•진동 및 내구성시험<br><br>•전자파시험<br>•실차시험(제3자 검증) | 100% |

## 제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

감속기 모니터링시스템 기술개발을 통한 기술적 효과를 분석하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 온도 및 진동, 윤활상태 감시를 통한 감속기의 모니터링 기술 확보
- 감속기의 모니터링 기술의 확보로 감속기의 효율적 관리를 위한 유지보수 기술 향상 (유지보수 주기, 방법 등의 기술향상)
- 시험시설 및 실차시험을 통한 고속열차 감속기의 손상 안전도 평가를 통하여 대외 신뢰도가 확보될 수 있으며, 감속기 국산화의 기반 기술 확보
- 모니터링 시스템은 전 세계적으로 심도 있게 개발 되고 있는 사항으로서 본 과제를 통하여 성능이 우수한 감속기 모니터링 시스템이 개발되면 이 장비 관련 국내산업의 활성화 및 해외 수출 기대
- 감속기 모니터링 시스템을 활용하여 정확한 감속기 사고 원인규명이 가능해짐으로 사고조사, 대책수립 기간 및 비용 절감 기대

### 1. 기술적 효과

가. 기술적 의의

철도차량의 감속기 설비의 결함을 조기에 찾아서 고장 발생 원인을 규명하여 올바른 대처가 무엇보다 중요하지만 현재 한국의 현실은 조기에 이상 징후를 파악하여 대처하는 방식이 아닌 이상 현상 발생 시 인력을 투입하여 측정을 하는 후 처리 방식이 보급화 되어 있다. 그러나 이러한 방식은 이미 기계가 고장이 일정 수준 진행이 된 상태로 기계의 고장을 예방하는 데에는 한계가 있다. 이에 새로운 개념의 모니터링 진단 기술에 대한 니즈가 증대되고 있다. 이러한 측면에서 소형화, 측정-분석-경고의 통합화가 가능한 모니터링 진단 기술에 대한 관련 기업의 큰 관심 사항으로 부상하고 있다. 업계의 이러한 관심 사항은 새로운 설비진단 기술에 대한 니즈로 연계될 것으로 판단되어 향후 동 분야의 기술개발이 더욱 촉진될 것으로 보인다.

모든 기계적 장치에서 진동이 발생하고 정상적인 상태에서 발생되는 진동과 비정상적인 사태에서 발생되는 진동은 서로 다르다. 본 장치는 기계적 장치에 진동센서를 설치하여 발생되는 진동을 탐지하고 수신된 신호를 분석하여 장치의 정상작동 여부를 판단하면서 간단하게 관리자에게 정보를 제공할 수 있다. 또한 철도 산업 설비 현장에 바로 접목할 수 있으며, 철도 차량 설비 운영자의 관리에 따른 업무의 손실을 획기적으로 줄이고 산업체의 설비관리 비용을 최소화할 수 있는 제품의 형태이다. 본 개발 기술을 적용한 제품은 기계의 가동 정지 전에 미리 조치를 취할 수 있어 생산성 증대와 설비의 수명을 연장 시킬 수 있어 회사나 국가적으로 막대한 이익을 가져올 수 있다. 가전제품, 자동차, 건설 현장 등 현재 거의 모든 산업 분야에서 진동에 대한 문제점이 발생하고 있고 이를 개선하기 위한 활동이 끊임없이 수행되고 있다. 이러한 이유로 인하여 이번 개발 제품은 산업설비 현장에만 한정하여 생각할 수 없다. 건축, 토목건설 현장 뿐 아니라 세탁기 같은 가전제품, 설비를 제작하는 제조업에서도 진동은 매우 민감한 사안이다.

진동에 의한 환경평가 용역이 수행이 되고 있으며 건설 현장에서도 지반에 대한 진동 문제는 끊임없이 문제가 야기되어 해결점을 모색하려고 하는 활동이 계속 되고 있다. 이러한 이유로 이번에

발광식 진동 센서를 개발하여 이런 분야의 산업 분야에도 연관 시키면 그 파급력이 매우 높을 것으로 판단된다.

본 개발 제품을 철도 산업현장에 적용하여 감속기 설비의 가동정지를 사전에 예방을 할 수 있도록 조치하면 결국 철도차량 운행 저하의 문제를 예방하는데 도움이 될 수 있고 결국 각 회사와 국가의 예산 낭비를 예방할 수 있어 결과적으로 막대한 이익을 창출할 수 있을 것이라 판단된다.

감속기의 이상 상태 감시는 주기적인 검사에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 이상 감시 시스템은 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상의 감시에 효과적이며, 주기적 검사 비용 및 철도 운행 중단에 따른 경제적인 손실을 최소화 할 수 있다. 국내에서 특히 발전소의 일반기계 및 대형 설비에는 모니터링 및 진단 기술은 활발하게 연구가 되어 실용화 단계에 있지만 철도차량의 감속기 모니터링 기술은 연구 및 실용화가 미흡한 실정이다. 해외에서는 기계의 설비진단 기술의 발달로 자동검사기술과 정밀측정, 품질관리 등을 통하여 철도차량의 부품을 최적의 상태로 관리하고 있는 실정이지만 본 개발 기술로 인하여 철도 차량의 감시 기술력 확보가 가능할 것으로 판단된다.

다음 표 4.2.1은 본 개발기술의 응용분야 및 파급효과에 대하여 정리한 것이다.

표 4.2.1 개발 기술의 응용분야 및 파급효과

| 구 분 | | 내 용 |
|---|---|---|
| 응용분야 | 제조산업 | • 전동기를 사용하는 제조공장의 설비 진단 |
| | 건설산업 | • 대형건축물의 안정성 진단 |
| | 전력산업 | • 발전기의 설비 진단 |
| 파급효과 | 기술적측면 | • 진단 장비의 소형화를 통해 설치의 용이성 제공<br>• 철도차량 설비 결함의 진단-분석-경고를 통합하여 기술적 경쟁력 확보 |
| | 경제·산업적 측면 | • 철도 산업설비의 결함을 조기에 발견함으로써 설비관리비용의 절감과 가동률의 향상에 따른 생산비용 절감.<br>• 고가의 수입 설비진단 장비의 대체를 통한 수입대체 및 수출 증대. |

나. 기술수명 주기상 위치

철도차량 산업 기계 설비가 대형화 되고 고급화됨에 따라 철도차량 설비의 고장은 수리비의 막대한 증가 및 운행률의 급격한 조래를 초래하게 되면서 오랜 기간 동안 사용 되어진 검사 장비의 주기적인 검사는 한계에 부딪치고 있어서 새로운 개념의 철도차량 설비 진단 장치가 필요로 하게 되었다. 본 개발 기술은 이러한 필요에 부응하고자 개발된 기술로서 국산화 장비는 현재 도입기의 기술로 판단이 되고 있다. 다음 그림 4.2.1은 기술 수명 주기강의 위치를 표현한 그림이다.

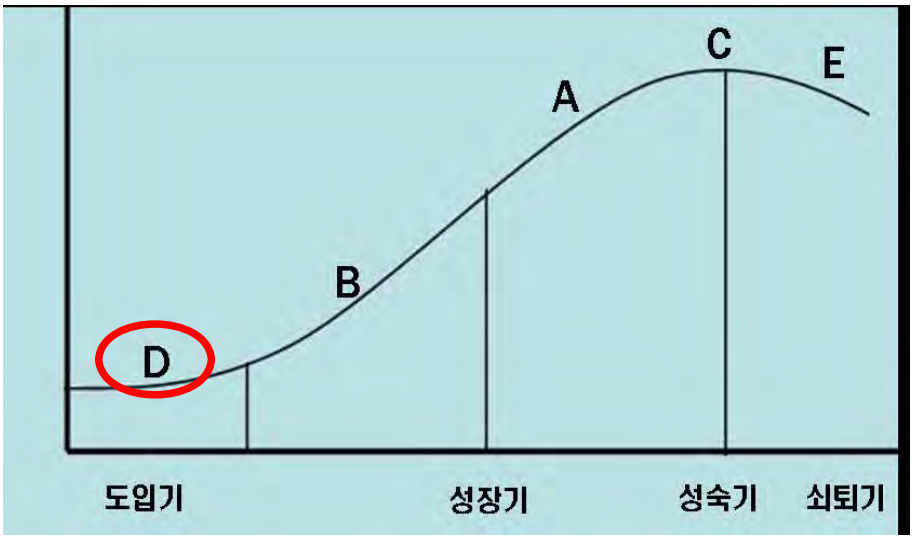



그림 4.2.1 개발기술의 기술 수명 주기상 위치

다. 기술경쟁력

(1) 기술의 자립도

본 개발 기술이 적용되는 부분은 철도차량 감속기의 통합 감시 시스템 분야이며, 본 기술을 개발하기 위한 주요 핵심기술은 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 감속기 진동 분석 파라미터 기술
- 감속기 온도 분석 파라미터 기술
- 감속기 윤활 분석 파라미터 기술
- 파라미터에 의한 알람 제어 설정 기술

본 기술은 철도차량 분야 뿐 만이 아니라, 건설 분야 및 다양한 설비가 적용된 분야에서 활용이 가능할 것으로 판단이 된다. 즉 본 개발 기술은 타 분야로의 응용 및 확장 가능성이 다소 높을 것으로 사료된다.

# 제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)

감속기 모니터링시스템 기술개발을 통한 경제적 효과를 분석하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 감속기의 손상관련 진단기술의 확보로 철도차량의 안전한 운행을 보장할 수 있고, 감속기의 효율적 관리를 통한 유지보수 비용 절감
- 감속기 고장으로 인한 운행정지 경제적 손실비용(600억/년, 2건 기준) 저감
- 진단시스템 구축으로 인한 KTX 차량 가용성 증가로 확보해야 할 예비편성 수량 감소로 편성당 약 400억의 비용절감
- 최신 모니터링 시스템 구축으로 인한 차량의 가용성 증가로 승객의 편익성 증대
- 차량의 안전운행으로 인한 사회적 경제적 신뢰성 확보

고속열차용 감속기 이상상태 감시시스템 기술개발에 의하여 실시간으로 상태감시를 수행하기 때문에 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상 감시에 대단히 효과적이며 주기적 감시 및 서비스 중단에 따른 비용을 감소시킬 수 있는 효과가 있다. 또한, 감속기 이상상태 감시 시스템 기술을 통하여 철도차량을 공공 교통 수송수단으로 신속, 정확하게 승객의 안전수송 역할을 충실하게 수행할 기술이다. 또한 감속기 이상상태 감시시스템 기술 개발 수준은 KTX와 KTX 산천의 차량에 적용을 목표로 기술 개발할 것이며, 완성된 기술을 통하여 전동차에도 적용하여 철도차량의 안전성을 한층 더 업그레이드 하는 기술을 개발할 계획이다. 또한, 상태감시 기반 정비 절차 도입으로 철도분야 유지보수 선진화에 기여하고 유지보수 비용 절감 기술 개발에 지속적으로 활용 가능하며, KTX 고장에 의한 국민들의 불안 해소와 대형사고 미연 방지를 통하여 운행 정지 사고로 인한 경제적 손실(660억/년, 2건 기준)을 최소화 할 수 있는 기술로 예측 가능하고 철도를 믿고 신뢰할 수 있는 사회기반의 토대가 될 것이며 세계 최고 수준의 안전성 확보 기술구현이 가능하다.

## 1. 시장 창출 효과

### 가. 제품화 용이성

본 기술의 제품화와 관련하여, 제품을 생산하기 위한 생산 설비 시설은 아직 제대로 구축이 되어 있지 않으나 소량 생산을 위한 기본적인 제반 시설은 구축되어 있으며 본 기술개발의 제품화를 위하여 하드웨어 설계 인력과 소프트웨어 설계 인력을 보유하고 있어 개발 및 생산에 어려움이 없을 것으로 보인다. 또한 양산을 위한 공장부지가 확보가 되어 있지만 추가 인력 및 설비 확보는 필요할 것으로 판단된다.

### 나. 시장 창출의 효과

#### (1) 설비진단 기술에 대한 니즈 증대

산업설비의 결함을 조기에 찾아서 고장 발생 원인을 규명하여 올바른 대처가 무엇보다 중요하지만 현재 한국의 현실은 조기에 이상 징후를 파악하여 대처하는 방식이 아닌 이상 현상 발생 시 인력을 투입하여 측정을 하는 후 처리 방식이 보급화 되어 있다. 그러나 이러한 방식은 이미 기계가 고장이 일정 수준 진행이 된 상태로 기계의 고장을 예방하는 데에는 한계가 있다. 이에 새로운 개념의 설비진단 기술에 대한 니즈가 증대되고 있다. 이러한 측면에서 소형화, 저가격화, 측정-분석-

경고의 통합화가 가능한 설비진단 기술에 대한 관련 기업의 큰 관심 사항으로 부상하고 있다. 업계의 이러한 관심 사항은 새로운 설비진단 기술에 대한 니즈로 연계될 것으로 판단되어 향후 동 분야의 기술개발이 더욱 촉진될 것으로 보인다.

(2) 국내 설비진단(센서 및 모니터링 시스템 장비) 산업의 낙관적 전망

최근의 고령화 및 저출산 등 노동인력의 감소로 인하여 산업 현장의 직접인력이 현격하게 줄어들고 있다. 따라서 생산현장의 자동화에 대한 요구가 증대됨에 따라 각종 측정 장비의 수요가 확대될 것으로 보인다.

그러나 국내 설비진단에 사용되는 모니터링 관련 생산업체는 대부분 중소기업으로 자체 생산보다는 수입 조립/가공을 하고 있는 실정이다. 국내 센서 업체는 2008년도 통계청 자료에 의하면 약 150여개 업체로 파악이 되고 있으며 자체 생산 비중 보다는 수입 제품의 교정 가공을 통한 국내 산업 현장에 맞게 개량된 센서로 교정하여 판매되고 있다.

(3) 기존 설비진단(센서 및 모니터링 시스템 장비) 장치의 높은 시장 점유율

현재 센서 및 모니터링 시스템의 국내 시장을 살펴보면, 대부분 외산 제품이 시장을 점유하고 있다. 이는 그 동안 국내에서 센서 및 계측장비의 개발이 제대로 진행되지 않는 가운데 국내 설비관련 기업에서 기존의 거래처를 상대로 제품을 구입하기 때문이다. 따라서 시장에 대한 검증이 이루어지지 않은 새로운 제품군으로 신청기술이 제품화되어 국내 시장에 진입할 경우 기존 센서 및 계측장비에 대하여 신뢰도가 쌓인 구매자의 인식을 전환하기에는 상당한 기간이 걸릴 것으로 보인다.

(4) 시장의 향후 확장 전망

감시 시스템 장비는 설비에 포함되어 있는 엔진이나 모터 등의 회전체의 진동 패턴을 센서를 통하여 확인하고 수집된 주파수와 진폭 등의 데이터를 수집하는 기능을 가지고 있다. 이 장치는 기계류나 구조물의 고장을 진단하고 해결하는데 널리 쓰이는 방법이다. 이러한 진단 방식은 예기치 못한 고장으로 인한 심각한 문제가 발생하는 것을 방지하여 비용과 가동시간 측면에서 중요한 역할을 하고 있다. 진동 감시 시스템 장비는 크게 고정식과 이동식의 두 가지로 구분할 수 있다. 고정식(또는 온라인 방식)은 설비에 고정된 일련의 센서를 포함하고 있으며 수집된 정보를 연결되어 있는 컴퓨터 또는 고정 서버로 전송하여 분석한다. 이동식은 전원이나 센서 등이 독립되어 있어서 이동이 가능하며 데이터 수집부터 분석의 전 과정을 독립된 장비 내에서 독자적으로 수행할 수 있는 특징이 있다.

아직도 진행되고 있는 전 세계적인 경기 침체는 수요자들의 소비를 제한하고 있으며 진동 감시 시스템 장비 시장의 성장에도 영향을 미치고 있으며, 장비의 가격에 민감한 분위기가 형성되므로 고가의 고정식 장비에 대한 수요가 줄어들고 있는 추세이다. 이와 관련해서 저가 제품에 대한 수요로 인하여 장비의 생산기지가 동유럽이나 아시아-태평양 지역으로 이전하는 추세이며, 북미나 유럽시장에서도 역시 가격인하에 대한 수요자들의 요구사항이 높아지고 있다.

감시 시스템 장치 시장과 관련하여 설비의 유지 기술이 새로운 분야로 떠오르고 있는데 설비의 가동 정지 시간을 단축시킴으로서 생산성을 높이기 위하여 기계류의 신뢰도를 개선하려는 노력이 다양하게 시도되고 있다. 감시 시스템 장치의 자동화나 원격 조정 기능을 향상시키기 위한 새로운 기술들이 개발되고 있다. 저비용의 무선 온라인 감시 시스템, 고장 및 진단을 자동으로 처리하는 방

식, 광대역 인터넷 통신의 적용, 스마트폰이나 웹을 기반으로 하는 감시 프로그램 등이 여기에 포함된다.

감시 시스템 장치 시장에서 가장 뚜렷한 변화는 추가 인력이 요구되는 오프라인 감시에서 온라인 지속 감시 방식으로의 수요 전환이다. 네트워크 기술의 진보와 인터넷이나 스마트폰의 확산은 연결 편리성이 매우 높아짐에 따라서 중앙에서 전 세계 장비를 감시하는 것이 가능하게 되었으므로 수요자 측면에서는 비용절감을 위한 온라인 감시가 시장의 추세로 판단된다. 그림 4.3.1에 진동 감시 시스템 장비 시장의 전망 내용이 표시되어 있다.

Global Industry Analysts, Inc.(GIA)에서 2013년 7월에 발표한 "Machine Condition Monitoring Equipment: A Global Strategic Business Report"에 따르면 가동 중지시간의 단축을 통한 생산성 향상과 작업장과 개인 안전에 대한 정부의 규제가 강화, 기계류가 계속 복잡해짐에 따라서 안정적인 설비의 작동을 위한 감시 시스템 시장은 지속적으로 증가할 것으로 설명하고 있다. 특히, 연속공정이 진행되는 발전소나 제조업 분야에서는 설비 중단에 따르는 피해를 줄이기 위하여 감시 시스템 장치에 많은 투자를 할 것으로 전망하고 있다. Frost & Sullivan에서의 보고와 마찬가지로 진동 감시 시스템 시장이 가장 큰 부분을 차지할 것이며 진동 감시, 윤활 분석, 열화상 분석 가운데 열화상 분석 분야의 성장률이 앞으로 가장 높을 것으로 보고 있으며, 중국과 인도, 동남아시아에서의 빠른 산업화로 인한 수요 증가와 생산비용 절감을 위하여 생산기지가 아시아로 이전할 것으로 전망하고 있다. 전체 감시 시스템 장비 시장 규모는 Frost & Sullivan과 비슷한 수준인 2018년에 23억 달러가 될 것으로 전망하였다.




그림 4.3.1 진동 감시 시스템 장비 시장 전망

출처 : Frost & Sullivan

## 제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

감속기 모니터링시스템 기술개발을 통한 정책적 효과를 분석하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 고속철도, 일반철도, 도시철도 차량의 감속기 모니터링에 적용하여 철도차량안전운행에 기여할 수 있음
- 철도차량안전운행을 통한 고속철도, 일반철도, 도시철도 차량의 신뢰성 향상
- 감속기 손상 메커니즘 분석 및 손상 영향 분석 결과는 감속기 손상 저감 및 유지보수 기초자료로 활용
- 감속기의 온도/진동/윤활 모니터링 데이터(대차 진동 데이터 포함)를 데이터베이스화하여 감속기 손상관련 연구의 기초 데이터로 활용할 수 있고, 모니터링 진단 기준 설정 및 기준 업데이트로 활용
- 철도차량 관련 첨단 감지 시스템 구축으로 인한 관련 시스템의 해외시장 개척
- 고속 감속기, 변속기 등의 타 분야의 구동장치 모니터링 시스템에 응용
- 감속기의 온도/진동/윤활 모니터링 진단기술은 차축 베어링의 온도 모니터링 및 진단, 차축 및 대차, 차체의 진동 모니터링 진단기술에 활용

철도는 에너지 효율, 수송효율, 토지이용률 등 친환경적인 부분에서 가장 확실한 미래의 교통기술이며, 국가적인 수송수단으로 거듭나고 있다. 유럽, 일본 등의 철도선진국들은 이러한 철도의 친환경성에 주목해 1990년대 후반부터 국가의 교통정책을 철도 중심으로 전환하여 철도에 대한 투자를 급속히 확대해 가고 있는 추세이며, 실제 철도 선진국들은 첨단 기술로 세계 철도시장을 점유하기 위해 단순히 철도투자를 확대하는 것이 아니라, 철도 교통을 국가의 차세대 성장 동력으로 인식하고 철도 중심의 정책과 연구개발을 추진하고 있는 실정이다. 현재 전동차에 들어가는 부품의 90~95%가 국내 부품회사들이 만든 제품이나 (KTX-산천 차량 부품의 국산화율도 90%) 해외에 수출하는 철도차량의 대부분은 해외발주기관의 지정사양부품을 장착해야 하는 부분이 있다. 그 중 한국 부품이 차지하는 비중은 20~30%에 불과하며 전기 제어시스템이나 제동장치 등 핵심부품은 외국 제품을 대부분 사용하고 있는 실정으로. 해외 수주차량에 따라 국내 부품을 사용하는 경우도 있지만 전체 물량에서 차지하는 국산화 부품의 비중은 극히 작은 부분을 차지하고 있다.

2011년도 우리나라 철도차량 부품의 대륙별 수입현황을 보면 유럽이 압도적이고 다음이 아시아로 최근 들어 증가하고 있는 추세이다. 전통적으로 철도차량 부품에 대한 노하우와 기술력을 가지고 있는 프랑스, 독일, 영국에 대한 의존도가 높으며, 최근 중국의 시장 확대로 중국으로부터의 부품수입도 증가하고 있음. 연도별 철도차량의 부품 수입현황에서 보면 전년도 대비 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

이러한 현실에서 부품 및 소재산업의 뒷받침 없이 단순한 철도건설에만 집중하면 부품 및 소재산업 분야가 선진국의 소비시장으로 전락할 수도 있을 것으로 판단된다. 그러나 철도차량 부품 중에는 철도 선진국 제품에 비해 우수하지만 적용 사례가 없다는 이유로 현장 적용에 제한을 받고 있는 경우도 있으므로 이러한 신기술 및 신제품에 대한 시범설치 및 적용을 확대하기 위해서는 국산화 부품의 적용을 위한 시범설치 구간의 의무 지정 등 제도적 지원 필요할 것으로 판단된다.

우리나라는 이미 고속철도와 같은 철도건설 기술은 물론 철도차량 및 부품에 대한 신기술, 그리고 100년 이상의 철도운영 및 유지보수에 대한 노하우 등을 갖고 있으므로 부품 및 소재 기술에 대한 적극적인 기술개발이 이루어진다면 해외 철도시장에서 충분한 경쟁력을 보유하게 될 것이라고 판단된다. 이러한 경쟁력을 통해 철도산업이 국가적 전략산업이 될 것으로 예상할 수 있으며, 이와 함께 철도교통을 보다 안전하게 이용하기 위해서는 반드시 지속적인 원천기술의 확보 및 관련 핵심 부품의 국산화가 이루어져야 하며 관련 부품산업에 대하여 세계적인 경쟁력을 확보해야 할 시기라고 사료된다. 다음 표 4.4.1은 해외의 자국 부품 사용 의무화 현황에 대한 내용이며 그림 4.4.1은 세계 주요 철도 산업 규모이다.

표 4.4.1 국외 자국부품사용 의무화 현황

| 국가 | 조 건 |
|---|---|
| 미국 | Buy America 조건 (미 연방자금 활용 사업)<br>– 계약가 중 재료비의 60% 미국산 부품 활용<br>– 최종조립은 미국내 수행(미국에서, 미국인이)<br>※시행청 자체자금 구입의 경우 조건변경 가능하며, 통상적으로 더 강화됨 (뉴욕메트로의 경우 100% 미국산 부품활용 조건) |
| 중국 | 총 계약가의 70%이상 자국 부품 사용 의무화(차량)<br>※ 전장품 계약의 경우 40%이상 자국 부품 사용 의무화 |
| 터키 | 계약가 중 재료비의 25~30% 자국 부품 사용 의무화 |
| 브라질 | 계약가 중 재료비의 30%이상 자국 부품 사용 의무화 |
| 대만 | 계약가 중 재료비의 20%이상 자국 부품 사용 의무화 |
| 우크라이나 | 현지 생산 조건(현지 공장 설립) |

| Nation | Total Route Km | Passengers ( *1000) | Passenger-Km ( *1000000) | Freight Ton ( *1000000) | Freight Ton-Km ( *1000000) | Traffic Density |
|---|---|---|---|---|---|---|
| China | 62,200 | 1,106,510 | 583,320 | 2,309.20 | 1,934,612 | 40.5 |
| Russia | 85,245 | 1,338,723 | 172,217 | 1,281.30 | 1,858,100 | 23.8 |
| India Total | 63,273 | 6,524,377 | 769,956 | 727.7 | 480,993 | 19.8 |
| EU 10(동유럽) | 61,678 | 744,400 | 45,188 | 575.7 | 142,816 | 3 |
| Spain(*) | 14,484 | 610,700 | 21,047 | 29.7 | 11,586 | 2.3 |
| EU 15(서유럽) | 150,224 | 6,361,900 | 326,941 | 860.3 | 243,648 | 3.8 |
| Japan Total | 12,217 | 8,987,944 | 309,741 | 36.2 | 23,166 | 27.2 |
| North America Total | 224,490 | 34,988 | 11,910 | 2,115.7 | 2,996,762 | 13.4 |
| Iran(**) | 7,131 | 19,400 | 11,149 | 30.3 | 19,127 | 4.2 |
| Turkey(**) | 8,697 | 76,306 | 5,036 | 18.9 | 9,078 | 1.6 |
| Korea(**) | 3,392 | 921,300 | 31,004 | 44.5 | 10,108 | 12.1 |
| Total All Other Railways(**) | 258,311 | 3,343,434 | 275,889 | 3,454.40 | 1,165,056 | 5.6 |
| World Total | 917,638 | 28,442,276 | 2,495,162 | 11,360.50 | 8,845,153 | 12.4 |

Note : (*) EU15에 포함, (**) Total All Other Railways에 포함 출처 : Forum Paper 2010

그림 4.4.1 세계 철도 산업 규모

# 제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

# 제1절 연구성과 향후 활용방안

## 1. 사업화 추진방안 (양산 및 판로 확보 계획)

○ 생산 규모 : 소규모 생산

센서 및 계측기 관련 상품은 다품종 소량 생산으로 산업 형태가 구성이 되어 있기 때문에 처음에는 소규모 생산으로 초점을 맞춰서 사업을 진행할 예정에 있다. 현재 본사 또한 고객의 요구에 따른 맞춤형 제품에 대한 소량 생산으로 진행을 해왔기 때문에 이에 관련된 생산 제반 시설을 갖춰야 할 필요성이 있다. 그러나 기본적으로 고객의 요구 조건에 맞춰 소량 생산을 위한 기본적인 제반 시설은 이미 갖추고 있는 상황으로 본 제품의 개발을 진행하면서 필요한 생산시설에 대하여 파악을 진행할 예정으로 이번 개발에 모든 역량을 결집시킬 준비를 진행 중에 있다. 다음 그림 5.1.1은 생산 계획에 대한 구상 내용이다.

생산 관련 원재료 투입은 현재 시장 상황에 대한 1차적인 조사를 완료한 상태이다. 전체적인 원재료 확보 방안을 이미 마련한 상태로 생산 진행이 되면 원재료 확보에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 다음 표 5.1.1은 수요 변동에 따른 생산 운영 계획을 정리한 것이다.




그림 5.1.1 생산 계획 구상 내용

표 5.1.1 수요 변동 생산 운영 계획

| 가동 구분 | 계획 내용 |
|---|---|
| 표준 가동 | • 평균 작업자의 부하(작업량)를 설비 Capa의 90%로 할당 운영<br>• 다기능 작업자가 여러 조립 공정을 진행 |
| 수요증가에 따른 가동 | • 임시 작업자를 고용하여 설비 Capa의 100% 운영<br>• 조기 출근 및 초과 근무 실시 |
| 수요감소에 따른 가동 | • 작업자 전환 배치<br>• 시간외 근무 단축<br>• 준비/교체 작업 단축 연습 전개<br>• 설비 및 생산 제반 사항 점검 |

○ 수요처 발굴 및 마케팅 전략

프로모션(Promotion) 측면에서 동사의 제품은 소비재가 아닌 생산설비의 한 부분에 해당하므로 일반 매스미디어 홍보보다는 수요대상 업체 및 기관을 대상으로 하는 직접 마케팅이 효과적일 것이다.

- 첫 번째로는 동사가 기존 사업을 영위하면서 구축한 네트워크를 통하여 홍보하는 방법이다. 동사가 수입하여 판매하고 있는 센서제품의 대상수요자들의 경우 대부분이 설비를 보유한 업체로서 동사의 신규제품에 대한 수요가 가능하므로 이 들에 대한 홍보는 실질적인 구매로 연결될 가능성이 높다.

- 두 번째로는 대규모 철도차량 관련 제조업체나 공기업 설비에 초기 진입하여 시장에서 자연스러운 구전 홍보효과를 기대할 수 있다. 특히 발전소와 같은 공기업 성격의 설비에 성공적으로 공급이 될 경우 제품의 인지도와 신뢰도를 인정받아 사기업 등에 대한 공급이 수월히 진행될 수 있다.

- 세 번째로 동사가 진행하고 있는 교육프로그램을 통하여 관련 사업체의 담당자들에게 간접적으로 홍보하는 방법도 효과적일 것이다. 교육 참여 기업과 참가자야말로 동사제품의 직접적인 수요자이므로 피교육자들에게 진동에 대한 조기경보의 필요성을 강력히 전달함으로써 매출로 연결될 수 있을 것이다.

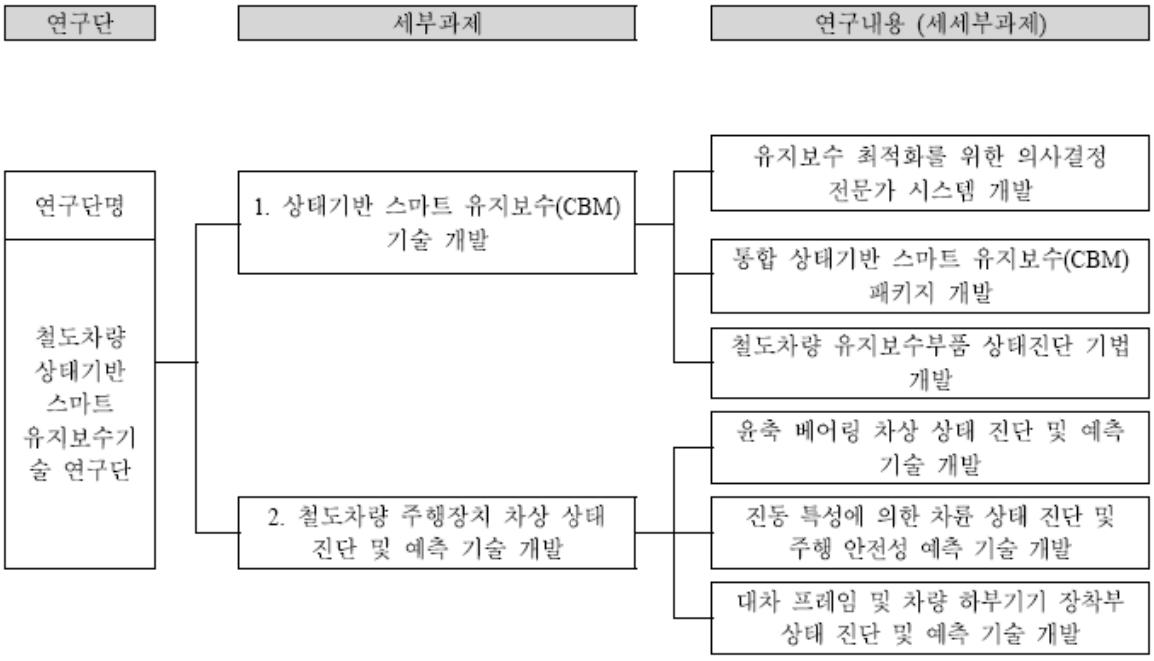
제품 상업화 이후 여러 마케팅 전략을 수립하여 홍보 활동을 진행을 해서 점차적으로 시장 점유율을 높일 예정으로 센서 전체 시장 중 19%를 점유하고 있는 산업 현장 분야를 1차 공략 시장으로 선정하여 마케팅 활동을 진행할 예정이다. 일단 제품 상업화 이후 목표 시장 점유율은 약 15% 정도를 초기 공략 목표로 하고 이후 제품의 다품종 연구를 지속적으로 수행하여 각 옵션별 기능에 맞춘 다양한 모델 출시로 시장 점유율을 점진적으로 높여나갈 예정이다. 최종적으로는 국내 계측기 분야 시장을 포괄적으로 포함시킬 수 있는 제품으로 판단되기 때문에 최종 공략 시장 점유율은 약 40% 공략을 목표로 하고 있다.

## 2. 기존 연구 및 타 연구와의 연계

기존에 수행한 모니터링 관련 연구 중 “철도시스템 건전성 모니터링 기초연구(교육과학부, 2009)” 과제에서는 적외선 열화상기술을 이용한 대차 및 제동장치의 건전성평가, 무선/무전원 SAW 센서를 이용한 철도차량 이상상태 실시간 모니터링 기술개발 등의 연구를 수행하였다. 이 과제 중 SAW 센서를 이용한 철도차량 이상상태 모니터링 기술은 고속열차 차축 베어링 온도를 실시간 모니터링하고 분석하였으나, 센서의 적용 가능성에 초점을 맞추었고 진단 기준 설정 등에 대한 연구는 수행되지 않았다. 본 연구의 감속기 모니터링시스템 기술개발을 통하여 개발한 감속기 진단 기술 및 진단 기준 등은 무선/무전원 SAW 센서가 개발된다면 연계가 가능한 기술이다.

기존 회전체 기계상태 모니터링 기술은 시험실 수준에서 모니터링 하는 기술이므로 실제 철도차량에 적용하기 어렵다. 본 연구에서는 고속철도에 적용하기 위한 센서선정, 측정방법, 신호 분석방법, 안전성 판별기준 등의 연구와, 고속철도 운영시스템과 인터페이스가 되는 프로그램 및 하드웨어를 구축하였으므로 철도차량 모니터링 분야에서 진일보한 기술이라고 평가된다.

최근에는 철도차량 주행장치 차상 모니터링 기술을 개발하여 차량상태에 따른 최적의 고 신뢰성 스마트 유지보수(CBM : Condition Based Maintenance)관리를 할 수 있는 핵심기술을 개발하여 철도차량 유지보수의 효율성, 안전성, 친환경성을 제고하고자 아래 표와 같이 연구과제를 기획하고 있다. 본 연구를 통하여 개발된 모니터링 및 진단기술은 윤축 베어링 및 대차 프레임 등의 상태 진단 및 예측기술 개발에 활용 가능하다. 또한 감속기의 상태기반 유지보수를 수행 할 수 있는 기초기술 및 데이터를 제공할 수 있기 때문에 상태기반 유지보수 연구과제와 연계할 계획이다.

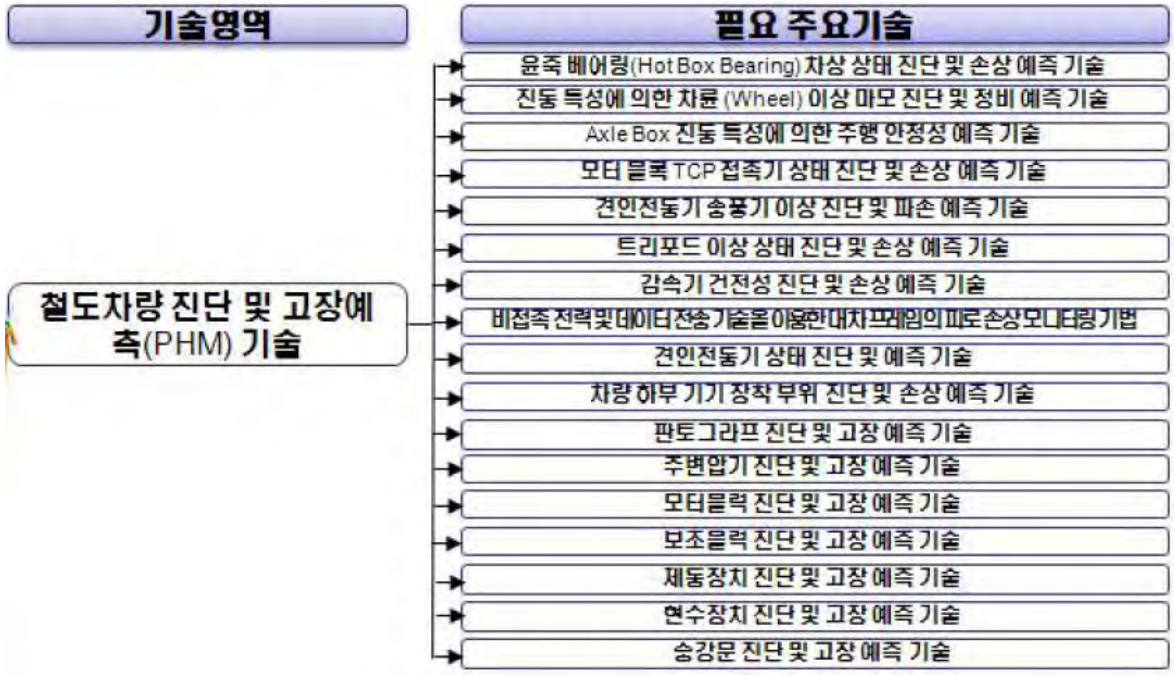



[철도차량 스마트 유지보수 기술 기획]

(출처: 철도차량 스마트 유지보수 기술 기획보고서, 2012, 국토해양부, 한국건설교통기술평가원)

## 제2절 추가연구 필요성

현 단계에서는 감속기의 이상상태를 진단하기 위한 상세 기술분야 별로 연구가 진행되고 있으나, 감속기의 특성만을 고려하여 감속기 상태를 진단 가능한 시스템이다. 후속적으로 차축 베어링, 모터 등 철도차량 주행장치 주요 분야를 통합하는 주행장치 이상상태 진단시스템 개발 연구가 필요하다. 즉, 고속열차 주행장치에서 안전 운행에 주요한 부품인 차축 베어링, 모터, 감속기 대차 등의 상태를 통합하여 이상상태를 모니터링 하고 진단할 수 있는 통합적 모니터링 기술이 개발되어야 한다. 아래 그림은 철도차량의 진단 및 고장예측 기술에 필요한 주요기술로 철도차량의 실시간 진단 및 유지보수 최적화를 위하여 연구가 필요한 기술이다.




[철도차량 진단 및 고장예측 기술]

(출처: 철도차량 스마트 유지보수 기술 기획보고서, 2012, 국토해양부, 한국건설교통기술평가원)

# 참고문헌

## 제1장 연구개발과제 개요


1. Kure, G. and Schmiechen, R., “Solutions for railway bogie condition monitoring,” Evolution magazine, No. 1, pp. 25-27, 2010.
2. KNORR-BREMSE, “COMORAN Condition Monitoring for Railway Applications,” http://www.knorr-bremse.com
3. Peng Z., Kessissoglou N. J., Cox M., " A study of the effect of contaminant particles in lubricants using wear debris and vibration condition monitoring techniques", Elsevier, Wear 258 (2005) 1651-1662.
4. Nam, Y., Kim, H., Yoo, N. and Lee, J. “Development of a Wind Turbine Monitoring System using LabVIEW,” J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 92-98, 2003.
5. 이관섭 외, “철도차량 스마트 유지보수기술 과제 기획보고서”, 국토해양부 한국건설교통기술평가원, 2011


## 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제1절 감속기 손상모드 시험 및 영향 분석


1. “Appearance of Gear Teeth - Terminology of Wear and Failure”, ANSI/AGMA 1010-E95, 1995
2. Shipley, R.J. and Becker, W. T., “ASM Handbook volume 11 ; Failure Analysis & Prevention”, ASM Int., 2002
3. Darle W. Dudley, Townsend, Dennis P., “DUDLEY'S GEAR HANDBOOK, McGraw-Hill”, New York, 1991
4. “Rolling bearings - Damage and failures - Terms, characteristics and causes”, ISO 15243, 2004,
5. SKF Bearing Corporation, “Bearing Failures and Their Causes”
6. “고속차량 주행부 동력전달장치 절손원인 분석 보고서”, 한국기계연구원, 2006.
7. 김철수, “KTX 감속기 기어파손 원인분석”, 한국철도대학, 2006
8. Ales Belsack and Joze Flasker, “Detecting cracks in the tooth root of gears”, Engineering Failure Analysis, Vol. 14, 2007
9. Chee Keong Tan, Phil Irving and David Mba, “A comparative experimental study on the diagnositc and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectometric oil analysis for spur gears”, Mechanical systems and signal processing, Vol. 21, 2007
10. T.H. Loutas, G. Sotiriades, I. Kalaitzoglou, V. Kostopoulos, “Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurements”, Applied Acoustics, Vol. 70,

2009
11. JSME, “Design for Gear Strength,” Jpn. Soc. Mech. Eng. (in Japanese), 1991.

## 제2절 온도 감시시스템 제작 및 시험

1. 정도원, 이영엽, 김은실, “KTX 감속기 유지보수 정책에 대한 고찰," 한국철도학회 2009년도 춘계학술대회, 2009년, 1191-1197
2. 최경진, 이동형, 서정원, 강부병, “대차용 감속구동장치 시험·평가 기술 개발," 한국DTS(주) 위탁연구 보고서, 한국철도기술연구원, 2000.
3. 김연수, 목재균, 장세기, 홍용기, 김용기, 김진완, 김태형, “바이모달 트램용 감속기어장치의 무부하 성능평가," 한국철도학회 2008년도 추계학술대회
4. B.R.Hohn,K.Michaelis, “Influence of oil temperature on gear failure”, Tribology International, 2004, 37, 103-109
5. Yasutomo Sone, 高速に對應する潤滑油とオイルシール, RRR, vol.69, No.9, 2012.9, p.25
6. 인천시 1호선 전동차 구동장치 부품 규격서, 로템 기술연구소, 2007

## 제3절 감속기 손상에 따른 진동특성 평가

1. 牧修市 저, 양보석 역, “진동법에 의한 설비진단의 실제”, 일오출판사, 1995.
2. 양보석, “기계설비의 진동 상태 감시 및 진단”, 도서출판인터비젼, 2006.
3. 이승훈, 윤동한, “웨이브렛 변환 이론 및 적용”, 보성각, 2004.
4. KS B ISO 8579-2 "기어장치의 인수검사-제2부 : 기어 장치의 기계 진동의 측정 방법 및 진동 등급의 결정", 2007.10.25 개정.
5. 제품 규격서-구동장치, 유진기공산업, 2006.
6. B. David Forrester, “Advanced Vibration Analysis Techniques for Fault Detection and Diagnosis in Geared Transmission Systems”, Barton David Forrester, 1996.
7. J.I.Taylor, “Identification of Gear Defects by Vibration Analysis”, Vibration Institute proceedings on Machinery Vibration Monitoring and Analysis Seminar and Meeting, New Orleans, LA, April 10-12, 1979.
8. 豊田利夫著, “回転機械診断の進め方”, 軸受診断のための信号前処理, 1990.
9. NREL, “Wind Turbine Gearbox Condition Monitoring Round Robin Study - Vibration Analysis”, 2012
10. Robert B. Randall, Jerome Antoni, “Rolling element bearing diagnostics - A tutorial”, Mechanical Systems and Signal Processing 25(2011), 485-520

## 제4절 진동에 의한 감속기 결함 및 이상상태 평가

1. Lee, S. H, Kim, K. J, Ha, J. Y 2000, An Experimental Study on Tooth-Meshing Frequency Components in Noise/Vibration of a Gearbox Under Operational Conditions, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference 2000, KAIST. DAEWOO HEAVY INDUSTRIES LTD, pp. 1096~1101.
2. Eom, B. G, Lee, H. S 2012, Dynamic Analysis for Improvement of Running Stability of Rubber Tired AGT Localization Bogie, Transactions of the Korean

Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 22, No. 4, pp. 307~317.
3. 김필관, 2003, 진동소음 점검장비, 경영사
4. D. J. Ewins, 2000, Modal Testing 2nd Ed, Research Studies Press LTD. Hertfordshire.
5. Randall, Robert Bond, 2011, Vibration-based Condition Monitoring, John Wiley & Sons, Inc. West Sussex.
6. J. Derek Smith, 2003, Gear Noise and Vibration 2nd Ed, Marcell Dekker INC, New York.
7. James E. Berry, 2003, Analysis Special Vibration Signature Analysis Time waveforms and related Technologies Required to Evaluate Low High and Variable Speed Machines, Technical Associates Of Charlotte, P.C, Charlotte.
8. Arthur R. Crawford, Steve Crawford, 1992, The Simplified Handbook Of Vibration Analysis Volume 2, Computational Systems Incorporated, Knoxville.
9. Rotor Kit, 2011, Vibration Measurement of Rolling Element Bearing, Lambert Academic Publishing.
10. Tom Proulx, 2011, Rotating Machinery Structural Health Monitoring Shock and Vibration Volume5, SEM Springer.
11. Dave S. Steinberg, 2000, Vibration Analysis for Electronic Equipment, Third Edition, Wiley Inter Science
12. William T. Thomson, 1998, Theory of Vibration With Application, 5th Edition, Pearson
13. David I. G. Jones, 2001, Handbook of Viscoelastic Vibration Damping,Wiley Inter Science
14. Victor Works, 1991, Machinery Vibration Measurement and Analysis, Mcgrawhill

## 제5절 감속기 진동진단 알고리즘 개발

1. 한학용, 패턴인식 개론: MATLAB 실습을 통한 입체적 학습, 한빛 미디어, pp274-303
2. Nam, Eun Kyoung, Railway engineering, KRRI, 2007
3. Healy, Juan, “high speed rail”, Vehicle System Dynamics V.12 No.1, 2007
4. H. Sohn, C.R. Farrar, F.M. Hemez, D.D. Shunk, D.W. Stinemates, B.R. Nadler, A review of structural health monitoring literature: 1996-2001, Technical Report, LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, 2003.
5. M. Palacz, M. Krawczuk, Vibration parameters for damage detection in structures, Journal of Sound and Vibration 249 (5), 999-1010, 2002.
6. Min-Joong Jeong and Bong-Hwan Koh, A decentralized approach to damage localization through smart wireless sensors, Smart Structures and Systems, 5 (1), 43-54, 2009.
7. Bong-Hwan Koh, L.R. Ray, Feedback controller design for sensitivity-based damage localization, Journal of Sound and Vibration 273 (1-.2), 317-.335, 2004.
8. Koh, Bong-Hwan, Li, Z., Dharap, P., Nagarajaiah, S., and Phan, M.Q., Actuator Failure Detection using Interaction Matrix Formulation, Journal of Guidance,

Control, and Dynamics, vol. 28(8), 895-901, 2005.
9. Koh, Bong-Hwan, Dharap, P., and Nagarajaiah, S., and Phan, M.Q., Real-time Structural Damage Monitoring through Input Error Function, AIAA Journal, 2005, vol. 43(8), 1808-1814, 2005.
10. Juang, J.-N., Phan, M.Q., Horta, L.G., and Longman, R.W., "Identification of Observer/Kalman Filter Markov parameters: Theory and experiments," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.16, No.2, 1993, pp.320-329.
11. Juang, J.-N., and Pappa, R.S., "An eigensystem realization algorithm for model parameter identification and model reduction," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.8, No.5, 1985, pp.620-627.
12. Alvin, K.F., and Park, K.C., "Second-order structural identification procedure via state-space-based system identification", AIAA Journal, Vol.32,No.2,1994,pp.397-406.
13. Tseng, D.H., Longman, R.W., and Juang, J.-N., "Identification of gyroscopic and nongyroscopic second-order mechanical systems including repeated roots problems," Advances in Astronautical Sciences, Vol.87, AAS94-151, 1994, pp.145-165.
14. Angelis D., Lus, H., Betti, R., and Longman, R.W., "Extracting physical parameters of mechanical models from identified state space representations," ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.69, September, 2002, pp.617-625.
15. Phan, M.Q., and Longman, R.W., "Extracting mass, stiffness, and damping matrices from identified state-space models," Paper AIAA-2004-5415, AIAA Conference on Guidance, Navigation, and Control, Providence, RI, August16-19, 2004.
16. Ray, L.R., and Koh, B.H., "Enhancing Uniqueness Properties in Damage Identification using Sensitivity Enhancing Control," Materials Evaluation, Vol.61, No.10, 2003, pp.1134-1142.
17. Koh, B.H., "Damage identification of smart structures through sensitivity enhancing control," Doctoral Dissertation, Thayer School of Engineering, Dartmouth College, New Hampshire, March, 2003.
18. Parks, T.R., "Manual for Model 205/205a: Torsional Control System," EPC Educational Control Products, Woodland Hills, California, 91367,1999.
19. V.N. Patel, N. Tandon, R.K. Pandey, Defect Detection in Deep Groove Ball Bearing in Presence of External Vibration using Envelope Analysis and Duffing Oscillator, Measurement, Vol. 45, 2012, pp960-970
20. Yuh-Tay Sheen, An Envelop Detection Method Based on the First-Vibration-Mode of Bearing Vibration, Measurement, Vol. 41, 2008, pp797-809
21. Yuh-Tay Sheen, An Envelope Analysis Based on the Resonance Modes of the Mechanical System for the Bearing Defect Diagnosis, Measurement, Vol. 43, 2010, pp912-934

22. R. Tomovic, V. Miltenovic, M. Banic, A. Miltenovic, Vibration Response of Rigid Rotor in Unloaded Rolling Element Bearing, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 52, 2010, pp1176-1185
23. Park, Jong-Po, Lee, Chong-Won, Identification of Defect Frequencies in Rolling Element Bearings Using Directional Spectra of Vibration Signals, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 9, No. 2, 1999, pp393-400
24. N. Tandon, A. Choudhury, A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings, Tribology International, Vol. 32, 1999, pp469-480
25. http://www.motorbank.co.kr
26. http://www.SKF.com
27. NI PXI-1042 Series User Manual and Specifications - http://www.ni.com
28. NI PXI-8110 User Manual and Specifications - http://www.ni.com
29. NI 446x Specifications - http://www.ni.com
30. NI Dynamic Signal Acquisition User Manual - http://www.ni.com
31. Cheng Junsheng, Yu Dejie and Yang Yu, "A fault diagnosis approach for roller bearings based on EMD method and AR model" College of Mechanical and Automotive Engineering, Hunan University, Changsha 410082, PR China Received 25 March 2004.

## 제6절 윤활유 열화감지 시스템 제작 및 시험

1. 공호성, "오일 분석 모니터링을 통한 기계상태 진단기술", 한국설비진단자격인증원 연차대회 2012, 2012. 7.
2. 김태헌, 공명수, 조덕영 "구매조건부 TOMS 기술개발 과제 결과 보고서", 2010.10, ㈜ 솔지.
3. 조덕영, "Successful Application Examples of Moisture Sensors", 2011. 9. Kittiwake Dealer Meeting Proceedings.
4. 솔지, "이동식 마이크로필터 여과기", 2010. 4, ㈜솔지 카탈로그
5. A. A. Carey, & A. J. Hazen, "The Dielectric Constant and Oil Analysis", Practicing Oil Analysis, 2001. 9.,
6. J. Fitch, "Determining Proper Oil and Filter Change Intervals: Can Onboard Automotive Sensors Help?", Practicing Oil Analysis, 2004. 1.
7. C. S. Byington & D. C. Schalcosky, "Advances in Real Time Oil Analysis", Practicing Oil Analysis, 2000. 11.
8. S. Gabarin, "On-line and In-line Wear Debris Detectors: Where's out there?", Practicing Oil Analysis, 2003. 9
9. Phil Keep, "Reliable Plant Lubrication Excellence by Application of On-line ICM Particle Counters", Reliable Plant 2011. 2011. 4.
10. Ron Kittle, "Online Condition Monitoring In Challenging Applications", Reliable Plant 2011, 2011. 4.
11. Argo-Hytos Application Note AH-APN-006, "Hydraulic Oil Monitoring with

H2Oplus II", 2012. 4.
12. Argo-Hytos Application Note AH-APN-003, "Multi-Disk Brake Cooling Oil Monitoring with H2Oplus II", 2012. 4
13. Schwartz, S. E. and D. J. Smolenski, "Development of an Automatic Engine Oil-Change Indicator System," SAE Paper 870403

[국내외 특허 기술조사]

1. 한국특허 등록번호 10-0302643 “자동차용 엔진오일의 열화상태 측정센서”, 2001.7.4
2. 한국특허 등록번호 10-0331720, “자동차용 엔진오일의 열화상태 측정용 코일형 센서, 2002.3.16
3. 한국특허 등록번호 10-0345436, “차량용 엔진오일의 열화상태 측정용 코일형 센서, 2002.7.9
4. 한국특허 등록번호 10-0865536, “탄소나노튜브 센서 및 이를 이용한 자동차용 엔진오일 교환시기 검출장치 및 검출방법”, 2008. 10. 21
5. 한국특허 등록번호 10-0820692, “엔진오일 측정센서”, 2008.4.2
6. 한국특허 등록번호 10-0789724, “형광빛 측정에 의한 오일 산화도 실시간 모니터링 방법 및 장치”, 2007. 12. 21
7. 한국특허 등록번호 10-0795373, “오일 열화 실시간 모니터링 방법 및 장치”, 2008.1.10
8. 한국특허 등록번호 10-0844717, “일체형 오일 센서”, 2008.7.1
9. 한국 공개특허 10-2009-0023801, “건설기계의 오일 상태 진단장치 및 그 방법”, 2009.3.6
10. 한국 공개특허 10-2008-0007478, “다기능 음파 오일 품질 센서”, 2008.1.21
11. 한국특허등록번호 10-0928947, “통합형 인라인 오일 모티터링 장치”, 2009.11.20
12. 한국특허등록번호 10-1147888, “산업유의 온라인 모티터링 및 정제를 위한 통합 관리 시스템”, 2012.5.14
13. USA 특허 4782332, “Lubricant Oil Monitorig System, Sensor for Monitoring Lubricant Oil Quality, and Method of Manufacturing Sensor for Monitoring Lubricant Oil Quality", Nov. 1. 1988
14. USA 특허 4792791, “Lubricant Oil Monitorig System, and Method of Monitoring Lubricant Oil Quality", Dec. 20. 1988
15. USA 특허 5089780, “Oil Quality Monitor Sensor and System", Feb. 18. 1992
16. USA 특허 5777210, “Oil Quality Sensor Measuring Bead Volume", Jul. 7, 1988
17. USA 특허 5789665, “Oil Quality Sensor For Use in a Motor", Aug. 4, 1988
18. USA 특허 6223589B1, “Oil Quality Sensor", May. 1, 2001
19. USA 특허 6459995B1, “Electrical Measurement of Oil Quality", Oct. 1, 2002
20. USA 특허 6519034B1, “Oil Quality Sensor", Feb. 11, 2003
21. USA 특허 6718819B2, “Oil Quality Sensor System, Method, And Apparatus", Apr. 13, 2004
22. 국제특허 WPO PCT 2011/022254 A2, "Capacitive Oil Quality Monitoring Sensor With Fluorinated Barrier Coating", Feb. 24, 2011

## 제7절 고속열차 감속기 모드시험 및 시험평가


1. 양보석, “기계설비의 진동 상태 감시 및 진단”, 2006
2. (사)한국소음진동공학회, “ISO규격에 따른 기계설비의 상태감시와 진단”, 2006
3. 양보석, “진동법에 의한 설비진단의 실제”, 1999
4. 박찬경, 김영국, 김석원, 김기환, “한국형 고속전철의 주행시험을 통한 진동 모드분석 연구” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp, 254~259, 2003
5. Lee, S. H, Kim, K. J, Ha, J. Y 2000, An Experimental Study on Tooth-Meshing Frequency Components in Noise/Vibration of a Gearbox Under Operational Conditions, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference 2000, KAIST. DAEWOO HEAVY INDUSTRIES LTD, pp. 1096~1101
6. Eom, B. G, Lee, H. S 2012, Dynamic Analysis for Improvement of Running Stability of Rubber Tired AGT Localization Bogie, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 22, No. 4, pp. 307~317
7. D. J. Ewins, 2000, Modal Testing 2nd Ed, Research Studies Press LTD. Hertfordshire
8. Randall, Robert Bond, 2011, Vibration-based Condition Monitoring, John Wiley & Sons, Inc. West Sussex
9. J. Derek Smith, 2003, Gear Noise and Vibration 2nd Ed, Marcell Dekker INC, New York
10. James E. Berry, 2003, Analysis Special Vibration Signature Analysis Time waveforms and related Technologies Required to Evaluate Low High and Variable Speed Machines, Technical Associates Of Charlotte, P.C, Charlotte
11. Arthur R. Crawford, Steve Crawford, 1992, The Simplified Handbook Of Vibration Analysis Volume 2, Computational Systems Incorporated, Knoxville
12. Engineering Vibration by DANIEL J. INMAN, pp, 469~505

# 요 약 문

## Ⅰ. 제 목

진동 및 통합 모니터링 시스템 구축 (공동연구)

## Ⅱ. 연구개발과제 개요

철도차량산업이 고속화, 주요교통수단으로 기여도가 상승함에 따라 고속철도 고장이 발생할 경우 다수의 안전에 위험을 초래할 뿐만 아니라 운행시간 감소, 차량정비시간이 증가되어 승객의 불편을 초래하고 국가적으로 막대한 경제적 손실을 초래하게 된다.

따라서 본 연구에서는 고속철도 감속기를 상시 감시하여 가동 중인 철도차량의 상태를 실시간으로 관리해줌으로써 어떠한 결함이 발생해도 신속히 대처할 수 있으며, 결함의 형태를 분석함으로써 결함 개소 및 감속기 수명을 예측하여 정비 시간 단축 및  정비비용을 대폭 감속시키고자 한다.

KTX와 같은 국가 기반 시설은 피해가 발생되면 피해에 따른 영향이 매우 크고 반응이 빠르게 나타나게 되어 파급력이 매우 크다. 따라서 사전에 사고를 미리 예방하고, 결함이 발생할 때 차량이 재 운전될 수 있도록 수명을 예측하고, MTBF(Mean Time Between Failure)를 연장하고, 동시에 이에 따른 적절한 대책을 세우는 것이 중요하다. 이와 같은 예방을 위하여 고속철도 차량의 안정되고 신뢰성 있는 차량운행이 될 수 있도록 종합적인 감시기술도입이 시급하다.

## Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

연구개발은 3차년도에 걸쳐 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

### – 1차년도

- 현황실측 및 진단(실물/현차) 센서 부착위치 및 종류 최적 선정
- 관련 시스템 기술 적용 및 TEST
- 결함신호처리, 차속&결함 신호처리 판별방법 등 이론 확립
- 최적 기술 선정 및 모니터링 시스템 기본 설계
- S/W 적합성 테스트 수행

### – 2차년도

- 감속기 시스템 이상상태 진단 S/W (알고리즘 포함) 구축
- 감속기 이상상태 진단 H/W 구축 및 성능 시험
- 대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업용 S/W, H/W 구축 및 성능 시험

- 3차년도

■ 진동/윤활/온도 Monitoring 통합 H/W. S/W 최종 설계안 확정
■ 진동에 의한 결함 및 이상상태 분석/평가 시스템 실차적용 시험 및 업그레이드
■ 통합시스템 매뉴얼 작성
■ 진동/윤활/온도 상태 Monitoring 통합 시스템 구축

## Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

고속열차용 감속기 모니터링 시스템(T-GMS, Train Gearbox Monitoring System)은 다양한 감속기의 상태(진동, 온도, 윤활) 진단 기술을 적용하여 실시간으로 예지보전기법의 진단 파라미터를 제공함과 아울러 위험신호를 감지하는 역할을 수행할 수 있다.

T-GMS는 철도차량의 대차 구조상 차량 하부에 서버 시스템(Sever System) 탑재가 어렵고 대차 하부 구동부의 센서로부터 객차 내부로 신호 케이블의 동선이 길고 복잡하여 이를 간소화하는 것에 초점을 두어 대차 하부에는 클라이언트(Client)를 상부에는 서버 시스템을 설치하는 방법으로 구성하였다.

위와 같은 구성은 클라이언트에서는 모든 신호연산처리를 완료하고 이 신호를 서버에 TCP/IP 프로토콜로 간단하게 전송하므로 이미 연산된 데이터가 케이블 노이즈의 영향이 없을 뿐만 아니라 서버는 그래픽과 클라이언트 네트워킹 운용만 담당하므로 시스템의 안정성이 높다.

## Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

본 연구에서는 감속기에서 발생하는 신호(온도, 진동, 윤활유 상태)를 상시 모니터링하고 실시간 분석, 진단하여 이상발생시 기관사에게 즉시 통보되는 감속기 이상 상태 모니터링시스템 기술개발이며, 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 진동을 이용한 감속기 모니터링 및 진단시스템 개발 (측정범위10㎐~20㎑)
- 최고속도 400㎞/h까지 적용 가능 (실차 검증속도 300㎞/h)
- 주요 고장에 대한 이상상태 모니터링 및 진단시스템 신뢰도 95% 이상

감속기 이상 상태 모니터링 시스템은 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상의 감시에 효과적이며, 주기적 검사 비용 및 철도 운행 중단에 따른 경제적인 손실을 최소화 할 수 있으며, 본 연구 개발 기술로 인하여 철도 차량의 감시 기술력 확보가 가능할 것으로 판단된다.

## Ⅵ. 연구성과 사업화 방안

본 연구를 통해 개발된 감속기 모니터링 시스템은 고객의 요구 조건에 맞춰 소량생산을 계획하고 있으며, 본 연구 개발품을 수요대상 업체 및 기관을 대상으로 직접 마케팅 홍보를 할 계획이다.

제품 상업화 이후 여러 마케팅 전략을 수립하여 홍보 활동을 진행을 해서 점차적으로 시장 점유율을 높일 예정으로 센서 전체 시장 중 19%를 점유하고 있는 산업 현장 분야를 1차 공략 시장으로 선정하여 마케팅 활동을 진행할 예정이다. 일단 제품 상업화 이후 목표 시장 점유율은 약 15% 정도를 초기 공략 목표로 하고 이후 제품의 다품종 연구를 지속적으로 수행하여 각 옵션별 기능에 맞춘 다양한 모델 출시로 시장 점유율을 점진적으로 높여나갈 예정이다. 최종적으로는 국내 센서와 계측기 분야 시장을 포괄적으로 포함시킬 수 있는 제품으로 판단되기 때문에 최종 공략 시장 점유율은 약 40% 공략을 목표로 하고 있다.

## 2. 연구성과물

○ 연구목표 및 내용 (총괄)

| 연 차 | 연구목표 | 주요 연구내용 |
|---|---|---|
| 1차년도 | ■ 현황실측 및 진단(실물/현차) 센서 부착위치 및 종류 최적 선정 | ■ 현황실측 및 진단실 열차 주행시험 및 LAB Test<br>■ GEAR BOX 정밀 진단 내용 발표 진행 |
| | ■ 관련 시스템 기술 적용 및 TEST<br>■ 결함신호처리, 차속&결함 신호처리 판별방법 등 이론 확립 | ■ 국내외 기술 현황 점검<br>→ 해외 기술 현황 조사<br>→ 관련 전문 시스템 시험 진행<br>■ 결함 확률, 결함 분포, 실차 특성 요소 등 감시 파라미터 이론 확립 |
| | ■ 최적 기술 선정 및 모니터링 시스템 기본 설계<br>■ S/W 적합성 테스트 수행 | ■ 모니터링 시스템 H/W, S/W 초기설계 (대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함)<br>■ 최적 기술 s/w 적용 및 적합성 Test<br>■ 온라인 모니터링 시스템 구비<br>■ 필요 Module 선정 및 test |
| 2차년도 | ■ 감속기 시스템 이상상태 진단 S/W (알고리즘 포함) 구축 | ■ 시제품 시스템 성능 평가를 위한 진단 파라미터 재정립 및 확정<br>■ 사용자 요구사항을 최적 반영한 User interface 구축 |
| | ■ 감속기 이상상태 진단 H/W 구축 및 성능 시험 | ■ 시스템 하드웨어 시스템 구축<br>■ 감속기 모니터링 시스템 실물 및 실차 적용 시험 |
| | ■ 대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업용 S/W, H/W 구축 및 성능 시험 | ■ 대차 진동 백업 기능 추가 및 성능 시험 (S/W, H/W) |
| 3차년도 | ■ 진동/윤활/온도 Monitoring 통합H/W. S/W 최종 설계안 확정 | ■ 통합신호의 Input/Output 알고리즘<br>■ 통신 유/무선화 및 KTX-OBCS 연계 방안 수립 |
| | ■ 진동에 의한 결함 및 이상상태 분석/평가 시스템 실차적용 시험 및 업그레이드 | ■ 모니터링 시스템 적용 및 시운전을 통한 감속기 결함 및 이상상태 H/W, S/W, 알고리즘 검증 및 보완<br>■ 진동 이상상태 기준 확립<br>■ 실차 장착용 하드웨어 시스템 내구성 테스트 등 공인인증 시험 진행<br>■ 최종 승인 시험 진행 – 제품 상용화 실현 |
| | ■ 통합시스템 매뉴얼 작성 | ■ 통합시스템 실용화 방안제시<br>■ 통합 시스템 유지보수 매뉴얼 작성 |

○ 연구 성과 증빙 자료

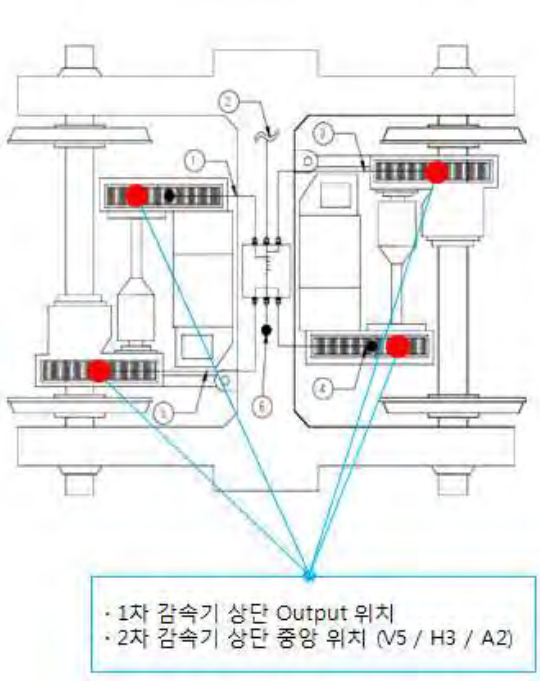
1. 1차년도 증빙 자료

(1) 모니터링 시스템 H/W 기본 설계

- KTX 부품별 고유 주파수 분석 및 ODS 분석

| 측정 Point | Natural Frequency | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1차 감속기 입력기어 | 2450Hz | 4400Hz | 4828Hz | | |
| 1차 감속기 중간기어 | 1728Hz | 2400Hz | | | |
| 1차 감속기 출력기어 | 2043Hz | 2748Hz | | | |
| 1차 감속기 중간기어 축 | 3015Hz | 3300Hz | 3734Hz | | |
| 모터 | 193Hz | 393Hz | 851Hz | | |
| 모터-1차감속기 | 146Hz | 212Hz | | | |
| Tripod | 2337Hz | 2643Hz | | | |
| 차륜 | 380Hz | 967Hz | | | |
| 2차 감속기-차축 | 141Hz | 181Hz | 276Hz | 382Hz | 647Hz |
| 2차 감속기-차축-차륜 | 113Hz | 707Hz | 1736Hz | | |
| 차축 | 220Hz | 570Hz | 962Hz | | |
| 대차 | 585Hz | 897Hz | 1615Hz | | |

- 최적 센서 측정 위치 선정

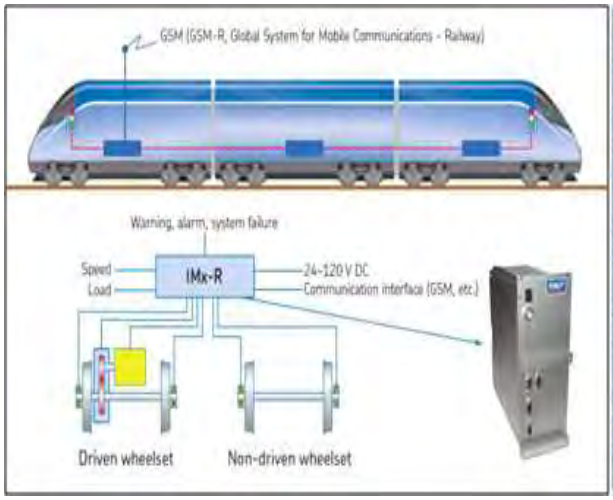



NOTES

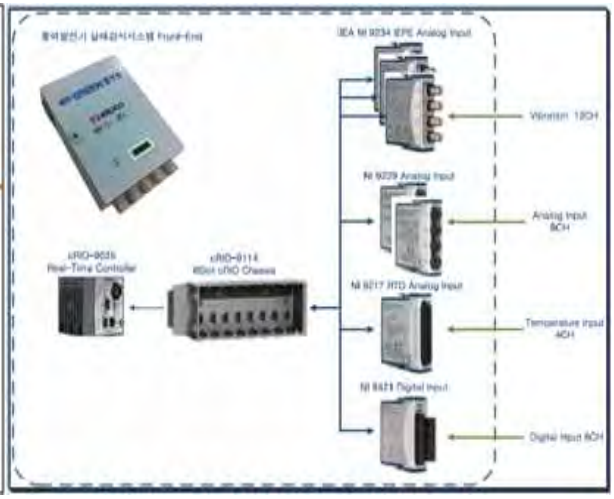
1. ① 객실 1차 감속기 (2 Direction Sensor) : 10 mv/g, ~ 6400Hz
   측정 항목 : Vibration, Lubrication, Temperature
   측정 방향 : 횡방향(X), 축방향(Z)
   ③ 동력 2차 감속기 (2 Direction Sensor) : 10 mv/g, ~ 6400Hz
   측정 항목 : Vibration, Lubrication, Temperature
   측정 방향 : 횡방향(X), 축방향(Z)
   ④ 동력 1차 감속기 (2 Direction Sensor) : 10 mv/g, ~ 6400Hz
   측정 항목 : Vibration, Lubrication, Temperature
   측정 방향 : 횡방향(X), 축방향(Z)
   ⑤ 객실 2차 감속기 (2 Direction Sensor) : 10 mv/g, ~ 6400Hz
   측정 항목 : Vibration, Lubrication, Temperature
   측정 방향 : 횡방향(X), 축방향(Z)
2. ⑥ Bogie (1 Direction Sensor) : 100mv/g, ~ 500Hz (raw data 저장)
   측정 항목 : Vibration
   측정 방향 : 횡방향(X)
3. Etc
   ⑦ Power Supply, Communication Lan cable

<감속기 최적센서 위치의 선정>

– 감속기 진동 모니터링 시스템 기본 설계 (유사 온라인 모니터링 시스템 비교)




<SKF 모니터링 시스템>

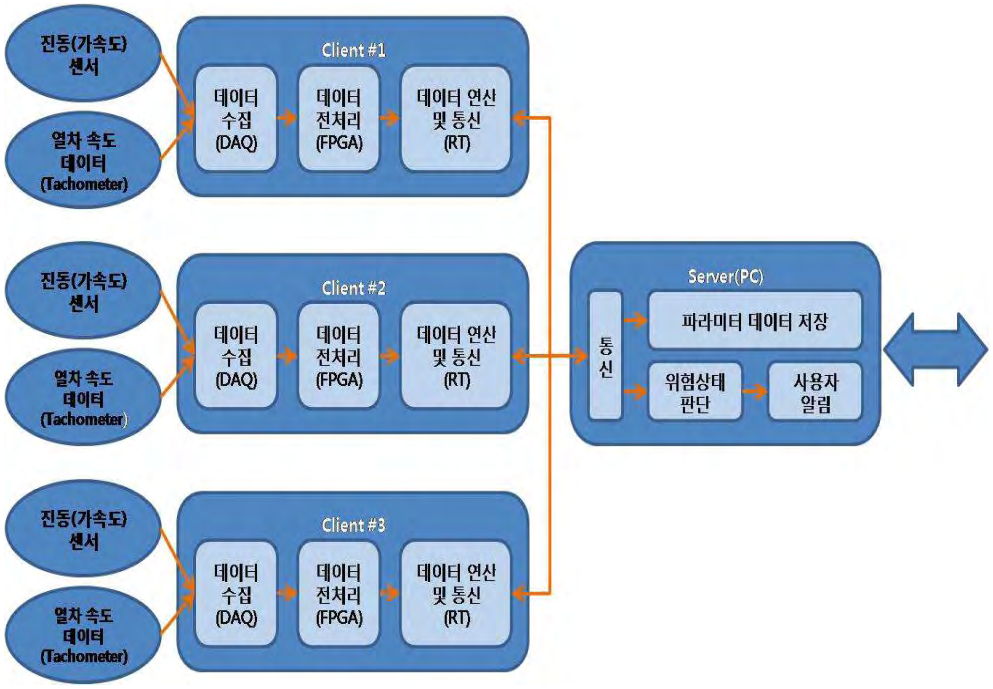


<SM 인스트루먼트 풍력발전용 모닐러링 시스템>

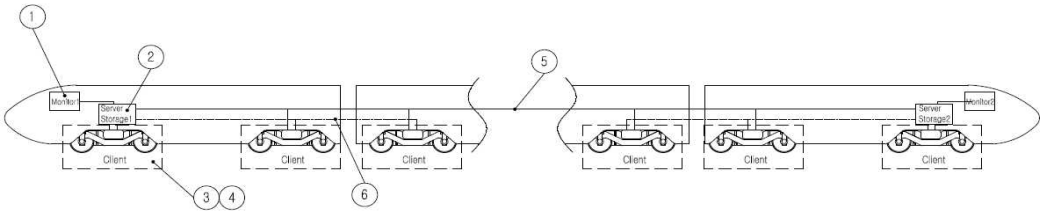
<감속기 모니터링 사양 검토 내용과 상용제품 비교 정리>

| 분류 | EMERSON | SM INSTRUMENT | SKF | KTM |
|---|---|---|---|---|
| H/W 채널 | • 24 Ch. | • 진동 : 12 Ch.<br>• AI : 8 Ch.<br>• 온도 : 4 Ch.<br>• DI : 8 Ch. | • 온도 : 8 Ch.<br>• 진동 : 8 Ch.<br>• 속도 : 4 Ch. | • 진동 : 9 Ch.<br>• 온도 : 16 Ch.<br>• 윤활 : 4 Ch.<br>• 속도 : 1 Ch.<br>(1 Client 기준) |
| 주요 용도 | • 산업용 터빈, 발전기, 기어, 블로워 | • 풍력발전기<br>(산업용 변형) | • 철도차량<br>(제지, 철강, 산업용 변형) | • 철도차량 전용, 변속기어박스 전용 |
| 가격 | • 약 1억~1억 5천 | • 약 1억~1억5천 | • 약8천~1억 | |
| 데이터 수집 및 전송 | • Real time 데이터 전송<br>• Hub and Nic 이더넷 통한 서버 전송 | • Real time 데이터 전송<br>• FTP 통신 이용 측정 데이터 자동 전송 | • Real time 데이터 전송<br>• CM Data 이더넷을 통한 서버전송 | • Real time 데이터 전송<br>• 이더넷을 이용한 서버-클라이언트 구조 |
| 측정 가능 주파수 | • 2ch. 모니터 0-40 kHz | • Vibration RMS 산출 (0.1-100Hz, 10-1kHz) | • 최대 250km/h 적용 가능 주파수 | • 12.8 ks/s 샘플링 데이터 FFT데이터, RMS 데이터 |
| 주요 측정 진동 | • 40kHz Fmax, 6400 lines resolution<br>• Peakvue 베어링 충격 파형 Demodulation<br>• FFT 시간 파형 및 위성 분석 자동 진단 기능<br>• 2kHz, 12800lines waveform 저장 가능(Transient)<br>• 100시간 이상 waveform 저장 가능 | • order analysis : 10분 평균 Power Vibration 1MA, 3MA 산출<br>• HFBP (1k~10kHz) 산출<br>• 10분 주기 데이터 파일 저장<br>• Trigger에 의한 시간 파형 저장<br>• 10분 평균 order spectrum | • Hot Axle Box 베어링 온도 상승 시 기차 운행 정지<br>• Boogie hunting Detection<br>• TSI 파라미터 에서 Relay 기능<br>• 철도차량의 안정성 측정 | • FFT, RMS 측정 및 진단<br>• 6.4khz, 5~120 line resolution search Demodulation<br>• 대차 진동 측정<br>• 감속기 진동 측정<br>• 10시간(1일기준) 진동파형 저장 (Raw Data) |
| 부가 기능 | • 네트워크 손실을 고려한 8MB 저장 | • FTP 통신을 이용한 측정 데이터 자동 전송 | • 실시간 데이터 LCD 모니터 display 기능 탑재 진행 | • 실시간 데이터 감시 및 선택적 FFT 파라미터 실시간 모니터링 |

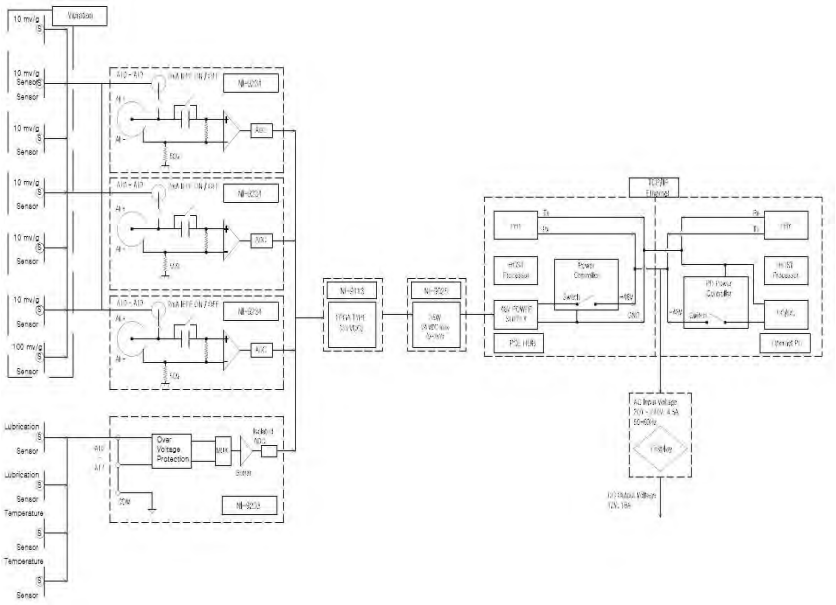
– 모니터링 시스템 기본 설계




<모니터링 시스템 진단 시스템 구성도>




<시스템 레이아웃 도면>



<시스템 전기도면 내용>

(2) 모니터링 시스템 S/W 기본 설계

1. 시스템 인터페이스(System Interface)

가. 보조시스템은 측정한 진동데이터를 바탕으로 각종 파라미터를 추출해낸 후 메인시스템에 전달하고, 메인시스템은 수신된 파라미터 정보를 이용하여 감속기의 이상 상태를 예측하고 사용자에게 결과를 나타내줌으로써 사용자가 적절한 시기에 감속기의 유지보수를 수행할 수 있도록 도와준다.

2. 사용자 인터페이스(User Interface)

가. 사용자는 필요에 따라 각 대차별, 감속기별, 센서별로 측정된 누적정보를 확인할 수 있다.

3. 하드웨어 인터페이스(Hardware Interface)

가. 메인시스템

(1)CPU : Intel-core I7 - 2 Generation 2600 이상 급

(2)Memory : Samsung DDR3 4G PC3-10600(X2)

(3)HDD : Segate 2TB

(4)Ethernet : Acchouses SSS100B RS232 (10/100 Mbps Ethernet)

4. 소프트웨어 인터페이스(Software Interface)

가. 메인시스템 (Server)

(1) OS : Microsoft Windows7

(2) GUI 및 개발환경 : NI Labview2011 sp1

나. 보조시스템 (Client)

(1) OS : VxWorks

(2) 개발 환경 : NI Labview2011 sp1

5. 통신 인터페이스(Communications Interface)

(1) 메인시스템 : 10/100 Mbps Ethernet

(2) 보조시스템 : 10/100 Mbps Ethernet

6. 제약 조건

가. 사용되는 상태분석 방법은 널리 성능이 입증된 것을 사용한다.

7. 개발 범위 (Scope)

가. 본 프로젝트의 개발 범위는 다음과 같다.

(1) (기능 1) 진동을 통한 감속기 상태진단

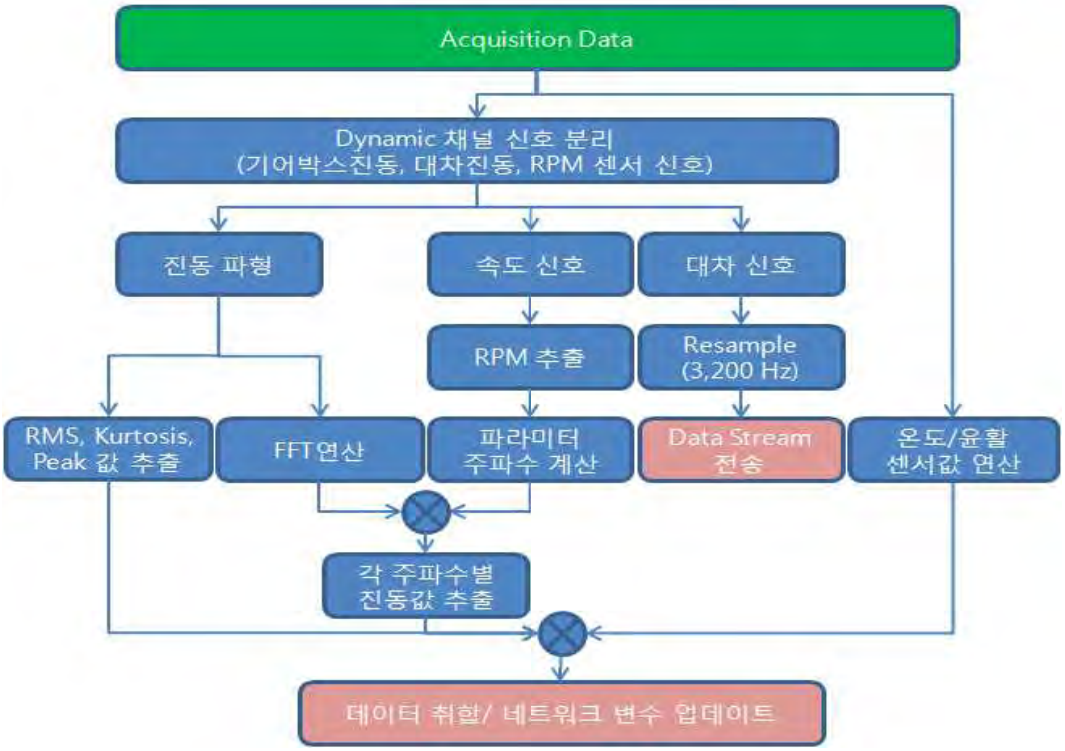
(2) (기능 2) 윤활을 통한 감속기 상태진단

(3) (기능 3) 온도를 통한 감속기 상태진단

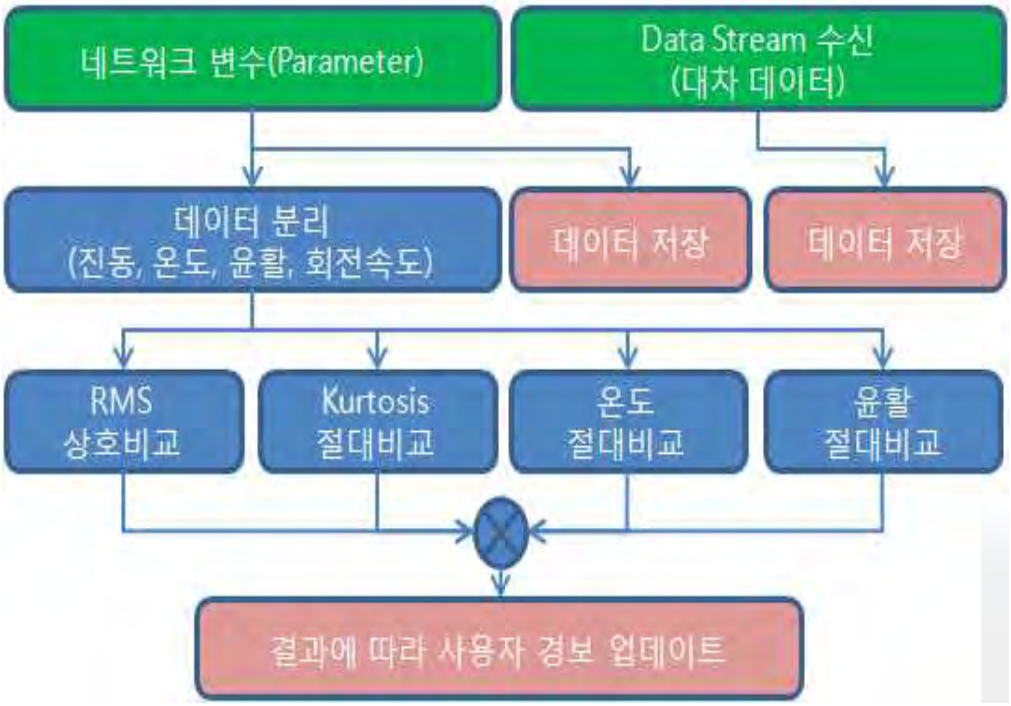
(4) (기능 4) 사용자 디스플레이

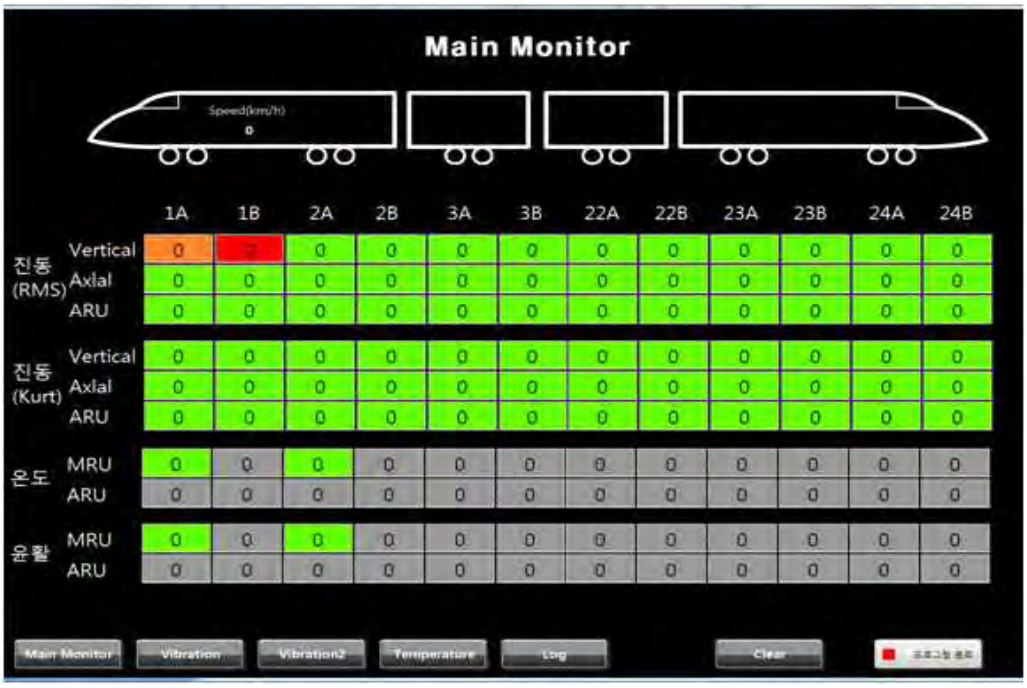
(5) (기능 5) 추출된 파라미터 데이터의 저장

# 클라이언트

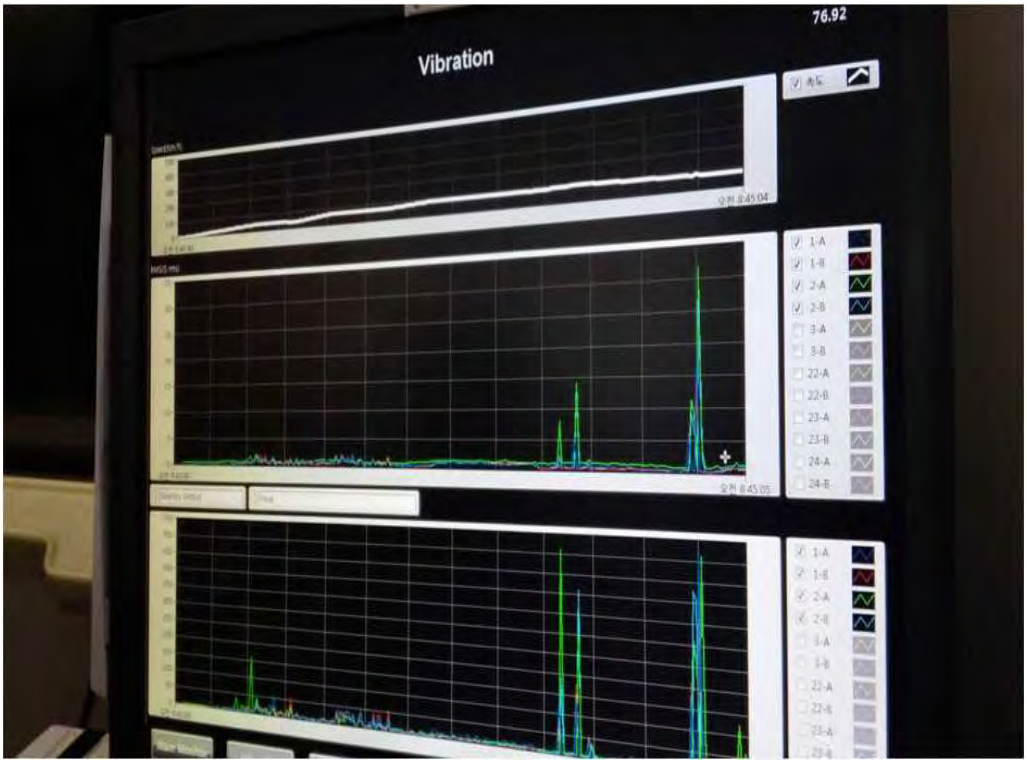

Acquisition Data
Dynamic 채널 신호 분리
(기어박스진동, 대차진동, RPM 센서 신호)
진동 파형
속도 신호
대차 신호
RPM 추출
Resample
(3,200 Hz)
RMS, Kurtosis,
Peak 값 추출
FFT연산
파라미터
주파수 계산
Data Stream
전송
온도/윤활
센서값 연산
각 주파수별
진동값 추출
데이터 취합/ 네트워크 변수 업데이트

# 서버


네트워크 변수(Parameter)
Data Stream 수신
(대차 데이터)
데이터 분리
(진동, 온도, 윤활, 회전속도)
데이터 저장
데이터 저장
RMS
상호비교
Kurtosis
절대비교
온도
절대비교
윤활
절대비교
결과에 따라 사용자 경보 업데이트




<소프트웨어 GUI 메인 화면 >




<모니터링 시스템 진동 데이터 취득 화면>

(3) 감속기 진동 특성 분석 시험



<전동차용 감속기 실물시험 (2012.3.8.)>

2. 2차년도 실적 증빙 자료

(1) 모니터링 시스템 시제품 제작 – H/W, S/W

– 감속기 모니터링 시스템 H/W

<하드웨어 사양>

| 구분 | 내용 |
|---|---|
| (H/W) 채널 | • 진동: 7 ch , 온도: 16ch, 윤활:4ch, 속도:1ch |
| 주요 용도 | • 철도차량 전용, 변속기어박스 전용 |
| 데이터수집및전송 | • Real Time 데이터 전송<br>• 이더넷을 이용한 server – client 구조 |
| 측정 가능 주파수 | • 12.8ks/s의 샘플링 데이터 FFT 데이터, RMS 데이터 전송(최대 400 km/h) 적용 가능 |
| 주요측정진동 | • FFT, RMS 측정 및 진단<br>• 6.4khz, 5,120line resolution search Demodulation<br>• 10분 주기 데이터파일 저장<br>• 파라미터 Relay 기능<br>• 대차 진동 측정<br>• 감속기 진동 측정 |
| 부가 기능 | • 실시간 데이터 감시 및 선택적 FFT 실시간 모니터링 |

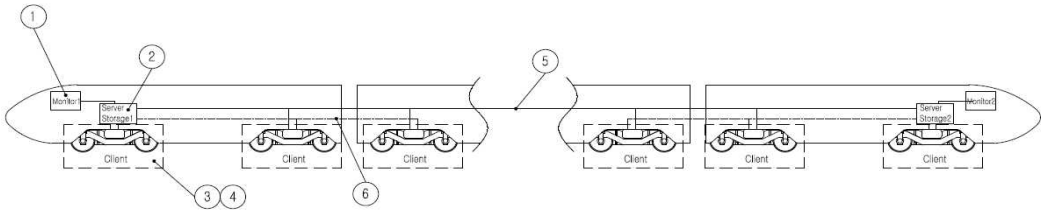




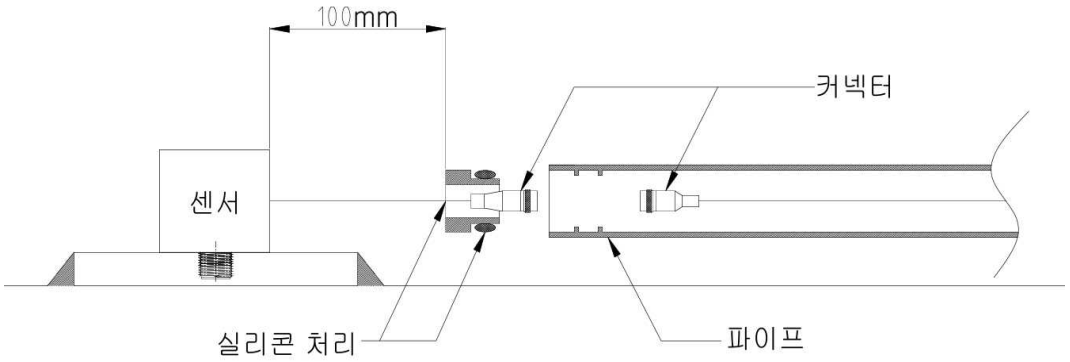
<서버 클라이언트 보호함 제작(좌 – 1차, 우 – 2차>

<각 채널별 센서 연결위치>

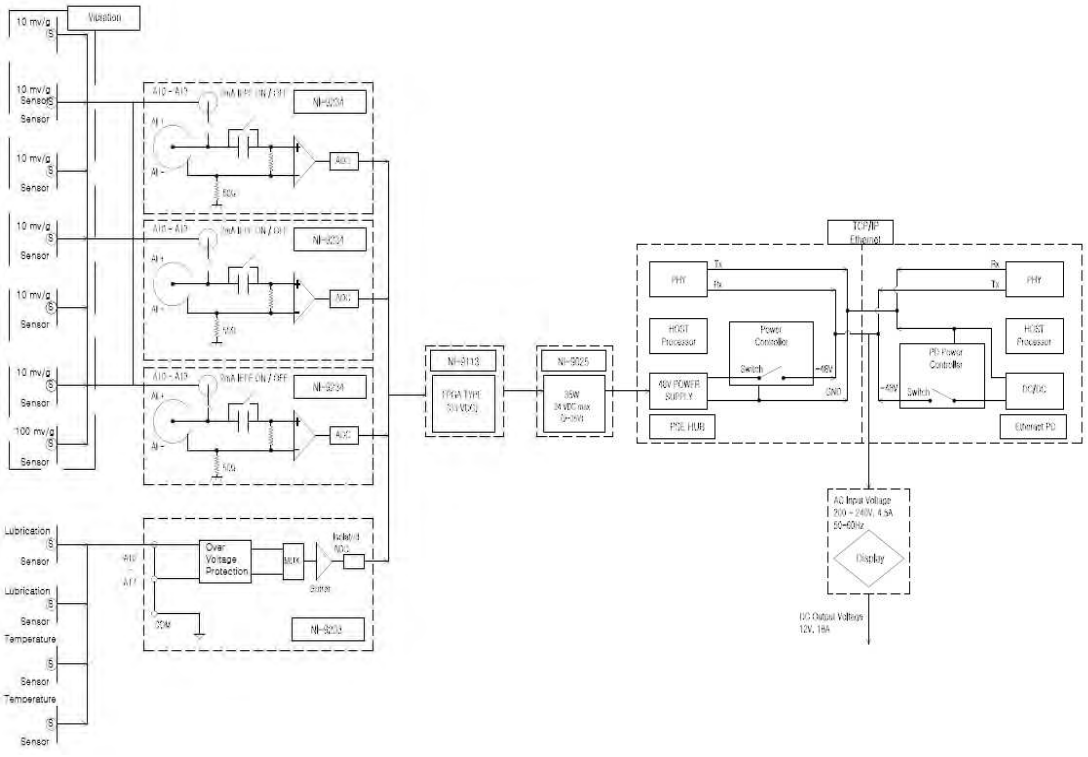
| 모듈 이름 | 채널 No. | 센서 포인트 | 기타 |
|---|---|---|---|
| 가속도 모듈 #1 | 0 | #1 Gearbox MRU Vertical | IEPE Sensor |
| | 1 | #1 Gearbox MRU Axial | IEPE Sensor |
| | 2 | #1 Gearbox ARU Vertical | IEPE Sensor |
| | 3 | Bogie Axial | IEPE Sensor |
| 가속도 모듈 #2 | 0 | #2 Gearbox MRU Vertical | IEPE Sensor |
| | 1 | #2 Gearbox MRU Axial | IEPE Sensor |
| | 2 | #2 Gearbox ARU Vertical | IEPE Sensor |
| | 3 | RPM Sensor | – |
| 온도 모듈 | 0~2 | #1 Gearbox MRU Bearing | T type |
| | 3~6 | #1 Gearbox ARU Bearing | T type |
| | 7~9 | #2 Gearbox MRU Bearing | T type |
| | 10~13 | #2 Gearbox ARU Bearing | T type |
| | 14 | System Box | T type |
| | 15 | Outside | T type |
| 윤활모듈 | 0 | #1 Gearbox MRU | |
| | 1 | #1 Gearbox ARU | |
| | 2 | #2 Gearbox MRU | |
| | 3 | #2 Gearbox ARU | |




<시스템 레이아웃 도면>

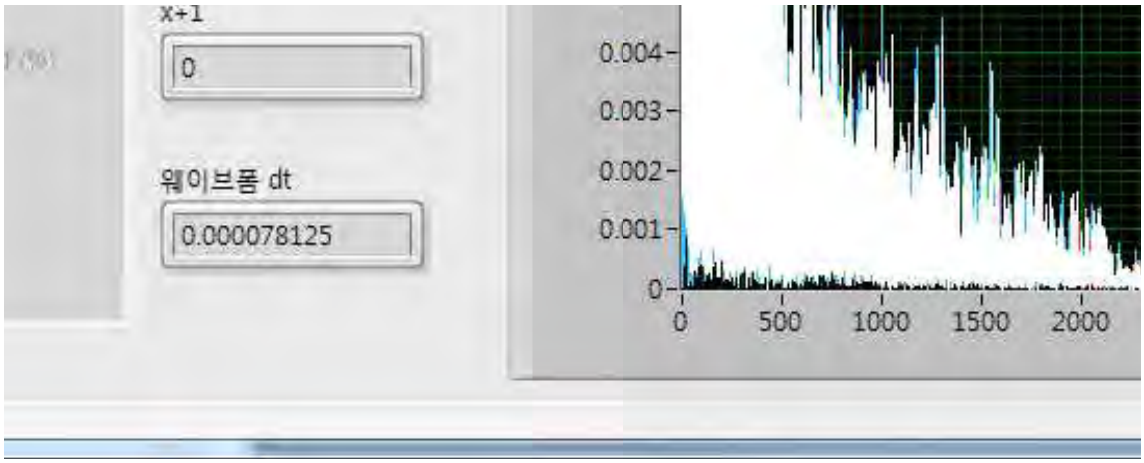



<센서 취부 방법>




<시스템 전기도면 내용>

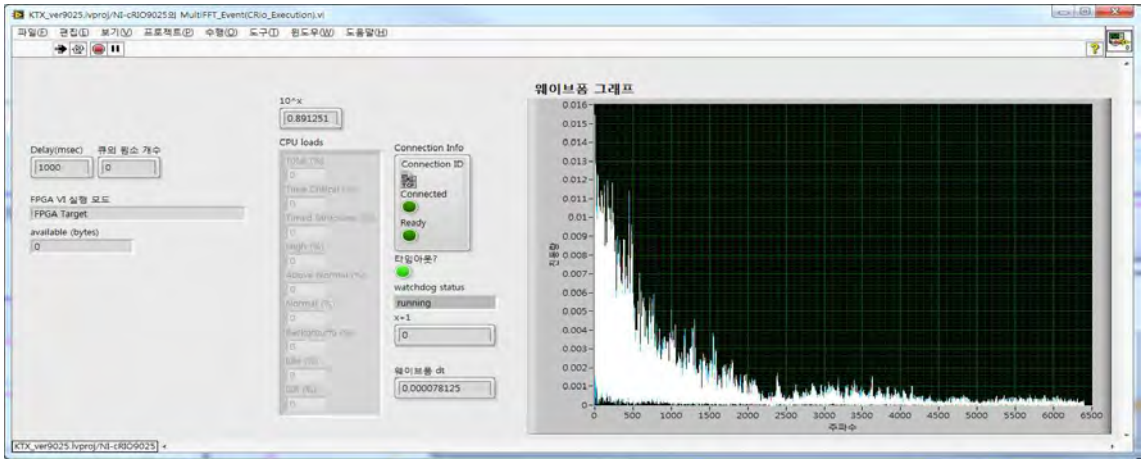
– 진동 측정 최대 샘플링 (12 kHz 이상)




<수집된 웨이브 폼의 데이터당 시간간격을 출력>

ⓐ 1초를 dt로 나눔 ( 1 ÷ 0.000078125 = 12800(S/s) )
ⓑ 초당 12,800개의 데이터를 샘플링하는 것을 확인할 수 있음

– 샘플링 데이터 FFT 확인



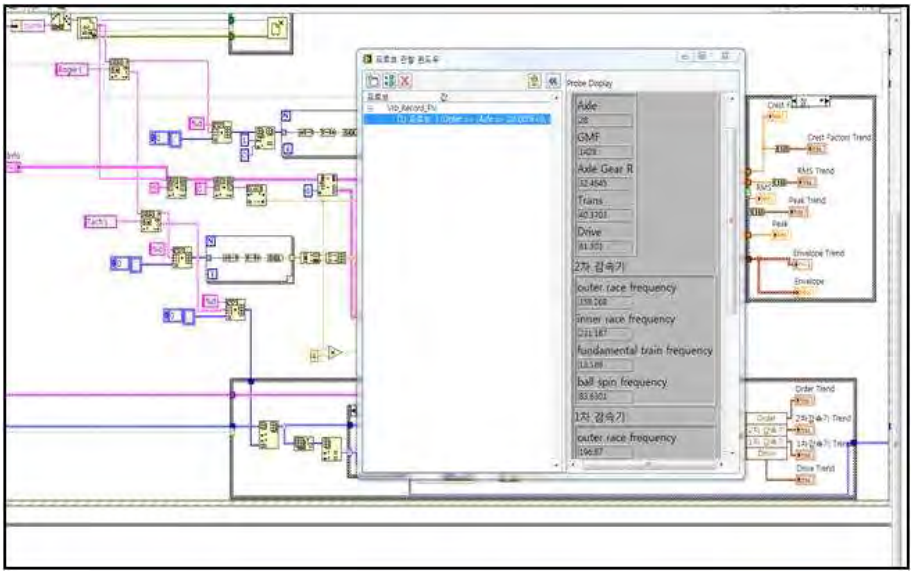

<Client에서 연산된 FFT 데이터 그래프>

ⓐ 이론적으로 FFT연산데이터는 실제 샘플링 주파수의 1/2 주파수까지 확인이 가능함
ⓑ 해당 그래프의 X축 데이터(주파수 영역)가 6400 까지 표시되는 것을 확인할 수 있음

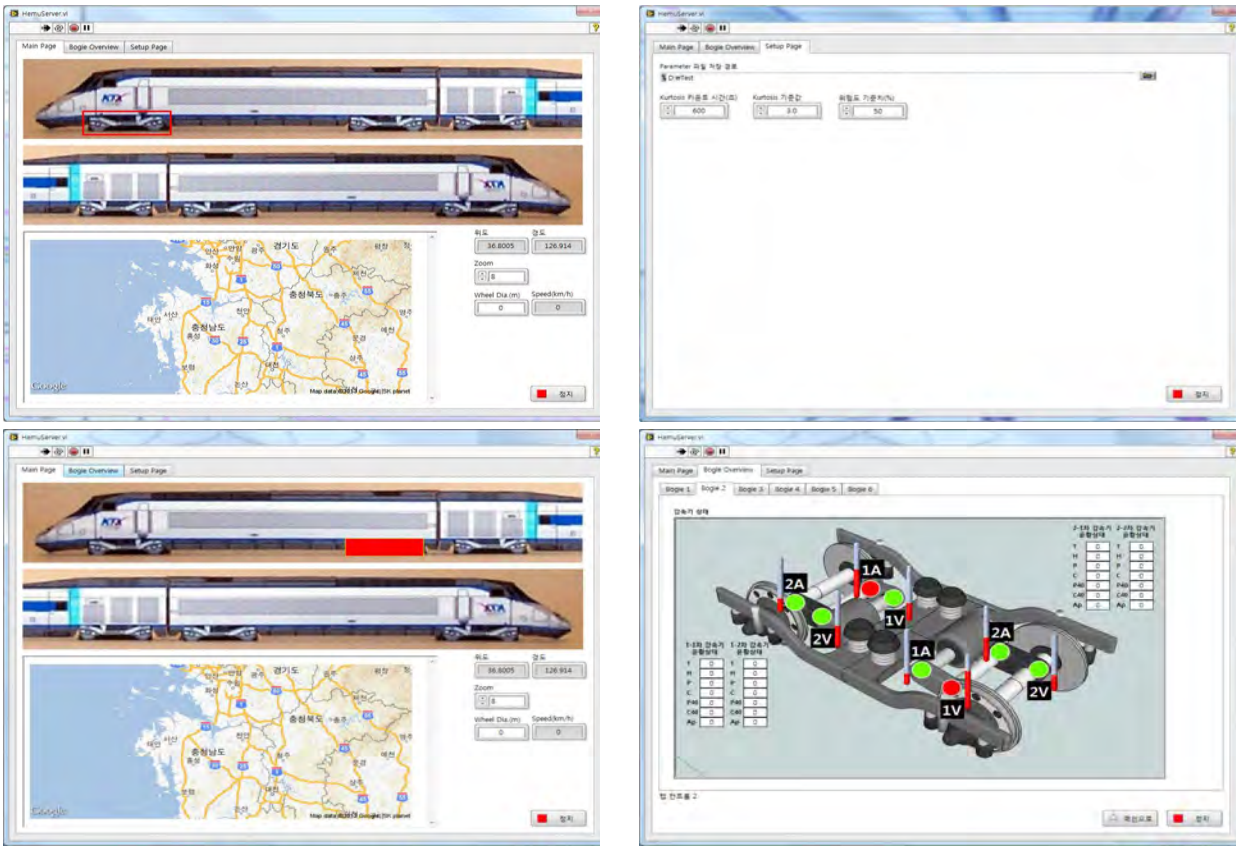
– 감속기 모니터링 시스템 S/W

<감시 및 진단 알고리즘이 포함된 감시 파라미터>

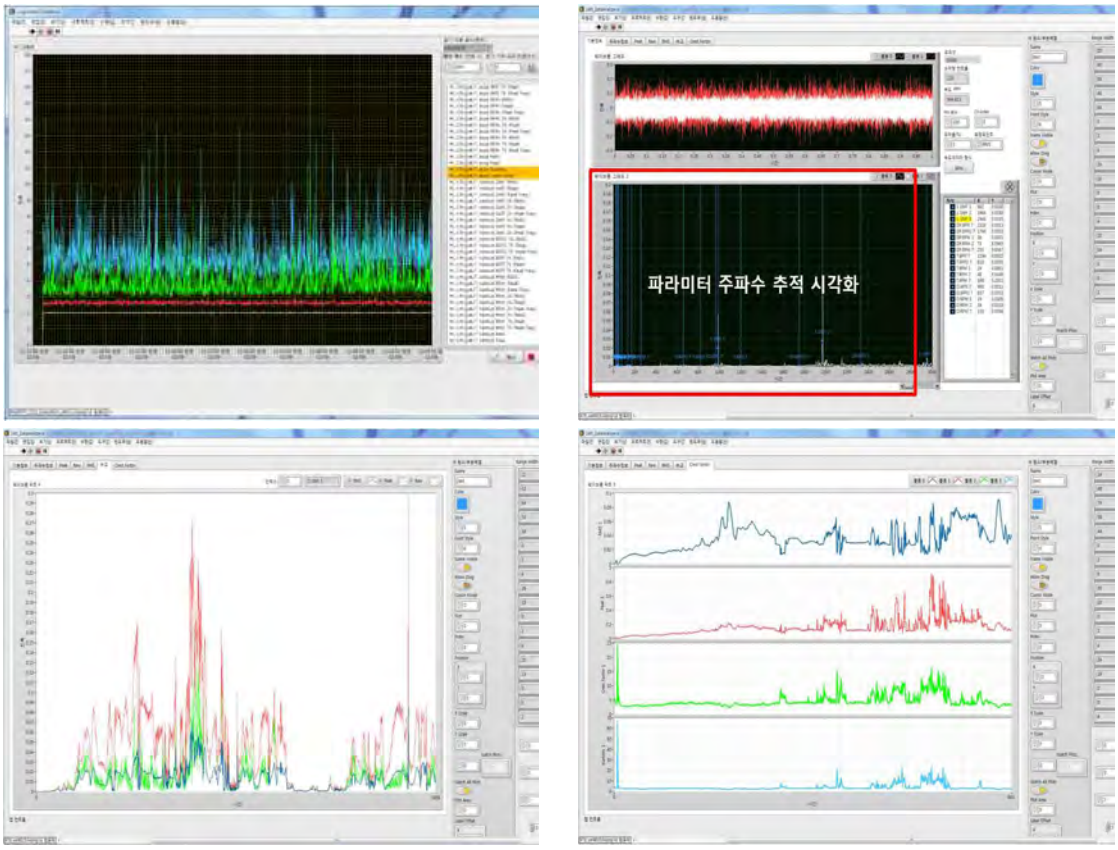
| Parameters | 설 명 |
|---|---|
| Peak / RMS<br>Crest factor | • 파형의 첨예한 정도를 나타내며 값이 클수록 열차의 진동 충격이 심하다는 것을 의미 |
| GMF | • 기어의 이빨이 맞물리는 부분 상태를 의미하는 것으로 기어의 편심, 치형 마모, 과도 백래쉬의 상태를 진단하기 위하여 선정 |
| GMF 2X, 3X | • 기어의 Misalignment 등을 진단하기 위하여 선정 |
| BPFI 7X | • 베어링 내륜 주파수 7배 성분<br>• 베어링의 외륜, 내륜에 손상이 가면 베어링 주파수의 특성은 고주파에서 주파수가 감지가 되어 점차 저주파수로 옮겨가면서 주파수가 나타남. 초기 베어링 결함을 감지하기 위하여 선정 |
| BPFO 7X | • 베어링 외륜 주파수 7배 성분 |
| 1X Shaft | • 고속열차 감속기 축에서 Unbalnce, Angle Misalignment, 치의 절손 등이 발생하게 되면 1x의 주파수가 발생. 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 2X Shaft | • 감속기 축에서 Offset Misalignment가 발생하면 shaft 2~3X의 주파수가 발생. 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 7X Shaft | • 감속기 축에서 Looseness가 발생하면 shaft 3~8X의 주파수가 발생. Looseness가 발생하는 이유는 기계적 조립상태에 문제가 있는 것으로 조기 이러한 결함을 검출하여 조치를 취하기 위하여 선정 |
| Kurtosis | • 베어링과 기어에서 발생하는 충격진동의 파형의 첨도(尖度)를 나타내는 것으로 파라미터 선정 |



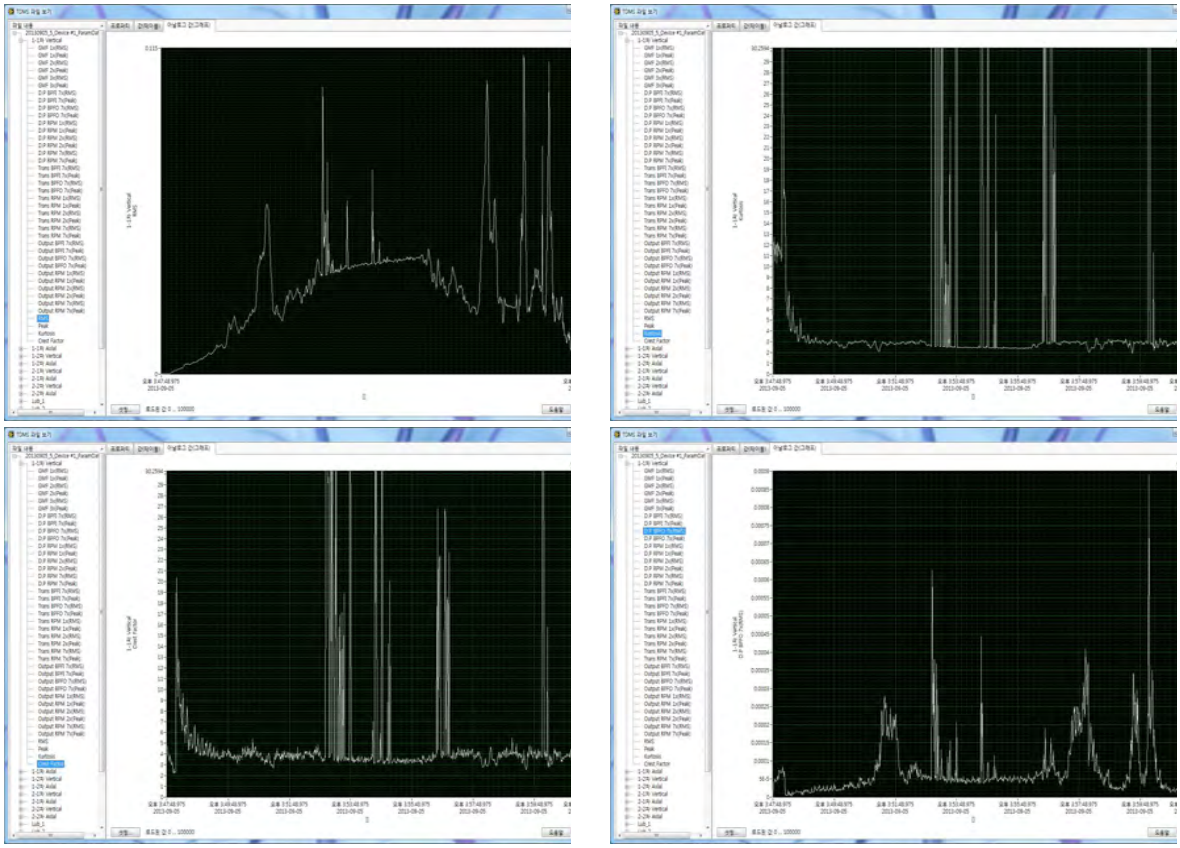

<시스템 구성 설계 (Labview)>




<소프트웨어 GUI>



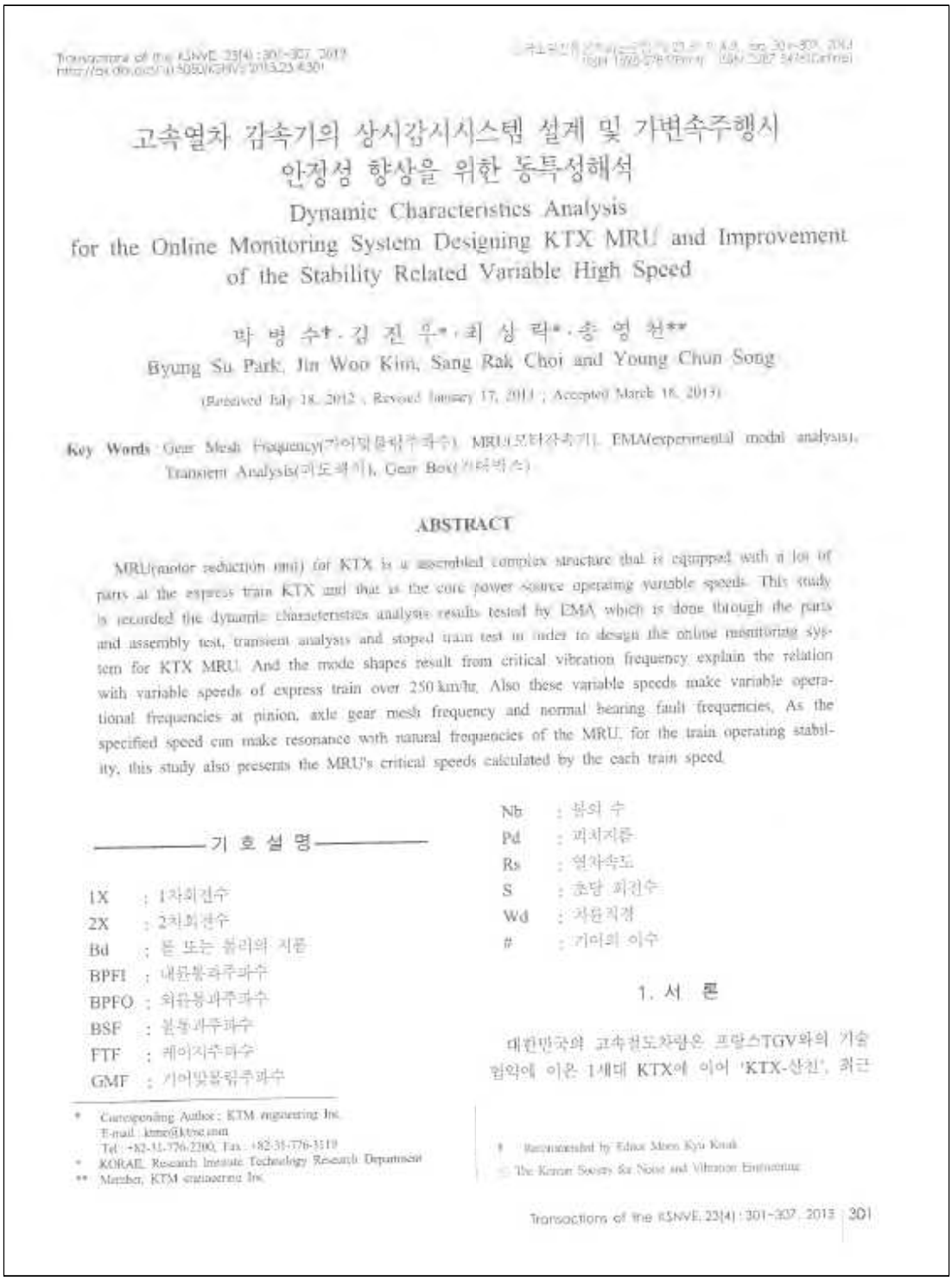

<소프트웨어 검증>



<진동 파라미터 검증 작업>

(2) 논문 게재 및 발표

| 번호 | 세부연구내용 | 활동내역 | 증빙서류 내역 |
|---|---|---|---|
| 1 | 소음진동 공학회 논문 게재 (2013년 4월) | • 논문 게재 | • 논문 게재 내용 첨부 |
| 2 | 한국철도학회 논문 발표 진행 (2013년 5월) | • 철도학회 논문 발표 | • 발표 관련 논문 일정 내용 첨부 |



Transactions of the KSNVE, 23(4) : 301~307, 2013
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.23.4.301

# 고속열차 감속기의 상시감시시스템 설계 및 가변속주행시 안정성 향상을 위한 동특성해석

# Dynamic Characteristics Analysis for the Online Monitoring System Designing KTX MRU and Improvement of the Stability Related Variable High Speed

박 병 수† · 김 진 우* · 최 상 락* · 송 영 천**
Byung Su Park, Jin Woo Kim, Sang Rak Choi and Young Chun Song

(Received July 18, 2012 ; Revised January 17, 2013 ; Accepted March 18, 2013)

**Key Words** : Gear Mesh Frequency(기어맞물림주파수), MRU(모터감속기), EMA(experimental modal analysis), Transient Analysis(과도해석), Gear Box(기어박스)

## ABSTRACT

MRU(motor reduction unit) for KTX is a assembled complex structure that is equipped with a lot of parts at the express train KTX and that is the core power source operating variable speeds. This study is recorded the dynamic characteristics analysis results tested by EMA which is done through the parts and assembly test, transient analysis and stoped train test in order to design the online monitoring system for KTX MRU. And the mode shapes result from critical vibration frequency explain the relation with variable speeds of express train over 250 km/hr. Also these variable speeds make variable operational frequencies at pinion, axle gear mesh frequency and normal bearing fault frequencies. As the specified speed can make resonance with natural frequencies of the MRU, for the train operating stability, this study also presents the MRU's critical speeds calculated by the each train speed.

## 기 호 설 명

1X : 1차회전수
2X : 2차회전수
Bd : 볼 또는 롤러의 지름
BPFI : 내륜통과주파수
BPFO : 외륜통과주파수
BSF : 볼통과주파수
FTF : 케이지주파수
GMF : 기어맞물림주파수
Nb : 볼의 수
Pd : 피치지름
Rs : 열차속도
S : 초당 회전수
Wd : 작용직경
# : 기어의 이수

## 1. 서 론

대한민국의 고속철도차량은 프랑스TGV와의 기술 협약에 의한 1세대 KTX에 이어 'KTX-산천', 최근

* Corresponding Author : KTM engineering Inc.
E-mail : ktme@ktme.com
Tel : +82-31-776-2200, Fax : +82-31-776-3119
* KORAIL Research Institute Technology Research Department
** Member, KTM engineering Inc.

† Recommended by Editor Moon Kyu Kwak
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering



<논문 게재 내용>

(3) 특허 출원 – 공동출원 협약서 첨부 예정

# (특허) 공동출원 협약서

한국철도기술연구원(이하 "갑" 이라 한다)과 케이티엠엔지니어링(주) (이하 "을" 이라 한다)는 (철도 핵심부품 및 장치 기술개발사업)의 발명에 대하여 공동으로 특허출원을 추진함에 있어 다음과 같이 협약을 체결한다.

제1조 (목적)

이 협약은 "철도 핵심부품 및 장치 기술개발사업" 에서 발생된 지식재산권 3건의 그에 따른 권리 구분 등과 관련된 제반사항을 정함을 그 목적으로 한다.

1. 지식 재산권 3건 목록

① 전동열차의 진동 측정 시스템 (출원번호 : 10-2012-0157298 [2012.12.28] )

② 전동열차의 신동 측정 장치 (출원번호 : 10-2013-0011654 [2013.2.1] )

③ 고속 전동 열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템 (출원번호 : 10-2014-0074559 [2014.6.18] )

제2조 (권리 지분)

"갑" 과 "을" 은 본 발명에 대한 특허를 받을 수 있는 권리를 공유하며, 그 지분은 "갑" 이 50%, "을" 이 50%로 한다.

제3조 (출원 절차)

① "갑" 은 본건 발명의 특허출원에서 등록까지의 절차(국내외)와 등록이후의 권리유지 보전에 관한 절차를 수행한다.

② "갑" 과 "을" 은 본건 발명의 특허출원이 등록되도록 상호 노력하여야 한다.

제4조[비용부담]

특허 출원, 등록, 유지 등 모든 소요비용은 갑" 과 "을" 은 제2조의 권리지분 비율로 부담 한다.

제5조[출원인 명의사항 변경]

"갑" 과 "을" 은 계약체결 이후 법인의 상호, 주소, 대표자 등 주요사항의

<특허 출원 관련 내용>

# 특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1381226 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2012-0157298 호
출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD) 2012년 12월 28일
등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD) 2014년 03월 28일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
전동열차의 진동측정 시스템

특허권자 (PATENTEE)
등록사항란에 기재

발명자 (INVENTOR)
송영천(571120-1******)
경기도 성남시 분당구 동판교로 123, 113-1004(백현동,백현마을)

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.

(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2014년 10월 16일

특 허 청 장 김 영 민
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

연차등록료는 2017년부터 매년 00월 00일까지 납부하여야 하며, 등록원부로 권리관계를 확인하십시오.

# 등 록 사 항

특 허 등록 제 10-1381226 호
(PATENT NUMBER)

특허권자 (PATENTEE)

케이티엠엔지니어링(주)(110111-1******)
경기 성남시 중원구 사기막골로 124, 비즈동 1416호 (상대원동, 에스케이엔테크노파크)

송영천(571120-1******)
경기도 성남시 분당구 동판교로 123, 113-1004(백현동, 백현마을)

한국철도기술연구원(135221-0******)
경기도 의왕시 철도박물관로 176 (월암동)

발급번호 : 5-5-2014-067992730

# 출원사실증명원
# CERTIFICATE OF APPLICATION

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 출원인 Applicant | 성 명 Name | 케이티엠엔지니어링(주) KTM Engineering Inc | 주 민 번 호 Residence No | 110111-1****** |
| | 주 소 | 경기 성남시 중원구 사기막골로 124, 비즈동 1416호 (상대원동, 에스케이엔테크노파크) | 전 화 번 호 | 02-3413-2002 |
| | 성 명 Name | 송영천 Song Young Chun | 주 민 번 호 Residence No | 571120-1****** |
| | 주 소 | 경기도 성남시 분당구 돌판교로 123, 113-1004(백현동,백현마을) | 전 화 번 호 | 031-776-0240 |
| | 성 명 Name | 한국철도기술연구원 KRRI | 주 민 번 호 Residence No | 135221-0****** |
| | 주 소 | 경기도 의왕시 철도박물관로 176 (월암동) | 전 화 번 호 | 031-567-5321 |
| 발명자 Inventor | 성 명 Name | 송영천 Song Young Chun | 주 민 번 호 Residence No | 571120-1****** |
| | 주 소 | 경기도 성남시 분당구 돌판교로 123, 113-1004(백현동,백현마을) | 전 화 번 호 | 031-776-0240 |
| 대 리 인 Agent | 성 명 | 특허법인 다해 | 대리인 코드 | 9-2011-100141-6 |
| | 주 소 | 서울시 강남구 테헤란로 20길 10, 10층(역삼동, 쓰리엠타워) | | |
| 출 원 번 호 Application Number | | 특허-2013-0011654 PATENT-2013-0011654 | 출 원 일 자 Filing Date | 2013년 02월 01일 FEB 01 , 2013 |
| 발명(고안)의 명칭, 디자인을 표현할 물품, 상품(서비스업)류 구분 Title of Invention, Product(s) Embodied in Design, or Classification of Mark | | 전동 열차의 진동 측정 장치 Apparatus for Measuring Vibration of Electric Train | | |
| 용 도 | | 확인용 | IPC 분류 | G01H 1/00 |
| 최 종 처 분 상 태 | | | 최종처분일 | |

위 사실을 증명함.

This is to certify that the above applicant has filed as stated in this certificate at the Korean Intellectual Property Office

발급일자 : 20141103

발급번호 5-5-2014-087991065



# 출원사실증명원
# CERTIFICATE OF APPLICATION

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 출원인 Applicant | 성 명 Name | 케이티엠엔지니어링(주) KTM Engineering Inc | 주민번호 Residence No | 110111-1****** |
| | 주 소 | 경기 성남시 중원구 사기막골로 124, 비즈몰 1416호 (상대원동, 에스케이엔테크노파크) | 전화번호 | 02-3413-2002 |
| | 성 명 Name | 송영천 Song Young Chun | 주민번호 Residence No | 571120-1****** |
| | 주 소 | 경기도 성남시 분당구 동판교로 123, 113-1004(백현동,백현마을) | 전화번호 | 031-776-0240 |
| | 성 명 Name | 한국철도기술연구원 KRRI | 주민번호 Residence No | 135221-0****** |
| | 주 소 | 경기도 의왕시 철도박물관로 176 (월암동) | 전화번호 | 031-567-5321 |
| 발명자 Inventor | 성 명 Name | 송영천 Song Young Chun | 주민번호 Residence No | 571120-1****** |
| | 주 소 | 경기도 성남시 분당구 동판교로 123, 113-1004(백현동,백현마을) | 전화번호 | 031-776-0240 |
| | 성 명 Name | 박병수 Byung - Soo, Park | 주민번호 Residence No | 720904-1****** |
| | 주 소 | 서울특별시 송파구 송이로19길 40-16 | 전화번호 | |
| | 성 명 Name | 정성환 Sung - Hwan, Jung | 주민번호 Residence No | 801121-1****** |
| | 주 소 | 경기도 성남시 중원구 지해로16번길 9, 금광동 삼익아파트 105동 907호 | 전화번호 | |
| | 성 명 Name | 윤영태 Young-Tae, Yun | 주민번호 Residence No | 800911-1****** |
| | 주 소 | 경기도 성남시 분당구 서현로 181 이매촌한신아파트 205동 402호 | 전화번호 | |
| 대리인 Agent | 성 명 | 특허법인 다해 | 대리인 코드 | 9-2011-100141-6 |
| | 주 소 | 서울시 강남구 테헤란로 20길 10, 10층(역삼동, 쓰리엠타워) | | |
| 출원번호 Application Number | | 특허-2014-0074559 PATENT-2014-0074559 | 출원일자 Filing Date | 2014년 06월 18일 JUN 18 , 2014 |
| 발명(고안)의 명칭, 디자인을 표현할 물품, 상품(서비스업)류 구분 Title of Invention, Product(s) Embodied in Design, or Classification of Mark | | 고속 전동 열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템 System for Preventing Risk From Occurring by Analyzing Vibration | | |

발급일자 : 20141103

3. 3차년도 실적 증빙 자료

– 시제품 업그레이드



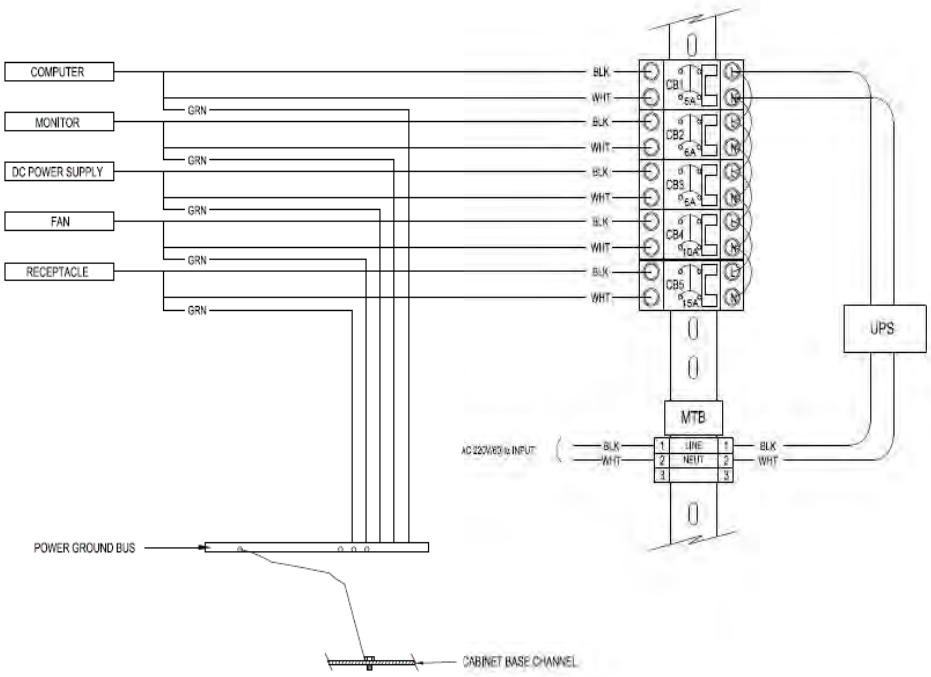




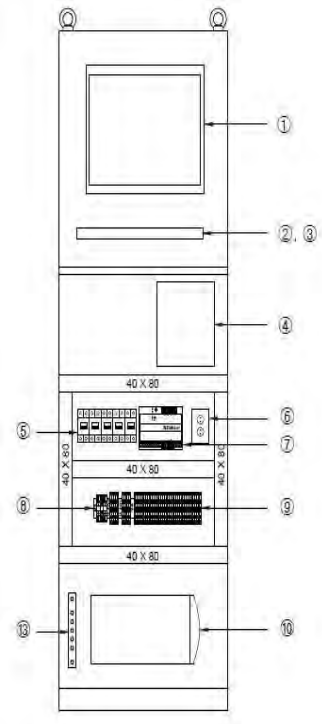

<시제품 개선 모델>

<시제품 개선 내용 요약>

| 구분 | 기본 설계안 | 변경 내용 | 내용 |
|---|---|---|---|
| 채널 | 진동 9ch<br>온도 16ch<br>윤활 4ch<br>속도 1ch | 진동 7ch<br>온도 16ch<br>윤활 4ch<br>속도 1ch | • 2차 감속기 axle측 기어 진동 측정 포인트 삭제<br>• 2차 감속기 axle측 기어는 1차 감속기 헬리컬 기어가 아닌 일반 평기어로 진동에 의한 기어 부하가 적어 이번 진동 측정 대상에서 제외 하여도 문제가 없음. |
| Client 크기 | 300 X 300 X 120 (mm) | 200 X 200 X 110 (mm) | • 기존 Client 박스 내부에 NI모듈 및 파워서플라이, 서지 프로텍트, 터미널 블록 으로 구성된 시제품에서 Client 박스 내부에는 NI 모듈만 설치하고 나머지 부품들은 객차 내부로 설치 변경 진행 |




<서버랙 파워 Distribution 개선 내용>



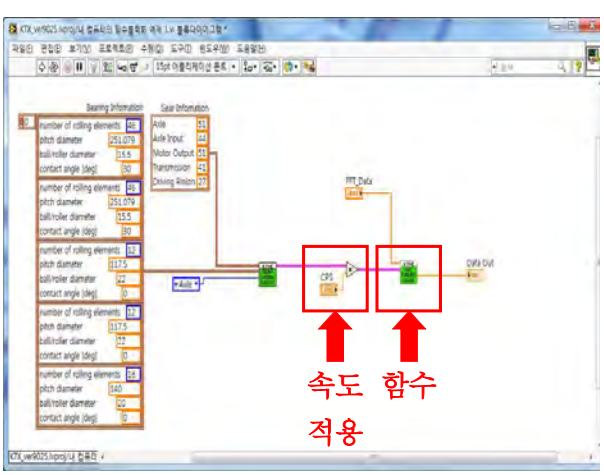

BILL OF MATERIALS

| ITEM | DISCRIPTION | MAKE | MODEL | QTY |
|---|---|---|---|---|
| 1 | MONITOR | LENOVO | | 1EA |
| 2 | KEYBOARD | SEJIN | | 1EA |
| 3 | MOUSE | LOGI TECH | B175 | 1EA |
| 4 | COMPUTER | LENOVO | | 1EA |
| 5 | BKM | LS 산전 | BKM 32b | 5EA |
| 6 | RECEPTACLE | | | 1EA |
| 7 | POWER SUPPLY | | DLP240-24-1 | 1EA |
| 8 | TERMINAL BLOCK | | WDU 10 | 3EA |
| 9 | TERMINAL BLOCK | | WTR 2.5 | 50EA |
| 10 | UPS | | | 1EA |
| 11 | FILTER | | | 2EA |
| 12 | FAN | NMB | 4710PS-22T-B30 | 2EA |
| 13 | GROUND BUSBAR | | | 1EA |

<서버랙 구성 및 레이아웃>

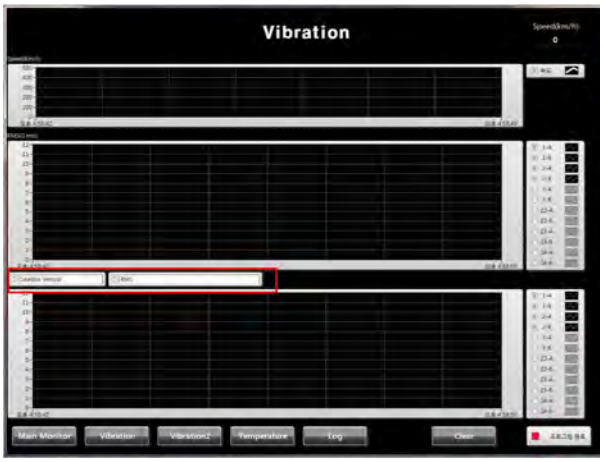


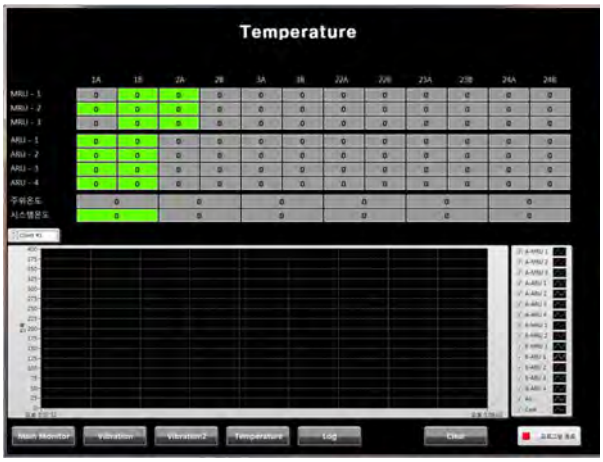

<OBCS 연계구상안 내용>










<소프트웨어 GUI 구성 개선 화면>

– 소프트웨어 등록

제 C-2014-024616 호

# 프 로 그 램 등 록 증

1. 프로그램의 제호 (명칭) T-GMS(티 - 지엠에스)
2. 저작자 성명 (법인명) 케이티엠엔지니어링(주) 경기도 성남시 중원구 사기막골로
3. 생년월일 (법인등록번호) 110111-1314345
4. 창작연월일 2014년09월01일
5. 공표연월일 -
6. 등록사항 저작자 : 케이티엠엔지니어링 주식회사, 창작 : 2014.09.01
7. 등록연월일 2014년10월01일

「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2014년 10월 15일

한국저작권위원회

– 시제품 공인 인증 성능 시험

* KS C IEC 61373

전자문서서비스

# 시험성적서

1. 성 적 서 번 호 : CT14-085383
2. 의뢰자
   - ○ 업 체 명 : 케이티엠엔지니어링(주)
   - ○ 주 소 : 경기도 성남시 중원구 상대원동 190-1 SK테크노파크 비즈센터 1416호
   - ○ 의뢰일자 : 2014.08.12
   - ○ 시험발급일 : 2014.08.19
3. 시험성적서의 용도 : 거래처 제출
4. 시료명 : 고속철도용 통합 감시 모니터링 시스템 서버랙
5. 시험방법

(1) KS C IEC 61373:2002 1종 A

6. 시험환경 : 온도:(25.5±0.5) ℃, 습도:(59±1) % R.H.
7. 시험결과

| 시험 항목 | 시험 결과 |
|---|---|
| 모의 장기 수명 시험 | 외관상 이상 없음 |
| 충격 시험 | 외관상 이상 없음 |
| 기능 랜덤 시험 | 외관상 이상 없음 |

| 확인 | 작성자 성 명 | 최성은 | 최성은 | 기술책임자 성 명 | 남궁연 | |
|---|---|---|---|---|---|---|

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보장하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

한국인정기구 인정 **한국건설생활환경시험연구원장**

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

가산시험연구동 : 153-803 서울특별시 금천구 가산디지털로 199, 02-2102-2500
결과문의 : 포장물류팀 ☎ (02)2102-2775

* KS C IEC 61373

전자문서서비스

# 시험성적서

부본 (R1)
2014.07.11

1. 성 적 서 번 호 : CT14-072906
2. 의뢰자
   ○ 업 체 명 : 케이티엠엔지니어링(주)
   ○ 주 소 : 경기도 성남시 중원구 상대원동 190-1 SK테크노파크 비즈센터 1416호
   ○ 의뢰일자 : 2014.07.07
   ○ 시험발급일 : 2013.07.11
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리
4. 시료명 : 고속철도용 통합 감시 모니터링 시스템
5. 시험방법

(1) KS C IEC 61373:2002 2종

6. 시험환경 : 온도:(26.5±0.5) ℃, 습도:(58±1) % R.H.
7. 시험결과

| 시험 항목 | 시험 결과 |
|---|---|
| 모의 장기 수명 시험 | 이상 없음 |
| 충격 시험 | 이상 없음 |
| 기능 랜덤 시험 | 이상 없음 |

| 확인 | 작성자 성 명 | 최성은 | 최성은 | 기술책임자 성 명 | 남궁연 | |
|---|---|---|---|---|---|---|

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

한국인정기구 인정 **한국건설생활환경시험연구원장**

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

가산시험연구동 : 153-803 서울특별시 금천구 가산동 459-28 02-2102-2500
결과문의 : 포장물류팀 ☎ (02)2102-2775

YOUR PARTNER FOR THE BEST QUALITY

# TEST REPORT

성적서 번호 : CUS2014-3070

신청자 o 회 사 명 : 제이티엠엔지니어링(주)

o 주 소 : 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124 비즈-1416(상대원동, SK테크노파크)

o 대표자명 : 송명천

시험성적서의 용도 : 품질관리용

시험대상품목 : 고속열차 감속기 모니터링 시스템

모델 / 정격 : T-GMS Client/a.c. 220 V, 60 Hz, 35 W

접수일자 : 2014년 08월 27일 시험기간 : 2014년 09월 11일 ~ 2014년 09월 11일

시험방법 : 의뢰자 제시 : KN 61000-4-3 : 2011.10

시험환경 : 온도 : (21.8 ± 1.0) ℃ 습도 : (56.8 ± 1.0) % R.H 기압 : (96.8 ± 1.0) kPa

시험결과 : 적합

비 고 :
1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며 성적서의 진위 확인은 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(등본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.


Bae Yong su
작성자 : 배용수
Tel : 031)679-5664

Sung Kwan Young
기술책임자 : 성관영
E-mail : sky@ktr.or.kr


2014년 09월 24일

KTR 한국화학융합시험연구원장

위변조 확인용 QR코드

F339-44DD-HDD2-735A

# 방송통신기자재등의 적합등록 필증

*Registration of Broadcasting and Communication Equipments*

| | |
|---|---|
| 상호 또는 성명<br>*Trade Name or Registrant* | 케이티엠엔지니어링 (주) |
| 기자재 명칭<br>*Equipment Name* | 고속열차 감속기 모니터링 시스템 |
| 기본모델명<br>*Basic Model Number* | T-GMS Client |
| 파생모델명<br>*Series Model Number* | |
| 등록번호<br>*Registration No.* | MSIP-REM-ke1-T-GMS-Client |
| 제조자/제조(조립)국가<br>*Manufacturer/Country of Origin* | 케이티엠엔지니어링 (주) / 한국 |
| 등록년월일<br>*Date of Registration* | 2014-09-24 |
| 기타<br>*Others* | |

위 기자재는 「전파법」 제58조의2 제3항에 따라 등록되었음을 증명합니다.
It is verified that foregoing equipment has been registered under the Clause 3, Article 58-2 of Radio Waves Act.

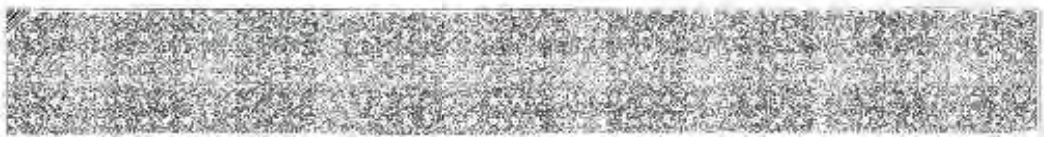
2014년(Year) 09월(Month) 24일(Date)

국립전파연구원장

*Director General of National Radio Research Agency*

※ 본 필증은 방송통신기자재는 반드시 "적합성평가표시"로 부착하여야 합니다.
위변조 사례로 인한 법적 문제에 대해서는 책임지지 않습니다.





YOUR PARTNER FOR THE BEST QUALITY

# TEST REPORT

성적서 번호 : CUS2014-3071

신청자 o 회 사 명 : 케이티엠엔지니어링(주)

o 주 소 : 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124 비스-1416(상대원동, SK테크노파크)

o 대표자명 : 송영천

시험성적서의 용도 : 품질관리용

시험대상품목 : 고속열차 감속기 모니터링 시스템

모델 / 정격 : T-GMS Server Rack/a.c 220 V, 60 Hz, 600 W

접수일자 : 2014년 08월 27일 시험기간 : 2014년 09월 11일 ~ 2014년 09월 11일

시험방법 : 의뢰자 제시 : KN 61000-4-3 : 2011.10

시험환경 : 온도 : (27.8 ± 1.0) ℃ 습도 : (56.8 ± 1.0) % R.H. 기압 : (98.8 ± 1.0) kPa

시험결과 : 적합

비 고 :
1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며 성적서의 진위 확인은 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 외로의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(등본 도함)과 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Bae Yong su
작성자 : 배용수
Tel : 031)579-9884

Sung Kwan Young
기술책임자 : 성관영
E-mail : sky@ktr.or.kr

2014년 09월 24일

KTR 한국화학융합시험연구원장

위변조 확인용 QR코드

KTR-Q-Y013-F09(01)

2248-4AD5-2388-8176

# 방송통신기자재등의 적합등록 필증

*Registration of Broadcasting and Communication Equipments*

| | |
|---|---|
| 상호 또는 성명<br>*Trade Name or Registrant* | 케이티엠엔지니어링 (주) |
| 기자재 명칭<br>*Equipment Name* | 고속열차 감속기 모니터링 시스템 |
| 기본모델명<br>*Basic Model Number* | T-GMS Server Rack |
| 파생모델명<br>*Series Model Number* | |
| 등록번호<br>*Registration No.* | MSIP-REM-ke1-T-GMS-Server |
| 제조자/제조(조립)국가<br>*Manufacturer/Country of Origin* | 케이티엠엔지니어링 (주) / 한국 |
| 등록인월일<br>*Date of Registration* | 2014-09-24 |
| 기타<br>*Others* | |

위 기자재는 「전파법」 제58조의2 제3항에 따라 등록되었음을 증명합니다.
It is verified that foregoing equipment has been registered under the Clause 3, Article 58-2 of Radio Waves Act.

2014년(Year) 09월(Month) 24일(Date)

국립전파연구원장 국립전파연구원장인

*Director General of National Radio Research Agency*

※ 기자재에 표시하는 적합성평가표시는 국립전파연구원의 등록마크와 같습니다.
위조시 상해와 처벌 및 등록이 취소될 수 있습니다.

# 사단법인 한국철도차량엔지니어링
KOREA ROLLING STOCK TECHNICAL CORPORATION


본 사 :
전 화 : (031) 369-5152
팩 스 : (031) 369-5470

시험본부
전 화 : (031) 207-7790
팩 스 : (031) 369-3377


# 검 사 용 역 증 명 서
(CERTIFICATE OF INSPECTION SERVICE)

발행번호 : RTC - 14 - 029 (CERTIFICATE NO.)
발행일자 : 2014. 10. 07. (ISSUED DATE)

| | | |
|---|---|---|
| 발 주 자 (CONSIGNER) | : | 국토교통과학기술진흥원 |
| 사 용 자 (END USER) | : | - |
| 공 급 자 (SUPPLIER) | : | 케이티엠엔지니어링 주식회사 |
| 제 작 자 (MANUFACTURER) | : | 케이티엠엔지니어링 주식회사 |
| 계약계약번호 (CONTRACT NO.) | : | - |
| 검 사 장 소 (PLACE OF INSPECTION) | : | 부산철도차량정비단(고속) 부산역 ~ 광명역 |
| 검 사 기 간 (DATES OF INSPECTION) | : | 2014. 10. 06. - 2014. 10. 07. |

| | |
|---|---|
| 품명 및 규격 (DESCRIPTION) | 감속기모니터링시스템(T-GMS)<br>/<br>시험절차서 |
| 수 량 (QUANTITY) | 1ST |
| 비 고 (REMARKS) | |


This document is issued electronically by KTMEC and its authenticity is verified via the website of KTMEC.

# 시 험 성 적 서

발 행 번 호 : 2014-0591F

회 사 명 : 케이티엠 엔지니어링

시 료 명 : 티-지엠에스 클라이언트

상기 사항은 본 연구원에서 실시한 시험성적서임을 증명함.

2014년 10월 23일

전자부품연구원장

본 시험성적서는 의뢰자가 제공한 시료의 시험결과로써 시료명은 의뢰자가 제시한 것입니다. 본 시험·분석은 단지 제품의 품질 및 신뢰성 향상을 위한 시험분석입니다. 이 성적서는 용도이외의 사용을 금하며, 의뢰자가 임의로 사용하여 발생되는 문제에 대해서 당 연구원은 책임지지 않습니다.

경기도 성남시 분당구 새나리로 25, Tel : 031) 789-7298, Fax : 031) 789-7299 http://www.keti.re.kr/reliability

# 목 차


제1장 연구개발과제 개요 ·····1

제1절 연구개발의 목적 및 필요성 ·····3

1. 연구개발 개요

2. 연구개발 중요성

제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징 ·····15

1. 연구개발의 정의 및 특징

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ·····18

1. 국내 기술 현황

2. 국외 기술 현황

3. 특허 동향

4. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

제4절 연구개발결과가 관련 분야에서 차지하는 위치 등 ·····26

1. 연구개발의 의미

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 ·····27

제1절 감속기 모니터링 시스템 구축 이론 연구 ·····29

1. 감속기 결함 감시 파라미터 및 이상 진단 기술 연구

2. 모니터링 시스템 하드웨어 기본 설계

3. 모니터링 시스템 소프트웨어 기본 설계

제2절 모니터링 시스템 최종 분석 및 설계 ·····63

1. 모니터링 시스템 구축 파라미터 설계

2. 모니터링 시스템 하드웨어 설계 및 분석

3. 모니터링 시스템 소프트웨어 설계 및 분석

4. 대차 진동 측정 시스템 구축 설계 및 분석

5. KTX-OBCS 연계 방안 설계

제3절 모니터링 시스템 연구 결과 및 검증 ·····113
1. 모니터링 시스템 구축 결과 H/W, S/W
2. 모니터링 시스템 성능시험
3. 모니터링 시스템 공인인증시험
4. 모니터링 시스템 개선
5. 모니터링 시스템 설명서 및 매뉴얼

제3장 최종 연구성과 및 적용실적 ·····293
제1절 KTX 감속기 온라인 모니터링 시스템 연구 개발 성과 ·····295
제2절 특허 및 논문 연구 성과 ·····298

제4장 연구목표 달성 및 효과 ·····311
제1절 연구개발 최종목표 달성도 ·····313
제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ·····342
제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등) ·····345
제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 351

제5장 연구 성과의 사업화 방안 ····· 353
제1절 연구 성과 사업화 방안 ····· 355

참고문헌 ····· 361

# 그 림 목 차

그림 1.1.1 고속철도 감속기 구조 ·····3
그림 1.1.2 감속기 진동파형(Spectrum&Waveform) ·····4
그림 1.1.3 Trend 그래프 및 Alarm발생수준 ·····5
그림 1.1.4 기계 상태 감시를 위한 기법 및 장비 기술 ·····6
그림 1.1.5 온라인 상시 감시 시스템 ·····6
그림 1.1.6 설비 운영 정지에 따른 경제적 손실 ·····7
그림 1.1.7 설비 진단기술의 구성 ·····8
그림 1.1.8 설비진단 개념 ·····9
그림 1.1.9 온라인 모니터링 시스템 적용 설비진단 ·····9
그림 1.1.10 KTX 감속기 문제점 내용 ·····10
그림 1.1.11 시스템의 개요 및 주요 개발 추진 기능 ·····11
그림 1.1.12 감속기 이상상태 모니터링 항목 및 검출 가능한 손상 ·····12
그림 1.1.13 SWOT 분석 ·····14
그림 1.2.1 고속철도차량 + 산업용 Gear box 전용 모니터링 시스템 개념 ·····15
그림 1.3.1 전 세계 상태 감시 시스템 장비 시장 규모 ·····24
그림 2.1.1 rms, peak, peak to peak 간의 관계 ·····31
그림 2.1.2 감속기 기어 구조 ·····36
그림 2.1.3 시스템 개략도 ·····37
그림 2.1.4 시스템 구성도 ·····41
그림 2.1.5 과부하로 인한 시스템다운 ·····42
그림 2.1.6 파워-Client 흐름 ·····43
그림 2.1.7 서버 Lay-Out 구성 ·····43
그림 2.1.8 모니터링 시스템 하드웨어 신호 통신 ·····46
그림 2.1.9 진단 시스템 구성도 ·····47
그림 2.1.10 동력차 1차감속기 Idle Z(주황색) / Output Y(분홍색), 동력객차 1차감속기 Idle Z(녹색) / Output Y(청색) ··49
그림 2.1.11 센서 및 클라이언트 설치도 ·····50
그림 2.1.12 센서 부착 그림 ·····51
그림 2.1.13 주파수 분석 흐름도 ·····52
그림 2.1.14 인터페이스 시스템 구성 (Labview) ·····53
그림 2.1.15 사용자 프로그램 인터페이스 1 ·····54
그림 2.1.16 사용자 프로그램 인터페이스 2 ·····54
그림 2.1.17 사용자 프로그램 인터페이스 3 ·····55
그림 2.1.18 C rio 동적 기술 구상 내용 ·····58
그림 2.1.19 Server 동적 기술 내용 ·····59
그림 2.2.1 Experimental system for modal test ·····64
그림 2.2.2 FRF, Coherence and phase graph ·····64
그림 2.2.3 FRF, Coherence and phase graph at 1st gear box vertical direction ·····65
그림 2.2.4 동력차 1차감속기 Idle Z(주황색) / Output Y(분홍색), 동력객차 1차감속기 Idle Z(녹색) / Output Y순서(청색) ··66
그림 2.2.5 2차 감속기 Vertical 방향의 5포인트 측정점 그래프 ·····66

그림 2.2.6 감속기 최적센서위치의 선정 ·····67
그림 2.2.7 센서 취부 방법 ·····67
그림 2.2.8 상태진단 및 수명 평가 기술 정리 ·····70
그림 2.2.9 Off-line 데이터와 On-line 데이터의 비교 ·····71
그림 2.2.10 온라인 데이터 취득 그래프 ·····71
그림 2.2.11 분리된 센서에서 취득한 진동 파형 ·····72
그림 2.2.12 설비를 가동 정지한 후 진동 측정 데이터 ·····72
그림 2.2.13 Pulverizer Gearbox Online Monitoring System ·····73
그림 2.2.14 미분기 기어박스 진동 측정 데이터 분석 그래프 ·····74
그림 2.2.15 거리 10m 무선 모듈 데이터 취득 상태 ·····76
그림 2.2.16 거리 5m 무선 모듈 데이터 취득 상태 ·····76
그림 2.2.17 모니터링 하드웨어 (NI) ·····77
그림 2.2.18 선정 Module KTX 장착 시험 결과 ·····78
그림 2.2.19 선정 Module KTX 장착 시험 결과 ·····79
그림 2.2.20 풍력발전용 모니터링 시스템 ·····80
그림 2.2.21 시스템 레이아웃 도면 ·····82
그림 2.2.22 시스템 전기도면 내용 (NI 모듈 및 채널수 조정) ·····82
그림 2.2.23 Client 설계 내용 ·····83
그림 2.2.24 클라이언트 모델링 설계 내용 ·····83
그림 2.2.25 시제품 제작 사진 ·····84
그림 2.2.26 2차 클라이언트 보호함 ·····84
그림 27 최종 클라이언트 설계 및 제작 내용 ·····85
그림 2.2.28 서버 스토리지 레이아웃 ·····87
그림 2.29 파워-Client 흐름 ·····87
그림 2.2.30 서버 스토리지 제작 사진 ·····87
그림 2.2.31 서버랙 파워 Distribution 내용 ·····88
그림 2.2.32 서버랙 구성 및 레이아웃 ·····89
그림 2.2.33 센서 및 보호박스 설치도 ·····91
그림 2.2.34 1차 배경도(레벨0) ·····94
그림 2.2.35 1차 서브시스템 모델(레벨2) ·····94
그림 2.2.36 1차 메인시스템 모듈(레벨3) ·····95
그림 2.2.37 1차 시스템 구조(레벨1) ·····95
그림 2.2.38 1차 서브시스템 모듈(레벨3) ·····96
그림 2.2.39 1차 C/S 모델 ·····96
그림 2.2.40 최종 배경도(레벨0) (변경사항 없음) ·····97
그림 2.2.41 최종 소프트웨어 시스템 구성도 (변경 없음) ·····97
그림 2.2.42 서버프로그램의 내부 모듈 구성도 ·····97
그림 2.2.43 Network 모듈 내부 구조 ·····98
그림 2.2.44 Client 물리적 구성도(H/W) ·····99
그림 2.2.45 Client S/W 내부 모듈 구성도 ·····99
그림 2.2.46 클라이언트 프로그램 설계 구성도 및 흐름도 ·····100

그림 2.2.47 프로그램 구성도 및 흐름도 ·····100
그림 2.2.48 GUI 구성 화면 ·····101
그림 2.2.49 감시진단 GUI 구성 화면 ·····101
그림 2.2.50 알람 발생 화면 ·····102
그림 2.2.51 감시진단 데이터 화면 ·····103
그림 2.2.52 모니터링 시스템 GUI 메인 화면 ·····104
그림 2.2.53 진동 파라미터 값 세팅 화면 ·····105
그림 2.2.54 알람 표시 화면 ·····105
그림 2.2.55 31개의 출력 파라미터 ·····106
그림 2.2.56 모니터링 시스템 함수 블록화 설정 적용 ·····106
그림 2.2.57 감시 주파수 진동데이터 진폭 추출 함수 ·····107
그림 2.2.58 시험용 프로그램 화면 ·····109
그림 2.2.59 대차 측정 위치 : ⑥ ·····110
그림 2.2.60 OBCS 연계구상안 내용 ·····111
그림 2.3.1 클라이언트 2차 모델 ·····113
그림 2.3.2 서버랙 제작 사진 ·····113
그림 2.3.3 X축 데이터의 최대값 확인 화면 ·····114
그림 2.3.4 Client에서 연산된 FFT 데이터 그래프 ·····115
그림 2.3.5 수집된 웨이브 폼의 데이터 시간간격 출력 화면 ·····115
그림 2.3.6 소프트웨어 구성 화면 ·····116
그림 2.3.7 소프트웨어 구조 변경 설계 화면 ·····117
그림 2.3.8 소프트웨어 구조 변경 설계 화면 ·····117
그림 2.3.9 감속기 실물 시험 측정 포인트 ·····125
그림 2.3.10 시험 측정 현장 사진 ·····126
그림 2.3.11 최고운전속도(100km/h) 진폭 및 주파수 ·····127
그림 2.3.12 무부하 순차속도에서의 5포인트 그래프 ·····129
그림 2.3.13 Gear Output Horizontal방향의 속도별 운전상태 ·····130
그림 2.3.14 부하조건 Transient 그래프 ·····132
그림 2.3.15 무부하조건과 부하조건 비교 그래프 ·····133
그림 2.3.16 부산교통공사 1호선 전동차 실차시험 측정 포인트 ·····134
그림 2.3.17 부산지하철 실차 시험 사진 ·····134
그림 2.3.18 93년, 84년 기어박스 Transient 그래프 ·····135
그림 2.3.19 Gearbox Spectrum, Waveform 측정 그래프 ·····135
그림 2.3.20 부산지하철 Gear Box 및 대차 Overall 값 ·····136
그림 2.3.21 기어박스 & 대차 진동 Spectrum ·····137
그림 2.3.22 각 운행 구간별 Cascade 그래프 ·····138
그림 2.3.23 철기연 감속기 및 부산지하철 진동 특성 비교 그래프 ·····139
그림 2.3.24 KTX 실차 시험 측정 포인트 ·····140
그림 2.3.25 KTX 실차 시험 현장 사진 ·····140
그림 2.3.26 1차/2차 감속기의 진동을 측정한 데이터 ·····141
그림 2.3.27 1차/2차 감속기 Axial, Vertical방향Transient, Cascade, Spectrum ···142

그림 2.3.28 감속기와 대차의 진동 Spectrum Waveform 비교 ·····142
그림 2.3.29 구간별 진동 특성 그래프 ·····144
그림 2.3.30 감시 포인트 및 센서 설치 내용 ·····152
그림 2.3.31 센서 현장 설치 사진 ·····153
그림 2.3.32 센서 및 계측기 설치 사진 ·····154
그림 2.3.33 동력차 ; 대차 및 1차감속기 Overall time waveform ·····155
그림 2.3.34 동력객차 ; 대차 및 1차감속기 Overall time waveform ·····156
그림 2.3.35 동력차 ; 1차 감속기 GMF ·····157
그림 2.3.36 동력차 및 동력객차 ; Point별 Spectrum ·····158
그림 2.3.37 동력차 및 동력객차 ; 1차 감속기 과도상태 ·····159
그림 2.3.38 동력차 및 동력객차 ; 1차 감속기 Idle Z cascade ·····160
그림 2.3.39 동력차 및 동력객차 ; 1차 감속기 Output Y cascade ·····161
그림 2.3.40 동력차 : 1차 감속기 Idle Z 저속구간 및 고속구간 ·····162
그림 2.3.41 동력객차 : 1차 감속기 Output Y 저속구간 및 고속구간 ·····163
그림 2.3.42 NI 하드웨어 데이터 취득 내용 ·····164
그림 2.3.43 저속구간 및 고속구간 전체 Data 취득 상태 ·····165
그림 2.3.44 풍력발전용 온라인 모니터링 시스템 구성 ·····166
그림 2.3.45 풍력발전용 모니터링 시스템 실차 시험 적용 결과 ·····167
그림 2.3.46 대차-실내 무선 데이터 취득 상태 ·····167
그림 2.3.47 실내-실내 무선 데이터 취득 상태 ·····168
그림 2.3.48 측정 위치 및 조건 ·····172
그림 2.3.49 현장 측정 사진 ·····172
그림 2.3.50 1차 감속기 진동 포인트 ·····173
그림 2.2.51 1차 감속기 진동 포인트 ·····174
그림 2.3.52 2차 감속기 Vertical 방향 ·····175
그림 2.3.53 2차 감속기 Horizontal ·····175
그림 2.3.54 2차 감속기의 Axial 방향 ·····176
그림 2.3.55 센서 안정성에 대한 최적의 위치 사진 ·····177
그림 2.3.56 유지보수 최적 측정 위치 ·····177
그림 2.3.57 2차 감속기 최적 측정위치 주파수(GMF, Overall, BPFI/BPFO 7X) 178
그림 2.3.58 2차 감속기 최적 측정위치(V5) Parameter(Shaft 1X, 2~3X, 3~8X) ·····179
그림 2.3.59 센서장착 최적 위치 최종 설정 ·····180
그림 2.3.60 실물 측정 사진 및 측정 조건 ·····181
그림 2.3.61 2차 감속기 최적 측정위치 주파수(GMF, Overall, BPFI/BPFO 7X) 181
그림 2.3.62 센서장착 최적 위치 최종 설정 ·····182
그림 2.3.63 측정 위치 ·····184
그림 2.3.64 감속기 센서 설치사진 ·····184
그림 2.3.65 pm 4:50 - 5:00 Waterfall data ·····185
그림 2.3.66 120km/h 조건 시 감속기 주파수 계산표 ·····186
그림2.3. 67 290km/h 조건 시 감속기 주파수 계산표 ·····186
그림 2.3.68 공진대역으로 추정되는 속도 123km/h 주파수 계산표 ·····187

그림 2.3.69 공진대역으로 추정되는 속도 192km/h 주파수 계산표 ·····187
그림 2.3.70 Mode Shape 데이터 ·····188
그림 2.3.71 실물 시험 사진 ·····189
그림 2.3.72 1차 감속기 Vertical 방향 각 진동 파라미터 변동추이 ·····190
그림 2.3.73 해무 DGU 사양 ·····192
그림 2.3.74 해무 포인트 선정 및 주파수 계산(275 km/h 조건시 감속기 주파수 계산표) ·····192
그림 2.3.75 HEMU 시험 ·····192
그림 2.3.76 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 RMS 데이터(대전->광명) ·····193
그림 2.3.77 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 RMS 데이터(대전->광명) ·····193
그림 2.3.78 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 Kurtosis 데이터(대전->광명) ·····194
그림 2.3.79 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 Kurtosis 데이터(대전->광명) ·····194
그림 2.3.80 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 GMF 1X 데이터(대전->광명) ·····194
그림 2.3.81 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 GMF 1X 데이터(대전->광명) ·····195
그림 2.3.82 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 Idle Gear BPFI 7x 데이터(대전->광명) ·····195
그림 2.3.83 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 Idle Gear BPFI 7x 데이터(대전->광명) ·····195
그림 2.3.84 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Crest Factor 데이터(대전->광명) ·····196
그림 2.3.85 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Crest Factor 데이터(대전->광명) ····196
그림 2.3.86 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Motor축 RPM 1x 데이터(대전->광명) ·····196
그림 2.3.87 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Motor축 RPM 1x 데이터(대전->광명) ····197
그림 2.3.88 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Axle축 BPFO 7x 데이터(대전->광명) ····197
그림 2.3.89 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Axle축 BPFO 7x 데이터(대전->광명) ·····197
그림 2.3.90 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 GMF 1x 데이터(대전->동대구) ·····198
그림 2.3.91 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 GMF 1x 데이터(대전->동대구) ·····198
그림 2.3.92 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 Motor BPFO 7x 데이터(대전->동대구) ·····198
그림 2.3.93 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 Motor BPFO 7x 데이터(대전->동대구) ·····199
그림 2.3.94 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 GMF 3x 데이터(대전->동대구) ·····199
그림 2.3.95 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 GMF 3x 데이터(대전->동대구) ·····199
그림 2.3.96 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Idle Gear RPM 1x 데이터(동대구->부산) ·····200
그림 2.3.97 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Idle Gear RPM 1x 데이터(동대구->부산) ·····200
그림 2.3.98 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Motor RPM 7x 데이터(동대구->부산) ·····200
그림 2.3.99 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Motor RPM 1x 데이터(동대구->부산) ·····201
그림 2.3.100 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Crest Factor 데이터(동대구->부산) ·····201
그림 2.3.101 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Crest Factor 데이터(동대구->부산) ·····201
그림 2.3.102 KTX 산천 실차 시험 측정 포인트 ·····202
그림 2.3.103 KTX 실차 시험 현장 사진 ·····203
그림 2.3.104 KTX 산천 실차 시험 MRU, Vertical 방향 진동 RMS 데이터 취득204
그림 2.3.105 MRU, Vertical / Axle 방향 진동 RMS 데이터 ·····204
그림 2.3.106 MRU, Vertical / Axle 방향의 GMF 1X 파라미터 비교 그래프 ····205
그림 2.3.107 ARU 출력측 베어링의 온도 변화 추이 그래프 ·····205
그림 2.3.108 KTX 산천 소프트웨어 GUI 구동 화면 ·····205
그림 2.3.109 대차 측정 설치 사진 ·····207

그림 2.3.110 개발 장비를 통해 측정한 대차 진동 Raw Data ·····208
그림 2.3.111 계측기를 통해 측정한 대차 진동 Raw Data ·····208
그림 2.3.112 감속기와 대차의 스펙트럼 비교 ·····209
그림 2.3.113 차세대 고속열차 실차 시험조건 사진 ·····210
그림 2.3.114 대차 측정 설치 사진 ·····211
그림 2.3.115 Performance test screen and raw data ·····212
그림 2.3.116 Comparative plot of RPM and RMS, GMF1X(vertical) ·····213
그림 2.3.117 Comparative plot of RPM RMS, GMF1X(axial) ·····213
그림 2.3.118 Comparative plot of RPM and RMS, BPFI7X ·····214
그림 2.3.119 Comparative plot of RPM and RMS, Kurtosis ·····214
그림 2.3.120 Comparative plot of RPM and RMS, Axle PRM 1X ·····215
그림 2.3.121 Comparative plot of RPM and RMS, GMF1X 7X ·····215
그림 2.3.122 제 3자 인증 시험 시스템 설치 개요도 ·····216
그림 2.3.123 성능 시험 데이터 취득 경향 ·····221
그림 2.3.124 개발 제품 대차 진동 저장 파형 ·····222
그림 2.3.125 데이터 수집 시험 진행 화면 ·····223
그림 2.3.126 주파수 추적 검증 (1) ·····223
그림 2.3.127 주파수 추적 검증 (2) ·····224
그림 2.3.128 주파수 추적 검증 (3) ·····224
그림 2.3.129 KTX 실차 시험 현장 사진 ·····227
그림 2.3.130 KTX 실차 시험 현장 사진 ·····228
그림 2.3.131 KTX 실차 시험 현장 사진 ·····229
그림 2.3.132 KTX 실차 시험 현장 사진 ·····229
그림 2.3.133 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 속도 변화 측정 결과 값 ····230
그림 2.3.134 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Vertical 축 RMS 변화 측정 결과 값 ····230
그림 2.3.135 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Vertical 축 Kurtosis 변화 측정 결과 값 231
그림 2.3.136 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Vertical 축 NA6 변화 측정 결과 값 ·····231
그림 2.3.137 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Axial축 RMS 변화 측정 결과 값 ····231
그림 2.3.138 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Axial축 Kurtosis 변화 측정 결과 값 ····232
그림 2.3.139 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Axial축 NA6 변화 측정 결과 값 ····232
그림 2.3.140 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 ARU Vertical축 RMS 변화 측정 결과 값 ·····232
그림 2.3.141 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 ARU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과 값 ···233
그림 2.3.142 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 ARU Vertical축 NA6 변화 측정 결과 값 ····233
그림 2.3.143 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 속도 변화 측정 결과 값 ·····233
그림 2.3.144 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Vertical축 RMS 변화 측정 결과 값 ····234
그림 2.3.145 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과 값 ·····234
그림 2.3.146 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Vertical축 NA6 변화 측정 결과 값 ····234
그림 2.3.147 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Axial축 RMS 변화 측정 결과 값 ····235
그림 2.3.148 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Axial축 Kurtosis 변화 측정 결과 값 ····235
그림 2.3.149 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Axial축 NA6 변화 측정 결과 값 ····235
그림 2.3.150 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 ARU Vertical축 RMS 변화 측정 결과 값 ·····236

그림 2.3.151 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 ARU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과 값 ·····236
그림 2.3.152 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 ARU Vertical축 NA6 변화 측정 결과 값 ·····236
그림 2.3.153 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 속도 변화 측정 결과 값 ·237
그림 2.3.154 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Vertical축 RMS 변화 측정 결과 값 ·237
그림 2.3.155 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과 값 ··237
그림 2.3.156 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Vertical축 NA6 변화 측정 결과 값 ···238
그림 2.3.157 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Axial축 RMS 변화 측정 결과 값 ·····238
그림 2.3.158 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Axial축 Kurtosis 변화 측정 결과 값 ·····238
그림 2.3.159 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Axial축 NA6 변화 측정 결과 값 ····239
그림 2.3.160 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 ARU Vertical축 RMS 변화 측정 결과 값 ····239
그림 2.3.161 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 ARU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과 값 ····239
그림 2.3.162 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 ARU Vertical축 NA6 변화 측정 결과 값 ····240
그림 2.3.163 철도 내구성 시험 관련 규격 기준 ·····241
그림 2.3.164 클라이언트 인증 시험 사진 ·····243
그림 2.3.165 서버 인증 시험 사진 ·····245
그림 2.3.166 KN 50 측정 대역폭 ·····247
그림 2.3.167 포트들의 주요 범례 ·····248
그림 2.3.168 전자파 시험 배치도 ·····249
그림 2.3.169 시험 결과 – 주전원 단자의 연속성 방해 시험 결과(2) ·····251
그림 2.3.170 모니터링 시스템 전자파 인증 시험 사진 ·····254
그림 2.3.171 클라이언트 전자파 내성 시험 결과 내용 ·····255
그림 2.3.172 서버 전자파 내성 시험 결과 ·····256
그림 2.3.173 고온 시험의 사양 및 규격 시험 방법 정의 ·····258
그림 2.3.174 저온 시험의 사양 및 규격 시험 방법 정의 ·····258
그림 2.3.175 온도 변화 사이클 시험의 사양 및 규격 시험 방법 정의 ·····259
그림 2.3.176 51.2kS/s 로 샘플링 수행 시 RawData ·····262
그림 2.3.177 12.8 kS/s 로 샘플링 수행 시 RawData ·····262
그림 2.3.178 문제 발생 화면 (1) ·····263
그림 2.3.179 문제 발생 화면 (2) ·····264
그림 2.3.180 배경도(레벨0) ·····265
그림 2.3.181 서브시스템 (레벨1) ·····265
그림 2.3.182 메인시스템 모듈(레벨2) ·····265
그림 2.3.183 시스템 구조(레벨1) ·····266
그림 2.3.184 서브시스템 모듈(레벨3) ·····266
그림 2.3.185 C/S 모델 ·····266
그림 2.3.186 개선전 GUI 구성 화면 ·····270
그림 2.3.187 개선 전 진동 진단 알람 발생 화면 ·····270
그림 2.3.188 개선 소프트웨어 GUI 메인 화면 ·····271
그림 2.3.189 진동 데이터 취득 화면 ·····271
그림 2.3.190 온도 표시 화면 개선 ·····272
그림 2.3.191 윤활 표시 화면 개선 ·····272

그림 2.3.192 데이터 과거 이력 조회용 소프트웨어 화면 (1) ·····273
그림 2.3.193 데이터 과거 이력 조회용 소프트웨어 화면 (2) ·····273
그림 2.3.194 Setup.exe 파일을 실행 화면 ·····275
그림 2.3.195 설치 경로 설정 화면 ·····275
그림 2.3.196 라이센스 동의 화면 ·····276
그림 2.3.197 설치 정보 확인 화면 ·····276
그림 2.3.198 설치 진행 화면 ·····277
그림 2.3.199 설치 완료 화면 ·····277
그림 2.3.200 데이터 파일 초기 설정 화면 ·····278
그림 2.3.201 파일을 오픈한 화면 ·····278
그림 2.3.202 초기 프로그램 실행화면 ·····279
그림 2.3.203 관리자 권한 실행 화면 ·····280
그림 2.3.204 모니터링 시스템 메뉴 함목 화면 ·····281
그림 2.3.205 모니터링 시스템 메인 화면 ·····282
그림 2.3.206 HEMU에 실제 적용하여 테스트하던 중 나타났던 주의/경고 알람화면 ·····282
그림 2.3.207 모니터링 시스템 진동 화면 ·····283
그림 2.3.208 대차 선택 리스트 박스 ·····284
그림 2.3.209 MRU의 주파수 파라미터 리스트 ·····284
그림 2.3.210 ARU의 주파수 파라미터 리스트 ·····284
그림 2.3.211 실차 시험 중 진동 데이터 취득 화면 ·····287
그림 2.3.212 모니터링 시스템 진동 파트 화면 ·····287
그림 2.3.213 센서 위치 선택 화면 ·····288
그림 2.3.214 윤활 설정 화면 ·····288
그림 2.3.215 윤활 선택 화면 ·····289
그림 2.3.216 윤활 요소 선택 화면 ·····289
그림 2.3.217 온도 설정 화면 ·····289
그림 2.3.218 온도 대차 선택 화면 ·····290
그림 2.3.219 온도 동작 화면 ·····290
그림 2.3.220 로그 파일 화면 ·····291
그림 3.1.1 T-GMS 시스템 개요 ·····295
그림 3.1.2 소프트웨어 구성 화면 ·····297
그림 3.2.1 전동열차의 진동 측정 시스템 특허 출원 관련 청구도면 ·····300
그림 3.2.2 전동열차의 진동측정 장치 청구도면 (1) ·····302
그림 3.2.3 전동열차의 진동측정 장치 청구도면 (2) ·····302
그림 3.2.4 발광식 계측장비 청구도면 ·····303
그림 3.2.5 고속열차의 안전 예방을 위한 진동 측정 시스템 청구도면(1) ·····305
그림 3.2.6 Online Monitoring System Design Concept for KTX ·····307
그림 3.2.7 소프트웨어 등록 내용 ·····309
그림 4.1.1 감속기 최적센서 위치의 선정 ·····315
그림 4.1.2 전동차용 감속기 현황 진단 측정 시험 사진 ·····315
그림 4.1.3 풍력발전용 모니터링 시스템 실차 적용 시험 진행 ·····316

그림 4.1.4 무선 모니터링 시스템 실차 적용 시험 ·····317
그림 4.1.5 산업용 발전 모니터링 시스템 열차 차량 적용 ·····317
그림 4.1.6 시스템 레이아웃 기본 설계 도면 ·····321
그림 4.1.7 센서 취부 방법 ·····321
그림 4.1.8 시스템 전기도면 내용 ·····322
그림 4.1.9 소프트웨어 시스템 구성 설계 (Labview) ·····322
그림 4.1.10 사용자 프로그램 인터페이스 기본 설계 ·····323
그림 4.1.11 사용자 프로그램 인터페이스 기본 설계 ·····323
그림 4.1.12 사용자 프로그램 인터페이스 기본 설계 ·····323
그림 4.1.13 31개의 출력 파라미터 구성 설계 ·····324
그림 4.1.14 모니터링 시스템 함수 블록화 설정 적용 ·····324
그림 4.1.15 선정 하드웨어 모듈(NI) ·····329
그림 4.1.16 선정 Module KTX 장착 시험 주파수 ·····329
그림 4.1.17 사용자 인터페이스 구축 ·····330
그림 4.1.18 프로그램 알고리즘 ·····330
그림 4.1.19 모니터링 시스템 진단 구성도 (하드웨어) ·····331
그림 4.1.20 서버 클라이언트 보호함 제작(좌 – 1차, 우 - 2차) ·····332
그림 4.1.21 하드웨어 서버 구성도 ·····332
그림 4.1.22 하드웨어 성능 시험 ·····332
그림 4.1.23 대차 측정 진동 시험 설치 사진 ·····333
그림 4.1.24 대차 진동 Raw Data 취득 ·····333
그림 4.1.25 클라이언트 프로그램 설계 구성도 및 흐름도 ·····334
그림 4.1.26 프로그램 구성도 및 흐름도 ·····334
그림 4.1.27 OBCS 연계구상안 내용 ·····335
그림 4.1.28 모니터링 시스템 하드웨어 보완 ·····335
그림 4.1.29 모니터링 시스템 서버랙 파워 Distribution 개선 내용 ·····336
그림 4.1.30 소프트웨어 GUI 구성 개선 화면 ·····336
그림 4.1.31 모니터링 시스템 공인인증시험 성적서 (1) ·····337
그림 4.1.32 모니터링 시스템 공인인증시험 성적서 (2) ·····338
그림 4.2.1 개발기술의 기술 수명 주기상 위치 ·····343
그림 4.3.1 진동 감시 시스템 장비 시장 전망 ·····347
그림 4.3.2 세계 철도시장 성장 예측 ·····348
그림 4.3.3 사업화에 대한 인력 운용 계획 ·····350
그림 5.1.1 생산 계획 구상 내용 ·····355
그림 5.1.2 부산지하철 감속기 구조 ·····358
그림 5.1.3 부산지하철 센서 설치 사진 ·····358

# 표 목 차

표 1.1.1 기계부품의 검출신호와 진단기술 ·····12
표 1.3.1 연도별 해외 특허출원 동향 ·····20
표 1.3.2. 연도별 국내 특허 출원 동향 ·····21
표 1.3.3 전 세계 상태 감시 시스템 장비 시장 규모 ·····23
표 1.3.4 진동 감시 시스템 장비 시장 규모 전망 ·····25
표 2.1.1 주요 진동 이론 정리 ·····30
표 2.1.2 출력 스펙트럼 주파수 ·····31
표 2.1.3 감시 및 진단 알고리즘이 포함된 감시 파라미터 ·····34
표 2.1.4 KTX 정보 ·····35
표 2.1.5 감속기 기어 정보 ·····36
표 2.1.6 속도 구간 진동 정보 ·····37
표 2.1.7 감속기 모니터링 사양 검토 내용과 상용제품 비교 정리 ·····38
표 2.1.8 시스템 구조 설계안 검토 종합 비교표 ·····39
표 2.1.9 Client 하드웨어 사양 ·····40
표 2.1.10 센서 출력 신호 표시 ·····44
표 2.1.11 시스템 장착 위치 검토 내용 ·····45
표 2.1.12 하드웨어 시스템 주요 구성 장치 최종 정리 ·····47
표 2.1.13 센서 적용 위치 및 방향 정리 ·····50
표 2.1.14 모니터링 시스템 소프트웨어 개발 범위 ·····57
표 2.1.15 1차 구상 소프트웨어 프로세스 명세서 내용 ·····60
표 2.2.1 Natural frequencies of parts and assembles ·····65
표 2.2.2 감속기 설비 이상 감시 기법 적용 내용 정리 ·····69
표 2.2.3 감시 및 진단 알고리즘이 포함된 감시 파라미터 ·····75
표 2.2.4 시제품 Clinet 사양 ·····85
표 2.2.5 출력 스펙트럼 주파수 ·····92
표 2.2.6 함수 블록화 내용 ·····108
표 2.2.7 KTX 대차 관련 정보 내용 ·····110
표 2.3.1 감시 및 진단 알고리즘이 포함된 감시 파라미터 ·····118
표 2.3.2 KTX 진동 분석 파라미터 ·····119
표 2.3.3 시험 측정 조건 내용 정리 ·····120
표 2.3.4 (1) 산업용 진동 측정 포터블 장비 ·····121
표 2.3.5 측정 대상 및 주요 분석 범위 ·····124
표 2.3.6 풍력발전용 온라인 모니터링 시스템 ·····149
표 2.3.7 무선 측정 온라인 모니터링 시스템 ·····150
표 2.3.8 선정 하드웨어 모듈 ·····151
표 2.3.9 계측기별 분석 범위 내용 정리 ·····151
표 2.3.10 시험장비 : Alta Solution ·····183

표 2.3.11 측정 시험 주요 분석 범위 ·····183
표 2.3.12 실제 측정 데이터 ·····186
표 2.3.13 실제 측정 데이터 ·····187
표 2.3.14 시험 측정 조건 내용 ·····189
표 2.3.15 제 3자 인증 시험 개발 제품 동시 설치 상용화 계측기 ·····216
표 2.3.16 진동 알람 기준 값 설정 내용 ·····218
표 2.3.17 온도 알람 기준 설정 ·····220
표 2.3.18 측정 데이터 평균값 비교 ·····221
표 2.3.19 계측장비 ·····225
표 2.3.20 KS C IEC 모의 장기 수명 시험조건 (2종) ·····242
표 2.3.21 KS C IEC 충격 시험조건 (2종) ·····242
표 2.3.22 KS C IEC 기능 랜덤 시험조건 (2종) ·····242
표 2.3.23 KS C IEC 모의 장기 수명 시험조건 (1종) ·····244
표 2.3.24 KS C IEC 충격 시험조건 (1종) ·····244
표 2.3.25 KS C IEC 기능 랜덤 시험조건 (1종) ·····244
표 2.3.26 KN50, KN51 규격 시험 검사 항목 ·····247
표 2.3.27 KN50, KN51 적용 시험 규격 ·····250
표 2.3.28 시험 결과 – 주전원 단자의 연속성 방해 시험 결과(1) ·····251
표 2.3.29 방사성 방해 시험 결과 ·····252
표 2.3.30 정전기 방전 내성 시험에 대한 결과 ·····252
표 2.3.31 EFT/버스트 내성 시험의 결과 ·····253
표 2.3.32 서지 내성 시험의 결과 ·····253
표 2.3.33 전도성 RF 전자기장 내성 시험 결과 ·····253
표 2.3.34 클라이언트 박스 축소 안 ·····260
표 2.3.35 클라이언트 설치 위치 변경 ·····260
표 2.3.36 시제품 기본 설계 내용 대비 변경 사항 ·····261
표 2.3.37 소프트웨어 프로세스 명세서 내용 ·····267
표 2.3.38 각 채널의 센서 연결 정보 ·····274
표 2.3.39 주파수 파라미터의 의미 정리 ·····285
표 3.1.1 모니터링 시스템 클라이언트 & 서버 ·····296
표 3.2.1 KTX speed versus MRU critical frequency ·····308
표 4.1.1 정량적 성과 목표 및 성과지표 ·····313
표 4.1.2 연구목표 및 내용 ·····314
표 4.1.3 각 산업 분야 모니터링 시스템 비교 분석 ·····318
표 4.1.4 감시 및 진단 알고리즘이 포함된 감시 파라미터 ·····319
표 4.1.5 KTX 진동 분석 파라미터 ·····320
표 4.1.6 각 하드웨어 채널별 센서 연결 위치 정리 ·····321
표 4.1.7 산업용 발전용 모니터링 시스템 ·····325
표 4.1.8 NI 하드웨어 모듈 시작품 ·····326
표 4.1.9 풍력 발전용 모니터링 시스템 ·····327
표 4.1.10 무선 통신 모니터링 시스템 ·····328

표 4.1.11 구축 하드웨어 시스템 사양 내용 ·····331
표 4.1.12 점검 기록관리 계획 ·····340
표 4.1.13 점검 기록관리 가이드 ·····341
표 4.2.1 개발 기술의 응용분야 및 파급효과 ·····343
표 4.3.1 세계 지역별 철도 시장 규모 및 성장률 ·····348
표 4.3.2 철도유지관리 분야 국내외 시장 규모 전망 ·····349
표 4.4.1 국외 자국부품사용 의무화 현황 ·····352
표 4.4.2 세계 철도 산업 규모 ·····352
표 5.1.1 수요 변동 생산 운영 계획 ·····356
표 5.1.2 T-GMS 예상 제조 원가 산출 내역 ·····357
표 5.1.3 추가 연구 진행 및 상용화 실행 방안 수립 ·····359

# 제1장 연구개발과제 개요

# 제1절 연구개발의 목적 및 필요성

## 1. 연구개발 개요

철도차량산업이 고속화, 주요 교통수단으로 기여도가 상승함에 따라 고속철도 고장이 발생할 경우 다수의 안전에 위험을 초래할 뿐만 아니라 운행시간 감소, 차량정비시간이 증가되어 승객의 불편을 초래하고 국가적으로 막대한 경제적 손실을 초래하게 된다.

KTX와 같은 국가 기반 시설은 피해가 발생되면 피해에 따른 영향이 매우 크고 반응이 빠르게 나타나게 되어 파급력이 매우 높다. 따라서 사전에 사고를 예방하고 결함이 발생할 때 차량이 재운전될 수 있도록, 동시에 이에 따른 적절한 대책을 세우는 것이 매우 중요하다. 이와 같은 불의의 사고를 예방하기 위하여 고속철도 차량의 안정성 및 신뢰성 있는 차량 운행 관리가 될 수 있는 종합 감시 기술의 도입이 시급하다고 할 수 있다. KTX 차량의 신뢰성 관리에 가장 핵심은 현재 운전되고 있는 감속기와 대차에 대한 상시 감시시스템의 유무에 대한 관점이라고 할 수 있다. 주행 중인 고속철도 차량의 상태를 실시간으로 관리함으로서 어떠한 결함이 발생하여도 신속히 대처를 할 수 있으며, 결함의 형태를 분석, 파악하여 결함의 개소 및 감속기와 대차의 수명을 예측하여 철도차량의 정비 계획과 자재의 조달을 손쉽게 하는 것이 가능하여 차량 정비 시간의 정비를 단축시켜 철도 차량의 유지 보수의 효율을 크게 높일 수 있는 장점이 있다. 또한 철도 차량의 중대 결함을 미연에 방지할 수 있게 되어 감속기와 대차의 중대 결함을 미연에 방지할 수 있게 되어 감속기와 대차의 핵심부품의 고장 예방과 주요 설비의 수명을 연장시킬 수 있어 차량 유지보수 비용을 크게 감소를 시킬 수 있다. 다음 그림 1.1.1은 고속열차의 감속기의 구조를 나타낸 것이다.

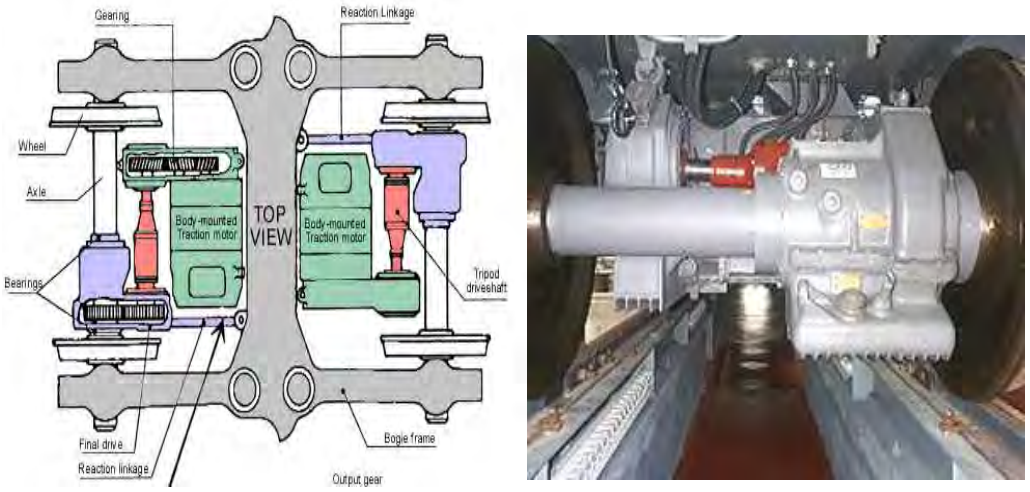



그림 1.1.1 고속철도 감속기 구조

고속철도용 감속기의 구성은 1차 감속장치(Motor Reduction Unit)와 2차 감속장치(Axle Gear Box Reduction Unit), 그리고 두 감속장치의 동력 전달 역할을 수행하는 동력전달 축 (tripod joint shaft)으로 구성되어 있다. 차량 운행 시 감속구동장치에 가해지는 부하가 매우 크기 때문에 기어의 안전성 및 내구성, 각 부품의 신뢰성 등이 매우 중요한 고속철도 차량의 핵심 부품이다.

철도진동의 특성에 영향을 미치는 요소는 차량, 궤도, 궤도지지 구조물, 지반, 수진 구조물 등 매우 다양하며 이 요소들은 상호 복합적으로 작용하는 관계로 철도진동의 발생 및 전파특성에 대한 깊은 이해가 요구된다.

우선 첫째로, 레일 위를 주행하는 차량의 구동(rolling)에 의해 발생하는 차량구동 진동이다. 차량구동 진동은 주행 중인 차량의 요동작용과 차륜과 레일의 주행접촉에 따른 충격(impact) 및 마찰작용에 의해 발생된다. 차량구동 진동은 철도진동의 가장 큰 요인으로 진동의 주파수 특성 측면에서 보면 주파수 성분이 복합적이고, 진동강도의 주파수 분포특성이 일정한 규칙성이 없는 불규칙진동(random vibration)에 속한다. 진동의 시간적 측면에서 보면, 비교적 짧은 단속 시간을 두고 일련의 과도진동(transient vibration)성분들이 파상적으로 발생하는 단속이 일시 진동의 특성을 갖는다.

둘째로, 차량에 부속된 각종 기계설비의 가동에 의해 발생되는 기계진동이다. 비교적 큰 진동 및 소음을 유발하는 기계설비로 공기압축기(air compressor), 환기팬(ventilation fan), 유압장치(hydraulic power unit)등이 있으며 무엇보다도 주행과 안전측면에서 중요한 감속기(gear box unit)가 큰 비중을 차지하게 된다. 이러한 기계설비 진동은 특정한 주파수 성분을 갖고 끊임없이 진동이 지속되는 주기성 연속진동(periodic; continuous vibration)의 특성을 갖는다. 특히 본 개발과제의 대상인 감속기의 문제는 전체차량의 운행 및 안전 상태와 직결되며, 운행시간에 따른 피해와도 깊은 관련이 있으므로 이에 대한 적절한 대책이 필요하다. 이에 대한 적절한 대책으로 진동, 윤활 및 온도의 상태에 관한 통합적인 감시기법의 도입과, 지속적인 상시감시시스템(on-line monitoring system)이 가동되었을 경우 감속기 가동에 지장을 주는 주요 결함 감시를 원활하게 진행할 수 있게 된다. 다음 그림 1.1.2는 감속기의 진동파형 형태를 보여주는 스펙트럼 웨이브 파형이다.

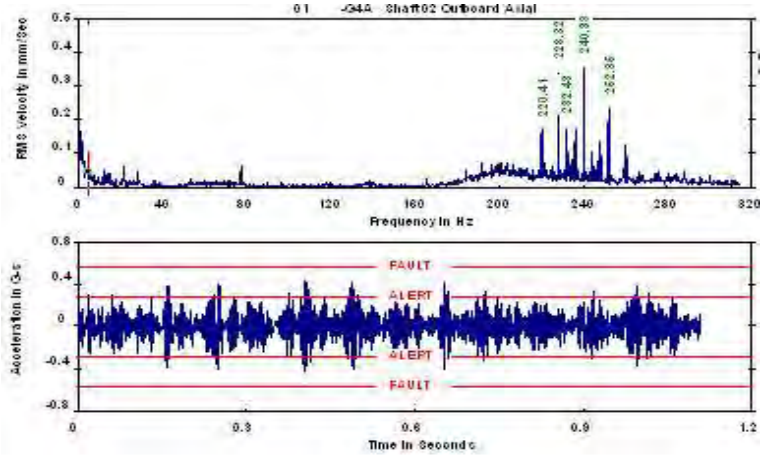



그림 1.1.2 감속기 진동파형(Spectrum&Waveform)

이러한 통합적인 감시기법 중에서 특히 진동기법은 매우 광범위하고 복잡한 신호의 해석을 필요로 하며, 신뢰성 있는 파라미터(중요 특성을 표현하는 세부 기법들)의 분석과 관찰을 통해 진동결함과 신호의 선형성을 찾아내야 한다. 따라서 다양한 결함유형과 그에 따른 최적의 진동 센서 위치, 진동센서의 종류, 신호취득의 방법, 정확한 파라미터 선정, 신호의 알고리즘 개발에 대한 연구가 필요하다.

진동신호 취득 이후에 가장 중요한 연구과정은 위에서 설명한 연속진동에서 불규칙 진동을 제외시키는 과정이다. 이 불규칙 진동을 제외하는 것과 아울러 개발품에 반드시 포함되어야 할 신호분류기능은 다음과 같다.

○ 연속진동에서 불규칙진동 제거
○ 여러 연속진동(가변속)에서 감속기 진동만을 추출
○ 감속기 관련 주요 결함 진동신호만 추출
○ 주요 결함 진동신호의 심각도 선정(Alarm or not)
○ 신호의 결과 방법 결정(Trend, Spectrum, Waveform, Envelope, 등)
○ 경고신호의 발생수준(Alarm-> Warning -> Trip)

고속철도 차량 기기의 운전 상태를 점검하기 위해 주 효과(Primary effect; 기기 본래 성능을 나타내는 파라미터, 예: 전류, 출력, 토크, 회전수, 압력, 유량)와 2차 효과(Secondary effect; 기기 운전시의 진동, 음량, 온도, 악취 등)에 의한 데이터를 온라인으로 감시하는 기법이 있다. 이때 온라인으로 감시하여 취득이 되는 데이터 정보는 컴퓨터로 처리되어 데이터로 만들어 진다. 진동정보는 기준치와 비교되어 경보(Warning), 긴급정지(Trip)의 신호를 발생하여 현재 상태파악 및 운전여부를 결정하는 감시 시스템의 주요 역할을 수행할 수 있다. 다음 그림 1.1.3은 진동에 의한 Trend 그래프 및 Alarm 발생수준에 대한 기준을 표현한 내용이다.

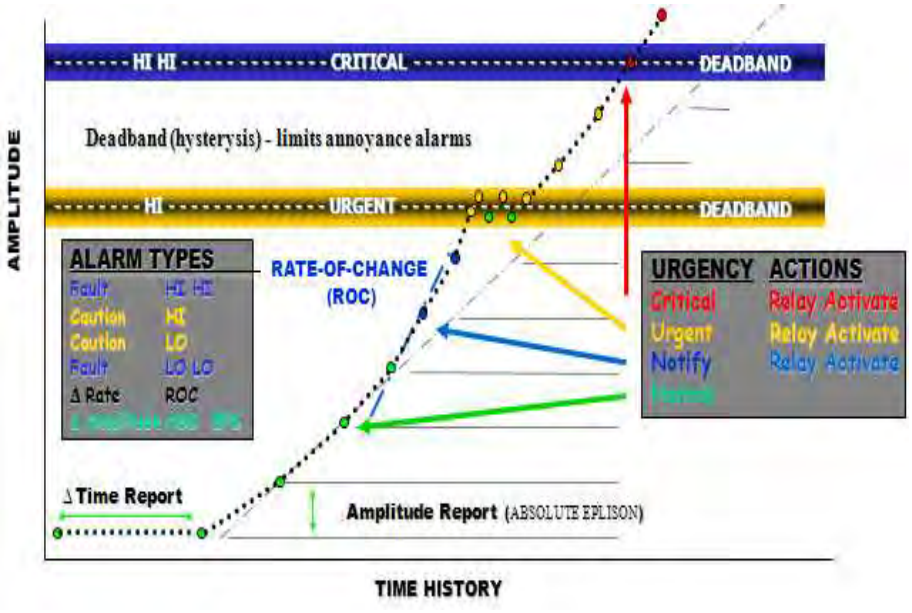



그림 1.1.3 Trend 그래프 및 Alarm발생수준




그림 1.1.4 기계 상태 감시를 위한 기법 및 장비 기술

현재 기어박스 및 대차의 전용 온라인 모니터링 시스템은 거의 없는 상황이다. 감속기 축 진동 모니터링 시스템을 기어 박스에 적용하여 축 자체 결함 즉, Unbalance나 Misalignment같은 설비 결함은 검출하지만 기어박스에서 가장 중요한 기어 Tooth결함, 기어 맞물림 결함, 기어나 베어링 초기 결함은 검출할 수 없는 것이 현실이다. 그러나 이번 기술 개발로 진단기법의 향상과 고감도 진동 센서의 활용으로 기어박스 온라인 진단 기법이 개발될 것으로 전망된다. 이 내용은 저속 기어 박스와 기어의 초기 결함을 검출하는 기술이 포함되어 있고 결함 형태에 대한 분석으로 설비의 운전 수명 예측이 가능할 것으로 전망된다. 이번 과제를 수행하면서 아직 국내에 활용되지 않는 저속 Gear 진단 기술, Gear, Bearing의 자체 초기 결함 검출 기법에 대한 기술을 습득하게 되고 설비 수명예측 기술을 확보함으로서 선진 기술과의 격차를 크게 해소할 수 있다고 판단된다. 그림 1.1.4는 기계 상태의 감시를 위한 기법과 장비기술이 하나로 요약이 된 그림이다.

이번 과제를 위하여 현재 국내에서 가장 활발하게 온라인 모니터링 시스템이 적용된 산업 설비 이상 감시 시스템에 대하여 검토를 하였다. 날로 치열해지는 현대 산업사회에서 플랜트 설비보전의 관리 필요성이 갈수록 중요시 되고 있다. 통상 플랜트의 설비보전 비용은 대개 총생산비의 4% ~ 16%를 차지하고 있고, 때로는 플랜트의 이득보다 많을 수도 있다고 알려져 있다. 다음 그림 1.1.5는 산업용 온라인 모니터링 시스템에 관한 사진이다.



CMS(유선)



Wireless(무선)

그림 1.1.5 온라인 상시 감시 시스템

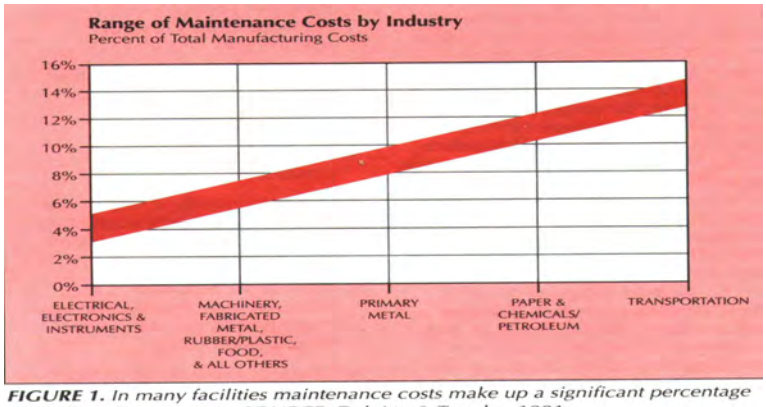



***FIGURE 1.*** *In many facilities maintenance costs make up a significant percentage of total production costs. SOURCE: Deloitte & Touche, 1991.*

그림 1.1.6 설비 운영 정지에 따른 경제적 손실

갑작스러운 설비의 가동정지 시간에 의한 보수에는 엄청나게 많은 비용이 들어가고, 때로는 설비 보전 비용보다 더 많이 들어가고 있다. 갑작스러운 가동정지에 의한 점검 보수, 생산 일정의 중단, 품질 하락, 원가 상승의 요인이 초래되고 가장 심각하게 고려되는 것은 설비 운영 정지에 따른 경제적 손실일 것이다. 이러한 이유로 설비 관리 시 Potable 장비가 가지고 있는 한계점을 보완하기 위해, 설비를 실시간으로 관리할 수 있는 Online Monitoring system(실시간 설비 관리 시스템)의 확보가 플랜트 업체들 사이에서 대두되고 있는 실정이다. 위의 그림 1.1.6은 설비 운영 정지에 따른 경제적 손실을 나타낸 그래프이다.

이처럼 국내 산업 전반에 걸쳐 온라인 모니터링의 중요성이 더욱 커지고 있지만 국내의 온라인 모니터링 시스템은 대부분 외산 장비에 의존하고 있는 실정으로 국내 시장의 약 95%를 외산 장비가 장악하고 있다. 국내 설비에 적용되는 진동 계측장비는 대부분 중소기업에서 생산하고 있으며 자체 생산보다는 수입 조립/가공을 하고 있는 실정이다. 설비의 모니터링 진단 시스템은 고감도 센서의 활용한 진단 설비 관리 기법으로 고장 메커니즘 분석을 통한 다양한 결함 유형과 그에 따른 최적의 센서, 감시 포인트 선정, 신호 취득의 방법, 신호의 알고리즘 구현이 가능한 기술로서 반드시 국내에서도 연구 개발하여 기술의 독립을 추구하여야 할 매우 중요한 기술이라고 사료된다. 이러한 온라인 모니터링 시스템의 적용 기술에서 가장 주요한 이론으로 자리 잡고 있는 것이 바로 설비진단 기술이다.

설비진단(Machine fault analysis; Health analysis)이라는 용어는 국내에서는 2000년대 이후에 비로소 자리를 잡았다. 의미를 두어 말하면 '기계결함분석'이라고 할 수 있지만, 국내에 이 종류의 기술이 처음 도입된 시기인 1990년대 후반에 국내 오퍼업체들이 번역하면서 만들어 낸 용어였고 국내 소음 진동 공학회에서 만들어진 '설비진단강습회, 설비 진단 자격인증원' 이 창립된 후로 용어가 정착되었다. 설비진단의 개념은 주로 장치산업(화학플랜트, 시멘트, 제지, 철강, 전력 등 연속기계 시스템인 플랜트로부터 제품을 양산하는 산업을 말함)에서 적용하기에 매우 적합하여 설비진단이라는 단어 대신에 다른 용어 (회전기계진단 또는 기계진단)를 사용하기도 하였다. 이 설비진단은 플랜트 내에서 존재하는 수많은 회전기계(모터 및 터빈, 엔진 등으로 구동하는 기계 조합)들 즉, "살아서 가동하고 있는 기계"들을 진단하고 원인을 해결하여 수명을 증진시키는데 그 목적을 두고 있는 분야(PDM)에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 왜냐하면 PDM(예지보전)을 위해서는 사람을 진단하는 것처럼 상세하게 설비(기계)의 현재 상태를 가장 잘 파악해야 하며 다음과 같은 많은 측정 장비와 진단기술(설비진단기술)이 근본이 되어야하기 때문이다.

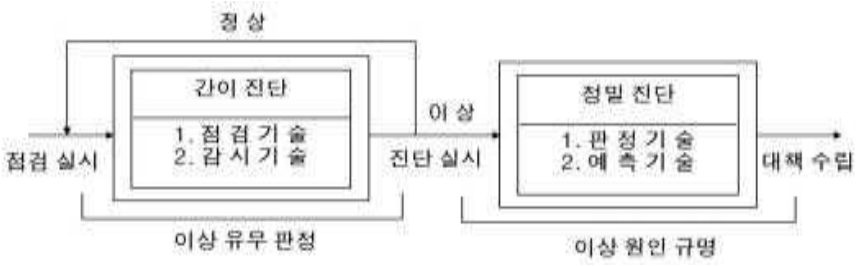



그림 1.1.7 설비 진단기술의 구성

설비 진단 기술은 간이진단기술(Condition Surveilance Technique : CST)과 정밀진단기술(Precision Diagnosis Technique)로 구성된다. 간이진단이란 사람의 제1차 건강진단에 해당되는 것으로 다수의 설비 열화 상태를 신속히 행하는 것으로 전문적 지식기술을 습득하지 않는 사람도 가능한 것을 전제로 하고 있다. 위의 그림 1.1.7은 설비 진단 기술의 구성을 간략하게 표현한 그림이다.

간이 진단기술은 점검기술과 감시기술의 두 가지 기능을 가지게 되며, 점검기술로는 사람이 휴대용 진단기나 설비상태를 순회 체크하는 기술이며, 감시기술은 감시 장치로 설비기능 연속 감시하는 기술을 말한다. 간이진단기술은 주로 오퍼레이타나 보전점검원에 의해 실시되는 것으로 간이 진단기는 조작이 간다하고 판정기준도 매우 간단, 명쾌해야 하며, 간이 진단 기술의 목적은 열화경향관리에 의한 이상의 조기발견, 정밀진단 대상설비선정, 경향관리 데이터의 분석에 의한 고장시점예측 등이 있다.

정밀진단 기술의 기능으로는 인지기술과 예측기술의 두 가지 기능을 지니며, 그 중 인지기술이란 설비의 현 시점에서 이상의 종류를 파악하는 기술이고, 예측기술은 장래의 상태를 예측하는 기술이다. 정밀진단의 목적은 설비이상의 종류나 발생위치를 파악하며, 설비이상의 원인과 제거방법을 파악, 위험도를 알고 그 진행을 예측, 그리고 최적 복구 시기나 복구방법을 파악하여 조치를 실행하는데 그 목표가 있다. 설비진단은 정비라는 의미와 상통 하며 정비(maintenance)는 보수(Repair) 또는 보전으로도 불리며, 설비를 운전 가능한 상태로 유지하고, 고장(Failure)이나  결함(Fault) 등을 고치기 위한 조치 및 활동을 의미하고 있다.

설비 진단 유형에는 선행보전(proactive Maintenance; PAM), 예지보전(Predictive Maintenance; PDM), 예방보전(Preventive Maintenance; PM), 사후보전(Reactive Maintenance; RM) 등이 있는데, 본 기술은 심각한 기계의 결함이 발생하기 전에 예측을 하여 불시에 생산라인의 주요설비가 가동정지 되는 것을 방지하는 예지보전 유형에 해당된다. 현재 국내의 설비 진단 기술은 설비에 문제가 발생한 후 대처하는 절차로 진행되고 있다. 그러나 문제가 발생한 후 정비에 들어가게 되면 열차의 경제적인 손실이 매우 클 뿐만 아니라 운행 중 사고 위험이 발생할 수 있으므로 철도의 진단 및 모니터링 기술은 일반 산업 설비와 비교할 때 그 중요성이 더 크다고 할 수 있다. 다음 그림 1.1.8은 설비진단의 개념을 표현한 도표이며, 그림 1.1.9는 설비진단 기술이 적용된 산업용 온라인 모니터링 시스템의 내용을 표현한 그림이다.

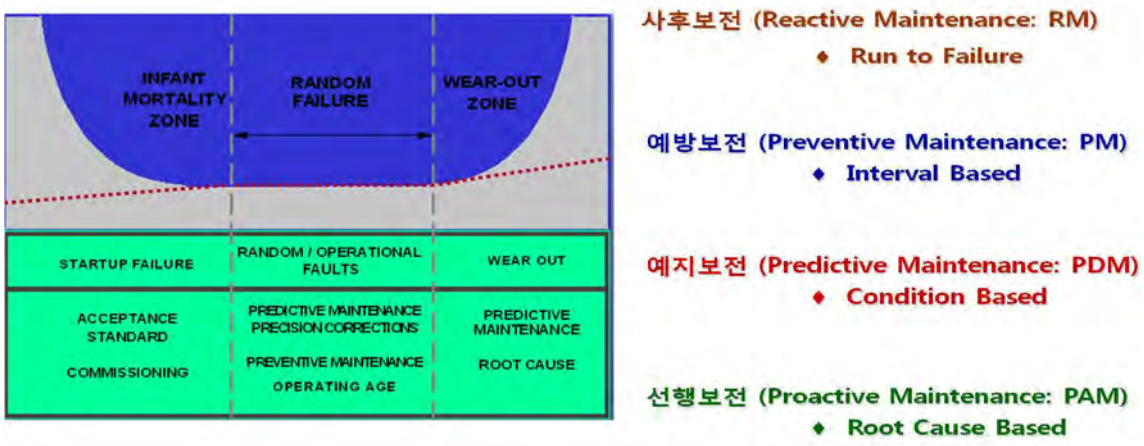



그림 1.1.8 설비진단 개념

현재 국내의 일반기계 및 설비에 대한 모니터링 및 진단 기술의 연구와 실용화는 활발하게 진행이 되어 왔지만, 철도차량과 관련된 기술은 아직 연구와 실용화가 미흡한 수준으로 이에 대한 보완이 필요하다. 그러나 이러한 설비 진단의 기술은 감속기 진동에 의한 결함을 상시 모니터링을 수행하는 시스템이 없어 감속기 손상에 대해 파악이 어려운 단점이 있다. 국내의 고속철도 운행 중 주요장치 고장 발생 시 차량의 상태를 시각적으로 제공하는 안전장치는 설치되어 있지만 감속기 고장에 대한 안전장치는 설치되어 있지 않아 항상 사고의 위험성이 존재하고 있다. 고속철도용 감속기의 경제적 손실 660억/년 기준으로 검토하였을 때 기존설비 진단 기술에 한발 앞서 조기에 결함을 예방하고 방지할 수 있도록 설비진단 기술과 모니터링 할 수 있는 통합 시스템 개발이 요구되고 있다. 다음 그림 1.1.10은 고속열차의 감속기 문제점을 정리한 것이다.

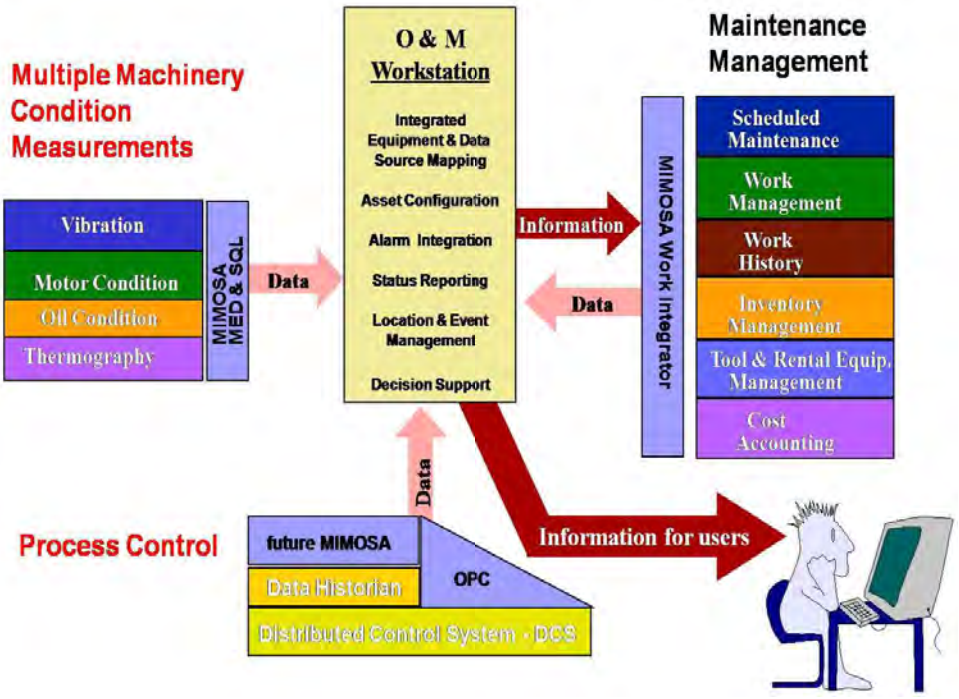



그림 1.1.9 온라인 모니터링 시스템 적용 설비진단



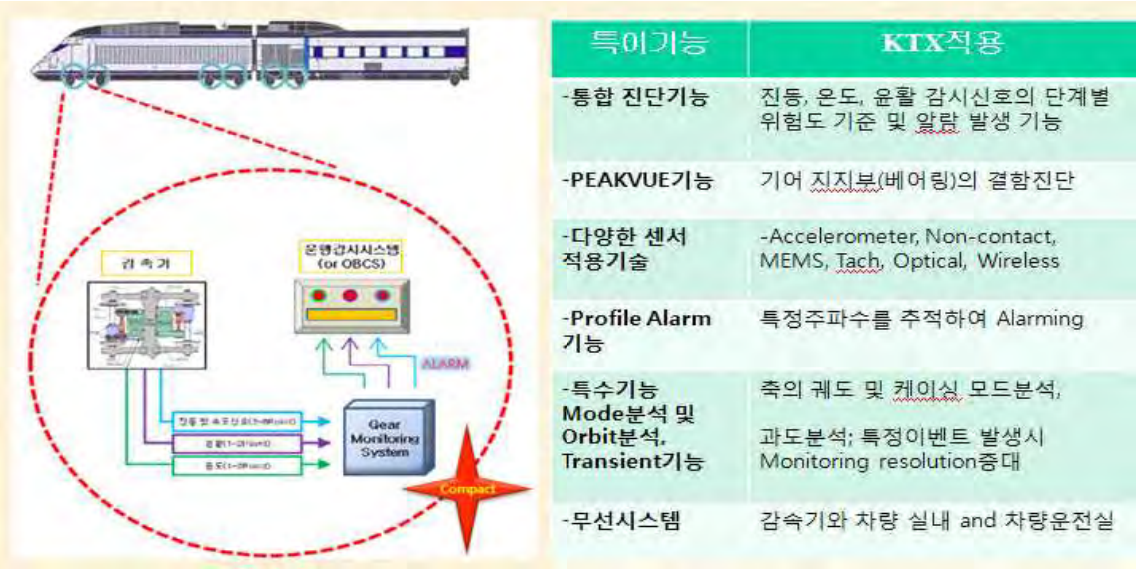

그림 1.1.10 KTX 감속기 문제점 내용

현재까지의 내용을 종합적으로 정리하여 보면 산업용(발전소 미분기 감속기 전용) 진동 Monitoring 시스템은 활발하게 현장에 적용되며 점차 그 보급 범위를 넓혀가고 있지만 고속철도(KTX)의 감속기와 대차에는 모니터링 시스템이 부재가 되어 안전을 진단할 수 있는 시스템이 미비한 상태로 감속기와 대차의 고장에 효과적으로 대처할 수 있는 수단이 전무한 실정이다. 이 때문에 고속철도 차량의 온라인 모니터링 시스템을 구축하여 철도차량의 주행 안전성을 높이고 감속기와 대차의 주기적인 유지보수 관리 체계 시스템을 구축하는 것이 그 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 고속철도 차량의 모니터링 시스템을 구축하기 위해서는 가장 효과적으로 감속기와 대차를 감시할 수 있는 기법만이 적용되어야 한다. 그리고 장착공간이 매우 협소하여 기법이 Simple하고 제품의 크기가 Compact한 시스템이 되어야 할 것으로 사료된다.

본 시스템에 대해 간결한 주요 파라미터에 대한 기법 중에는 주요 Gear의 축 하중을 지지하고 있는 베어링의 결함진전 여부에 대한 감시가 매우 필요하다. 이는 기존의 산업용 감속기에 대한 주요 감시기법 중의 하나로 반드시 감시해야 할 요소로 판단된다. 따라서 본 KTX감속기 진동 감시 시스템에서 주요하게 다루어야 할 기법들을 정리하면 아래와 같다.

○ 베어링 감시기법(Peak Vue; Envelope)
○ 가변주파수 감지(Order tracking & Synchronous averaging)
○ 변동 주파수 Alarm 설정 기법(Profile alarm)
○ 불필요 Alarm신호 제거기법(온도, 윤활 및 Motor current 부하 연동) 등

다음 내용을 정리를 하면 아래의 그림 1.1.11과 같이 정리를 할 수 있다.




| 특이기능 | KTX적용 |
|---|---|
| -통합 진단기능 | 진동, 온도, 윤활 감시신호의 단계별 위험도 기준 및 알람 발생 기능 |
| -PEAKVUE기능 | 기어 지지부(베어링)의 결함진단 |
| -다양한 센서 적용기술 | -Accelerometer, Non-contact, MEMS, Tach, Optical, Wireless |
| -Profile Alarm 기능 | 특정주파수를 추적하여 Alarming |
| -특수기능 Mode분석 및 Orbit분석, Transient기능 | 축의 궤도 및 케이싱 모드분석,<br>과도분석; 특정이벤트 발생시 Monitoring resolution증대 |
| -무선시스템 | 감속기와 차량 실내 and 차량운전실 |

그림 1.1.11 시스템의 개요 및 주요 개발 추진 기능

## 2. 연구개발의 중요성

가. 기술적 측면

감속기와 대차의 이상 상태 감시는 주기적인 검사에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 이상 감시는 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상의 감시에 효과적이며 주기적 검사 비용 및 철도 운행 중단에 따른 물류 운송의 경제적인 손실을 감소시킬 수 있다.

국내에서 특히 발전소의 일반기계 및 대형 설비에는 모니터링 및 진단 기술은 활발하게 연구가 되어 실용화 단계에 있지만, 철도차량의 감속기와 대차의 모니터링 기술은 연구 및 실용화가 미흡한 실정이다. 이미 해외에서는 설비진단 기술의 발달로 자동검사기술과 정밀측정, 품질관리 등을 통하여 철도차량의 부품을 최적의 상태로 관리하고 있으며 철도차량도 모니터링 시스템의 보급으로 인하여 철도 차량 설비에 대하여 체계적인 관리 시스템으로 도입하여 관리하고 있다.

발전소 설비의 설비진단 모니터링 시스템 기법에서 진동, 음향, 온도, 변위 등에 감시시스템 기술을 고속열차 차량 설비에 맞게 개량하여 적용하면 열차 차량의 안전성과 신뢰성 있는 차륜결함과 차축 베어링 감시 기술개발이 가능하다고 판단된다. 특히 외국산 장비가 주류를 이루고 있는 이상감시 모니터링 시스템을 개발한다면 철도차량 관련 모니터링 기술을 선점할 수 있으며 고장 부품 정보의 데이터 축적으로 화차 차량의 운용률 향상이 가능할 것으로 판단된다.

또한, 고장 예방 및 운영기관 유지보수의 능력 향상과 감시 기준에 대한 확립으로 안전한 운행 기술력 확보가 가능할 것으로 판단된다.

이러한 관점으로 정리하여 보면 산업 설비에 적용하고 있는 기계 부품의 검출신호와 진단 기술 내용을 고속열차 차량에 맞게 개량을 하여 적용을 한다면 많은 연구비 투자와 인력의 투입이 없이도 효과적으로 고속열차용 온라인 모니터링 시스템의 개발이 가능할 것이다. 다음 표 1.1.1은 기계 부품의 검출신호와 진단기술을 정리한 내용이다.

표 1.1.1 기계부품의 검출신호와 진단기술

| 검 출 계 | 검출 기술명 | 응 용 진 단 기 술 예 |
|---|---|---|
| 진동 음향 신호계 (Vibration & Sonic Signature) | (1) 진 동 법<br>(2) 진동 모드법<br>(3) 음 향 법 | (1) 진동에 의한 회전 기계 진단기술<br>(2) 진동에 의한 베어링진단기술<br>(3) 음향에 의한 기어진단기술 |
| 초음파 신호계 (Ultra-Sonic Signature) | (1) 초음파법<br>(2) 대기 중 초음파법<br>(3) 응력초음파(AE)법 | (1) 초음파에 의한 베어링진단기술<br>(2) 대기 중 초음파에 의한 검출기술<br>(3) AE법에 의한 압력용기진단기술 |
| 열적 신호계 (Thermal Signature) | (1) 온도계법<br>(2) 서보 그래프법<br>(3) 열류계법 | (1) 측정온도에 의한 코일의 감시<br>(2) 서보그래프에 의한 굴뚝의 진단<br>(3) 열류계에 의한 진단 |
| 기계 신호계 (Miscellaneous Mechanical Signature) | (1) 회전 속도법<br>(2) 변 위 법<br>(3) 유 량 법 | (1) 각가속도에 의한 회전기의 진단<br>(2) 변위법에 의한 저속 베어링의 진단<br>(3) 유량법에 의한 파손의 진단 |

감속기에서 발생하는 주요 손상은 기어의 피로손상 또는 베어링 손상, 축 및 볼트의 손상, 윤활불량 등이 있으며, 이와 같은 손상은 이상 소음 및 진동, 온도상승, 누유 등의 이상상태를 나타내고 있다. 따라서 감속기의 이상상태를 모니터링하기 위한 검출항목은 온도 및 진동, 오일상태 등이 가장 적절하다. 그림 1.1.12는 감속기 이상상태 모니터링 항목 및 검출 가능한 손상을 정리한 내용이다.

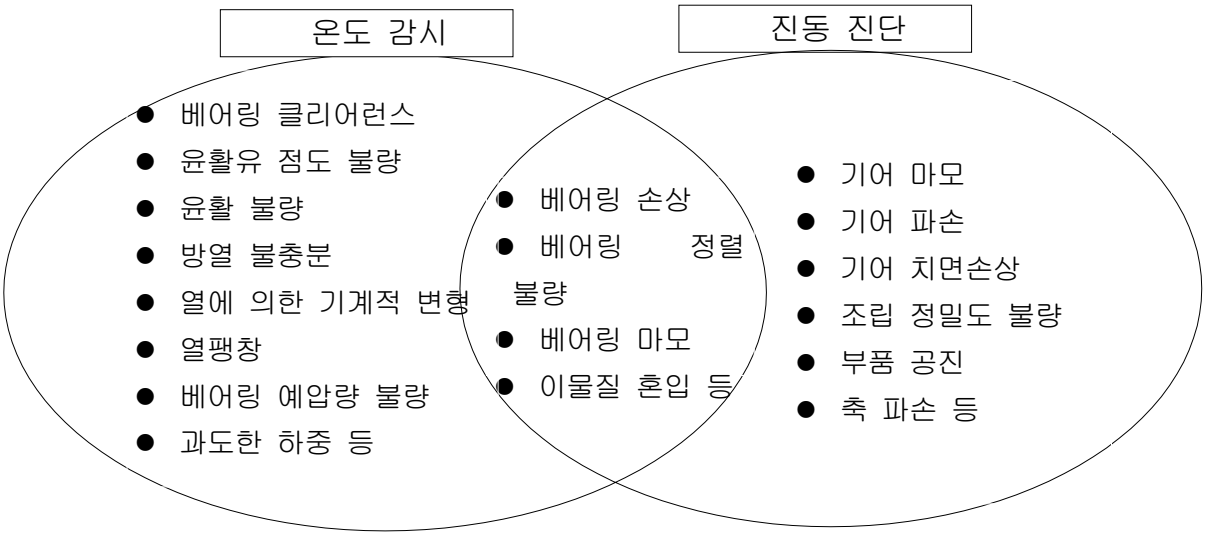



그림 1.1.12 감속기 이상상태 모니터링 항목 및 검출 가능한 손상

고속철도 차량의 감속기는 축의 회전속도가 광범위하고 차륜과 레일의 구름접촉 때문에 발생하는 진동 및 소음, 대차 및 차체의 진동 등이 복합적으로 전달되므로 일반 산업체의 진단 기술을 직접 적용하기는 매우 어려움이 따르고 있다.

나. 경제 산업적 측면

최근에 부각되고 있는 이상상태 실시간 모니터링 기술을 철도에 적용하여 개발할 경우, 철도의 안전운행 및 효율적 유지보수, 쾌적성 향상 등에 크게 기여할 수 있는 등 많은 장점 및 가능성을 지니고 있다. 고속열차용 감속기 이상상태 감시시스템 기술 개발 연구 과제를 통하여 관련 기술을 국내 기술개발로 완성하게 되면 감속기와 대차의 이상상태를 실시간으로 감시하기 때문에 철도의 안전운행 및 효율적 유지보수, 쾌적성 향상 등에 크게 이바지할 수 있는 기술개발이 될 것이다.

고속열차용 감속기 이상상태 감시시스템 기술개발로 실시간으로 상태감시를 수행하기 때문에 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상 감시에 대단히 효과적이며 주기적 감시 및 서비스 중단에 따른 비용을 감소시킬 수 있는 효과가 있다. 또한, 감속기 이상상태 감시 시스템 기술을 통하여 철도차량의 공공 교통 수송수단으로써 신속, 정확하게 승객의 안전수송 역할을 충실하게 수행할 기술이다.

고속열차용 감속기 이상상태 감시시스템 기술 개발 수준은 KTX와 KTX산천의 차량에 적용을 목표로 기술 개발할 것이며, 완성된 기술을 통하여 전동차에도 적용하여 철도차량의 안전성을 한층 더 업그레이드하는 기술을 개발할 계획이다. 또한, 상태감시 기반 정비 절차 도입으로 철도분야 유지보수 선진화에 이바지하고 유지보수 비용 절감 기술 개발에 지속적으로 활용 가능 기술이다.

KTX 고장에 의한 국민들의 불안 해소와 대형사고 미연 방지를 통하여 운행정지 사고로 인한 경제적 손실(660억/년, 2건 기준)을 최소화할 수 있는 기술로서 예측 가능하고 철도를 믿고 신뢰할 수 있는 사회기반의 토대가 될 것이며 세계 최고 수준의 안전성 확보 기술구현이 가능하다.

다. 연구개발의 필요성

고속열차의 안전운행 및 고장예방을 위하여 철도선진국에서는 윤축 베어링 온도 모니터링, 대차 안정성 및 헌팅(hunting) 모니터링 등에 대한 연구가 진행됐으며, 일부 모니터링 제품은 적용단계에 있다. 국내의 경우 고속철도 운영 기간이 짧지만, 고속열차 감속기 성능시험에 관한 기술을 확보하고 있고, 감속기를 부하 시험할 수 있는 대형시험기를 보유하고 있으므로 감속기의 손상을 방지하기 위한 모니터링 기술 개발을 위한 사전준비는 되어 있다. 고속철도 감속기의 유지보수 및 관리가 상태 진단을 통한 체계적이고 과학적인 관리가 아닌 운전시간을 기초로 일정 주기로 보수하는 Time Based 보전이 이루어지고 있어 이의 보완이 매우 시급하다. 따라서 상태진단을 통한 감속기 유지보수 및 관리를 위하여 관련 기술의 개발이 시급히 요청되고 있다. 300km/h 의 고속주행 시 감속기 손상으로 인한 대형 사고를 사전에 방지하기 위하여 감속기의 손상발생 가능 항목에 대하여 모니터링 하고 알람을 표시할 수 있는 안전장치의 개발이 시급히 추진될 필요가 있다. 고속열차 운행 시 감속기의 정상 상태를 모니터링, 진단하기 위하여 최적의 위치에 센서를 설치하고 효율적으로 데이터를 취득하고 전송하는 H/W 기술의 개발이 필요하며, 이상상태를 진단하고 알람을 표시할 수 있는 연속 상태 진단 S/W 핵심기술을 개발하여야 한다. 다음 그림 1.1.13은 본 연구개발 내용에 대한 SWOT 분석이다.

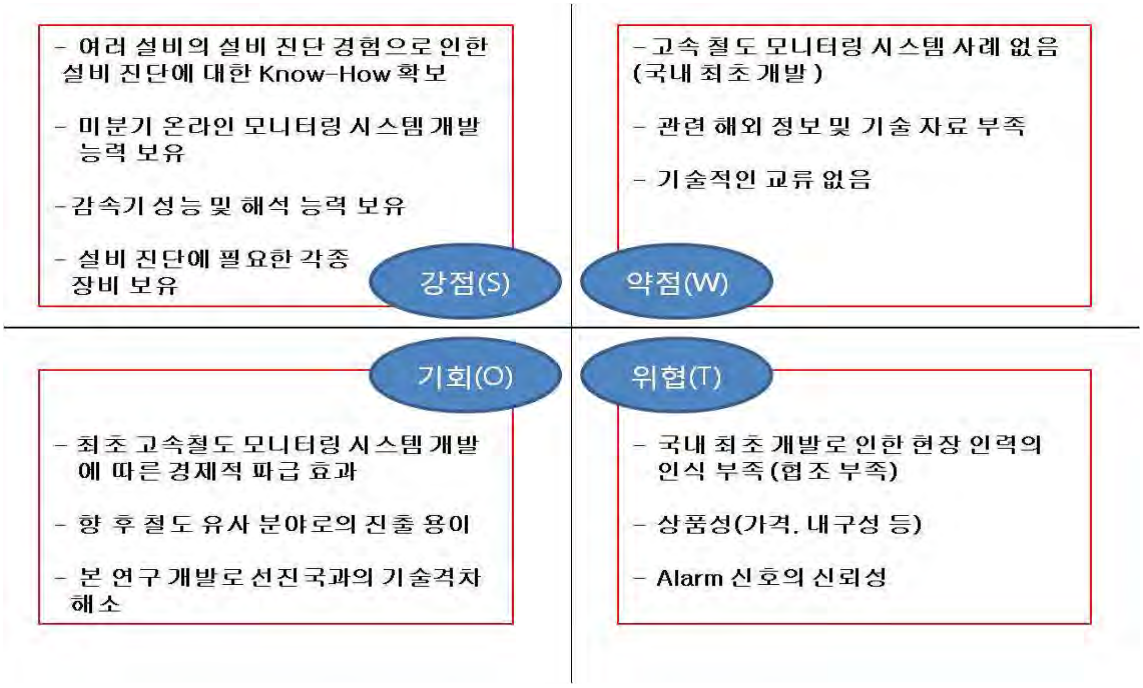



그림 1.1.13 SWOT 분석

위의 내용을 종합적으로 정리하면 다음과 같다.

○ 고속열차의 안전운행 및 고장예방을 위하여 철도선진국에서는 윤축 베어링 온도 모니터링, 대차 안정성 및 헌팅(hunting) 모니터링 등에 대한 연구가 진행됐으며, 일부 모니터링 제품은 적용단계에 있다.

○ 고속철도 감속기의 유지보수 및 관리가 상태 진단을 통한 체계적이고 과학적인 관리가 아닌 운전시간을 기초로 일정 주기로 보수하는 Time Based 보전이 이루어지고 있어 이의 보완이 매우 시급하다. 따라서 상태진단을 통한 감속기 유지보수 및 관리를 위하여 관련 기술의 개발이 시급히 요청되고 있다.

○ 300km/h 의 고속 주행 시 감속기 손상으로 인한 대형 사고를 사전에 방지하기 위하여 감속기의 손상발생 가능 항목에 대하여 모니터링 하고 알람을 표시할 수 있는 안전장치의 개발이 시급히 추진될 필요가 있다.

○ 고속열차 운행 시 감속기의 정상 상태를 모니터링, 진단하기 위하여 최적의 위치에 센서를 설치하고 효율적으로 데이터를 취득하고 전송하는 H/W 기술의 개발이 필요하며, 이상상태를 진단하고 알람을 표시할 수 있는 연속 상태 진단 S/W 핵심기술을 개발 하여야 한다.

○ 기존 온라인 모니터링 시스템 기술은 산업장비의 설비에 적용되었던 기술로 아직 철도차량에 적용되어있지 않다. 산업설비 분야에서 적용되는 온라인 모니터링 기법을 철도 차량에 적용하여 센서의 선정, 진단 기법의 완성, 신호 처리 및 분석 방법, 안전성 기준을 확립하여 새로운 시스템에 대한 매뉴얼을 완성하고 고속철도 운영시스템과 인터페이스가 되는 프로그램 및 하드웨어를 구축하여 철도 차량의 새로운 모니터링 시스템 개념을 개발하고자 한다.

# 제2절 연구개발의 정의, 특징

## 1. 연구개발의 정의 및 특징

### 가. 연구개발의 최종목표

○ 본 연구의 최종 목적은 고속철도 차량의 감속기에서 발생하는 진동 신호에 맞게 실시간 감시하고 실시간 모니터링을 수행하면서 이상 발생 시 기관사에게 즉시 통보가 되는 통합 시스템을 개발하여 고속철도의 운행에 있어 기존의 시스템과 비교할 때 안전성 확보 및 경제적 손실을 최소화할 수 있는 진동 및 통합 시스템의 개발을 목표로 한다. (대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함)

- 고속철도 차량 감속기에 맞는 최적 센서의 선정 (감속기, 대차)
- 모니터링의 최적 기법 및 감시 위치의 도출
- 모니터링 시스템의 S/W, H/W의 시스템 설계를 통한 시스템의 표준화 정립

○ 고속철도 차량의 정비 시점을 예측하고 가동률을 향상하여 주기적 점검에 따른 시간적 손실을 최소화 하고 열차 가동 중지에 따른 경제적 손실을 최소화할 수 있도록 기존 산업 설비에 국한되어 있던 설비 진단 온라인 모니터링 시스템 기술을 고속철도 차량에 적용하는데 그 목표를 설정하고자 한다.

- 정확한 Alarm 결과 출력
- 상품성 및 내구성을 감안한 제품
- Simple한 알고리즘과 Compact한 제품

○ 통합 신호의 Input / Output 알고리즘을 적용하여 통신의 유/무선화 및 KTX-OBCS의 연계 방안을 수립하여 적용되도록 한다. 다음 그림 1.2.1은 이번 개발 목표의 시스템의 개념을 표현한 그림이다.

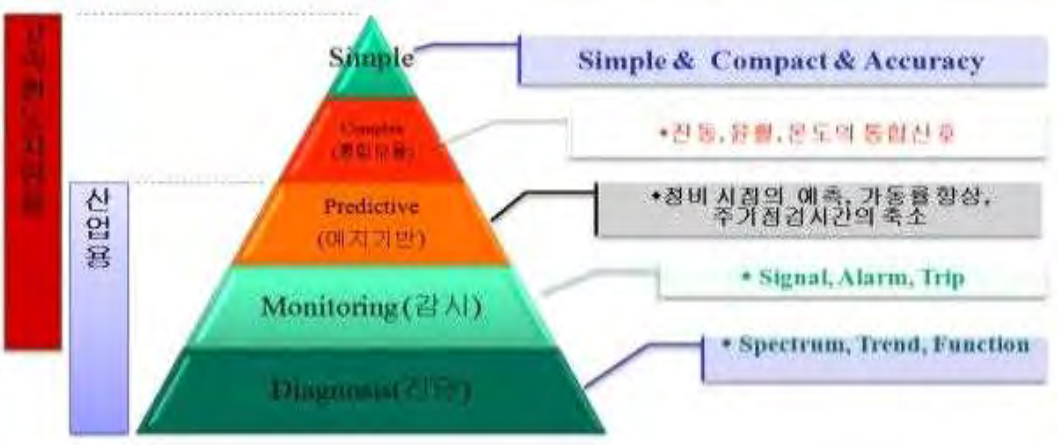



그림 1.2.1 고속철도차량 + 산업용 Gear box 전용 모니터링 시스템 개념

나. 연구개발 최종목표의 성격 및 설정 근거

○ 진동을 이용한 감속기 모니터링 및 진단 통합 시스템으로 측정 범위는 10 Hz에서 20 kHz이다. 이렇게 설정한 근거는 1차 고속열차의 감속기 회전 입력 수 4,000 rpm에서 발생할 수 있는 최저 주파수는 35 Hz 이고 3차 측정에서 최고 주파수는 10,800 Hz로 측정이 되어 설정된 값이다. (대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함)

○ 기존의 산업 설비에 대한 온라인 모니터링 시스템의 기술 개발 및 상용화는 이미 활발하게 진행이 되어 각 설비 분야에 적용 및 활용 되고 있지만 고속철도 차량의 결함 진단 및 모니터링 시스템 분야(대차 포함)는 아직 미흡한 수준이다.

○ 이러한 이유로 고속철도 차량의 문제 발생 시 매년 보수비용과 운행 정지에 따른 경제적 손실이 연간 660억 규모의 손실과 정비에 따른 200여 시간의 LOSS가 발생 되고 있어 상당한 문제점을 가지고 있으므로 (1) 최종목표에서 언급하였던 센서의 선정에서부터 설치 위치, 설비 결함에 대한 최적의 기법 및 실행방안을 정립하고 표준화하여 정밀한 진단 및 정비를 하면 위에 언급 하였던 손실을 최소화할 수 있다.

○ 산업 설비에 국한된 온라인 모니터링 시스템을 고속철도용 통합 모니터링 시스템으로 적용이 되도록 계획을 수립하고 기존 모니터링 기술의 한계를 극복하도록 반영구적인 통합 모니터링 시스템을 갖추게 하여 향후 보다 효과적으로 고속철도 차량 기어박스의 진동에 의한 결함 진단 및 대처가 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

○ 고속철도 차량 차축에 설치된 센서를 통하여 이상 발생 시 알람을 통한 기관사에게 즉시 통보되는 시스템으로 설비결함 발생 및 대형 사고를 미리 방지하여 기존 고속철도 차량 운행에서 발생한 사고 및 가동정지에 따르는 손실을 만회하고 안전성을 높일 수 있다.

○ 사전에 사고를 예방하고 결함이 발생할 경우 설비가 가동될 수 있는 수명을 예측하고 적절한 대책을 수립해 실행함으로써 안정되고 신뢰성이 있는 시스템의 구현이 가능하다.

○ Main 시스템 및 센서 설치 부위가 협소하므로 Compact한 시스템의 설치가 요구된다.

○ 대차 진동을 측정 및 저장하고 측정 데이터를 백업할 수 있는 기능 구축

다. 연차별 연구목표 및 내용

| 연 차 | 연구목표 | 주요 연구내용 |
|---|---|---|
| 1차년도 | ■ 감속기 손상 메커니즘 분석 | ■ 감속기 손상사례 및 원인 분석 (고속철도 및 전동차)<br>■ 감속기 손상모드 및 손상 메커니즘<br>■ 주요 손상사례별 이상상태 영향 분석<br>■ 감속기 이상상태 데이터베이스 구축 (I)<br>(실물 시험기 및 소형 시험기 이용) |
| | ■ 감속기 진동특성 분석 및 모니터링 시스템 기본설계 | ■ 감속기 진동 증가 요인 분석 (감속기 결함 시나리오 분석)<br>■ 감속기 실물/현차 시험<br>■ 진동특성 분석 (시계열/주파수 분석)<br>■ 계측센서 부착위치 및 최적 센서 선정<br>■ 감속기 진동 모니터링 시스템 기본설계 (H/W, S/W)<br>(대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함) |
| 2차년도 | ■ 감속기 손상모드 실물시험 및 영향 분석 | ■ 감속기 손상모드 실물시험 (베어링, 기어 등)<br>■ 감속기 손상모드별 이상상태 영향 분석<br>■ 감속기 이상상태 데이터베이스 구축 (II)<br>(실물 시험기 및 소형시험기 이용) |
| | ■ 진동에 의한 결함 및 이상상태 | ■ 감속기 결함 및 이상상태 평가방법 정립<br>■ 감속기 이상상태진단 S/W (알고리즘 포함) 구축<br>■ 감속기 이상상태진단 H/W 구축 및 성능시험<br>■ 대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업용 S/W, H/W 구축 및 성능시험 |
| 3차년도 | ■ 진동에 의한 결함 및 이상상태 분석/평가 시스템 현장적용 시험 및 업그레이드 | ■ 시운전을 통한 감속기 결함 및 이상상태 S/W(알고리즘 포함), H/W의 검증 및 보완<br>■ 진동 이상상태 기준 설정 및 정도향상 |
| | ■ 진동 / 윤활 / 온도 상태 Monitoring 통합 시스템 구축 | ■ 통합시험의 Input/Output 알고리즘 구축<br>■ 통합시스템 신뢰성 검증<br>– 신뢰성 입증 시험방법 및 시험기준 정립<br>– 정상/이상상태 시험실 시험 검증<br>– 이상상태 중첩을 통한 실차시험 검증<br>■ 무선화 및 KTX-OBCS 연계방안 수립<br>■ 통합시스템 유지보수 매뉴얼 작성 |

# 제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

## 1. 국내기술 현황

### 가. 국내 관련기술

○ 국내의 경우 회전기계의 결함진단에 관한 연구가 진행되면서 발전기, 모터 등에 대한 자동진단 시스템이 개발되어 활용되고 있다. 고가의 기어박스 진동 모니터링 기법이 국내의 Power plant에 도입된 바 있으며 Alarm signal을 출력할 수 있는 알고리즘은 국제특허를 취득할 만큼 특수한 결과물이 될 수 있을 것으로 판단된다.

○ 현재 산업체에서 사용되고 있는 다양한 종류의 기계의 상태를 진단하는 방법으로 기계 구조물의 소음/진동의 측정 및 분석, 열화상 카메라를 이용한 열화상 측정, 온도 측정 및 윤활유 분석 등 다양한 종류의 비파괴 분석법이 사용되고 있다.

○ 국내에서는 회전기계의 결함진단에 관한 연구가 많이 진행되면서 발전기, 모터 등과 같은 회전체에 대한 자동 진단 시스템이 개발되어 산업분야에서 다수 이용되고 있다.

○ 회전기계의 결함진단을 원인과 증상에 대한 인과관계를 고려하여 한계치를 설정하지 않고 정확한 판별을 위해서 fuzzy 이론을 도입한 이상 진단 시스템을 개발하였다.

○ 한국 원자력 연구소에서는 원자로 내부 구조물의 손상 혹은 결함을 감지하기 위해서 진동데이터를 이용한 진동평가 프로그램(해석, 측정, 검사, 평가)을 이용하여 이상상태 감지 시스템을 개발하였다.

○ Gear box의 Vibration monitoring 방법은 Gear box로 인한 감/증속 시스템을 사용하고 있는 Power, Air Product, Tire, Paper, Cement, Steel, Petro chemical 생산 등 Plant에서 유용하게 적용할 수 있으며 특히 고가의 기어 박스를 적용하는 산업현장에서 당 모니터링 기법을 적용한다면 생산 및 보수비용에 의한 자산관리 측면에서 매우 적절한 효용가치가 있을 것으로 사료된다.

## 2. 국외기술 현황

### 가. 국외 관련기술

#### (1) 진동을 이용한 모니터링 및 진단 기술

○ 일본 철도차량 분야에서는 차량의 주요부품을 해체하지 않는 상태에서 결함 및 이상상태를 진단하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 그 가운데에서도 진동을 이용한 이상상태를 감지하기 위한 시스템이 개발되고 있다.

○ 일본 JR에서는 신칸센 대차의 유지보수 및 검사를 위해서 진동을 이용한 결함감지를 위한 두 개의 알고리즘을 개발하였다.

○ 영국에서는 철도차량의 안전성과 유지보수의 시간과 비용을 절약하기 위해서 대차의 결함 및 이상상태 감지 시스템에 관한 연구를 수행하였다.

○ 독일의 GMBH는 휠, 철도 차량의 차축 또는 휠 베어링 박스에 센서를 부착하여 진동, 온도, 속도, 가속도의 성분을 모니터링 할 수 있도록 시스템을 개발하였다.

○ 미국의 Wilcoxon Research사는 베어링 박스에 가속도 센서를 부착하여 진동을 감지하는 시스템을 개발하였다.

○ 중국의 Hindawi Publishing Corporation은 열차의 바퀴 축에 센서를 부착하여 진동을 감지하는 시스템을 개발하였다.

○ 중국 베이징에서 2009년에 개최된 Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference에서 FBG(fiber Bragg grating) 센서를 적용하여 실시간 열차의 진동 안전 모니터링을 하는 기술이 소개되었다.

○ 벨기에의 D2S international사는 비접촉 센서 EMAT를 적용하여 320 km/h의 속도까지 적용이 가능한 열차의 진동 및 레일의 손상을 감지하고 모니터링 하는 시스템을 개발하였다.

○ 스위스의 Colibrys사의 제품 중 하나인 가속도 센서로 열차의 진동 모니터링에 적용이 가능한 센서를 개발하여 상용화하였다.

## 3. 특허 동향

○ 해외 주요 특허 분석

표 1.3.1 연도별 해외 특허출원 동향

| 출원 년도 | '00 이전 | '01 | '02 | '03 | '04 | '05 | '06 | '07 | '08 | '09 | '10 | '11 | '12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 일본 | 9 | 0 | 1 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| 미국 | 9 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 유럽 | 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

* 미국등록공보 검색식 (vibrat*oil*tempaerature*ultrasonic wave and (sens* measur* detect*) and alarm* and (compar* judg* diagnos* watch*wheel*Bearing*flat)) : 237 건 검색
* 일본공개공보 검색식 (vibrat*oil*tempaerature*ultrasonic wave and (sens* measur* detect*) and alarm* and (compar* judg* diagnos* watch*wheel*Bearing*flat)) : 257 건 검색
* 유럽공개공보, 검색식 (vibrat*oil*tempaerature*ultrasonic wave and (sens* measur* detect*) and alarm* and (compar* judg* diagnos* watch*wheel*Bearing*flat)) :37건 검색

- 특허 US 6,297,742호

모니터(진단장치)에 관한 것으로 하우징과 하우징을 기계에 부착하기 위한 파스너와 모니터에 전력을 공급하는 전력 공급기와, 하우징 내부에 배치되어 센서 데이터를 생성하는 센서와, 센서 데이터를 가공 및 분석하고 기계의 이상 시 경보 신호를 생성하는 신호 처리기와 경보 신호를 수신하여 사람이 지각 가능한 표시를 생성하는 지시 부 및 센서 데이터와 기계의 작동 이력을 저장하는 메모리를 포함하여 형성되며, 지시 부는 시각적 지시 부로 형성되고 시각적 지시 부는 기계의 상태에 따라 발광하는 노란 색 또는 빨간색의 발광 부를 포함하도록 형성되는 구조이다. 따라서 기계에 장착되어 기계의 상태를 감지하며, 기계의 상태를 육안으로 식별하도록 표시하는 특허이다.

- JP 0488-14630 호

철도차량의 유지보수 관리 시스템에 관련된 특허로서 철도 차량의 유지보수에 관련된 특허이다. 주 원리는 계측장비를 이용하여 철도 차량의 이상을 감지하는 모니터링 시스템 관련된 특허로서 주로 유지보수 기술에 관련된 특허이다.

- 특허 JP 2004-338890호

베어링 관리 시스템에 관한 것으로서, 베어링의 진동을 검출하는 진동 검출 센서와 검출 진동 데이터가 기준 진동 값을 넘었을 경우에 베어링 이상 신호를 발생하는 베어링 이상 판단장치 및 베어링 이상 신호 때문에 경보를 발하는 경보기를 포함하여 형성되며, 경보기는 시각적 정보를 표시하기 위한 라이트로 형성될 수 있는 구조이다. 따라서 베어링이 이상이 있는 경우에 진동을 감지하여 시각적 경보를 발생시키는 구조의 특허이다.

표 1.3.2. 연도별 국내 특허 출원 동향

| 출원년도 | '00이전 | '01 | '02 | '03 | '04 | '05 | '06 | '07 | '08 | '09 | '10 | '11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 한국 | 17 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 |

* 특허 및 실용신안, 검색 식 : (진동, 윤활, 온도, 초음파 and (센서 센싱 탐지 감지 계측) and (알람 경보) and (비교 대비 판단 감시 진단))

○ 국내 주요 특허 분석

- 한국공개특허 10-1205-9640000호

본 발명은 철도차량용 주행안정성 측정 시스템에 관한 것으로 보다 상세하게는 철도차량의 차축과 레일 상면 사이의 수직거리를 이용하여 철도차량의 주행 중에 발생하는 차륜의 플랜지부분과 레일 사이의 접촉 여부 및 차륜의 점프 현상 등의 주행안정성을 실시간으로 파악할 수 있도록 함으로써 운행구간의 레일 상태 등의 자료를 확보할 수 있도록 함과 동시에 확보된 자료를 토대로 유지보수를 용이하게 할 수 있도록 하는 철도차량용 주행안정성 측정 시스템에 관한 것이다.

- 한국공개특허 10-2012-0078113호

공작기계의 진동모니터링 시스템에 관한 것으로서 스핀들모터에 연결된 주축에 설치되어 진동을 감지하여 진동 감지 값을 출력하는 진동감지 센서와 진동감지센서의 진동 감지 값을 입력받고 가공정보를 받아 가공정보에 대한 데이터를 산출하는 제어모듈과 경보 레벨보다 진동 감지 값이 큰 경우에 경보신호를 발생시키는 모니터링모듈을 포함하여 형성되었다.

- 한국공개특허 10-2013-0045589호

진동센서를 이용한 진단시스템에 관한 것으로서, 진단 대상으로부터 진동신호를 감지하는 센서와 진동신호를 수신하는 감지신호 수신부와, 감지신호를 디지털데이터로 변환하는 컨버터와 디지털데이터를 기준데이터와 비교하는 비교 부 및 진단대상의 이상여부를 판단하는 판단 부를 포함하며, 비교 부는 진동주파수의 평균값 또는 실효값을 임계값과 비교하도록 형성된다.

- 한국공개특허 10-1210-8150000호

본 발명은 비파괴 검사 장치에 관한 것으로, 회전체 외부에 다수의 초음파 탐촉 자를 갖는 탐촉자 모듈 부를 두어 대상물의 내. 외 면 종. 횡 방향의 결함 및 두께 측정이 가능하도록 한 초음파를 이용한 비파괴 검사 장치에 관한 것이다.

## 4. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

### 가. 시장의 정의

모터, 팬, 펌프, 기어, 베어링, 기구부 등의 구동설비에서 발생하는 비정상적인 진동은 일반적으로 예상하지 못한 기계적 고장의 원인이 되며, 이런 형태의 고장으로 인한 불필요한 설비의 가동 정지와 보수는 산업체에 커다란 손실을 발생시킴으로써 산업 생산성을 낮추게 되는 가장 큰 요인이 되고 있다. 특히, 대규모 설비가 가동되고 있는 플랜트나 발전소에서의 가동 정지는 금전적 손실뿐 아니라 관련 산업체의 손실이나 일반인들의 피해까지도 예상할 수 있다. 설비진단 기술이란 시간에 따른 설비의 상태를 확인하고 이를 바탕으로 이상 혹은 고장에 관한 원인 및 앞으로의 영향을 예지, 예측하고 필요한 대책을 찾아내는 기술로서, 예상하지 못한 가동 정지로 인한 피해를 방지하고 설비의 정상적인 가동을 가능하게 할 수 있다.

개발 기술은 철도 산업 설비 현장에 바로 접목할 수 있는 모니터링 시스템 타입으로 기존 센서 부착 방식으로 철도 설비 운영자의 관리에 따른 업무의 손실을 획기적으로 줄이고 산업체의 설비관리 비용을 최소화할 수 있는 제품의 형태를 연구하였으며 동 기술이 상용화될 경우 최종 제품인 발광식 소형 진동 센서는 진단 설비 산업 군에 속하며, 장치산업의 대표적인 석유화학, 철강 및 발전설비 등에서 사용되는 회전기계의 결함을 분석하고 진단하는데 활용되게 된다. 이에 따라, 동 제품의 후방 산업은 진동을 감지하는 센서 산업이며, 전방 산업은 장치 산업으로 규정지을 수 있다. 설비진단 산업은 플랜트, 전력, 철도 등 국가의 기간산업을 유지하기 위한 필수적인 산업 분야로서 결합형 지식산업이자 벤처 기업 형 산업, 차세대 전략산업 및 글로벌산업이라는 산업적 특징이 있으며, 기술적으로는 기술 집약적 첨단사업이자 공업지식산업으로 강한 규제가 작용하는 산업이다.

설비진단(Machine fault analysis; Health analysis)이라는 용어는 국내에서는 2000년대 이후에 비로소 자리를 잡았다고 볼 수 있는데 의미만으로 보면 '기계결함분석'이라고 할 수 있지만, 국내에 이 종류의 기술이 처음 도입된 시기인 1990년대 후반에 국내 장비수입업체들이 번역하면서 만들어 낸 용어였으며 국내의 한국 소음 진동 공학회에서 만들어진 설비진단강습회, 설비진단자격인증원 등이 창립된 이후로 설비진단이라는 용어가 정착된 것으로 보인다. 설비진단 기술은 장치산업의 대표적인 석유화학플랜트, 시멘트, 제지, 철강 및 발전설비, 가스, 수자원, 하수처리 등에서 사용되는 회전기계의 결함을 분석하고 진단하는 기술을 말하며, 연속공정에서 사용되는 이 회전기계들은 대부분 24시간 작동되므로 중요한 부분의 고장으로 전체 설비가 정지될 경우에는 큰 손실이 발생하게 된다. 따라서 체계적인 정비계획과 보조설비 등의 관리가 요구되는 산업 분야이다. 이 설비진단은 플랜트 내에서 가동되고 있는 수많은 회전기계(모터, 터빈, 엔진 등으로 구동하는 기계 조합)들을 진단하고 원인을 해결하여 수명을 증진하는데 그 목적을 두고 있다. 설비진단 분야에서 첨단기술에 속하는 예지보전(Predictive Maintenance)은 다양한 측정 장비(진동, 윤활, 초음파, 열화상, 온라인모니터링, 레이저 얼라인먼트, 밸런싱, 전류분석 등)와 진단기술(설비진단기술)을 활용하여 설비의 상태를 감시하는 것으로서 비용효과가 매우 높은 것으로 알려져 있다. 아직 국내에서는 예지보전을 할 수 있는 업체는 당사가 유일하며 대부분 업체에서는 설비의 진단만을 하고 있으므로 설비진단은 발전가능성이 높은 산업분야이다.

나. 시장 규모 및 동향

시장의 형태를 살펴보면, 설비의 상태를 감시하는 방식으로는 엔진 등의 진동을 측정하여 이상 유무를 확인하는 진동 감시 시스템(VMS)이 있고, 모터 회전축 부분의 윤활제를 분석하여 베어링의 마모도나 엔진의 상태를 확인하는 윤활 분석(lubricating oil), 적외선 카메라를 이용하여 설비 각 부분의 온도를 확인하는 열화상분석(thermography) 등으로 구분할 수 있다. 이러한 감시 시스템 장비의 사용자는 화학, 석유화학, 석유산업, 전기발전산업, 우주항공, 무기 및 방위산업, 제조 산업, 수 처리 산업 등이 있다. 2011년 6월에 Frost & Sullivan에서 발표한 자료에 따르면 전 세계 설비 상태 감시 시스템 장비의 2007년 전체 시장은 12억 3천만 달러 규모이며 진동감지가 가장 큰 부분으로서 8억 3,000만 달러이고, 윤활분석 장비가 1억 4천만 달러, 열화상분석 장비가 2억 6천만 달러를 차지하고 있다. 2008-2009년의 전 세계 경제위기로 인하여 설비 감시 시장도 다른 분야와 마찬가지로 2009년도 전체 시장 규모가 전년에 비하여 13억 3천만 달러로 줄어들게 되지만 2010년에는 12억 7,300만 달러로 증가하는 것을 볼 수 있다. 2010년 이후에는 비교적 안정적인 경제성장과 환경안전 수요, 새로운 적용분야에 대한 기회 등의 요인에 의하여 감시 시장 규모가 증가할 것으로 전망하고 있으며 2010년도에서 2015년도 사이의 연평균 성장률을 6.7%로 판단하였으며 이로부터 2015년 상태 감시 시스템의 전체 시장규모는 17억 5,800만 달러이고 이 가운데 진동 감시 시스템 장비는 11억 8,800만 달러를 차지할 것으로 예측하였다. 표 1.3.3 에 상태 감시 시스템 장비의 연도별 시장규모가 표시되어 있으며, 이것으로 그림 1.3.1 에 그림으로 나타내었다.

표 1.3.3 전 세계 상태 감시 시스템 장비 시장 규모

(단위 : 백만 달러)

| 구분 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vibration | 830 | 880 | 830 | 860 | 917 | 978 | 1,043 | 1,113 | 1,188 |
| Lubricating Oil | 140 | 150 | 130 | 131 | 139 | 149 | 159 | 170 | 181 |
| Thermography | 260 | 280 | 270 | 282 | 301 | 321 | 343 | 365 | 389 |
| 합계 | 1,230 | 1,310 | 1,230 | 1,273 | 1,357 | 1,448 | 1,545 | 1,648 | 1,758 |

출처 : Frost & Sullivan, “World Condition Monitoring Equipment Market”, 2011.06.29, CAGR (2010-2015): 6.7%

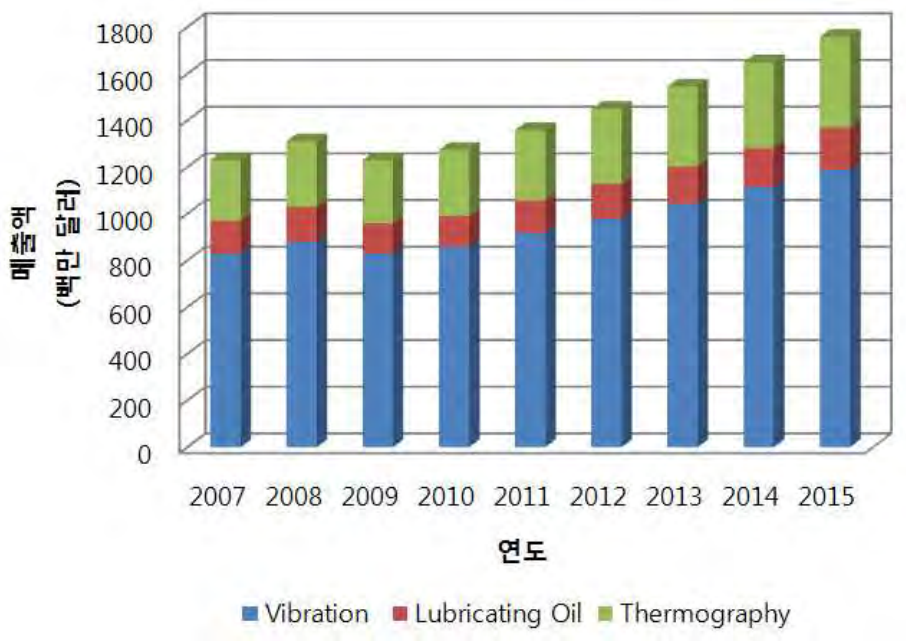



그림 1.3.1 전 세계 상태 감시 시스템 장비 시장 규모

다. 시장 전망

감시 시스템 장비는 설비에 포함되어 있는 엔진이나 모터 등의 회전체 진동 패턴을 센서를 통하여 확인하고 수집된 주파수와 진폭 등의 데이터를 수집하는 기능을 가지고 있다. 이 장치는 기계류나 구조물의 고장을 진단하고 해결하는데 널리 쓰이는 방법이다. 이러한 진단 방식은 예기치 못한 고장으로 인한 심각한 문제가 발생하는 것을 방지하여 비용과 가동시간 측면에서 중요한 역할을 하고 있다. 진동 감시 시스템 장비는 크게 고정식과 이동식의 두 가지로 구분할 수 있다. 고정식(또는 온라인 방식)은 설비에 고정된 일련의 센서를 포함하고 있으며 수집된 정보를 연결되어 있는 컴퓨터 또는 고정 서버로 전송하여 분석한다. 이동식은 전원이나 센서 등이 독립되어 있어서 이동할 수 있으며 데이터 수집부터 분석의 전 과정을 독립된 장비 내에서 독자적으로 수행할 수 있는 특징이 있다. 아직도 진행되고 있는 전 세계적인 경기 침체는 수요자들의 소비를 제한하고 있으며 진동 감시 시스템 장비 시장의 성장에도 영향을 미치고 있으며, 장비의 가격에 민감한 분위기가 형성되므로 고가의 고정식 장비에 대한 수요가 줄어드는 추세이다. 이와 관련해서 저가 제품에 대한 수요로 인하여 장비의 생산기지가 동유럽이나 아시아-태평양 지역으로 이전하는 추세이며, 북미나 유럽시장에서도 역시 가격 인하에 대한 수요자들의 요구사항이 높아지고 있다.

감시 시스템 장치 시장과 관련하여 설비의 유지 기술이 새로운 분야로 떠오르고 있는데 설비의 가동 정지 시간을 단축함으로써 생산성을 높이기 위하여 기계류의 신뢰도를 개선하려는 노력이 다양하게 시도되고 있다. 감시 시스템 장치의 자동화나 원격 조정 기능을 향상하기 위한 새로운 기술들이 개발되고 있다. 저비용의 무선 온라인 감시 시스템, 고장 및 진단을 자동으로 처리하는 방식, 광대역 인터넷 통신의 적용, 스마트폰이나 웹을 기반으로 하는 감시 프로그램 등이 여기에 포함된다. 감시 시스템 장치 시장에서 가장 뚜렷한 변화는 추가 인력이 요구되는 오프라인 감시에서 온라인 지속 감시 방식으로의 수요 전환이다. 네트워크 기술의 진보와 인터넷이나 스마트폰의 확산은 연결 편리성이 매우 높아짐에 따라서 중앙에서 전 세계 장비를 감시하는 것이 가능하게 되었으므로 수요자 측면에서는 비용절감을 위한 온라인 감시가 시장의 추세로 판단된다.

Global Industry Analysts, Inc.(GIA)에서 2013년 7월에 발표한 "Machine Condition Monitoring Equipment: A Global Strategic Business Report"에 따르면 가동 중지시간의 단축을 통한 생산성 향상과 작업장과 개인 안전에 대한 정부의 규제가 강화, 기계류가 계속 복잡해짐에 따라서 안정적인 설비의 작동을 위한 감시 시스템 시장은 지속적으로 증가할 것으로 설명하고 있다. 특히, 연속공정이 진행되는 발전소나 제조업 분야에서는 설비 중단에 따르는 피해를 줄이기 위하여 감시 시스템 장치에 많은 투자할 것으로 전망하고 있다.

Frost & Sullivan에서의 보고와 마찬가지로 진동 감시 시스템 시장이 가장 큰 부분을 차지할 것이며 진동 감시, 윤활 분석, 열화상 분석 가운데 열화상 분석 분야의 성장률이 앞으로 가장 높을 것으로 보고 있다. 중국과 인도, 동남아시아에서의 빠른 산업화로 인한 수요 증가와 생산비용 절감을 위하여 생산기지가 아시아로 이전할 것으로 전망하고 있다. 전체 감시 시스템 장비 시장 규모는 Frost & Sullivan과 비슷한 수준인 2018년에 23억 달러가 될 것으로 전망하였다. Frost & Sullivan과 GIA의 자료를 바탕으로 2013년부터 향후 5년간 진동 감시 시스템의 미래 시장 전망이 표 3.1.3 에 나타나 있다(1달러 당 1,100원으로 환산). 2013년 기준으로 전 세계 시장 규모 1조 1,482억 원과 국내 시장 규모 344억 원에서 2018년에는 전 세계 시장 규모가 1조 5,857억 원이며 국내 시장 규모는 475억 원으로 성장할 것으로 판단한다.

표 1.3.4 진동 감시 시스템 장비 시장 규모 전망

(단위 : 억 원)

| 구분 | 2013* | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 전 세계 | 11,482 | 12,251 | 13,072 | 13,948 | 14,882 | 15,880 | 16,944 | 18,079 |
| 국내** | 344 | 368 | 392 | 418 | 446 | 476 | 508 | 542 |

* 출처 : Frost & Sullivan, Global Industry Analysis, Inc.

## 제4절 연구개발결과가 관련 분야에서 차지하는 위치

### 1. 연구개발 결과 의미

○ 기존 온라인 모니터링 시스템 기술은 산업장비의 설비에 적용이 되었던 기술로 아직 철도차량에 적용은 미흡한 수준이다. 산업설비 분야에서 적용된 온라인 모니터링 기법을 철도 차량에 적용하여 최적의 센서 선정, 감속기의 진단 기법 완성, 감속기 결함 신호 처리 및 분석 방법, 안전성 기준을 확립하여 새로운 시스템을 구축하여 고속철도 운영시스템과 상호 연계될 수 있도록 시스템을 개발 한다면 고속 철도 차량의 운행에 있어 좀 더 높은 신뢰성을 가질 수 있다.

○ 고속철도 차량의 주요 구동부분(Gear Box)에 대한 신뢰성이 확보되어 궁극적으로 예측정비 부분 증가 -> 가동률 증가에 따른 철도차량의 수리에 따른 미가동 시간을 줄임으로써 시간적인 손실을 줄 일 수 있다.

○ Alarm signal을 출력할 수 있는 정확한 알고리즘(Gear의 결함상태와 Critical 상태와의 선형성)은 국제특허에 합당한 특수한 결과물이 될 수 있을 것으로 판단된다.

○ 주요 기간산업용으로 운영 중인 Gear Box에 대한 Vibration Monitoring System의 단순화 및 국산화 대체 효과로 대부분 수입에 의존하고 있는 이 모니터링 분야의 자체 기술력 확보 및 원가 절감의 효과를 창출할 수 있고 향후 국내 감속기 모니터링 시장의 선두적인 지위를 선점할 수 있어 그 의미가 매우 클 것으로 사료 된다.

○ KTX 및 열차 차량의 고장 및 정비 불량에 따른 연 손실액 약 600억 원의 절감 효과가 발생할 수 있다. 이는 눈에 보이는 수치의 절감이며 정비에 따른 인력 투입비용과 업무 진행에 따른 시간적인 손실을 감안하면 전체적인 절감 효과 비용은 위에 언급한 수치 그 이상일 것으로 판단된다.

○ 본 연구결과의 성과물인 철도차량 감속기 모니터링 시스템 알고리즘에 대한 특허출원으로 타사에 대하여 공인된 기술력을 구축할 수 있으며 모니터링 시스템 시제품의 개발에 따른 기술 및 제품의 실용화로 철도 및 응용산업 분야에 진출이 쉽게 되어 경제적인 파급력이 매우 클 것으로 생각한다.

○ 고속철도 차량 차축에 설치된 센서를 통하여 이상 발생 시 알람을 발생하여 운전 기관사에게 즉시 통보가 되는 시스템으로 설비결함 발생 및 대형 사고를 미리 방지하여 기존 고속철도 차량의 운행에서 발생한 사고 및 가동정지에 따른 손실을 만회할 수 있으며, 열차 차량 운행의 안전성을 높일 수 있다.

# 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

# 제1절 감속기 모니터링 시스템 구축 이론 연구

## 1. 감속기 결함 감시 파라미터  및 이상 진단 기술 연구

### 가. 감속기 모니터링 시스템 구축 검토 내용

#### (1) 이론 정리 – 진동분석기법

기계 설비는 다양한 기계의 부품들로 조립이 이루어져 진동이 어느 한 부위에서만 발생하지 않고 각 기계의 요소들에 전체 적인 진동이 전달되어 진동이 매우 다양하고 복잡하게 발생하게 된다. 이렇게 다양하고 복잡한 기계적 요소들에 의하여 발생되는 진동을 분석하기 위해서는 그 기계의 요소에 맞는 진동 분석기법을 적용을 하여 분석을 하여야 그 데이터에 대하여 신뢰성을 부여할 수 있다. 이러한 진동은 기계손상과 밀접한 관계를 가지고 있다.

예를 들면 진동에 의한 기계고장, 고장에 의한 진동을 말할 수 있다. 현재 산업계에서는 진동을 이용한 진단방법이 연구되고 있으며 진동을 이용한 기법을 적용하여 막대한 손실을 절약할 수 있었다. 특히 진동을 이용하여 상습적인 기계의 오동작, 고장 원인 분석뿐만이 아니라 고장시기의 예측까지 가능해지고 있다. 진동은 가진력이라 불리는 맥 동력에 대한 응답이라고 간단하게 정의할 수 있다. 가진력과 기계의 시스템 동적 특성에 의하여 진동의 크기가 결정되는데 이러한 진동의 크기는 기계요소의 결함에 의하여 발생이 된다. 기계 설비는 다양한 기계의 부품들로 조립이 이루어져 진동이 어느 한 부위에서만 발생하지 않고 각 기계의 요소들에 전체적인 진동이 전달되어 진동이 매우 다양하고 복잡하게 발생을 하게 된다.

진동의 측정은 변위, 속도, 가속도 등을 측정하여 진동을 측정하는데 변위는 주로 베어링과 축 또는 케이스와 축 간의 상대운동을 측정하는데 사용이 되며, 속도는 변위의 시간에 대한 변화율로 피로와 관련이 된 요소이다. 주로 10Hz ~1kHz 범위의 기계 상태를 평가하는 데 사용한다. 가속도는 진동을 측정하는데 가장 널리 쓰이고 있는 요소로서 기어나 베어링과 같은 기계의 요소에 작용하는 힘에 비례한다. 가속도는 고주파에서 지배적으로 측정된다. 측정범위가 가장 넓으며, 10Hz ~ 25KHz 범위의 기계 상태를 평가하는 데 사용한다.

이렇게 다양하고 복잡한 기계적 요소들에 의하여 발생하는 진동을 분석하기 위해서는 그 기계의 요소에 맞는 진동 분석기법을 적용하여 분석하여야 그 데이터에 대하여 신뢰성을 부여 할 수 있다. 따라서 최고 시속 400km/hr일 경우, 주요주파수가 5000Hz 내외로 형성되는 KTX 철도차량의 감속기에 관한 적절한 출력은 가속도 또는 속도로 나타내는 것이 적절할 것으로 판단하였다. 진동의 크기는 변위와 속도 및 가속도로 표기할 수 있다. 이는 힘, 에너지와 관련이 있는 단위로서 변위(㎛ peak to peak), 속도(mm/sec peak , mm/sec rms), 가속도(g peak 또는 g rms)로 각각 표현하는 것이 일반적이다. 변위, 속도와 가속도는 서로 미적분에 의해 서로 변환할 수 있으나 센서의 종류에 따라서 혹은 측정하고자 하는 주파수 대역에 따라서 단위를 사용하게 된다. 기본적인 진동에 관련된 이론은 표 2.1.1에 정리하였다.

표 2.1.1 주요 진동 이론 정리

| 구분 | 내용 |
|---|---|
| 진동의 정의 | • 가진력이라 불리는 맥동력에 대한 응답<br>• 가진력과 시스템의 동적 특성에 의해 진동의 크기 결정<br>• 기계요소의 결함에 의해 발생 |
| 진동 시스템의 동적 특성 | • 같은 힘에 의해 가진 되는 구조물의 경우 질량이 클수록 진동은 감소<br>• 같은 회전속도로 회전하는 회전체의 경우 질량이 클수록 진동은 증가<br>• 시스템을 구성하는 요소 탄성에 의해 결정<br>• 변위나 속도에 비례한다. 진동은 잘못된 설계, 설치 결함, 마모에서 부터 발생하는 결함을 구분 |
| 진동의 단위 | • 진폭(Amplitude)<br>• 변위 (displacement) ㎛ peak to peak, mils peak to peak (1mils = 1/1,000 inch)<br>• 속도 (velocity) mm/sec peak , mm/sec rms , in/sec peak , in/sec rms (1 in/sec = 25.4 mm/sec)<br>• 가속도 (acceleration) g peak 또는 grms (1g =9.81 m/sec² , 386.4 in./sec² )<br>• 주파수 (Frequency) : Hz, CPM<br>• 위상각 (Phase Angle) : Deg. |
| 진폭 (Amplitude) | • 진동하는 물체의 운동 또는 에너지의 크기를 측정한 값<br>• 진폭의 정량화 : peak to peak (p-p) |
| 최대값 zero to peak (peak, p) | • 진동 속도와 가속도를 표시할 때 사용 |
| 실효값 (root mean square, rms) | • peak 값에 0.707을 곱한 값<br>• 실효값은 기계진동 에너지를 표시<br>* 그림 2.1.1에 실효값에 대한 개념을 표현하였다. |
| 주파수(Frequency) | • 1초에 진동하는 회수 [단위 : Hz (CPM, CPS, Order, X) ]<br>• 기계진동 범위: 일반적으로 10,000Hz 이하 (90 % 이상은 5,000 Hz 이하) |
| 진동의 측정 | • 변위 (Displacement)<br>• 속도 (Velocity)<br>• 가속도 (Acceleration) |
| FFT 분석 | • 복잡한 진동은 FFT 알고리즘을 이용하여, 분석<br>• FFT는 반복적으로 발생하는 신호를 여러 개의 조화함수로 분석 |
| 진동 분석법 | • Unbalance or 1x RPM 성분<br>• Misalignment or 2x RPM 성분<br>• Mechanical Looseness<br>• Rotating Structural Looseness<br>• Oil Whirl, Oil Whip, Rub<br>• Roller Bearing진동, Belt 진동, Sub- Harmonic 진동 |

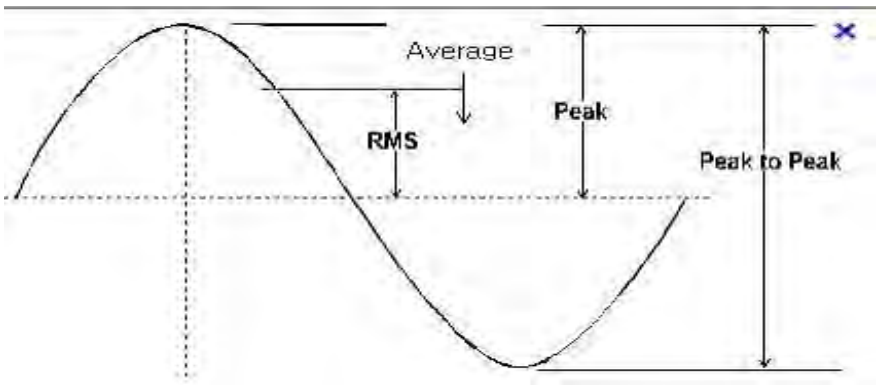



그림 2.1.1 rms, peak, peak to peak 간의 관계

(2) 진동 분석 파라미터 검토 및 정립

진동의 크기를 변위와 속도 및 가속도로 표기할 때 Overall (일반적으로 시간파형의 실효치; RMS)로 표기하게 되는데 이것은 전체 진동의 높고 낮음만을 나타낸다. 그러므로 감속기의 결함 원인 및 요소와 정도를 표현하기 위해서 주파수 성분별 또는 분석의 평가 대상이 세분화하였다. 세분화된 결함판단을 위한 구분 대상을 '파라미터' 라 정의하였다. 이번 고속철도차량의 경우, 고속주행 경우에도 기어 맞물림 주파수(GMF)의 3배수가 5,000Hz를 초과하지 않고 대부분의 감시 대상 주파수는 5,000Hz 이내에서 형성되므로 본 주파수를 평가하기에는 속도(mm/s rms)에 의한 감시가 적합하나 변위, 가속도로의 환산이 가능하도록 파라미터를 선정하였다. 진동신호 취득에 있어서 연속진동에서 불규칙 진동을 제외시키는 과정은 매우 중요한 과정이다. 불규칙 진동을 제외하는 것은 반드시 이번 개발에 포함되어야 할 과정으로 신호의 분류기능을 다음과 같이 정리하였다.

- 여러 진동에서 불규칙 진동 제거
- 여러 연속진동(가 변속)에서 감속기 진동만 추출
- 감속기 관련 주요 결함 진동 신호만 추출
- 주요 결함 진동신호의 심각도 선정
- 신호의 결과 방법 결정
- 경고 신호의 발생 수준

표 2.1.2 출력 스펙트럼 주파수

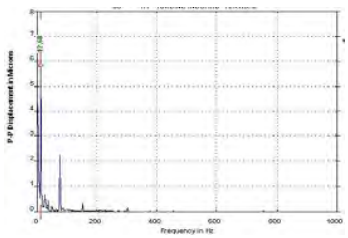
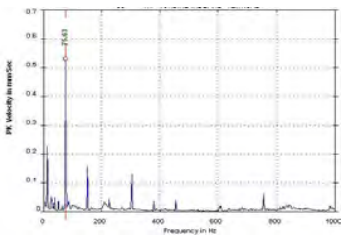
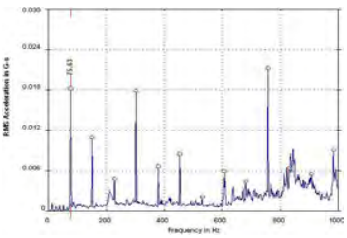
| 변위 스펙트럼 | 속도 스펙트럼 | 가속도 스펙트럼 |
|---|---|---|
|  |  |  |

표 2.1.2에 분류된 신호들은 반드시 이번 개발되는 시스템에 적용되어야 하는 신호들로서 감속기의 결함을 측정하는데 반드시 필요한 항목들이다. 정의된 결함주파수를 입력하고 결함주파수가 감지되었을 때 즉시 운전자에게 통보가 되는 시스템이 구현되어야 할 것이다. 진동에 의한 상태감시는 여러 가지의 파라미터 들을 통한 결과 값으로 분석하여 최종적인 진단결과를 내리게 된다. 파라미터의 선정은 결함 검출 알고리즘 및 결함의 감지 선형성과 밀접하다. 감속기에 관련된 진동 파라미터들을 나열하면 다음과 같다. 아래에 나열한 진동 파라미터들은 감속기 부품들에 관련된 파라미터로서 부품의 상태를 설명해 준다.

(가) 진동분석 파라미터 선정

① GMF ; 기어 맞물림 주파수(Gear Mesh Frequency)로서 기어 잇 수*해당기어축의 회전수를 의미하며, 서로 물려있는 기어의 경우 GMF는 동일하다. 따라서 1차감속기에서 1개의 GMF와 2차감속기에서 1개의 GMF가 존재하게 된다. GMF의 증가와 감소의 원인은 기어의 상태(맞물림 불량, Crack, 윤활부족, 편심, 기어박스 뒤틀림, 축 정렬 불량, 질량 불 평형 등)와 관련이 있으며 GMF의 2배, 3배 정수배도 파라미터로 선정하였다.

② 1X ; 회전축의 회전주파수를 '1X'라고 정의한다. 이는 주파수 분석 시 보편적으로 명명하는 명칭이며 회전주파수의 정수배 조화 파는 2X, 3X, ..., nX로 표현 하게 된다. 여러 개의 축으로 이루어져 회전주파수가 여러 개인 경우에는 해당 회전축의 1X로 표현할 수 있다. 따라서 KTX 감속기에는 각기 다른 4개의 회전 주파수가 존재하게 된다.

③ BPFI, BPFO ; 베어링의 내륜 주파수, 케이지주파수를 의미한다. 감속기의 기어 축을 지지하고 있는 각 베어링은 1차 감속기의 경우 3종류로서 NU2315, NUP2314, NU2220이며 각 회전축의 속도와 관련이 있다. 베어링에 이상이 있을 경우에는 각 기본주파수의 고차 조화 파 (Harmonics)에서 발생하여 저주파 기본주파수까지 진전되는 현상을 보이며 진폭과 측대파(Sidebands)가 증가하게 된다.

(나) 진동 파라미터 기호설명:

① GMF : Gear Mesh Frequency
② # : the number of Gear tooth
③ Rs : Railway Speed
④ Wd : Wheel Diameter
⑤ BPFI : Ball Pass Frequency Inner Race
⑥ BPFO : Ball Pass Frequency Outer Race
⑦ Nb : The number of Ball
⑧ S : Turning Speed / Second
⑨ Bd : Ball or Roller Diameter
⑩ Pd : Pitch Diameter
⑪ 1X : Primary frequency of turning speed.
⑫ 2X : Secondary frequency of turning speed

(다) 파라미터 산정 식:

① GMF Axle : Axle Hz × Axle Gear #

② 1X Axle Axis : Rs×1000/(3600sec×3.14× Wd)

③ 1X Tripod : 1X Axle Axis × Axle Gear # / Axle Input Gear #

④ 1X Trans : 1X Tripod × Motor Out Gear # / Transmission Gear #

⑤ 1X Drive : 1X Trans × Transmission Gear # / Driving Pinion Gear #

⑥ GMF Trans & Drive : 1X Trans × Transmission Gear #

⑦ BPFI : (Nb/2) × S × (1 + Bd / Pd × $\cos\theta$)

⑧ BPFO : (Nb/2) × S × (1 − Bd / Pd × $\cos\theta$)

(라) Crest factor ; 'Peak / RMS' 로서 파형의 첨예한 정도를 나타낸다. 값이 클수록 충격이 심하다는 것을 의미한다.

(마) Sidebands ; 측대파로서 베어링 및 기어의 주요주파수의 옆에 형성된 modulated된 주파수들을 의미하며, 측대파와 주요주파수와의 간격으로 결함이 있는 위치(해당 축)를 파악할 수 있다.

(바) Natural frequency ; 고유주파수를 의미하며 구조의 강성이 변동할 경우 주파수대역이 변동하며 공진(Resonance)이 발생할 경우 진폭의 상승이 관찰된다.

(사) Kurtosis : 진동의 도수분포가 얼마나 뾰족하고, 또한 얼마나 평평한지를 나타내는 첨도를 의미한다.

○ 아래의 표 2.1.3은 위에서 언급한 이번 소프트웨어 구성에 최종 선정된 진동 파리미터를 정리한 내용이다.

표 2.1.3 감시 및 진단 알고리즘이 포함된 감시 파라미터

| Parameters | 설명 |
|---|---|
| Peak / RMS<br>Crest factor | • 파형의 첨예한 정도를 나타냄. 값이 클수록 열차의 진동 충격이 심하다는 것을 의미 |
| GMF | • 기어의 이빨이 맞물리는 부분 상태를 의미하는 것으로 기어의 편심, 치형 마모, 과도 백 래시의 상태를 진단하기 위하여 선정 |
| GMF 2X, 3X | • 기어의 Misalignment 등을 진단하기 위하여 선정 |
| BPFI 7X | • 베어링 내륜 주파수 7배 성분<br>• 베어링의 외륜. 내륜에 손상이 가면 베어링 주파수의 특성은 고주파에서 주파수가 감지가 되어 점차 저주파수로 옮겨가면서 주파수가 나타남. 초기 베어링 결함을 감지하기 위하여 선정 |
| BPFO 7X | • 베어링 외륜 주파수 7배 성분 |
| 1X Shaft | • 고속열차 감속기 축에서 Unbalance, Angle Misalignment, 치의 절손 등이 발생하게 되면 1x의 주파수가 발생하며 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 2X Shaft | • 감속기 축에서 Offset Misalignment가 발생하면 shaft 2~3X의 주파수가 발생하게 되며 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 7X Shaft | • 감속기 축에서 Looseness가 발생하면 shaft 3~8X의 주파수가 발생하게 됨. Looseness가 발생하는 이유는 기계적 조립 상태에 문제가 있는 것으로 조기 이러한 결함을 검출하여 조치를 취하기 위하여 선정 |
| Kurtosis | • 베어링과 기어에서 발생하는 충격진동의 파형의 첨도(尖度)를 나타내는 것으로 파라미터 선정 |

## 2. 모니터링 시스템 하드웨어 기본 설계

### (1) 하드웨어 시스템 구축 내용 검토

#### (가) 감속기 및 대차의 제원 검토

KTX 모니터링 시스템을 구축하기 전에 먼저 KTX 감속기 및 대차의 재원을 파악하는 것이 매우 중요하였다. 관련된 정보를 기준으로 시스템의 하드웨어 및 주파수 연산 파라미터에 대한 내용을 종합적으로 파악을 하여 연구를 수행하기 위하여 다음 표 2.1.4와 같이 KTX 고속열차의 감속기, 대차 등의 중요한 정보를 정리 하였다.

감속기의 진동 특성 분석하기 위해서는 무엇보다도 감속기 기어의 수치를 정량화 할 필요가 있었다. 기어의 형태, 기어 잇 수, 기어 직경 등에 따라서 진동의 주파수가 달라지기 때문에 감속기의 기어의 사양을 정리할 필요가 있었다. 그림 2.1.2는 고속열차 KTX 감속기의 기어 구조를 나타낸 그림이며 표 2.1.5는 KTX 감속기 기어의 사양을 정리한 내용이다.

표 2.1.4 KTX 정보

| 항 목 | | 내 용 |
|---|---|---|
| 열차동력 | 사용전압 | 교류 25KV 단상, 60HzAC |
| | 견인동력 | 13,560 KW (1,130 KW×12 개) |
| | 전기제동력 | 300 KN |
| 대 차 | 궤간 | 1,435 mm |
| | 대차 수/량 | 대차 수 23 (구동대차6,관절대차17)/20량 1 편성 |
| | 차륜직경 및 수 | 920mm/850mm(신품/마모한도), 차륜수 92 개 |
| 열차성능 | 안전한도속도 | 330 Km/h |
| | 최대운용속도 | 300 Km/h |
| | 가속성능 | 0 ~ 300 Km/h 도달시간 6 분 5초 |
| 열차편성 | 동력차 2 량 + 동력객차 2 량 + 중간객차 16량 | |
| | 편성가능방식 | 동력차단독, 객차18량, 객차16량, 객차14량 |
| | 동력차 | 전부, 후부 각 1 량씩 편성 당 2 량 |
| | 1 등 객차 | 4 량 / 20 량 1 편성 당 |
| | 2 등 객차 | 14 량 / 20량 1 편성 당 |
| 열차 길이 | | 388 m |

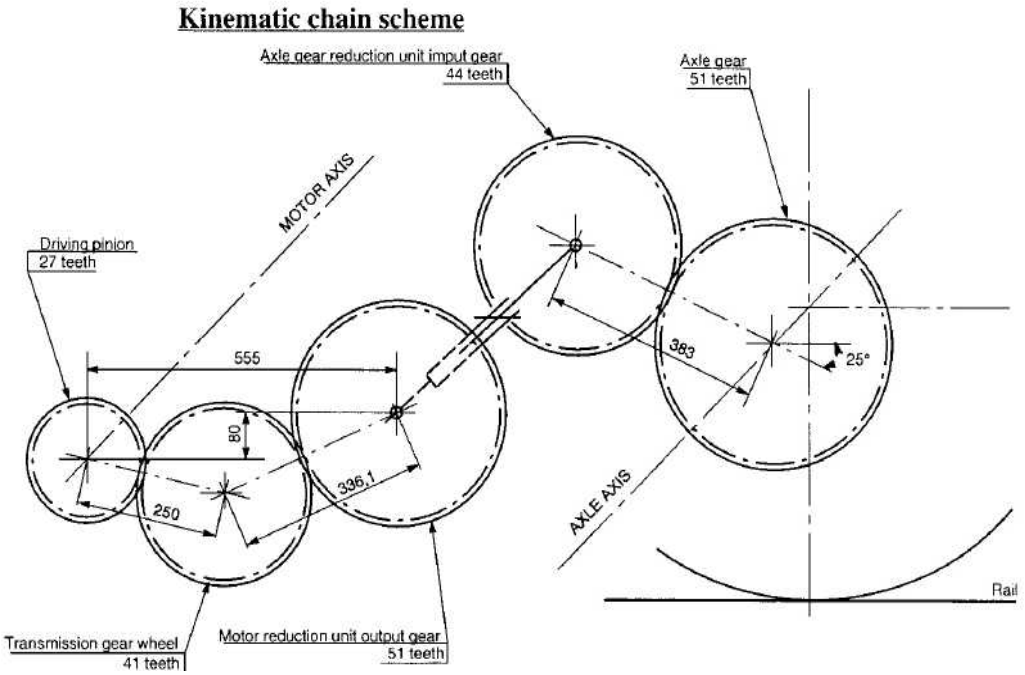



그림 2.1.2 감속기 기어 구조

표 2.1.5 감속기 기어 정보

| | Motor Gear Reduction | | | Axle Gear Reduction Unit | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pinion 27 teeth | Gear 41 teeth | Gear 51 teeth | Gear 44 teeth | Gear 51 teeth |
| Type of gearing | helicoidal | helicoidal | helicoidal | Spur | Spur |
| Slope of helix | 15° | 15° | 15° | – | – |
| Direction of slope | right | left | right | – | – |
| Number of teeth | 27 | 41 | 51 | 44 | 51 |
| Cutter Module | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 |
| Operating Module | 7.353 | 7.353/7.306 | 7.306 | 8.063 | 8.063 |
| Contact Angle | 20° | 20° | 20° | 20° | 20° |
| Operating pitch diameter | 198.53 | 301.47/299.57 | 372.633 | 354.77 | 411.22 |
| Outer diameter | 213.4 | 313.7 | 385.6 | 371.2 | 426.6 |

표 2.1.6 속도 구간 진동 정보

| 측정 내용 | Speed(km/h) | |
|---|---|---|
| | 100 | 300 |
| wheel Diameter(m) | 0.92 | 0.92 |
| Axle Hz | 9.6 | 28.8 |
| Ratio | 2.2 | 2.2 |
| Driving Hz (Hz) | 21.1 | 63.2 |
| GMF Axle (Hz) | 490.4 | 1471.2 |
| GMF Trans & Drive (Hz) | 568.4 | 1705.3 |
| 1X Axle Axis (Hz) | 9.6 | 28.8 |
| 1X Axle Gear R (Hz) | 11.1 | 33.4 |
| 1X Trans (Hz) | 13.9 | 41.6 |
| 1X Drive (Hz) | 21.1 | 63.2 |

다음과 같은 사양을 근거로 KTX 속도 구간에 따른 진동의 주파수를 계산을 하였다. 위의 파라미터 산정 공식에 대입을 하여 100 km/hr, 300 km/hr 두 속도에 대한 진동 파라미터의 주파수를 계산을 하여 다음 표 2.1.6과 같이 정리를 하였다.

정리된 사양으로 하드웨어 모듈을 선정을 하는 것이 하드웨어 구축에 있어서 처음 단계였다. 일단 이번 개발에서 클라이언트를 감속기 대차에 설치를 하는 방식으로 시스템을 구상 설계를 하였으며 이에 적합한 하드웨어를 선정을 하고자 하였다. 다음 그림 2.1.3은 감속기 모니터링 시스템의 초기 구상을 표현한 그림이다.

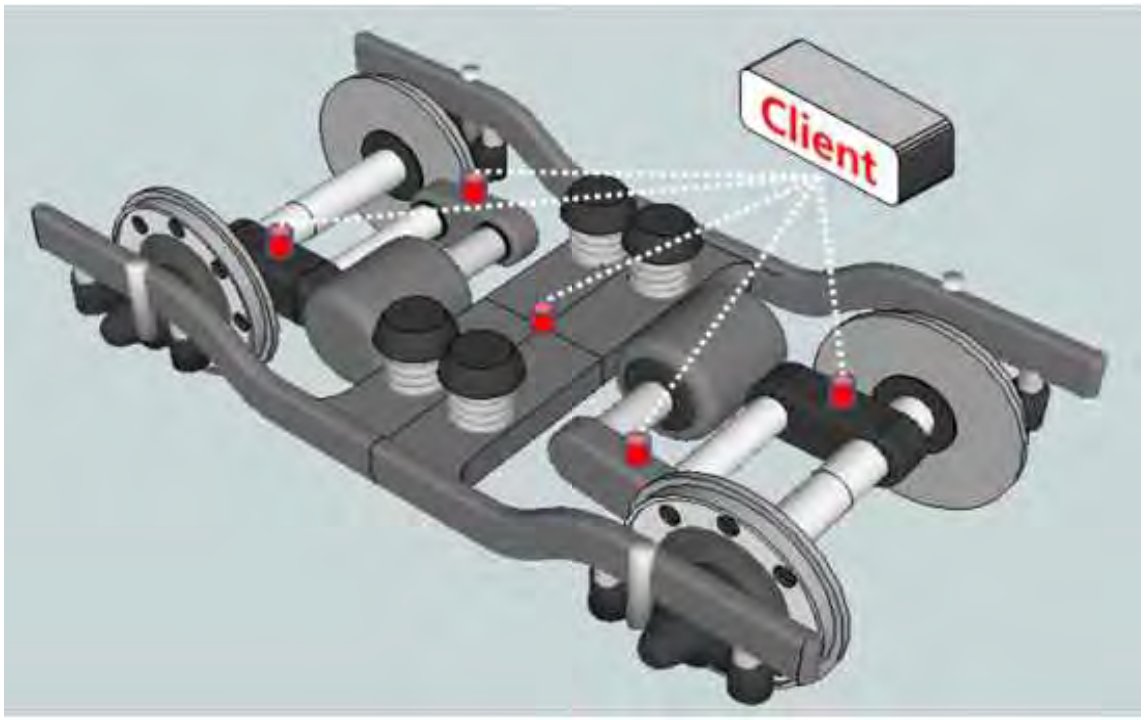



그림 2.1.3 시스템 개략도

(나) 모니터링 시스템의 하드웨어 구성 방식 검토

감속기의 대차에 하드웨어 즉 클라이언트를 설치하기 위해서는 높은 내구성과 진동의 충격에 강한 하드웨어 모듈을 필요로 하였다. 그렇기 때문에 하드웨어를 구축하기에 앞서 개발하고자 하는 시스템과 비교 대상을 선정 하였다. 현재 온라인 모니터링 시스템이 가장 활발하게 활용이 되고 있는 분야는 산업용 감속기와 풍력 발전용 모니터링 시스템이다. 본 연구기관 에서는 산업용과 풍력발전용 온라인 모니터링 시스템을 각각 1개씩 선정을 하였으며 유럽에서 개발이 된 SKF의 철도용 고속 온라인 모니터링 시스템을 선정하여 각 특징 요소를 선별하여 개발의 방향을 설정하기로 하였다. 다음 표 2.1.7은 개발하고자 하는 하드웨어 사양과 비교대상과 비교한 결과를 정리한 것이다.

표 2.1.7 감속기 모니터링 사양 검토 내용과 상용제품 비교 정리

| 분류 | EMERSON | SM INSTRUMENT | SKF | KTM |
|---|---|---|---|---|
| H/W 채널 | • 24 Ch. | • 진동 : 12 Ch.<br>• AI : 8 Ch.<br>• 온도 : 4 Ch.<br>• DI : 8 Ch. | • 온도 : 8 Ch.<br>• 진동 : 8 Ch.<br>• 속도 : 4 Ch. | • 진동 : 9 Ch.<br>• 온도 : 16 Ch.<br>• 윤활 : 4 Ch.<br>• 속도 : 1 Ch.<br>(1 Client 기준) |
| 주요 용도 | • 산업용 터빈, 발전기, 기어, 블로워 | • 풍력발전기<br>(산업용 변형) | • 철도차량<br>(제지, 철강, 산업용 변형) | • 철도차량 전용, 변속기어박스 전용 |
| 가격 | • 약 1억~1억 5천 | • 약 1억~1억5천 | • 약8천~1억 | |
| 데이터 수집 및 전송 | • Real time 데이터 전송<br>• Hub and Nic 이더넷 통한 서버 전송 | • Real time 데이터 전송<br>• FTP 통신 이용 측정 데이터 자동 전송 | • Real time 데이터 전송<br>• CM Data 이더넷을 통한 서버전송 | • Real time 데이터 전송<br>• 이더넷을 이용한 서버-클라이언트 구조 |
| 측정 가능 주파수 | • 2ch. 모니터 0-40 kHz | • Vibration RMS 산출 (0.1-100Hz, 10-1kHz) | • 최대 250km/h 적용 가능 주파수 | • 12.8 ks/s 샘플링 데이터 FFT데이터, RMS 데이터 |
| 주요 측정 진동 | • 40kHz Fmax, 6400 lines resolution<br>• Peakvue 베어링 충격 파형 Demodulation<br>• FFT 시간 파형 및 위성 분석 자동 진단 기능<br>• 2kHz, 12800lines waveform 저장 가능 (Transient)<br>• 100시간 이상 waveform 저장 가능 | • order analysis : 10분 평균 Power Vibration 1MA, 3MA 산출<br>• HFBP (1k~10kHz) 산출<br>• 10분 주기 데이터 파일 저장<br>• Trigger에 의한 시간 파형 저장<br>• 10분 평균 order spectrum | • Hot Axle Box 베어링 온도 상승시 기차 운행 정지<br>• Boogie hunting Detection<br>• TSI 파라미터 에서 Relay 기능<br>• 철도차량의 안정성 측정 | • FFT, RMS 측정 및 진단<br>• 6.4khz, 5~120 line resolution search Demodulation<br>• 대차 진동 측정<br>• 감속기 진동 측정<br>• 10시간(1일기준) 진동파형 저장 (Raw Data) |
| 부가 기능 | • 네트워크 손실을 고려한 8MB 저장 | • FTP 통신을 이용한 측정 데이터 자동 전송 | • 실시간 데이터 LCD 모니터 display 기능 탑재 진행 | • 실시간 데이터 감시 및 선택적 FFT 파라미터 실시간 모니터링 |

비교 분석을 완료한 후 상용화 하드웨어 모듈로 시스템을 구성을 할 것인지, 아니면 모듈을 별도로 개발을 하여 시스템을 구성을 하여야 할지를 선정을 하여야 하였다. 마찬가지로 하드웨어 모듈에 대하여 비교 검토를 하여야 할 필요가 있었다. 다음 표 2.1.8은 하드웨어에 대한 비교검토를 한 내용이다.

표 2.1.8 시스템 구조 설계안 검토 종합 비교표

| | 1안 : (채택)<br>NI Compact RIO 개별 동작 방식 (Client연산방식) | 2안 :<br>NI PXI 이용 연결 방식 (Server연산방식; H/W) | 3안 :<br>NI 센서&통신 모듈 작동 방식 (Server연산방식; S/W) | 4안 :<br>기타 센서/통신 모듈 작동 방식 (Server연산방식; 저가 S/W) |
|---|---|---|---|---|
| 그림 |  |  |  |  |
| 특징 | • Client 개별동작 방식<br>• 센서 → Client Box → PC 연결 작동 방식 | • PC와 센서 직접 연결 작동 방식(Server H/W; NI PXI 연산방식)<br>• 센서 -> Junction box -> PC | • Main Controller 작동 방식<br>• NI 센서와 컨트롤러 서버 작동 방식(S/W 연산방식)<br>• 센서 ->Junction box ->PC | • Main Controller 작동 방식<br>• 기타 센서와 컨트롤러 서버 작동 방식 (S/W연산방식)<br>• 센서 ->Junction box ->PC |
| 장점 | • 연산 작업이 안정되며, Server의 부하가 없음<br>• 대차단위로 독립시킬 수 있어 정비에 편리<br>• 개별 동작 방식으로 진행이 되어 데이터 과부하의 위험이 없음<br>• 각 Client로 연결 배선 간단<br>• 디지털 신호전송으로 신호노이즈가 최소화 가능 | • 시스템의 구성이 이해하기 편리<br>• PC와 동일한 환경에서 직접적인 센서 데이터 취득이 가능하므로, 직관적인 시스템 구현 | • 상대적으로 가격 저렴<br>• 크기가 작아 설치작업이 간단<br>• 형상과 구조가 비교적 간단하여 관리 편리 | • 상대적으로 가격 저렴<br>• 사용자가 원하는 크기로 제작 가능 |
| 단점 | • 구성가격 비교적 고가<br>• Client의 보호함 내부에 과진동 안전장치가 필요 (H/W의 기본내진특성은 50G에 견딜 수 있다) | • Junction box-PC간 연결 배선관경이 크고 처리가 어려움<br>• 중앙 집중 시스템으로 연산 부하 위험이 매우 높음<br>• 구성 가격 매우 고가 | • 연산 부하가 심함<br>• 시스템의 크기에 비하여 배선 작업이 어려움<br>• 대차 하부 Junction Box의 설치가 필요 | • 개발 기간이 많이 소요<br>• 성능에 대한 검증이 필수적으로 필요<br>• 대차 하부 Junction Box의 설치가 필요 |

(다) 하드웨어 선정

이번 과제에서 채택한 시스템 구축안은 표 2.1.8의 1안으로서, 상용화된 내쇼날 인스트루먼트사의 c-Rio 하드웨어 모듈로 시스템을 구성하기로 결정을 하였다. NI cRIO는 주요 연산 프로세서가 열차 하부에 장착되어 있는 형태로 센서와 가까운 위치에서 데이터를 수집하여 디지털로 변환한 다음 서버로 가벼운 데이터를 전송하게 되므로 실시간으로 결과 Trend 데이터(진단 파라미터)를 전송하는데 매우 유리한 장점이 있었다. Server연산의 경우 Analogue 케이블 30ch 이상을 확보해야 하므로 직경 20mm*2선 이상의 케이블이 Server에서 감속기 근처에까지 연결이 되어야 한다는 점이 있으나 Client연산방식에서는 센서 근처 Client까지 2mm*3선만 연결되는 구조로 되어 있으며 Digital 신호만을 전송하므로 매우 적합한 구조로 판단되어 다음과 같이 시스템을 구성하였다. 아날로그 연산처리 과정에서 축적되는 데이터는 실시간 저장소에 저장되고 실시간 전원을 각 구성장치에 공급하여 열차 운행 중 전원이 차단이 될 수 있는 위험을 방지할 수 있도록 고안하였다. 다음 표 2.1.9는 이번 시스템 하드웨어로 선정을 한 NI-cRIO 하드웨어를 정리한 내용이다.

표 2.1.9 Client 하드웨어 사양

| 구분 | 구성 장치명 | 사양 내용 | |
|---|---|---|---|
| 클라이언트 | NI cRIO-9025 | • 구분 : Compact RIO Controller<br>• 운영체제 : VxWorks Real-Time OS<br>• CPU : 1024 MHz Power PC<br>• 시스템 메모리 : 512 Mb<br>• 포트 : Ethernet 2port, RS-232<br>• 입력 전압 범위 : 9~35V<br>• 권장 입력 전압 : 24V<br>• 정격 전력 : 35W | |
| | NI cRIO-9113 | • 구분 : Compact RIO Chassis<br>• FPGA Type : Virtex-5 LX50<br>• 슬롯 개수 : 8개<br>• 전격전력 : 3.3W | |
| | NI cRIO-9234 | • 구분 : Compact RIO Module<br>• 측정타입 : 가속도<br>• 측정신호 범위 : ±5V<br>• 분해능 : Ch당 51.2KS/s<br>• 해상도 : 24bit<br>• 채널수 : 4개 × 3 EA = 12 ch<br>• 신호 컨디셔닝 : IEPE(ICP) 옵션 지원<br>• 커넥터 타입 : BNC | <br><NI 하드웨어 조립> |
| | NI cRIO-9208 | • 구분 : CompactRIO Module<br>• 측정타입 : 전압<br>• 분해능 : 500 S/s<br>• 해상도 : 24 bit<br>• 채널수 : 16개<br>• 커넥터 타입 : 스크류 터미널<br>• 채널수 : 온도 16ch | |
| | NI cRIO-9203 | • 구분 : CompactRIO Module<br>• 측정타입 : 전압<br>• 측정신호 범위 : ±10V<br>• 분해능 : 500 KS/s<br>• 해상도 : 12 bit<br>• 채널수 : 8개<br>• 커넥터 타입 : 스크류 터미널<br>• 채널수 : 윤활 8ch | |

(라) 하드웨어 시스템 구상

① 하드웨어 layout 구성

기본적으로 시스템은 가속도 센서를 통하여 메모리 버퍼(FIFO)로 취득된 데이터를 전송하고 취득된 신호를 처리하는 연산 프로세스를 통하여 TCP/IP 통신으로 서버에 전송하는 방식으로 시스템을 구상하였다. 이렇게 들어온 복합적인 신호는 설정된 이상 진단 기준에 의하여 고속철도 차량의 운전자에게 디스플레이 되는 타입으로 시스템 구성 흐름을 확정을 하였다. 그림 2.1.4는 구상한 시스템 프로세스 구성내용이다.

구성된 시스템의 Client는 동력대차와 감속기의 진동 상태를 감시하고 서버와의 통신을 이용하여 진동데이터를 즉시 전달 해주는 기능을 담당하게 하는 기능으로 구상을 하였다. 동력 대차에서 수집하는 속도데이터는 각 감속기에서 1개의 데이터를 가져오는 형식으로 시스템을 구상하였으며 수집하는 진동데이터는 4개의 감속기에서 8개(감속기 1기 기준으로 진동채널 2개), 대차에서 1개(단축 횡 방향)로 구성하는 방식으로 구상하였다. 수집하는 온도데이터는 총 16개(2개의 구동계에서 각각 7개씩, 한 개의 외부온도데이터)로 시스템을 구상하였으며, 윤활데이터는 각 감속기당 1개씩 도합 4개의 데이터를 가져올 수 있도록 하여 시스템의 채널수를 설정하였다.

이렇게 설정한 시스템의 클라이언트는 카운터 입력용 모듈을 통해 전달되어진 Pulse 신호를 이용하여 각각 Gear의 회전수(rpm)를 산출해내는데, 수집된 센서 데이터를 이용하여 대차와 감속기 해당 부품에 해당되는 진동 파라미터를 분석한 후에 진동 정보를 서버에 전달을 하는 역할을 하게 되는 방식이다. 이때 전달되는 진동 파라미터의 종류는 RMS, Overall, Peak-to-Peak, 1x, GMF, Crest Factor, Kutosis, BPFI, BPFO 등으로 구성하였으며 각 해당되는 주파수의 정보를 파악하고 설비 관리자는 이상부위를 빨리 진단을 할 수 있도록 하여 철도 차량의 운전자에게 실시간으로 정보가 전송될 수 있는 시스템을 구현하고자 하였다.

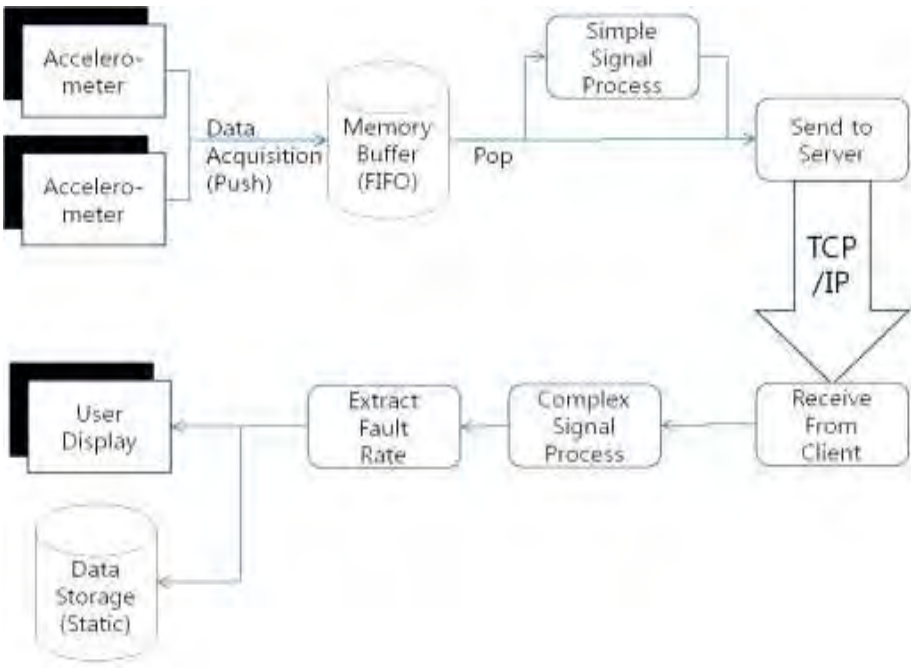



그림 2.1.4 시스템 구성도

구성 시스템의 Server Storage는 각각 상행/하행구간으로 분리되어 관리할 수 있도록 구성하였고, 이때 유의할 점은 1대의 Server Storage는 연산기능과 터미널 기능을 수행하고, 다른 1대의 Server Storage는 터미널 기능만을 수행하는 형식으로 서버를 구상하였다. TCP/IP로 Client와 통신을 하도록 하여 데이터 유실을 최소화 할 수 있는 시스템을 구성하고자 하였으며 측정/분석된 진동 파라미터 데이터를 Ethernet 방식으로 수집을 할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 여기에 한 가지 더 추가한 내용은 GPS 수신기를 장착하여 현재의 열차 진행위치를 파악을 할 수 있도록 한 것이다. GPS 수신기와는 USB포트를 이용하여 RS-232 통신을 활용한다.

이때 이상 인자를 감시하는 센서는 고속 철도 차량의 대차와 감속기에 부착되어 진동 및 오일 윤활 분석 온도 변화를 감지하여 Client에 데이터를 전송할 수 있도록 하고, 보호함은 대차에 설치되는 하드웨어 모듈을 고속열차 주행 시 발생되는 외부의 이물질 또는 이완에 대한 파손을 방지하기 위하여 필요 내용에 확정하였다.

1차년도 기본 설계서를 기본으로 열차 하부에 하드웨어를 설치하기 전에 설치 주요 부위의 검토가 필요하였다. 이번 연구 기간 동안 표 2.1.7과 같이 KTX 철도차량 하부 구조를 검토하였다. 검토 결과 대차 하부에 하드웨어를 장착할 수 있는 공간을 확인할 수 있었다. 하부에 계측장치가 설치되어 고장률이 증가할 수 있다는 측면의 염려가 있으나 그 것은 헌팅센서의 설치위치와 크게 다르지 않고, 현재 채택한 하드웨어의 기본 내충격성(50G)과 Client의 보호함 내에 진동 Damping에 대한 추가 처리로서 보호 가능하다는 결론을 얻었다. 또한, Client가 설치될 공간 확보 및 '고정장치의 상용차량에 설치불가' 등에 관련된 대책으로서는 Server 연산식에서도 하부에 Junction box의 설치가 필수불가결인바 Client 연산식과 크게 다르지 않다.

② 하드웨어 시스템 layout 설정 근거

- Client 구성은 본 시스템 대차 1대당 총 진동 7ch, 윤활 4ch, 온도 16ch 속도1ch 총 28ch로 Client 6개 총 168ch로 구성된다. 고속열차는 속도가 수시로 변동을 하여 진동의 패턴이 일정하지 않고 감속기는 여러 기계요소가 복합적으로 구성되어 다양한 진동 파라미터 즉 데이터가 발생하게 된다. 따라서 서버에서 데이터 수집, 연산을 모두 수행할 경우 연산처리의 과부하가 발생하므로 Client에서 기초연산 수집 후 결과를 전송하는 방법을 선정하였다. 다음 그림 2.1.5는 데이터 과부하로 인한 시스템 다운된 모습이다.

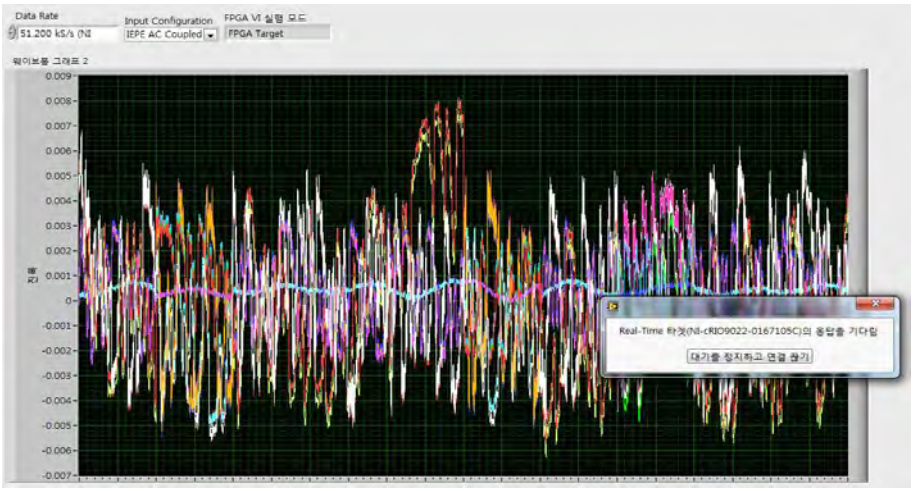



그림 2.1.5 과부하로 인한 시스템다운

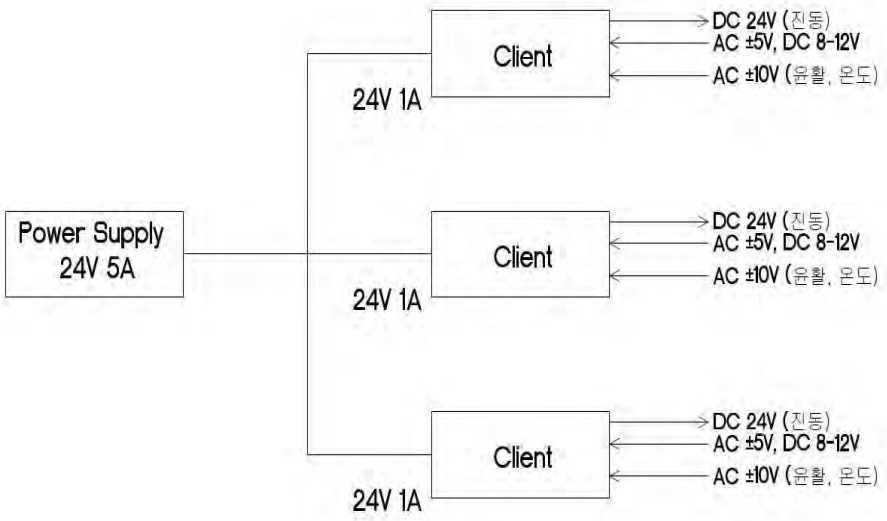



그림 2.1.6 파워-Client 흐름

- Client 위치를 실내 내부에 설치하고 감속기에는 센서만 설치하여 케이블로 열차 하단부로 내리는 구조이다. 이렇게 시스템을 구성하면 실내에 서버 스토리지와 연동을 하여 하드웨어를 구성할 수가 있어 소형 터미널의 최소화가 가능하므로 다음과 같이 시스템을 개선하는 방안을 검토하였다. 다음 그림 2.1.6은 대차 하부 설치에 따른 클라이언트의 전원 프로세스에 대한 내용을 정리한 것이다.

- Server Storage 구성은 KTX 고속열차는 상행/하행 구간으로 운전실이 구성되어 열차 운행 시 한 방향의 운전실만 운영되고 운행 반대편 운전실은 공석으로 운행된다. 만약 Server Storage가 한 방향에만 설치가 되어 있으면 반대편으로 운행하면 측정되는 데이터를 확인하기 위하여 반대편에도 인력이 배치되어야 한다. 이러한 이유로 인하여 상행/하행 운행 시 운전자의 편의성을 고려하여 Server Storage를 상행/하행 구간 양쪽으로 2개의 설치를 한다. 다음 그림 2.1.7은 서버의 레이아웃 구상 내용이다.

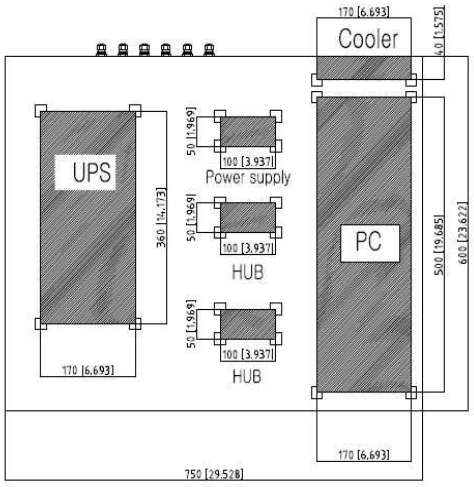



그림 2.1.7 서버 Lay-Out 구성

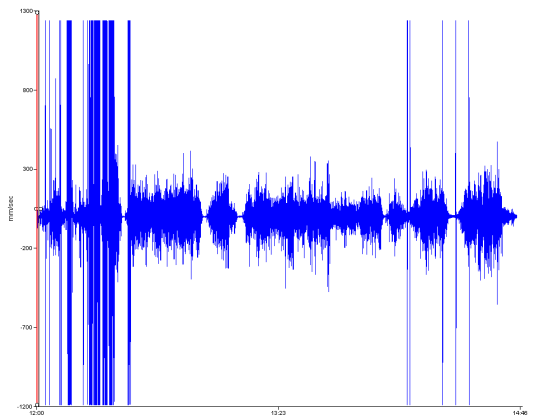
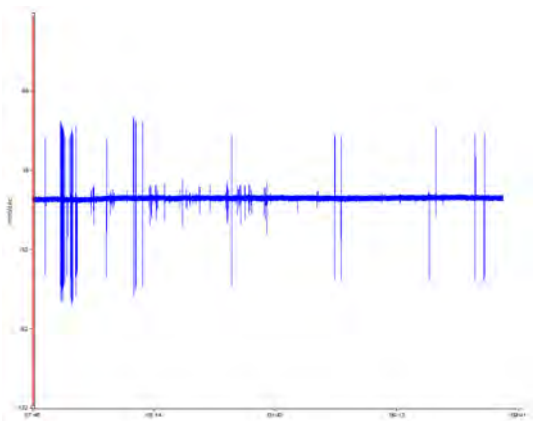
- Server의 Power Supply는 차량 전원으로부터 공급되는 교류(220V) 전기를 온라인 모니터링 시스템에 맞는 직류(DC 24V) 전류로 전환하기 위하여 구성하였다. 1개의 Client에 24V 1A의 전원이 공급되어 총 3A가 요구되나, 전원공급 안정성을 위해 24V 5A로 설정하였다. Hub는 다수의 Client를 하나의 네트워크에 연결하기 위하여 구성하였다. PC는 Client에서 수집되는 데이터를 연산처리 하여 운전실에 디스플레이할 수 있도록 하기 위하여 구성하였다.

서버를 구축하여야 하는 필요성은 기능적 관점에서 볼 때 다수의 클라이언트가 수집한 진동 데이터를 취합할 장치가 필요하였다. 또한, 클라이언트에서 수집된 데이터를 연산하여 파라미터를 추출하기 위한 연산 가능 장치가 필요하였으며 추출된 파라미터를 통하여 이상상태 발생 유무를 판단하기 위한 연산을 수행할 수 있어야 하였다. 사용자 관점에서 보았을 때는 진동 데이터를 통한 연산결과를 사용자에게 알려주기 위한 전송 장치가 필요하며 측정/연산된 데이터를 상태예측 자료로 활용하기 위해서 데이터를 저장할 수 있는 저장 장치가 필요하였다.

진동신호를 취득하는 센서의 종류는 변위센서, 속도센서, 가속도센서 등이 있으나 변위센서와 속도센서는 유지보수 측면에서 센서 부착방법의 어려움, 크기의 고려(속도센서는 대형의 크기), 적용주파수 등의 다각적인 검토를 걸쳐  최종적으로 부착이 편리하고, 가격이 저렴하며, 내구성이 좋고, 전원의 공급 및 S/N비가 우수, 적용주파수 당 선형성이 우수한 피에조 타입 ICP가속도센서를 선정하였다. 감속기에서 받는 최대 Shock pulse는 1,000G 이므로 최대 5,000G까지 견딜 수 있는 가속도센서를 우선 선정하였다. 대차용 진동센서는 저주파수(~200Hz)의 측정이 요구되고 최대 Shock pulse가 30G 이내 이므로 최대 500G까지 견딜 수 있는 감도 100mV/g 가속도센서를 선정하였다.

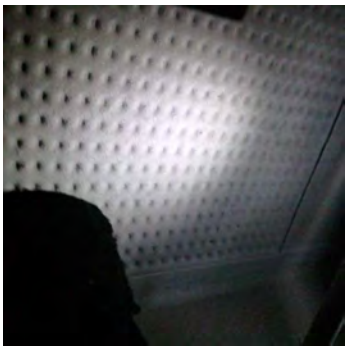
센서를 선정할 때 센서의 진폭의 최대 측정 범위를 고려하지 않을 수 없었다. 철도 차량의 운행 데이터를 분석한 결과 최대주행속도에서 일반적인 진폭이 30G~70G 이내 이므로 500G까지 Over range하지 않고 측정이 가능한 감도 10mV/g 가속도센서를 선정하였다. 대차용 진동센서는 50G까지 Over range 하지 않고 측정이 가능한 감도 100mV/g 가속도센서를 선정하였다. 감도를 높일수록 저주파에 대한 진폭의 선형성에 대한 신뢰도가 높아 적합한 센서 선정이었다고 판단한다. 다음 표 2.1.10은 센서의 출력 신호를 계측기에서 본 형상이다.

표 2.1.10 센서 출력 신호 표시

|  |  |
|---|---|
| 센서의 측정 Range를 벗어난 신호. | 정상 Range에 있는 센서 출력 신호. |

위의 내용과 같이 구상한 Client를 열차 하부에 하드웨어를 설치하기 전에 설치 주요 부위의 검토가 필요하였다. 이번 연구 기간 동안 표 2.1.11과 같이 KTX 철도차량 하부 구조를 검토하였다. 검토 결과 대차 하부에 하드웨어를 장착할 수 있는 공간을 확인할 수 있었다. 하부에 계측장치가 설치되어 고장률이 증가할 수 있다는 측면의 염려가 있으나 그것은 헌팅 센서의 설치위치와 크게 다르지 않고, 현재 채택한 하드웨어의 기본 내충격성(50G)과 Client의 보호함 내에 진동 Damping에 대한 추가 처리로서 보호 가능하다는 결론을 얻었다. 또한, Client가 설치될 공간 확보 및 '고정 장치의 상용차량에 설치불가' 등에 관련된 대책으로서는 Server 연산식에서도 하부에 Junction box의 설치가 필수불가결인바 Client 연산식과 크게 다르지 않다.

표 2.1.11 시스템 장착 위치 검토 내용

| | | | |
|---|---|---|---|
| **측정위치** |  |  |  |
| **세부위치 설명** | • 대차상단 차량하부측면 메탈표면 | • 대차상위 측면 메탈표면 | • 차량하부 FRP 표면 |
| **적용가능 특징 검토** | • 운행 시 파편 및 분진이 최소화 되는 위치로서 대차의 서스펜션 여유에 관한 검토가 필요 없는 부분, 안정위치 | • 운행 시 파편 및 분진이 상대적으로 적은 위치로서 측면에 부착하는 방식, 점검위치는 최적이나 미관상 염려되는 위치 | • 차량하부로 통과해야 하는 Hole 및 Client의 위치 고정 장치의 부착위치로서는 최적이나, 재질이 FRP임<br>• FRP에 대한 관통 잔류응력의 분석을 통해 안정성을 검토 가능 |
| **비고** | • 보호함 고정용 브라켓 또는 볼트의 용접이 필요 | • 보호함 고정용 브라켓 또는 볼트의 용접이 필요 | • FRP의 관통이 가능한 Hole작업일 경우, 고정장치의 설치(FRP 내외부의 용접이 필요 없는 브라켓 제작이 가능)가 편리 |

(2) 기본 하드웨어 시스템 구성 내용

고속으로 달리는 열차의 특성상 구축 하드웨어는 12.8ks/s의 샘플링 데이터 FFT 데이터, RMS 데이터 전송 (최대 400 km/h) 적용이 가능하여야 한다. 데이터는 고속열차에서 들어오는 엄청난 데이터 용량의 문제로 인하여 10분 주기로 데이터 파일을 저장할 수 있도록 설정하였으며 데이터 전송은 Real time 전송 방식으로 감속기와 대차의 진동 데이터를 측정할 수 있도록 설정하였다. 통신방식은 이더넷을 활용하여 server-client 구조로 시스템을 구성하였으며 진동을 취득하는 센서는 감속기 부위에 10 mV/g (Measurement range 500g shock limits 5,000 g) 사양의 센서로 7채널로 구성을 하였고 대차 부는 100 mV/g (Measurement range 50g shock limits 500 g)의 사양의 센서로 1채널로 시스템을 구성하였다. 그림 2.1.8은 하드웨어의 구성도이다.

구축 하드웨어 Client는 열차 1편성 당 총 6대를 설치할 수 있도록 설계하였다. 주요 기능으로는 각각의 동력대차와 감속기의 진동 상태를 감시하고 서버와의 통신을 이용하여 진동데이터를 즉시 전달을 해주는 기능을 담당하게 된다. 이때 데이터의 수집이 매우 중요한 요소로 작용하게 되는데 속도 데이터의 경우 각 감속기에서 1개의 데이터를 가져오며 진동 데이터는 4개의 감속기에서 7채널에서 데이터를 수집하여 저장한다. 온도데이터는 2개의 구동축에서 각각 7채널 앞 차량과 뒤 차량 각각 외부 온도 2개의 채널로 총 16개의 채널로 구성이 되었다. 데이터를 취득하는 과정은 카운터 입력용 모듈을 통하여 전달된 Pulse 신호를 이용하여 각각의 Gear의 회전수를 산출할 수 있도록 시스템을 구상하였다. 이러한 시스템의 통신방식은 이더넷을 활용하여 server-client 구조로 시스템을 구성하였으며 진동을 취득하는 센서는 감속기 부위에 10mV/g (Measurement range 500g shock limits 5,000g) 사양의 센서로 7채널로 구성을 하였고 대차 부는 100mV/g (Measurement range 50g shock limits 500g)의 사양의 센서로 1채널로 시스템을 구성 하였다. 다음 표 2.1.12는 하드웨어 시스템의 주요 구성 장치를 정리한 것이며, 그림 2.1.9는 진단 시스템의 구성도를 표현한 것이다.

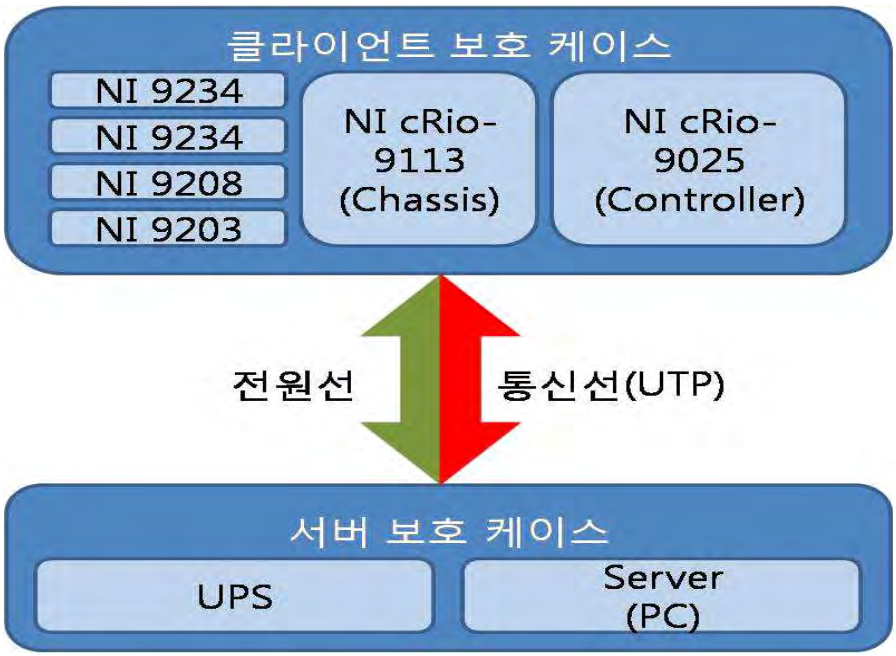



그림 2.1.8 모니터링 시스템 하드웨어 신호 통신

표 2.1.12 하드웨어 시스템 주요 구성 장치 최종 정리

| 구분 | 기능 | 내용 |
|---|---|---|
| Client | 센서 데이터 수집 및 데이터 연산 | • Real-time OS가 탑재 임베디드 시스템 (NI cRio-9025 : 800MHz CPU, 512Mb RAM)<br>• 데이터 전처리(Pre-Processing)를 담당하는 FPGA<br>• Chassis (NI cRio-9113Vertex-5 LX50)<br>• 진동 데이터 취득용 모듈 x 2 (NI 9234, IEPE 지원, Max 51.2KS/s, 4채널)<br>• 온도 데이터 취득용 모듈 (NI 9208, 측정타입: 전류, 16ch)<br>• 윤활 데이터 수신용 모듈 (NI 9203, 측정타입: 전류, 8ch)<br>• 시스템 보호 케이스 (200 X 200X 110 , PG 13.5 TYPE) |
| Server Storage | 데이터 저장 ,위험상태진단 사용자 경보 | • 고성능 컴퓨터 (Intel I7 2600, 4Gb RAM, 2Tb HDD)<br>• UPS<br>• 클라이언트 전원공급 시스템<br>• 시스템 보호랙 케이스 |

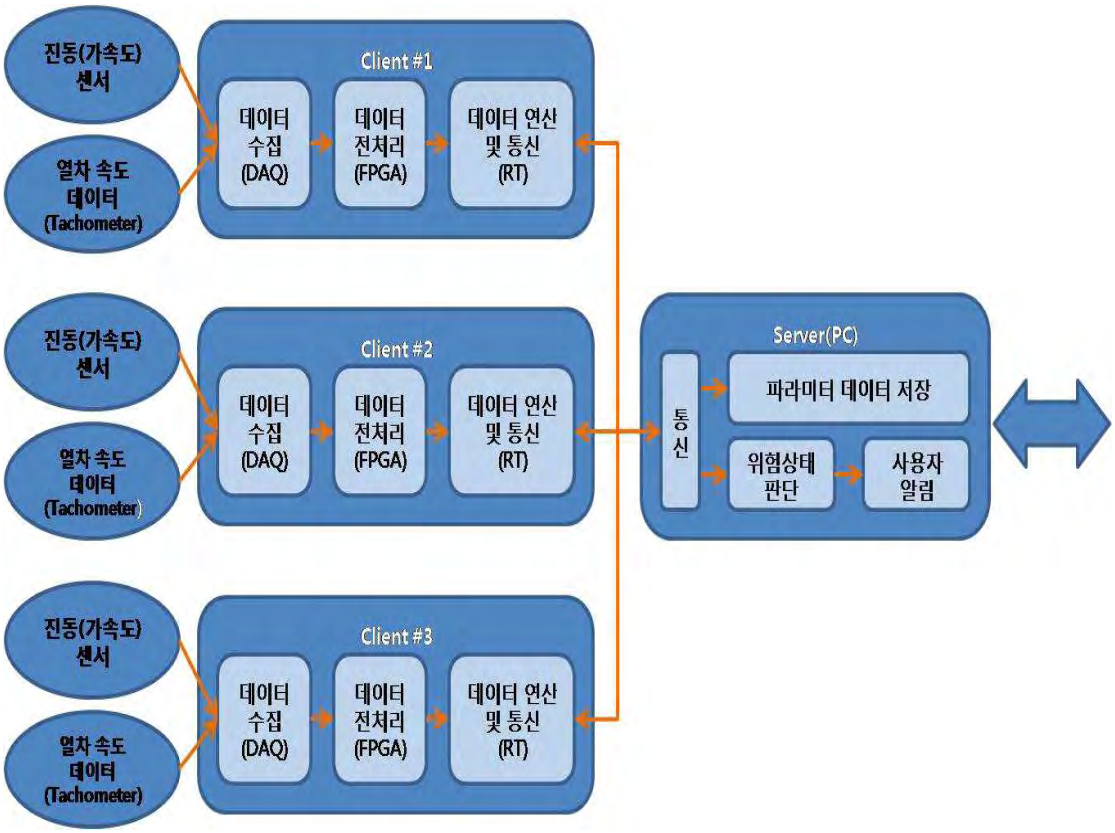



그림 2.1.9 진단 시스템 구성도

(3) 감속기 감시 위치 및 방법 설정

(가) 감시 포인트 선정 검토

① 채널 선정 검토

진동 데이터를 취득하기 위해서는 측정 포인트의 선정이 매우 중요하였다. 측정 포인트를 선정하기 위해서는 다음과 같은 사항의 검토가 필요하였다. 1클라이언트는 1대차를 담당하게 되므로 2채널*4감속기=8채널과 대차용 진동신호추출을 위한 채널 1을 포함하면 총 9채널의 진동신호 입력단자가 필요하며 윤활 4ch, 온도 15~16ch 총 4 ch의 Analog 입력 단자가 요구된다. 속도 센서는 tachometer를 장착하여 NI 9401 모듈로 데이터를 받는 방법을 취한다. tachometer 센서는 회전기계에 범용적으로 사용되는 속도 센서로 장착이 용이하여 향 후 유지보수에 매우 유리한 장점이 있다.

② 측정 방향 검토

감속기는 레일-차륜 간의 충격에 의한 수직 방향(Z) 진동에 민감하며, 이는 감속기의 건강상태와 밀접하므로 반드시 설정해야 하는 방향이다. 감속기는 축 방향(기어의 축에 대한 방향; 열차의 진행방향으로는 수평방향; X)의 거동을 보이며 평 기어와 헬리컬기어 모두에서 잘 관찰되는 방향으로서 특히 1차 감속기의 기어형태인 헬리컬기어는 축 방향에서 신호의 확인이 필수적이다. 축방향의 신호는 기어의 특성을 아주 잘 나타내 준다. 감속기의 구조상 Z, X방향에 비해 Y방향(열차의 진행방향으로는 전후방향)의 거동은 민감도가 적고 동일 반경방향이므로 파형이 유사하며 축방향의 특성과  는 다르므로 측정이 필요한 방향의 대상에서 제외하였다. 센서의 측정 방향들 중에서 감속기의 특성을 모두 담아낼 수 있는 최소한의 방향을 선정하는 것을 우선 선정기준으로 하였고 이는 Z방향과 X방향이 유효하다. 대차로부터 추출해야 하는 진동의 방향은 사용자의 요구사항에 부합하는 X방향(열차의 진행방향으로는 수평방향)을 선정하였다.

감속기는 레일-차륜 간의 충격에 의한 수직방향(Z) 진동에 민감하며, 이는 감속기의 건강상태와 밀접하므로 반드시 설정해야 하는 방향이다. 감속기는 축 방향(기어의 축에 대한 방향; 열차의 진행방향으로는 수평방향; X)의 거동을 보이며 평 기어와 헬리컬기어 모두에서 잘 관찰되는 방향으로서 특히 1차 감속기의 기어형태인 헬리컬기어는 축 방향에서 신호의 확인이 필수적이다. 감속기의 구조상 Z, X방향에 비해 Y방향(열차의 진행방향으로는 전후방향)의 거동은 민감도가 적고 동일 반경방향이므로 파형이 유사하며 축방향의 특성과는 다르므로 측정이 필요한 방향의 대상에서 제외하였다. 센서의 측정 방향들 중에서 감속기의 특성을 모두 담아낼 수 있는 최소한의 방향을 선정하는 것을 우선 선정기준으로 하였고 이는 Z방향과 X방향이 유효하였다. 대차 부는 대차로부터 추출해야 하는 진동의 방향이 사용자의 요구사항에 부합하는 X방향(열차의 진행방향으로는 수평방향)을 선정하였다.

③ 센서의 부착 위치 검토

실차시험과 Lab실물시험을 통해 여러 측정위치별로 측정된 결과자료를 통해 분석을 한 결과 고속열차 감속기에 부착되어야 하는 센서의 부착위치 선정을 위한 우선 조건으로 다음과 같이 검토하였다. 장기간 부착 상태에서도 안전한 위치, 해당 기어의 진동신호를 가장 잘 취득할 수 있는 위치, 유지보수가 편리한 위치 다음과 같은 세 가지의 조건이 충족되어야 하였다. 감속기별 주요 진동 데이터 비교를 통해 가장 먼저, 안전한 기준에서 데이터의 신뢰성이 양호한 위치를 선정하고 그 다음 유지보수가 편리한 위치를 선정하였다. 진동측정 데이터는 동일한 측정위치를 상시 감시하는 것이 가장 우선하여야 했는데 그러한 점을 증명하기 위하여 동력차 1차 감속기의 각 방향에 대하여 진동주파수 측정을 하였다. 다음 그림 2.1.10은 1차 동력차와 동력객차의 1차 감속기의 각 방향의 진동을 측정한 결과 그래프이다.

고속열차 감속기에 부착되어야 하는 센서의 부착위치 선정을 위해서 3축 센서의 설치조건으로 3방향의 진동 Data가 가장 잘 취득될 수 있는 위치와 센서의 안정성 및 유지보수에 편리한 최적의 진동측정위치 선정이 필요하다. 안정성 및 유지보수에 유리한 부분은 감속기 Shaft 베어링 측면보다는 표면적이 넓고 충격으로부터 영향을 덜 받을 수 있는 상단이 주요하다고 사료되고, 상단 부분 중 3방향(수직, 수평, 축)의 진동 신호를 가장 잘 취득할 수 있는 위치를 최종 선정하였다.

그림 2.1.11은 시험 과정을 거치면서 선정한 진동 데이터 취득 포인트를 정리한 내용이다.

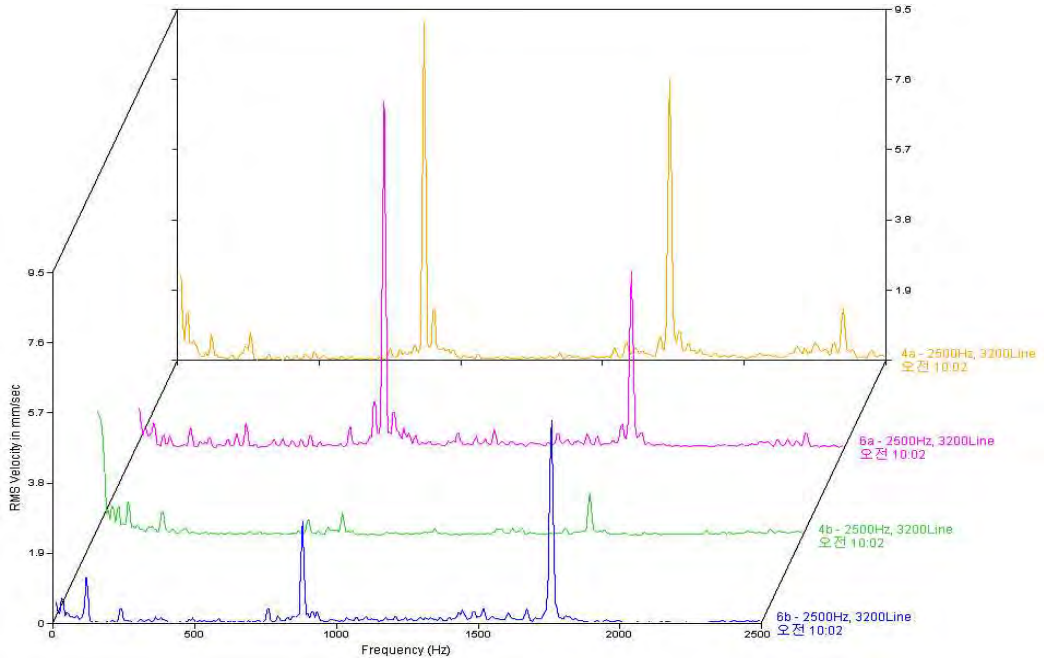



그림 2.1.10 동력차 1차감속기 Idle Z(주황색) / Output Y(분홍색), 동력객차 1차감속기 Idle Z(녹색) / Output Y(청색)

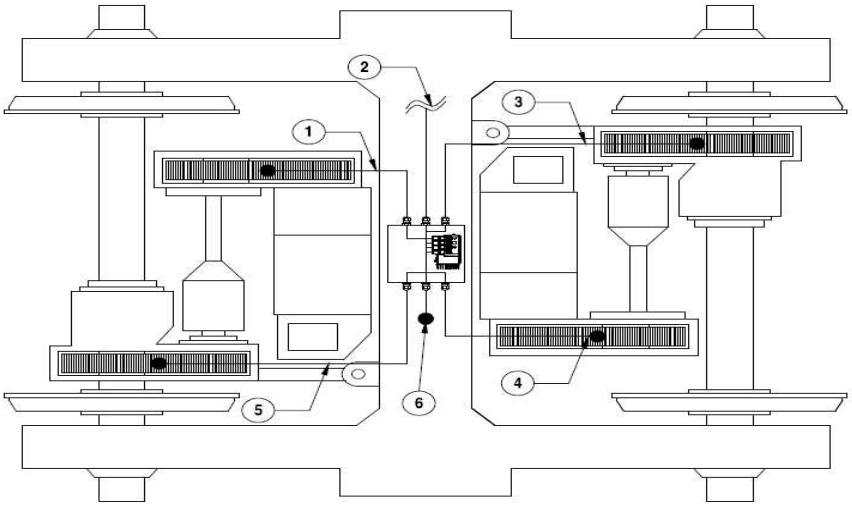



그림 2.1.11 센서 및 클라이언트 설치도

진동신호를 취득하는 센서의 종류는 변위센서, 속도센서, 가속도센서 등이 있으나 변위센서와 속도센서는 유지보수 측면에서 센서의 부착방법의 어려움, 크기의 고려(속도 센서는 대형의 크기), 적용주파수 등의 다각적인 검토를 걸쳐 최종적으로 부착이 편리하고, 가격이 저렴하며, 내구성이 좋고, 전원의 공급 및 S/N비가 우수, 적용주파수 당 선형성이 우수한 피에조 타입 ICP가속도센서를 선정하였다. 실차 시험결과 감속기에서 받는 최대 Shock pulse는 1,000G 이므로 최대 5,000G까지 견딜 수 있는 가속도센서를 우선 선정하였다. 대차용 진동 센서는 저주파수(~200Hz)의 측정이 요구되고 최대 Shock pulse가 30G이내 이므로 최대 500G까지 견딜 수 있는 감도 100 mV/g 가속도센서를 선정하였다. 최대주행속도에서 일반적인 진폭이 30G ~ 70G이내 이므로 500G까지 Over range 하지 않고 측정이 가능한 센서를 선정하였다. 다음 표 2.1.13은 선정한 센서에 대한 내용을 정리한 것이다.

표 2.1.13 센서 적용 위치 및 방향 정리

| | |
|---|---|
| 선단 1차 감속기(2 Direction Sensor) | • 10 mv/g, ~ 6,400 Hz<br>• 측정 항목 : 진동, 윤활, 온도<br>• 측정 방향 : 횡 방향(X), 축 방향(Z) |
| 후단 2차 감속기 (1 Direction l Sensor) | • 10 mv/g, ~ 6,400 Hz<br>• 측정 항목 : 진동, 윤활, 온도<br>• 측정 방향 : 축 방향(Z) |
| 후단 1차 감속기 (2 Direction Sensor) | • 10 mv/g, ~ 6,400 Hz<br>• 측정 항목 : 진동, 윤활, 온도<br>• 측정 방향 : 횡 방향(X), 축 방향(Z) |
| 선단 2차 감속기 (1 Direction Sensor) | • 10 mv/g, ~ 6,400 Hz<br>• 측정 항목 : 진동, 윤활, 온도<br>• 측정 방향 : 축 방향(Z) |
| Bogie 대차 (1 Direction Sensor) | • 100 mv/g, ~ 500 Hz<br>• 측정 항목 : Vibration<br>• 측정 방향 : 횡 방향(X) |

센서를 부착하는 방법은 기본적으로 열차 하부의 환경이 매우 열악하기 때문에 센서를 보호하는 점에 대하여 중점을 두고 검토하였다. 고속열차의 센서는 강력한 진동에 노출되어 센서를 보호 할 수 있는 장치가 필요하다. 따라서 센서의 장착을 위하여 다음과 같이 protection cap을 씌운 센서를 위의 그림과 같이 super magnetic으로 장착하고 자석 주위를 glue로 마감 처리를 하여 센서를 부착하는 방법을 구상하였다. 다음 그림 2.1.12는 센서를 부착하는 방법에 대한 구상안을 도면화한 내용이다.

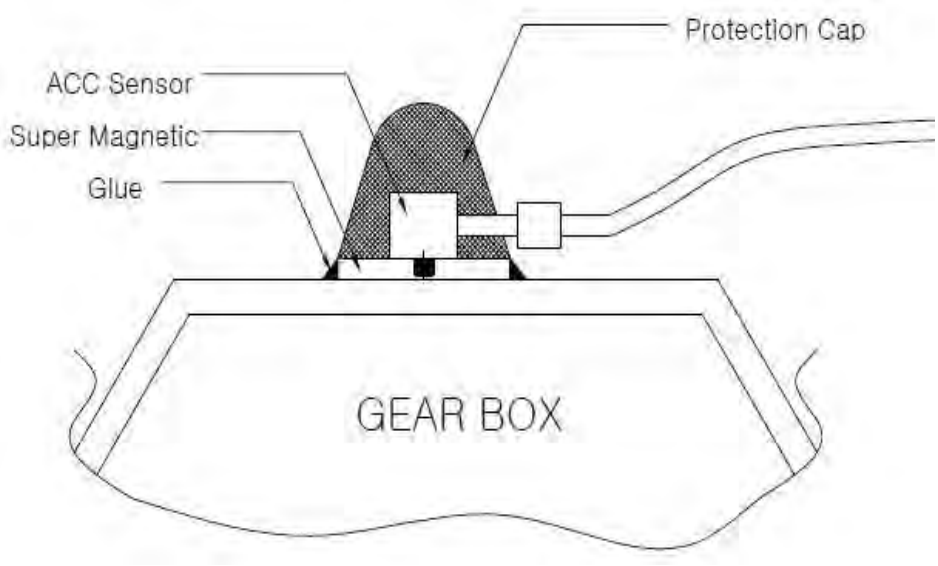



그림 2.1.12 센서 부착 그림

## 3. 모니터링 시스템 소프트웨어 기본 설계

### (1) 소프트웨어 구축 검토 내용

#### (가) 모니터링 시스템 소프트웨어의 설계 정의

고속열차용 감속기와 대차의 모니터링 시스템의 소프트웨어를 구축하기 전 소프트웨어의 주요 기능과 수행 역할에 대하여 분명하게 정의를 먼저 할 필요성이 있었다. 본 소프트웨어의 전체 시스템 개발은 분석-설계-구현-시험 단계로 절차를 구분하였다. 절차의 구분 후 소프트웨어가 구현되었을 때 요구사항에 관련하여 분석이 필요하였다. 감속기 모니터링 시스템의 소프트웨어의 주요 기능을 간단하게 정의를 하면 첫 번째로 감속기와 대차에 설치되어있는 센서에서 신호 데이터를 실시간으로 취득하게 되고 이 들어오는 신호를 클라이언트에서 받아 연산 처리를 하여야 기준 값으로 입력된 알람기준의 값에 도달하게 되면 알람을 발생시키는 기능, 발생한 알람을 데이터 정보화 하여 열차 차량 운전자에게 전달하는 기능 크게 두 가지로 요약할 수 있다. 이상 신호에 대한 연산 처리를 위하여 이상 신호에 대한 진동, 온도, 윤활에 대한 이상 기준에 대한 값이 명확하게 구현이 되어야 하마 각 인자에서도 감시 진단 파라미터를 명확하게 하여 소프트웨어를 구성하여야 하였다.

#### (나) 소프트웨어의 구성 내용 연구

개발 소프트웨어의 기능을 구상하면서 소프트웨어의 구성에 대한 구상 내용을 다음과 같이 정리하였다. 대상 열차의 감속기와 대차에 부착된 각종 센서들에서 얻어지는 데이터를 실시간으로 취득하고 이를 분석하여 수차에서 발생하고 있는 설비의 이상 진동, 온도, 윤활 현상 발생의 경중을 평가하는 기능을 가진다. 이를 위하여 Fast fourier transformation(FFT) 방법을 이용한 주파수분석 기법(Frequency Analysis)을 적용하기로 하였다. 다음의 그림 2.1.13은 본 소프트웨어에 적용된 FFT 절차를 표시하고 있다.

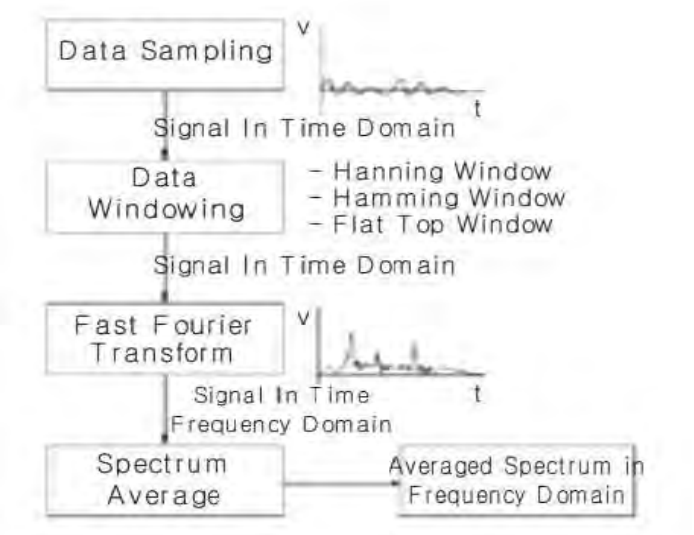



그림 2.1.13 주파수 분석 흐름도

그림 2.1.13을 살펴보면 캐비테이션 특성의 감시를 위하여 설치된 각 센서에서 출력되는 신호는 측정용 PC에 장착된 AD Converter에 의하여 Digital 데이터로 변환되는 데이터 취득 (Data sampling) 과정을 통하여 구해지는데 얻어진 데이터는 주파수 분석의 정확도를 높이기 위한 Data windowing 과정을 거친다. 본 소프트웨어에서는 일반적인 주파수 분석에서 사용되는 Hanning window와 Hamming window, Flat top window의 세 가지 방식을 사용자의 설정에 따라 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다. 이렇게 구해진 시간영역에서의 신호(Signal in time domain)을 주파수 영역에서의 신호로 변환되는데 이러한 변환 과정을 Fourier transform이라 한다. 본 개발 소프트웨어에서는 취득된 데이터를 Fast fourier transform(FFT)에 의하여 시간영역 신호에 대한 Single-sided, Scaled auto power spectrum을 계산하도록 하였다.

그리고 이렇게 구해진 주파수영역에서의 신호는 Spectrum average 과정을 거치게 되는데 1회의 취득 데이터를 이용하여 구해진 결과에 대한 노이즈를 줄이고 특성 주파수의 신호에 대한 변별력을 높이기 위하여 수차례 반복, 취득된 주파수 영역에 서의 신호를 같은 주파수의 값들의 평균을 취하는 과정이 된다. 이렇게 처리된 Averaged spectrum은 낮은 잡음비와 높은 첨두치(Peak) 선별력을 지니게 된다.

(다) 시스템 인터페이스 기술 내용

개발하고자 하는 시스템의 소프트웨어는 기본적으로 보조시스템(클라이언트) - 메인시스템(서버) 구조의 소프트웨어이다. 쉽게 설명을 하자면 보조시스템(클라이언트)은 열차의 주행 중 들어오는 신호를 받아 범위를 체크를 하고 데이터베이스 트랜잭션을 구동하여 필요한 모든 데이터를 수집하는 기능을 수행하는 장치를 말한다. 메인시스템(서버)은 트랜잭션을 수행하고 데이터의 일관성을 보장하는 기능을 수행하는 장치라고 설명할 수 있다.

보조시스템은 측정한 진동데이터를 바탕으로 각종 파라미터를 추출해낸 후 메인 시스템에 전달하고, 메인시스템은 수신된 파라미터 정보를 이용하여 감속기의 이상상태를 예측하고 사용자에게 결과를 나타내줌으로써 사용자가 적절한 시기에 감속기의 유지보수를 수행할 수 있도록 도와준다. 그림 2.1.14는 이번 소프트웨어 인터페이스 구성 화면이다. 본 시스템 인터페이스는 감속기의 각 요소들을 사용자 필요에 따라 대차별, 감속기별, 센서 별로 측정된 누적정보를 확인할  수 있도록 시스템 인터페이스를 구성하였다. 시스템의 인터페이스를 구성하되 일단 개발되는 시스템 소프트웨어 조작의 편이성, 빠른 반등속도, 사용 중 오류의 미발생, 다수의 사용자가 유지가 되어야 한다는 전제 조건을 설정하고 시스템 인터페이스의 개발을 시작하였다.

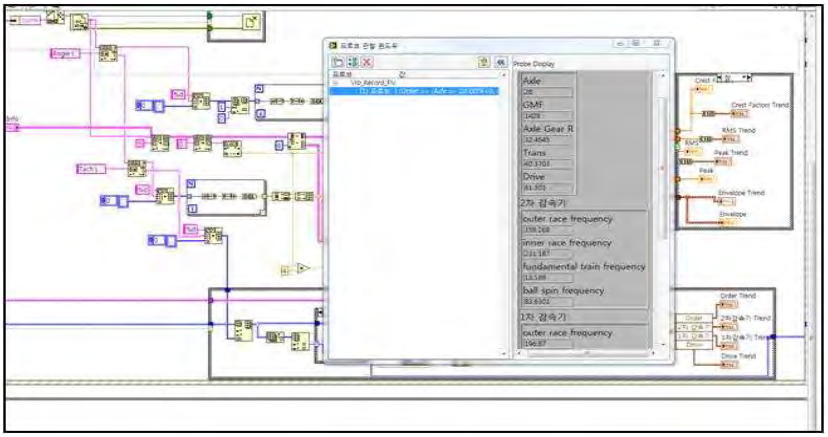



그림 2.1.14 인터페이스 시스템 구성 (Labview)

(라) 사용자 인터페이스 기술 내용

사용자는 필요에 따라 각 대차별, 감속기별, 센서별로 측정된 이상 감지 누적 정보를 확인을 할 수 있으며 필요에 따라서는 데이터의 내용을 분석할 수 있도록 시스템을 구성한다. 다음 그림 2.1.15 ~ 2.1.17은 사용자 인터페이스의 구상 내용을 간략하게 프로그램으로 설계하여 실현화 한 내용이다.

그림 2.1.15를 보면 시스템에서 발생하는 이벤트를 기록하고, 감속기가 장착된 대차에서 이상 징후가 발생할 경우 화면에 표시해주어 쉽게 알아볼 수 있도록 해준다. 각 대차의 위치를 클릭하면 해당 대차의 정보를 볼 수 있는 화면으로 이동하는 구조이다.

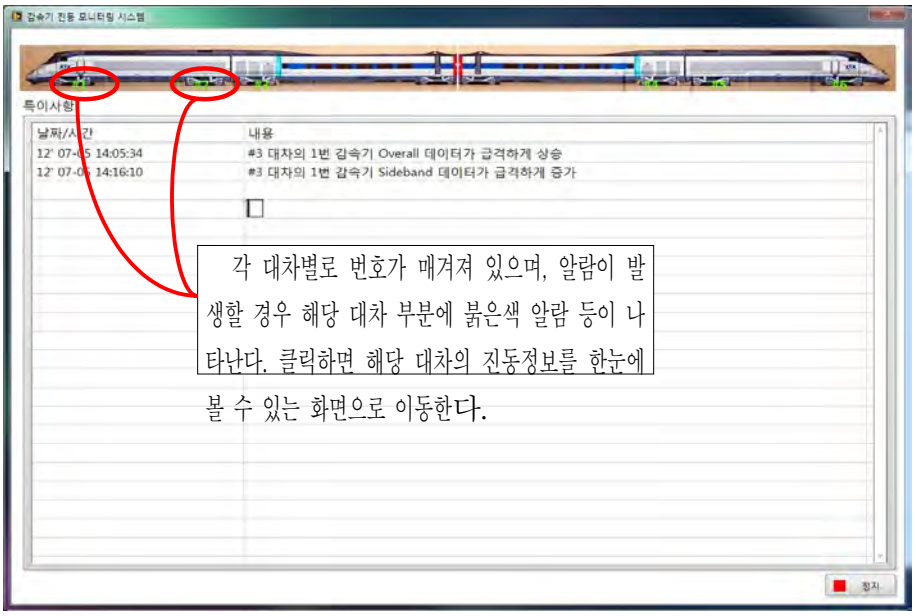



그림 2.1.15 사용자 프로그램 인터페이스 1

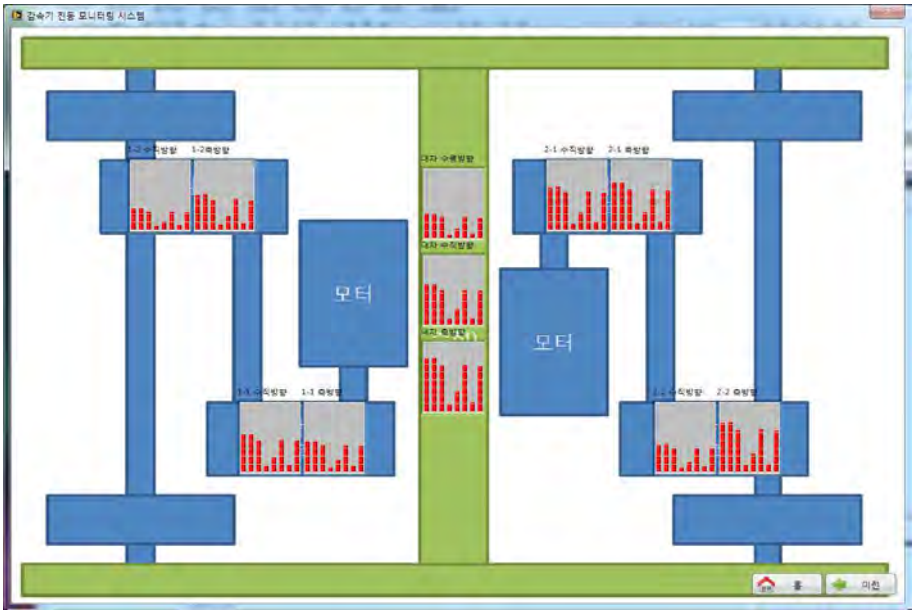



그림 2.1.16 사용자 프로그램 인터페이스 2

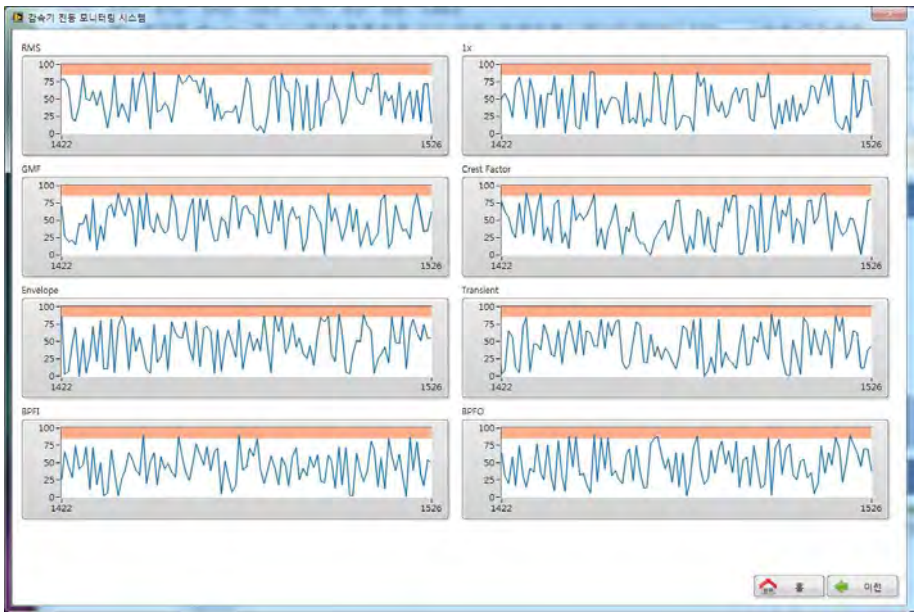



그림 2.1.17 사용자 프로그램 인터페이스 3

그림 2.1.16의 구상 인터페이스 내용은 각각의 센서 입력에 따라 필요한 파라미터를 계산하여 추출해내고, 그것에 대한 실시간 정보를 보여준다. 그래프를 클릭하면, 해당 파라미터의 시간별 차트를 확인할 수 있다. 현재 감속기와 대차에서 나타나는 센서별 파라미터를 막대형게이지 화면으로 표시해준다. 각 그래프를 클릭하면, 해당 센서 데이터의 변화기록을 그래프로 확인할 수 있는 화면으로 이동하는 구조로 설계된 내용이다.

이 때 사용자 인터페이스의 데이터 기록 규칙은 1초 동안 수집한 진동 데이터를 바탕으로 추출해낸 각종 진동 파라미터(1X GMF, Overall, BPFI, 등등)의 수치와 측정시간 ,모터의 분당회전수(RPM), 온도센서 데이터, 윤활센서 데이터, GPS 데이터를 함께 저장하는 것으로 설정하였다. 이때 대차 진동의 경우 별도의 파일에 원본데이터를 저장한다.

(마) 하드웨어 인터페이스 기술

① 하드웨어 인터페이스(Hardware Interface)

◯ 메인시스템

- CPU : Intel-core I7 - 2 Generation 2600 이상 급
- Memory : Samsung DDR3 4G PC3-10600(X2)
- HDD : Segate 2TB
- Ethernet : 10/100 Mbps Ethernet

◯ 보조시스템

- CPU : 533MHz PowerPC
- Memory : 256Mb
- Ports : Ethernet 2port, RS-232 1port, USB 1port

(바) 소프트웨어 인터페이스 기술

◯ 메인시스템 (Server)

- OS : Microsoft Windows7
- GUI 및 개발환경 : NI Labview2011 sp1

○ 보조시스템 (Client)
- OS : VxWorks
- 개발 환경 : NI Labview2011 sp1

(사) 통신 인터페이스(Communications Interface)
○ 메인시스템 : 10/100 Mbps Ethernet
○ 보조시스템 : 10/100 Mbps Ethernet

다음과 같은 인터페이스 기술을 적용하는 상태 분석 방법의 전제 조건은 KTX 진동 및 통합 모니터링 시스템 연구개발 결과로부터 추출되는 파라미터 및 알고리즘에 의한 산출된 널리 성능이 입증되는 것을 사용하는 것을 전제 조건으로 설정한다.

(아) 경보 알고리즘 변경

감속기 각각의 센서에서 들어오는 진동 시그널을 기반으로 추출해낸 최근 1분[1]간의 Kurtosis, RMS 데이터를 임시 메모리 버퍼에 저장하고, 저장된 데이터를 이용해 경보를 운전자에게 알려주는 방법으로 알고리즘을 변경하였다.

① RMS 값은 동일 포지션에 설치된 센서들 간의 값을 이용하여 평균값을 산출하고, 각각의 데이터가 평균값대비 몇 %의 값을 가지는지 산출하여 해당 비율을 누적하고, 누적된 최근 1분간의 평균값이 설정된 주의/경고[2] 단계의 비율[3]을 상회할 경우에 경보를 발생시킨다.

② Kurtosis 값은 최근 1분간 주의/경고[4] 값 아래도 단 한 번도 내려간 적이 없을 경우에 해당 경보를 발생시킨다.

(자) 위험도 측정 알고리즘 설계

감속기 각각의 측정위치에 따른 Kurtosis, Crest Factor 데이터를 메모리에 누적시키는 방법으로 알고리즘의 기본을 설계하였다. 메모리에 데이터를 누적시킬 때 10분주기 연산으로 누적된 값 중에서 Kurtosis의 기준치를 초과한 횟수를 파악하여 총 데이터 개수 대비 초과된 개수의 비율을 산출하여 위험도를 추출할 수 있도록 하였으며 추출한 위험도가 기준치를 초과할 경우 사용자에게 경보를 보여주는 방법으로 알고리즘을 구성하였다.

---

1) 필요에 따라 시간의 변경이 가능하다.
2) 두 값 모두 사용자의 요구에 따라 변화가능하며, 주의는 200%, 경고는 400% 가 기본값으로 설정되어 있다.
3) RMS 값을 비율을 통해 비교하는 것은 속도와 모터의 구동/비구동 상태에 따라 RMS 값의 변화폭이 심하여 고정된 임계값을 설정하기 힘든 요소이기 때문에, 동일 측정 포인트간의 상호비교 방식을 이용하는 것이다.
4) 기본값은 주의:5, 경고:50 으로 설정되어 있다.

(차) 인터페이스 구성 전제 조건

사용되는 상태분석 방법은 KTX 진동 및 통합 모니터링 시스템 연구개발 결과로부터 추출되는 파라미터 및 알고리즘에 의해 산출된 널리 성능이 입증된 것을 사용하였다. 그러나 인터페이스를 구성하는 부분에 있어 개발 범위에 대한 검토와 위험도 측정 알고리즘에 대한 내용을 반드시 확인하여야 하였다. 다음 표 2.1.14는 모니터링 시스템 소프트웨어의 개발 범위를 설정한 내용이다.

이러한 인터페이스 기술을 전제로 클라이언트와 서버의 동적 기술 내용을 정리하였다. 다음 그림 2.1.18 ~ 2.1.19는 클라이언트의 동적 기술에 대한 구상 내용을 정리한 것이다.

표 2.1.14 모니터링 시스템 소프트웨어 개발 범위

| | |
|---|---|
| 기능 1 | 진동 주파수 기법을 통한 감속기 상태진단 |
| 기능 2 | 윤활 오염 분석 기법을 통한 감속기 상태 진단 |
| 기능 3 | 온도 분석 기법을 통한 감속기 상태 진단 |
| 기능 4 | 사용자 디스플레이 |
| 기능 5 | 추출된 파라미터 데이터 저장 |

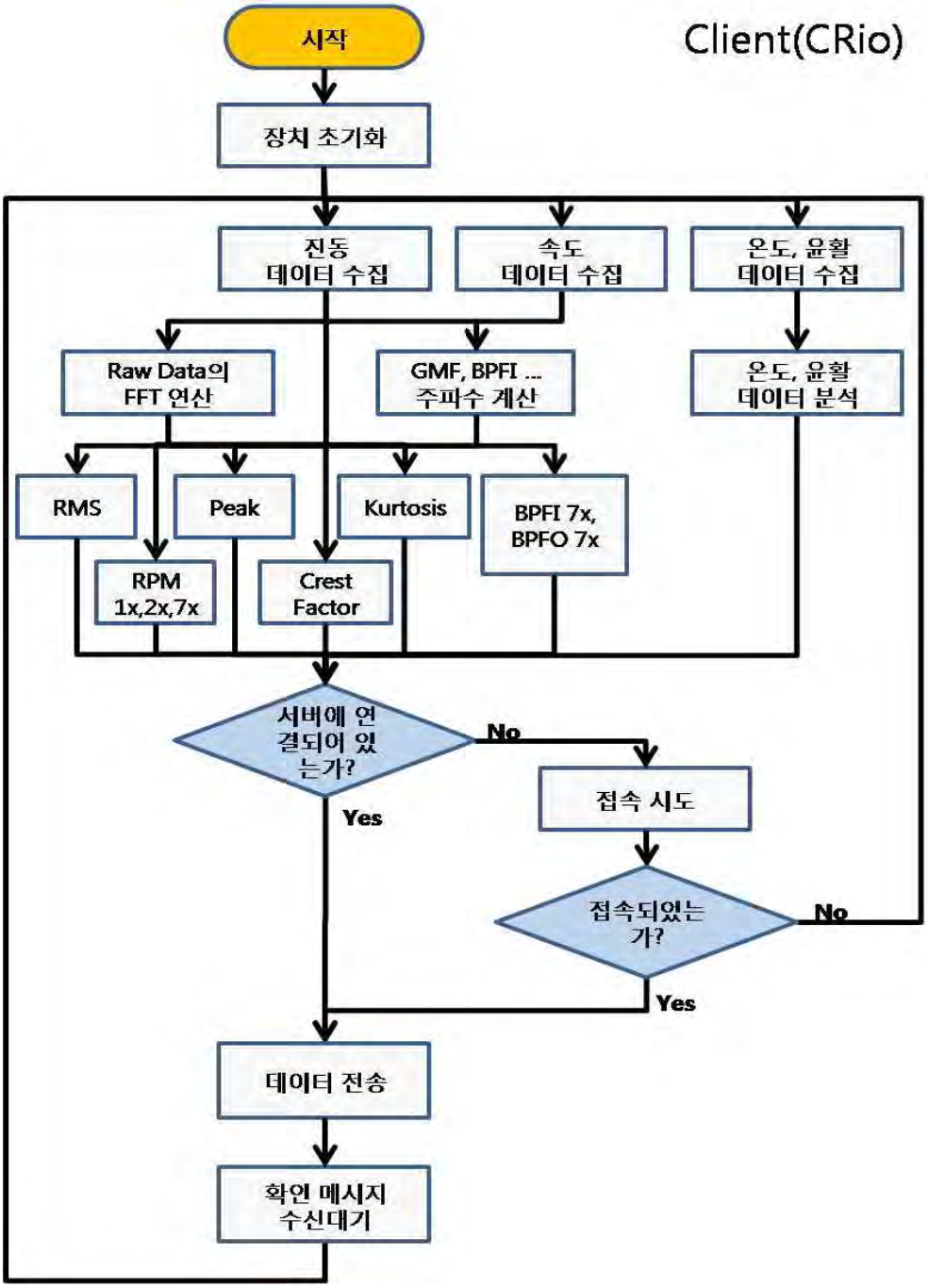



그림 2.1.18 CRio 동적 기술 구상 내용

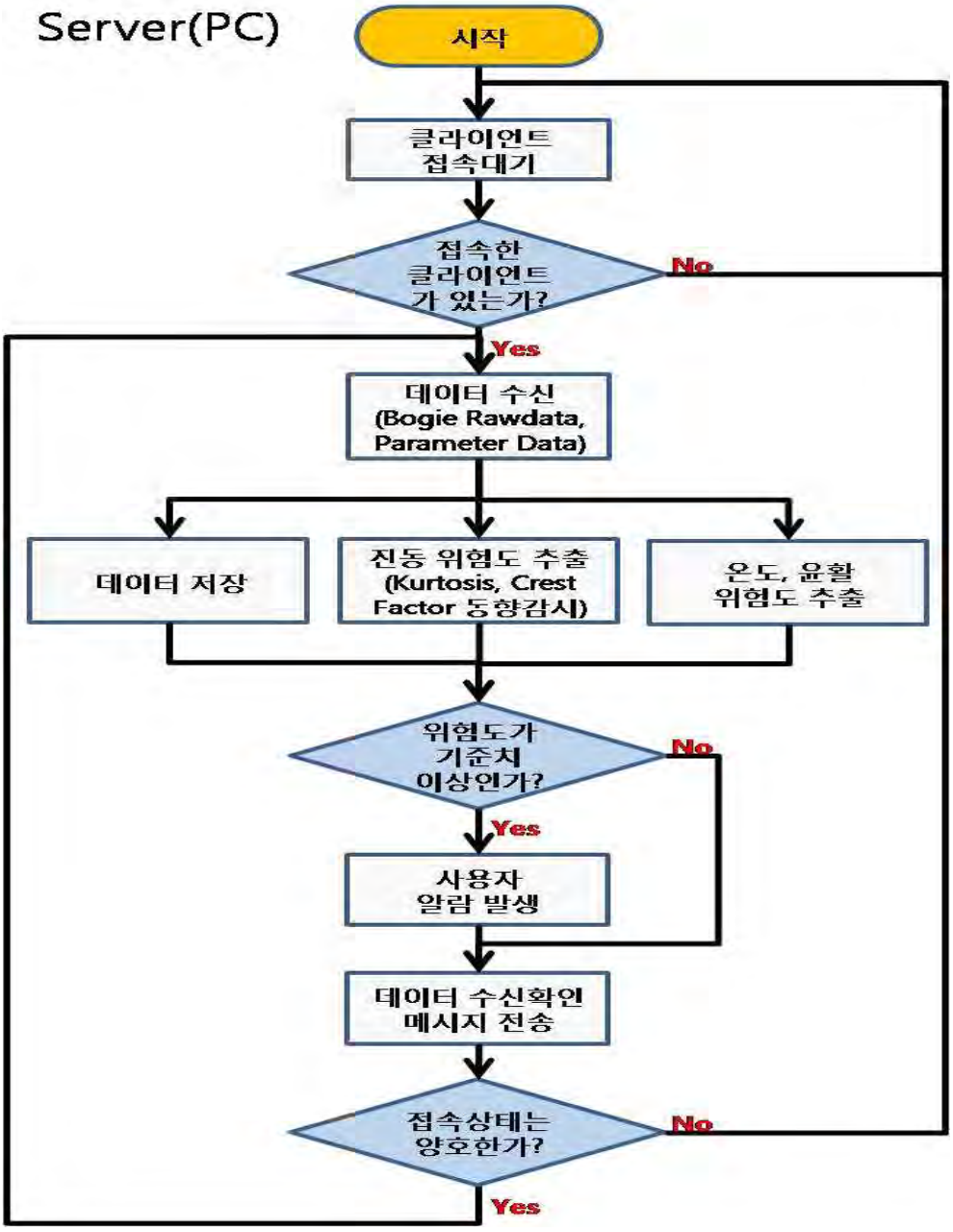



그림 2.1.19 Server 동적 기술 내용

다음과 같은 인터페이스 기술 내용을 정리하여 소프트웨어의 구축에 대한 전략은 다음과 같이 정리할 수 있었다.

① 사용자에 대한 UI 화면 고려

- 이 시스템에 대한 사용자는 진동에 대한 전문가가 아니므로 상세한 내용의 데이터를 화면에 보여준다 하더라도 증상이나 상태 이상 유무에 대한 판단을 내리기 어렵다.

- 직관적인 UI(User Interface)를 사용하여 이상이 발생한 것으로 추정되는 위치를 한 눈에 확인할 수 있도록 해준다.

- 주요한 진동주파수 파라미터의 값이 어떻게 변하였는지 확인할 수 있도록 그래프를 이용한 디스플레이를 적용하여 과거로부터 데이터의 변화추이를 확인할 수 있도록 한다.

② 데이터 저장 목적

- 진동 수치에 대한 장기적인 변화를 확인하여, 향후 발생할 가능성이 높은 결함을 미리 예방한다.

- 장비의 고장 발생 시 누적된 데이터를 이용하여 고장원인을 찾고, 결함 예측을 위한 기초자료로 활용하는 것을 기대할 수 있다.

③ GPS모듈 사용 근거

- 열차의 진동정보와 함께 위치를 저장함으로써 향후 저장데이터를 이용한 정밀 분석 시 철로의 특성을 함께 고려해 분석할 수 있다.

위의 내용을 근거로 1차 소프트웨어 프로세스 명세서를 작성하여 시스템 구성을 진행하였다. 다음 표 2.1.15는 구상 프로세스 명세서 내용을 정리한 것이다.

표 2.1.15 1차 구상 소프트웨어 프로세스 명세서 내용

| 이름 | 메인시스템 메인모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 파라미터 데이터 수신 From 1.2<br>수신확인 To 1.2<br>상태감시채널 선택 From 1.3<br>선택채널 상태 동향 데이터 To 1.3<br>파라미터 데이터 To 1.4<br>상태예측 데이터 From 1.4<br>파라미터 데이터 To 1.5<br>저장확인 From 1.5 |
| 내용 | 서브시스템에서 전달되어지는 파라미터 데이터를 수신하여, 데이터 연산 모듈(1.4)로 전달하고, 모듈에서 감속기의 상태에 재한 예측 진단 데이터를 수신하여, 메모리에 저장한다. 사용자 요청이 들어올 경우 사용자가 선택한 채널의 데이터 변화 동향을 그래프로 보여준다. |

| 이름 | Network 통신모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 수신확인 To 1.1<br>파라미터 데이터 From 1.1 |
| 내용 | 서브시스템에서 연산해낸 결과 파라미터를 받아 메인시스템 메인모듈(1.1)로 전달하고, 피드백을 받는다. |

| 이름 | Network 통신모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 연결요청 From 2.2.1<br>연결수락 To 2.2.1<br>상태감시 파라미터 데이터 From 1.2.1<br>열차 운행속도 데이터 To 1.2.1 |
| 내용 | 서브시스템과 실제적인 네트워크 세션을 생성하고 열차의 운행속도 데이터를 전달하고, 속도에 따라 추출되는 파라미터 데이터를 수신한다. |

| 이름 | GUI 모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 채널 선택 정보 From 1.1<br>선택 채널의 상태 누적데이터 To 1.1 |
| 내용 | 사용자로부터 채널 선택 정보를 입력받고, 그에 해당하는 채널의 데이터를 화면에 표시해준다. |

| 이름 | 데이터 연산모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 파라미터 데이터 From 1.1<br>감속기 상태 예측 정보 To 1.1 |
| 내용 | 서브시스템들에서 취합한 파라미터 데이터를 메인모듈(1.1)로부터 전달받고, 이상상태의 종류와 진행정도를 계산하여 메인모듈로 되돌려 준다. |

| 이름 | 데이터 저장모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 파라미터 데이터 From 1.1<br>저장확인 To 1.1 |
| 내용 | 데이터를 저장장치에 저장하는 기능을 수행한다. |

| 이름 | 서브시스템 메인모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 각 센서의 Raw Data From 2.3<br>Raw Data 수신확인 To 2.3<br>각 센서의 Raw Data To 2.4<br>추출된 파라미터 데이터 From 2.4<br>추출된 파라미터 데이터 To 2.2<br>수신확인 From 2.2 |
| 내용 | 메인모듈은 FPGA에서 수집된 진동/온도/윤활데이터를 전달받아, 데이터 연산모듈을 통해 각종 데이터를 추출해내고, 추출해낸 결과를 통신모듈을 통하여 메인시스템으로 전달한다. |

| 이름 | Network 통신모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 추출된 파라미터 데이터 From 2.1<br>수신확인 To 2.1 |
| 내용 | 메인모듈로부터 파라미터를 전달받아 메인시스템으로 전달하고, 메인시스템에서 넘어온 수신확인 데이터를 메인모듈로 전달한다. 이때 전달받은 수신확인데이터에는 열차의 현재 운행속도 정보를 포함한다. |

| 이름 | Network 통신모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 연결요청 To 1.2.1<br>연결수락 From 1.2.1<br>파라미터 데이터 To 1.2.1<br>속도 데이터 From 1.2.1 |
| 내용 | 서브시스템이 가동되면, 메인시스템에 연결을 요청하고, 연결이 수락되면 파라미터 데이터를 보내고 속도데이터가 포함된 수신확인 데이터를 받아 메인모듈(2.1)로 전달한다. |

| 이름 | FPGA 모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 센서 데이터 To 2.1<br>수신확인 From 2.1 |
| 내용 | 센서로부터 측정된 각각의 센서데이터를 취합하여 메인시스템(2.1)로 전달하고, 수신확인을 받는다. |

| 이름 | 데이터 연산 모듈 |
|---|---|
| 입력 / 출력 | 센서 데이터 From 2.1<br>연산된 파라미터 데이터 To 2.1 |
| 내용 | FPGA 모듈(2.3)을 통해 취득된 센서데이터와 네트워크 통신모듈(2.2)을 통해 전달받은 운행속도 정보를 메인모듈(2.1)에서 전달받고, 연산된 파라미터 데이터를 메인모듈로 되돌려 준다. |

# 제2절 감속기 모니터링 시스템 최종 분석 및 설계

## 1. 모니터링 시스템 구축 주요 파라미터 설계

### 가. 최적의 감시 위치 선정을 위한 감속기 부품 고유 진동 해석 연구

#### (1) 실측 결과를 통한 센서 위치 선정 연구

본 과제를 수행하면서 최적의 감시 포인트를 선정하는 것이 매우 중요한 과정이었다. 최적의 감시 포인트를 선정하기 위하여 본 기관에서는 실차시험과 감속기 실물시험을 통해 여러 측정위치별로 측정된 결과자료를 통해 분석한 결과 고속열차 감속기에 부착되어야 하는 센서의 부착위치 선정을 위한 우선 조건을 다음과 같이 설정하였다.

- 장기간 부착 상태에서도 안전한 위치
- 해당 기어의 진동신호를 가장 잘 취득할 수 있는 위치
- 유지보수가 편리한 위치

최적의 센서 및 감시 포인트를 선정하기 위하여 어떠한 주파수 분석을 할지 선정을 하는 과정이 중요 하였다. 일단 연구를 진행하면서 KTX 모터감속기(MRU)에서 발생하는 차륜-레일 간 광대역 충격진동주파수를 제외한 주요 가진 이산주파수에는 모터에서 발생하는 회전주파수, 감속기의 각 축에서 발생하는 회전주파수, 차륜의 회전주파수 및 기어 맞물림 주파수(GMF)와 베어링의 접촉기본주파수(외륜, 내륜, 볼, 케이지)등 으로 나열할 수 있다. 이들 가진 주파수는 열차의 주행속도에 따라 수시로 변동하므로 감속기의 종합구성체에서 내포하고 있는 고유주파수들과의 관련성은 공진과 밀접한 의미가 있다 할 수 있다. 이러한 센서의 선정과 주요 발생 파라미터를 선정하는 것은 모니터링 시스템을 구축하는 가장 먼저 수행을 하여야하는 과정 이였다. 일단 주요 파라미터를 선정하기 위한 계획을 수립하였다. 감속기 실물시험, 전동차 시험, 실차 시험 등에 대한 계획을 수립하여 최적의 센서 선정, 센서 장착 위치, 최적의 감시 파라미터 선정 등에 대한 연구를 진행할 계획을 세워 연구를 진행하게 되었다.

최적의 센서 포인트 선정하기 위하여 실험에 의한 고유치해석(experimental modal analysis)방법을 사용하였다. 세부 해석 방법으로는 독립적인 거동이 가능한 단품과 조립품의 각 동특성해석을 이용하여 주요 고유주파수들의 분포를 확인하고 주행 시 과도해석과 정지 시 광대역 주파수인 충격가진에 의한 응답 해석결과를 비교 검토하고, 실험결과에 의한 모드해석을 기본으로 가진 주파수와의 관련성 검토를 추가적으로 실시하였다. 다음 그림 2.2.1은 최적의 센서 선정 조건을 찾기 위한 시험의 조건을 정리한 내용이다.

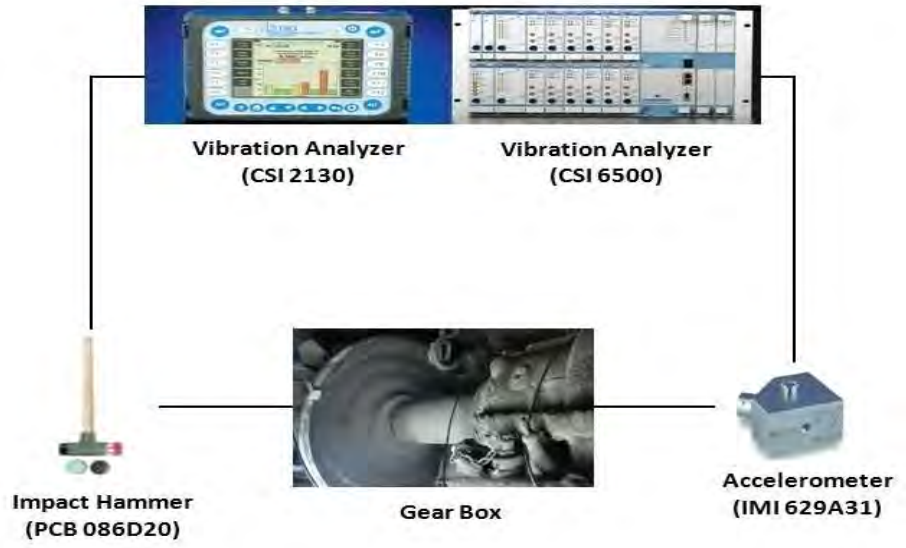



그림 2.2.1 Experimental system for modal test

감속기를 구성하는 부품 중 독립적인 거동이 가능한 단품구성요소 및 조립구성요소의 고유 진동수 산출을 위해 각 구성요소를 가능한 Isolate된 상태에서 광대역주파수 충격 가진을 가해 추출한 진동 응답 신호를 검토하여 고유주파수를 산출하였다. 다음 그림 2.2.2는 FRF, Coherence와 Phase를 통해 차축의 고유주파수를 확인한 그래프이다.

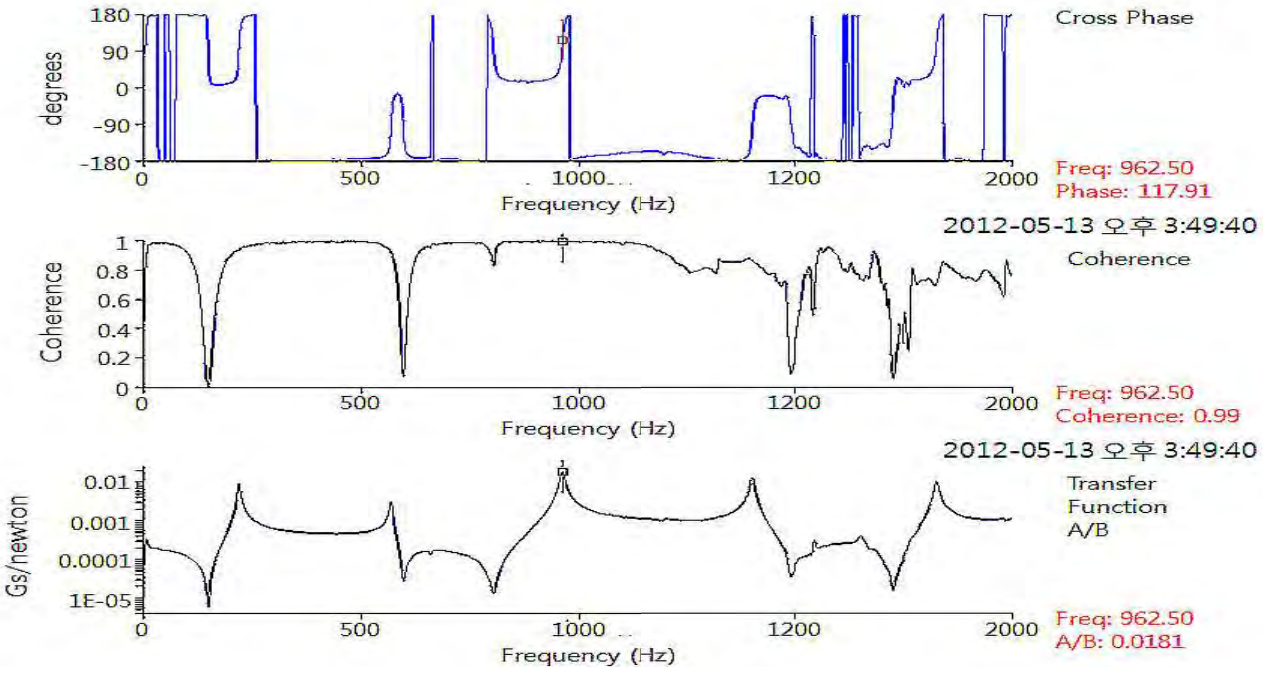



그림 2.2.2 FRF, Coherence and phase graph

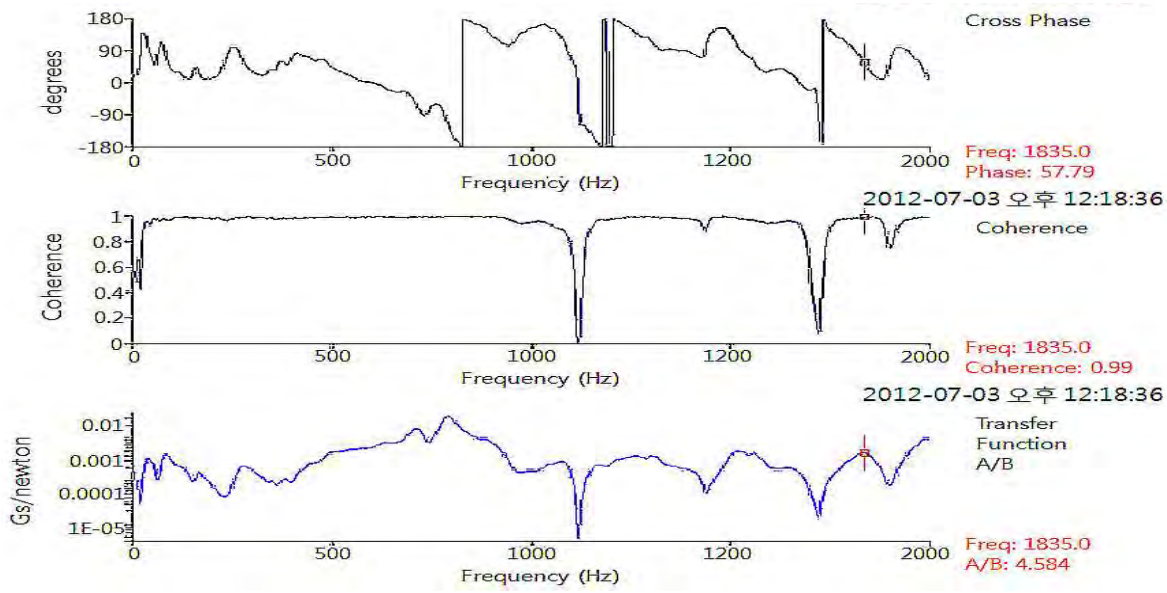



그림 2.2.3 FRF, Coherence and phase graph at 1st gear box vertical direction.

정지상태의 KTX 실차에 MRU가 결합되어 있는 상태로 차축에 Impact hammer를 이용하여 충격 가진을 준 상태에서 감속기 및 차륜의 FRF를 산출하였다. 이 결과로 산출된 실차 조립품 상태에서의 주요 고유주파수는 690Hz, 790Hz, 1,045Hz, 1,835Hz 등으로서 조립된 상태의 접촉강성이 가미된 실제 MRU 고유주파수로 파악할 수 있다. 종합적인 부품이 조립되고 서로 연성(coupling)효과로 영향을 주는 관계로 단품구성요소 및 조립구성요소의 결과 값보다 명확한 결과를 유추하기 어려운 점이 있어서 주행 중 과도해석으로 재검증이 필요했다. 그림 2.2.3은 1차 감속기의 수직방향 고유주파수를 확인한 그래프이다.

실차상태의 고유주파수는 단품 및 조립 구성요소의 고유주파수들과 대부분 유사하지 않았으며 이는 조립이 완벽하게 이루어진 실차의 경우 레일에 인입되어 있는 종합구성체로서의 강성 및 질량의 변동이 고유주파수의 차이를 형성한다는 것을 확인 할 수 있는 결과이다. 다음 표 2.2.1에서는 단품테스트와 실차 결합상태에서의 고유주파수를 비교한 결과를 나타내고 있다.

표 2.2.1 Natural frequencies of parts and assembles

| Location | Part (Hz) | Assemble (Hz) |
|---|---|---|
| 1st gearbox | 390, 881,<br>962, 1815 | 697, 790, 1835 |
| 2nd gearbox | 590, 907 | 690, 746,<br>1045, 1705 |
| Axle shaft | 220, 570, 960 | 540, 717 |

KTX 감속기 부품의 고유 진동 해석을 진행 한 후 최종적으로 감속기 실물 시험을 통하여 위치별, 방향에 따른 최적의 포인트 검증 시험을 진행하였다.

감속기별 주요 진동 데이터 비교를 통해 가장 먼저, 안전한 기준에서 데이터의 신뢰성이 양호한 위치를 선정하고 그다음 유지보수가 편리한 위치를 먼저 선정하였다. 진동측정 데이터는 동일한 측정위치를 상시 감시하는 것이 가장 우선해야 한다. 다음 그림 2.2.4와 그림 2.2.5는 실물 시험 및 실차 시험을 통하여 취득된 신호를 보여주는 값이다. Route 1차감속기 상부 10point, 1차 감속기 부 10point, 1차감속기 베어링 부 10point 등 현장에서 안전을 고려하여 최종 선정하여 감속기 각 축에 해당하는 진동의 데이터를 3방향에서 측정을 하는 시험을 진행하였다. 다음 그림 2.2.4는 동력차와 동력객차의 1차 감속기 각 측정 방향에 대한 스펙트럼 내용 그래프이며, 그림 2.2.5는 2차 감속기 Vertical 방향의 5포인트 측정 그래프를 표현한 것이다.

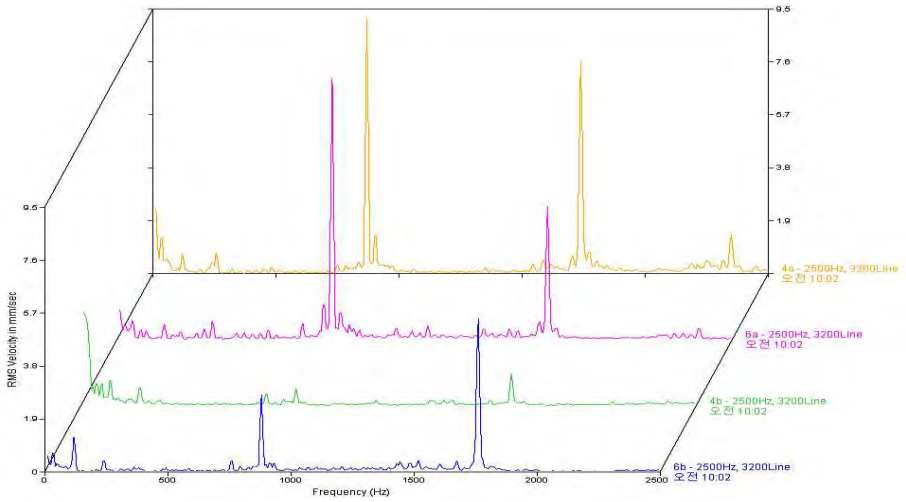



그림 2.2.4 동력차 1차감속기 Idle Z(주황색) / Output Y(분홍색), 동력객차 1차감속기 Idle Z(녹색) / Output Y순서(청색)

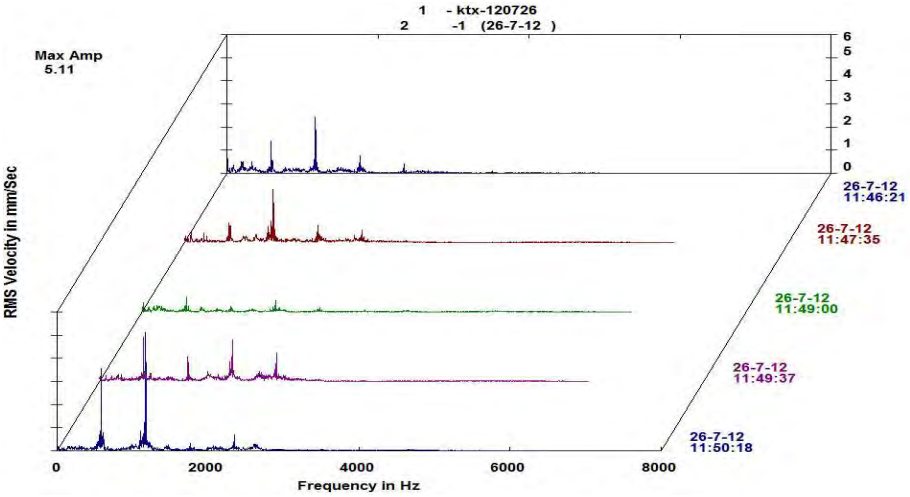



그림 2.2.5 2차 감속기 Vertical 방향의 5포인트 측정점 그래프

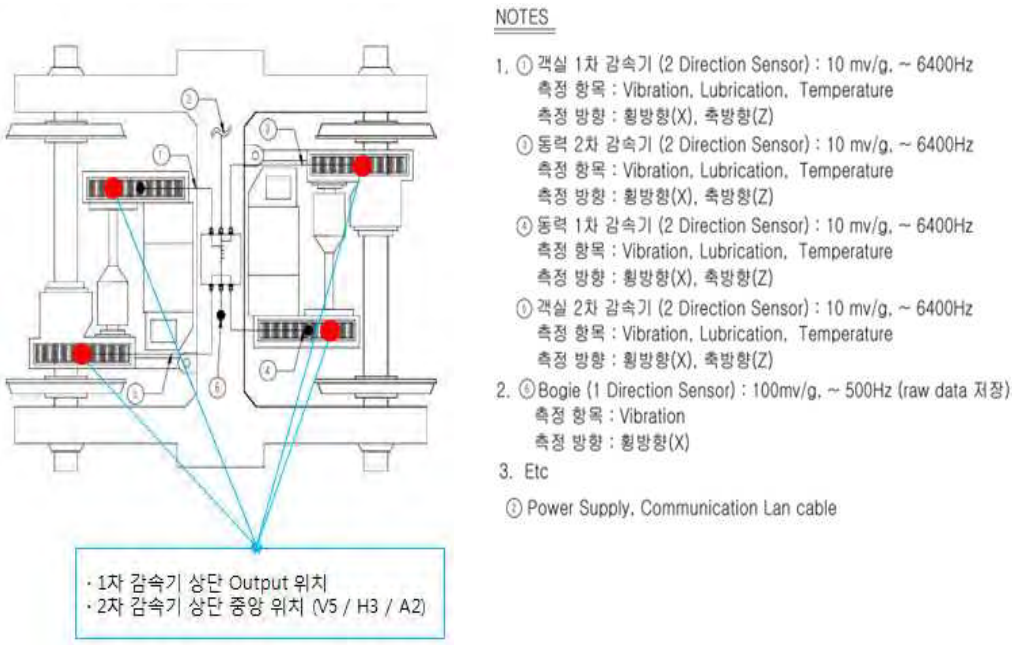



그림 2.2.6 감속기 최적 센서 위치의 선정

고속열차 감속기에 부착되어야 하는 센서의 부착위치 선정을 위해서 3축 센서의 설치조건으로 3방향의 진동 Data가 가장 잘 취득될 수 있는 위치와 센서의 안정성 및 유지보수에 편리한 최적의 진동측정위치 선정을 해야 한다. 안정성 및 유지보수에 유리한 부분은 감속기 Shaft 베어링 측면보다는 표면적이 넓고 충격으로부터 영향을 덜 받을 수 있는 상단이 주요하다고 사료되고, 상단 부분 중 3방향(수직, 수평, 축)의 진동 신호를 가장 잘 취득 할 수 있는 위치를 최종 선정하였다. 그림 2.2.6은 감속기 최적 센서 위치를 선정한 결과 내용이다.

고속열차의 센서는 강력한 진동에 노출되어 센서를 보호할 수 있는 장치가 필요하다. 그러나 초기에 구상하였던 구상안은 고무의 금형을 제작하여야 하는 단점과 정확한 검증이 되지 않아 실제로 구현하기에 무리가 있었다. 결국, 센서의 장착을 위하여 다음과 같이 protection cap을 씌운 센서를 위의 그림과 같이 super magnetic으로 장착하고 자석 주위를 glue로 마감 처리를 하여 센서를 부착하는 방법을 선정하였다. 그림 2.2.7은 센서를 부착하는 방법을 표현한 그림이다.

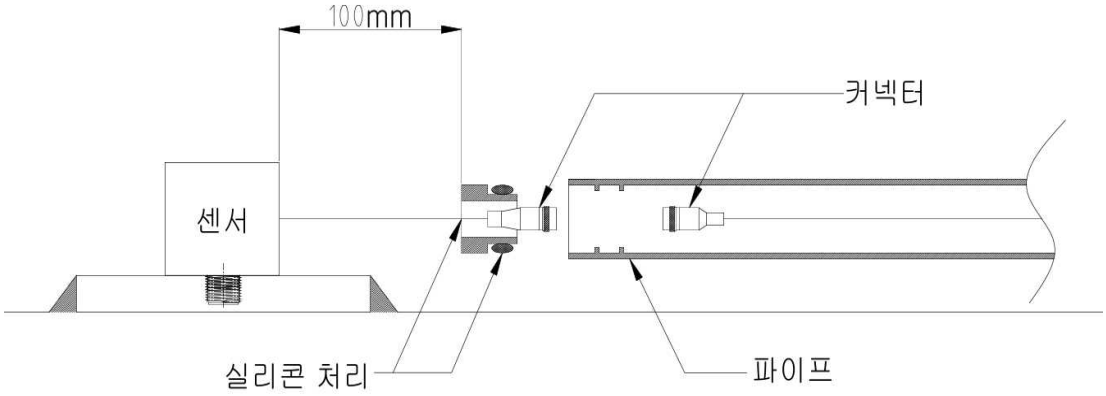



그림 2.2.7 센서 취부 방법

(2) 산업용 설비의 실측결과를 통한 파라미터 연구

이번 모니터링 시스템을 구축하면서 어떠한 진동의 파라미터를 적용하여 시스템을 구성하여야 할지 많은 고민을 하였다. 때문에 산업 설비 현장에서 설비에 대하여 가장 널리 쓰이는 기계 설비의 감시 기법을 조사하였다. 감속기와 대차의 설비 현황을 고려하였을 때 다음과 같은 설비 감시 기법을 적용하기로 결론을 내렸다.

○ 모터 분석법을 통하여 감속기의 전기적 결함을 분석하여 Flux 및 Current의 Spectrum 분석을 통해 회전자(Rotor)의 결함인가 또는 고정자(Stator)의 결함인가를 분석하고 Motor진동분석법-Motor에서 발생하는 Electromagnetic Vibration에 대한 측정을 실시해서 진단을 하는 이상 감시 기법을 적용하기로 하였다. 모터는 기계적인 특성과 전기적인 특성을 가진 기계이다. 따라서 정밀한 분석 없이는 기계적인 결함인지, 전기적인 결함인지를 구분하기란 어렵다. 이 모터 분석법을 통해 결함의 원인을 찾음으로써 설비의 안정적인 운영을 도와줄 수 있을 것으로 판단하였다.

○ Bearing 진단법 (PeakVue기법)은 SST기법-특히 10Hz이하의 저속 설비에서 베어링이나 기어의 초기 결함을 분석해 준다. 베어링의 분석기법은 PeakVue 기법이라 하는데 이 감시 기법은 베어링이나 기어의 초기 결함을 분석해 준다. 이 때 온도계를 화용을 하면 베어링 하우징 부분의 온도를 체크하고 과부하 및 과열상태를 점검할 수가 있다. 베어링 분석 기법을 적용하면 진동 주파수 분석과 진단 프로그램을 이용하여 Bearing 결함 주파수를 찾고, 잔존 수명을 예측함으로 갑작스런 설비의 셧 다운을 방지할 수 있다.

○ 복잡한 형태의 진동은 FFT 알고리즘을 이용하여, 분석할 수 있다. FFT 분석기는 반복적으로 발생하는 신호를 여러 개의 조화함수로 분석할 수 있다. 종래에는 DSP chip을 이용하여 FFT 분석을 H/W로서 처리하였으나, 컴퓨터 성능의 발전으로 동일한 속도로 S/W 처리가 가능해짐으로써 여러 가지 편리한 기능이 보강된 FFT 분석 장치가 개발, 보급되고 있는 추세이다.

최근의 철도차량의 진단기술은 차량의 운전 상태에서 감시 제어시스템을 구성하여 이상상태를 감지하는 상태감시기술, 비파괴검사나 비분해검사의 상태정보로부터 설비나 기기의 열화정도 및 잔여수명을 평가할 수 있는 정밀진단기법 및 합리적인 유지 보수 계획을 수립하는 유지관리체계로 정리할 수 있으며, 특히 분해하지 않은 상태에서의 기기나 장치의 열화 및 이상상태를 진단하는 비분해검사와 차량 운행 중의 이상검지에 의해 돌발고장을 예방하는 상시감시 진단기술에 대한 연구가 주목받고 있다.

위의 분석 기법을 종합적으로 정리를 하면 다음 표 2.2.2와 같다.

표 2.2.2 감속기 설비 이상 감시 기법 적용 내용 정리

| 진 단 기 법 | 진 단 내 용 | 기 대 효 과 |
|---|---|---|
| 진동분석법 | • 설비의 진동을 분석함으로써 설비의 결함을 알 수 있다.<br>*Unbalance or 1x RPM 성분<br>*Misalignment or 2x RPM 성분<br>*Mechanical Looseness<br>*Rotating Structural Looseness<br>*Oil Whirl, Oil Whip, Rub<br>*Roller Bearing의 진동 및 Belt 진동 혹은 Sub- Harmonic 진동<br>*전자기적 진동<br>*Bearing 진동을 분석한다. | • 회전 기계에서 자주 발생하는 결함을 조기에 발견하고, 진행 상태를 알게 됨으로써 계획적인 정비를 통해 설비의 수명을 최대한으로 연장시킬 수 있다.<br>• 설비의 결함(고장)원인을 미리 알고 정비를 실시할 수 있어, 우수한 정비 능력을 발휘할 수 있으며, 정비 시간을 단축시킬 수 있다. |
| 모터분석법 | • 전기적 결함 분석법- Flux 및 Current의 Spectrum 분석을 통해 회전자(Rotor)의 결함인가 또는 고정자(Stator)의 결함인가를 분석한다.<br>• Motor 진동 분석법- Motor에서 발생하는Electromagnetic Vibration에 대한 측정을 실시해서 진단한다. | 모터는 기계적인 특성과 전기적인 특성을 가진 기계이다. 따라서 정밀한 분석 없이는 기계적인 결함인지, 전기적인 결함인지를 구분하기란 어렵다. 이 모터 분석법을 통해 결함의 원인을 찾음으로써 설비의 안정적인 운영을 도와준다. |
| Bearing 진단법<br>(PeakVue기법) | • SST 기법- 특히 10Hz이하의 저속 설비에서 베어링이나 기어의 초기 결함을 분석해 준다.<br>• PeakVue 기법-베어링이나 기어의 초기 결함을 분석해 준다.<br>• 온도계- 베어링 하우징 부분의 온도를 체크하고 과부하 및 과열상태를 점검한다. | 진동 주파수 분석과 진단 프로그램을 이용하여 Bearing 결함 주파수를 찾고, 잔존 수명을 예측함으로써 갑작스런 설비의 Shutdown을 예방할 수 있다. |

다음 아래의 그림 2.2.8은 철도차량의 진단기술 및 수명평가의 기본 절차이다.

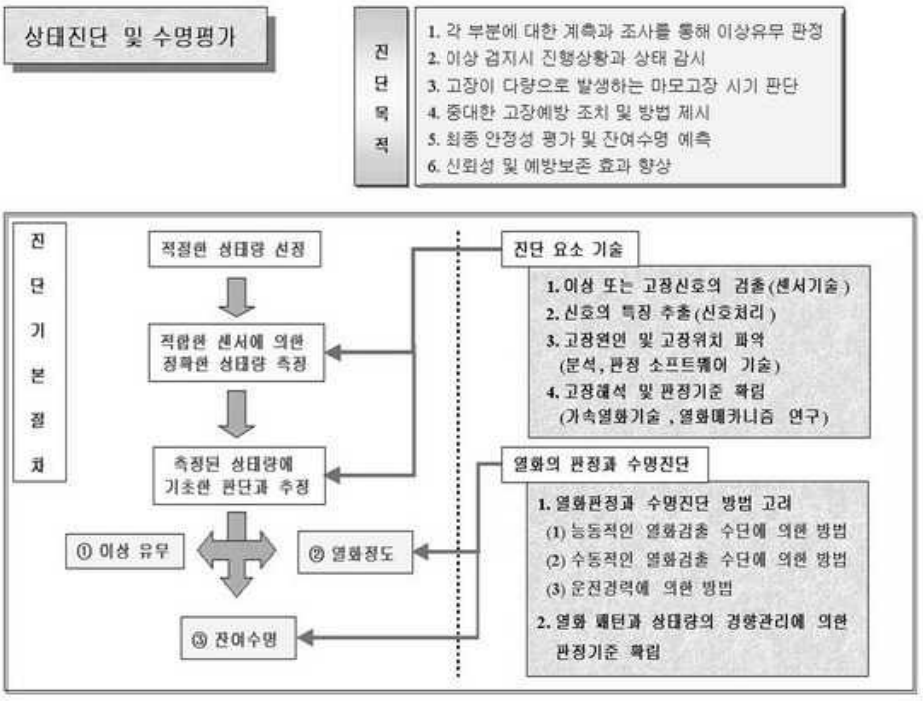



그림 2.2.8 상태진단 및 수명 평가 기술 정리

좀 더 효과적인 파라미터의 선정을 위하여 산업 설비에 적용하여 시 운전 중인 온라인 모니터링 시스템의 파라미터에 대한 연구를 심도 있게 진행을 하였다. 연구를 진행하면서 파악한 내용은 온라인 모니터링의 데이터 취득의 안정성 평가를 위한 분석으로 AC Gross scan, Spectrum 및 Time waveform 과 Waterfall Spectrum을 비교하였다. 비교 분석의 결과 데이터 취득의 안정성이 유지되고 있으며, 이때에 Spectrum의 변화가 없어 데이터 취득에 높은 신뢰성이 있는 것으로 확인되었다. 이때 산업 온라인 모니터링에서는 베어링의 감시 주파수 기법을 Demodulation-enveloping 기법을 통하여 감시하고 있었지만 이 기법은 기어나 베어링 설비에 대한 초기 결함 분석이 어려워 초기의 이상을 감기를 가능케 하는 Peakvue 기법을 채택하는 것으로 확정하였다.

감속기와 대차에서 발생하는 다양한 신호에 대한 분석 파라미터를 특성에 맞게 알람 설정 기능이 제공될 수 있는 설비와 비교를 하는 것이 매우 중요 하였다. 일단 산업설비 현장을 방문하여 오프라인 측정기와 온라인 측정기로 동시에 파라미터의 정확한 비교하기 위해서온라인 모니터링과 오프라인으로 취득하는 데이터의 비교가 실시하였는데, On-line 진단 시스템을 운영하여 현장 진동 데이터를 취득하고 분석한 결과를 Off-line 정밀 진동 분석기와 비교 평가한 결과 동일한 특성을 보이고 있으며 데이터 취득에 있어서는 더 우수한 성능을 보이고 있다. Pulverizer #A에서 측정한 결과 진동량의 크기와 주파수 특성과 중요 주파수 성분들이 동일하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. Axial 방향의 진동 특성도 주파수 성분과 Sideband 성분 등이 동일한 형태를 취하고 있어 정밀 진동 분석기와 같은 성능으로 정밀한 진동 분석이 가능한 것으로 판단되었다. 그림 2.2.9는 온라인에서 측정한 데이터와 오프라인으로 측정한 데이터를 비교한 것이다.

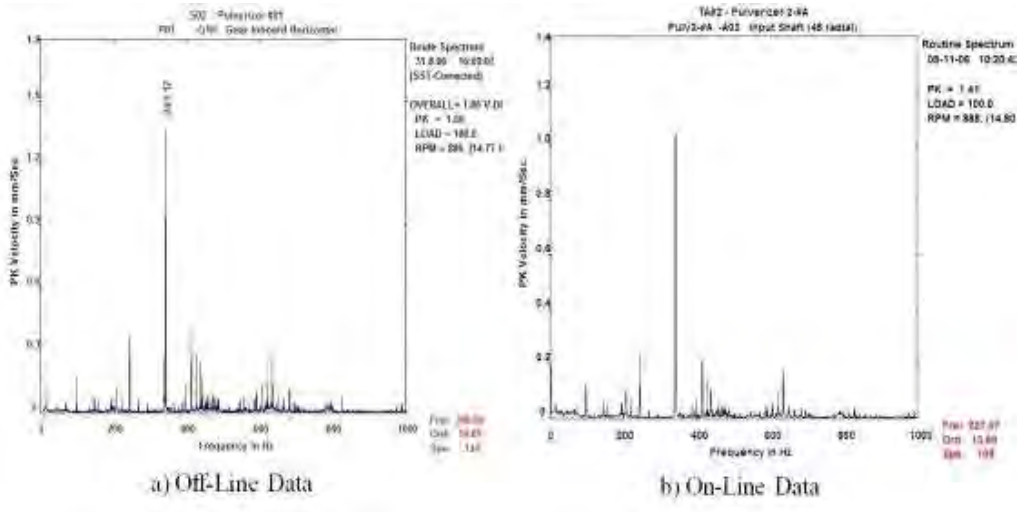



그림 2.2.9 Off-line 데이터와 On-line 데이터의 비교

측정한 결과 내용으로 온라인 시스템의 데이터 취득 안정성 검토를 하였는데 데이터 취득의 안정성 평가를 위한 분석으로 AC Gross scan, Spectrum 및 Time waveform 과 Waterfall Spectrum을 비교하였다. 비교 분석의 결과 데이터 취득의 안정성이 유지되고 있으며, 이때 Spectrum의 변화가 없어 데이터 취득에 높은 신뢰성이 있는 것으로 판단되었다. 그림 2.2.10은 측정한 결과 그래프 값이다.

데이터 취득에 대한 정밀성을 검토하기 위하여 센서를 분리하고 데이터 취득을 진행하였다. 분리된 진동 센서는 Gearbox의 특성 진동을 감지하지 못하므로 AC Gross scan 값은 Zero로 나타나고, Spectrum 및 Time waveform 값도 거의 Zero에 가까운 진동 값을 보이고 있다. Waterfall Spectrum 역시 저주파의 매우 낮은 진동을 보이고 있으며 미분기 Gearbox의 특성 주파수는 전혀 나타나지 않는 결과를 확인할 수 있었다. 다음 그림 2.2.11은 분리된 센서에서 온라인 모니터링을 활용하여 취득한 결과 그래프이다.

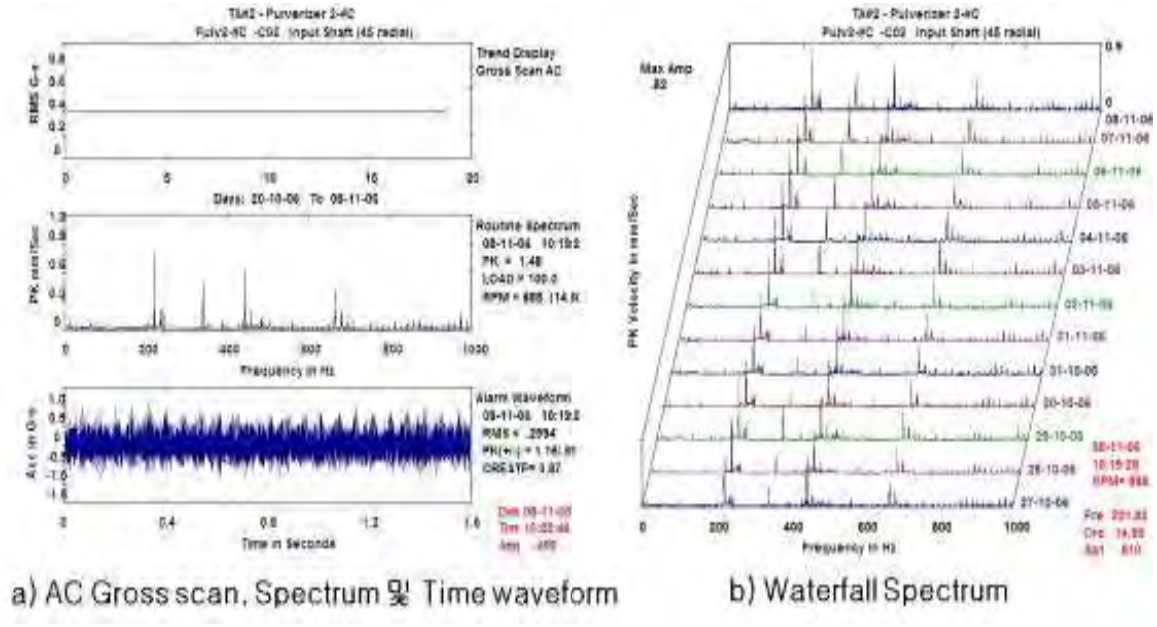



그림 2.2.10 온라인 데이터 취득 그래프

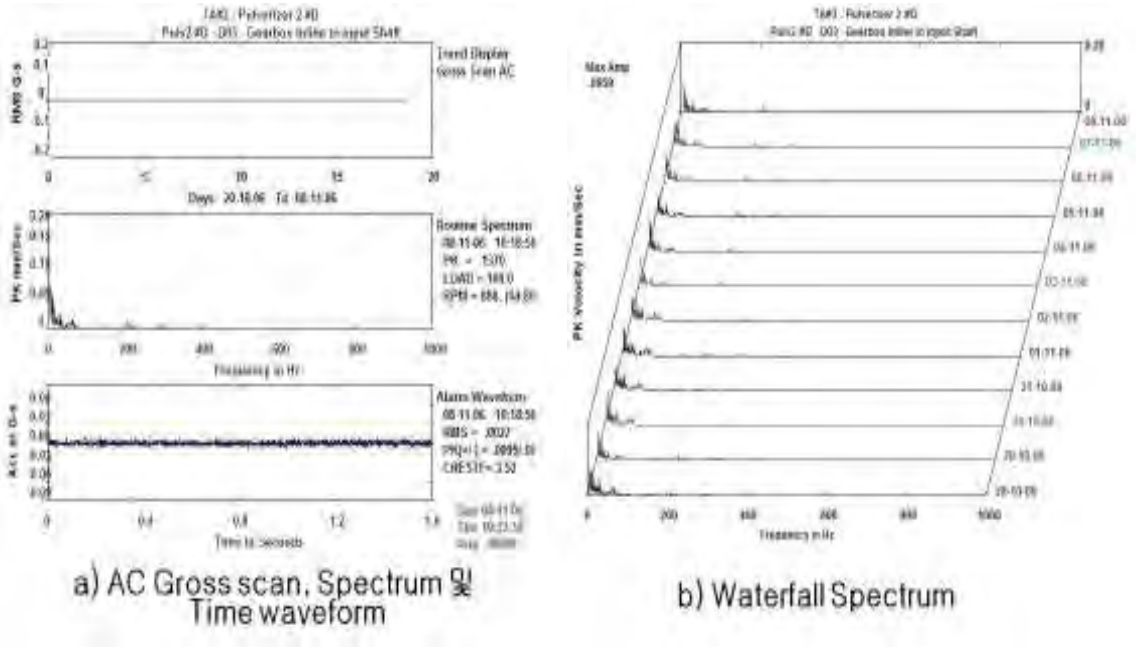



그림 2.2.11 분리된 센서에서 취득한 진동 파형

센서를 분리하였을 때 데이터 취득에 대한 영향은 파악하였지만 설비가 가동이 멈추었을 때에 대한 검토도 필요하였다. 그래서 설비의 가동을 정지를 시키고 데이터 취득 시험을 진행하였는데 시험 결과는 외부의 영향이 없을 때 AC Gross scan 값은 zero를 나타내고 있다가 외부의 영향을 받으면 순간적으로 상승하고 있다. Spectrum 및 Time waveform 값도 외부의 영향이 없을 때 거의 Zero에 가깝다가 외부 미분기의 영향을 받게 되면 설비의 진동 성분이 미세하게 나타나고 있음을 다음 그림 2.2.12에서 확인할 수 있다.

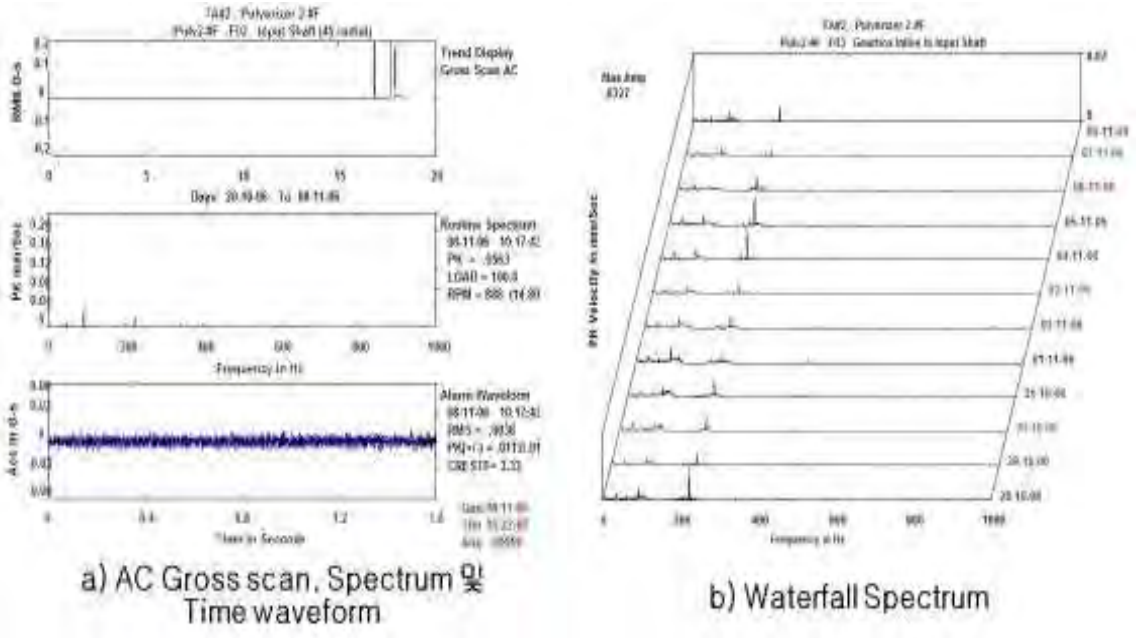



그림 2.2.12 설비를 가동 정지한 후 진동 측정 데이터

최종적으로 파라미터의 진동 특성에 대한 선정을 위하여 최종적으로 산업 설비의 감속기 진동 측정 시험을 진행하였다. 선정한 산업 설비의 감속기는 본 연구기관이 당진화력에 설치하여 기 운영 중인 미분기에 대해 실시간으로 데이터를 취득하고 이를 분석 진단하여 설비의 상태를 평가하고 수명을 예측할 수 있는 On-line 시스템과 비교하기로 하였다. 그림 2.2.13은 당진화력에 설치하여 본 기관이 운영 중인 미분기 감속기 온라인 모니터링 시스템의 개요도이다.

미분기의 기어박스 감속기의 진동 시험에 대한 결과는 진동이 높게 발생하고 있는 곳은 Input shaft radial 방향으로 전체 진동 값이 2.98mm/sec 이며, 이 중 1st Stage의 GMF 성분인 221.8Hz가 2.39mm/sec로 전체 진동의 80%를 차지하며 미분기 중 가장 높은 진동 값을 보이고 있다. 모든 측정 위치에서 Input shaft의 회전 성분이 넓게 분포되고 있고, Gearbox axial 방향과 horizontal 방향에서 Time waveform을 분석한 결과 Input shaft의 회전 성분이 충격파 형태로 나타나고 어, 축 정렬 불량이 Bevel Gear의 결합에 영향을 미치고 있는 결과를 얻을 수 있었다.

축 정렬 불량의 영향을 확인하기 위해 PeakVue 분석을 하였다. 모든 측정 위치에서 Input shaft의 회전 성분이 타 설비보다 상대적으로 높게 발생하고 있으며 특히, E05(Gearbox horizontal 방향)에서는 가장 높은 값을 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 다음 그림 2.2.14는 당시 측정된 대표적인 진동 주파수 분석 그래프이다.

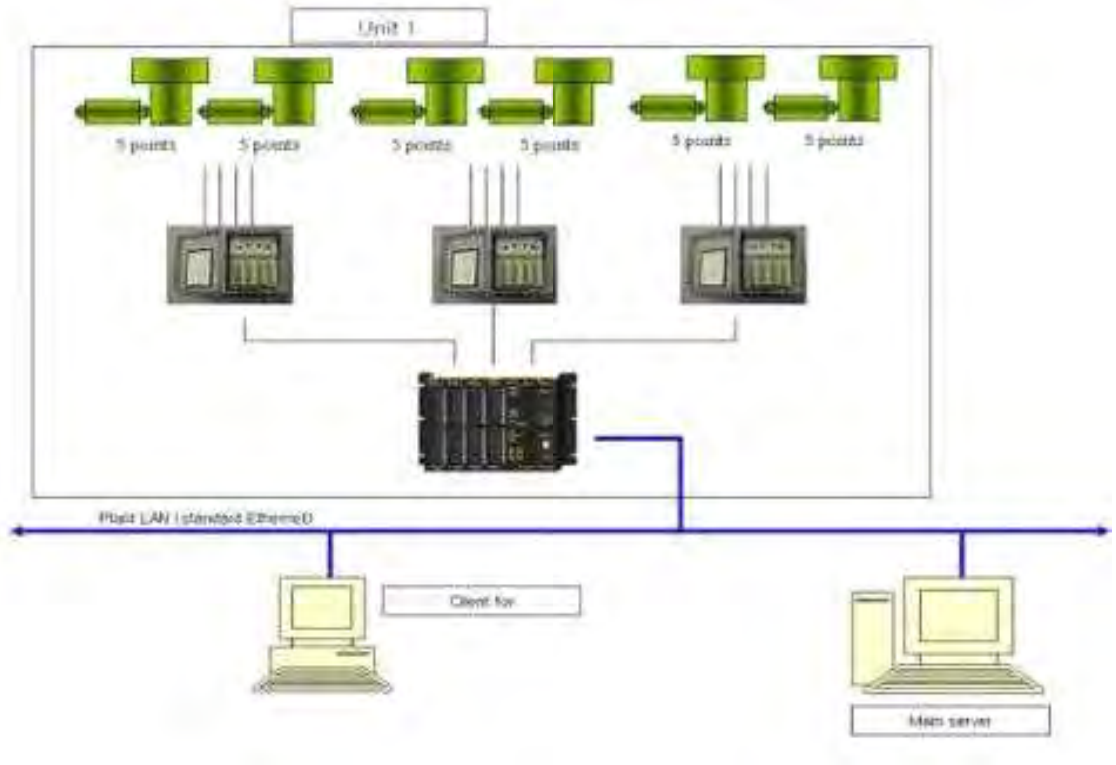
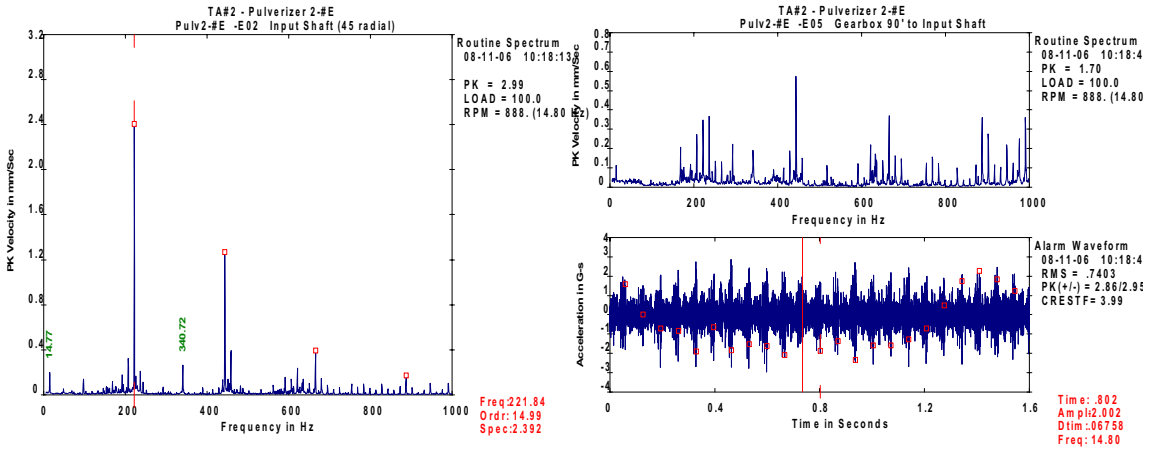
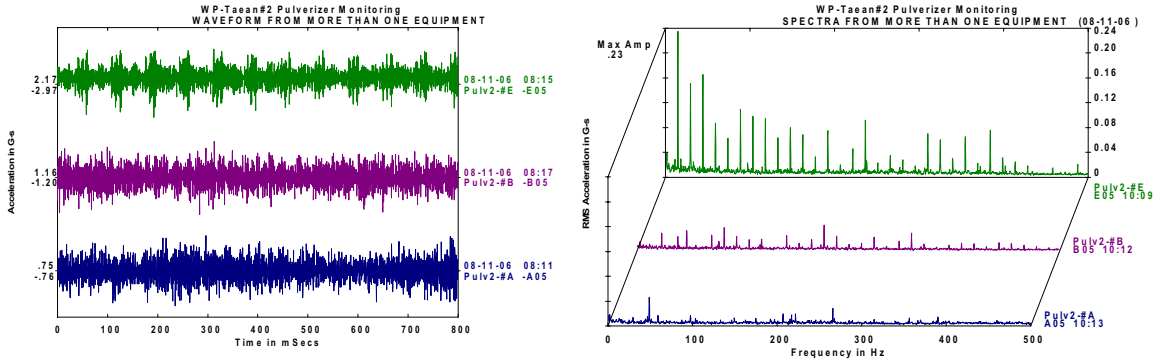



그림 2.2.13 Pulverizer Gearbox Online Monitoring System




<Pulverizer #E의 Gearbox에서 진동 주파수>

a) Input Shaft Horizontal 방향 b) Gearbox Vertical 방향




<Pulverizer #A, #B 및 #E의 진동 주파수 비교>

a) Gearbox Horizontal에서 Time Waveform 비교 b) 동일 위치에서 PeakVue 분석 비교

그림 2.2.14 미분기 기어박스 진동 측정 데이터 분석 그래프

시험 결과를 정리하면 산업용 설비의 기어박스 감속기 진동파형은 이론에서 정리한 내용대로 기어 결함 주파수와 베어링 결함 주파수가 대부분의 진동 성분으로 측정되는 결과를 확인할 수 있었으며 간 혹 설비의 운전으로 인한 축에서 발생이 되는 진동 파형들이 모니터링 시스템에서 발견이 되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 시험 결과를 바탕으로 고속열차용 감속기와 대차의 모니터링 시스템에 적용을 하는 진동 진단 파라미터를 최종적으로 확정할 수 있었다. 그러나 산업용 감속기에서 발생되는 이상 진단 파라미터에 대한 좀 더 명확한 진단 기법을 위하여 Kurtosis 파라미터를 추가하여 베어링과 기어에서 발생하는 충격진동의 파형의 첨도를 확인할 수 있도록 하여 파라미터의 신뢰성을 좀 더 높여 감시 파라미터를 선정 작업을 확정할 수 있었다.

이렇게 정리를 한 최종 감시 및 진동 진단 알고리즘의 감시 파라미터는 다음 표 2.2.3과 같이 최종적으로 정리하였다.

표 2.2.3 감시 및 진단 알고리즘이 포함된 감시 파라미터

| Parameters | 설 명 |
|---|---|
| Peak / RMS<br>Crest factor | • 파형의 첨예한 정도를 나타내며 값이 클수록 열차의 진동 충격이 심하다는 것을 의미 |
| GMF | • 기어의 이빨이 맞물리는 부분 상태를 의미하는 것으로 기어의 편심, 치형 마모, 과도 백래쉬의 상태를 진단하기 위하여 선정 |
| GMF 2X, 3X | • 기어의 Misalignment 등을 진단하기 위하여 선정 |
| BPFI 7X | • 베어링 내륜 주파수 7배 성분<br>• 베어링의 외륜, 내륜에 손상이 가면 베어링 주파수의 특성은 고주파에서 주파수가 감지가 되어 점차 저주파수로 옮겨가면서 주파수가 나타남. 초기 베어링 결함을 감지하기 위하여 선정 |
| BPFO 7X | • 베어링 외륜 주파수 7배 성분 |
| 1X Shaft | • 고속열차 감속기 축에서 Unbalnce, Angle Misalignment, 치의 절손 등이 발생하게 되면 1x의 주파수가 발생. 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 2X Shaft | • 감속기 축에서 Offset Misalignment가 발생하면 shaft 2~3X의 주파수가 발생. 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 7X Shaft | • 감속기 축에서 Looseness가 발생하면 shaft 3~8X의 주파수가 발생. Looseness가 발생하는 이유는 기계적 조립상태에 문제가 있는 것으로 조기 이러한 결함을 검출하여 조치를 취하기 위하여 선정 |
| Kurtosis | • 베어링과 기어에서 발생하는 충격진동의 파형의 첨도(尖度)를 나타내는 것으로 파라미터 선정 |

## 2. 모니터링 시스템 하드웨어 설계 및 분석

### 가. 감속기 모니터링 시스템 통신방식 연구

모니터링 시스템을 개발하면서 통신 방식을 선정이 필요하였다. 무선 통신을 적용하게 되면 센서의 배선이 간결해지므로 무선 통신 방식 적용을 최우선으로 검토하였다. 통신 방식에 대한 검증을 위하여 실차 시험을 통하여 데이터 취득 경향을 검토하였다. 그림 2.2.15와 2.2.16은 센서와 계측기 간 거리에 따른 데이터 취득 결과에 대한 결과이다.

그림 2.2.16은 동력차 대차에 무선모듈을 10m 거리에 설치하고 KTX 내부에서 Data를 받아본 결과이다. 가장 최적 조건의 Data수집 속도에도 불구하고 약 5초에서 최대 15초 간격으로 Data가 수집되는 현상이 나타났다. 센서와 계측기간의 거리가 멀고 KTX 구성 및 가동조건상 무선통신 전파방식에 방해 되는 요소가 있어 불규칙적으로 Data가 수집되어 진동 주파수 데이터의 신뢰성이 떨어지는 결과를 얻을 수 있었다.



그림 2.2.15 거리 10m 무선 모듈 데이터 취득 상태



그림 2.2.16 거리 5m 무선 모듈 데이터 취득 상태

거리 조건에 따른 Data 수집 상태를 확인하기 위해서 그림 2.2.6과 같이 대차-실내보다 가까운 실내-실내거리에서 Data를 수집해 보았다. 그 결과 Data 수집 간격은 약 3~4 초정도로 확인되었고, 거리가 가까워짐에 따라 Data 수집시간이 축소되는 결과는 얻었지만 3~4초 간격의 Data 수집 속도로도 감속기모니터링 시스템을 구성하기에는 매우 부족한 면이 있었다. 취득한 데이터 또한 신뢰성이 떨어져 적용이 불가능하다고 결론을 지었다. 검토 결과 무선통신 방식이 시스템 구성이 쉽고 간단하지만, 감속기 모니터링 시스템을  구축하기에는 Data 수집 속도가 너무 느리고 전기적인 노이즈 신호가 상당하여 수시로 진동량이 변하는 고속철도에는 적합하지 않다고 결론을 내렸다. 무선 방식이 케이블 작업이 간편하여 적용을 고려하였지만, 데이터 취득이 어렵고 데이터의 신뢰성이 떨어지는 이유로 적용이 어려워 유선 방식을 채택하였다. 유선 방식은 센서 설치 작업과 케이블 배선 작업이 번거롭지만 데이터 취득이 용이하고 데이터를 1초 간격으로 저장이 가능하여 데이터의 신뢰성이 확보되는 장점이 있었다.

위의 시험을 통한 결과는 무선 방식이 케이블 작업이 간편하여 적용을 고려하였지만 데이터 취득이 어렵고 데이터의 신뢰성이 떨어지는 이유로 적용이 어려워 유선 방식을 채택하였다.  유선 방식은 센서 설치 작업과 케이블 배선 작업이 번거롭지만, 데이터 취득이 용이하고 데이터를 1초 간격으로 저장이 가능하여 데이터의 신뢰성이 확보 되는 장점이 있었다.

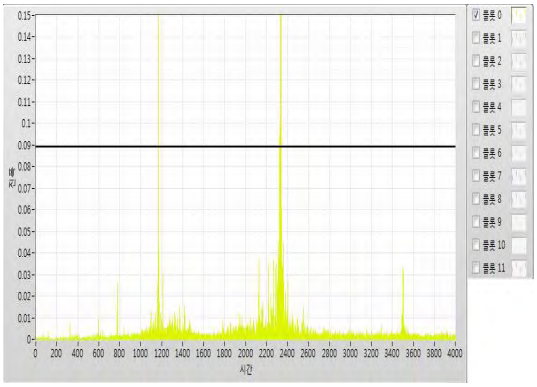
나. 필요 하드웨어 모듈 선정 및 모듈 시험 연구 진행

본 연구과제에서 우선적으로 선정한 하드웨어로 PC와 동일한 환경에서 직접적으로 센서를 연결하여 데이터 취득이 가능한 하드웨어 모듈이 반드시 구성이 되어야 모니터링 시스템을 이상 없이 구축할 수 있었다. 이러한 방식의 하드웨어는 직관적인 시스템을 구현할 수 있었기 때문에 사용자 관측에서도 다루기가 쉽기 때문에 반드시 충족이 되어야 하는 조건이었다. 2장 1절에서 언급한 내용대로 여러 가지 비교를 하고 검토를 하여 이번 연구개발에서는 하드웨어 모듈은 NI cRIO를 최종적으로 선정을 하였는데 본 하드웨어는 처리속도가 매우 빠르고 정확하여 고속철도의 진동의 특성을 빠르게 확인하고 검증을 할 수 있는 장점이 있어 최종적으로 본 하드웨어를 선정하여 적용을 하였다. 다음 그림 2.2.17은 NI 하드웨어 모듈이다.

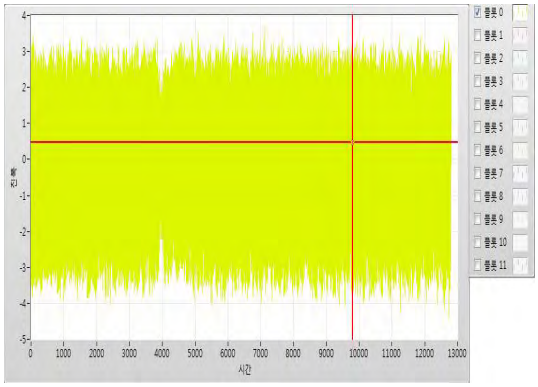



그림 2.2.17 모니터링 하드웨어 (NI)

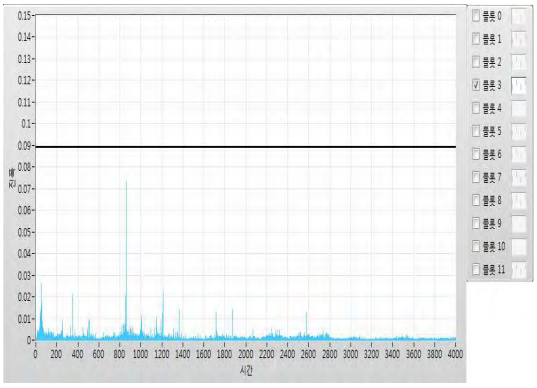
NI 모듈로 선정을 하였지만 반드시 하드웨어 모듈에 대한 검증이 필수 적 이였다. 따라서 NI 하드웨어 모듈로 간이 측정 시스템을 구성을 하여 각 포인트 별 데이터 취득 상태를 검토하기로 하였다. 물론 개발이 진행단계였기 때문에 여러 가지 기능 및 분석 기능은 구현을 할 수는 없었지만 간이로 제작한 소프트웨어를 통하여 NI Module에서 Data 취득 상태를 확인을 한 결과 신호불량인 Sensor를 제외하고는 Raw data 수집이 원활하게 이루어 졌고, Data 저장 및 Data 취득속도 모두 양호한 결과를 보여주는 것을 확인을 할 수 있었다. 다음 그림 2.2.18은 NI 모듈을 적용하여 간이 측정 소프트웨어를 직접 제작을 하여 KTX 실차 운행 중에 데이터를 취득한 결과이다.



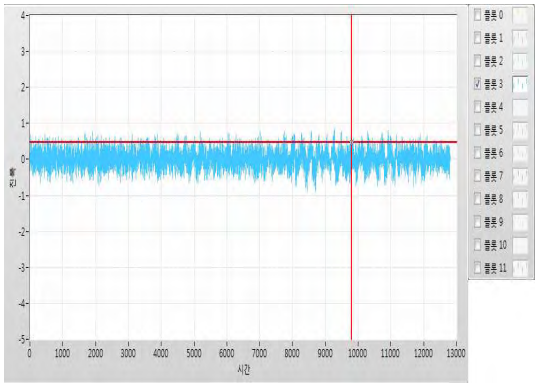
<동력차 1차감속기 Y Spectrum>



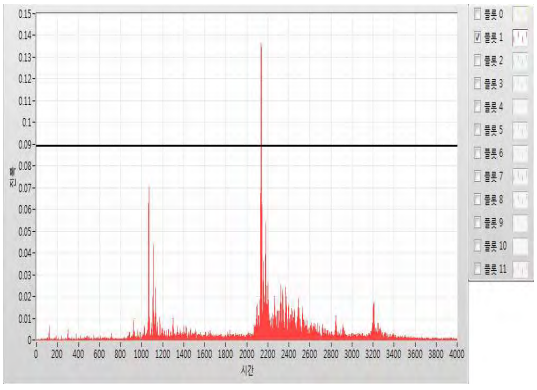
<동력차 1차감속기 Y Timewaveform>



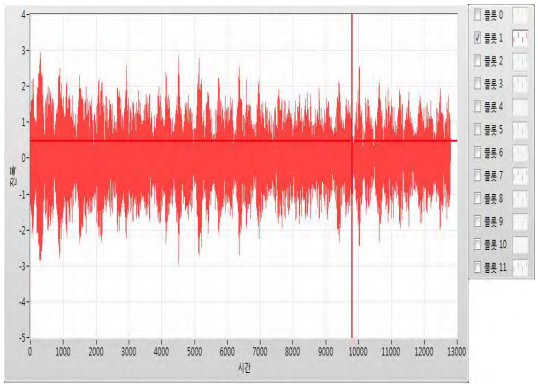
<동력차 1차 감속기 Z Spectrum>



<동력차 1차 감속기 Z Timewaveform>



<동력객차 1차 감속기 Y Spectrum>

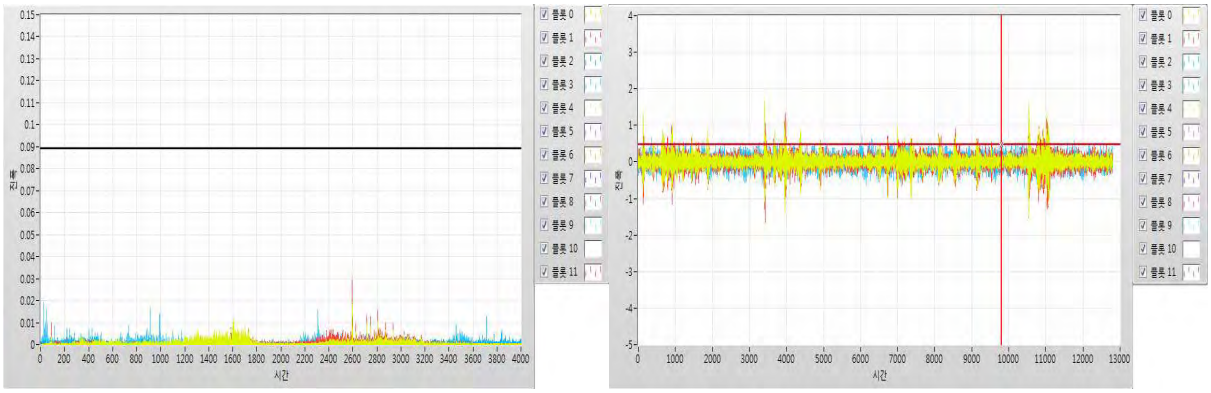


<동력객차 1차 감속기 Y Timewaveform>

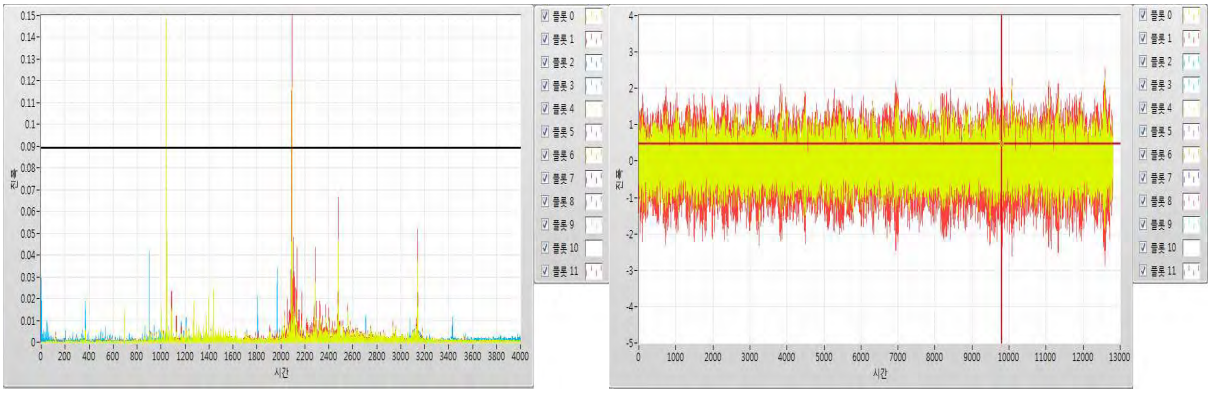
그림 2.2.18 선정 Module KTX 장착 시험 결과

NI 모듈이 운행을 하면서 데이터를 취득을 하는 결과는 확인을 할 수 있었지만 저속구간과 고속구간 즉 속도 변화에 따른 데이터의 취득 상태에 대한 내용도 반드시 검증을 할 필요가 있었다. 따라서 주행 중인 KTX 열차에서 각 구간마다 속도 변화에 따른 데이터 취득 상태를 직접 구현을 하여 확인을 하였는데, KTX 열차는 속도변화에 따른 회전주파수 성분이 실시간으로 잘 저장되어 분석 Data로 나타나고 있고, 이는 가용할 수 있는 다채널 진동 Data 취득 시에 system상 큰 부하가 걸리지 않는다는 것을 최종적으로 확인을 하였다. 그림 2.2.19는 저속구간과 고속구간에 대한 전체 데이터 취득 상태에 대한 그래프이다.

NI 하드웨어 모듈의 퍼포먼스에 대한 내용을 확인을 하면서 본 연구기관은 풍력 산업용 감속기 모니터링 시스템을 KTX 열차에 적용을 하여 NI 모듈과 비교 시험을 진행을 하였다. 동시에 측정을 한 이유는 풍력 모니터링 시스템 또한 다른 버전의 NI 하드웨어 모듈을 탑재를 하고 있었고 풍력 설비 기어박스 감속기 소프트웨어가 구축이 되어있었기 때문에 좋은 비교 자료가 될 것이라는 판단에서 진행을 하게 되었다. 정밀한 시험 분석 내용은 제 2장 3절에서 언급을 하겠지만 적용 하였던 결과를 간략하게 요약을 하면 풍력 발전 모니터링 시스템은 실차 측정 시 Data 수집 관련 사항으로는 저속구간에서는 Data 수집이 원활히 이루어졌지만, 과부하를 받는 고속구간에서 시스템이 shutdown되는 현상이 발생하였다. 풍력발전소에서 고정 되어 모니터링을 하는 목적으로 만들어진 module이기 때문에 달리는 KTX열차의 조건과는 잘 맞지 않는 Module이라 최종적으로 결론을 내일 수 있었다. 그림 2.2.20은 SM 인스트루먼트사의 풍력 발전용 감속기 모니터링 시스템이다.



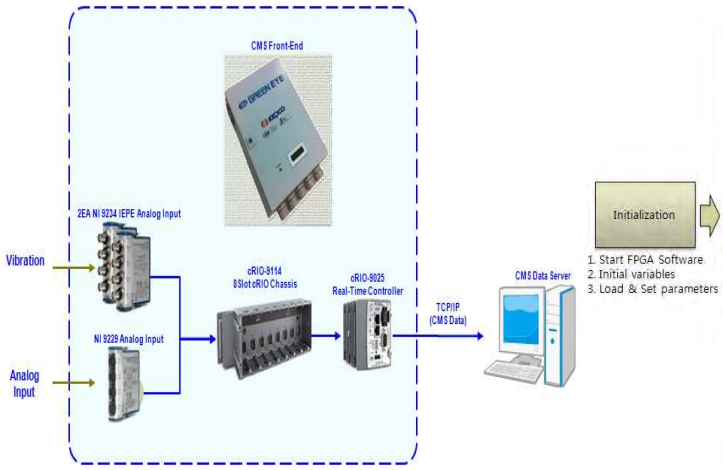
<전체 Point 저속구간 Spectrum data> <전체 Point 저속구간 Timewaveform data>



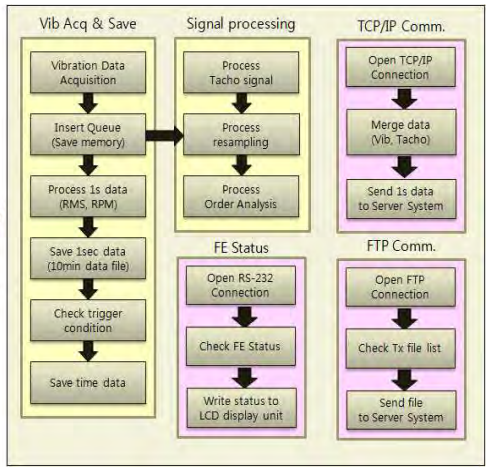
<전체 Point 고속구간 spectrum data> <전체 Point 고속구간 Timewaveform data>

그림 2.2.19 선정 Module KTX 장착 시험 결과

NI 하드웨어 모듈을 KTX 열차에 적용을 하여 검토를 한 결과 KTX 속도변화에 따른 회전주파수 성분이 실시간으로 잘 저장되어 분석 Data로 나타나고 있고, 이는 가용할 수 있는 다채널 진동 Data 취득 시에도 system상 큰 부하가 걸리지 않는다는 것을 입증할 수 있었기 때문에 이번 시스템 구성에 적합한 하드웨어로 최종적으로 결론을 내릴 수 있었다.




<Hardware 구성>




<Software 구성>

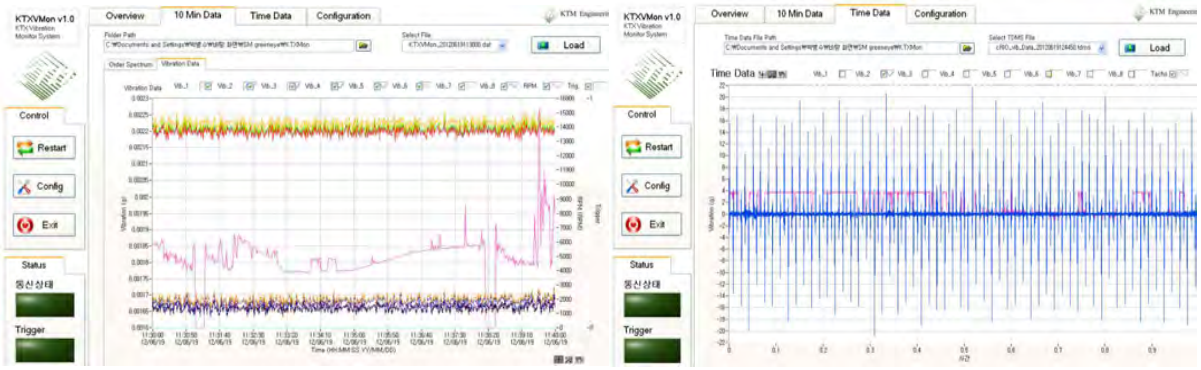



그림 2.2.20 풍력발전용 모니터링 시스템

다. 하드웨어 설계

(1) 하드웨어 설계

하드웨어의 모듈 선정을 확정을 한 후 하드웨어 시스템에 대한 설계 작업을 진행을 하였다. 하드웨어 시스템의 설계는 최종적으로 고속철도 차량의 감속기에서 발생되는 진동 신호에 맞게 실시간으로 모니터링을 하면서 감시를 하고 이상이 발생을 하면 즉시 운전기사에게 통보가 되는 통합 시스템으로 구현을 하여야 했다. 물론 고속철도 운행에 있어 다른 기존 시스템에 비해서도 안정성이 확보가 될 수 있는 시스템의 개발을 목표로 설계를 진행 하였다.

(가) 시스템 주요 기능 정리

하드웨어 시스템을 설계에 들어가기 전에 하드웨어 시스템에서 수행을 하여야 하는 주요 기능에 대하여 다음과 같이 정리를 하였다. 정리된 내용은 다음과 같다.

- 12.8ks/s의 샘플링 데이터  FFT 데이터, RMS 데이터 전송 (최대 400 km/h) 적용 가능
- 10분주기 데이터 파일 저장
- Real Time 데이터 전송
- 감속기, 대차 진동 측정
- 이더넷을 이용한 server – client 구조( 2 Server Storages, 1 Server, 6 Clients)
- Client : 진동 7ch, 온도 16ch, 윤활4ch 속도 1ch Total 28ch
- 진동 센서 감속기 : 10mV/g (Measurement range 500g shock limits 5,000 g) x 8ch
- 진동 센서 대차 : 100mV/g (Measurement range 50g shock limits 500 g) x 1ch

주요한 기능을 정리를 한 후 시스템에 대한 큰 파트에 대한 구성안을 최종적으로 확정을 할 필요가 있었다. 일단 시스템은 센서 – 클라이언트 – 서버 순으로 순차적으로 데이터를 주고받는 통신을 하므로 각 파트에 대한 구성을 명확하게 하여 설계를 진행하여야 하였다.

(나) 시스템 Lay-Out 설계

본 시스템은 대차 1대당 총 진동 8ch, 윤활 4ch, 온도 16ch 속도 1ch 총 29ch로 Client 6개 총 174 ch로 구성된다. 고속열차는 속도가 수시로 변동을 하여 진동의 패  턴이 일정하지 않고 감속기는 여러 기계요소가 복합적으로 구성이 되어 다양한 진동 파라미터 즉 데이터가 발생하게 된다. 따라서 서버에서 데이터 수집, 연산을 모두 수행할 경우 연산처리의 과부하가 발생하므로 Client에서 기초연산 수집 후 결과를 전송하는 방법을 선정하였다. Client는 객실내 공간이 협소하고 케이블 설치시 선로 공사 및 배선 경로가 매우 복잡하여 하부에 설치하는 방법을 채택하였다. 다음 그림 2.2.21은 시스템의 레이아웃 구성도 이다.

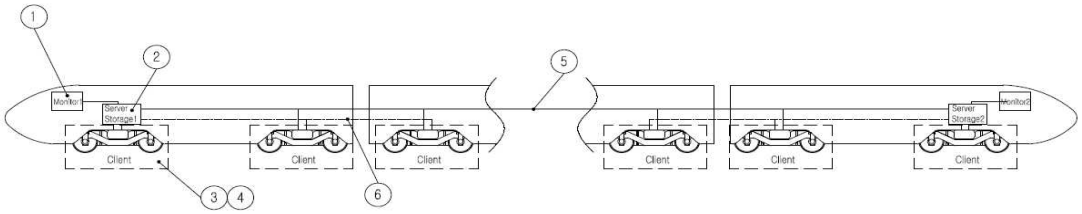



그림 2.2.21 시스템 레이아웃 도면

기본적인 시스템 레이아웃은 1차년도 기본 설계안과 동일한 내용으로 확정하였다. 2차년도 연구를 진행하면서 클라이언트를 열차 내부에 설치하는 방법도 고려를 하였지만 센서 케이블 배선이 길어지는 문제에 대한 근본적인 해결 방법을 찾을 수 없어 결국 1차 년도 기본 설계안과 동일한 내용으로 최종적으로 레이아웃을 확정 하였다. 연구를 진행을 하면서 2차 감속기 기어박스의 헬리컬 기어가 큰 의미가 없는 결함 주파수를 발산하는 것을 발견을 하여  진동 채널수를 1개 줄어들고 NI 하드웨어 모듈이 일부 변경됨에 따라 시스템 전기도면을 그림 2.2.21과 같이 일부 수정을 하여 도면 내용을 최종 확정하였다. 또한 클라이언트 설계는 최대한 콤팩트하게 설계를 하여 다음 그림 2.2.22와 같이 설계를 완료 하였다.

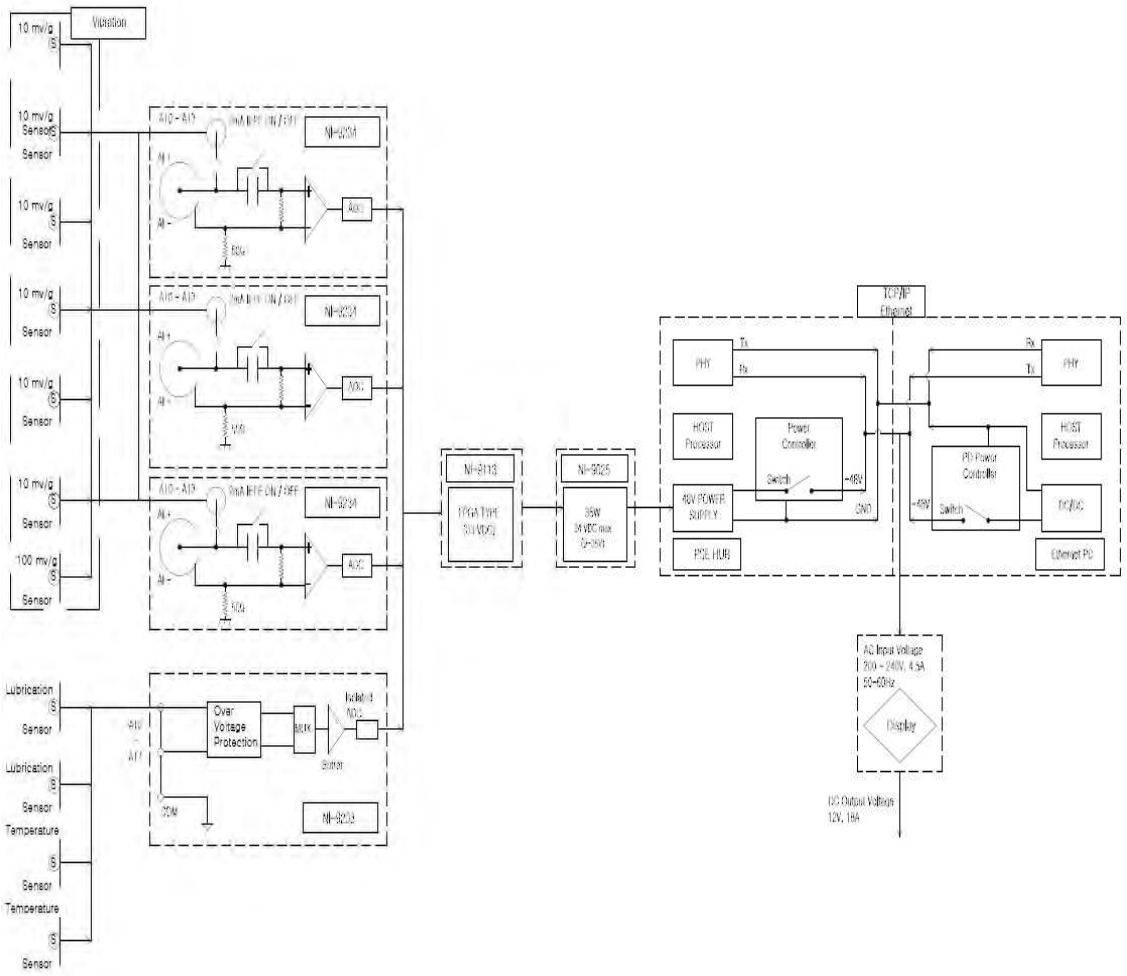



그림 2.2.22 시스템 전기도면 내용 (NI 모듈 및 채널수 조정)

(다) Client 시스템 설계

기본적으로 고속열차용 감속기 모니터링 시스템의 Client를 설계할 때 기본적으로 세운 방향은 Client를 열차 하부에 설치하는 것으로 결정을 하였다 하부에 설치하기로 한 이유는 객실내 공간이 협소하였으며 운영처의 승인이 없어 내부에 설치를 하는 것이 불가능 하였다. 또한 객실 내부에 설치를 한다고 하여도 엄청난 케이블의 포설작업이 필수적인데 선로 작업이 복잡하고 까다로운 공정을 요구하는 작업이었다. 물론 하부에 설치를 하면서 별도의 센서 Junction Box를 고려할 필요가 없는 장점도 있었다.

Client는 NI 하드웨어 모듈이 적용이 되었기 때문에 별도의 회로 및 기구설계가 진행이 되지는 않았다. 그러나 열차의 하부에 설치가 되기 때문에 Client를 보호해줄 수 있는 보호함의 제작이 필수적 이였다. 열악한 환경에 노출이 되는 문제점을 보완하기 위하여 Client를 보호할 수 있는 보호함을 다음 그림 2.2.23 ~ 2.2.24와 같이 설계를 하였다.

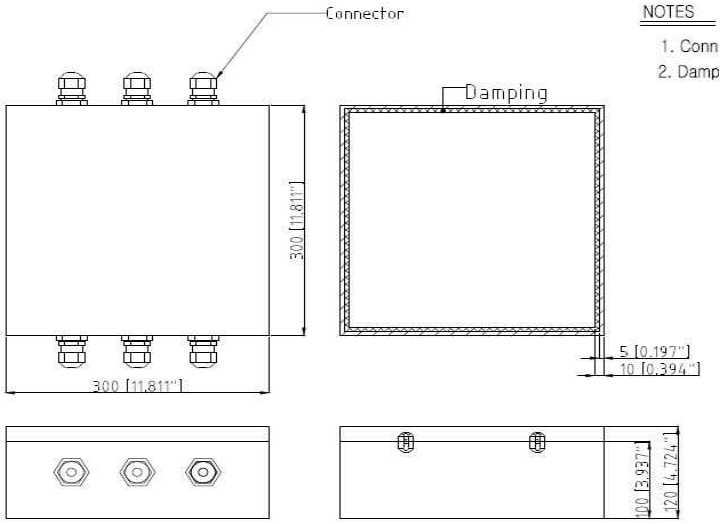



그림 2.2.23 Client 설계 내용

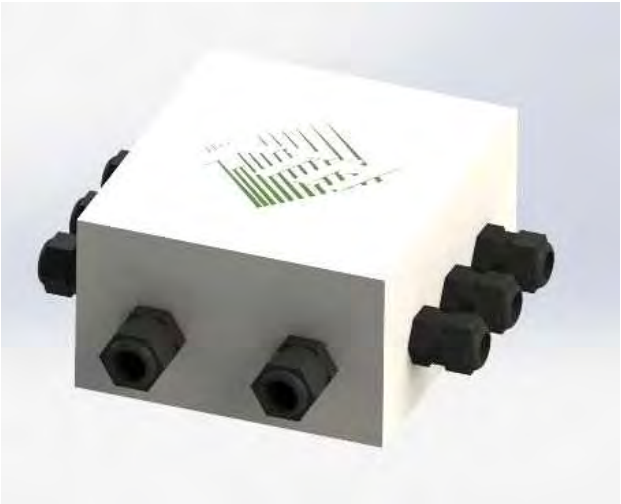


그림 2.2.24 클라이언트 모델링 설계 내용

1차 시제품 제작을 완료 후 검토 결과 기본 설계 사이즈 300 x 300 x 120 mm 대비 가로 6cm, 높이 9cm 커지게 되어 시제품이 처음  계획과 상이하게 제작이 되었다. 시제품이 기본설계 내용과 다르게 크기가 증가하게 된 이유는 NI 하드웨어 모듈 적재함은  4slot, 8 slot 으로 기성품이 구성 되어 있다. 그러나 각 기관별 기본 설계 내용으로는 4 slot 적재함은 적용이 불가하고  8 slot을 적용 하여야 시스템을 구성 할 수 있었다. 이러한 이유로 인하여 1차 시제품의 사이즈가 증가 하게 되었으나 이 크기는 실제 감속기 장착이 어려워 다른 방향으로 시제품 수정이 고려되어야 했다. 이러한 이유로 인하여 Client 박스의 크기 조정이 필요 하다는 판단이 되어 다른 방안을 검토하였다. 설계 내용을 실제 제작을 하여 그림 2.2.25와 같이 구현을 하였지만 열차에 적용하기에는 너무 부피가 커 실제 열차에 장착을 하는데 많은 문제점이 있었다.

결국 보호함 축소를 위하여 클라이언트 보호함에는 NI하드웨어 모듈만 설치를 하고 나머지 기존에 있던 Surge Protect와 Power Supply는 실내에 별도의 공간에 설치를 하고 케이블로 연결을 하는 방안을 강구하였다. 하드웨어 모듈을 제외한 나머지 부속품을 제거하고 보호함 축소 제작을 재 진행을 하여 클라이언트 박스를 가로 115 mm, 세로 90mm, 높이 10mm를 축소할 수 있었다. 다음 그림 2.2.26은 크기를 대폭 줄인 2차 클라이언트 보호함의 사진이다.



그림 2.2.25 시제품 제작 사진



그림 2.2.26 2차 클라이언트 보호함

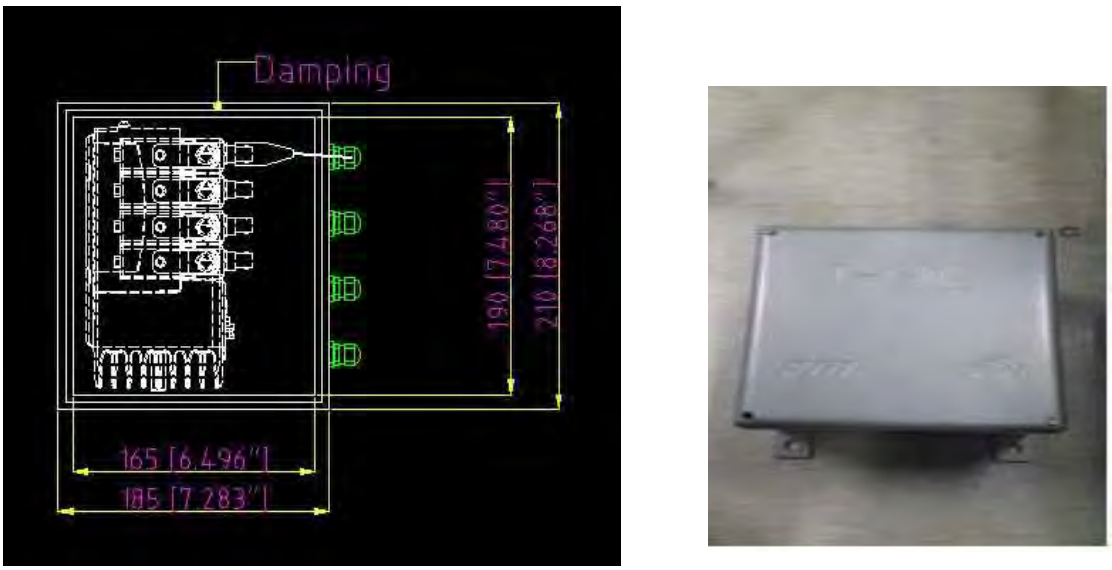



그림 2.2.27 최종 클라이언트 설계 및 제작 내용

2차로 제작한 보호함은 크기도 매우 작아지고 무게가 가벼워 일단 여러 가지로 이점이 있었다. 그러나 플라스틱으로 보호함 외형을 구성을 하니 내구성이 약하여 너무 작은 충격에도 함이 파괴가 되는 문제점이 발생을 하게 되었다. 다시 보호함 설계를 진행을 하여 보호함의 재질은 가벼우면서도 충격성이 뛰어난 알루미늄을 선정을 하여 적용을 하여 클라이언트 보호함의 설계를 완료를 할 수 있었다. 다음 그림 2.2.27은 알루미늄 보호함의 최종 설계 내용이며 실제 제작 형상을 표현한 그림이다.

보호함의 설계를 최종확정을 한 후 Client의 사양을 명확하게 정할 필요가 있었다. 그래서 선정된 NI 하드웨어 모듈의 사양과 선정한 주요 기능 내용을 정리를 하여 다음 표 2.2.4와 같이 개발 Client의 사양을 최종적으로 확정하였다.

표 2.2.4 시제품 Clinet 사양

| 구 분 | 내 용 |
|---|---|
| (H/W) 채널 | 진동: 7 ch, 온도: 16ch, 윤활:4ch, 속도:1ch |
| 주요 용도 | 철도차량 전용, 변속기어박스 전용 |
| 데이터수집및전송 | • Real Time 데이터 전송<br>• 이더넷을 이용한 server – client 구조 |
| 측정 가능 주파수 | 12.8ks/s의 샘플링 데이터 FFT 데이터, RMS 데이터 전송(최대 400 km/h) 적용 가능 |
| 주요측정진동 | • FFT, RMS 측정 및 진단<br>• 6.4khz, 5,120line resolution search Demodulation<br>• 10분 주기 데이터파일 저장<br>• 파라미터 Relay 기능<br>• 대차 진동 측정<br>• 감속기 진동 측정 |
| 부가 기능 | • 실시간 데이터 감시 및 선택적 FFT 실시간 모니터링 |

구축 하드웨어 Client는 열차 1편성 당 총 6대를 설치할 수 있도록 설계 하였다. 주요 기능으로는 각각의 동력 대차와 감속기의 진동 상태를 감시하고 서버와의 통신을 이용하여 진동데이터를 즉시 전달을 해주는 기능을 담당하게 된다. 이때 데이터의 수집이 매우 중요한 요소로 작용을 하게 되는데 속도 데이터의 경우 각 감속기에서 1개의 데이터를 가져오며 진동 데이터는 4개의 감속기에서 7채널에서 데이터를 수집하여 저장을 한다. 온도데이터는 2개의 구동축에서 각각 7채널 앞 차량과 뒤 차량 각각 외부 온도 2개의 채널로 총 16개의 채널로 구성이 되었다. 데이터를 취득하는 과정은 카운터 입력용 모듈을 통하여 전달되어진 Pulse 신호를 이용하여 각각의 Gear의 회전수를 산출할 수 있도록 시스템을 구상하였다. 이러한 시스템의 통신방식은 이더넷을 활용하여 server-client 구조로 시스템을 구성하였으며 진동을 취득하는 센서는 감속기 부위에 10 mV/g (Measurement range 500g shock limits 5,000g) 사양의 센서로 7채널로 구성을 하였고 대차부는 100 mV/g (Measurement range 50g shock limits 500g)의 사양의 센서로 1채널로 시스템을 구성 하였다.

구축 하드웨어 Client는 열차 1편성 당 총 6대를 설치할 수 있도록 설계 하였다. 주요 기능으로는 각각의 동력대차와 감속기의 진동 상태를 감시하고 서버와의 통신을 이용하여 진동데이터를 즉시 전달을 해주는 기능을 담당하게 된다. 이때 데이터의 수집이 매우 중요한 요소로 작용을 하게 되는데 속도 데이터의 경우 각 감속기에서 1개의 데이터를 가져오며 진동 데이터는 4개의 감속기에서 7채널에서 데이터를 수집하여 저장을 한다. 온도데이터는 2개의 구동축에서 각각 7채널 앞 차량과 뒤 차량 각각 외부 온도 2개의 채널로 총 16개의 채널로 구성이 되었다. 데이터를 취득하는 과정은 카운터 입력용 모듈을 통하여 전달되어진 Pulse 신호를 이용하여 각각의 Gear의 회전수를 산출해낸다. 수집된 센서 데이터를 이용하여 대차와 감속기 해당 부위의 진동 파라미터를 분석하여 진동 정보를 열차 운용자에게 디스플레이 하는 구조로 시스템은 작동하게 된다. 이때 분석하는 진동 파라미터는 RMS, Overall, Peak-to-Peak, 1x은, GMF, Crest Factor, Kutosis, BPFI, BPFO 등이 있다.

(라) 서버 시스템 설계

서버의 구성은 다음과 같이 설계를 하였다. 1차 적으로 파워서플라이 파트에 대해서는 차량 전원으로 부터 공급되는 교류(220V) 전기를 온라인 모니터링 시스템에 맞는 직류(DC 24V) 전류로 전환하기 위하여 구성 하였다. 1개의 Client에 24V 1A의 전원이 공급되어 총 3A가 요구되나, 전원공급 안정성을 위해 24V 5A로 설정 하였다. 또한 다수의 클라이언트에서 데이터를 보내오기 때문에 HUB를 구성을 하였으며 수집되는 데이터의 연산처리를 위하여 PC를 설치하여 운전실에 디스플레이 기능까지 고안을 하여 설계 내용을 확정을 지었다. 또한 열차 운행 중 중간에 전원 공급이 일시적으로 차단이 되는 현장 상황으로 인하여 별도로 UPS를 장착을 하여 전원이 끊어지는 현상을 방지할 수 있도록 설계를 진행 하였다. 다음 그림 2.2.28 ~ 2.2.29는 초기에 설계를 한 서버의 설계 내용이며 다음 그림 2.2.30은 초기 제작된 서버의 제작 사진이다.

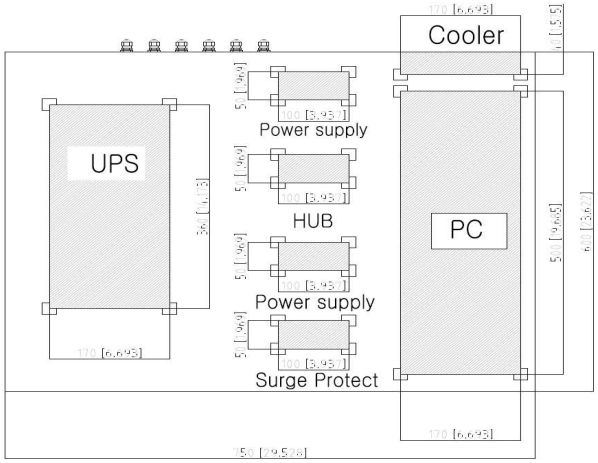



그림 2.2.28 서버 스토리지 레이아웃

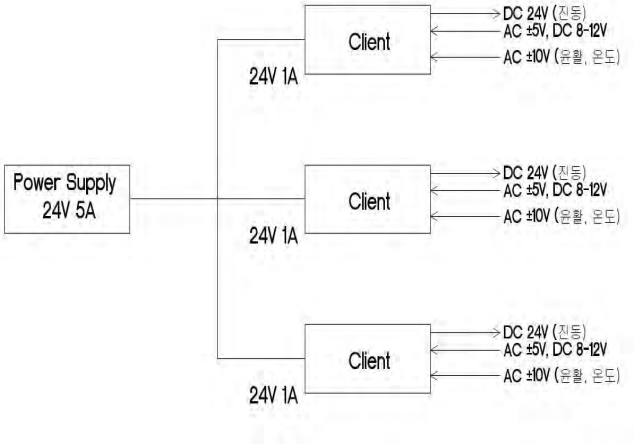



그림 2.29 파워-Client 흐름



그림 2.2.30 서버 스토리지 제작 사진

그러나 초기에 제작된 서버는 콤팩트하게 구성은 되었지만 연산처리 기능 및 내구성에 많은 문제가 발견이 되었다. 서버의 구성이 너무 콤팩트하게 되어 서버 자체에서 발생되는 열의 문제점으로 서버가 계속적으로 다운이 발생을 하고 여유 있게 설계를 구성을 하였다고 판단을 한 24V 5A에도 전류의 노이즈가 수시로 발생을 하는 문제점이 지속적으로 발견이 되었다. 결국 서버에 대하여 설계를 다시 실시를 하였으며 다음 그림 2.2.31과 같이 서버의 전기 Distribution 내용을 재설계를 하였고 서버에 대한 외형의 크기를 확대하는 방안으로 설계를 수정하였다. 서버가 가동이 되면 클라이언트와 TCP/IP 방식으로 서버를 활성화 시키면서 클라이언트와 접속이 진행될 때 까지 대기할 수 있도록 시스템을 최종적으로 설계를 진행을 하였다. 수정된 서버의 외형 도면은 다음 그림 2.2.32와 같다.

진동 모니터링 시스템의 서버 스토리지 구성은 열차 1편성에 총 2대를 설치할 예정이다. 서버 스토리지는 상행/하행 구간으로 분리가 되어 열차를 관리하게 된다. 유의 할 점은 1대의 서버 스토리지는 연산기능과 터미널 기능을 동시에 수행을 하게 되며 다른 1대의 서버 스토리지는 터미널 기능만을 수행하게 된다. 이유는 취득되는 데이터를 확인하는 운용자는 1곳으로 둘 다 연산기능을 수행할 필요는 없다 그러나 시스템의 과부하와 데이터 취득량에 대한 문제가 발생할 수 있기 때문에 2대로 운용을 할 수 있도록 설계를 하였다.

통신 방식은 TCP/IP 방식으로 클라이언트와 통신을 하게 되며 이더넷 방식으로 데이터를 수집하게 된다. 분석하는 진동 파라미터는 위에서도 언급 하였듯이 RMS, Overall, Peak-to-Peak, 1x, GMF, Crest Factor, Kutosis, BPFI, BPFO 등이 있다. 서버에는 별도로 GPS를 장착하여 열차의 운행 위치 정보를 전송할 수 있도록 시스템을 구성하였다. GPS 통신은 USB포트를 이용하여 RS-232 통신을 활용하는 방안으로 시스템을 설계 하였다.

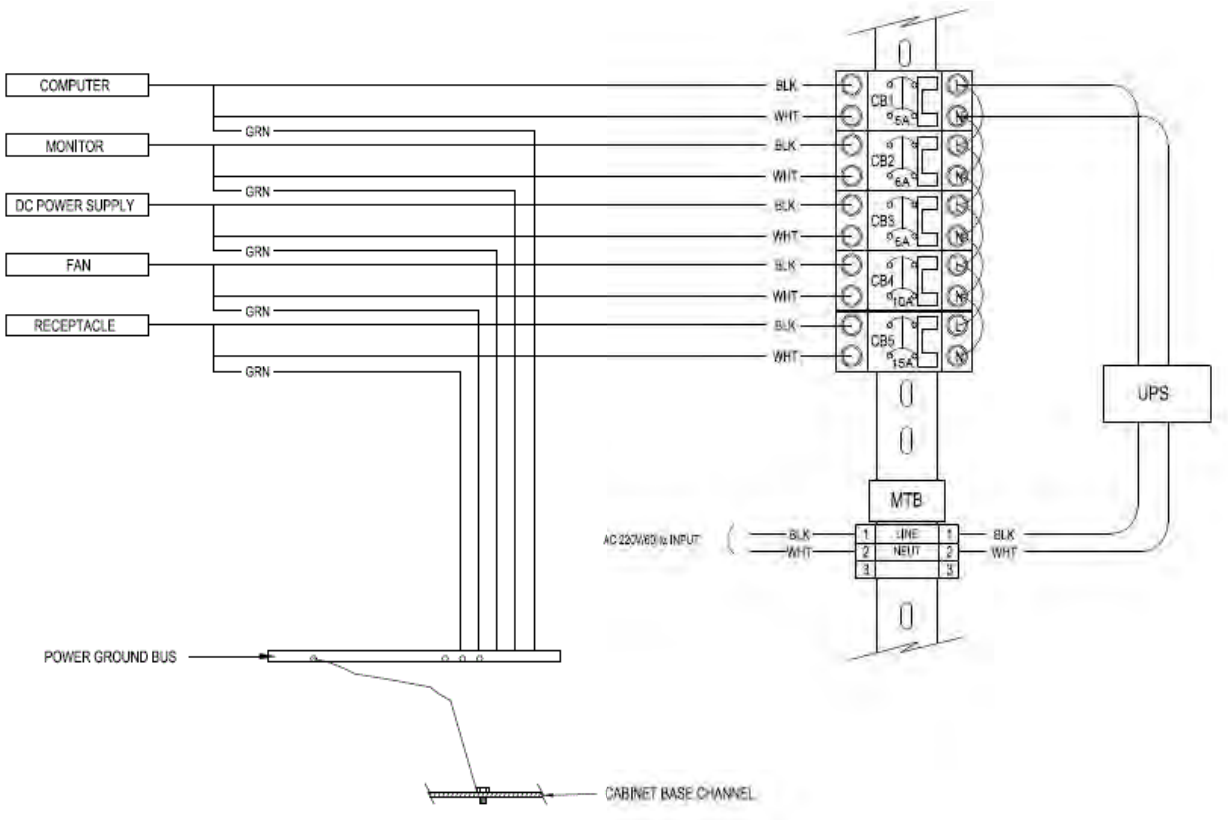
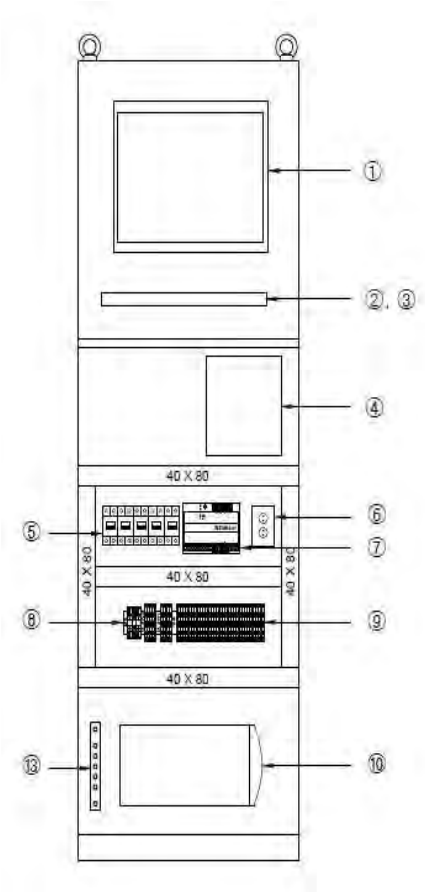



그림 2.2.31 서버랙 파워 Distribution 내용




BILL OF MATERIALS

| ITEM | DISCRIPTION | MAKE | MODEL | QTY |
|---|---|---|---|---|
| 1 | MONITOR | LENOVO | | 1EA |
| 2 | KEYBOARD | SEJIN | | 1EA |
| 3 | MOUSE | LOGI TECH | B175 | 1EA |
| 4 | COMPUTER | LENOVO | | 1EA |
| 5 | BKM | LS 산전 | BKM 32b | 5EA |
| 6 | RECEPTACLE | | | 1EA |
| 7 | POWER SUPPLY | | DLP240-24-1 | 1EA |
| 8 | TERMINAL BLOCK | | WDU 10 | 3EA |
| 9 | TERMINAL BLOCK | | WTR 2.5 | 50EA |
| 10 | UPS | | | 1EA |
| 11 | FILTER | | | 2EA |
| 12 | FAN | NMB | 4710PS-22T-B30 | 2EA |
| 13 | GROUND BUSBAR | | | 1EA |

그림 2.2.32 서버랙 구성 및 레이아웃

KTX 고속열차는 상행/하행 구간으로 운전실이 구성이 되어 열차 운행 시 한 방향의 운전실만 운영이 되고 운행 반대편 운전실은 공석으로 운행이 된다. 만약 Server Storage가 한 방향에만 설치가 되어 있으면 반대편으로 운행을 하면 측정되는 데이터를 확인하기 위하여 반대편에도 인력이 배치되어야 한다. 이러한 이유로 인하여 상 행/하행 운행 시 운전자의 편의성을 고려하여 Server Storage를 상행/하행 구간 양쪽으로 2개의 설치를 하였다. KTX 고속철도는 차량 길이가 350m 이상으로 lan선으로 데이터 전송 시 문제가 발생할 확률이 있다. 그렇기 때문에 차량 중간 중간에 신호 증폭기를 설치하여 데이터 전송에 문제가 없도록 처리할 수 있도록 한다.

Server Storage의 전원 문제는 KTX 운행시 전원 공급이 불안정하여 서버 컴퓨터에 UPS를 탑재하여 전원 공급의 불안정 문제를 해결하였다. 서버 스토리지의 구성부에서 Power Supply는  차량 전원으로 부터 공급되는 교류(220V) 전기를 온라인 모니터링 시스템에 맞는 직류(DC 24V) 전류로 전환하기 위하여 구성 하였다. 1개의 Client에 24V 1A의 전원이 공급되어 총 3A가 요구되나, 전원공급 안정성을 위해 24V 5A로 설정 하였다. Hub는 다수의 Client를 하나의 네트워크에 연결하기 위하여 구성하였으며, PC는 Client에서 수집되는 데이터를 연산처리 하여 운전실에 디스플레이할 수 있도록 구성하였다.

(마) 센서 측정 채널 수, 측정방향 설계

1대차 내에서 4개의 감속기 감시 포인트와 대차의 진동 1 채널을 1개의 클라이언트가 담당을 하는 방법으로 설계를 실시하였다. 각 1개의 각 1개의 감속기에는 1개의 진동센서(2방향)와 1개의 온도센서, 1개의 윤활센서로부터 신호를 받게 되므로 4채널이 필요하다. 1클라이언트는 1대차를 담당하게 되므로 4채널*4감속기=12채널과 대차용 진동신호추출을 위한 채널 1을 포함하면 총 13채널의 진동신호 입력단자가 필요하며 윤활 2ch, 온도 2ch 총 4ch의 Analog 입력단자가 요구된다.

측정 방향은 감속기는 레일-차륜간의 충격에 의한 수직방향(Z) 진동에 민감하며, 이는 감속기의 건강상태와 밀접하므로 반드시 설정해야 하는 방향이다. 감속기는 축 방향(기어의 축에 대한 방향; 열차의 진행방향으로는 수평방향; X)의 거동을 보이며 평 기어와 헬리컬기어 모두에서 잘 관찰되는 방향으로서 특히 1차 감속기의 기어형태인 헬리컬기어는 축 방향에서 신호의 확인이 필수적이다. 축방향의 신호는 기어의 특성을 아주 잘 나타내 준다. 감속기의 구조상 Z, X방향에 비해 Y방향(열차의 진행방향으로는 전후방향)의 거동은 민감도가 적고 동일 반경방향이므로 파형이 유사하며 축방향의 특성과는 다르므로 측정이 필요한 방향의 대상에서 제외하였다. 센서의 측정 방향들 중에서 감속기의 특성을 모두 담아낼 수 있는 최소한의 방향을 선정하는 것을 우선 선정기준으로 하였고 이는 Z방향과 X방향이 유효한 것으로 최종 설계를 완료 하였다. 다음 그림 2.2.33은 최종 설계된 센서의 측정 방향 및 클라이언트 설치를 표현한 그림이며 번호 주기에 대한 설명은 다음과 같이 정리를 할 수 있다.

① 선단 1차 감속기 (2 Direction Sensor) : 10 mv/g, ~ 6,400 Hz
측정 항목 : Vibration, Lubrication, Temperature
측정 방향 : 횡 방향(X), 축 방향(Z)
② Power supply, Communication Lan Cable
③ 후단 2차 감속기 (2 Direction l Sensor) : 10 mv/g, ~ 6,400 Hz
측정 항목 : Vibration, Lubrication, Temperature
측정 방향 : 횡 방향(X), 축 방향(Z)
④ 후단 1차 감속기 (2 Direction Sensor) : 10 mv/g, ~ 6,400 Hz
측정 항목 : Vibration, Lubrication, Temperature
측정 방향 : 횡 방향(X), 축 방향(Z)
⑤ 선단 2차 감속기 (2 Direction Sensor) : 10 mv/g, ~ 6,400 Hz
측정 항목 : Vibration, Lubrication, Temperature
측정 방향 : 횡 방향(X), 축 방향(Z)
⑥ Bogie 대차 1 Direction Sensor : 100mv/g, ~ 500Hz
측정 항목 : Vibration (raw data 저장)
측정 방향 : 횡 방향(X)

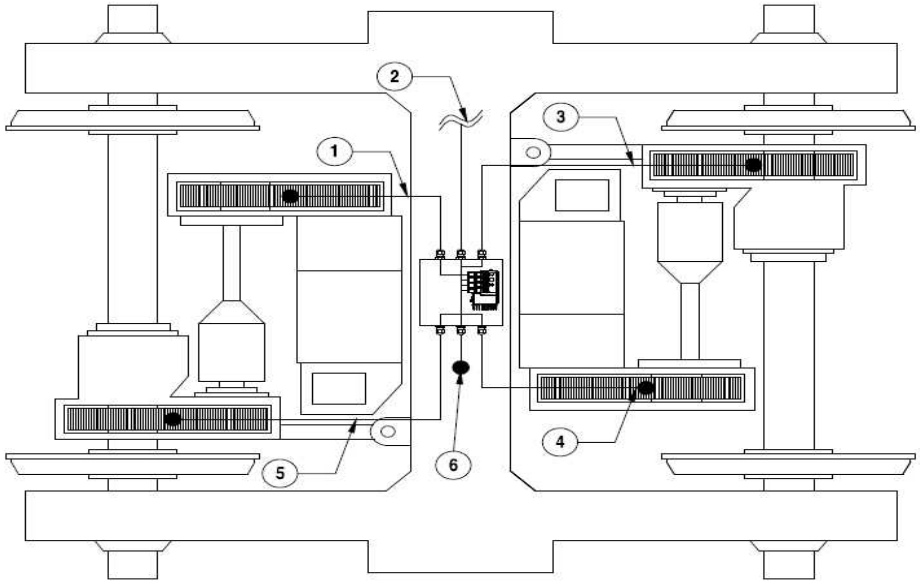



그림 2.2.33 센서 및 보호박스 설치도

## 3. 모니터링 시스템 소프트웨어 설계 및 분석

### 가. 소프트웨어 적용 관련 기술 연구

(1) 진동 주파수 적용 기술 관련 주요 기능 정리

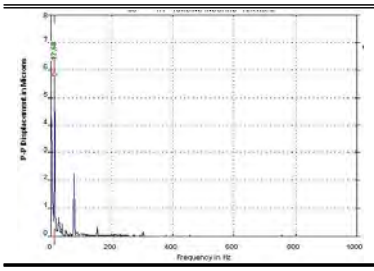
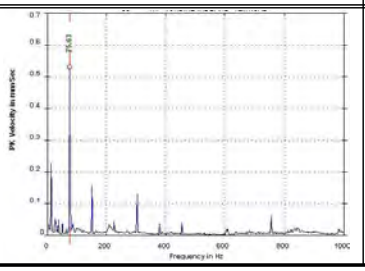
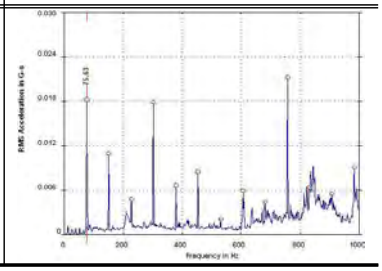
진동의 크기를 변위와 속도 및 가속도로 표기할 때 Overall (일반적으로 시간파형의 실효치; RMS)로 표기하게 되는데 이것은 전체 진동의 높고 낮음만을 나타낸다. 그러므로 감속기의 결함 원인 및 요소와 정도를 표현하기 위해서 주파수 성분별 또는 분석의 평가 대상을 세분화 하였다. 세분화된 결함판단을 위한 구분 대상을 '파라미터' 라 정의하였다. 이번 고속철도차량의 경우, 고속주행 경우에도 기어 맞물림 주파수(GMF)의 3배수가 5,000Hz를 초과하지 않고 대부분의 감시 대상 주파수는 5,000Hz이내에서 형성되므로 본 주파수를 평가하기에는 속도(mm/s rms)에 의한 감시가 적합하나 변위, 가속도로의 환산이 가능하도록 파라미터를 선정하였다. 진동신호 취득에 있어서 연속진동에서 불규칙 진동을 제외시키는 과정이 매우 중요한 과정이다. 불규칙 진동을 제외하는 것은 반드시 이번 개발에 포함이 되어야 할 과정으로 신호의 분류기능을 다음과 같이 정리 하였다.

① 연속진동에서 불규칙 진동 제거
② 여러 연속진동(가 변속)에서 감속기 진동만 추출
③ 감속기 관련 주요 결함 진동신호만 추출
④ 주요 결함 진동신호의 심각도 선정
⑤ 신호의 결과 방법 결정
⑥ 경고 신호의 발생 수준

(2) 결함 확률, 결함 분포, 실차 특성 요소에 따른 감시 파라미터 연구

감속기와 대차의 주요 결함을 측정을 하여 알람을 발생하는 소프트웨어를 구성하기 위해서는 최적의 진단 파라미터의 검증이 반드시 필요하였다. 감속기는 전체적으로 발생하는 진동의 주파수의 성분이 크게 전체 진동량, 기어 결함 주파수, 베어링 결함 주파수, 축에서 발생하는 주파수가 대표적인 진동 파라미터로 측정이 되었다. 앞 장과 앞 절에서도 언급을 하였듯이 주요 파라미터에 대한 충분한 사전 검토는 이미 완료가 된 상태였기 때문에 선정한 파라미터를 어떠한 방식으로 취득할 것인지에 대한 연구를 하였다. 대표적인 진동을 받는 신호에 대하여 변위, 속도, 가속도를 선정을 하여 각각의 스펙트럼을 비교 분석을 진행하였다. 다음 표 2.2.5는 각각의 스펙트럼 주파수를 나타낸 그림이다. 아래의 주파수 신호는 감속기의 결함을 측정하는데 반드시 검토가 필요한 항목으로서 시스템 구축을 위하여 1단계로 속도 신호를 취득하여 클라이언트에서 연산 처리를 하여 신호를 가속도로 변환을 한 후 연산 처리된 신호를 시스템에 입력을 하여 각각의 진동 주파수로 처리를 할 수 있게 소프트웨어를 구성하기로 안을 최종적으로 확정을 하였다.

표 2.2.5 출력 스펙트럼 주파수

| 변위 스펙트럼 | 속도 스펙트럼 | 가속도 스펙트럼 |
|---|---|---|
|  |  |  |

(3) 소프트웨어 적용 인터페이스 적용 기술

(가) 소프트웨어 전체 적용 인터페이스 내용

시스템의 인터페이스 기술 내용을 정리를 하면 보조시스템은 측정된 진동 이상 신호를 기본으로 각종 이상 신호 파라미터를 선별 추출하고, 메인 시스템에 전달을 하게 된다. 이 때 메인 시스템은 수신된 이상 파라미터의 정보를 활용하여 감속기와 대차의 이상 상태를 예측하게 되는데 이 예측하여 보여주는 결과 값은 사용자에게 직관적인 그래프 혹은 알람으로 결과 내용을 표시를 하여줌으로서 열차 차량의 운전자가 적절한 시기에 유지보수 계획 및 실행을 할 수 있도록 도와주는 기술을 포함하고 있다. 이때 운전자는 필요에 따라서는 각 대차별, 감속기별, 센서별로 측정된 누적 데이터를 언제든지 확인을 할 수 있으며 필요에 따라서는 적절할 조치를 취할 수 있도록 시스템을 정립하였다. 하드웨어의 인터페이스는 열차 차량의 조건에 부합되는 사양을 충족을 시켜야 하는데 이번 연구를 통하여 하드웨어 인터페이스 기술 부분에 대하여 다음과 같이 정리를 하였다.

(나) 하드웨어 인터페이스(Hardware Interface)

① 메인시스템
- CPU : Intel-core I7 - 2 Generation 2600 이상 급
- Memory : Samsung DDR3 4G PC3-10600(X2)
- HDD : Segate 2TB
- Ethernet : 10/100 Mbps Ethernet

② 보조시스템
- CPU : 533MHz Power PC
- Memory : 256Mb
- Ports : Ethernet 2port, RS-232 1port, USB 1port

(다) 소프트웨어 인터페이스(Software Interface)

① 메인시스템 (Server)
- OS : Microsoft Windows7
- GUI 및 개발환경 : NI Labview2011 sp1

② 보조시스템 (Client)
- OS : VxWorks
- 개발 환경 : NI Labview2011 sp1

(라) 통신 인터페이스(Communications Interface)
- 메인시스템 : 10/100 Mbps Ethernet
- 보조시스템 : 10/100 Mbps Ethernet

위의 인터페이스 내용을 근거로 기능 기술에 대한 내용을 다음과 같이 정리를 할 수 있었다.

다음 그림 2.2.34 ~ 2.2.39는 설정한 인터페이스 설계 내용을 근거로 작성한 최초 자료의 Flow Diagram을 단계적으로 표현한 것이다.




그림 2.2.34 1차 배경도(레벨0)

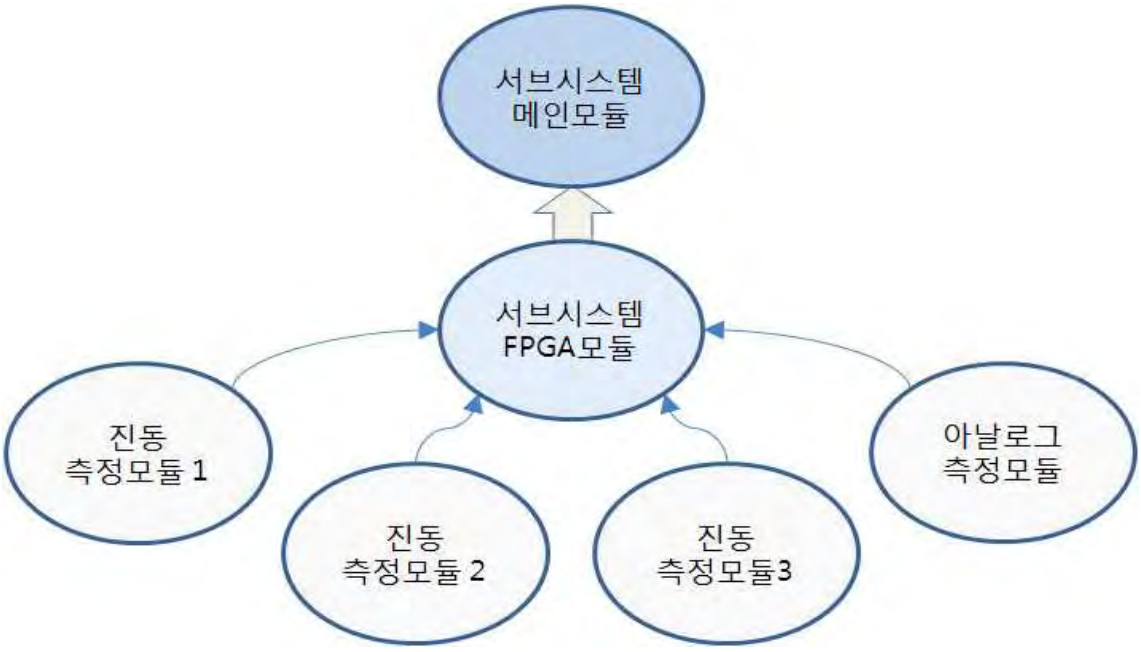



그림 2.2.35 1차 서브시스템 모델(레벨2)

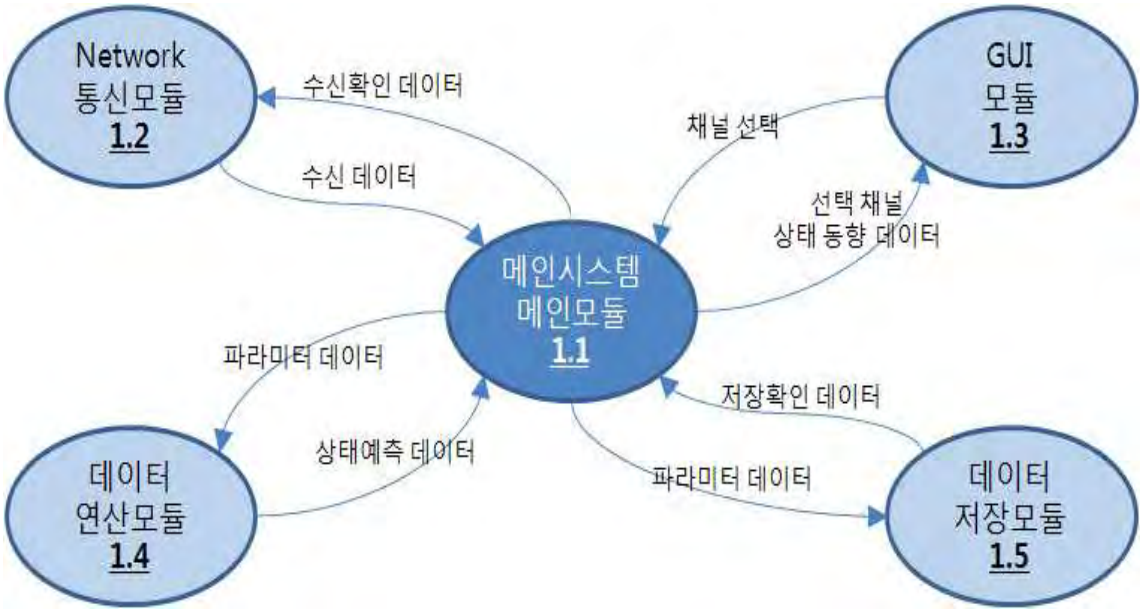



그림 2.2.36 1차 메인시스템 모듈(레벨3)

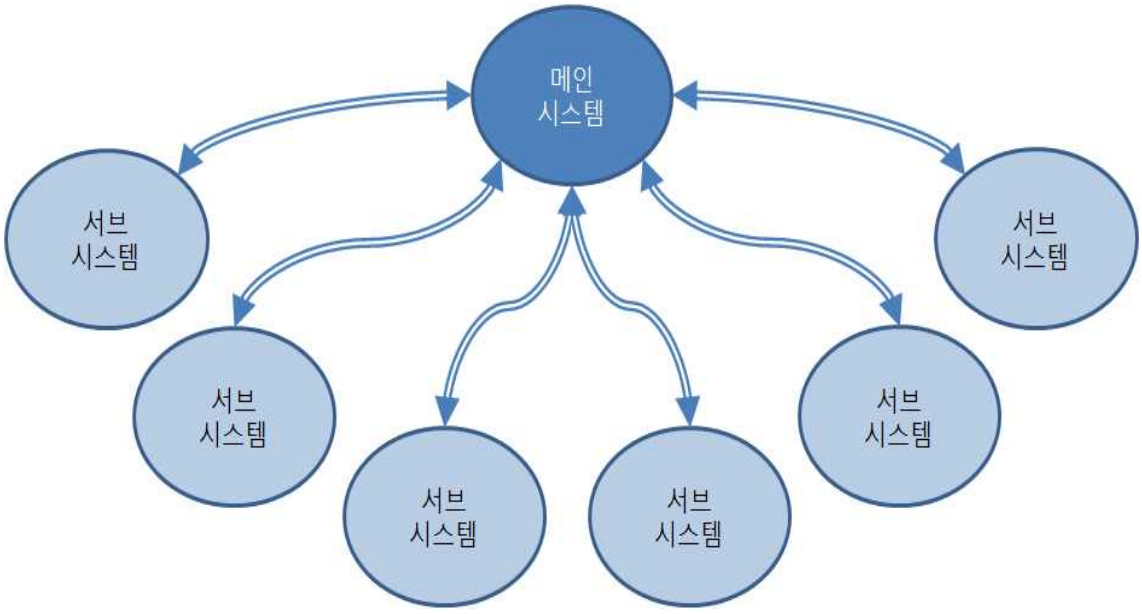



그림 2.2.37 1차 시스템 구조(레벨1)

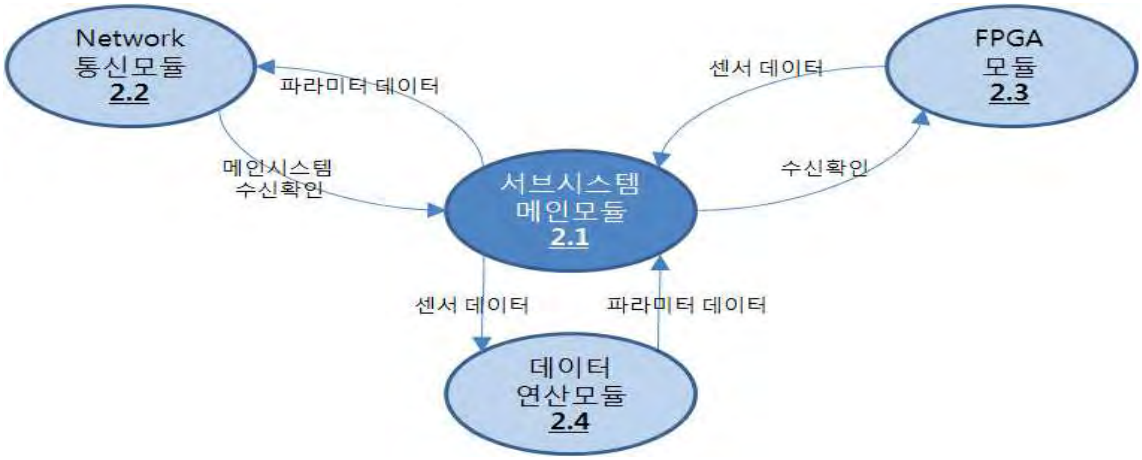



그림 2.2.38 1차 서브시스템 모듈(레벨3)




그림 2.2.39 1차 C/S 모델

(마) 기능 기술 설계의 변경 내용

초기 설계된 소프트웨어의 내용을 구현을 하면서 하드웨어의 연산 처리 및 채널수 조정 문제가 발생을 하면서 기능 기술 내용에 대한 설계 변경이 필요하게 되었다. 초기 설계안은 진동 모듈3개가 설치되고 온도와 윤활 데이터는 아날로그 모듈로 데이터를 취득하는 방식 이였지만 온도 채널수가 늘어나면서 모듈에 대한 구성을 새롭게 구성을 하면서 온도, 윤활 각 요소의 하드웨어 모듈을 별도로 구성을 하여 시스템을 구성하였다. 그림 2.2.40 ~ 그림 2.2.42는 변경된 서브시스템의 메인 모듈의 자료 흐름에 대한 최종 설계 내용을 표현한 것이다.




그림 2.2.40 최종 배경도(레벨0) (변경사항 없음)

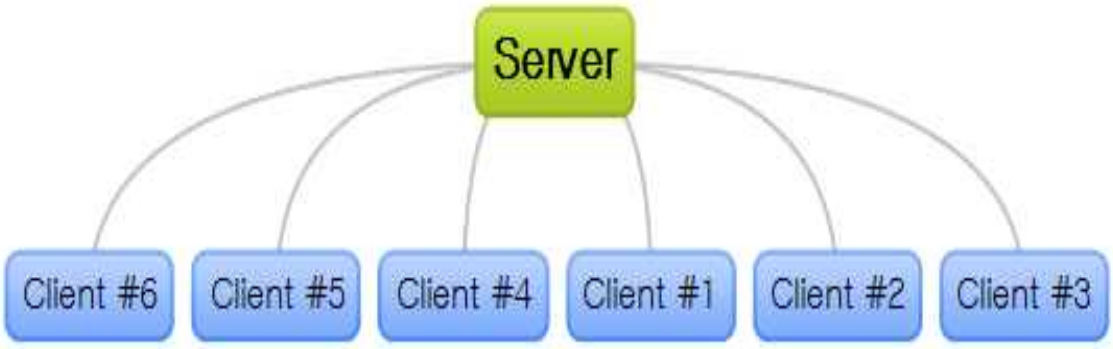



그림 2.2.41 최종 소프트웨어 시스템 구성도 (변경 없음)

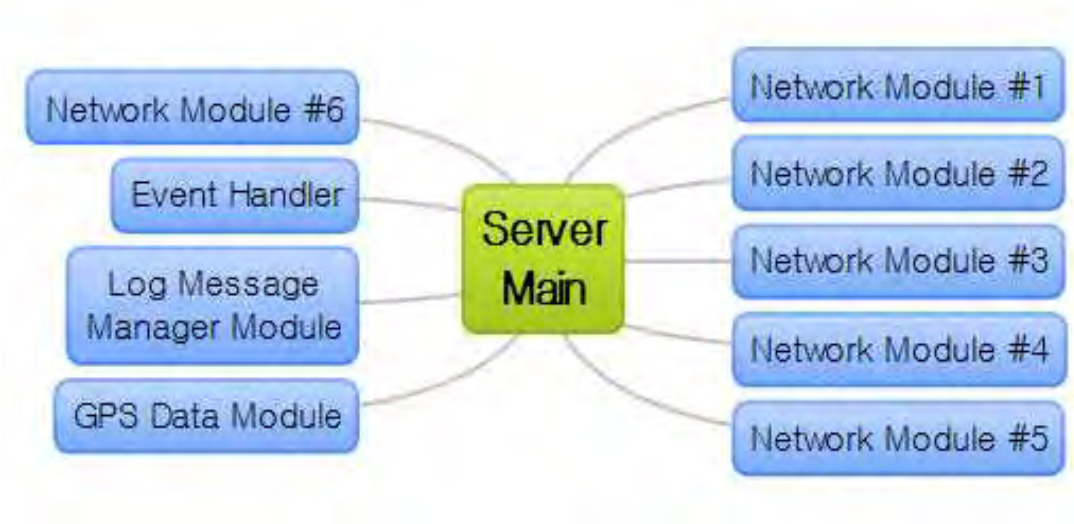



그림 2.2.42 서버프로그램의 내부 모듈 구성도

소프트웨어를 설계를 진행을 하면서 네트워크 모듈에 대한 내부 구조에 대한 소프트웨어 기능기술을 설계를 새롭게 개편을 하여 확정을 지었다.  설계를 변경한 내용은 각의 Client에 대응하는 별도의 S/W모듈을 제작하여, 위의 그림처럼 1개의 모듈이 1개의 클라이언트만 처리하도록 설계를 변경하였다. 설계 변경의 근거는 다음과 같다. 기존에 서버의 데이터 수신처리를 1개의 모듈에서 6개의 클라이언트를 모두 처리하는 형태로 구현되어 있었으나, 시스템 리소스의 과도한 점유로 인해 서버의 퍼포먼스가 하락하는 상황 발견하였다. 연결되지 않은 채널의 데이터까지 저장하게 되어 저장용량의 낭비를 초래하기 때문이다. 그림 2.3.43은 네트워크 모듈 관련 소프트웨어 설계 내용이다.

그림 2.3.43을 풀어서 설명을 하면 다음과 같이 정리를 할 수 있다.

Data Streaming 수신모듈에서는 대차의 헌팅을 감시하기 위한 대차 진동 센서 정보를 수신한다. Network Variable 감시모듈에서는 각 센서(진동, 온도, 윤활, 회전수)에서 계측되어 추출된 데이터가 포함 공유변수를 상시 감시하여 업데이트 될 때마다 수신한다. Network Variable 감시모듈에서는 각 센서(진동, 온도, 윤활, 회전수)에서 계측되어 추출된 데이터가 포함 공유변수를 상시 감시하여 업데이트 될 때마다 수신한다. 데이터 저장모듈에서는 수신된 데이터를 저장한다. 데이터 저장모듈에 부속된 모듈의 기능을 정리를 하면 다음과 같다.

① Event Handler Module : 사용자의 입력/조작에 따른 동작을 처리하기 위한 모듈
② Log Message Manager Module : 각각의 데이터를 토대로 경보를 발생시킬 경우, 해당 정보를 별도의 파일에 기록하고, 사용자에게 알려주는 부분을 처리하는 모듈
③ GPS Module : GPS 위성에서 수신된 지형정보를 토대로 현재 위치를 실시간 저장하는 모듈

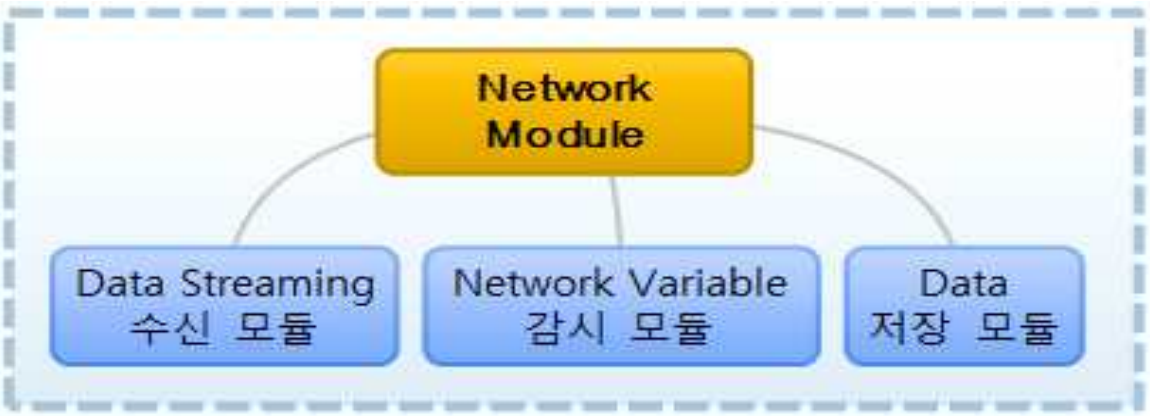



그림 2.2.43 Network 모듈 내부 구조

소프트웨어 설계에서 클라이언트 부에 대한 설계는 다음과 같이 소프트웨어 구조를 설계 하였다. 다음 그림 2.2.44 ~ 2.2.45는 클라이언트 물리적 구성을 표현한 그림이다.

Data Streaming 수신모듈에서는 대차의 헌팅을 감시하기 위한 대차 진동 센서 정보를 수신한다. Network Variable 감시모듈에서는 각 센서(진동, 온도, 윤활, 회전수)에서 계측되어 추출된 데이터가 포함 공유변수를 상시 감시하여 업데이트 될 때마다 수신한다. 데이터 저장모듈에서는 수신된 데이터를 저장한다.

부속된 모듈의 기능을 정리를 하면 다음과 같다.

① Data Streaming 송신모듈 : FPGA모듈을 통해 전달받은 대차 진동 데이터를 서버로 송신

② FPGA 데이터 수신 모듈 : 센서에서 수집된 정보를 1차로 처리한 FPGA 보드에서 데이터를 수신하는 모듈. 수신한 데이터는 데이터 연산 모듈과 Data Streaming 송신 모듈로 전송

③ 데이터 연산 모듈 : FPGA 모듈에서 전달받은 센서데이터를 기반으로 진동파라미터를 추출하고, 온도정보, 윤활정보를 Network Variable(변수)에 업데이트 하여 서버에서 정보를 수신할 수 있도록 처리하는 모듈

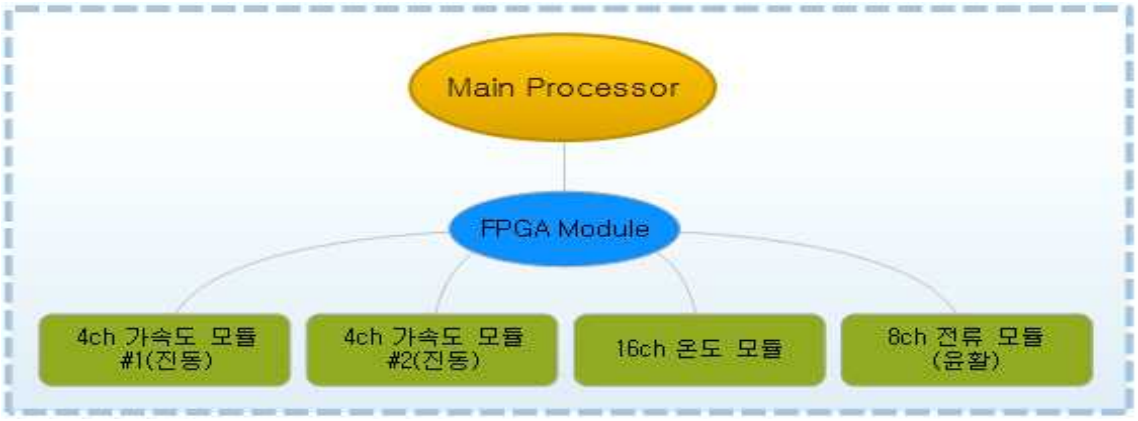



그림 2.2.44 Client 물리적 구성도(H/W)

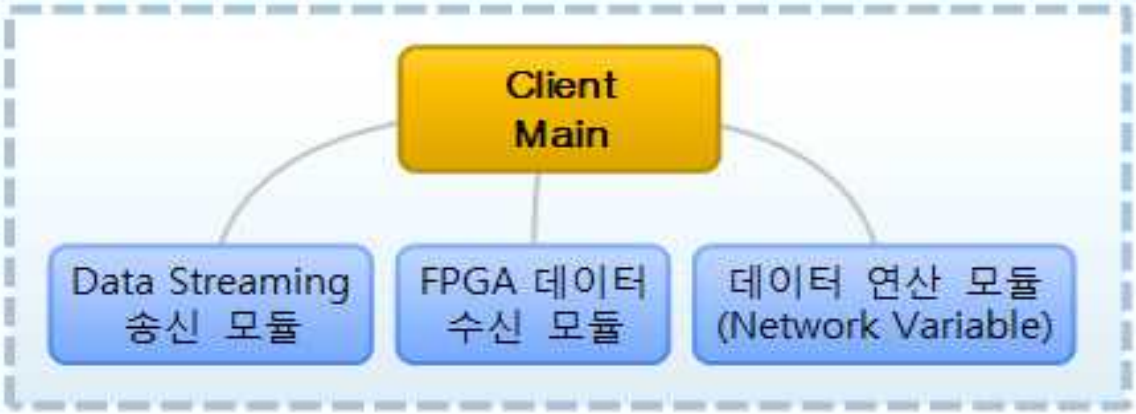



그림 2.2.45 Client S/W 내부 모듈 구성도

그림 2.2.46 ~ 2.2.47은 확정된 알고리즘과 프로세스 명세서 내용을 바탕으로 작성된 각 구성 장치 프로그램 연산 데이터 처리 흐름도 이다.

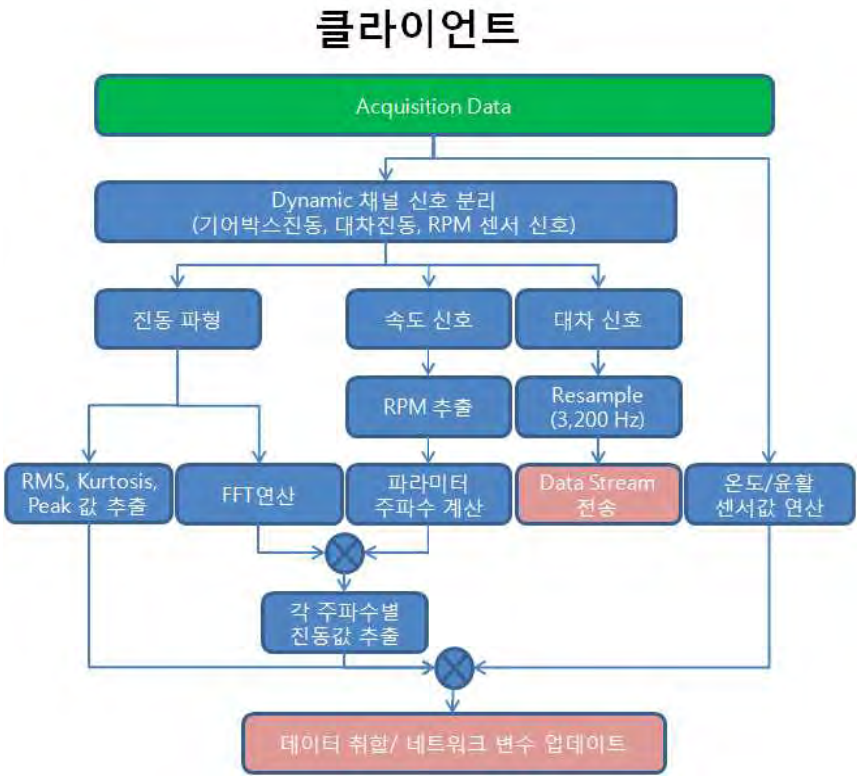



그림 2.2.46 클라이언트 프로그램 설계 구성도 및 흐름도

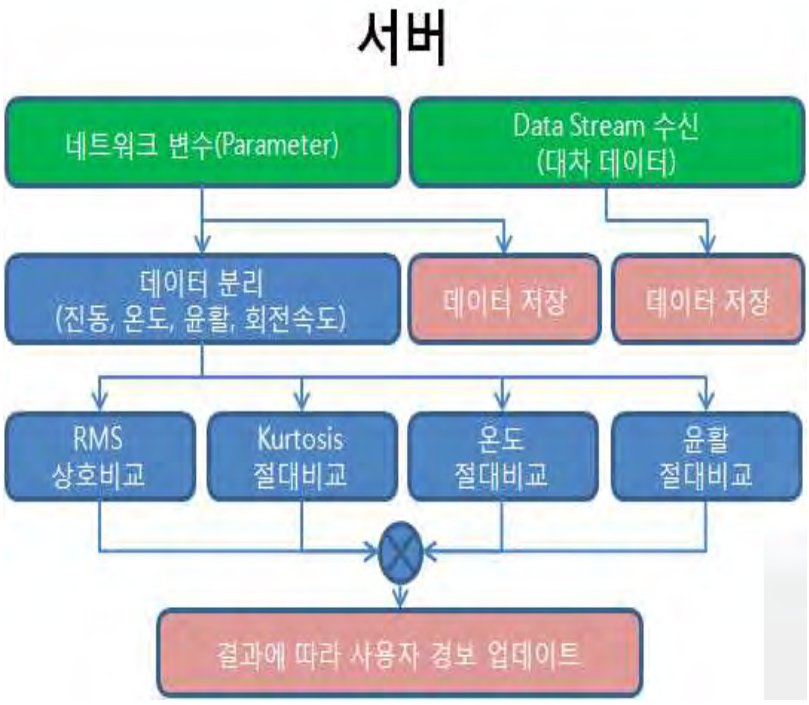



그림 2.2.47 프로그램 구성도 및 흐름도

(바) 소프트웨어 GUI 설계 내용

확정한 데이터 처리방법을 어떻게 철도차량 사용자에게 표시를 하는 것이 좋을지 많은 고민을 하였다. 전체적으로 모니터링 시스템의 화면 구성은 운전자의 확인이 최대한 용이하게 할 수 있도록 최대한 간단하게 구성을 하는 것이 중요하다고 생각을 하였다. 각각 시스템에서 발생하는 이벤트를 기록하고 감속기가 장착된 시스템에서 이상 징후가 발생을 하게 되면 운전자가 즉시 확인이 가능할 수 있도록 시스템을 구성을 하는 것이 중요하다고 판단을 하였다. 다음 그림 2.2.48은 초기 최초로 구상한 GUI의 메인 구성 화면이다.

초기에 설계한 GUI의 구성 화면은 매우 간단하여 운전자의 확인이 매우 손쉬운 장점은 분명 존재하였지만 어느 설비의 이상이 있는지 확인이 필요 하였다. 따라서 감속기 모델링을 별도로 추가를 하여 감속기 각 포인트를 표현한 화면에 각각의 센서입력에 따라 필요한 파라미터를 계산하여 추출해내고, 그것에  대한 실시간 정보를 보여준다. 그래프를 클릭하면, 해당 파라미터의 시간별 차트를 확인할 수 있는 다음 그림 2.2.49와 같은 감시 진단 GUI 구성 화면을 구성을 하였다.

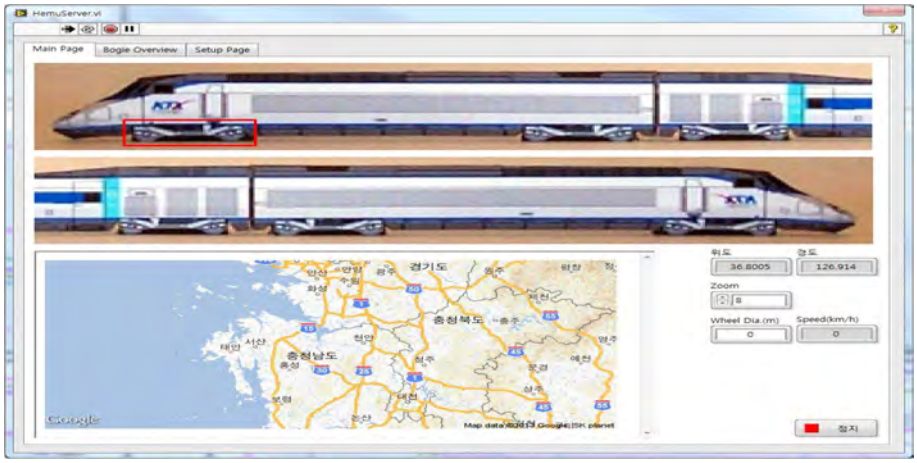



그림 2.2.48 GUI 구성 화면

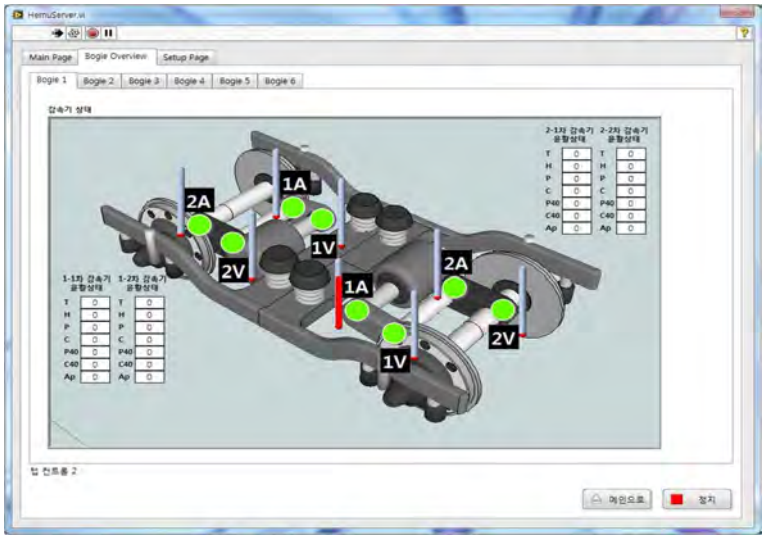



그림 2.2.49 감시진단 GUI 구성 화면

GUI 설계 화면은 감속기와 대차에서 나타나는 센서별 파라미터를 막대형게이지 화면으로 표시해 준다. 각 그래프를 클릭하면, 해당 센서 데이터의 변화기록을 그래프로 확인할 수 있는 화면으로 이동을 하는 기능을 한다. 초기에 설계된 GUI 화면의 알람 발생 화면은 다음과 같이 구성을 하였다. 다음 그림 2.2.50에 그 내용을 표시 하였다. 다음 그림은 운행 중 알람이 발생하게 되면 그림 2.2.50과 같이 빨간색 표시 화면이 깜빡 거리면서 이상 부위에 대하여 지속적으로 운전자에게 정보를 디스플레이 할 수 있도록 프로그램을 최초 설계하였다.

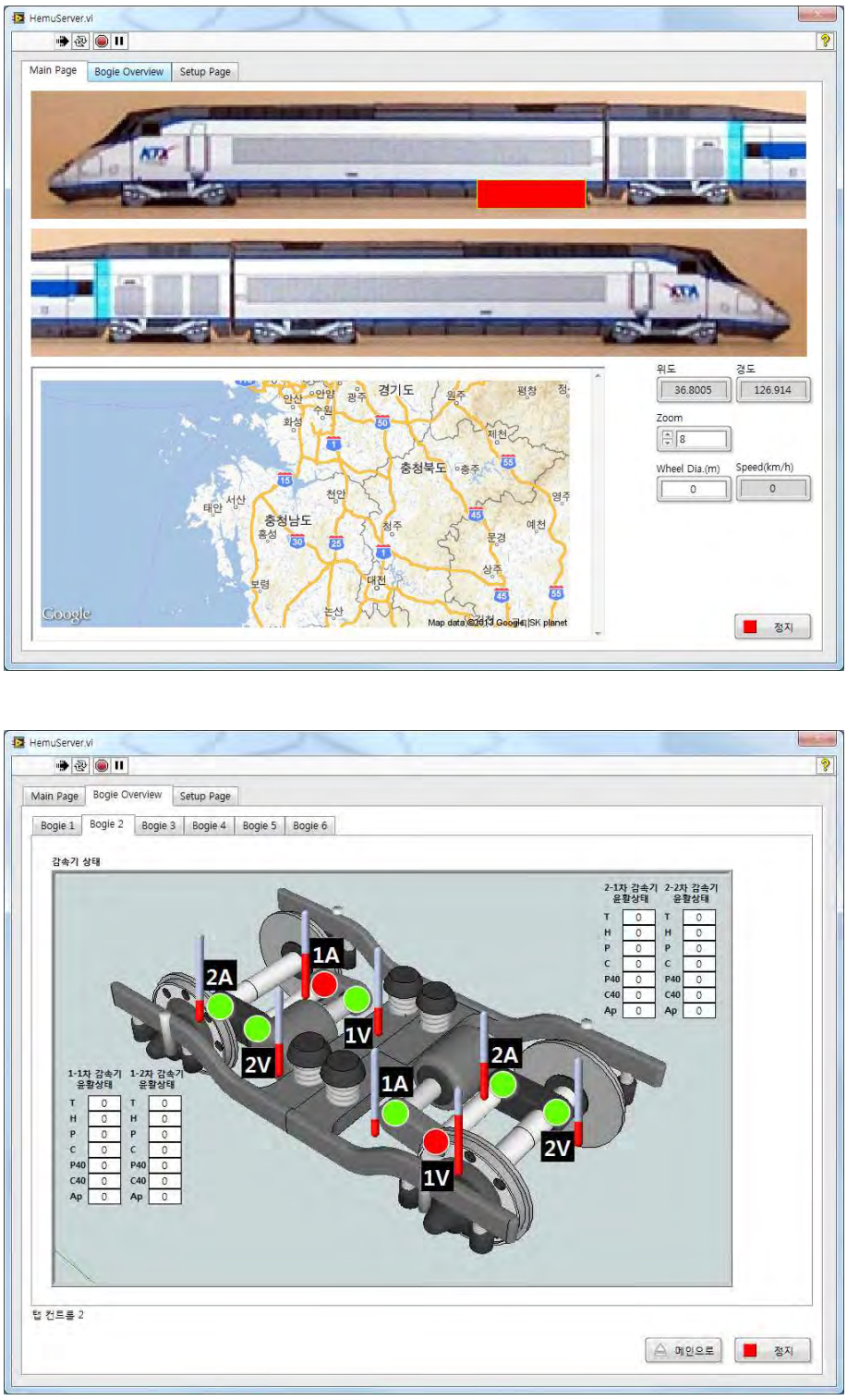



그림 2.2.50 알람 발생 화면

이 시스템에 대한 사용자는 진동에 대한 전문가가 아니므로 상세한 내용의 데이터를 화면에 보여주어도 증상이나 상태 이상 유무에 대한 판단을 내리기 어렵다. 그러나 직관적인 UI (User Interface)를 사용하여 이상이 발생한 것으로 추정되는 위치를 한눈에 확인할 수 있도록 해준다. 주요한 진동주파수 파라미터의 값이 어떻게 변하였는지 확인할 수 있도록 그래프를 이용한 디스플레이를 적용하여 과거로부터 데이터의 변화추이를 확인할 수 있도록 설계를 하였다.

이 때 발생하는 알람에 대한 확인은 별도의 메뉴를 구성을 하여 사용자가 확인을 하고 싶을 때는 언제든지 확인이 가능하도록 소프트웨어를 설계를 하였다. 다음 그림 2.2.51은 알람이 발생한 부품에 대하여 그래프를 클릭하여 진동 주파수가 얼마 인지를 확인을 하는 GUI 구성 화면 설계 내용을 표시한 것이다.

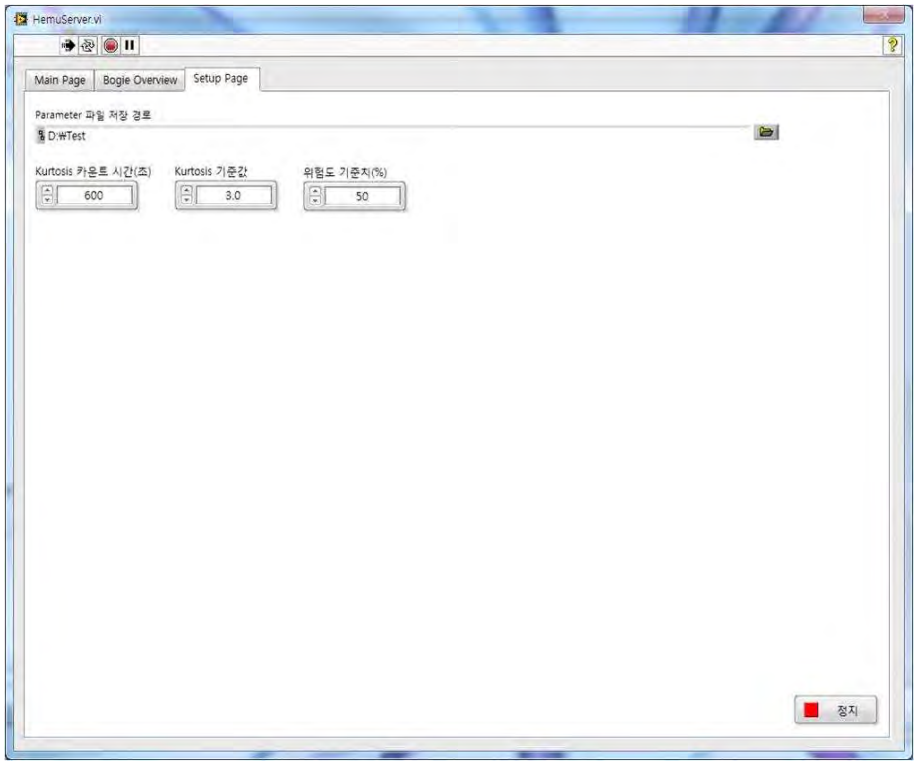



그림 2.2.51 감시진단 데이터화면

(사) 소프트웨어 GUI 설계 변경

초기의 소프트웨어 GUI는 매우 간단하여 사용자 편의를 최대한 고려를 하였지만 운전자가 운행을 하면서 알람이 발생하는 화면에 대하여 클릭을 하여 확인을 하는 번거로움이 발생할 가능성에 대하여 설계 변경을 고려하게 되었다. 또한 배경 화면이 간단하였지만 오히려 사용자 측면에서는 더 간단하고 직관적으로 확인이 가능한 GUI를 선호 하는 관점에 비춰 다시 GUI를 재설계를 진행하게 되었다. 그리하여 감시 진단 GUI의 메인 화면을 그림 2.2.52와 같이 설계변경을 실시를 하였다. 변경된 화면은 메인 화면에 진동, 윤활, 온도의 각 인자가 그림과 같이 적색 그래프로 즉시 화면에 표시가 되어 운전자가 즉시 이상부위에 대하여 확인이 가능할 수 있도록 구성하였다.

6개의 대차가 각각 확인이 가능할 수 있도록 GUI를 구성하여 수시로 언제든지 각 대차의 상태 확인이 가능할 수 있도록 최대한 실무자의 편의성을 고려하였다. 감시 진단 GUI에서는 진동, 윤활, 온도의 계측되는 값이 화면에 수치로 바로 표현이 되며 측정된 데이터 값이 저장이 되어 언제든지 수치 값을 확인이 가능하도록 설정 하였다. 또한 진동, 윤활, 온도의 상세정보를 조회하는 창으로 이동하게 되면, 그림 2.2.53과 같이 변화추이를 확인하고 싶은 대차/파라미터를 선택할 수 있는 메뉴가 존재하며, 해당 메뉴에 값을 설정함으로써 해당 값에 대한 변화추이를 그래프를 통해 확인할 수 있다. 열차 운행 중 알람이 발생하게 되면 그림 2.2.54와 같이 알람 표시 화면이 깜빡 거리면서 이상 부위에 대하여 지속적으로 운전자에게 정보를 디스플레이 할 수 있도록 프로그램을 설계 내용을 최종적으로 확정할 수 있었다.

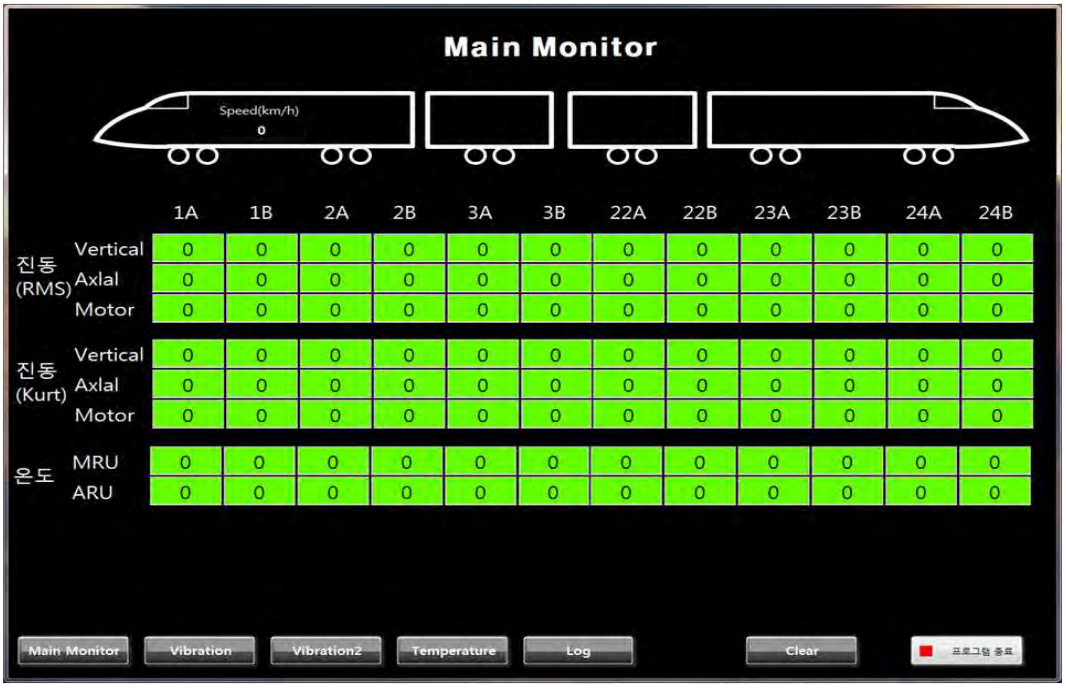



그림 2.2.52 모니터링 시스템 GUI 메인 화면

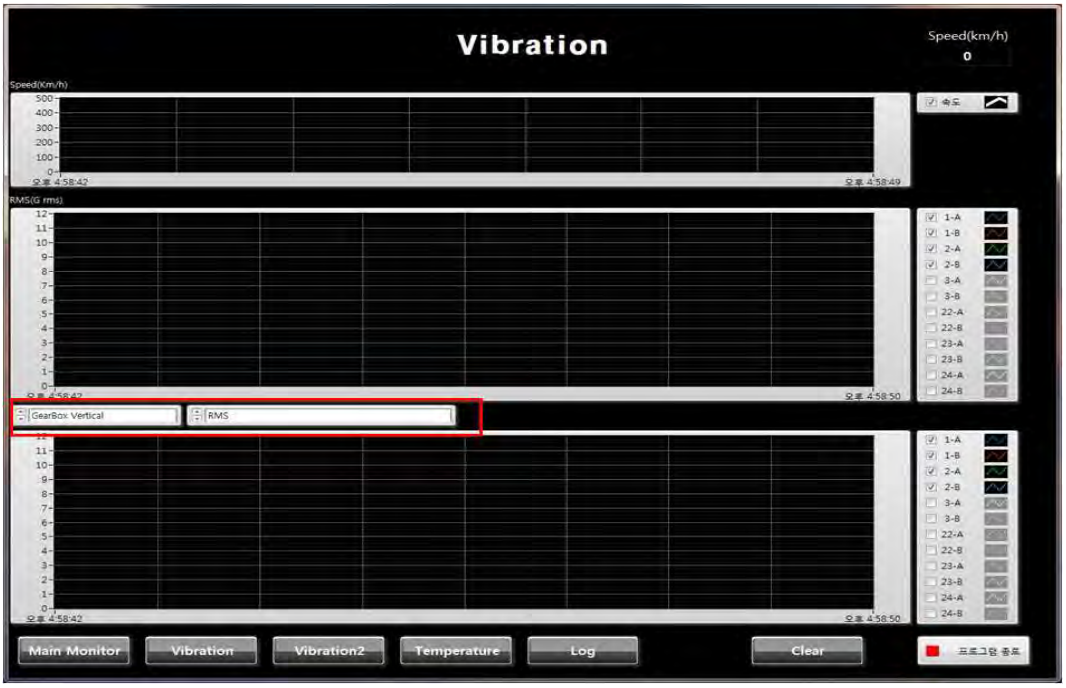



그림 2.2.53 진동 파라미터 값 세팅 화면

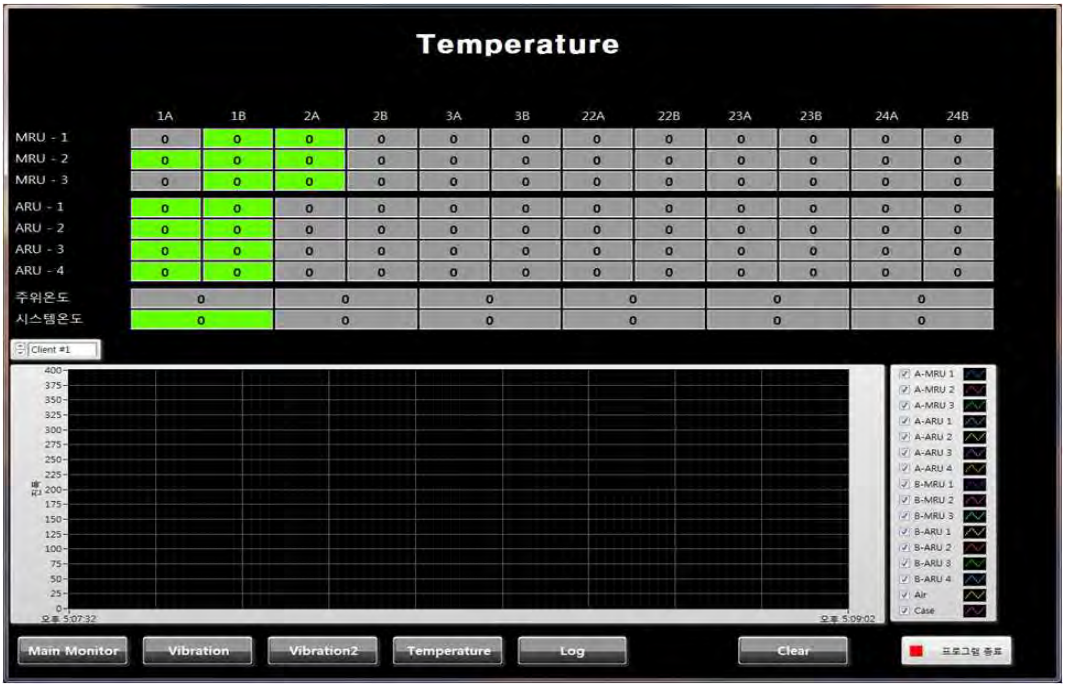



그림 2.2.54 알람 표시 화면

(아) 모니터링 시스템 함수의 블록화 설정 연구

진동 모니터링 시스템의 파라미터 계산 함수 설정은 기어 정보와 베어링 정보를 이용하여 기어박스 1세트 당 31개의 주파수 파라미터를 계산해 주는 함수를 적용하였다. 그림 2.2.55는 적용한 31개의 주파수 파라미터 함수 내용이다. 1 세트 당 적용한 주파수 파라미터 함수는 1CPS (Cycle per Second)로 기준 데이터를 설정하였다. 그림 2.2.56은 설정한 함수를 Labview 프로그래밍에 적용한 내용이다.

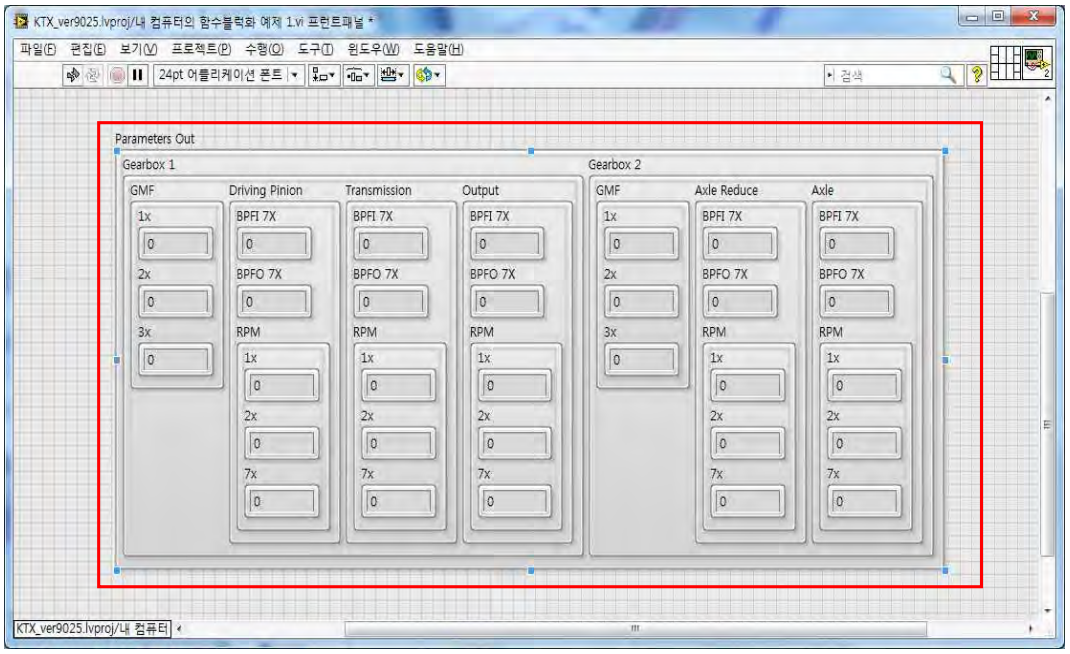



그림 2.2.55 31개의 출력 파라미터

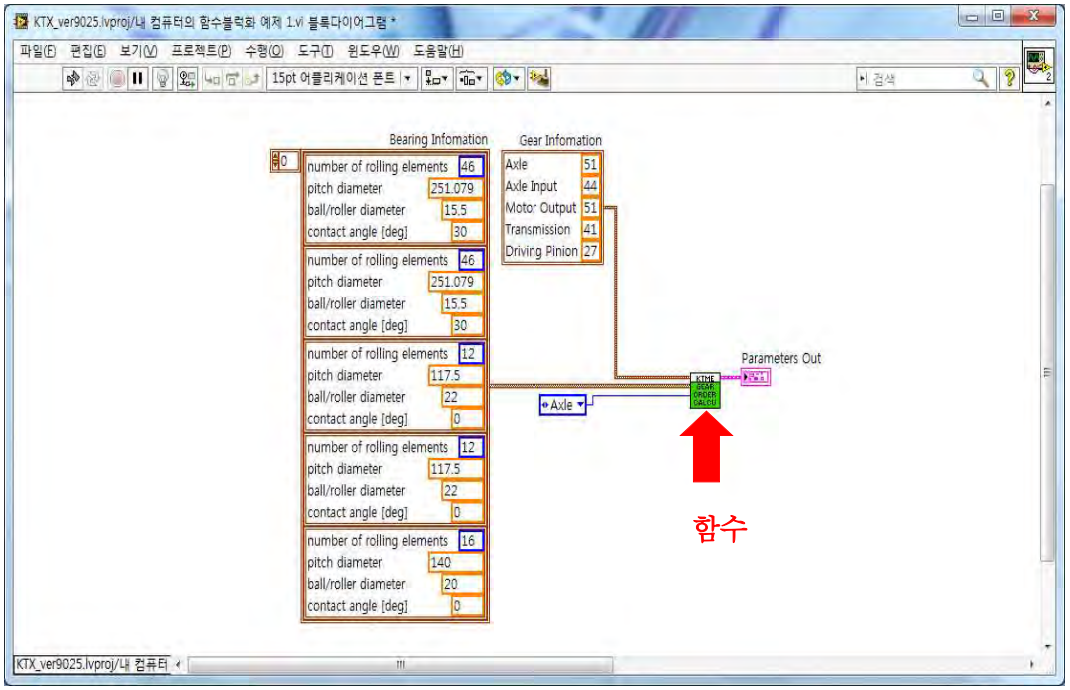



그림 2.2.56 모니터링 시스템 함수 블록화 설정 적용

감시 주파수 진동데이터 진폭 추출 함수는 실시간으로 연산되어 전달되는 FFT 결과데이터에서 산출된 파라미터 주파수(현재 주행속도 × 기본 파라미터 주파수)범위의 진동 값을 추출해주는 함수로 블록화 하였다. 그림 2.2.57은 감시 주파수 진동데이터 진폭 추출함수를 Labview 프로그래밍에 구현한 내용이다.

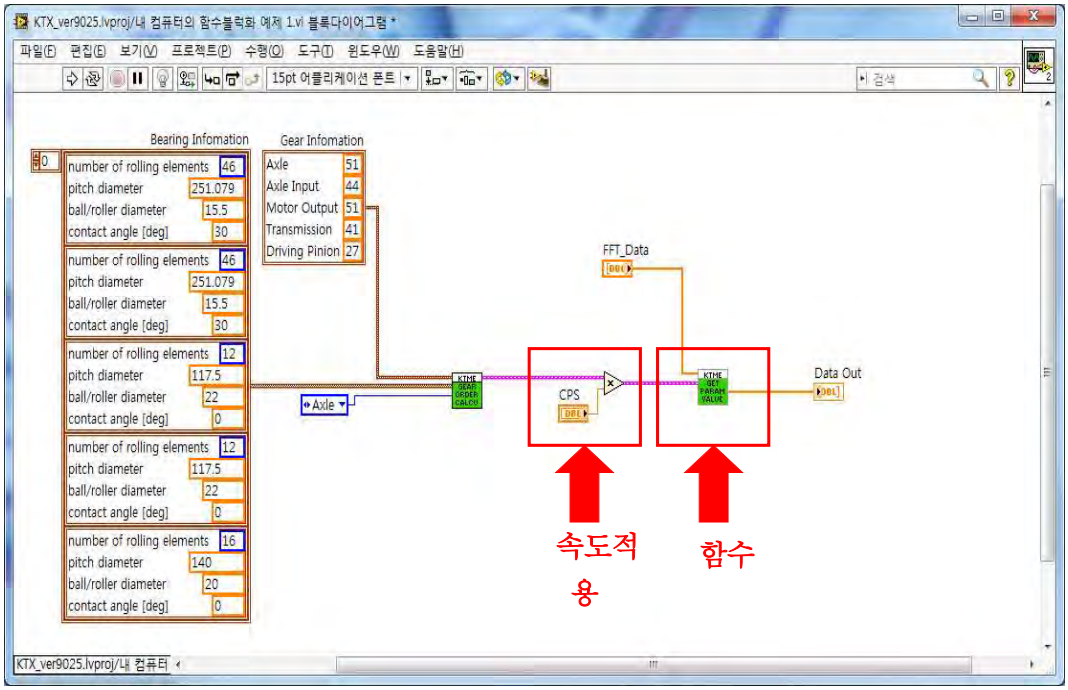



그림 2.2.57 감시 주파수 진동데이터 진폭 추출 함수

프로그래밍의 함수 블록화는 데이터 처리효율의 상승을 위하여 각각 별도의 데이터 처리 Thread를 할당하여 프로세서의 효율을 높이고, 향후 소프트웨어 개선에 용이하도록 하기 위한 목적으로 구현하였다. 아래의 표 2.2.6은 구현한 함수 블록화 내용을 정리한 내용이다.

표 2.2.6 함수 블록화 내용

| 함수 블록화 구간 | 설명 |
|---|---|
| Client / FPGA | • 데이터 취득 부<br>: 센서에서 취득한 데이터를 가져오는 블록 (실시간 처리)<br>• 데이터 전달 부<br>: Real-Time 시스템에서 데이터를 요청하면 데이터를 전달해주는 블록 |
| Client / Real-Time System | • 데이터 수신 부<br>: FPGA에 데이터를 요청해서 가져오는 기능을 수행하는 블록<br>• 데이터 연산 부<br>: 가져온 데이터를 연산처리 하는 블록<br>• 통신 처리부<br>: Server컴퓨터에 접속을 시도하고, 데이터 통신을 담당하는 블록 |
| Server / Server Computer | • 데이터 처리부<br>: 연결된 Client들에서 데이터를 수신하고 저장하는 기능을 수행하는 블록<br>• 통신 연결부<br>: TCP/IP 통신방식을 통해 접속을 시도하는 Client에게 통신을 허용하는 블록 |

(자) 소프트웨어 설계 내용의 정립

설계된 소프트웨어의 데이터 기록 규칙은 1초 동안 수집한 진동 데이터를 바탕으로 추출해낸 각종 진동 파라미터(1X GMF, Overall, BPFI, 등등)의 수치와 측정시간 ,모터의 분당회전수(RPM), 온도센서 데이터, 윤활센서 데이터, GPS 데이터를 함께 저장하는 규칙을 설정 하였다. 이 때 저장할 파일은 2진(binary) 파일형식을 선택하여 저장하며 대차 진동의 경우 별도의 파일에 원본데이터를 저장할 수 있도록 소프트웨어를 설정하였다. 그림 2.2.58은 데이터 기록 규칙 내용을 구현한 화면이다. 각 진동 요소들이 이 상없이 기록이 되는지 여부를 판별하기 위한 시험용 프로그램으로 본 프로그램을 활용하여 데이터 기록이 설계 내용대로 축적되는 유무를 확인할 수 있었다.

열차가 400km/h의 속도로 주행할 경우 나타날 수 있는 최대 기어 맞물림 주파수는 2,200Hz영역 이라는 결론을 계산식에 의하여 얻어내었고, 12.8 kS/s의 속도로 샘플링 진동데이터를 스펙트럼으로 변환하면 6,400Hz 의 주파수 범위까지 확인할 수 있어 2~3배수의 하모닉스 성분까지 측정 가능하다. 베어링 주파수 역시 400km/h 주행할 경우 나타날 수 있는 최대 주파수는 770Hz 영역이고, 8배수의 하모닉스 성분까지 확인할 수 있다. 12.8kS/s 로 데이터를 수집 할 경우 차후 데이터 연산량이 늘어나도 CPU 사용량에 여유가 있으므로 연산부하에 대한 문제가 발생할 확률이 적었다.

TCP/IP 통신 방식은 10/100Base T 방식을 사용할 경우 10Mbps 속도를 지원한다. IP주소를 이용하여 연결하는 방식이므로, 1:N, N:N 통신을 구현할 수 있고 높은 데이터 신뢰성을 가지며 다른 통신방식에 비해 원거리의 통신이 가능하기 때문에 이번 통신 방식으로 적용하였다.



그림 2.2.58 시험용 프로그램 화면

## 4. 대차 진동 측정 시스템 구축 설계 및 분석

이번 연구에서 대차 진동 측정 시스템을 구축 하는 방안을 연구하면서 1차 적으로 대차 진동 측정을 위한 센서와 대차의 진동 측정 방향을 선정하는 것이 매우 중요하였다. 여러 가지 사항을 검토하여 대차는 단축 센서 100mv/g의 센서를 선정하였고 측정 항목은 연구계획대로 횡 방향(X)의 진동 raw data를 취득하는 방향으로 연구 결과를 선정 하였다. 표 2.2.7은 KTX 대차의 사양을 정리한 내용이며 그림 2.2.59는 대차의 진동 측정 위치를 표시한 내용이다.

표 2.2.7 KTX 대차 관련 정보 내용

| 항 목 | | 내 용 |
|---|---|---|
| 대 차 | 궤간 | 1,435 mm |
| | 대차 수/량 | 대차 수 23 (구동대차6,관절대차17)/20량 1 편성 |
| | 차륜직경 및 수 | 920mm/850mm(신품/마모한도), 차륜수 92 개 |

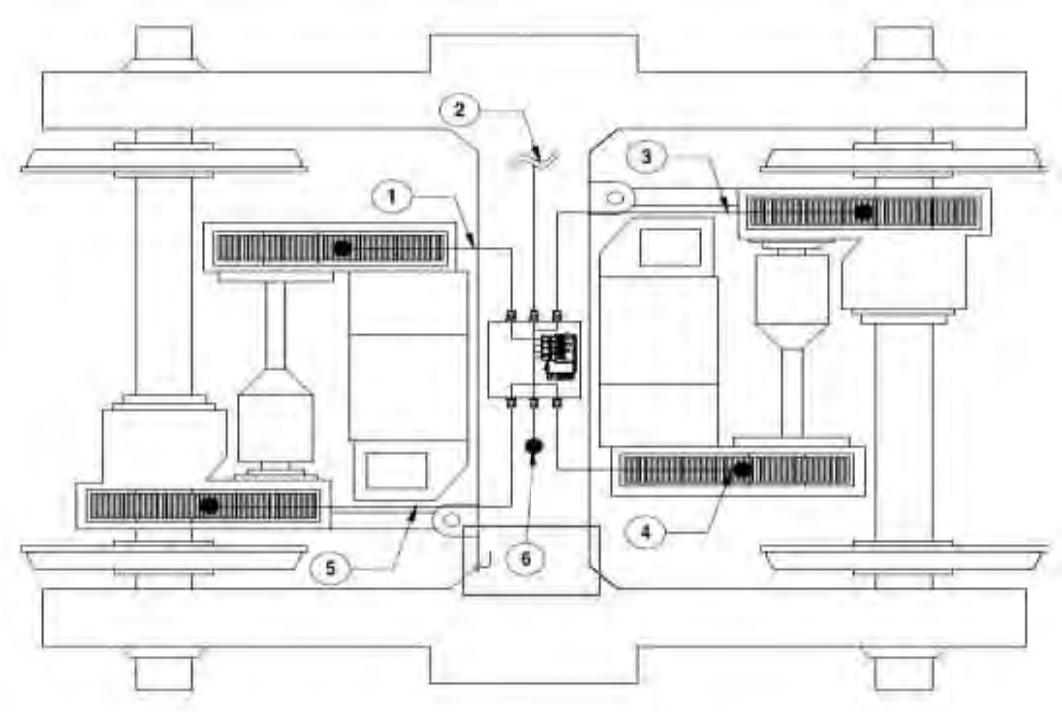



그림 2.2.59 대차 측정 위치 : ⑥

## 5. KTX-OBCS 연계 방안 설계

KTX 감속기 상태모니터링시스템의 궁극적인 설계개념은 원활한 운영과 경제적인 정비에 있다. 이러한 개념과 목적을 달성하기 위해서 열차 운행 중에 발생될 수 있는 감속기 관련 실시간 고장확인 등을 포함하여 향 후 예지보전(Predictive Maintenance)개념의 추이분석(Trend Analysis)을 통해 고장 심화시점의 예측과 모든 위험을 최소화할 수 있는 방안을 기술적인 방법으로 차량설계에 반영하여야 한다. 이와 같은 각종 감속기 관련 위험 및 고장예측을 사전에 감지할 수 있는 진단 및 감지 시스템의 구축은 고속열차 뿐만 아니라 모든 철도 시스템에 적용되어야 경제적이고 원활한 위험감시시스템이 구축된 철도시스템이라 할 수 있을 것이다. 이번 연구를 진행을 하면서 KTX 철도차량의 OBCS에 어떠한 방식으로 시스템을 연동을 하는 방안에 대하여 고민을 하게 되었다.

본 고속열차 감속기 모니터링시스템은 다음의 두 가지 확인 신호를 발생할 수 있다.

첫째, '실시간 고장확인' 은 현재 속도를 제어하고 확인하지 않으면 열차 운행 시 안전을 확보할 수 없을 정도의 장애를 의미하는 것으로 이는 감속기 부품의 고장으로 발생한 것일 수 있으며 램프의 점멸을 통해 신호를 발생하게 된다.

둘째, '고장예측(PDM)' 은 최근의 감속기의 건강상태를 다양한 진동 진단 파라미터, 온도, 윤활의 종합적인 진단기법 들을 통해 판단하여 가급적 빠른 시일 내에 정비 및 정밀진단이 필요한 정도의 고장예측상태를 의미하는 것으로 이는 감속기 부품의 고장으로 발생한 것일 수 있으며 램프의 점등을 통해 신호를 발생하게 된다.

저장된 데이터의 기록 및 세부알람의 확인은 열차 내에 배치된 시스템서버(Main Server)의 Display화면을 통해 확인할 수 있으며 매뉴얼을 통해 고장 코드 분석과 고장원인을 도출할 수 있다. 또한 데이터를 다운로드하여 정비센터에서 이를 정밀 분석하여 정비시점을 계획할 수 있도록 활용할 수 있으므로 일종의 차량하부의 상태모니터링 블랙박스와 같은 역할을 수행한다.

두 가지 확인 신호에 대한 내용을 운전실에 표시하는 방안으로는 다음 그림 2.2.60과 같이 구상을 하였다.

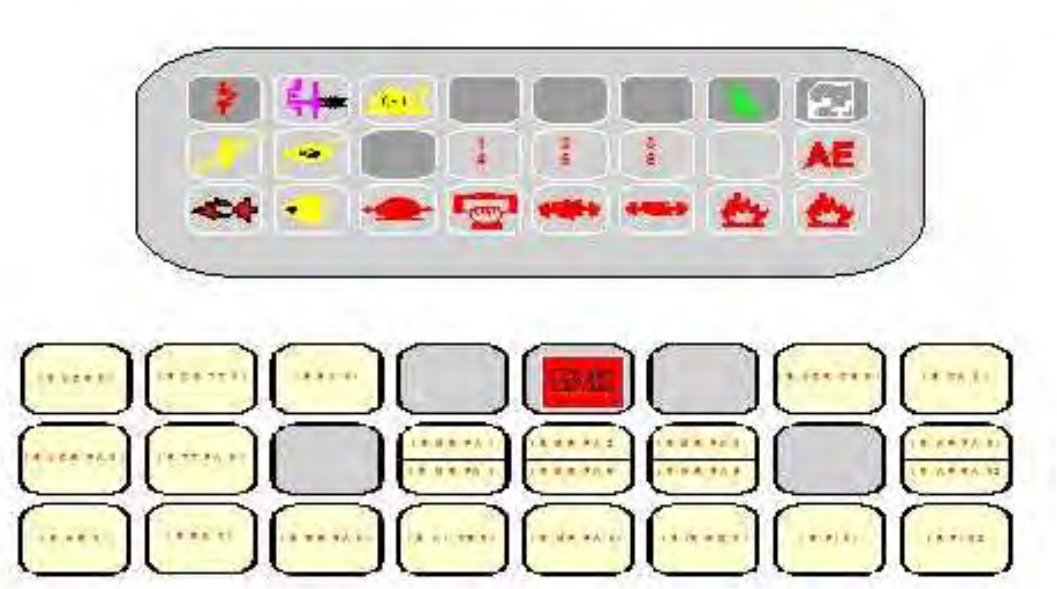



그림 2.2.60 OBCS 연계구상안 내용

그림 2.2.60의 “GMS” 램프는 감시하고 있는 감속기가 1개라도 문제가 있을 경우 현시되는 램프로서 감속기 관련 감지센서는 진동, 윤활, 온도로서 각 대차 위에 한 개의 Client에 연결되어 설정된 Thresholds를 초과하는 경우 점멸된다. 점멸속도는 1초에 한 번 일 경우에는 1개의 센서에 대한 이상신호를 의미하며 0.5초에 한 번 점멸할 경우에는 한 개의 감속기에 대한 이상 신호 (2개 이상의 센서)를 의미한다. 그리고 0.3초에 한 번 이상 초과 점멸할 경우에는 여러 개의 감속기에 대한 이상신호를 의미하므로 즉각적인 조치(속도조절 및 다른 신호와의 연관성 확인)가 요구된다. 이 램프가 계속 점등된 상태로 되면 당장의 위험신호를 의미하는 것은 아닌 예지보전개념의 정비가 필요함을 의미하며 서버에서 확인 또는 정비센터에 통보하여 확인 후 정비시점을 계획할 수 있도록 한다. 점멸신호는 점등지속신호보다 우선하여 발생하는 형식으로 표시가 된다.

OBCS 연계 시스템의 운행 중 동작은 270kph 이상의 속도에서 램프가 켜지면, 기장은 F1 조치를 시행하고 GMS 램프를 소등하고 매뉴얼을 확인한다. 매뉴얼은 기장에게 다음 사항을 조치토록 요구한다. 270 kph 속도 미만으로 감속하여 주행을 계속하고 CTC 관제사에게 통보함과 아울러 동력차의 로그 북에 기록한다. 재차 속도를 270 kph 이상으로 향상시켜 속도를 향상시켜 GMS 램프가 다시 점등되지 않으면 최고속도까지 운행할 수 있으나, 재 점등 시에는 안전을 위하여 270 kph 이하로 운전하게 되며 이 경우는 어느 정도 열차 지연을 예상할 수밖에 없다. 이러한 운전 상황은 정비를 위해 OBCS에 저장하는 방식으로 연계 방안을 수립하였다.

# 제3절 모니터링 시스템 연구 결과 및 검증

## 1. 모니터링 시스템 구축 결과 H/W, S/W

### 가. 하드웨어 구축

#### (1) 클라이언트 구축

2번의 설계 변경을 한 클라이언트는 다음과 같이 알루미늄 보호함으로 구성을 하여 최종적으로 구축을 진행을 하였다. 구축 하드웨어 Client는 열차 1편성 당 총 6대를 설치할 수 있도록 최종 제작이 되었으며, 주요 기능으로는 각각의 동력대차와 감속기의 진동 상태를 감시하고 서버와의 통신을 이용하여 진동데이터를 즉시 전달을 해주는 기능을 담당하게 된다.

이때 데이터의 수집이 매우 중요한 요소로 작용을 하게 되는데 속도 데이터의 경우 각 감속기에서 1개의 데이터를 가져오며 진동 데이터는 4개의 감속기에서 7채널에서 데이터를 수집하여 저장을 한다. 온도데이터는 2개의 구동축에서 각각 7채널 앞 차량과 뒤 차량 각각 외부 온도 2개의 채널로 총 16개의 채널로 구성이 되었다. 데이터를 취득하는 과정은 카운터 입력용 모듈을 통하여 전달되어진 Pulse 신호를 이용하여 각각의 Gear의 회전수를 산출해낸다. 수집된 센서 데이터를 이용하여 대차와 감속기 해당 부위의 진동 파라미터를 분석하여 진동 정보를 열차 운용자에게 디스플레이 하는 구조로 시스템은 작동하게 된다.

다음 그림 2.3.1은 최종 구축 클라이언트 결과 사진이다. 그림 2.3.2는 올해 시제품 제작을 진행하면서 구성한 서버 스토리지 제작 사진이다. 초기 설계된 내용 보다는 크기가 커지게 되었지만 모니터링 시스템을 구현하는데 별다른 문제점은 없었다.



그림 2.3.1 클라이언트 2차 모델






그림 2.3.2 서버랙 제작 사진

진동 모니터링 시스템의 서버는 열차 1편성에 총 2대를 설치할 예정이다. 서버는 상행/하행 구간으로 분리가 되어 열차를 관리하게 된다. 유의 할 점은 1대의 서버는 연산기능과 터미널 기능을 동시에 수행을 하게 되며 다른 1대의 서버는 터미널 기능만을 수행하게 된다. 이유는 취득되는 데이터를 확인하는 운용자는 1곳으로 둘 다 연산기능을 수행할 필요는 없다 그러나 시스템의 과부하와 데이터 취득 량에 대한 문제가 발생할 수 있기 때문에 2대로 운용을 할 수 있도록 설계를 하였다. 통신 방식은 TCP/IP 방식으로 클라이언트와 통신을 하게 되며 이더넷 방식으로 데이터를 수집하게 된다. 분석하는 진동 파라미터는 위에서도 언급 하였듯이 RMS, Overall, Peak-to-Peak, 1x, GMF, Crest Factor, Kutosis, BPFI, BPFO 등이 있다. 서버에는 별도로 GPS를 장착하여 열차의 운행 위치 정보를 전송할 수 있도록 시스템을 구성하였다. GPS 통신은 USB포트를 이용하여 RS-232 통신을 활용하는 방안으로 시스템을 설계하였다.

구축한 하드웨어의 진동 측정 샘플링 구현 입증을 위한 방법으로 하드웨어 구동 프로그램에 데이터 확인을 위한 임시 클라이언트 소프트웨어에 그래프 출력을 추가 하여 클라이언트에서 연산된 FFT 데이터 그래프를 확인을 하였다. FFT 연산 데이터는 이론적으로 실제 샘플링 데이터 주파수의 1/2 주파수 까지 확인이 가능하다. 하단의 그림 2.3.3 ~ 2.3.4를 보면 해당 X 축의 데이터 즉 주파수 영역이 6,400까지 표시되는 것을 확인할 수 있다.

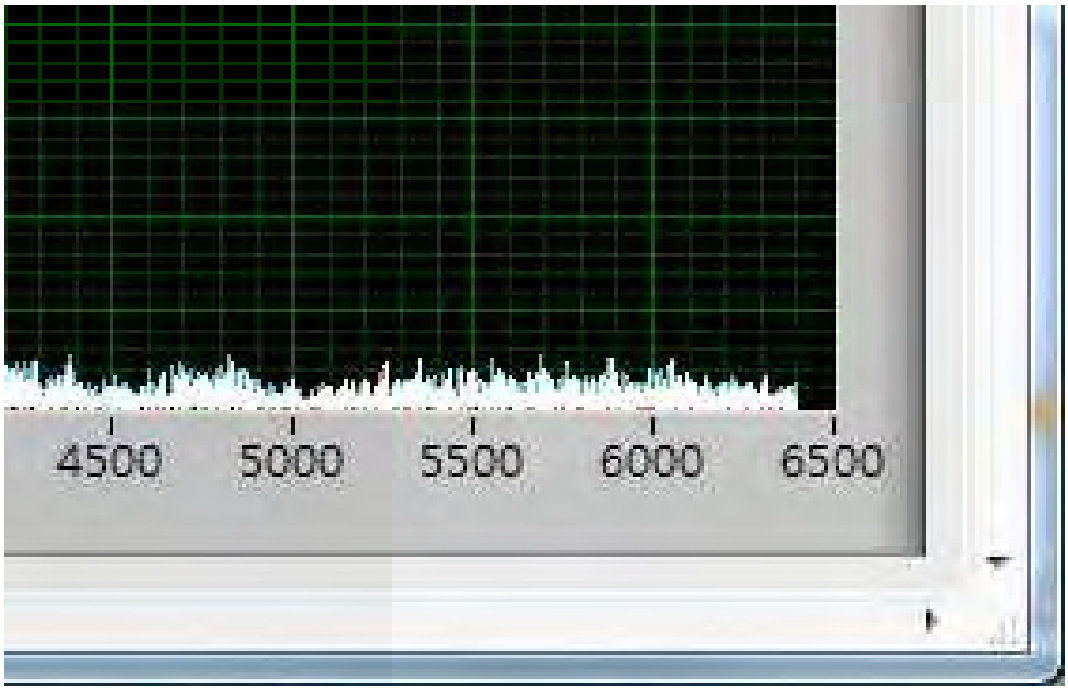



그림 2.3.3 X축 데이터의 최대값 확인 화면

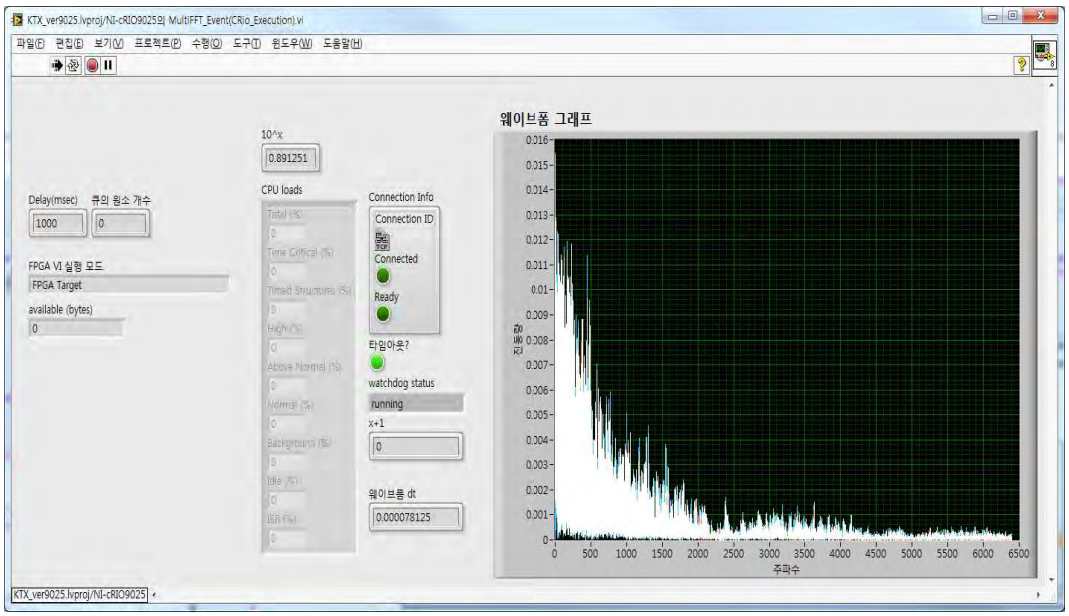



그림 2.3.4 Client에서 연산된 FFT 데이터 그래프

수집된 Waveform 원본 데이터의 데이터 간 시간 간격을 출력을 확인한 결과 0.000078125의 값이 출력이 되는 것을 확인할 수 있었다. 즉 1초를 0.000078125로 나누면 12,800 S/s의 값이 산출이 되는데 이는 초당 12,800개의 데이터를 샘플링 하는 것으로 최종 확인이 가능 하였다. 다음 그림 2.3.5는 본 설명에 대한 검증 소프트웨어 구동 화면을 표시한 것이다.

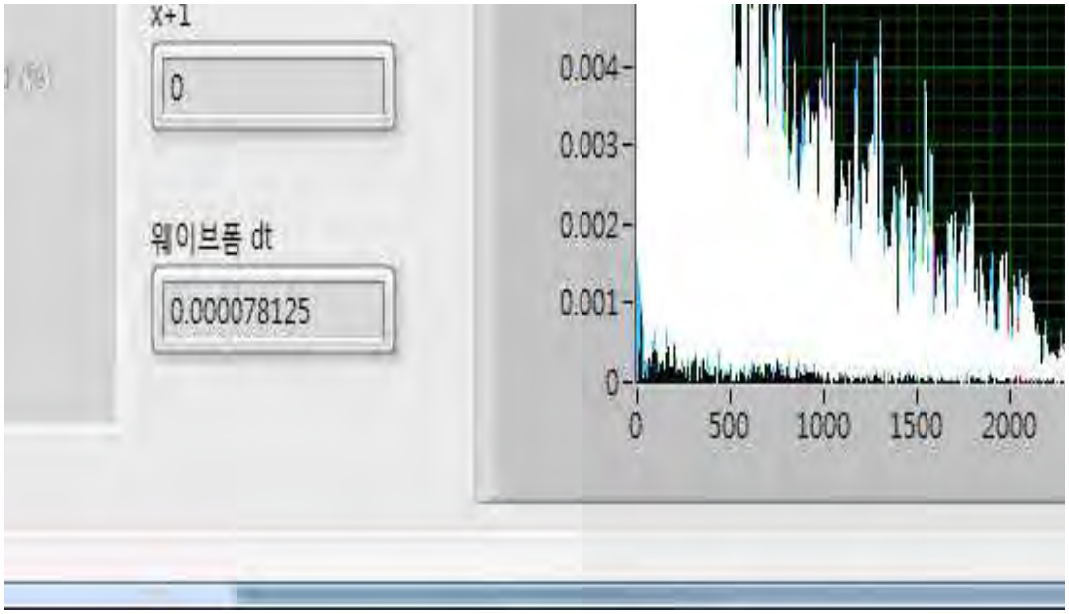



그림 2.3.5 수집된 웨이브 폼의 데이터 시간간격 출력 화면

나. 소프트웨어 구축

(1) 소프트웨어 구축

구축된 소프트웨어는 FFT, FPGA, RMS를 측정하여 연산처리를 한 후 감속기와 대차의 이상을 진단하는 기능을 수행하는 기능으로 구축을 하였다. 진동 신호의 진원지를 파악을 하여 데이터를 축적을 하고 데이터를 축적 하면 진동 신호를 구축된 알고리즘에서 분석을 실시간으로 하여 운전자에게 통보가 되는 시스템으로 최종적으로 구현을 하였다.

보조시스템은 측정한 진동, 온도, 윤활 결함 파라미터를 연산 처리하여 각종 파라미터 신호로 다시 추출을 한 후 메인시스템에 전송을 하게 되고 수진된 정보를 활용하여 감속기와 대차의 진동, 온도, 윤활에 대한 이상을 예측을 하여 사용자에게 결과를 디스플레이 하게 됨으로서 사용자가 적절한 시기에 효율적인 보수 및 관리를 할 수 있도록 도와주는 시스템으로 최종적으로 소프트웨어를 구현을 하였다. 특히 설계된 알고리즘에서는 결함의 확률과 분호, 열차의 특성 요소를 분석할 수 있도록 하여 고속열차 차량에 적합한 소프트웨어를 구현을 할 수 있었다.

측정되는 신호는 감속기 손상 메커니즘에 대한 분석 정보를 담고 있으며 손상 영향에 대한 결과는 향 후 감속기와 대차의 효율적인 유지보수의 기초 자료로 활용 가치가 매우 높다고 판단이 된다. 다음 그림 2.3.6은 구축된 소프트웨어의 결과 화면을 표현한 내용이다.

그림 2.3.6을 보면 진동 파라미터 화면은 그래프를 이용하여 실시간으로 열차속도, 진동량 등 각 파라미터별 진동 수치를 표시를 해주고 변화 추이를 계속 확인이 가능하도록 개선을 하였다. 온도 화면은 각 포인트 별로 온도를 한 번에 확인이 가능하도록 구성을 하여 사용자의 편의성을 최대한 고려를 하여 구축을 완료 하였다.

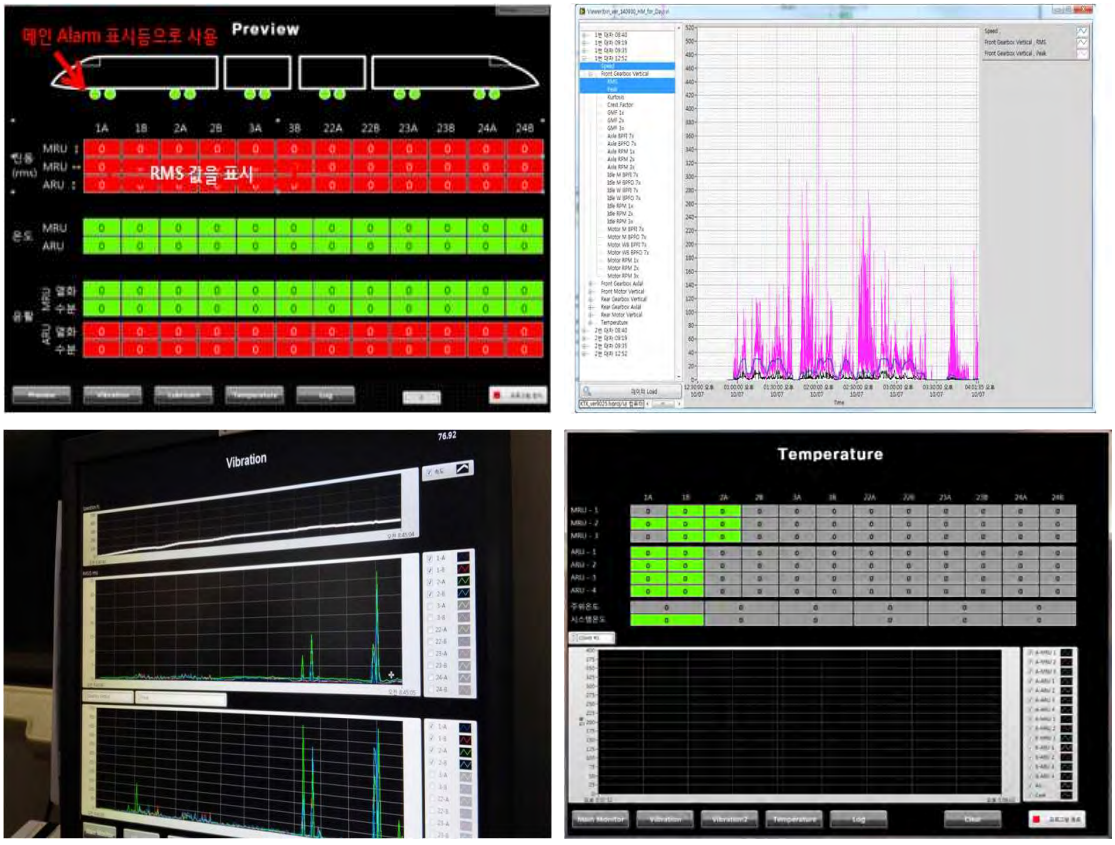



그림 2.3.6 소프트웨어 구성 화면

소프트웨어를 구현 하는데 큰 어려움은 없었지만 이 후에 불미스러운 사고가 발생을 하였을 경우 과거의 데이터 이력을 조회하는 기능을 추가하는 것을 고려를 하게 되었다. 과거의 데이터 이력조회 기능을 추가를 하게 되면 저장이 되는 엄청난 데이터 양으로 인하여 하드웨어에 많은 무리가 발생을 할 가능성이 있어 이 부분에 대한 시스템을 구현 하는데 많은 제약 조건이 있었다. 이러한 기능을 추가를 하기 위해서 통신 방식에 대한 소프트웨어의 구조 변경을 수행을 하였다. 다음 그림 2.3.7~2.3.8은 데이터 이력 조회 기능을 추가하기 위한 소프트웨어의 구조 변경 설계를 하는 구성 화면의 내용이다.

특히나 소프트웨어의 정확한 구현을 위하여 열차 주행을 하면서 KTX 고속열차의 특성 진동 주파수에 대한 내용을 알고리즘에 적용을 하였다. 다음 표 2.3.1은 KTX 각 부품별 진동 특성 주파수를 정리한 내용이다. 정리한 데이터를 응용하여 알고리즘에 적용을 하였다. 다음 표 2.3.1은 최종 소프트웨어에 적용을 한 감시 진단 파라미터 이다.

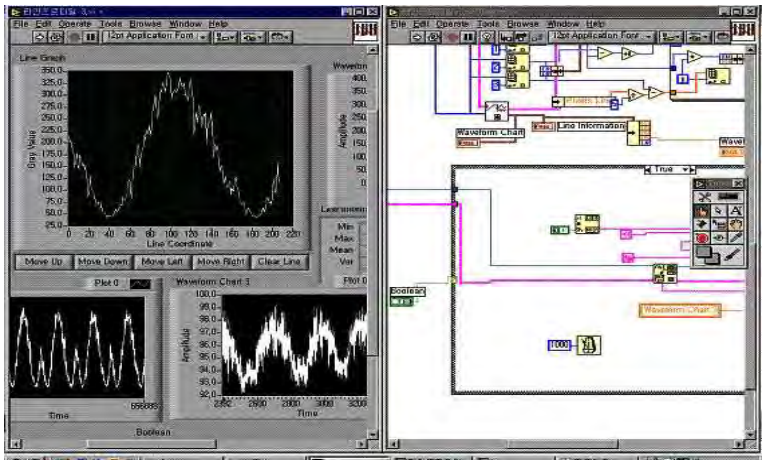


그림 2.3.7 소프트웨어 구조 변경 설계 화면

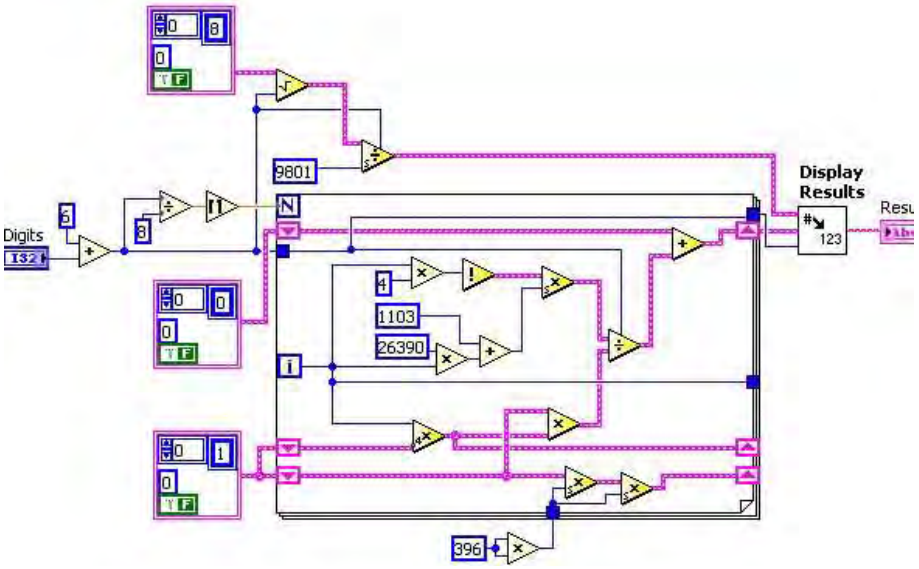



그림 2.3.8 소프트웨어 구조 변경 설계 화면

표 2.3.1 감시 및 진단 알고리즘이 포함된 감시 파라미터

| Parameters | 설 명 |
|---|---|
| Peak / RMS<br>Crest factor | • 파형의 첨예한 정도를 나타내며 값이 클수록 열차의 진동 충격이 심하다는 것을 의미 |
| GMF | • 기어의 이빨이 맞물리는 부분 상태를 의미하는 것으로 기어의 편심, 치형 마모, 과도 백래쉬의 상태를 진단하기 위하여 선정 |
| GMF 2X, 3X | • 기어의 Misalignment 등을 진단하기 위하여 선정 |
| BPFI 7X | • 베어링 내륜 주파수 7배 성분<br>• 베어링의 외륜, 내륜에 손상이 가면 베어링 주파수의 특성은 고주파에서 주파수가 감지가 되어 점차 저주파수로 옮겨가면서 주파수가 나타남. 초기 베어링 결함을 감지하기 위하여 선정 |
| BPFO 7X | • 베어링 외륜 주파수 7배 성분 |
| 1X Shaft | • 고속열차 감속기 축에서 Unbalnce, Angle Misalignment, 치의 절손 등이 발생하게 되면 1x의 주파수가 발생. 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 2X Shaft | • 감속기 축에서 Offset Misalignment가 발생하면 shaft 2~3X의 주파수가 발생. 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 7X Shaft | • 감속기 축에서 Looseness가 발생하면 shaft 3~8X의 주파수가 발생. Looseness가 발생하는 이유는 기계적 조립상태에 문제가 있는 것으로 조기 이러한 결함을 검출하여 조치를 취하기 위하여 선정 |
| Kurtosis | • 베어링과 기어에서 발생하는 충격진동의 파형의 첨도(尖度)를 나타내는 것으로 파라미터 선정 |

다음 표 2.3.2는 알고리즘에 진단 기준으로 활용된 KTX 감속기 부품별 고유 진동수를 정리한 내용이다.

표 2.3.2 KTX 진동 분석 파라미터

| Parameters | Additional (harmonics) | 120 km/hr | 290 km/hr |
|---|---|---|---|
| GMF Axle | ~3X | 588.5 Hz | 1422.2 Hz |
| GMF Trans & Drive | ~3X | 682.1 Hz | 1648.4 Hz |
| 1X Axle Axis | ~10X | 11.5 Hz | 27.9 Hz |
| 1X Axle Gear R | ~10X | 13.4 Hz | 32.3 Hz |
| 1X Trans | ~10X | 16.6 Hz | 40.2 Hz |
| 1X Drive | ~10X | 25.3 Hz | 61.1 Hz |
| Motor reduction unit output gear bearing | | | |
| NU2315 BPFI (1X) | ~10X | 95 Hz | 230 Hz |
| NU2315 BPFO (1X) | ~10X | 65 Hz | 158 Hz |
| NU2315 BSF (1X) | ~10X | 5 Hz | 13 Hz |
| NU2315 FTF (1X) | ~10X | 34 Hz | 83 Hz |
| NUP2314 BPFI (1X) | ~10X | 95 Hz | 230 Hz |
| NUP2314 BPFO (1X) | ~10X | 65 Hz | 158 Hz |
| NUP2314 BSF (1X) | ~10X | 5 Hz | 13 Hz |
| NUP2314 FTF (1X) | ~10X | 34 Hz | 83 Hz |
| Transmission gear Wheel bearing | | | |
| NU2315 BPFI (1X) | ~10X | 119 Hz | 286 Hz |
| NU2315 BPFO (1X) | ~10X | 81 Hz | 196 Hz |
| NU2315 BSF (1X) | ~10X | 7 Hz | 16 Hz |
| NU2315 FTF (1X) | ~10X | 43 Hz | 104 Hz |
| NUP 2314 BPFI (1X) | ~10X | 119 Hz | 286 Hz |
| NUP 2314 BPFO (1X) | ~10X | 81 Hz | 196 Hz |
| NUP 2314 BSF (1X) | ~10X | 7 Hz | 16 Hz |
| NUP 2314 FTF (1X) | ~10X | 43 Hz | 104 Hz |
| Driving Pinion bearing | | | |
| NU2220 BPFI (1X) | ~10X | 231 Hz | 558 Hz |
| NU2220 BPFO (1X) | ~10X | 173 Hz | 419 Hz |
| NU2220 BSF (1X) | ~10X | 11 Hz | 26 Hz |
| NU2220 FTF (1X) | ~10X | 87 Hz | 209 Hz |
| Demodulation(Peakvue) | | | |
| Overall RMS | | | |
| Crest factor | | | |
| Special sidebands | | | |
| Natural frequencies | | 697,790,1045,1845 | |

## 2. 모니터링 시스템 성능시험

### 가. 감속기 최적 측정위치 선정 시험 – 2012년 3월

#### (1) 진동 특성 분석 시험

##### (가) 시험의 개요

KTX 감속기 진동의 특성을 파악하기 전에 고속열차와 유사한 환경의 부산 지하철 전동차의 진동 특성 시험과 감속기 실물시험을 한국철도기술연구원에서 진행하게 되었다. 지하철 전동차에서 시험을 진행하게 된 이유는 전동차는 수시로 열차 운행 환경이 바뀌는 것과 달리 운행 환경이 지속적으로 일정하여 전동차 감속기의 진동 특성을 명확하게 파악이 가능한 장점이 있었다. 또한 KTX 감속기 모니터링 시스템 개발의 설계를 위한 다양한 열차 진동특성검토와 비교 데이터의 확보의 일환으로서 KTX 감속기 및 대차의 진동 측정 또는 다른 형식의 열차 감속기에 대한 진동 측정의 필요성에 의해 수행되었다. 1차 측정과정으로 전동차, KTX산천 열차 등에 대하여 실시하였으며 이 결과로 측정한 데이터는 향후 진동 특성 Parameter(파형, 주파수범위, 주파수 특성 등), 센서의 부착위치, 센서의 종류 등을 파악하는데 활용할 목적으로 시험을 진행하게 되었다. 다음 표 2.3.3은 시험 측정 조건 및 시험의 전반적인 조건을 정리한 내용이다.

표 2.3.3 시험 측정 조건 내용 정리

| | |
|---|---|
| **측정 대상 실물 또는 실차** | • 한국철도기술연구원 실험실 전동차 실물시험<br>• 부산교통공사 1호선 전동차 실차시험(6량) 노포 – 신평역 왕복구간<br>• 한국철도공사 KTX 산천(8량) 고양 행신차량기지–여수엑스포역–익산 구간 |
| **측정기간** | • 2012년 3월 8~18일<br>• 3월 8일 : 한국철도기술연구원 전동차 실물시험<br>• 3월 15일 : 부산교통공사 전동차 실차시험(6량) 노포 – 신평역 왕복구간<br>• 3월 19일 : KTX 산천(8량) 고양 행신차량기지–여수엑스포역–익산 구간 |
| **가동조건** | • 실물 시험 시 부하/무 부하 조건 (부하 2580 kNm)<br>• 실물 시험 시 저속/상업운전속도/고속 조건 (50/80/100km/h)<br>• 실차 시험 시 과도운전상태/정상운전상태 조건 (정거장 정류/가속/감속) |

시험을 진행을 하면서 산업용 발전 설비의 진동을 측정하는 장비들을 투입을 하여 시험을 진행을 하였다. 산업용 측정 장비를 활용한 이유는 기본적으로 산업용 장비가 철도차량의 진동 측정에서 어느 정도 신뢰성 있는 진동 데이터를 취득하는지를 보기 위함 이였으며 향 후 모니터링 시스템을 구축을 하였을 때 참고 자료로 활용하기 위함이었다. 다음 표 2.3.4는 시험에 투입한 산업용 장비의 사양을 정리한 내용이다.

표 2.3.4 (1) 산업용 진동 측정 포터블 장비

| 측정 장비명 | Potable 진동 및 소음 분석 (Model: 2130) |
|---|---|
| 장 비<br>사 진 |  |
| 측 정<br>내 용 | • 제조사 : CSI (Emerson, 미국)<br>• 주파수 범위 : Dc to 80KHz<br>• 분해능 : 1/3 Octave,100 to 12,800 line<br>• 평균화 기법 : Normal, Peakhold, Order tracking, Synchronous Time,<br>• 입력 신호 평균 : 1 to 9999<br><br>• 분석 기능 : spectra, Waveform, 1/3 Oct. A-weighting, Phase, Bode/Nyquist , Transient, Balancing, Laser alignment, Cross spectrum & Phase, Bump test, Cascade, Route and Off route , ODS and etc<br><br>• 측정 파라메터: 가속도, 속도, 변위<br>• 주파수 형식 : Hz, CPM, Order<br>• 센서 : 진동-Accelerometer (Sensitivity: 0.1V/g)<br>소음-Microphone (Sensitivity: 0.05835mV/EU;dB)<br><br>• 데이터 분석 속도<br>Real-time : 19 KHz(max)<br>400-line Spectrum : 40 avg/sec<br>1600-line Spectrum: 12 avg/sec |
| 비 고 | 회전 설비 교정, Gear Box, Turbine, Motor ,Pump, Blower,<br>기타 진동, 소음 분석, 고유주파수 분석, 위상분석 외 |

표 2.3.4 (2) 산업용 진동 측정 온라인 모니터링 장비

| 측정 장비명 | On-line Multiple channel 진동 분석기<br>(Model: 6500) |
|---|---|
| 장 비<br>사 진 |  |
| 측 정<br>내 용 | • 제조사 : CSI (Emerson, 미국)<br>• 주파수 범위: Dc to 40KHz, Transient DC to 2KH<br>• 분해능: 200 to 6,400 line<br>• Dynamic Range : > 80dB<br><br>• Prediction : 24 channel의 주기적 진동 data 관리.(Trend)<br>• Protection : 12card에서 감시하는 Shaft(터빈)보호기능, 6500 module에서 발생시키는 Trip 신호를 통해 진동 상승 시 Shaft Shout down<br><br>• 주요 기능 : spectra, Waveform, RPM의 live viewing, 주요 분석 파라미터(1X, 2X, 3~8X, overall, crest factor, Gap orbit, HFD etc...), Phase, Transient, Relay etc...<br><br>• 측정 파라미터: 가속도, 속도, 변위<br>• 주파수 형식 : Hz, CPM, Order<br>• 센서 : 진동-Accelerometer (Sensitivity: 0.1V/g, 0.01V/g)<br><br>• 데이터 분석 속도<br>Spectrum scan rate : 400Hz, 400line, 평균횟수 1회 조건에서 초당 2 channel scan |
| 비 고 | 각종 회전 설비(Gear Box, Turbine, Motor ,Pump, Blower, etc...)기타 진동, 위상분석, 과도분석 외 |

표 2.3.4 (3) 산업용 진동 측정 온라인 모니터링 장비

| 측정 장비명 | Multiple channel 분석 장비<br>(Model: LMS) |
|---|---|
| 장 비<br>사 진 |  |
| 측 정<br>내 용 | • 제조사 : LMS (LMS, 벨기에)<br>• 진동 FFT 주파수 범위 : Dc to 100KHz<br>• 8 Channel Input, 2 Channel speed detecting, 2 Channel I/O relay.<br><br>• 분석 기능 : Basic(Absolute, Arctangent, Triggering, Cosine, Differentiation, Exponential, Integration, Log, Max, Min, Phase) Level(Envelope, Noise level, RMS) Filter(Digital filter, A B C D Z-weight edfilter) Spectra(FFT, PSD, Auto power, FRF, Window) Octave(1/1~1/24 Octave) Order(Single order, Order spectrum, Synchronized order, Order filter) Acoustics(Articluation index, Loudness) Smoothing Counting(Time level evaluation, Rain flow counting) Strain Gauges<br><br>• 측정 파라메터: 가속도, 속도, 변위, DB<br>• 주파수 형식 : Hz, CPM, Order, Octave<br>• 센서 : 진동-Accelerometer (Sensitivity: 0.1V/g, 0.01V/g)<br>소음-Microphone (Sensitivity: 0.05835mV/EU;dB)<br>응력-Strain gage (Micro $\varepsilon$ 미소변위)<br>기타 digital audio, V, etc... |
| 비 고 | 각종 회전 설비(Gear Box, Turbine, Motor ,Pump, Blower)<br>기타 지반 및 건물 진동, 소음 분석, 고유주파수 분석, 위상분석, 스트레인 게이지(변형률)분석 외 |

시험을 측정을 하면서 측정 대상 및 주요 진동의 분석 범위를 설정을 하는 것이 가장 우선시 하여야 할 공정 이였다. 다음 표 2.3.5는 측정 대상 및 분석 범위를 정리한 내용이다.

표 2.3.5 측정 대상 및 주요 분석 범위

| 측정 대상 | 주요 분석 범위 | 비 고 |
|---|---|---|
| **전동차 실물시험** | • 최고운전속도(100km/h)에서 모든 측정 점의 위치별 진폭, 주파수 비교<br>• 무부하 순차 속도(과도상태운전, 정상상태운전 ; 50km/h, 80km/h, 100km/h)에서 감속기의 진동 진폭 및 주파수 비교 분석.<br>• 부하(2580 kNm) 순차속도에서 감속기의 진동 진폭 및 주파수 비교 분석. | 한국철도기술연구원 실험동 |
| **전동차 실차시험** | • 신형감속기와 구형감속기의 주파수 및 진폭비교<br>• 감속기와 대차의 진동특성비교<br>• 구간별 진동특성비교<br>• 실물시험과 실차시험의 진동특성비교 | 부산교통공사 1호선 |
| **KTX산천 실차시험** | • 1차/2차 감속기의 진동특성비교<br>• 감속기와 대차의 진동특성비교<br>• 구간별 진동특성비교 (속도별) | KTX산천 고양-여수 |

(나) 전동차 실물 시험

① 시험조건

철도기술연구원 실험실에 설치되어 있는 실험용(실물 전동차 대상) Motor-Gearbox설비의 가동 중 현재 진동상태와 주파수 분석을 확인하기 위하여 Potable 2130 Machine analyzer 장비로 해당 설비 Motor의 DE측(Inboard), NDE측(Outboard), Gearbox의 각 Shaft측의 DE측(Inboard), NDE측(Outboard)의 베어링 근접부에 각 각 수평(H; Horizontal), 수직(V: Vertical), 축(A: Axial)방향을 순차적으로 진동 측정하였다. 측정 후 진동 값이 대폭 높은 위의 그림 중 5point를 선정해 다채널 진동 분석 장비(6500, LMS)로 1차(무부하조건) 및 2차(부하조건)에서 50, 80, 100km/h 속도로 30분씩 test를 실시하였다. 계측기의 기본 설정 값은 다음과 같다.

- CSI 2130 : 1600~6400Line, Fmax 8500Hz
- CSI 6500 : 3600 Line, Fmax 2000Hz
- LMS : 1800 Line, Fmax 3072Hz

다음 그림 2.3.9는 시험 측정 당시 감시 포인트를 선정한 내용이며 다음 그림 2.3.10은 당시 시험 측정 사진이다.

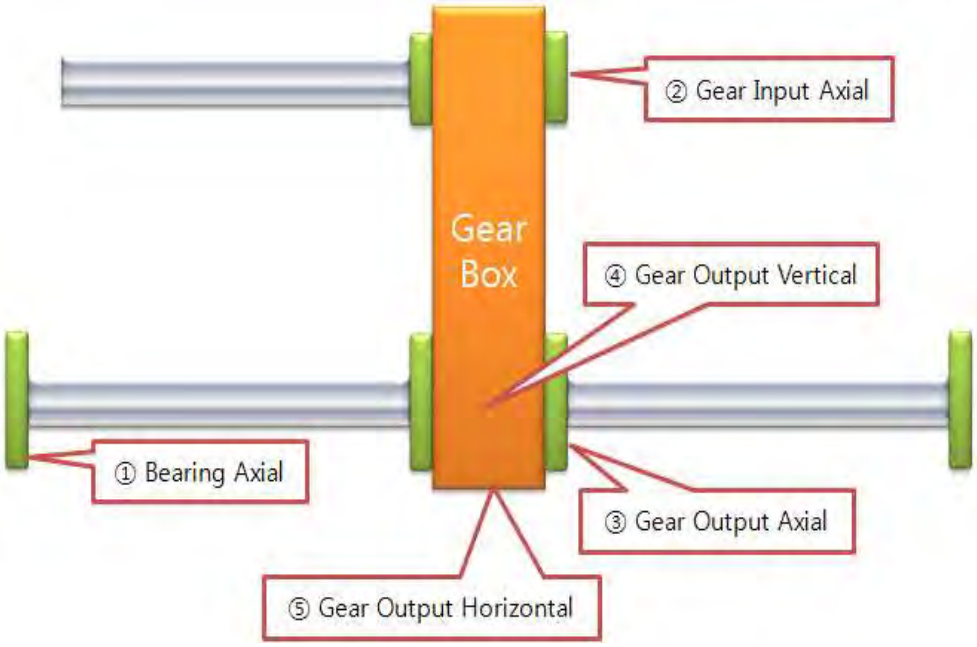


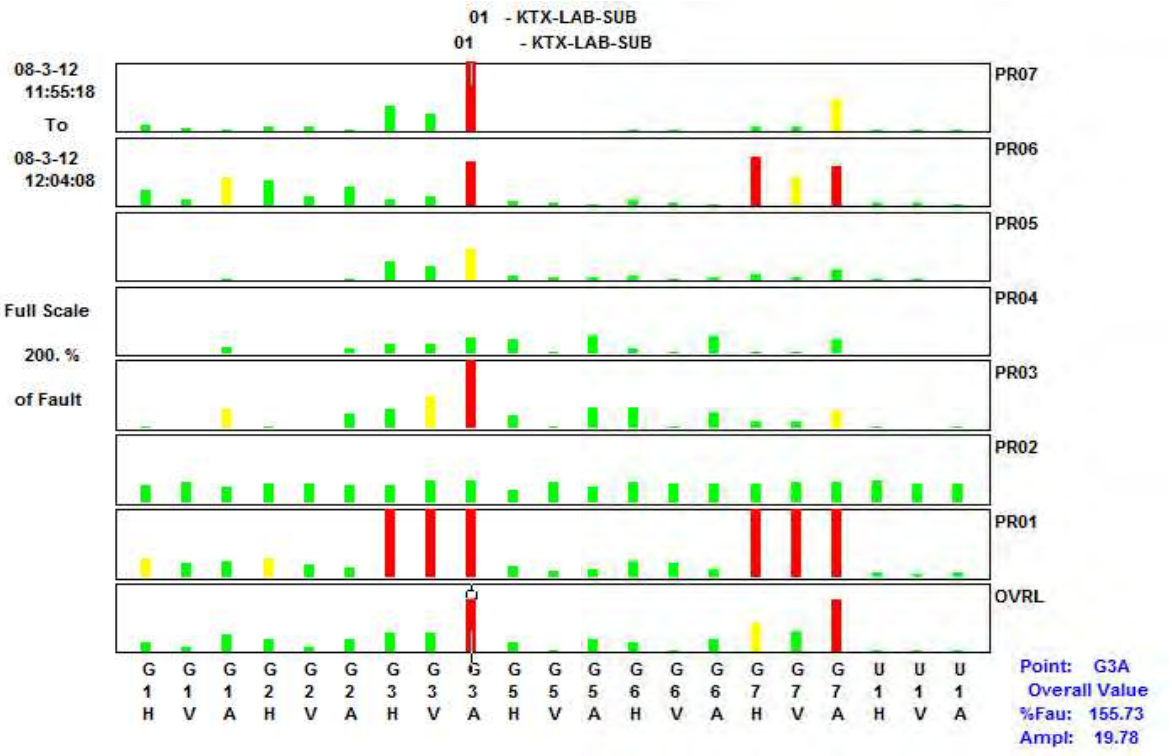

그림 2.3.9 감속기 실물 시험 측정 포인트



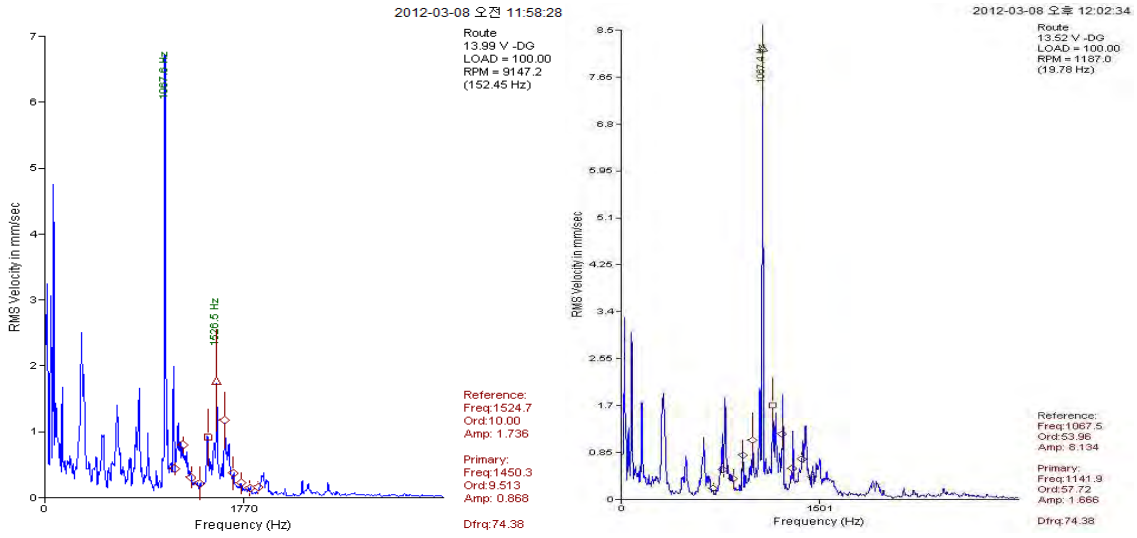
그림 2.3.10 시험 측정 현장 사진

② 시험 측정 결과

○ 최고운전속도(100km/h)에서 모든 측정 점의 위치별 진폭, 주파수 비교 – 철도연 실물 시험




(a) 전체 Overall 및 Parameter Profile




(b) G3A (c) G7A

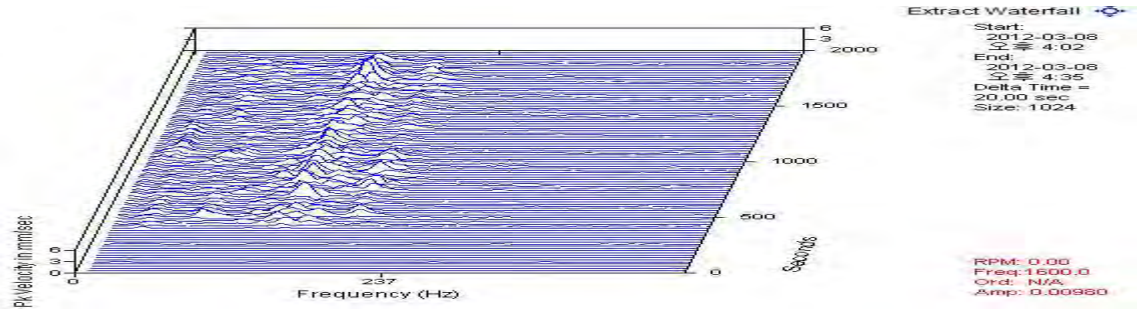
그림 2.3.11 최고운전속도(100km/h) 진폭 및 주파수

그림 2.3.11의 프로파일 그래프는 감속기 실물시험에서 가상으로 수행한 상업운전속도(100km/h)에서의 Profile 분석 그래프이다. 모든 측정 점의 (mm/s rms)을 각 parameter별로 표현한 것으로서 G3A(Shaft2 1st Gearbox Inboard Axial G7A(Shaft2 Main Gearbox Inboard Axial)방향에서 가장 높은 Overall 값(약 19mm/s rms)을 나타내고 있다. 전체적으로 높은 진동량을 나타내고 있는 G3A와 G7A의 Spectrum을 보면 비슷한 형태의 주파수가 관찰된다. 가장 높은 1067Hz중심으로 sideband가 1X(Pinion Shaft 76Hz)로 형성되고 1067Hz가 1X의 Harmonic 성분인 것으로 보아 기어 맞물림 주파수와 함께 Pinion에 연결된 Shaft에 결함이 있는 것으로 파악이 되었다.

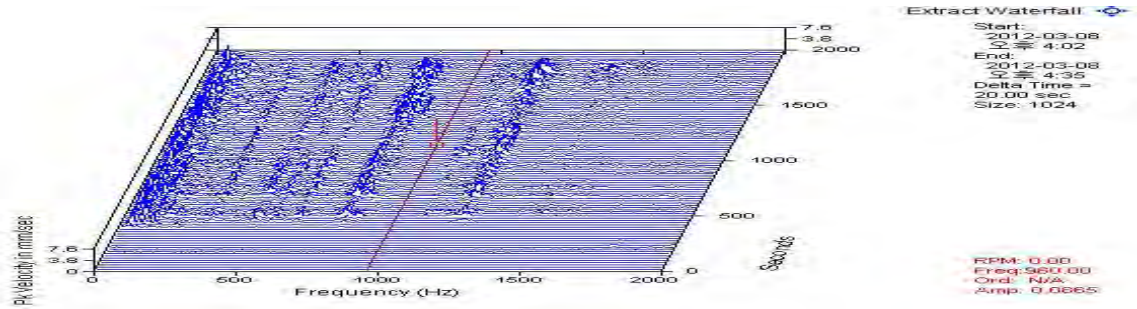
- 100m × 1000 ÷ (3600s × 0.82m ×3.14) = 10.79 Hz[Cycle/s]
  (Gear 잇수 : 99, Pinion 잇수 : 14) GMF : 10.79 × 99 = 약 1068Hz

○ 무부하 순차 속도(과도상태운전, 정상상태운전; 50km/h, 80km/h, 100km/h)에서 감속기의 진동 Trend 진폭 및 주파수 비교 분석 – 철기연 실물 시험

그림 2.3.12의 첫 번째 그래프는 무 부하 순차속도(50, 80 100km/h)에서의 5포인트(① Bearing Axial, ② Gear Input Axial, ③ Gear Out Axial, ④ Gear Output Vertical, ⑤ Gear Output Horizontal)의 Transient; cascade그래프와 진동 Trend 그래프이다. 약 33분 동안 전체 주파수대역의 주파수 형태와 진동량을 표현한 것으로 그래프를 보면 과도상태에서 진동량이 상승하고, 정상운행상태에서도 상당히 불규칙적인 진동량과 주파수가 관찰된다. Bearing Axial측에 비해 Gearbox In/Output 쪽에서 비교적 높은 진동량과 다양한 주파수가 관찰되는 결과를 확인할 수 있었다.

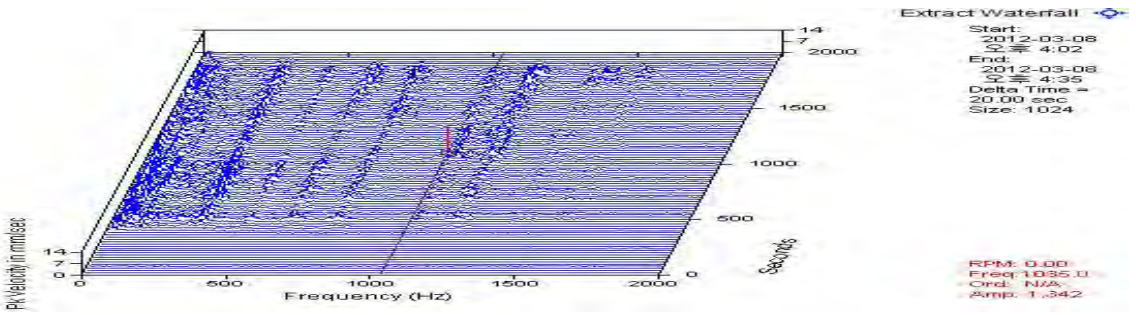



① Bearing Axial

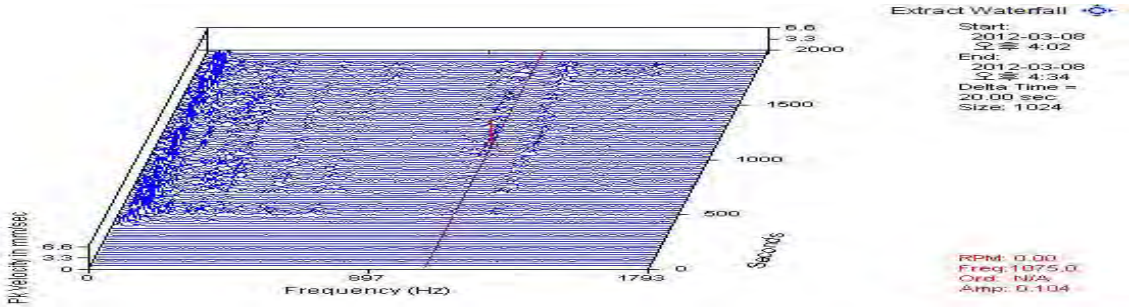



② Gear Input Axial

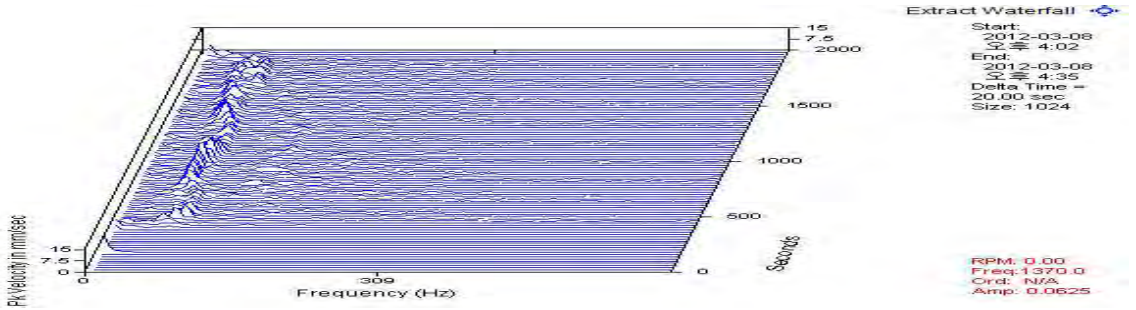
그림 2.3.12 (1) 무부하 순차속도에서의 5포인트 그래프




③ Gear Output Axial

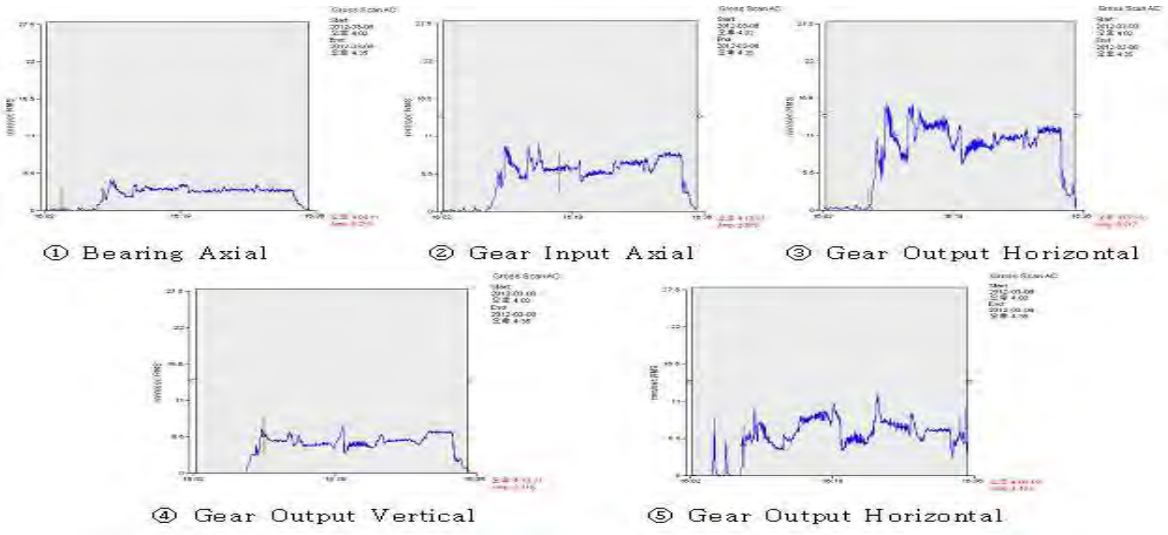



④ Gear Output Vertical




⑤ Gear Output Horizontal

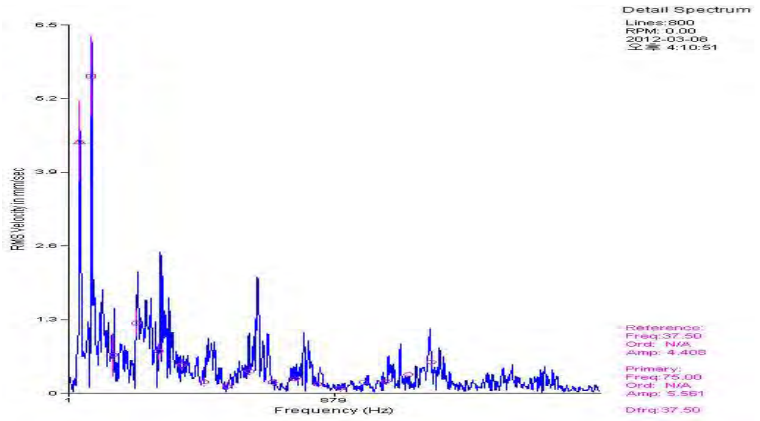
<Casacade 그래프>



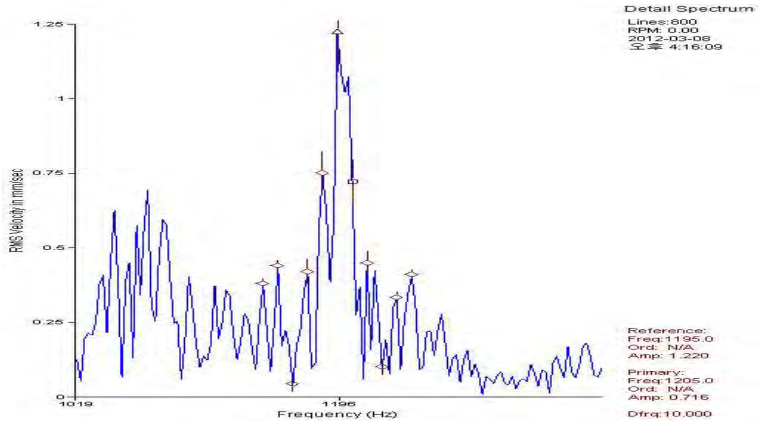

<Overall Trend>

그림 2.3.12 무부하 순차속도에서의 5포인트 그래프

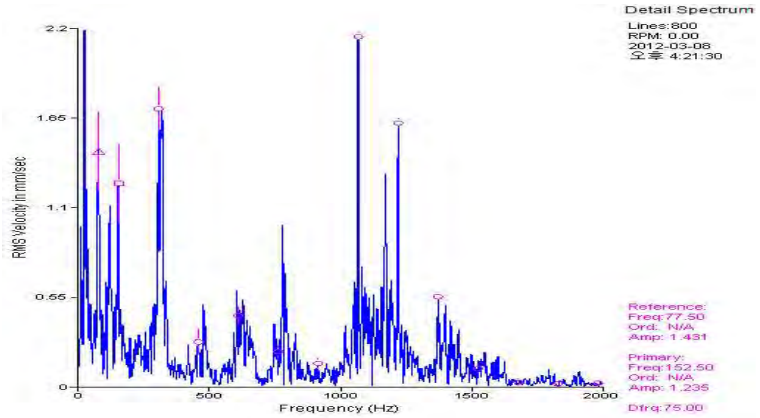
다음 그림 2.3.13의 그래프는 진동량이 가장 높은 Gear Output Horizontal방향의 속도별 운전상태를 나타낸 그래프이다. 50km/h의 운전상태일 때 Pinion Shaft 1X(38Hz)의 성분과 2X의 성분이 높게 나타나는 것으로 보아 Shaft축의 Unbalance(질량 불 평형)나 Mis-Alignment(축 정렬 불량)의 결함이 있는 것으로 추정된다. 80km/h의 운전 상태에도 1X, 2X성분이 주요 주파수로 상승해 있고, GMF 851Hz(8.6Hz × 99)가 아닌, 1195Hz성분이 Gear Shaft 1X(약 9Hz) Sideband와 함께 상승하는 Bearing주파수로 추정되는 결과를 확인할 수 있었다.




① 50km/h Geaer Output Horizontal




② 80km/h Gear Output Horizontal

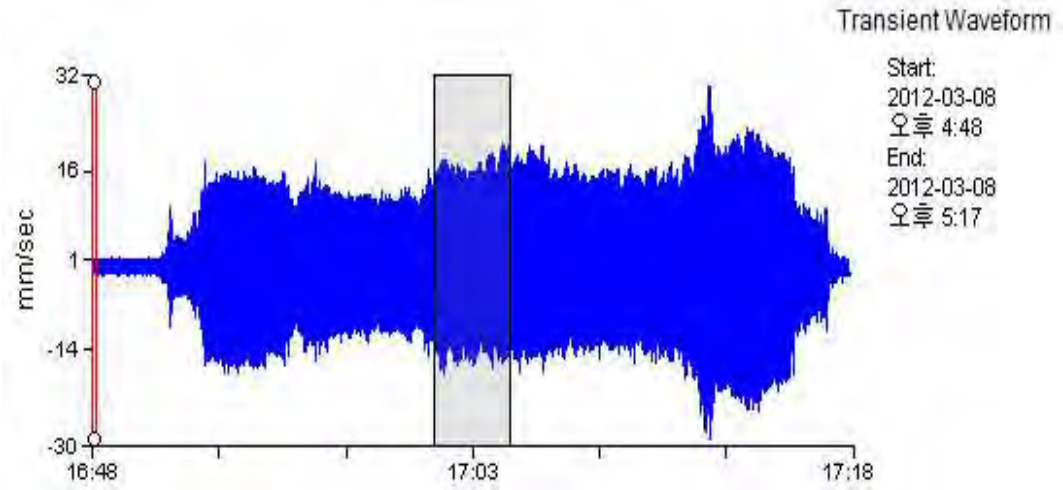



③ 100km/h Gear Output Horizontal

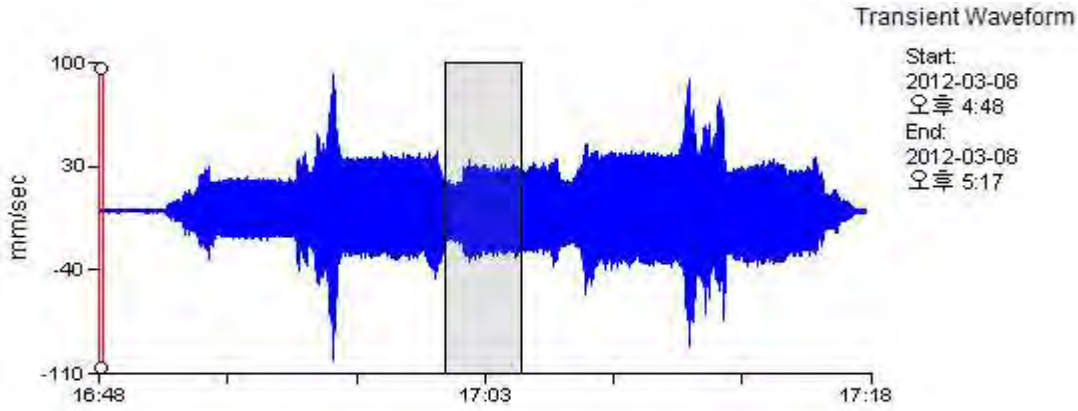
그림 2.3.13 Gear Output Horizontal방향의 속도별 운전상태

○ 부하(2580 kNm) 순차속도에서 감속기의 진동 진폭 및 주파수 비교 분석 – 철도연 실물 시험

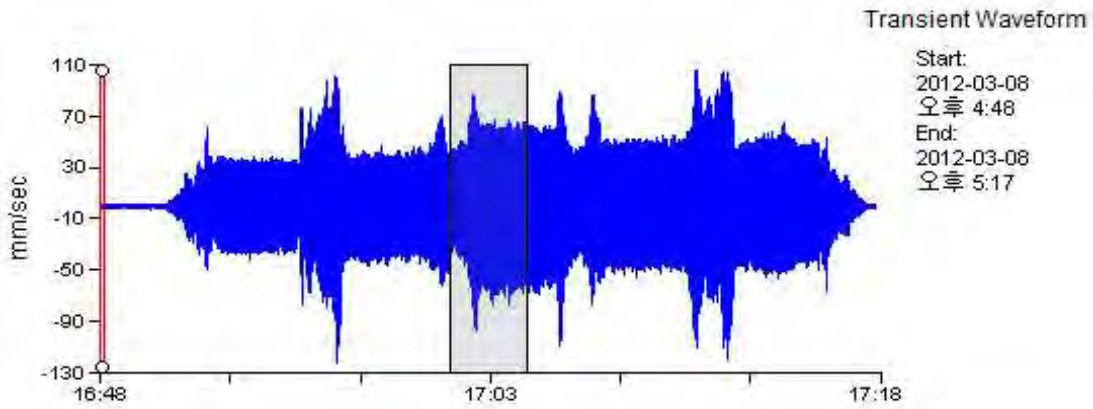
부하 순차속도 시험에서 감속기의 진동 진폭 및 주파수 비교 분석을 하는 시험을 진행을 하였다. 시험을 수행한 결과 전체적으로 Overall값이 높은 가운데 Time waveform 형태를 보면 과도상태(50 –> 80km/h, 80 –> 100km/h)에서는 진동량이 크게 상승하고 정상운전상태 에서는 안정적인 진동량을 보이는 결과를 확인할 수 있었다. 다음 그림 2.3.14는 그 결과 값이다.




① Bearing Axial

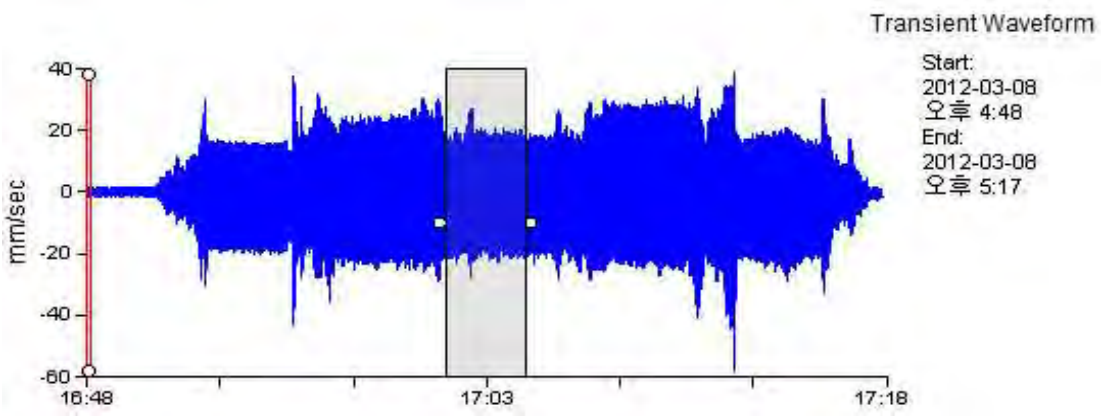



② Gear Input Axial

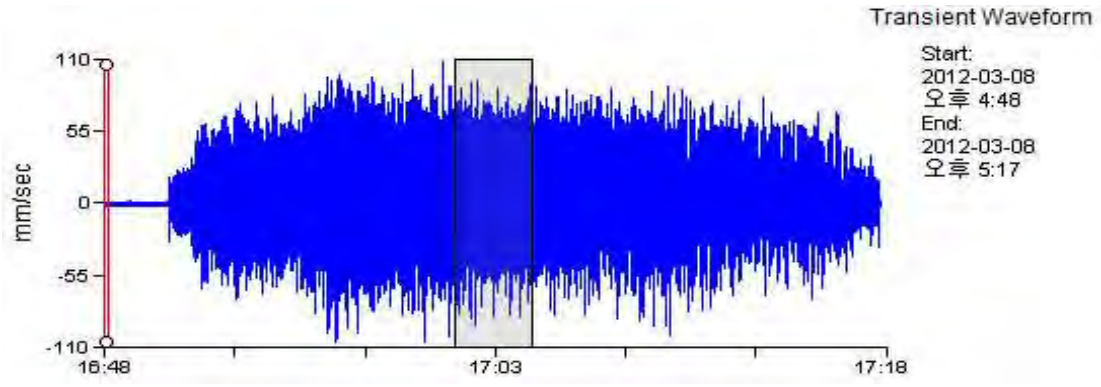



③Gear Output Axial

그림 2.3.14 최고운전속도(100km/h) 진폭 및 주파수




④ Gear Output Vertical

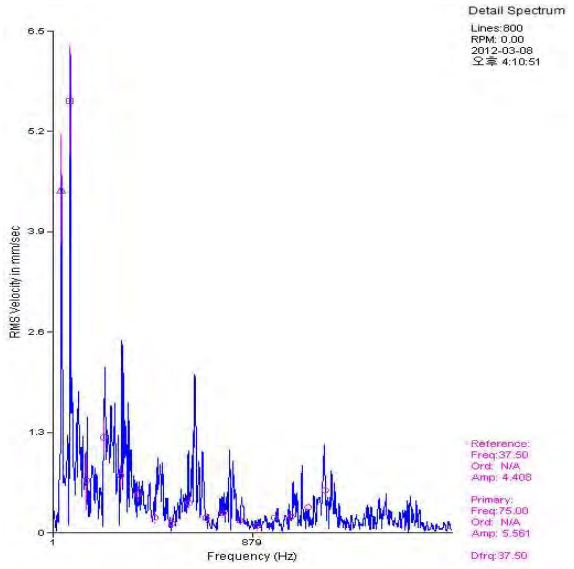



⑤ Gear Output Horizontal

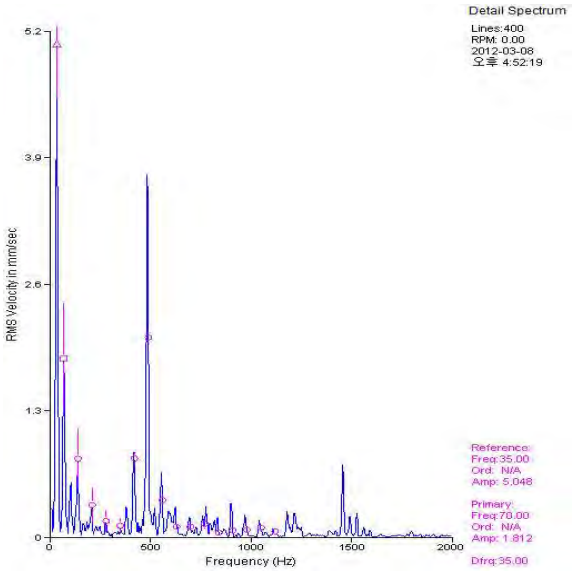
그림 2.3.14 부하조건 Transient 그래프

그림 2.3.15의 위 첫 번째 그래프는 Transient 그래프이다. 전체적으로 Overall값이 높은 가운데 Time waveform 형태를 보면 과도상태(50 -> 80km/h, 80 -> 100km/h)에서는 진동량이 크게 상승하고 정상운전상태 에서는 안정적인 진동량을 보이고 있다.

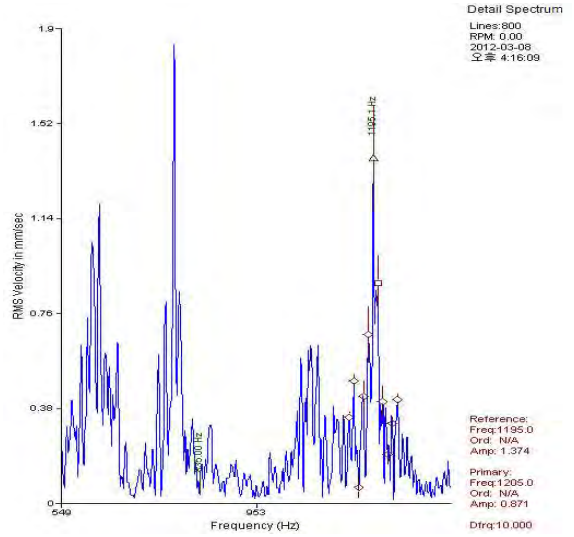
그림 2.3.15는 무부하조건과 부하 조건일 때의 비교 그래프이다. 50km/h 그래프를 비교해보면 무 부하 조건일 때에 비해 부하조건에서 특정 Harmonic성분들의 진동량 상승 및 감소폭이 있었을 뿐, 전체적으로 비슷한 형태의 주파수가 관찰되었다. 80km/h 비교 그래프를 보면 무 부하 조건에서 Bearing 주파수로 의심되었던 1,195Hz가 부하조건일 때에도 비슷한 진동량을 가지고 나타나 있지만, 부하조건일 때 무부하 조건에서 나타나지 않았던 835Hz가 Sideband(Pinion Shaft 1X; 60Hz)와 함께 나타나 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 80km시 GMF인 851Hz의 주파수 대역과 Sideband가 Pinion 1X인 61Hz로 비슷한 대역에서 나온 걸 로 보아 약간의 변속으로 인한 GMF 주파수 변화만 있었을 뿐 80km/h일 때 GMF 주파수가 나타난 것이라 사료된다. 100km/h에서는 부하조건일 때 GMF로 계속 의심되었던 1,067Hz가 약 25mm/s RMS의 높은 수치로 상승해 있는 것을 확인할 수 있었다.



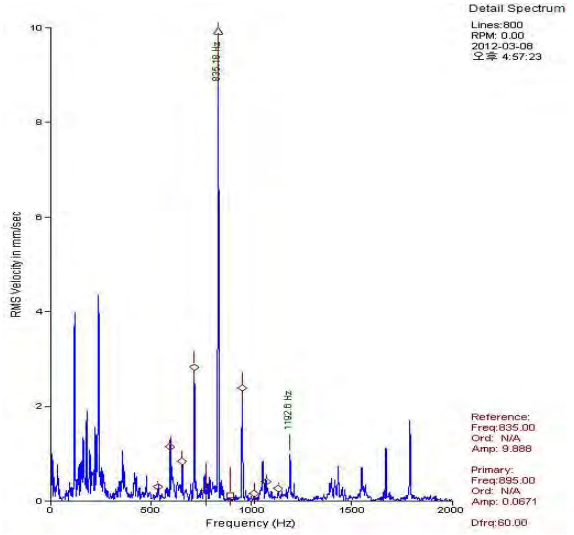

① 무부하 50km/h Gear Output Horizontal



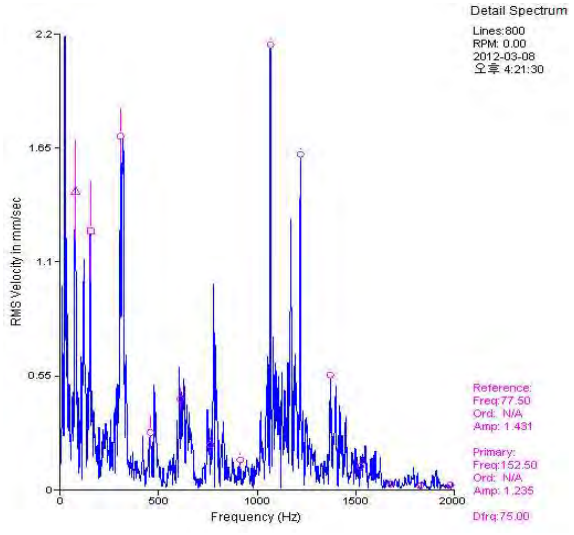

② 부하 50km/h Gear Output Horizontal



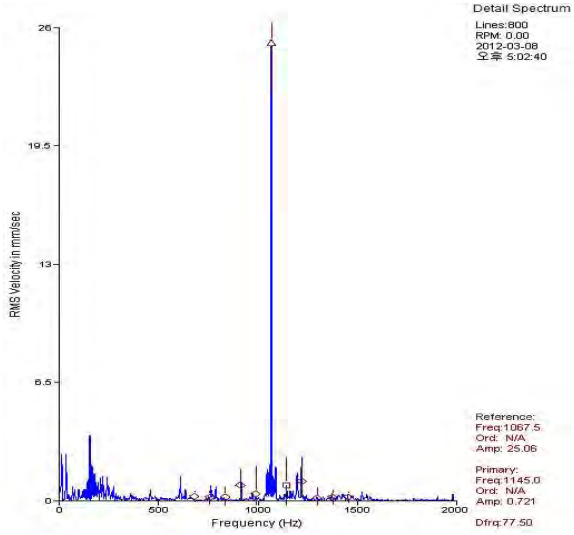

③ 무부하 80km/h Gear Output Horizontal




④ 부하 80km/h Gear Output Horizontal




⑤ 무부하 100km/h Gear Output Horizontal




⑥ 부하 100km/h Gear Output Horizontal

그림 2.3.15 무부하조건과 부하조건 비교 그래프

(2) 부산 전동차 실차 시험

KTX 실차 시험을 진행하기 전 유사한 지하철 전동차의 기어박스 및 대차의 가동 중 현재 진동 상태와 주파수 분석을 확인하기 위하여 1호기 Gearbox(93년도 제작) 수직(V: Vertical), 축(A: Axial)방향 및 대차 수직(V: Vertical)방향과, 2호기 Gearbox(84년도 제작) 수직(V: Vertical), 축(A: Axial)방향 및 대차 수직(V: Vertical)방향, 차륜 Tach sensor(Speed detector)포함 총 7point를 지하철 왕복운행구간 동안 다채널 진동 분석 장비로 측정 하였다. 가동 조건은 정상운행 속도 80km/h를 기준으로 각역 출발 및 도착시점의 과도상태를 포함한 부산 지하철 1호선 전체 운행구간을 기준으로 하였다. 다음 그림 2.3.16은 당시 시험 측정 포인트를 표현한 것이며, 그림 2.3.17은 당시 시험 현장 이다. 부산 지하철을 측정하였을 때의 산업용 계측기의 설정 값은 다음과 같이 설정을 하였다.

- 6500 : 3,600 Line, $F_{max}$ 2,000Hz
- LMS : 1,800 Line, $F_{max}$ 1,0240Hz

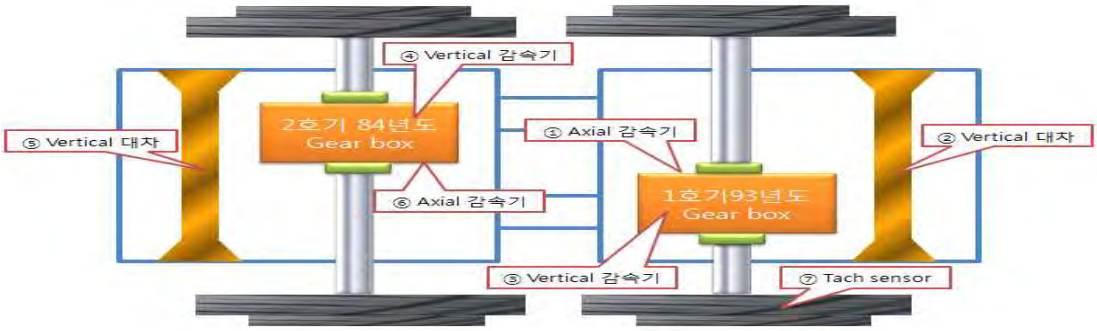



그림 2.3.16 부산교통공사 1호선 전동차 실차시험 측정 포인트



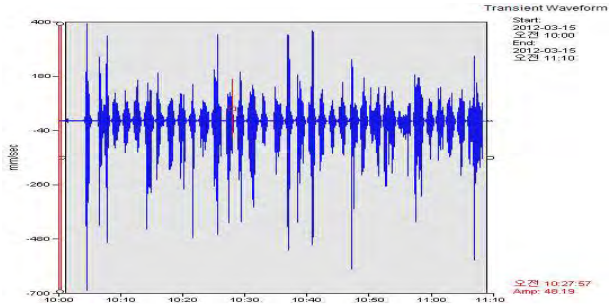
그림 2.3.17 부산지하철 실차 시험 사진

(가) 부산교통공사 1호선 전동차 실차시험(6량) 노포 – 신평역 왕복구간 : 신형 감속기와 구형 감속기의 주파수 및 진폭비교

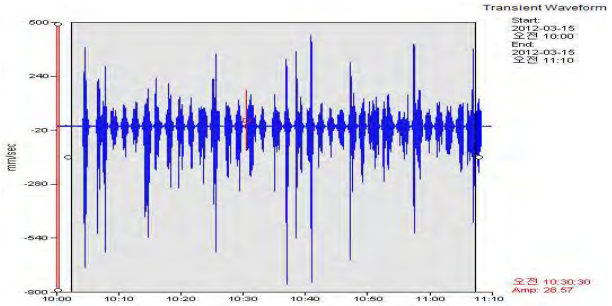
그림 2.3.18 그래프는 제작 년도가 서로 다른 두 Gearbox의 Transient 그래프이다. 전반적으로 둘 다 정차구간이 아닌 운행 구간에서는 정상 주기형 파형이 아닌 충격파형이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있고, 파형의 형태는 비슷하게 나타나고 있다.

2.3.19 ①의 93년도 Gearbox Spectrum, Waveform과 2.3.19 ②의 84년도 Gearbox Spectrum, Waveform의 기어박스 스펙트럼 및 웨이브폼 그래프를 보면 측정 결과는 다음과 같았다.

- 70km/h : Output 1X : 7.2Hz, GMF 619Hz (Gear잇수 : 86, Pinion잇수 : 15)
- 80km/h : Output 1X : 8.2Hz, GMF 707Hz

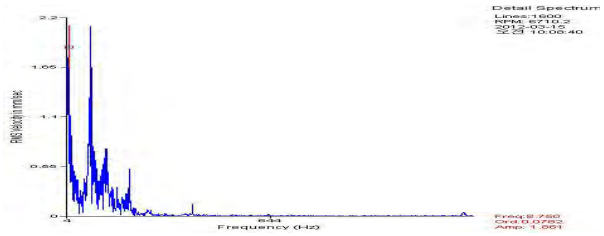


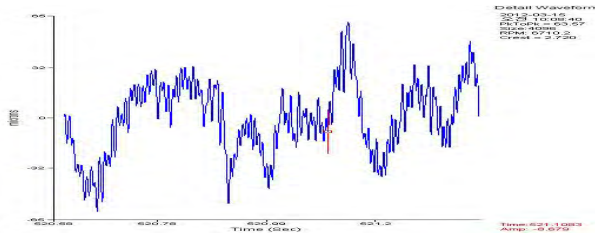

① 93년도 Gearbox Vertical Transient



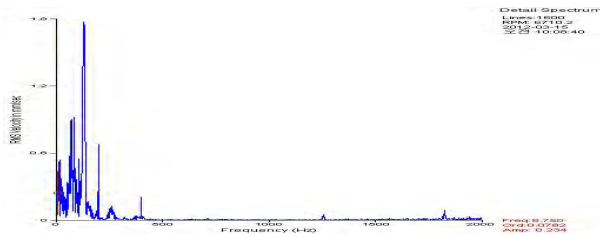

② 84년도 Gearbox Vertical Transient

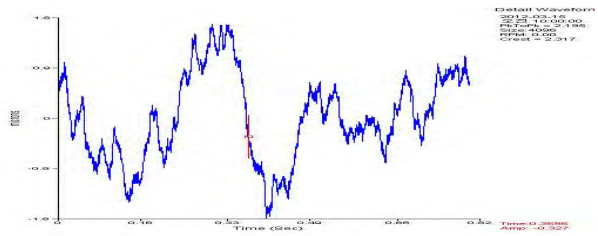
그림 2.3.18 93년, 84년 기어박스 Transient 그래프




① 93년도 Gearbox Spectrum, Waveform



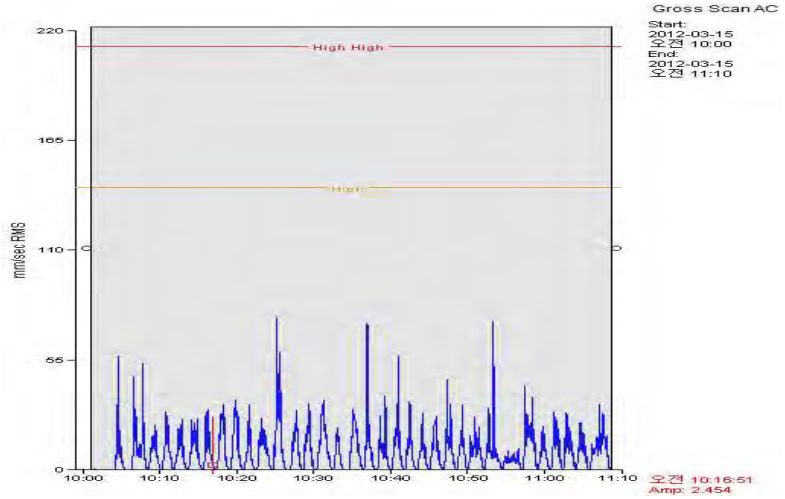




② 84년도 Gearbox Spectrum, Waveform

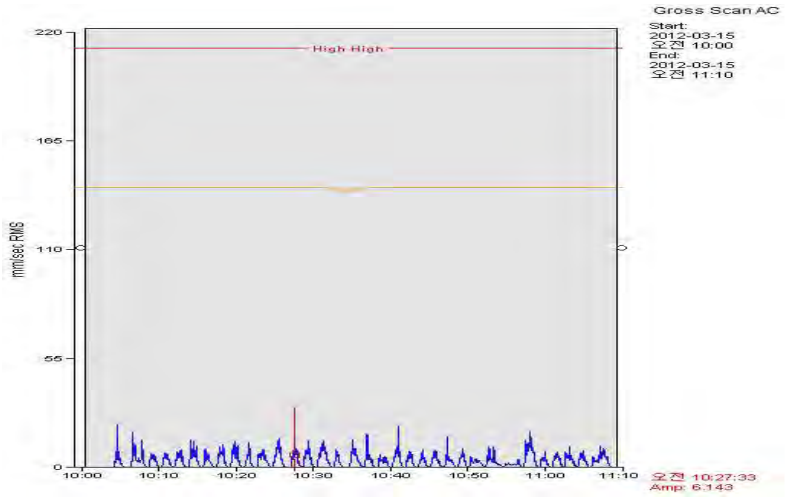
그림 2.3.19 Gearbox Spectrum, Waveform 측정 그래프

부산 지하철 시험에서 93년도, 84년도 Gearbox를 보면 Output Gear Shaft의 1X(7.2Hz)성분만 높을 뿐 GMF성분은 거의 나타나지 않는 것으로 보아 기어 결함은 미약한 것으로 판단되는 결과를 얻었다. 기타 1,000Hz이상의 고주파수 대역에서 나타나는 작은 주파수 성분들은 Bearing 결함 주파수 및 공진으로 추정되는 결과를 얻었으며,. 주파수별 차이점은 거의 발견이 되지 않았으며 진폭은 오히려 93년형이 소폭(2.1>1.8mm/s) 큰 것으로 관찰되는 결과를 확인할 수 있었다. 그림 2.3.18의 Gearbox의 Transient 그래프를 보면. 전반적으로 둘 다 정차구간이 아닌 운행 구간에서는 정상 주기 파형이 아닌 충격파형이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있고, 파형의 형태는 비슷하게 나타나는 결과를 확인할 수 있었다.

지하철 시험을 진행을 하면서 감속기와 대차의 진동 특성을 비교하는 것이 매우 중요하였다. 부산 지하철에서는 감속기와 진동의 특성을 분석하기 위하여 각 파트의 진동을 측정을 하여 형태는 비슷하지만 감속부에서의 Overall값이 대차 측에 비해 월등히(29mm/s RMS> 10mm/s RMS)높게 나타나고 있고, 충격파형이 크게 나타나는 결과를 확인할 수 있었다. 다음 그림 2.3.20은 그 결과 기어박스와 대차의 진동 Overall 측정값이다.



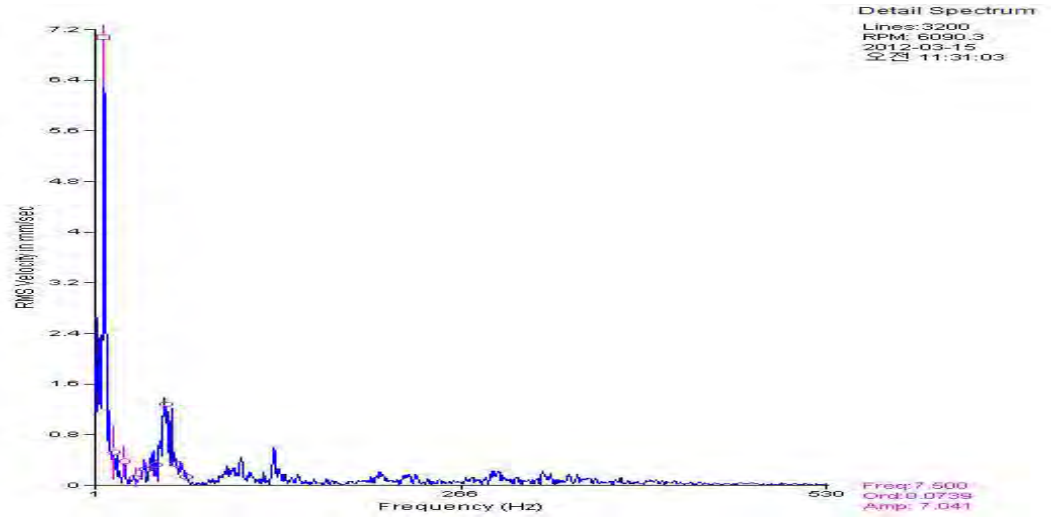

① 84년도 Gearbox Vertical Overall



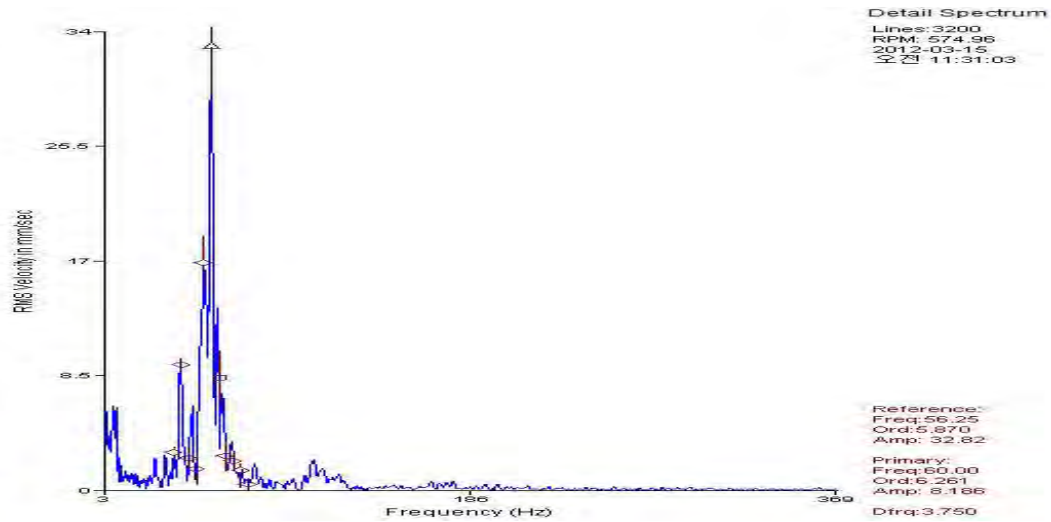

② 84년도 대차 Vertdical Overall

그림 2.3.20 부산지하철 Gear Box 및 대차 Overall 값

진동 Overall 값으로 진동의 차이를 확인을 하였지만 좀 더 명확한 분석을 위하여 Gearbox부와 대차부의 Spectrum을 비교 분석 하였다. 다음 그림 2.3.21은 기어박스와 대차의 진동 스펙트럼 비교 내용이다. 그림을 보면 서로 같은 조건에서의 그래프이지만 감속기와 대차의 주파수 형태가 상이하게 다른 형태를 나타내고 있고, 중복되는 주파수도 발견되지 않는다. 감속기부분에서 1X(7.5Hz)성분만이 높은 것으로 보아 Gear Shaft의 결함이 주를 이루고 있다고 판단되고, 대차의 가장 높은 진동량을 나타내는 56Hz(약 33 mm/s RMS)는 레일 충격진동에 의해 나타난 주파수 성분인 것으로 판단되었다.




① Gearbox Spectrum

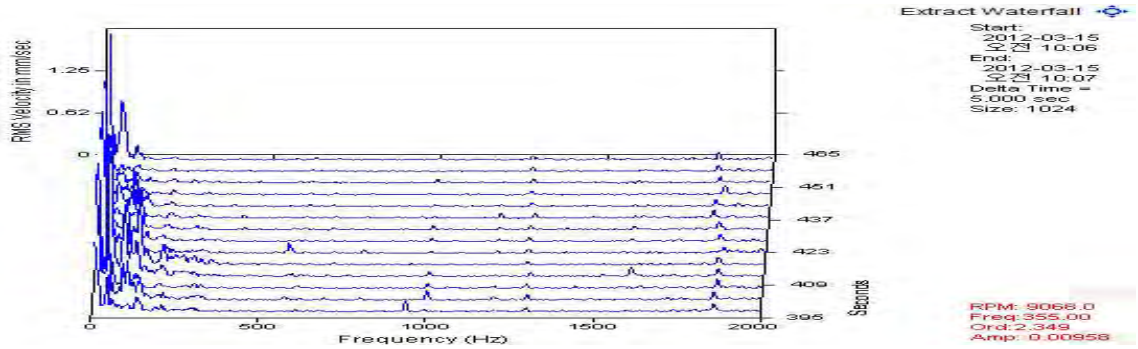



② 대차 Spectrum

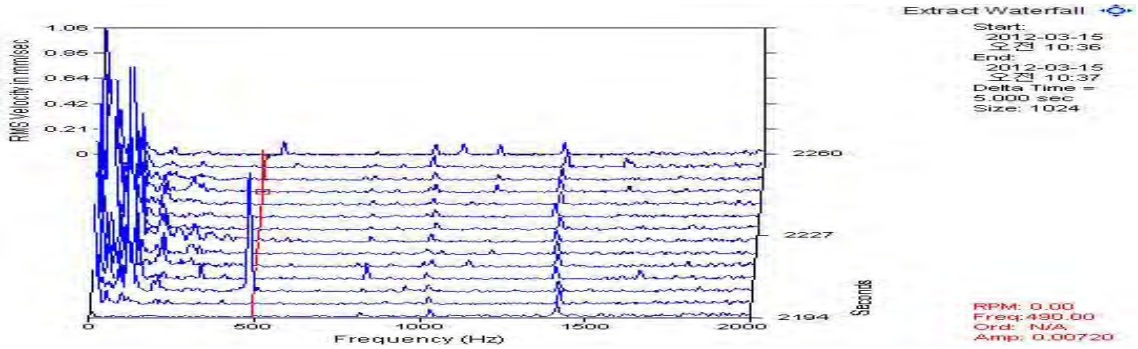
그림 2.3.21 기어박스 & 대차 진동 Spectrum

(나) 부산교통공사 1호선 전동차 실차시험 : 구간별 진동 특성 비교 시험

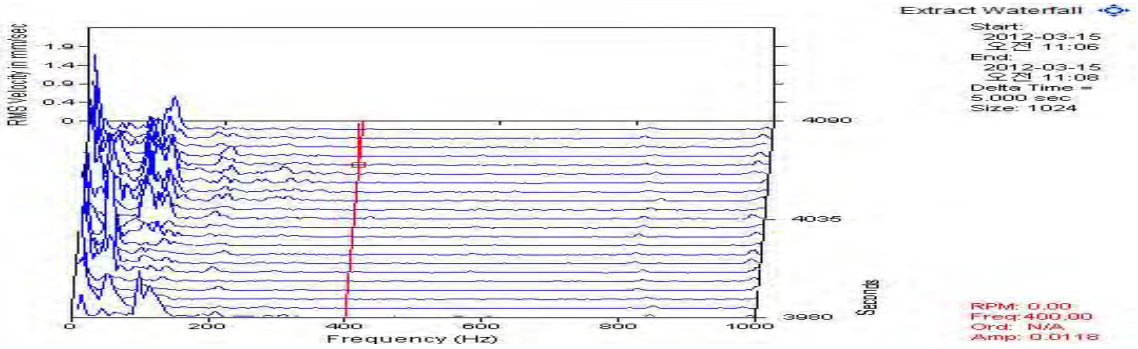
부산 지하철 실차 시험을 진행 하면서 각 구간별 감속기의 진동 데이터를 취득하여 분석을 하였다. 부산지하철 1호선(노포역 ~ 신평역)전체 구간 중 3개의 역을 선정해 운행구간을 나눠서 분석을 진행하였다. 레일-차륜 진동 혹은 바닥진동에 의한 충격파를 제외하고 3구간 모두 일정한 주파수 형태를 나타냈고 앞서 분석한 부분과 마찬가지로 GMF(70km/h - 619Hz, 80km/h - 705Hz) 성분은 보이지 않았다. 레일진동이 약 20G정도로 높은데 비해 GMF 주파수가 거의 나타나지 않는 것으로 보아 공진이 아닌 레일충격진동이 있었던 것으로 판단을 하였다. 다음 그림 2.3.22는 각 운행 구간별 Cascade 분석 그래프이다.




① 노포역 -> 범어사 93년도 감속기 Gear Vertical 10:06 ~ 10:08




② 범내골 -> 범어사 93년도 감속기 Gear Vertical 10:36 ~ 10:37

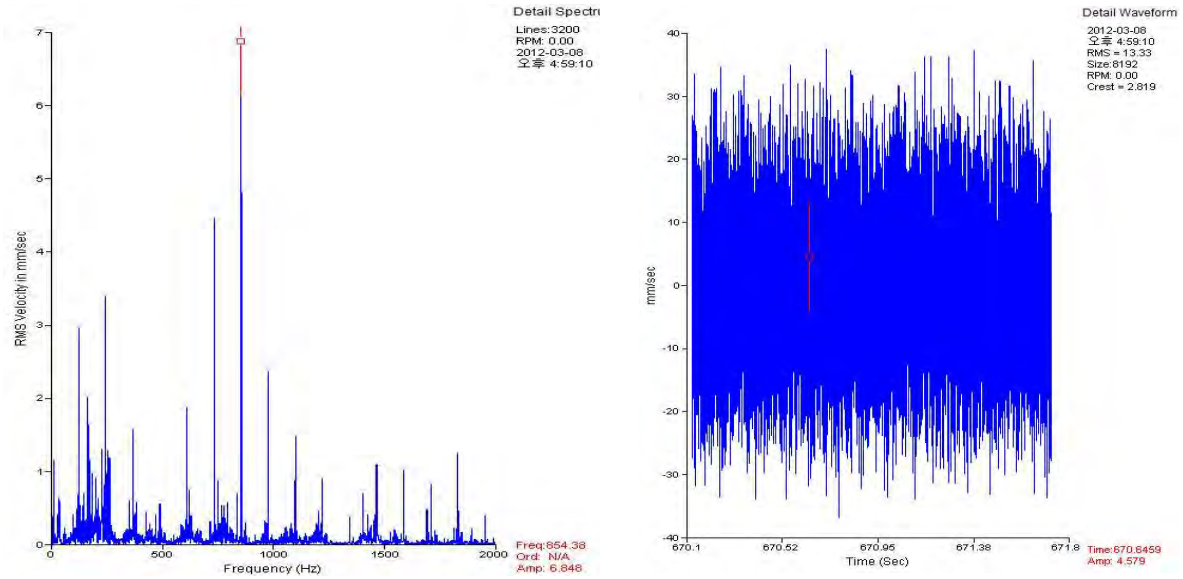



③ 하단역 -> 신평역 93년도 감속기 Gear Vertical 11:06 ~ 11:08

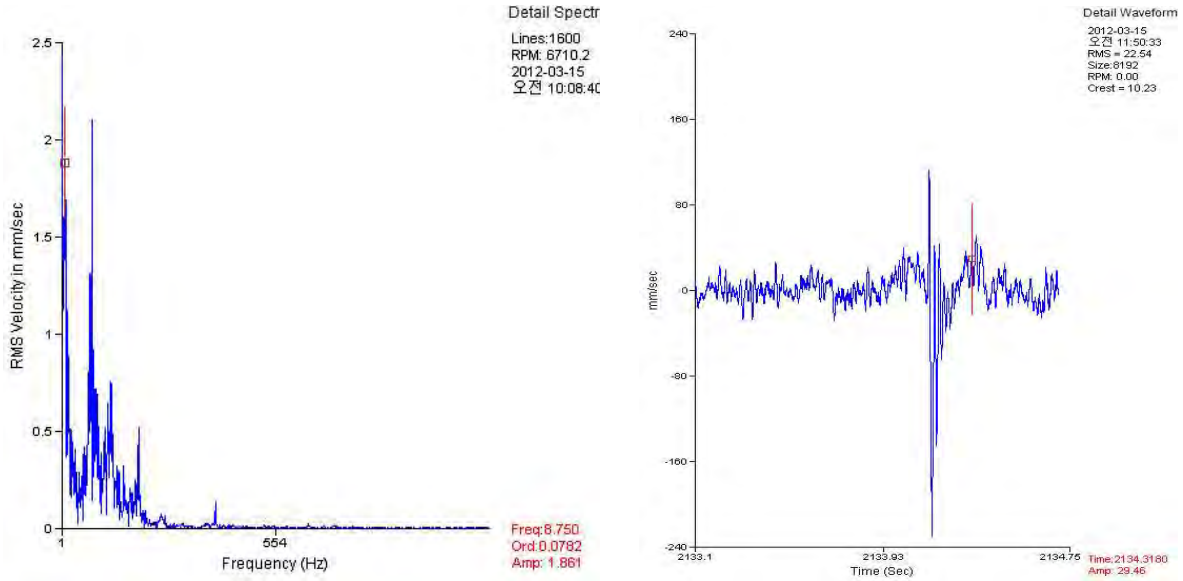
그림 2.3.22 각 운행 구간별 Cascade 그래프

(다) 감속기 실물 시험과 전동차 진동 특성 비교

그림 2.3.23은 철도기술연구원 Lab실(부하 순차속도 80km/h 에서의 진동 Spectrum, Wave form)에서의 실물시험과 부산지하철 1호선(93년도 Gearbox 80km/h)실차시험을 비교 분석한 그래프이다. 공통적으로 두 시험에서 1X, 2X성분들이 나타나고 있지만 실물시험에서는 Spectrum에서 보는바와 같이 1X의 Harmonic성분이면서 851Hz성분대역인 835Hz가 나타나고 있는 것을 보고 GMF라고 추정 할 수 있었다. 반면 실차시험에서는 GMF성분인 619Hz, 705Hz 대역의 성분이 전혀 나타나지 않는다. 기타 실차시험에서 성분을 알 수 없는 78Hz, 128Hz 같은 Non-harmonic 성분들은 외부에서 들어오는 충격요소에 의한 기타 주파수로 판단되는 결과 값을 확인 할 수 있었다.




① 철도기술연구원 Lab Gear Output Vertical 80km/h




② 부산지하철 1호선 93년도 Gearbox Vertical 80km/h

그림 2.3.23 철기연 감속기 및 부산지하철 진동 특성 비교 그래프

(3) KTX산천(8량) 고양 행신차량기지-여수엑스포역-익산 구간 시험

(가) 시험조건

KTX산천 운행 기간 중 Gearbox 및 대차의 진동상태와 주파수 분석을 확인하기 위하여 3축 가속도센서를 사용해 1차 Gearbox의 수평(H: Horizontal), 수직(V: Vertical), 축(A: Axial)방향과 2차 Gearbox의 수평(H: Horizontal), 수직(V: Vertical), 축(A: Axial)방향 및 대차 Vertical방향, 차륜 Tach sensor(Speed detector)를 포함해 총 8point를 다채널 진동 분석 장비로 측정하였다. KTX산천 고속선 진입 시 속도는 136~149km/h이며, 운행 구간은 고양 정비창 - 여수 엑스포 - 익산구간으로 운행하였다. 운행 시 서울역, 광명역, 익산역, 동익산역에서 약 5분간 중간 정차하였다. 다음 그림 2.3.24는 당시의 측정 포인트이며 그림 2.3.25는 현장 설치 사진이다.

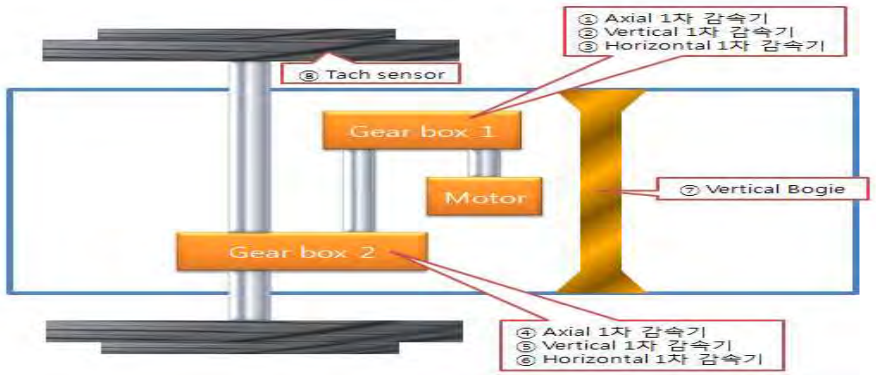


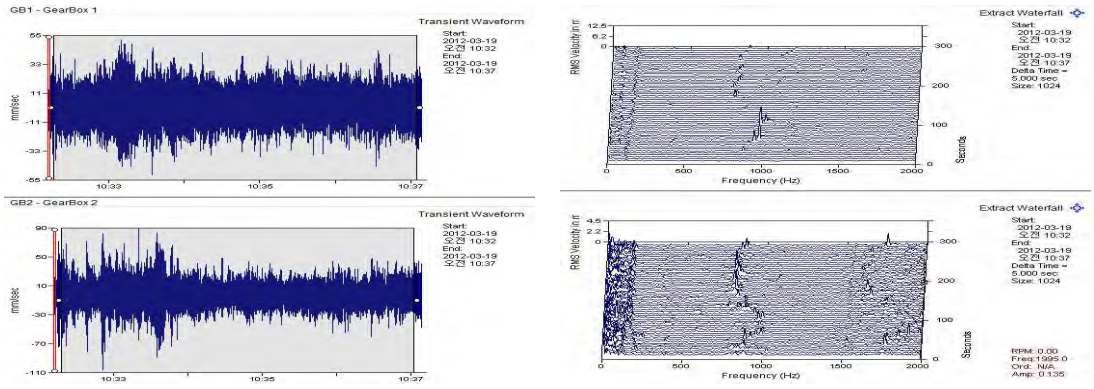

그림 2.3.24 KTX 실차 시험 측정 포인트



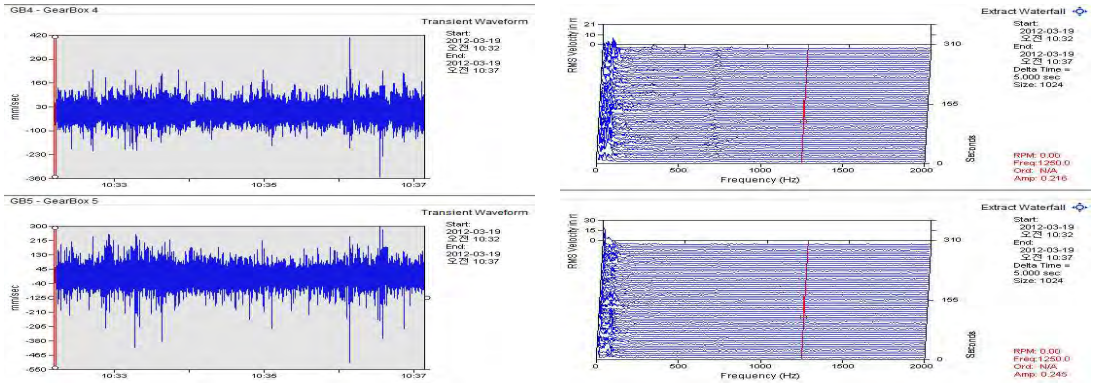
그림 2.3.25 KTX 실차 시험 현장 사진

(나) 1차/2차 감속기의 진동특성비교

KTX 실차 시험을 하면서 1차감속기와 2차 감속기의 진동 특성을 가장 먼저 진행 하였다. 같은 감속기 이지만 진동 특성이 다르게 나타날 수 있는 가능성이 있어 이 부분에 대하여 먼저 측정을 하여 취득되는 진동 데이터를 가장 먼저 분석을 하였다. 다음 아래의 그림 2.3.26은 1차/2차 감속기의 진동을 측정한 데이터 내용이다. 다음 그림 2.3.27은 같은 시점의 1차/2차 감속기 Axial, Vertical방향의 Transient, Cascade와 Spectrum(10:35:10)를 보여주는 그래프이며, 1차 감속기와 2차 감속기의 주파수 형태가 다르게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. Transient Data를 보면 KTX 산천 주파수 위치가 계속 변화하는데, 이것은 속도가 일정하지 않다는 의미를 내포하고 있다. 이를 감안해 분석해본 결과 1차감속기에서 143.5km/h의 속도로 운행 중 일 때(Drive Shaft 1X 30.3Hz) 1차감속기의 GMF로 계산된 817Hz가 1.8mm/s RMS의 값으로 다른 주파수 성분에 비해 높게 나타나고 있다. 같은 조건인 143.5km/h일 때에(Input Pinion 1X  16Hz, Output Gear 1X  13.8Hz) 2차감속기를 보면  GMF로 계산된 705Hz가 0.5mm/s RMS의 미약한 값으로 나타나 있긴 하지만 앞의 저주파대역의 주파수 성분들에 비하면 무시할 수 있을 정도의 작은 진동량을 보인다. 1차감속기는 GMF가 뚜렷한데 비해 2차 감속기는 GMF성분이 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있고, 이에 반해 Overall값은 2차감속기에서 훨씬 높게 나타나는 결과를 확인할 수 있었다.

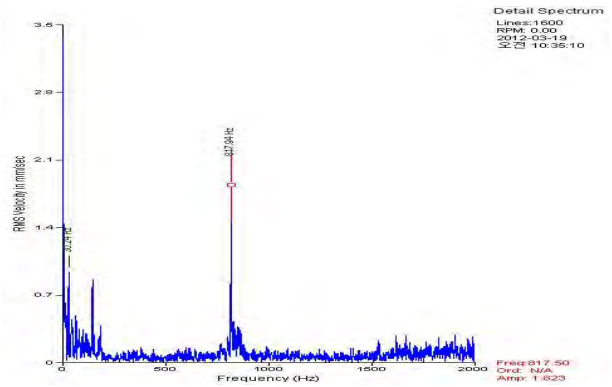



① 1차 감속기 Axial, Vertical




② 2차 감속기 Axial, Vertical

그림 2.3.26 1차/2차 감속기의 진동을 측정한 데이터

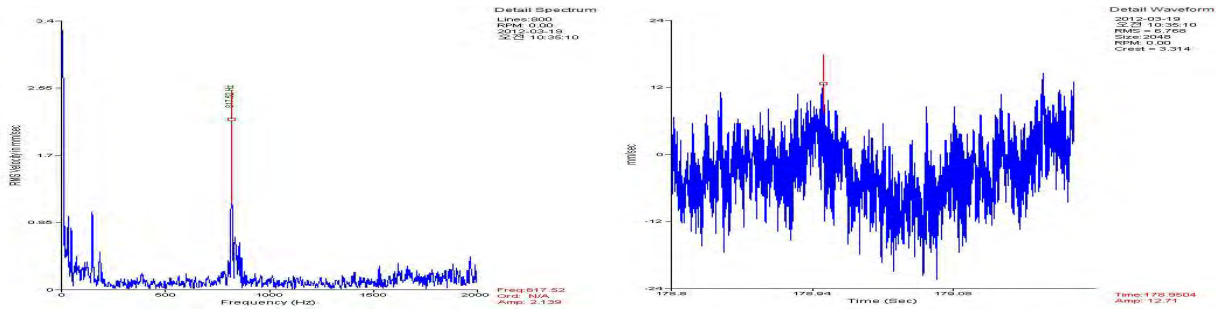



① 1차 감속기 Vertical 10:35:10, 143.5km/h ② 2차 감속기 Vertical 10:35:10, 143.5km/h

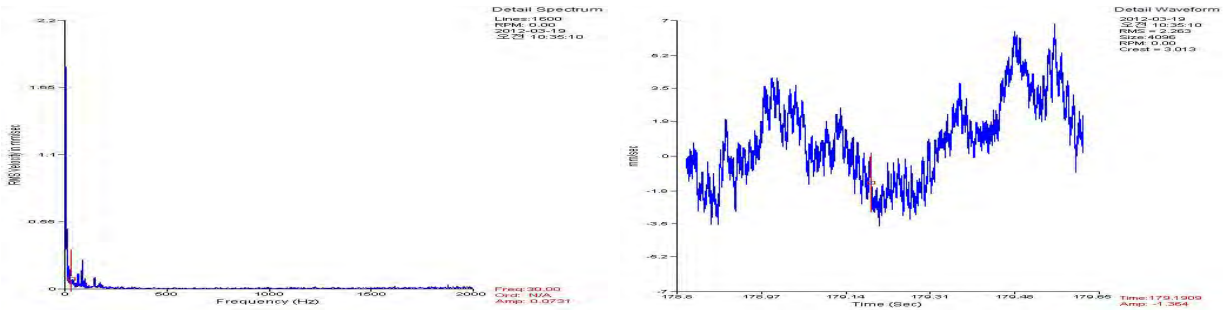
그림 2.3.27 1차/2차 감속기 Axial, Vertical방향Transient, Cascade, Spectrum

(다) 감속기와 대차의 진동특성 비교

그림 2.3.28을 보면 GMF의 형태가 뚜렷한 1차 감속기와 대차의 주파수성분을 비교해보면 형태가 전혀 다르게 나타나고 있다. 위의 1/2차 감속기 비교에서 본 결과 1차감속기에서는 143.5km/h의 속도로 달릴 때 817Hz가 GMF성분으로 나타났고 Shaft 결함에 해당하는 주파수는 큰 진동량을 나타내지 않고 있다. 그에 반해 대차 측에서 발생하는 주파수 성분을 보면 결함이라고 의심되는 여타의 주파수 성분들은 나타나지 않고 있다. 감속기 측 Overall은 약 50mm/s RMS, 대차 측 Overall은 약 10mm/s RMS로 약 5배정도 차이가 나고 있으며, 전반적으로 대차 측의 진동량이 낮게 나타나고 있는 점을 확인 할 수 있었다.




① 1차감속기 Vertical Spectrum Waveform 10:35:10, 143.5km/h>



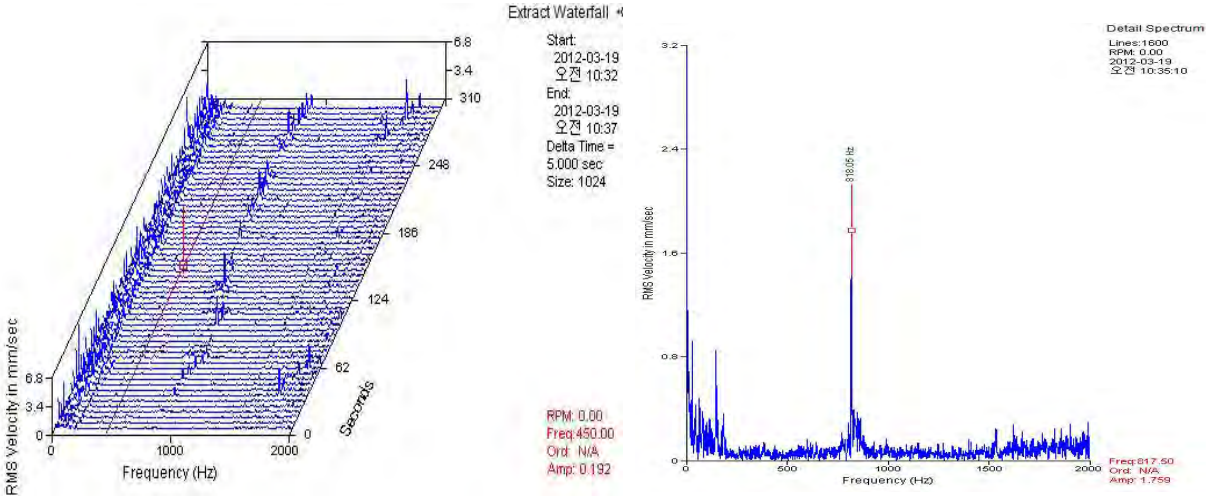

② 대차 Vertical Spectrum Waveform 10:35:10, 143.5km/h

그림 2.3.28 감속기와 대차의 진동 Spectrum Waveform 비교

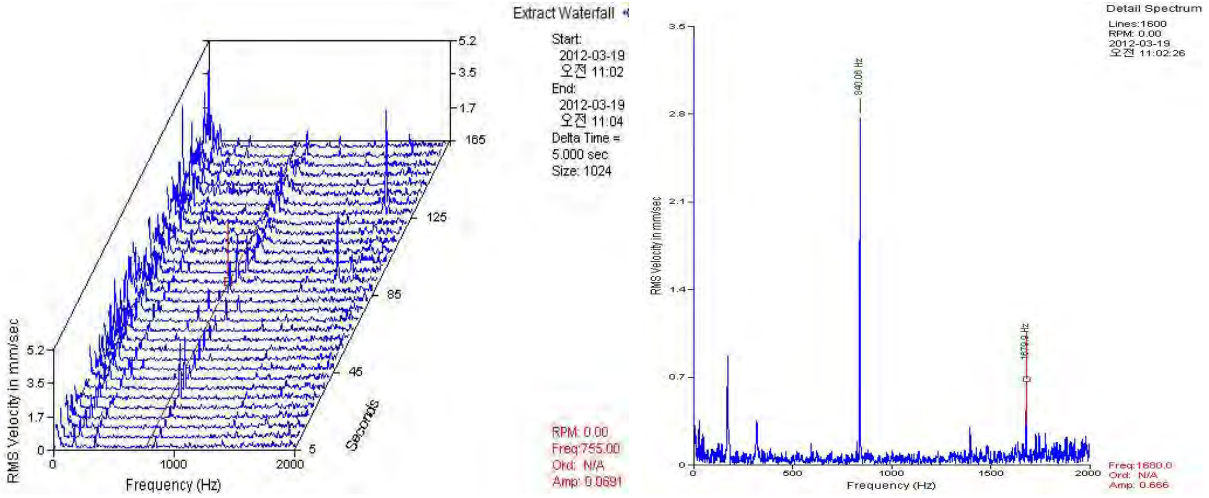
(라) 구간별 진동 특성 비교 시험 – KTX산천(8량) 고양 행신차량기지–여수엑스포역–익산 구간 시험

그림 2.3.29의 그래프는 속도가 서로 다른 구간을 역별로 분리하여 취득한 그래프이지만, Tach Data의 신호 불안정으로 인해 정확한 RPM을 측정할 수가 없어 100%신뢰할 수 없는 Data이다. 차선책으로 Turning speed를 Spectrum을 보고 예상해 이를 바탕으로 GMF 및 감속기의 결함주파수 성분을 분석하였다. 동익산역 구간의 1차감속기 조건은 143.5km/h(Drive shaft 1X 30.3Hz)일 때에 GMF로 추정되는 817Hz가 가장 높게 나타났다. 남원역 구간에서의 1차감속기는 147.8km/h (Drive shaft 1X 31.1Hz)에서 GMF로 추정되는 840Hz가 높게 상승했고, 동익산역 구간과는 다르게 남원역구간에서 GMF 2X성분인 1680Hz가 0.7mm/s RMS로 낮은 값이지만 상승해 있는 것을 확인하였다. 이러한 이유는 기어를 통해 맞물려있는 축들의 Offset–Misalignment(축정렬 불량)를 의미한다. 순천역의 Cascade 그래프를 보면 주파수가 계속 변하는 것으로 보아 변속이 심하게 일어나고 있다고 사료된다. 운행 구간 중 189.5km/h 의 속도로 추정되는 구간을 분석해 보면 Drive shaft 1X 40Hz, Axle Gear shaft 1X 21Hz, GMF로 추정되는 1,077Hz성분이 다 나타나고 있다.

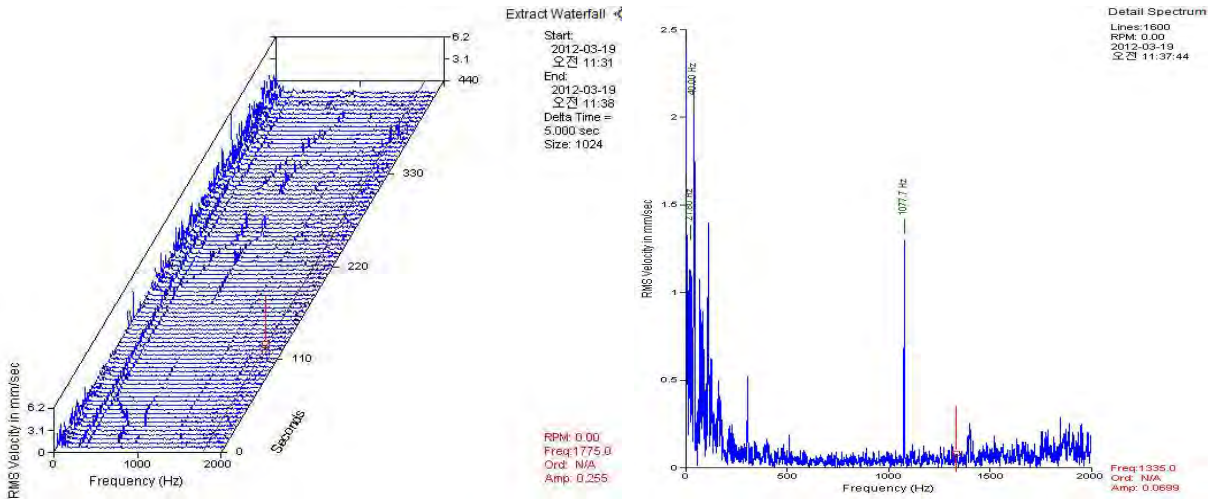
KTX 실차 시험을 1차와 2차에 걸쳐서 측정을 한 결과 감속기측이 대차측에 비해 Overall값이 높게(29mm/s RMS> 10mm/s RMS) 나타나는 경향을 확인할 수 있었고, 충격파형이 크게 나타나는 점을 확인하였다. Gearbox부와 대차부의 Spectrum 비교를 위해 같은 조건에서의 그래프를 보면 주파수 형태가 상이하게 다른 형태를 나타내는 점을 확인하였으며 중복되는 주파수도 나타나지 않는다. 감속부에서 1X(7.5Hz)성분만 높게 나타나고 있으며, 대차부에서 가장 높은 주파수는 56Hz로 약 33mm/s RMS의 값을 나타내고 있다. 이는 레일진동에 의한 충격으로 사료된다. 1차감속기에서 143.5km/h의 속도로 운행 중일 때 (Drive Shaft 1X 30.3Hz) GMF로 계산된 817Hz성분이 1.8mm/s RMS 진동량으로 다른 주파수성분들에 비해 높게 상승해 있었다. 같은 조건인 143.5km/h 속도(Input Pinion 1X 16Hz, Output Gear 1X 13.8Hz)에서의 2차감속기를 분석해보면 GMF로 계산된 705Hz가 1차 감속기에 비해 0.5mm/s RMS의 낮은 진동량을 나타내었다. GMF는 1차감속기에서 높게 나타난대 비해, 전체 Overall값은 2차감속기에서 130mm/s RMS로 50mm/s RMS를 나타내는 1차감속기에 비해 높게 나타내는 결과를 확인할 수 있었다.




① 동익산역 10:32 ~ 10:27




② 남원역 11:02 ~ 11:05




③ 순천역 11:31 ~ 11:38

그림 2.3.29 구간별 진동 특성 그래프

(4) 시험 측정 결과 내용 정리

(가) 한국철도기술연구원 실험실 전동차 실물시험

① 최고운전속도(100km/h)에서 모든 측정 위치별 진폭, 주파수 비교

모든 측정 점의 진동량(mm/s rms)을 각 parameter별로 표현한 결과, G3A(Shaft2 1st Gearbox Inboard Axial)와 G7A(Shaft2 Main Gearbox Inboard Axial)방향에서 가장 높은 Overall 값(약 19mm/s rms)을 나타내고 있다. 가장 높은 1067Hz는 sideband가 1X(Pinion Shaft 76Hz)로 형성된 기어결함 주파수(GMF)로 추정된다.

② 무부하 순차 속도(과도상태운전, 정상상태운전; 50km/h, 80km/h, 100 km/h)에서 감속기의 진동 Trend 진폭 및 주파수 비교 분석

50km/h의 운전상태일 때 Pinion Shaft 1X=38Hz의 성분과 2X의 성분이 높게 나타나는 것으로 보아 조립상 결함이 있는 것으로 추정되며 80km/h의 운전상태일 때에는 GMF인 851Hz 성분보다는 1195Hz성분이(Gear Shaft 1X=약 9Hz Sideband와 함께 상승)주도적인 주파수로 확인되며, 100km/h의 운전상태일 때에는 주로 확인되는 1067Hz성분이(Shaft 1X=약 76Hz의 Harmonic 성분)GMF로 추정된다.

③ 부하(2580kNm) 순차속도에서 감속기의 진동 진폭 및 주파수 비교 분석.

전적으로 Overall값이 약 30~35mm/s RMS로 높게 나타나고 있고 과도상태에서는 진동량이 상승, 정상운전상태 에서는 안정적인 진동량을 보이고 있다. 무부하조건과 부하조건을 비교해보면 50km/h 의 경우, 전체적으로 비슷한 형태의 주파수가 관찰되고 있고, 80km/h에서는 두 조건 모두 베어링 주파수로 의심되는 1,195Hz가 나타나고 있지만, 무 부하 조건에서 나타나지 않았던 GMF 851Hz(Sideband Pinion 1X 61Hz동반)대역 주파수인 835Hz(60Hz를 Sideband로 동반)가 부하조건에서만 나타나고 있다. 위의 결과는 약간의 변속에 의한 GMF주파수 변화가 생겼다고 판단되고 80km/h일 때의 GMF 주파수라고 사료된다. 100km/h에서는 부하조건일 때 GMF로 계속 의심되었던 1067Hz가 약 25mm/s RMS로 확인되고 있다. 고속일수록 GMF의 상대적인 상승량이 크다.

(나) 부산교통공사 1호선 전동차 실차시험(6량) 노포 – 신평역 왕복구간

① 신형 감속기와 구형 감속기의 주파수 및 진폭비교

부산 지하철 측정 시 Tach 신호(RPM)의 취득에 문제가 있었고 회전속도를 파악하는데 오류가 있었지만, 전반적으로 둘 다 정차구간이 아닌 운행 구간에서는 정상 주기 형 파형이 아닌 충격파형이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며 파형의 형태 또한 비슷하게 나타나고 있다. 93년도 신형 감속기와 84년도 구형감속기 모두 Output Gear Shaft 1X=약 7.2Hz성분이 관찰되나, GMF 성분인 619Hz(70km/h)와 707Hz(80km/h)는 잘 관찰되고 있지 않다. 주파수별 차이점은 거의 없으며 진폭은 오히려 93년형이 소폭(2.1>1.8mm/s) 큰 것으로 관찰된다.

② 감속기와 대차의 진동 특성 비교

감속기측이 대차 측에 비해 Overall값이 높게(29mm/s RMS> 10mm/s RMS) 나타나고 있고, 충격파형이 크게 나타나고 있는 것이 관찰된다. Gearbox부와 대차부의 Spectrum 비교를 위해 같은 조건에서의 그래프를 보면 주파수 형태가 상이하게 다른 형태를 나타내고 있고 중복되는 주파수도 나타나지 않는다. 감속부에서 1X(7.5Hz)성분만 높게 나타나고 있으며, 대차부에서 가장 높은 주파수는 56Hz로 약 33mm/s RMS의 값을 나타내고 있다. 이는 레일진동에 의한 충격으로 사료된다.

③ 구간별 진동특성비교

부산지하철 1호선(노포역 ~ 신평역)전체 구간 중 3개의 역을 선정해 운행구간을 나눠서 분석해 본 결과 레일-차륜 진동 혹은 바닥진동에 의한 충격파를 제외하고 3구간 모두 일정한 주파수 형태를 나타내고 있고, 앞서 분석한 부분과 마찬가지로 GMF성분인 619Hz, 705Hz 성분은 나타나지 않고 있다. 레일진동에 비해 GMF주파수는 거의 나타나지 않는다.

④ 실물시험과 실차시험의 진동특성비교

80 km/h의 동일조건에서 철도기술연구원 Lab 실물시험과 부산지하철 1호선 실차시험을 비교 분석 하였다. 공통적으로 두 시험에서 1X, 2X의 Harmonic성분들은 나타나고 있고, 실물시험에서는 GMF로 계산된 851Hz성분대역인 835Hz(Pinion Shaft 1X=약 60Hz인 Sideband 상승)가 GMF라고 추정 할 수 있었다. 반면 실차시험에서는 GMF성분인 619Hz(70km/h), 705(80km/h)성분이 전혀 관찰되지 않았다.

(다) 한국철도공사 KTX산천(8량) 행신차량기지-여수엑스포역-익산 구간

① 1차/2차 감속기의 진동특성비교

1차감속기에서 143.5km/h의 속도로 운행 중일 때 (Drive Shaft 1X 30.3Hz) GMF로 계산된 817Hz성분이 1.8mm/s RMS 진동량으로 다른 주파수성분들에 비해 높게 상승해 있다. 같은 조건인 143.5km/h 속도(Input Pinion 1X 16Hz, Output Gear 1X 13.8Hz)에서의 2차감속기를 분석해보면 GMF로 계산된 705Hz가 1차 감속기에 비해 0.5mm/s RMS의 낮은 진동량을 나타내고 있다. GMF는 1차감속기에서 높게 나타난대 비해, 전체 Overall값은 2차감속기에서 130mm/s RMS로 50mm/s RMS를 나타내는 1차감속기에 비해 높게 나타났다.

② 감속기와 대차의 진동특성비교

143.5km/h조건에서의 감속기와 대차 Spectrum을 살펴보면 주파수 형태가 전혀 다르게 나타나고 있다. 감속기에서 결함주파수로 의심되는 고주파수대역의 GMF, 공진에 관련된 주파수 성분은 대차 측에서 전혀 나타나지 않고 있으며, 이에 따라 대차의 진동측정은 저주파수에 의한 분석이 주효할 것으로 사료된다.

③ 구간별 진동특성비교 (속도별)

속도가 서로 다른 구간을 역별로 분리하여 취득한 그래프는 Tach Data의 신호 불안정으로 인해 정확한 RPM을 측정할 수가 없어 신뢰할 수 없는 data이다. 차선책으로 분석을 위해 Turning speed를 Spectrum을 보고 예상해 이를 바탕으로 GMF 및 감속기의 결함주파수 성분을 분석하였다. 143.5km/h 조건의 동익산역에서는 GMF로 의심되는 817Hz가 가장 높게 나타났고, 147.8km/h 조건의 남원역에서는 GMF 840Hz성분과 GMF2차 성분인 1680Hz 같이 나타남으로서, Gear와 맞물린 축들의 Offset-Misalignment(축 정렬 불량)결함이 발생하고 있다고 추정할 수 있었다. 변속이 가장 심한 구간으로 보이는 순천역은 189.5km/h 조건에서 Drive shaft 1X 40Hz, Axle Gear shaft 1X 21Hz, GM F로 추정되는 1,077Hz성분이 다 나타나고 있다.

나. 감속기, 대차 측정 포인트 및 진동 파라미터 검증 실차 시험 – 2012년 6월 수행

(1) 시험의 개요

이번 시험은 KTX 감속기 모니터링 시스템 개발(국토해양부 철도핵심 부품장치 기술개발과제)의 설계를 위한 KTX 대차 및 감속기의 진동특성검토와 분석 데이터 확보, 계측기간의 상호비교를 목적으로 1차 실차시험(실물시험, 부산 지하철시험, KTX 산천시험)에 이어 진동측정의 필요성에 따라 2차 실차시험이 수행 되었다. 금차 시험은 KTX에 대하여 단독으로 수행 되었으며, 계측기별 데이터 비교 후 감속기 모니터링 개발에 필요한 소프트웨어 및 하드웨어 구성, 진동 특성 Parameter(파형, 주파수 범위, 주파수 특성 등), 센서의 부착위치 등을 파악하기 위한 목적으로 시험을 진행 하였다. 이 시험은 한국철도공사 KTX 열차 차량의 경부선, 호남선 구간에서 측정을 하였으며 과도운전상태/정상운전상태 조건에 대하여 설정을 하고 실험을 진행을 하였다. 이번 시험에서는 기존에 활용한 계측기인 CSI 2130, 6500 이외 에도 산업용 풍력 발전 기어박스 온라인 모니터링 시스템, 무선 측정 온라인 모니터링 시스템, 선정 NI 하드웨어 모듈 등 총 5개의 계측기를 동시에 설치를 하여 측정을 진행을 하였다. 다음 아래의 표 2.3.6 ~ 2.3.8은 이번 시험에 새롭게 투입된 계측기의 사양을 정리한 내용이다.

표 2.3.6 풍력발전용 온라인 모니터링 시스템

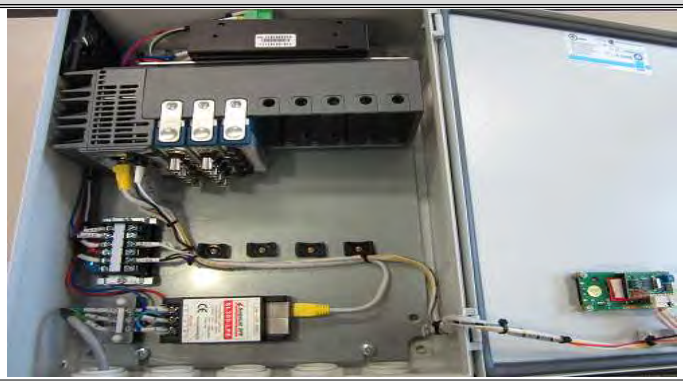
| 측 정<br>장비명 | Multiple channel module<br>(Model: 풍력발전소 진동 모니터링 시스템) |
|---|---|
| 장 비<br>사 진 |  |
| 측 정<br>내 용 | • 제조사 : ㈜SM Instrument (Korea)<br>• 시스템 하드웨어 사양<br>– cRIO Controller (cRIO-9025)<br>Real-Time Embedded Controller, 800MHz Processor, 4GB Storage<br>– cRIO Chassis (cRIO-9114)<br>8Slot cRIO Chassis, FPGA Reconfigurable Chassis<br>– Dynamic Signal Input Module (NI 9234)<br>채널 : 4 ch, 분해능 : 24bits, Max Sampling Rate : 51.2kS/s<br>– Analog Signal Input Module (NI 9229)<br>채널 : 4 ch, 분해능 : 24bits, Max Sampling Rate : 50 KS/s<br>• FE 소프트웨어 사양<br>– Vib Data Acquisition and Save<br>25.6kS/s 8 ch 진동데이터 및 AI 4 ch 수집, 수집데이터 Queue 저장<br>신호처리 : Gearbox(8 ch), RMS (Band 설정), 10분 데이터 파일 저장,<br>Trigger Condition Check (RMS Level 상한치 자동 삭제), Trigger 발생 시 Time Data 저장 Time Data : Vib 8 ch, Tacho 1 ch<br>– Signal Processing<br>기어박스 Order Analyses (8 ch), Order Resolution : 0.25<br>Order Spectrum Average/Max/Min 산출 (10분 평균),<br>Maxim : 100 order |
| 비 고 | • Wind power plant vibration monitoring .(Blade, Shaft, Gearbox etc...) |

표 2.3.7 무선 측정 온라인 모니터링 시스템

| 측 정<br>장비명 | Wireless Multiple channel module<br>(Model: Any logger S-V/ICP) |
|---|---|
| 장 비<br>사 진 |  |
| 측 정<br>내 용 | • 제조사 : ㈜한국유지관리 (Korea)<br>• 지원 채널 수 : 1 ch<br>• 인가전압 : -5 ~ 5V<br>• Gain : 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100<br>• Programmable Lower Pass Filter : 10 ~ 1000Hz<br>(10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000)<br>• Prog. Offset : 0 ~ 5V(12Bit)<br>• Max Sampling Rate : 1000Hz<br>• 센서전원 : 24V(Only ICP Type)<br>• 커넥터 : BNC<br>• Power Consumption(w/o sensor) : 150mA<br>• 내부 배터리 : Li-ion Rechargable 1500mAh x 2EA(Serial)<br>• 출력 전압 : 5V<br>• 작동온도 범위 : -10 ~ 80℃<br>• ADC Resolution Differential : 16Bit<br>• 측정오차 : F.S. 0.1%<br>• 통신 방식 Bluetooth v1.2 class1 18dBm(w/o ant.)<br>• 통신 주파수 범위 : 2.402 ~ 2.480GHz<br>• Transmission Method : FHSS(frequency Hopping Spread Spectrum) |
| 비 고 | • 각종 회전설비 및 구조물 진동.(Tidal plant, Train, Tower, Bridge etc...) |

표 2.3.8 선정 하드웨어 모듈

| 측정 장비명 | 감속기 모니터링 시스템 module (Model: 시작품) |
|---|---|
| 장 비<br>사 진 |  |
| 측 정<br>내 용 | • 제조사 : National Instrument (USA)<br>• NI9234<br>– 채널수 : Signal 12 ch<br>Internal Timebase 주파수 : 13.1072MHz, 정확도 : ±50ppm<br>Internal Timebase Data 속도 범위 : 1.652 ~ 51.2 KS/s<br>External Timebase Data 속도 범위 : 0.392 ~ 52.734 KS/s<br>TEDS 지원타입 : IEEE 1451.4 TEDS Class 1<br>• NI9201<br>– 채널수 : Tach 2 ch<br>Input 전압 : Voltage<br>• **현재 test 및 회의를 통해 소프트웨어 및 하드웨어 개발 중** |
| 비 고 | • 감속기 모니터링 시스템 적용 하드웨어 |

새롭게 투입이 된 장비와 기존에 적용을 하였던 장비들과는 각각의 특장점이 있기 때문에 시험의 범위와 주요 분석 내용을 설정하는 것이 중요하였다. 다음 표 2.3.9는 이번 시험에서 각 계측기들이 맡은 분석 범위를 정리한 내용이다.

표 2.3.9 계측기별 분석 범위 내용 정리

| 측정장비 | 주요 분석 범위 | 비 고 |
|---|---|---|
| CSI 6500<br>(다채널 진동 분석 장비) | • 포인트 위치별 진동 Data 비교 분석<br>• 같은 조건에서의 동력차와 동력 객차 데이터 비교 분석<br>• KTX 운행 중 저속구간과 고속구간 비교 분석 | 경부선 하행,<br>호남선 상행,<br>하행 |
| 시작품<br>(NI module) | • Raw data 취득.(저속, 고속, 포인트별)<br>• 저장 공간 및 Data 취득속도 test | 경부선 상행,<br>호남선 상행 |
| SM Instrument<br>(풍력 발전소<br>모니터링 시스템) | • Data저장 및 감시시스템 개요<br>• S/W, H/W 구성도<br>• 시스템 안정성 | 경부선 상행 |
| Wireless module<br>(무선 통신 시스템) | • 대차 ↔ 실내 구성 시 통신 상태<br>• 실내 ↔ 실내 구성 시 통신 상태 | 호남선 상행 |

(2) 측정 분석 및 조건

이번 시험은 KTX 감속기 및 대차의 측정을 위한 센서 설치위치로는 동력차 및 동력객차 각각의 1차 감속기 중간 측(Idle)/출력 측/Bearing Housing, 2차 감속기 출력 측/Bearing Housing, 대차 축에 각 Point별로 3축 센서가 설치되었고, 기타 동력차 및 동력객차에 단축센서로 각각 차륜 측의 축 상 Bearing, Speed detector가 설치 되었다. 총 3축 센서 12EA, 단축센서 2EA, Speed detector 2EA로 측정 channel은 40ch로 설정되었으며, 3축 센서는 각 측정 Point당 X,Y,Z 3방향으로서 X : KTX 이동방향, Y : 차축Axle 방향, Z : 수직방향으로 고정되어 설치되었다. KTX 운행구간에 따라 다채널 진동 계측장비인 CSI 6500, 풍력 모니터링 시스템, 무선통신 시스템, 시작품, LMS(철도기술연구원)가 활용되었으며, 구간별(정차, 저속운행, 고속운행)로 계측장비를 변경하여 Data를 취득하였다. 그림 2.3.30은 이번 시험의 감시 포인트 선정 및 측정 조건을 정리한 내용이다. 그림 2.3.31은 현장에서의 센서 설치 사진이며 그림 2.3.32는 계측기와 베어링측에 센서를 설치한 장면이다.

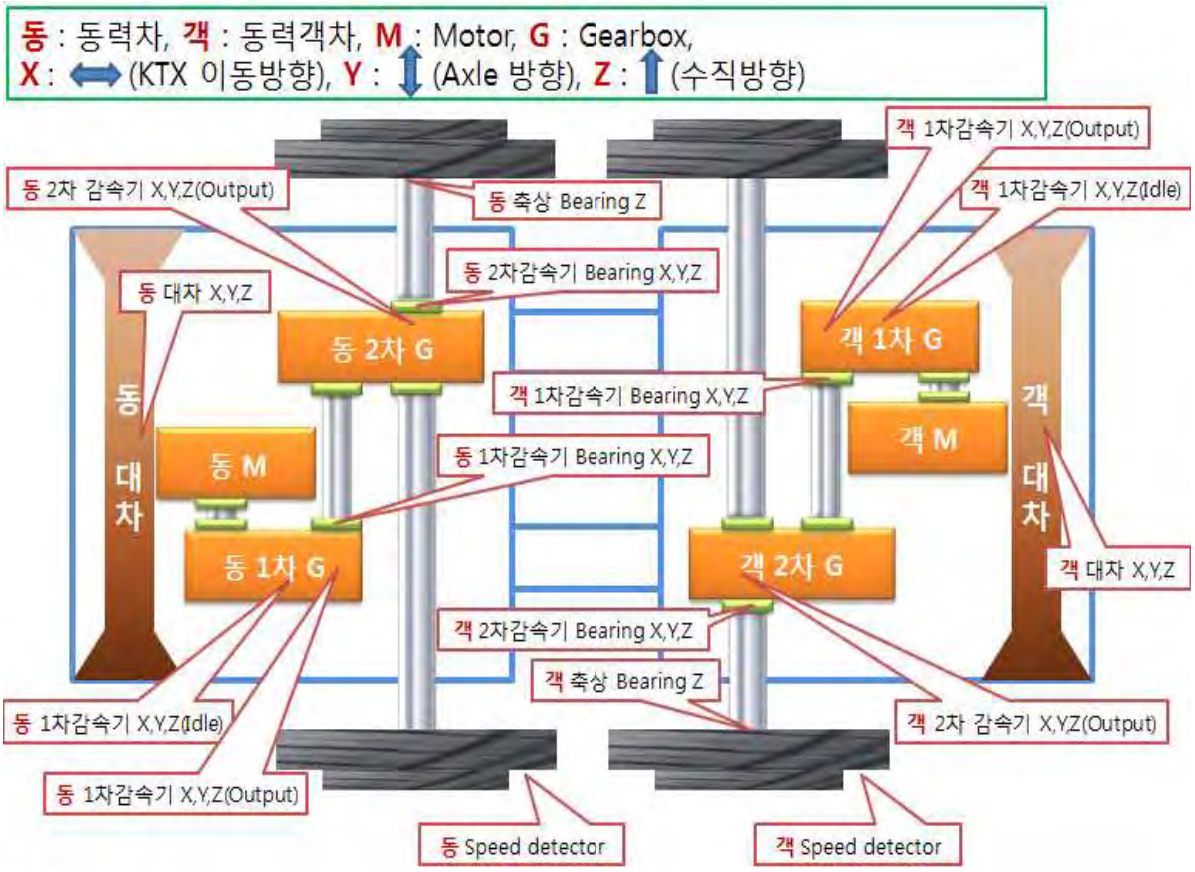



그림 2.3.30 감시 포인트 및 센서 설치 내용



① 대차



② 1차 감속기 Output



③ 1차 감속기 Idle



④ 2차 감속기 Output



⑤ Speed detector 1



⑥ Speed detector 2

그림 2.3.31 센서 현장 설치 사진



① 2차 감속기 Bearing



② 축상 Bearing



③ 1차 감속기 Bearing



④ 무선통신 Module



⑤ 센서 설치 후 Cable 포설 1



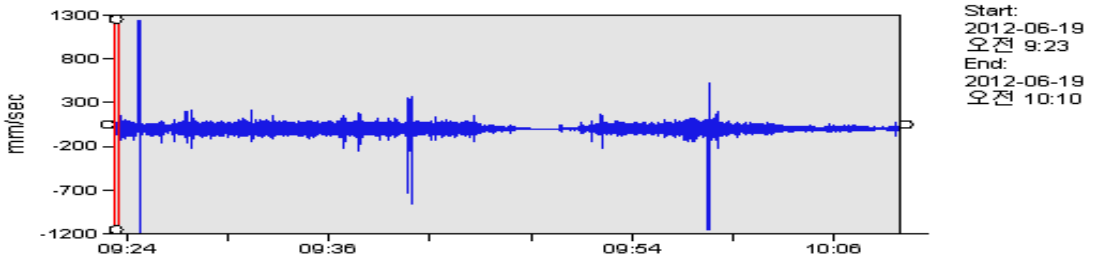
⑥ 센서 설치 후 Cable 포설 2

그림 2.3.32 센서 및 계측기 설치 사진

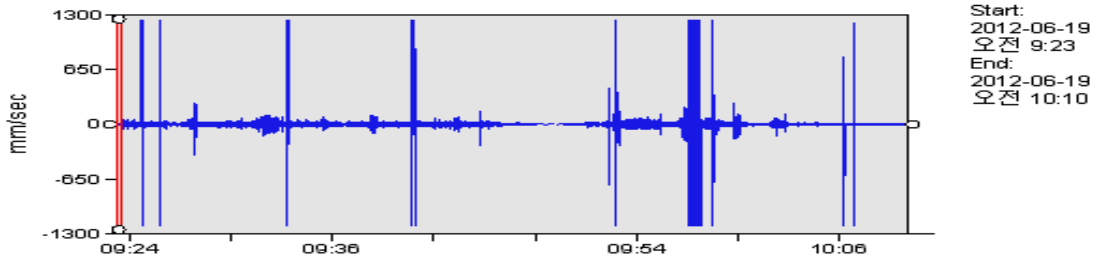
(3) 시험 측정 결과 내용 정리

이번 시험은 철도기술연구원 KTX 감속기 모니터링 시스템 개발의 취지에 맞춰, 금번 실차시험에서는 KTX 운행가동 중 선별해 놓은 측정위치, 측정조건 등을 고려하여 발생하는 감속기 및 대차의 주파수와 현재 진동상태를 비교 분석 하였다. 또한 각 Point별로 수집한 Data 상태를 바탕으로 센서의 설치위치, 계측기 상호비교를 통한 소프트웨어&하드웨어 개발을 위해 다음과 같은 분석 결과를 도출해 내었다.

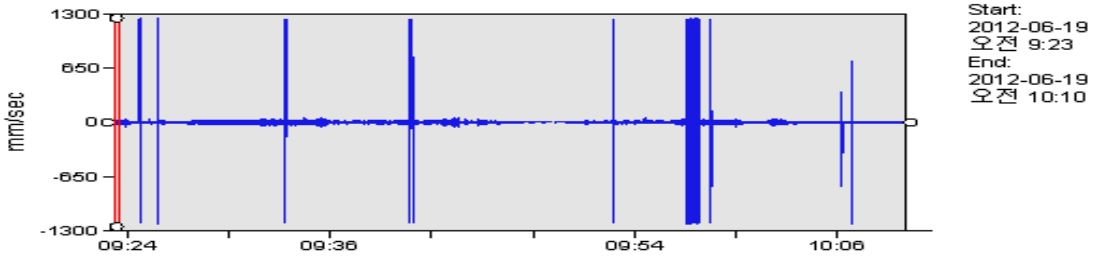
그림 2.3.33의 데이터는 CSI 6500으로 측정을 한 경부선 하행 운행구간 중 동력차에 해당하는 감속부의 진동 Time waveform 그래프이다. 정상 운행 시 1차 감속기 Idle Z, Output Y 방향에 비해 대차 Z 방향에서 평균 진동량이(약 100m/s RMS > 40m/s RMS)높게 나타나고 있지만, 레일 및 기타 충격진동의 영향은 감속기 측에서 더 많이 받는 것으로 나타나고 있다.




① 동력차 : 대차 Z



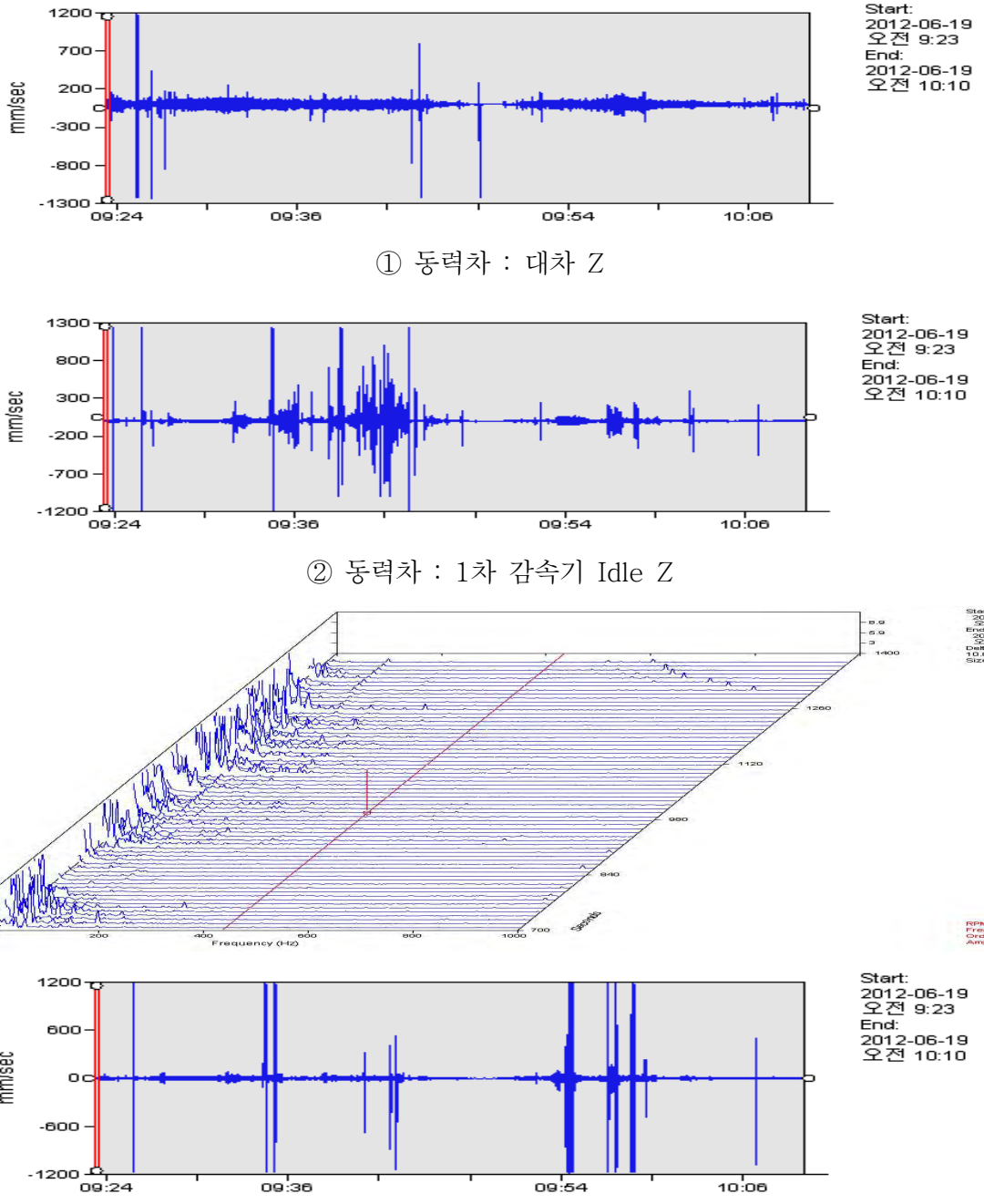

② 동력차 : 1차 감속기 Idle Z




③ 동력차 : 1차 감속기 Output Y

그림 2.3.33 동력차 ; 대차 및 1차감속기 Overall time waveform

그림 2.3.34는 CSI 6500으로 측정을 한 동력차에 이어 경부선 하행 운행구간 중 동력객차에 해당하는 감속부의 진동 Time waveform 그래프이다. 1차 Idle Z방향에서 약9시 30분 ~ 9시 45분까지 진동량이 동력차에 비해 크게 나타나고 있는데, cascade 분석결과 300Hz 이하대역의 주파수가 크게 나타나고 있는 것으로 보아 감속기 축 진동 및 KTX 차량의 떨림으로 인한 3X~10X 주파수에 의한 영향이라 판단된다. 전체적인 Overall 형태는 동력차와 매우 흡사하게 나타나고 있고, 동력차와 마찬가지로 동력객차에서 충격진동의 형태가 크게 나타나고 있다.



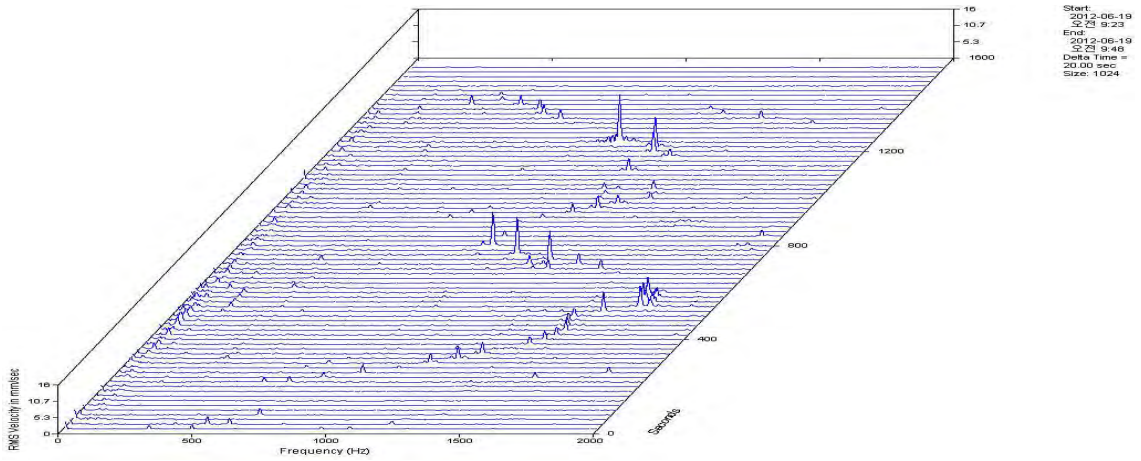

① 동력차 : 대차 Z

② 동력차 : 1차 감속기 Idle Z

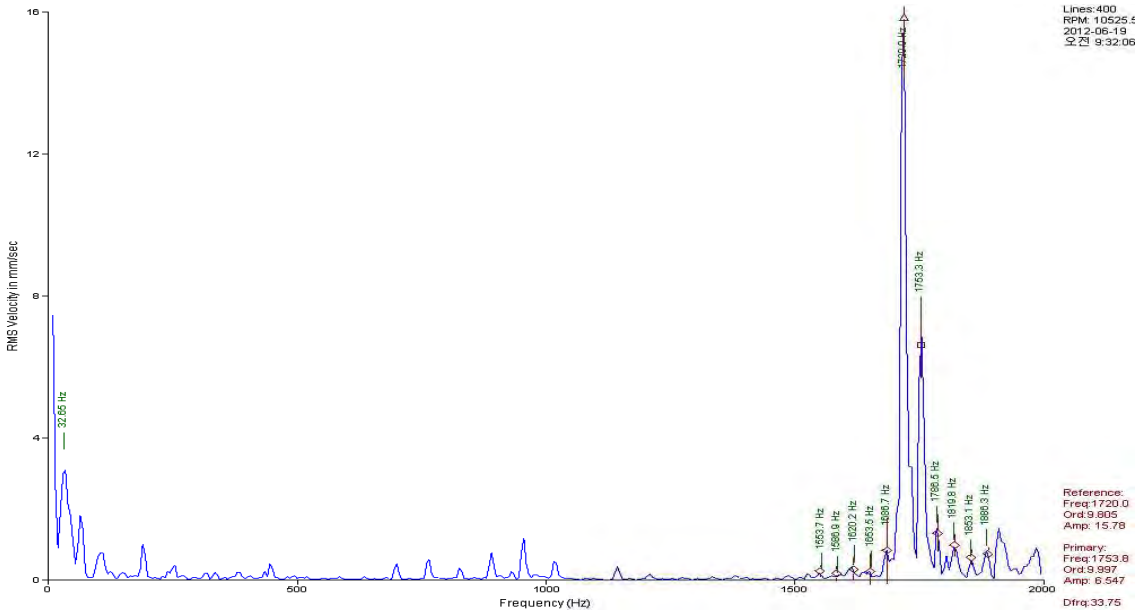
③ 동력차 : 1차 감속기 Output Y

그림 2.3.34 동력객차 ; 대차 및 1차감속기 Overall time waveform

그림 2.3.35의 데이터는 속도 변화에 따라 변화하는 1차 감속기 GMF를 살펴보기 위해 동력차 1차감속기 Idle Z방향의 cascade 그래프와 특정 고속구간의 spectrum을 분석한 data이다. cascade data를 보면 KTX 속도가 증가 혹은 감소함에 따라 1차 감속기 GMF가 sideband를 동반한 상태에서 계속 변화하고 있는 것을 확인할 수 있다. 감속기는 속도 변화에 따라 변화하는 주파수 성분들이 많기 때문에 cascade그래프에서 솟아오른 주파수가 1차 감속기 GMF라는 것을 입증하기 위해서 고속구간인 약 302km/h의 시속으로 달릴 때의 1차 감속기 Pinion Shaft 1X(33.7Hz), 1차 감속기 Gear잇수 등을 고려해 계산한 GMF(1,720Hz) 계산 값이 주파수와 일치하고 있음이 확인되었다.




① 동력차 ; 1차감속기 Idle Z cascade




② 동력차 ; 1차감속기 Idle Z Spectrum

그림 2.3.35 동력차 ; 1차 감속기 GMF

그림 2.3.36의 데이터는 같은 시점 및 같은 조건에서의 측정 Point별 Spectrum Data이다. 약 150km/h 조건으로 위에서부터 차례대로 동력차 대차 Z, 1차감속기 Idle Z, 1차감속기 Output Y, 동력객차 대차 Z, 1차감속기 Idle Z, 1차감속기 Output Y 순서이다. 대체적으로 동력객차 포인트보다는 동력차에서 주파수 성분들이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 위의 1차 감속기 포인트에서 상대적으로 눈에 띄는 좌측의 높은 주파수 성분들은 약 870Hz대역의 주파수로서 1차 GMF에 해당하는 값이다. 또한 우측의 높은 주파수 성분들은 1750Hz대역으로서 2차 GMF에 해당하는 값이고, 저주파수 대역에서 32HZ의 모터 Drive 1X성분이 나타남과 동시에 1,2차 GMF에서도 sideband로 모터 Drive 1X성분이 나타나고 있는 것이 확인된다.

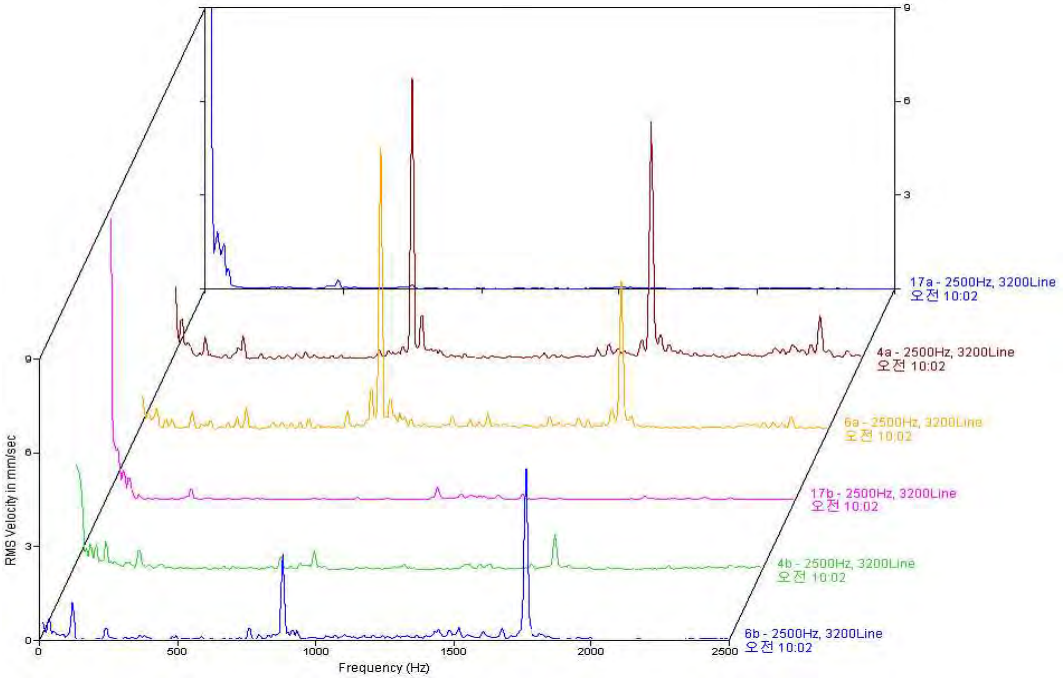
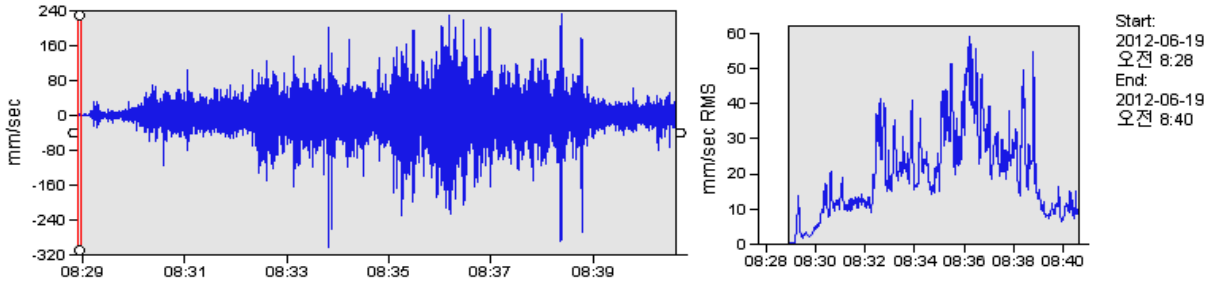
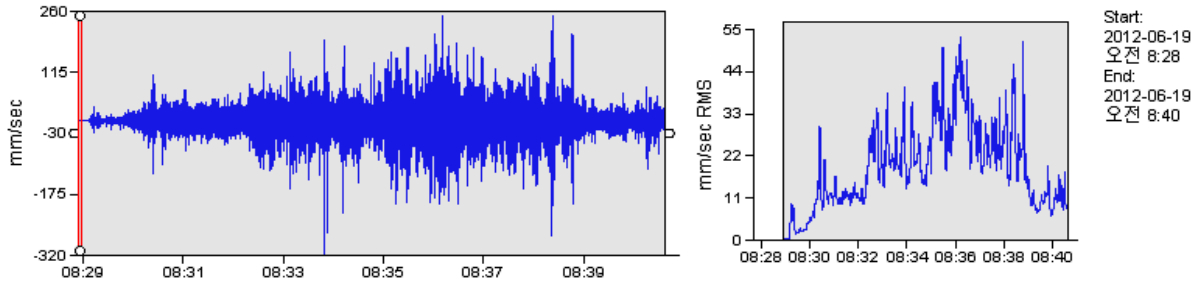



그림 2.3.36 동력차 및 동력객차 ; Point별 Spectrum

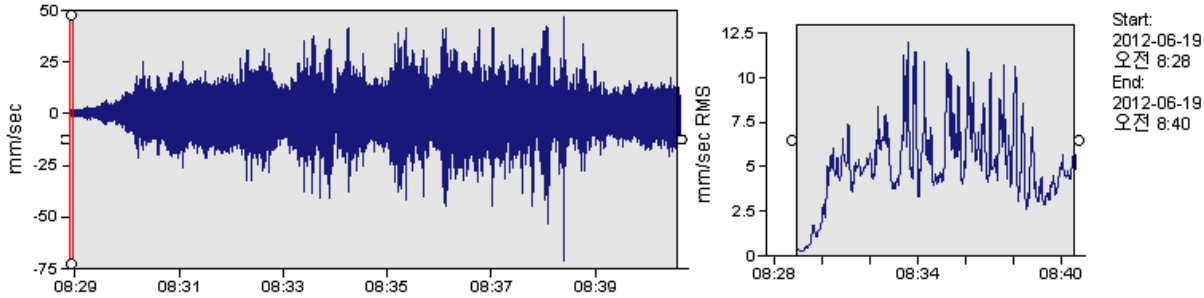
그림 2.3.37의 데이터는 과도상태에서의 동력차와 동력객차를 비교분석 하기 위한 Data로서 6월 19일 8:30분경 대전역을 출발한 KTX의 동력차 및 동력객차의 1차 감속기 Output측 Y방향과 대차 Z방향을 나타낸 그래프이다. 저속으로 운행되는 구간이고 Overall time waveform 형태는 크게 차이가 나지 않은 것으로 확인 된다. 진동량 비교 결과 동력차와 동력객차의 1차감속기 Output Y측은 진동량이 크게 차이가 나지 않지만, 대차측은 동력차측이 동력 객차 측에 비해 진동량이 조금 높은 것(동력차 대차 약 150mm/s RMS > 동력객차 대차 약 110mm/s RMS)으로 나타났다.



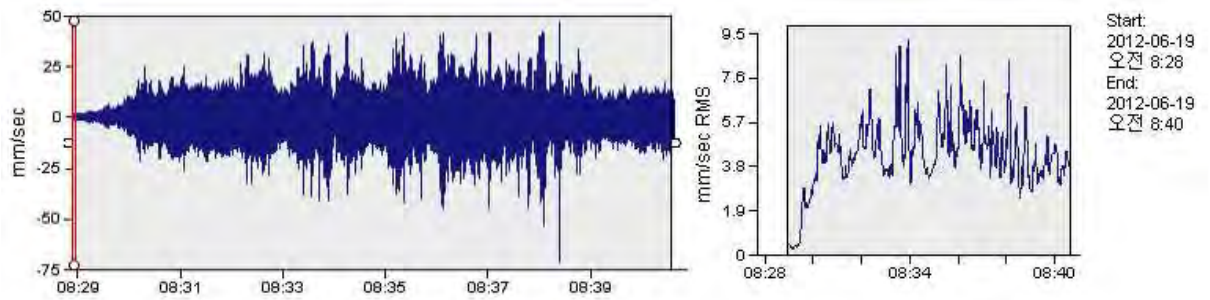

① 동력차 ; 대차 Z




② 동력객차 ; 대차 Z




③ 동력차 ; 1차 감속기 Output Y

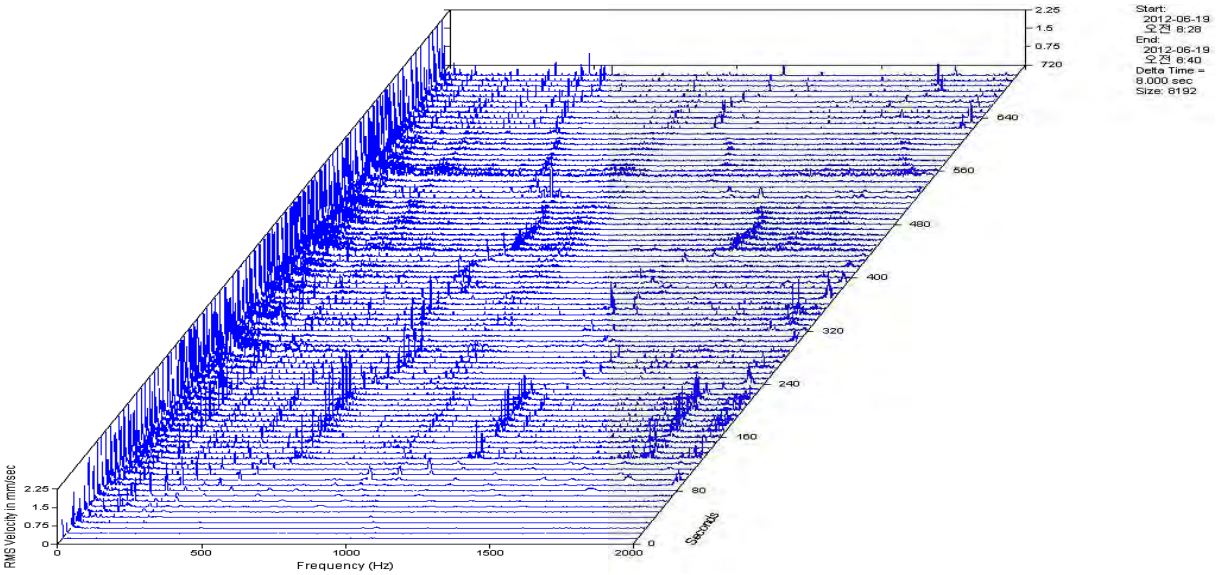



④ 동력객차 ; 1차 감속기 Output Y

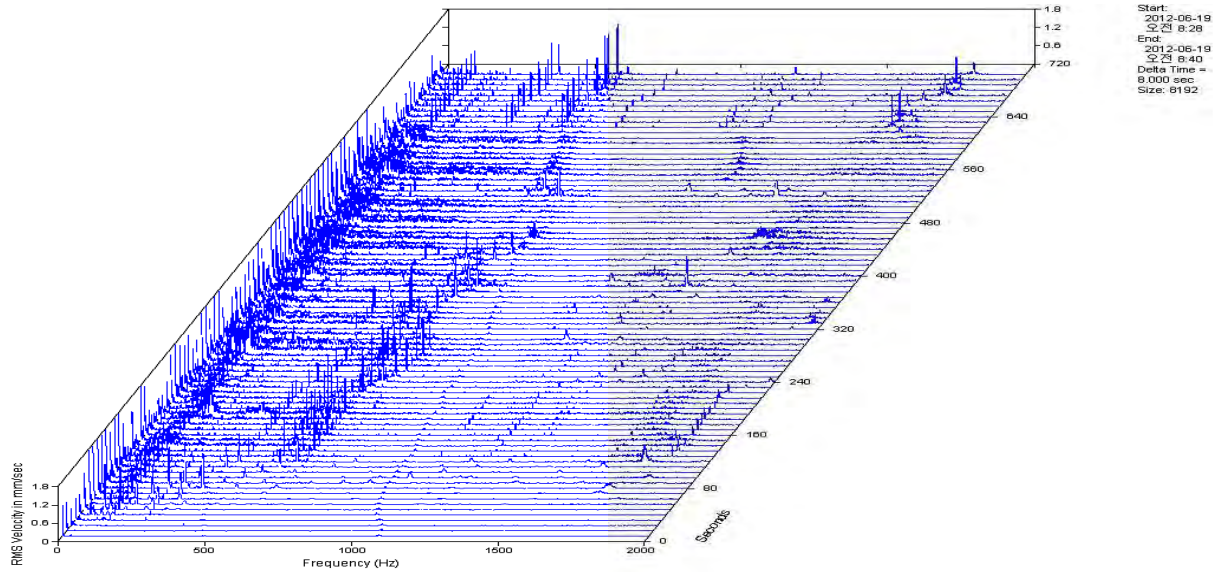
그림 2.3.37 동력차 및 동력객차 ; 1차 감속기 과도상태

그림 2.3.38의 주파수를 정밀하게 분석을 하여 보면 그림 2.3.56과 같다. 아래의 데이터는 동력차 및 동력객차의 1차 감속기 Idle Z cascade Data이다. 저속구간이기 때문에 약 110km/h로 운행 시 계산된 1차 감속기 GMF는 약 615Hz이다. 위의 Data를 비교해보면 동력차의 1차감속기에서는 GMF의 Harmonic 성분인 2X, 3X 성분까지 나오는 것을 확인할 수 있는 반면 동력객차의 1차감속기에서는 Harmonic 성분들이 거의 검출되지 않았다. 위의 Data를 바탕으로 감속기를 분석해보면 동력차의 1차감속기에 맞물린 기어의 모터기어 축, 중간기어 축, 출력기어 축 사이에 평행이 이뤄지지 않았다는 것을 의미한다.

○ 동력차 1차감속기 Idle Z방향 1차 GMF: 2.58, 2차: 1.58, 3차: 1.5 mm/s RMS
○ 동력객차 1차 감속기 Idle Z방향 1차 GMF: 1.1 mm/s RMS




① 동력차 ; 1차 감속기 Idle Z

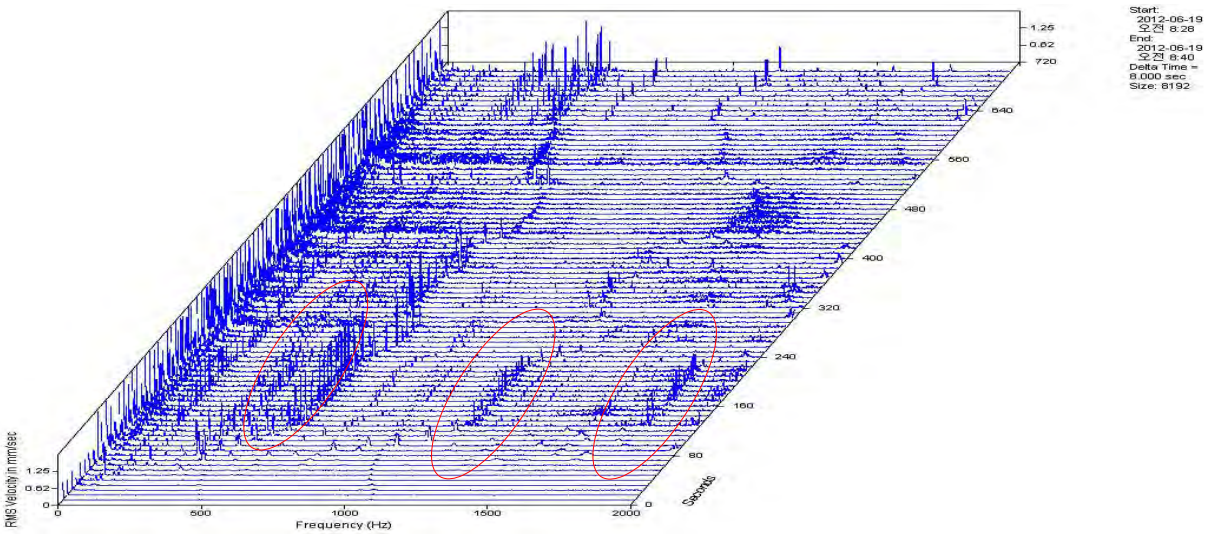



② 동력객차 ; 1차 감속기 Idle Z

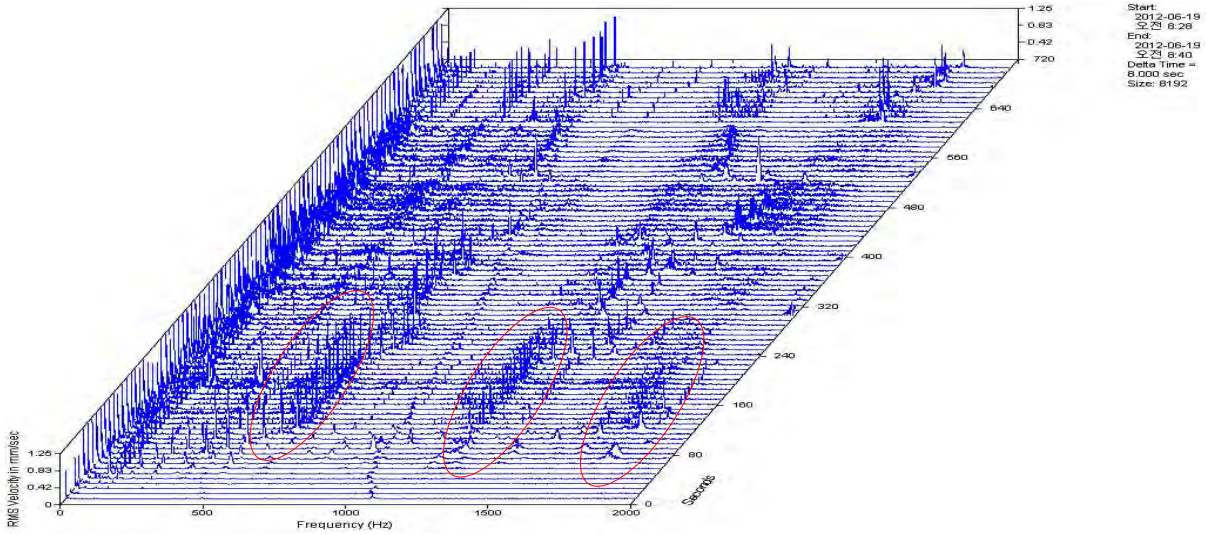
그림 2.3.38 동력차 및 동력객차 ; 1차 감속기 Idle Z cascade

그림 2.3.39의 데이터는 동력차 및 동력객차의 1차 감속기  Output Y cascade Data이다. GMF를 보면 전Data인 동력객차 Idle Z 방향에서 미세하게 나타났던 GMF 2차, 3차 주파수가 동력객차 Output Y 방향에서는 뚜렷하게 나타나고 있다. 이는 1차 감속기 센서 위치 선정 시 Idle 방향보다는 Output 방향이 감속기 결함을 파악하는데 더 주요한 위치가 될 것이라고 사료된다.

○ 동력차 1차감속기 Output Y방향 1차 GMF: 2.6, 2차: 1, 3차: 1.2 mm/s RMS
○ 동력객차 1차감속기 Output Y방향 1차 GMF 2.7, 2차 0.9, 3차: 0.6mm/s RMS




① 동력차 : 1차 감속기 Output Y




② 동력객차 : 1차 감속기 Output Y

그림 2.3.39 동력차 및 동력객차 ;  1차 감속기 Output Y cascade

시험을 진행하면서 저속구간과 고속구간에 대한 주파수의 비교 분석이 필요하였다. 그림 2.3.40은 동력차 1차 감속기의 IDLE Z 축의 저속구간과 고속구간을 비교한 내용이다.

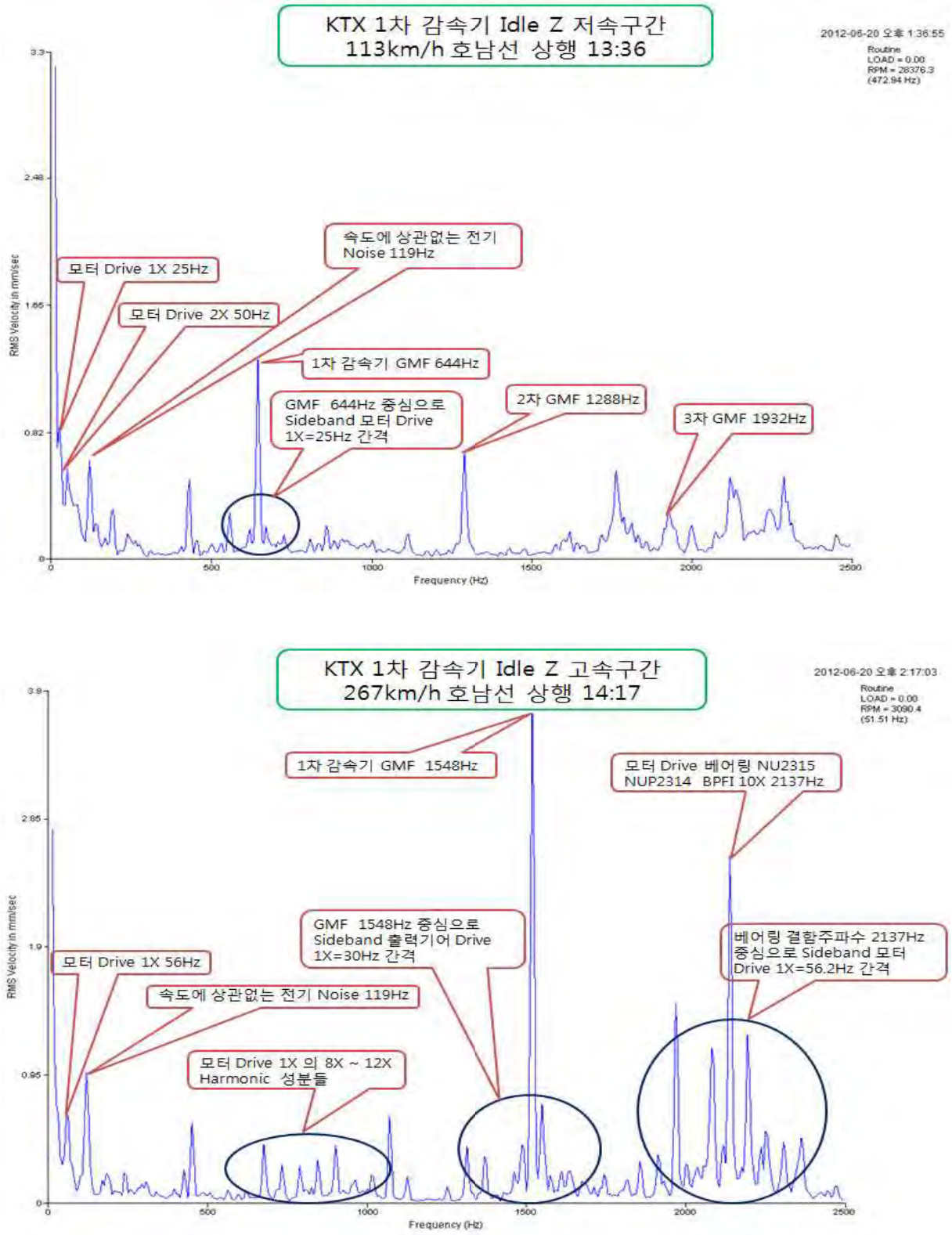



그림 2.3.40 동력차 : 1차 감속기 Idle Z 저속구간 및 고속구간

그림 2.3.41는 동력차 1차 감속기의 Output Y 축의 저속구간과 고속구간을 비교한 내용이다.

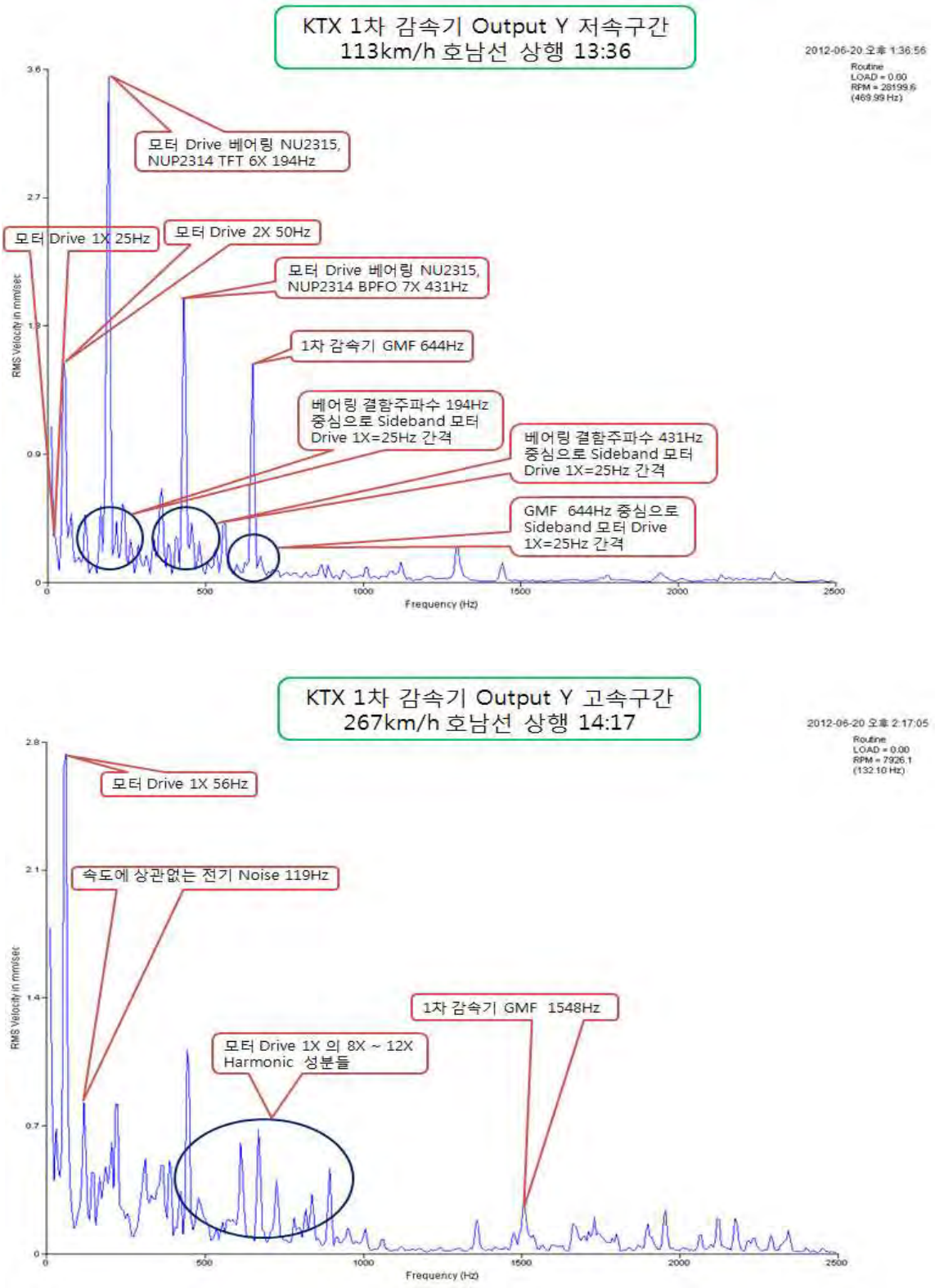
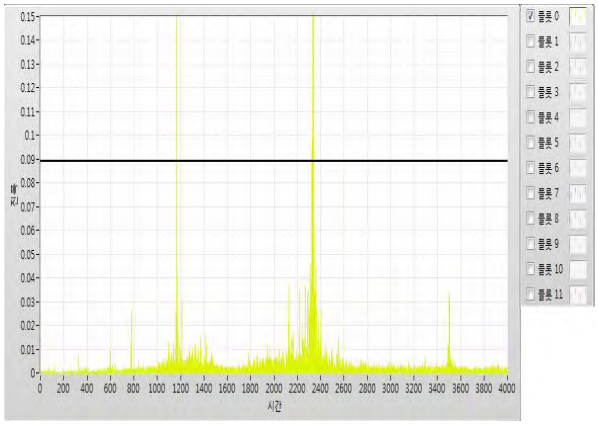
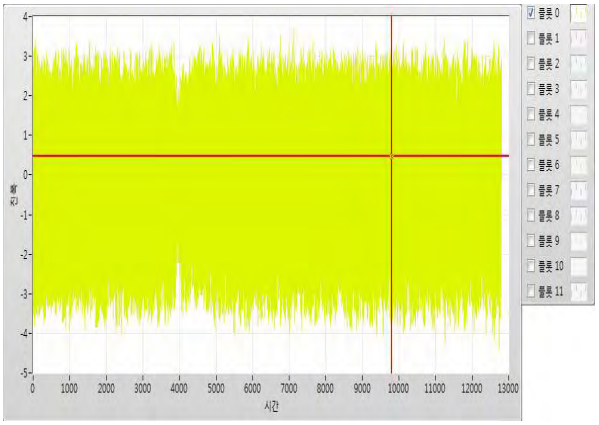



그림 2.3.41 동력객차 : 1차 감속기 Output Y 저속구간 및 고속구간

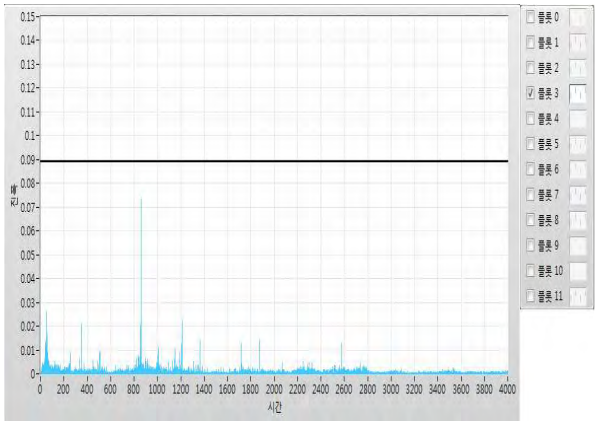
그림 2.3.42는 이번 하드웨어 구축에서 선정한 NI하드웨어 모듈의 데이터 취득 화면이다. 데이터 취득은 간이 소프트웨어를 작성을 하여 데이터를 취득하였다. 그림의 데이터는 시작품에 대한 Point별 진동 Data 값이다. 아직 개발진행중이라 여러 가지 기능 및 분석기능은 구현되지 않았으나, Data 신호불량인 Sensor를 제외하고는 Raw data 및 Spectrum data 수집, Data 저장 공간 및 Data 취득속도 모두 양호한 상태를 보여줬다.



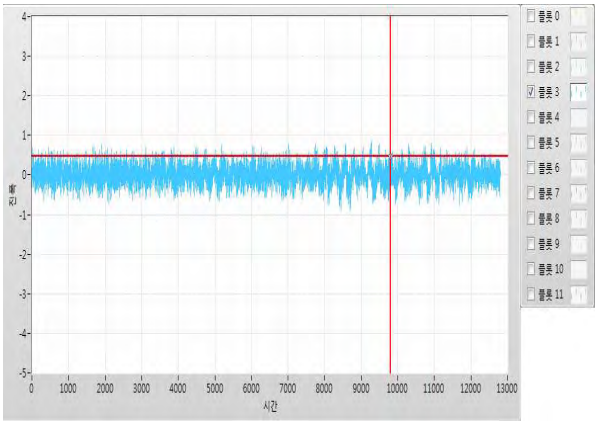
① 동력차 1차감속기 Y Spectrum



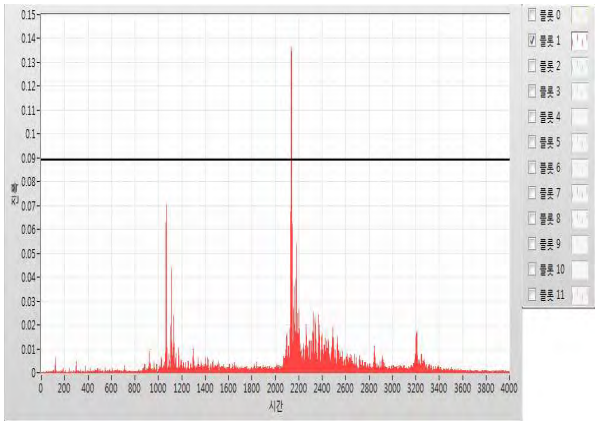
② 동력차 1차감속기 Y Timewaveform



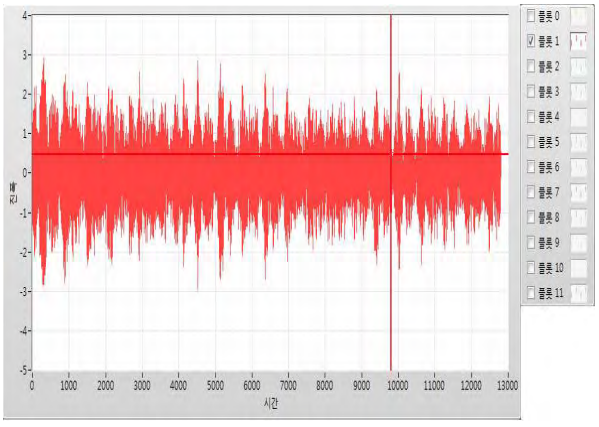
③ 동력차 1차 감속기 Z Spectrum



④ 동력차 1차 감속기 Z Timewaveform



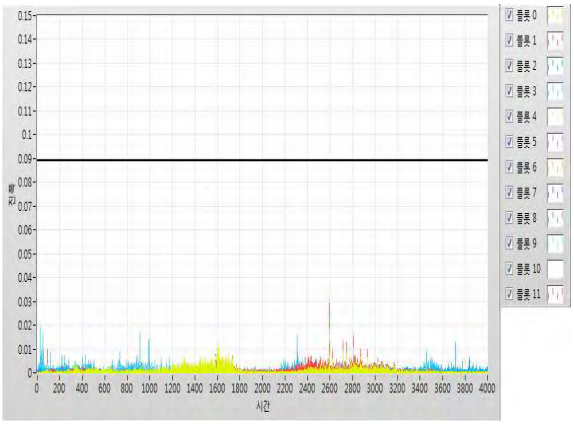
⑤ 동력객차 1차 감속기 Y Spectrum



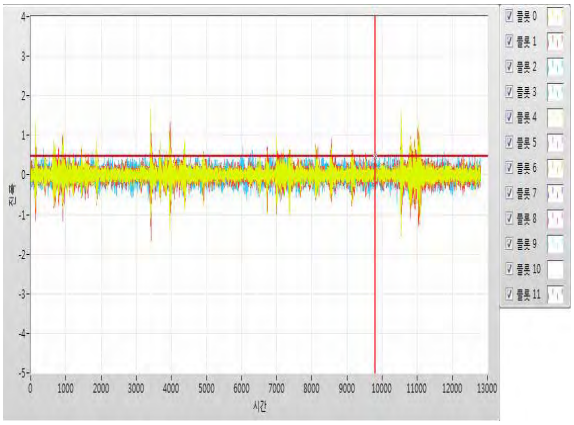
⑥ 동력객차 1차 감속기 Y Timewaveform

그림 2.3.42 NI 하드웨어 데이터 취득 내용

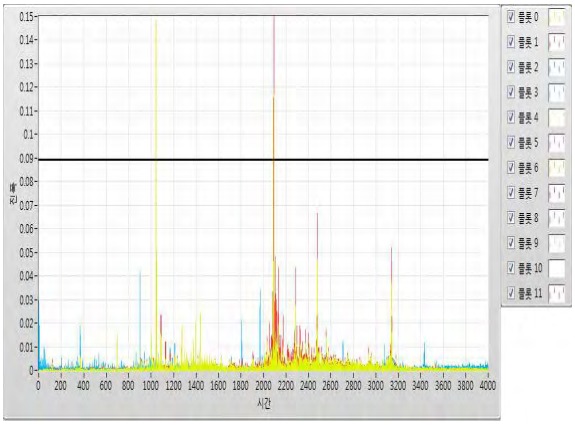
그림 2.3.43은 NI하드웨어가 주행 중인 열차의 저속구간과 고속구간에서 데이터를 취득한 스펙트럼 및 타임 웨이브 폼 데이터를 나타내는 것이다. 취득된 두 데이터는 저속구간 및 고속구간에서 정상Sensor로부터 얻어진 진동 Data 값이다. CSI 6500 Data와 비교 시 KTX 속도변화에 따른 회전주파수 성분 및 GMF의 변화가 실시간으로 잘 저장 되었고, 이는 가용할 수 있는 다채널 진동 data 수집 시 system상 큰 부하가 걸리지 않는 다는 것을 입증할 수 있는 Data라고 판단된다.



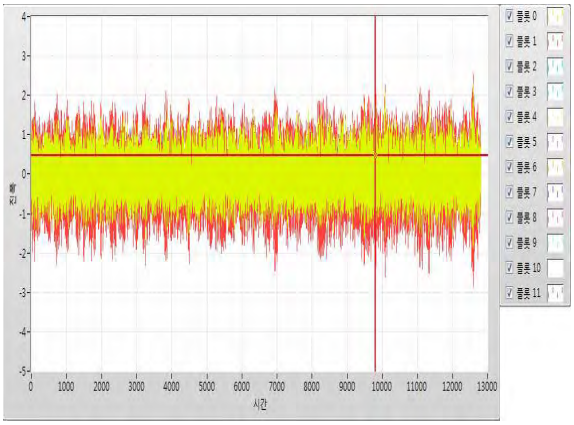
① 전체 Point 저속구간 Spectrum data



② 전체 Point 저속구간 Timewaveform data>



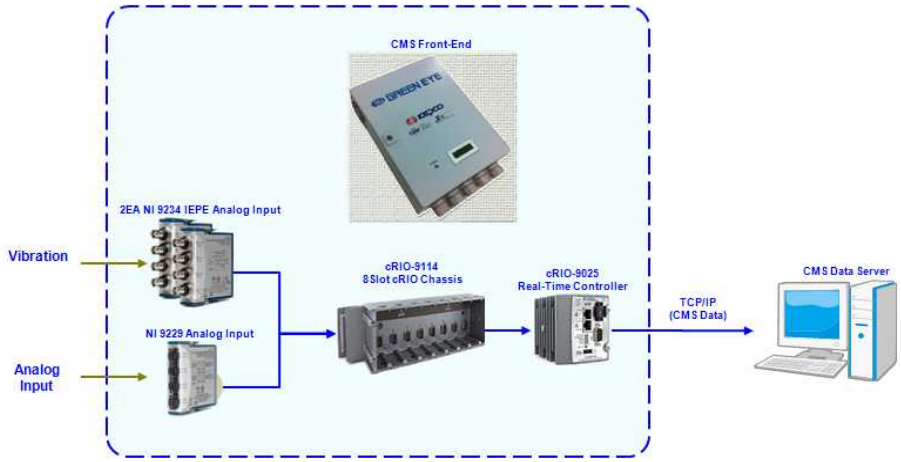
③ 전체 Point 고속구간 spectrum data



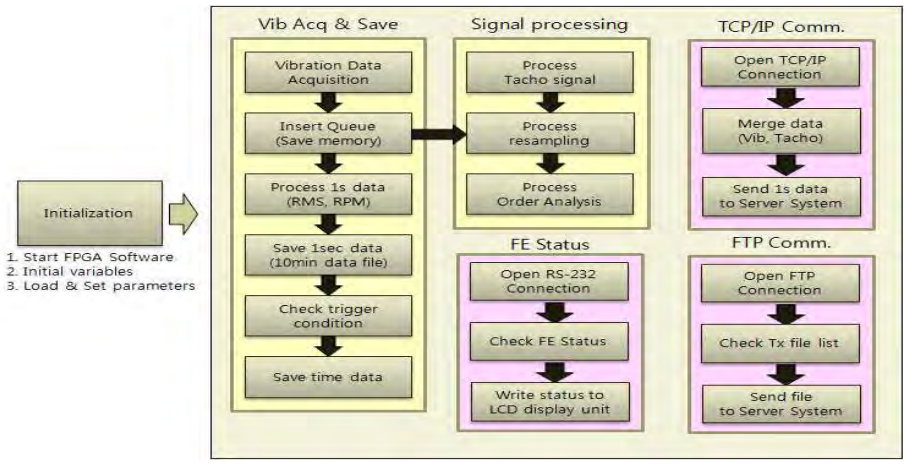
④ 전체 Point 고속구간 Timewaveform data

그림 2.3.43 저속구간 및 고속구간 전체 Data 취득 상태

개발을 하는 NI하드웨어 모듈과 더불어 이번 시험에 적용을 한 SM 인스트루먼트의 풍력발전소 모니터링 시스템을 동시에 적용을 하여 진동 데이터를 수집 및 신뢰성 테스트 평가를 수행하였다. 풍력 모니터링 시스템의 Data 저장 및 처리기능에 관련된 사항은 다음과 같다. 8채널의 진동 채널에서 초당 1번씩 진동 RMS값을 받아들여 10분에 한번씩 Data를 저장하는 형식이며, trigger 설정 시 전2~3초 data와 trigger 조건에 맞는 raw data를 따로 저장하는 방식이다. FTP communication 방식은 생성된 10분 data파일과 trigger파일을 server로 전송한다. server에 설치된 software의 주요 기능으로는 8개의 진동 채널에서 수집한 RMS data와 1개의 tach 채널에서 수집한 data를 1초간격의 실시간으로 보여줌과 동시에 저장된 파일의 data 분석이 가능한 시스템이었다. 다음 아래의 그림 2.3.44는 풍력 발전용 모니터링 시스템의 정보이다.




① Hardware 구성




② Software 구성

그림 2.3.44 풍력발전용 온라인 모니터링 시스템 구성

풍력 발전용 모니터링 시스템을 적용을 하여 시험을 진행한 결과는 다음 아래의 그림 2.3.45와 같다. 시험 내용을 요약하여 정리를 하자면 실차 측정 시 Data 수집 관련 사항으로는 저속구간에서는 Data 수집이 원활히 이루어졌지만, 과부하를 받는 고속구간에서 시스템이 shutdown되는 현상이 발생하였다. 풍력발전소에서 고정되어 모니터링을 하는 목적으로 만들어진 module이기 때문에 달리는 KTX 열차의 조건과는 잘 맞지 않는 Module이라 사료된다. 이번 시험을 진행을 하면서 무선 데이터 온라인 모니터링 시스템의 검증은 굉장히 중요한 공정 중에 하나였다. 그 이유는 온라인 모니터링을 무선으로 구축을 할 수만 있다면 센서의 설치에 따른 복잡한 케이블 포설 등의 번거로운 작업을 하지 않아도 되기 때문에 설계를 수행하기 전에 무선으로 감속기와 대차의 진동 측정 가능 여부를 확인을 하고자 하였다. 다음 아래의 그림 2.3.46은 대차-실내로 이어지는 센서-계측기간의 데이터 취득 상태를 표현한 그림이다.

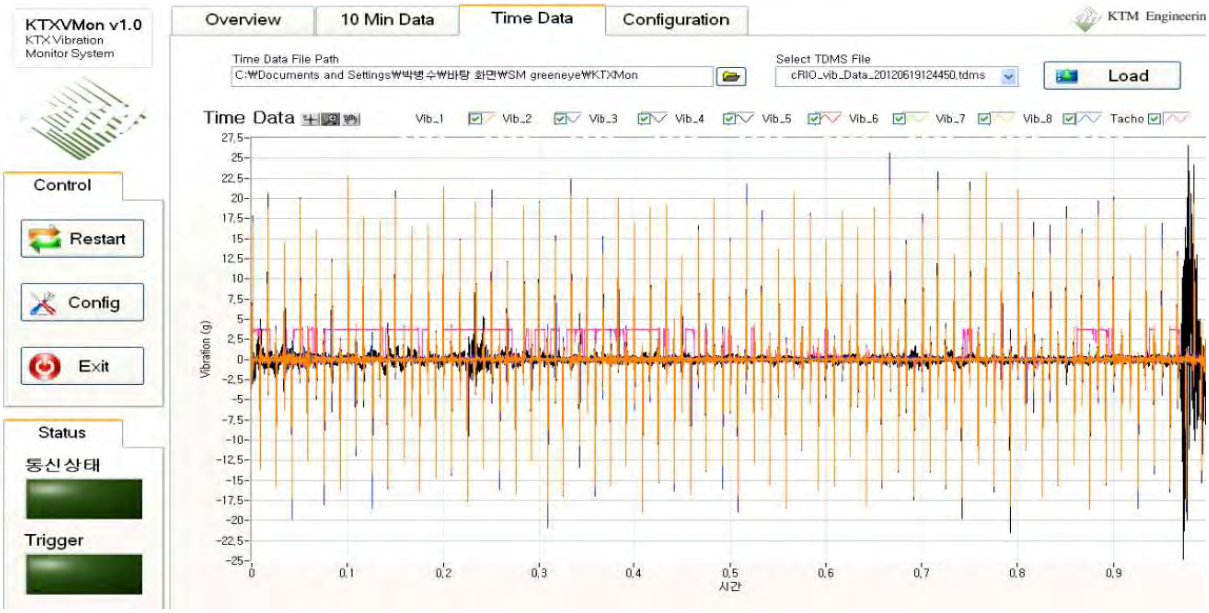



그림 2.3.45 풍력발전용 모니터링 시스템 실차 시험 적용 결과




그림 2.3.46 대차-실내 무선 데이터 취득 상태

그림 2.3.46의 데이터를 보면 동력차 대차에 무선모듈을 설치하고 KTX 내부에서 Data를 받아본 결과이다. 가장 최적조건의 Data수집 속도에도 불구하고 약 5초에서 최대 15초 간격으로 Data가 수집되는 현상이 나타나고 있다. 센서와 계측기간의 거리가 멀고 KTX구성 및 가동조건상 무선통신 전파방식에 방해 되는 요소가 있어 불규칙적으로 Data가 수집되고 있다고 사료되고, 수집된 진동 Data의 주파수 또한 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단된다.

대차-실내로 이어지는 구간에 대해서는 데이터의 취득 상태가 불량하다고 판단이 되어 열차 운행 중 실내=실내에서 진동 데이터를 취득하는 시험을 수행을 하였다. 그림 2.3.47은 데이터 취득 상태를 표현한 그림이다.

측정된 데이터의 내용을 보면 Data 수집 간격은 약 3~4초정도로 확인되고 있고, 거리가 가까워짐에 따라 Data 수집시간이 축소되는 결과는 얻었지만 3~4초간격의 Data 수집 속도로도 감속기모니터링 시스템을 구성하기엔 부족하다는 결론이 나왔다. 주파수 안정성도 신뢰할 수 있을만한 Data가 아니라는 결론과 더불어 무선통신모듈은 개발 중인 실차 system을 구성하기에는 다소 부족한 면이 있다고 사료되는 결과를 얻었다.




그림 2.3.47 실내-실내 무선 데이터 취득 상태

(4) 시험 종합 측정 계측기별 결과 정리

(가) CSI 6500 계측기

○ 동력차/동력객차의 대차 및 1차감속기 Overall 비교 분석

동력차의 경우 정상 운행 시 1차 감속기 Idle Z, Output Y방향에 비해 대차 Z방향에서 평균 진동량이 높게(약 100m/s > 40m/s)나타나고 있고, 레일 및 기타 충격진동의 영향은 감속기 측에서 더 많이 나타난다. 동력객차는 1차감속기 Idle Z 방향에서 동력차에 비해 300Hz 이하의 주파수 대역이 높은 것으로 보아 축 진동에 의한 영향을 크게 받고 있다고 추정되고, 전체적인 진동량 형태는 동력차와 매우 흡사하게 나타나고 있다.

○ 동력차 1차 감속기 GMF

운행속도 변화에 따라 회전성분들의 특정 주파수가 변하는 KTX 감속기 특성상 GMF를 살펴보면 Sideband를 동반한 형태로 GMF가 계속 변화하고 있는 것을 Data 상에서 확인할 수 있다. 고속구간인 시속 약 302km/h로 운행 시, 1차 감속기 Pinion shaft 1X(33.7Hz)와 1차감속기 Gear 잇수 등을 고려해 계산한 결과 값이 1,720Hz로 나타나고, 이는 1차감속기 GMF와 일치한다.

○ 동력차 및 동력객차 Point별 Spectrum

시속 약 150km/h의 조건에서 측정 Point별 Spectrum Data를 보면, 전반적으로 동력객차 포인트보다는 동력차에서 주파수 성분들이 뚜렷하게 나타나고 있다. 뚜렷하게 나타나고 있는 870Hz성분은 1차 감속기 GMF에 해당하는 값이고, GMF 2X성분인 1,750Hz도 나타나고 있다.

○ 동일조건에서의 동력차 및 동력객차 1차감속기 Idle Z방향 비교 분석

저속구간인 110km/h로 운행 중 일 때에 계산된 1차 감속기 GMF는 약 615Hz이다. 주파수 특성을 살펴보면 동력차 1차감속기의 Idle Z방향에서 1차 GMF(2.58mm/s RMS)를 비롯한 Harmonic성분인 2X(1.58mm/s RMS), 3X(1.5mm/s RMS)성분까지 나오는 것을 확인한 반면, 동력객차에서는 1차 GMF(1.1mm/s RMS)만 나타나고 있다.

○ 동일조건에서의 동력차 및 동력객차 1차감속기 Output Y방향 비교 분석

동일조건의 동력차 및 동력객차 Idle Z방향과의 비교분석을 위해 Output Y방향의 진동량 및 Spectrum을 분석 하였다. 그 결과 동력객차 Idle Z방향에서 미세하게 나타났던 GMF 2차 주파수(0.9mm/s RMS)과 3차 주파수(0.6mm/s RMS)가 동력객차 Output 방향에서는 뚜렷하게 나타나고 있다. 이로 말미암아 1차감속기 센서 위치 선정 시 Idle 방향보다는 Output 방향이 감속기 결함을 파악하는데 더 주요한 위치가 될 것이라고 판단된다.

○ 1차 감속기 Idle Z방향 저속구간 및 고속구간 비교분석

113km/h 저속구간에서 감속기 Idle Z방향의 Spectrum을 살펴보면 모터 Drive 1X(25Hz), 모터 Drive 2X(50Hz), 전기 Noise(119Hz), 1차감속기 1차 GMF(644Hz), 2차 GMF(1,288Hz), 3차 GMF(1,932Hz)가 주요 주파수로 나타나고 있고, 267km/h의 고속구간에서는 모터 Drive(56Hz), 전기 Noise(119Hz), 모터 Drive Harmonic 성분 8X ~ 12X, 1차 감속기 1차 GMF (1,548Hz), 모터 베어링 NU2314 · NUP2314 BPFI 10X(2,137Hz)가 주를 이루고 있다.

○ 1차 감속기 Output Y방향 저속구간 및 고속구간 비교분석

113km/h 저속구간에서 감속기 Output Y방향의 주요 Spectrum을 분석해보면, 모터 Drive 1X(25Hz), 모터 Drive 2X(50Hz), 모터 Drive 베어링 NU2315 · NUP2314 TFT 6X(194Hz), 모터 Drive 베어링 NU2315 · NUP2314 BPFO 7X(431Hz), 1차감속기 1차 GMF(644Hz)가 주요 주파수로 나타나고 있고, 267km/h의 고속구간에서는 모터 Drive 1X(56Hz), 전기 Noise(119Hz), 모터 Drive Harmonic 성분 8X ~ 12X, 1차 감속기 1차 GMF 1,548Hz가 주요 주파수로 상승해 있다.

(나) NI 하드웨어 모듈

○ Point별 Data 취득 상태

아직 시작품이 개발진행 단계이기 때문에 여러 가지 기능 및 분석기능은 구현이 되어 있지 않지만, 현재 까지 개발한 Module에서 Data 취득 상태를 보면 신호불량인 Sensor를 제외하고는 Raw data 수집이 원활하게 이루어 졌고, Data 저장 및 Data 취득속도 모두 양호한 상태이다.

○ 저속구간 및 고속구간 전체 Data 취득 상태

CSI 6500 Data와 마찬가지로 KTX 속도변화에 따른 회전주파수 성분이 실시간으로 잘 저장되어 분석 Data로 나타나고 있고, 이는 가용할 수 있는 다채널 진동 Data 취득 시에도 system상 큰 부하가 걸리지 않는다는 것을 입증할 수 있는 부분이라 판단된다.

(다) 풍력 발전소 온라인 모니터링 시스템

○ Data 저장 및 시스템 안정성

KTX 실차 측정 시 저속구간에서는 Data를 취득하는데 문제가 없었지만, 고속구간으로 접어들어 과부하를 받기 시작한순간 시스템이 멈추는 현상이 발생하였다. 풍력발전소에서 고정되어 사용되던 Module이기 때문에 달리는 KTX 열차의 조건과는 맞지 않는 것으로 사료되고, 모니터링 시스템으로는 미흡하다고 판단된다.

(라) 무선 통신 시스템

○ 대차-실내 Data 취득 상태

최적의 Data 취득 조건에도 불구하고 거리가 약 10m정도 되는 상태에서 data 수집 시 최소 5초에서 최대 15초까지 걸리는 현상이 나타나고 있다. 이는 실시간으로 감속기 상태를 모니터링 해야하는 조건에 부적합하다고 사료되고, 수집된 진동 Data 또한 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단된다.

○ 실내-실내 Data 취득 상태

거리를 가까운 조건으로 하여 실내-실내 Data를 취득해 보면, 대차-실내에 비해 Data 수집 시간은 3~4초정도로 빨라졌지만, 역시 실시간으로 감속기 상태를 파악해야하는 system에서는 부적합하다고 사료된다. 시작품 개발 시 무선통신시스템에 대한 논의가 많았지만, 이번 2차 KTX실차 시험결과 유선통신시스템 방식을 채택하는 것이 모니터링 및 Data취득에 더 주요하다고 판단된다.

다. KTX 감속기 측정 최종 위치 및 파라미터 검증 시험 – 2012년 6월 ~ 10월 수행

(1) 시험의 개요

모니터링 시스템 개발을 진행하면서 1차적으로 이상 진단을 감지하기 위한 최적의 진동 파라미터 설정과 함께 가장 중요한 부분이 바로 최적의 감시 포인트를 선정 하는 것 이었다. KTX 감속기 모니터링 시스템 개발에 대한 감속기 최적의 진동측정 위치와 분석 Parameter를 선정하기 위해 수행되었다. KTX 실차 및 Lab실 실물시험 Data를 바탕으로 KTX 운행 시 해당 기어의 진동신호를 가장 잘 취득할 수 있는 위치, 장기간 부착 상태에서의 안전한 위치, 유지보수가 편리한 위치 등의 조건을 고려하여 측정 위치를 선정함과 동시에 2차 감속기를 대상으로 진동분석을 위한 구체적인 Parameter를 규정하고자 하였다. 측정 대상은 한국 철도공사의 KTX 실차 시험과 한국철도기술연구원의 감속기 Lab 실물 시험을 통하여 측정을 하고자 하였다. 시험은 KTX 실차 시험은 2012년 6월에 진행을 하였고 철도기술연구원의 감속기 실물시험은 2012년 7월과 10월에 걸쳐서 시험을 진행을 하였다. 이번 시험의 가동 조건은 아래와 같이 정리를 하였다.

○ 실차시험 : 과도운전상태/정상운전상태 조건 (정거장 정류/가속/감속)
○ 실물시험 : 1,000N/m 부하조건의 690RPM, 2차 감속기 3,000N/m 부하조건의 690RPM & 1,680 RPM

이번 시험을 진행을 하면서 측정 위치와 조건은 아래의 그림 2.3.48과 같이 설정을 하였다. 그림을 보면 실차 1차감속기의 측정 위치는 Output, Idle, Bearing 측에 각각 3축 센서 3EA, 총 9포인트가 다채널 진동분석 장비(CSI 6500)로 측정 되었고, 실물 2차 감속기는 수직, 수평, 축 방향 각각 5포인트씩 총 15포인트가 포터블 진동분석 장비(CSI 2130)로 측정되었다.

시험을 진행을 할 때 계측기의 측정 기본설정은 다음과 같다.

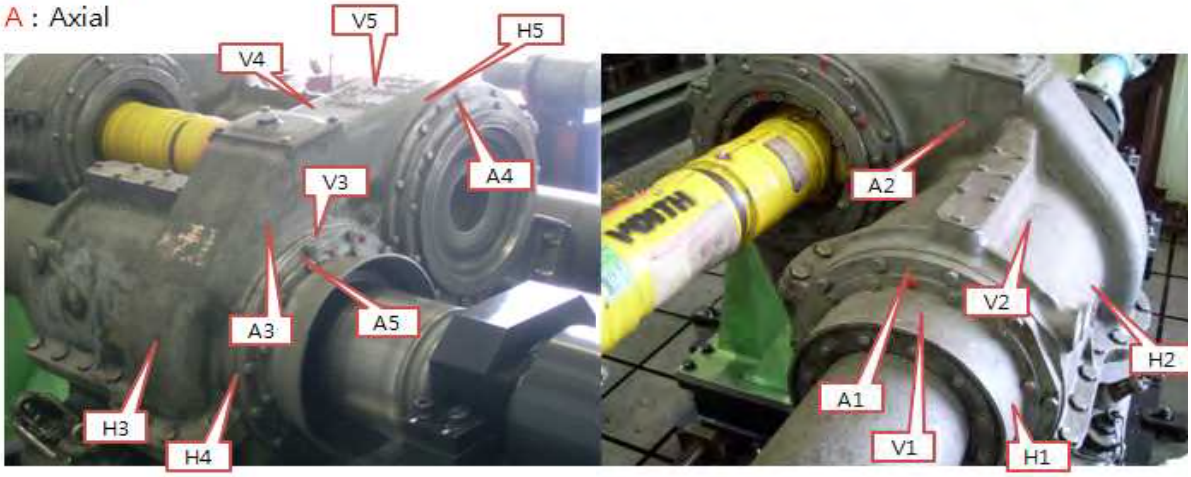
○ 다채널 진동분석 장비(CSI 6500) : Transient 2000Hz
○ 포터블 진동분석 장비(CSI 2130) : $F_{max}$ 6,500Hz, Line 6,400, Average1

X : Horizontal(열차 진행방향)
Y : Axial(Shaft 좌우방향)
Z : Vertical




① 실차 1차 감속기

H : Horizontal
V : Vertical
A : Axial




② 실물 2차 감속기

그림 2.3.48 측정 위치 및 조건



그림 2.3.49 현장 측정 사진

(2) 측정 결과 – 최적의 센서 위치 연구

실차 및 실물시험 측정 Data를 바탕으로 진동신호가 가장 잘 취득되는 위치, 장기간 부착 상태에서도 안전하고, 유지보수가 편리한 측정 위치를 고려하여 Data를 분석하였다. 다음 아래의 그림 2.3.50은 1차 감속기의 진동 포인트를 측정 분석한 내용이다.

그림 2.3.50을 보면 동시간대 같은 조건에서의 1차감속기 진동 측정 Data이다. 위에서부터 동력차 1차감속기 Idle Z / Output Y, 동력객차 1차감속기 Idle Z / Output Y순서이다. Data 취득상태를 비교해보면 동력차 1차감속기 Idle Z방향과 Output Y방향에서 Idle Z 방향이 조금 더 뚜렷하긴 하지만 크게 차이가 나고 있진 않은 반면, 동력차 Idle Z 방향과 Output Y 방향에서는 Output Y 방향이 확연히 높게 나타나고 있다. 1차 감속기에서는 Bearing이나 Idle방향보다는 Output 방향의 측정위치가 주요하다고 사료된다.

1차 감속기의 진동 포인트를 정밀하게 분석을 하기 위하여 그림 2.3.51의 그래프를 분석하였다. 그래프는 동력객차 1차 감속기 Idle Z방향과 Output Y방향을 나타낸 1차 감속기 Cascade 그래프이다. 110km/h의 조건에서 나타나는 GMF성분인 615Hz 성분은 두 측정점다 나타나는데 비해 GMF 2차, 3차 대역의 주파수는 Output Y 방향 에서만 나타나고 있다. 위의 Data와 마찬가지로 Idle 방향보다는 Output 방향에서 진동 Data가 더 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다.

※ 1차 감속기 최적 포인트 선정 순위

**Output** > Idle

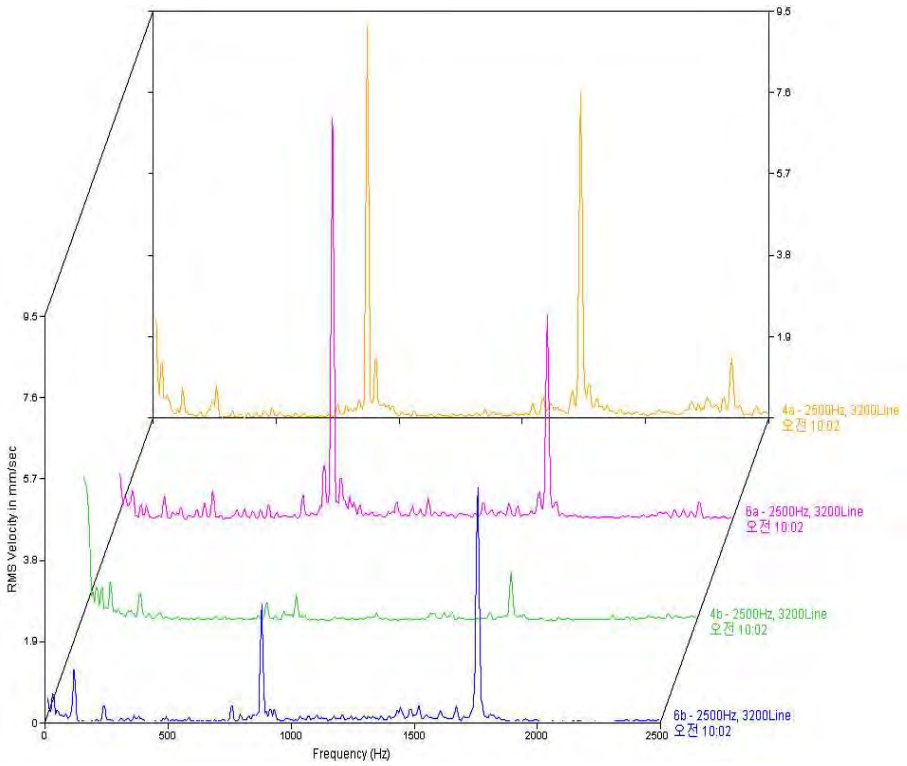
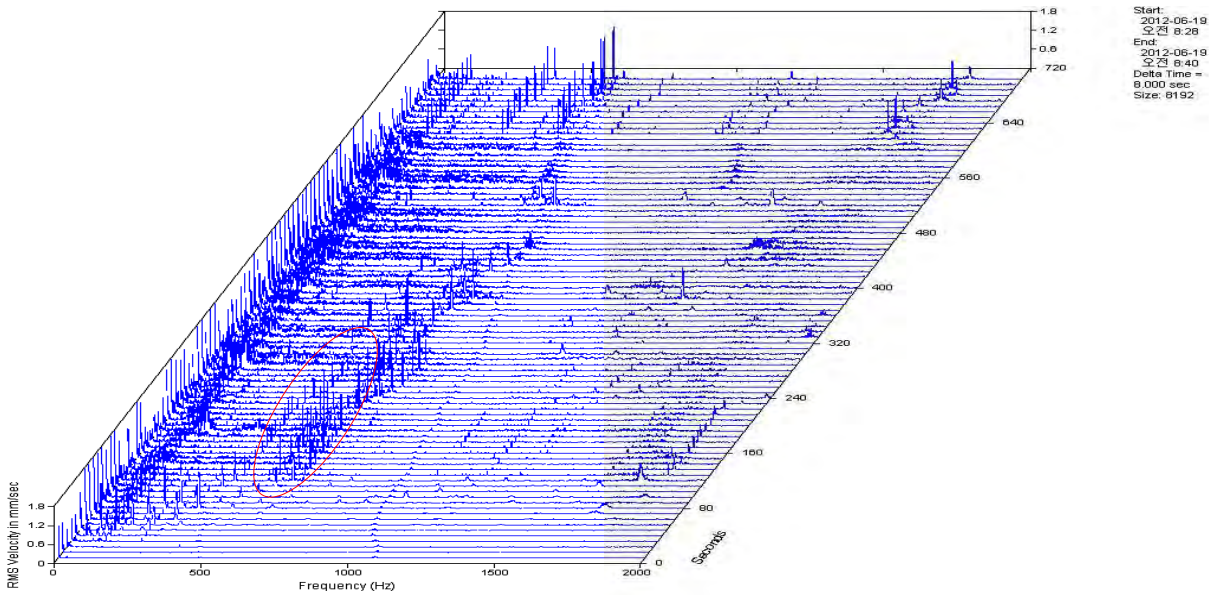
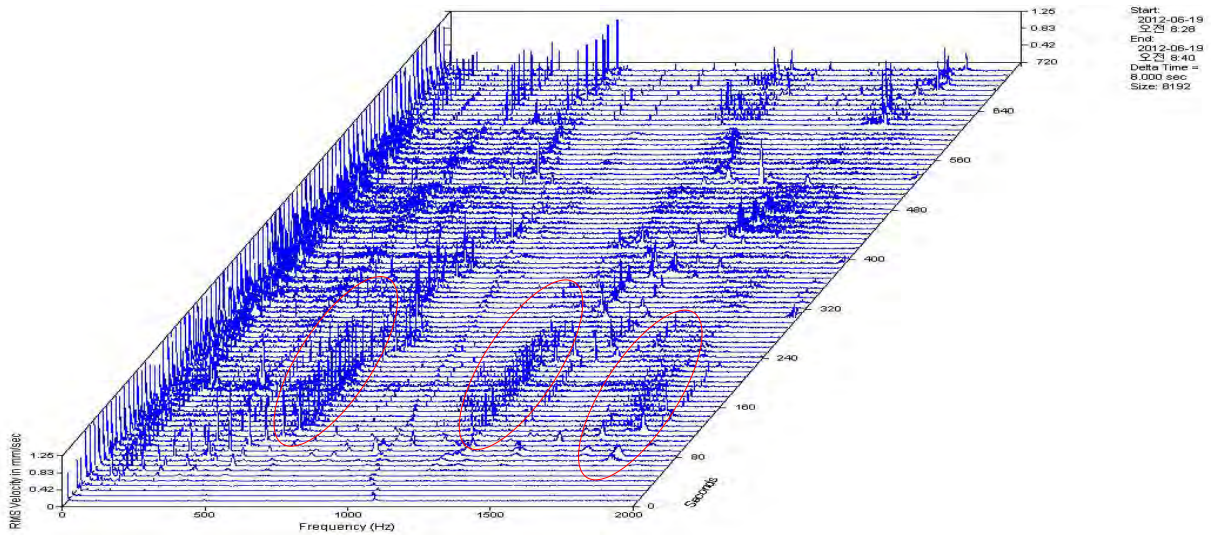



그림 2.3.50 1차 감속기 진동 포인트




① 동력객차 : 1차 감속기 Idle Z




② 동력객차 : 1차 감속기 Output Y

그림 2.2.51 1차 감속기 진동 포인트

다음은 2차 감속기의 Vertical 방향에 대하여 측정 분석을 진행을 하였다. 그림 2.3.52의 내용을 보면 그림에서 보여주는 데이터는 2차 감속기 Vertical 방향의 5포인트 측정 그래프로서 위에서부터 V1~V5 순서이다. 5포인트다 비슷한 형태의 주파수대역과 거의 대동소이한 진동량이 보여주고 있지만, V1 / V2 / V3인 베어링 측보다는 V4 / V5방향인 2차감속기 상단 측정 점에서 좀 더 뚜렷한 기어관련 주파수가 나타나고 있음을 확인 할 수 있다.

※ 2차 감속기 Vertical 방향 최적 포인트 선정 순위

**V5** > **V4** > V2 > V1 > V3

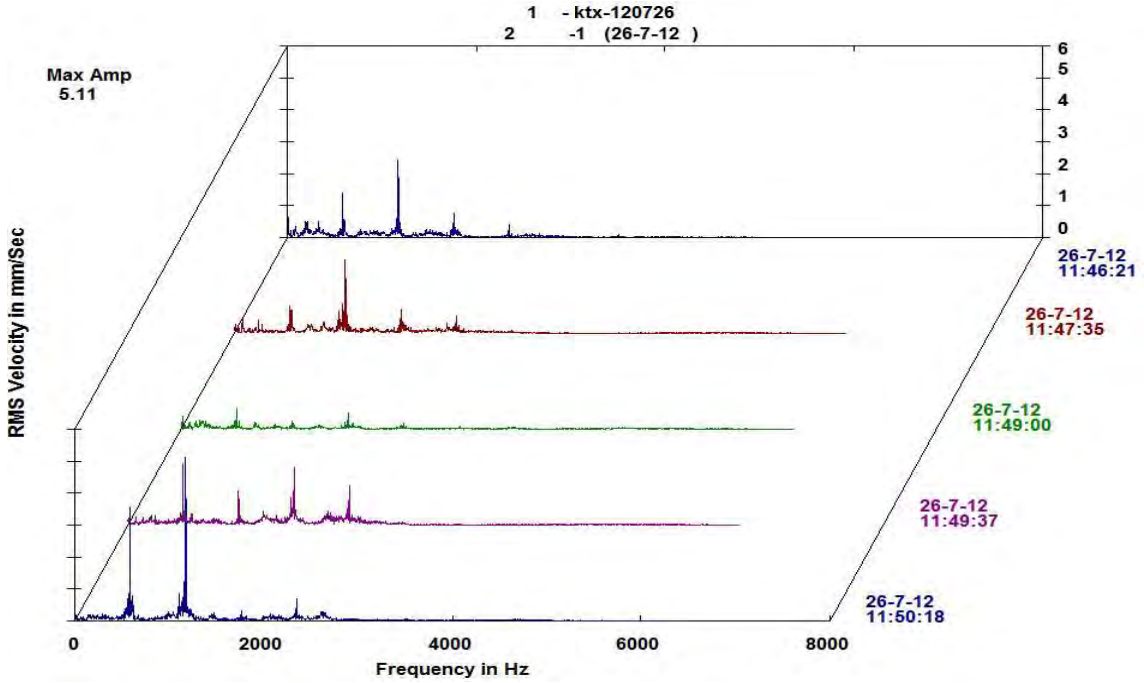



그림 2.3.52 2차 감속기 Vertical 방향

다음은 2차 감속기의 Horizontal 방향의 H1 ~ H5 Data이다. 주파수 형태 분석결과 Vertical 방향과 마찬가지로 전체 포인트가 비슷한 진동량을 보이고 있고, 축 베어링 측면보다는 감속기 상단과 가까운 H3 / H4 측정 점에서 GMF 및 Shaft 진동이 뚜렷하게 나타나는 것이 확인된다. 그 내용은 그림 2.3.53에 나타나 있다.

※ 2차 감속기 Horizontal 방향 최적 포인트 선정 순위

**H3** > **H4** > H5 > H2 > H1

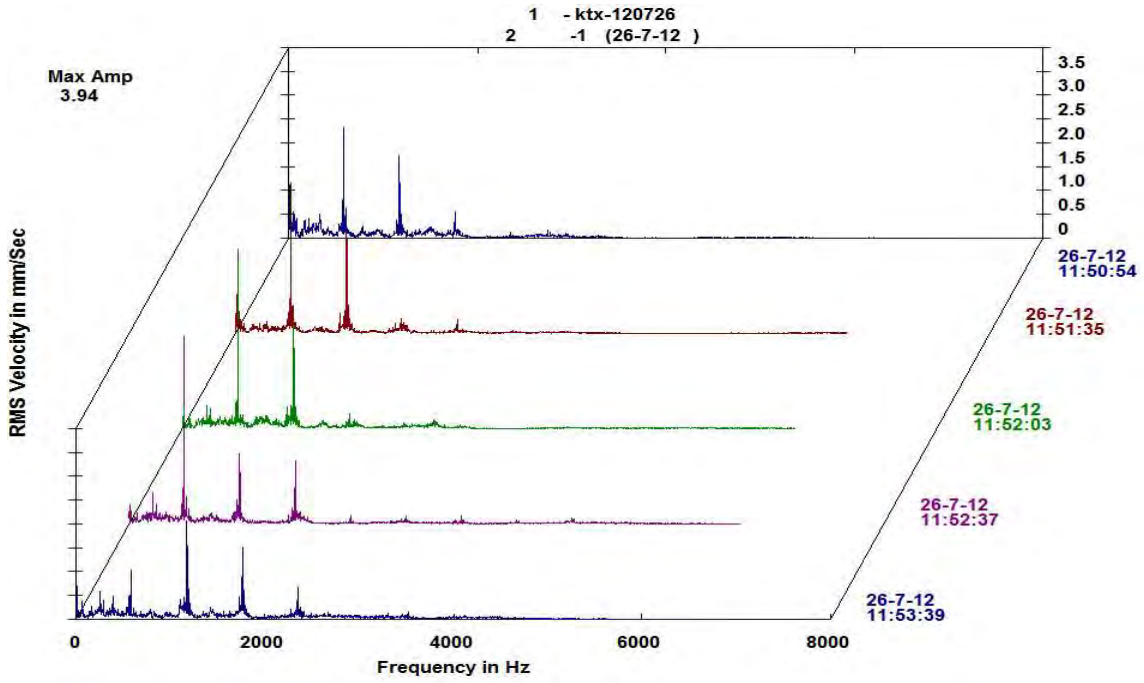



그림 2.3.53 2차 감속기 Horizontal

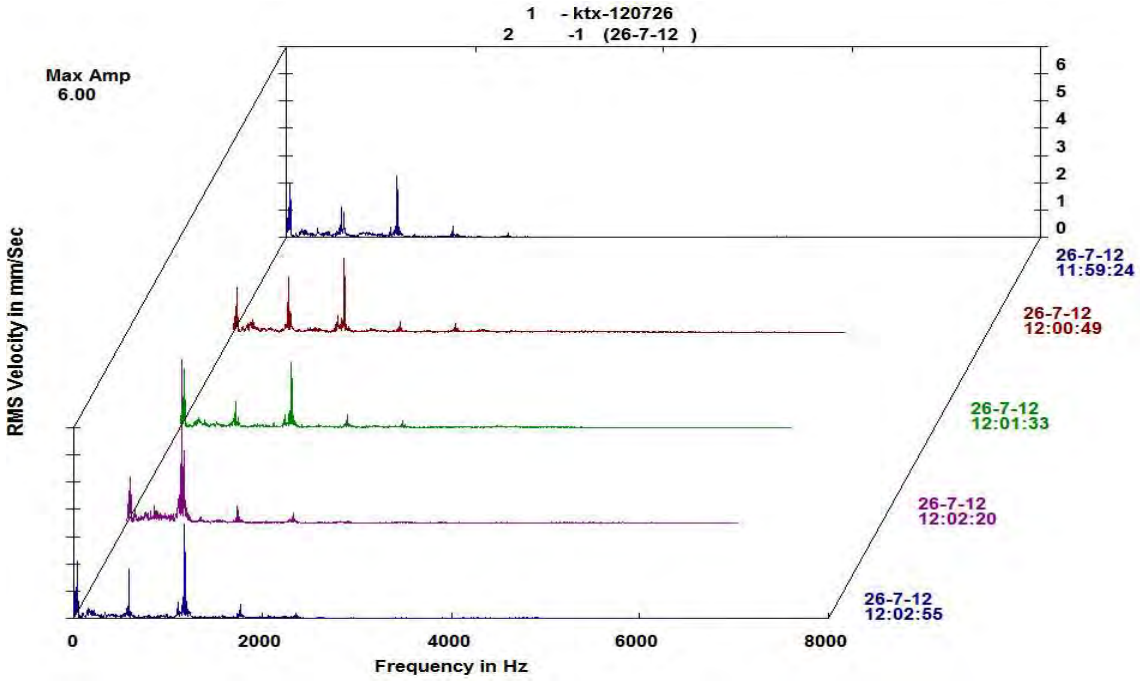



그림 2.3.54 2차 감속기의 Axial 방향

마지막으로 그림 2.3.54에서 2차 감속기 Axial 방향의 진동 Data로서 위에서부터 A1 ~ A5순서를 나타내고 있다. 베어링측면에서 취득한 Data를 보면 감속기 상단에서 측정한 주파수와는 좀 다른 형태가 나타나고 있음이 확인된다. Shaft의 영향을 많이 받는 포인트에서는 축 진동과 관련 있는 저주파수 대역이 크게 나타나고 있는 반면, 감속기와 가까운 포인트에서는 GMF위주로 주파수가 나타나고 있음이 확인된다. 감속기에서 가장 중요한 요소는 기어 및 피니언이기 때문에 최적의 포인트 선정 시 기어 측과 가장 인접하고 2, 3차 GMF또한 상대적으로 명확하게 나타나는 A2 / A3 포인트가 가장 주요하다고 사료된다.

※ 2차 감속기 Axial 방향 최적 포인트 선정 순위
A2 > A3 > A5 > A4 > A1

실제로 운행 중인 부산 지하철 및 KTX 산천, KTX 2차 실차측정결과 센서를 설치한 측정위치에 따라 Data 값은 물론 센서의 안정성에도 큰 영향을 미친다. 실제로 감속기 센서 설치 시 상단 및 측면에 설치되는 경우를 비교해 보면, 표면적이 넓은 상단에 비해 좁은 측면으로 설치할 경우 고속 운행하는 KTX의 공기저항 및 하중에 의해 센서가 측정위치를 이탈하는 경우가 빈번하게 발생한다. 또한 거동하는 차륜에 의해 바닥으로부터 솟아 올라오는 물질에 충격을 덜 받는 부분도 측면보다는 상단이기 때문에 상단부분이 안전하다고 판단된다.

그림 2.3.55에 센서의 안전성에 대한 최적의 측정 위치를 정리를 하였다.



① 1차 감속기 상단 설치



② 2차 감속기 상단 설치



③ 1차 감속기 측면 설치



④ 2차 감속기 측면 설치

그림 2.3.55 센서 안정성에 대한 최적의 위치 사진

센서의 최적의 위치를 설정을 하였지만 사실 센서의 케이블 포설에 따르는 유지보수에 관련된 케이블 포설의 최적의 위치 또한 고려를 하지 않을 수 없었다. 실제 센서 작동불능의 주요 원인으로는 충격에 의한 센서의 망가짐과 더불어 케이블의 단선이 주된 원인이 된다. 위에서 보는바와 같이 센서를 상단으로 설치한 경우와 측면으로 설치한 경우 케이블 포설의 형태가 많이 달라지는데 KTX 운행 시 차륜 및 벨로우즈의 영향으로 인해 케이블 인장 및 끊어짐의 영향으로부터 피해를 덜 받는 형태가 상단 설치의 경우이다. Data 취득 문제발생시 케이블을 연장하고 센서를 재설치하는 측면으로 보면 상단 설치가 유리하다고 판단된다. 다음 아래의 그림 2.3.56을 보면 유지보수에 대한 최적의 측정위치를 정리한 사진이다.



① 상단 설치 시 케입르 포설



② 측면 설치 시 케이블 포설

그림 2.3.56 유지보수 최적 측정 위치

(3) 측정 결과 – 파라미터 선정 연구

1차 실물 시험의 결과는 다음 아래의 그림 2.3.57과 같다. 그림을 보면 Spectrum 및 Time waveform은 센서 설치 시 가장 최적의 위치로 선정된 V5의 Overall 값과 1,2차 GMF를 Parameter로 나타낸 Data이다. 120km/h 조건으로 가동 중인 2차 감속기의 Overall값은 약 5.782mm/s RMS로 나타나고 있고, 1차 GMF 588Hz, 2차 GMF 1176Hz 로 나타나고 있다. V5 위치의 경우 GMF에 비해 Shaft 진동이 상대적으로 낮게 나타나고 있지만, 감속기의 가장 큰 결함 요인인 GMF를 중점으로 Data를 분석하는 것이 타당하기 때문에 센서 설치는 최적의 위치로 선정을 할 수 있었다.

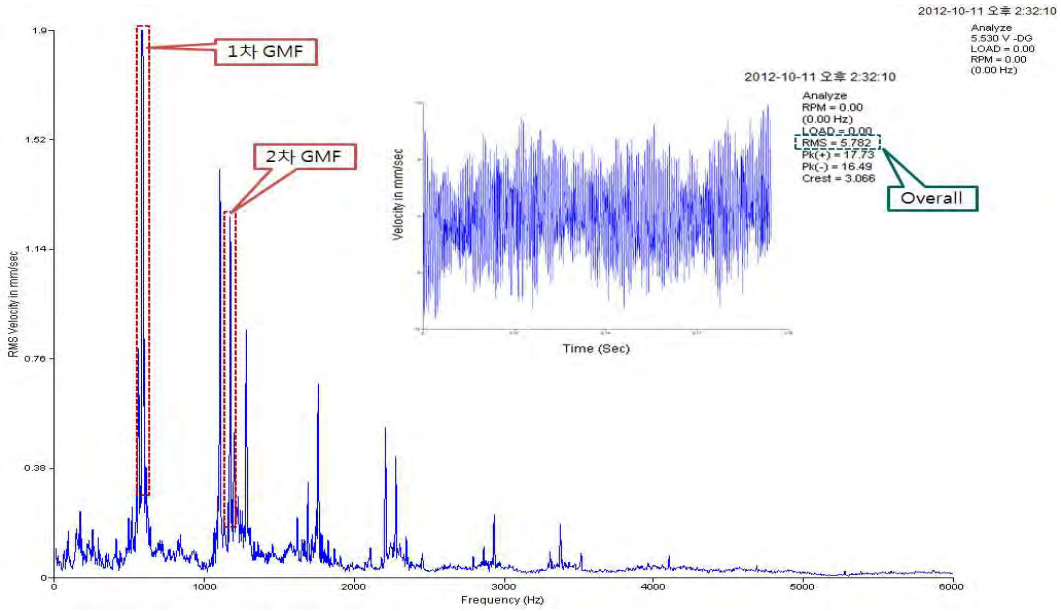



그림 2.3.57 2차 감속기 최적 측정위치 주파수(GMF, Overall, BPFI/BPFO 7X)

그림 2.3.58의 Spectrum은 저주파수 대역의 Shaft 진동 Parameter를 확대해서 나타낸 Data이다. 감속기의 센서 설치 위치(V5) 및 Shaft의 특징(길이가 단축이고 그에 비해 직경이 큰 Shaft)에 의해 GMF보다 낮은 진동량을 보이고 있다고 추정되고, 주파수 및 진동량을 살펴보면 120km/h 조건에서 Axle Shaft 1X(11.25Hz)의 진동량은 0.1mm/s RMS, 2 ~ 3X(22.5 ~ 33.75Hz)의 진동량은 약 0.08mm/s RMS, 3 ~ 8X(33.75 ~ 90Hz)의 진동량은 약 0.12 mm/s RMS값으로 전반적으로 낮은 진동량을 보이고 있다.

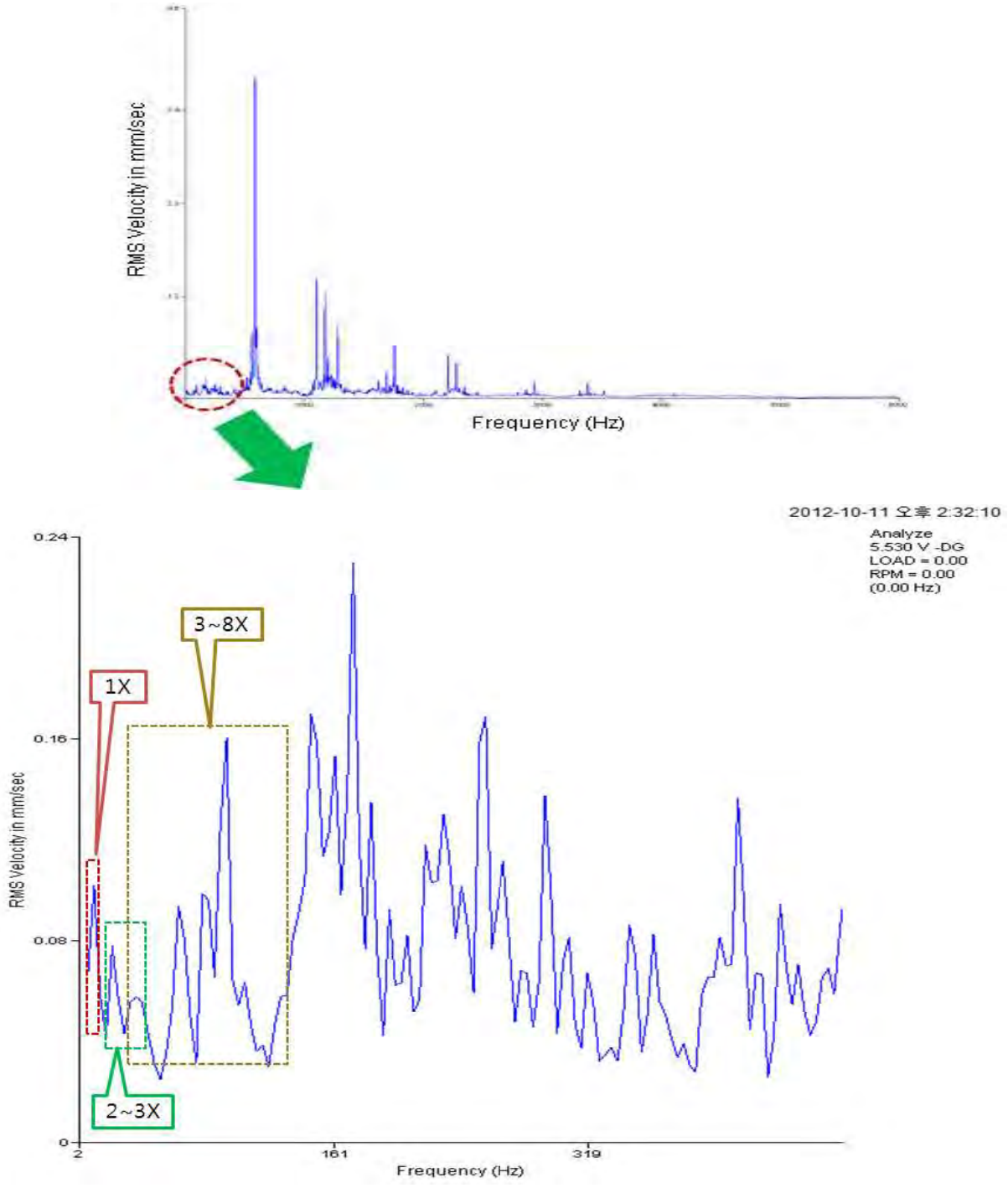



그림 2.3.58 2차 감속기 최적 측정위치(V5) Parameter(Shaft 1X, 2~3X, 3~8X)

(4) 측정 결과 내용 최종 정리

센서의 최적의 위치와 파라미터를 선정하기 위한 본 시험을 위하여 감속기 위치별, 방향별, 최적 포인트를 검토 하였다. 그 결과 Route 1차감속기 상부 10point, 1차 감속기 측 부 10point, 1차 감속기 베어링 부 10point 등 현장에서 안전을 고려하여 최종 선정하여 시험을 진행 하였다. 센서의 설치조건으로 3방향의 진동 Data가 가장 잘 취득될 수 있는 위치와 센서의 안정성 및 유지보수에 편리한 최적의 진동측정위치 선정을 필요로 한다. 안정성 및 유지보수에 유리한 부분은 감속기 Shaft 베어링 측면보다는 표면적이 넓고 충격으로부터 영향을 덜 받을 수 있는 상단이 주요하다고 사료되고, 상단 부분 중 3방향(수직, 수평, 축)의 진동 신호를 가장 잘 취득 할 수 있는 위치를 요약하면 그림 2.3.59와 같다.

라. 진동 파라미터 검증 감속기 실물 시험 진행 – 2013년 3월

모니터링 시스템 개발을 대한 파라미터의 최종 검증 작업을 진행하기 위하여 1차적으로 철도기술연구원에서 감속기 Lab 시험을 진행하였다. 1차 시험의 목적은 이상 진단을 감지하기 위한 최적의 진동 파리미터 선정을 위하여 진행한 시험이다. 1차감속기의 측정 위치는 Output, Idle, Bearing 측에 각각 3축 센서 3EA, 총 9포인트가 다채널 진동분석 장비(CSI 6500)로 측정 되었고, 실물 2차 감속기는 수직, 수평, 축 방향 각각 5포인트씩 총 15포인트가 포터블 진동분석 장비(CSI 2130)로 측정되었다.

○ 계측기의 측정 기본설정 값은 다음과 같이 설정하였다.
- 다채널 진동분석 장비(CSI 6500) : Transient 2000Hz
- 포터블 진동분석 장비(CSI 2130) : $F_{max}$ 6,500Hz, Line 6,400, Average1

○ 실물시험 가동조건은 다음과 같이 설정하였다.
- 1,000N/m 부하조건의 690RPM
- 2차 감속기 3,000N/m 부하조건의 690RPM & 1,680 RPM

그림 2.3.59와 그림 2.3.60은 실물 시험 측정 현장 측정 사진과 포인트 선정 사진이다.

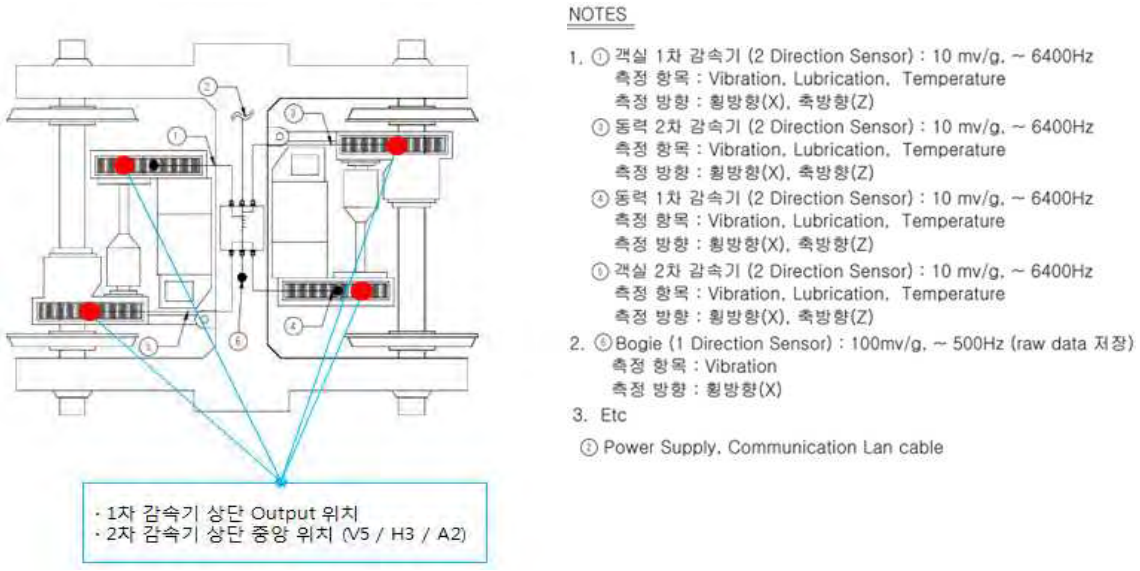



그림 2.3.59 센서장착 최적 위치 최종 설정

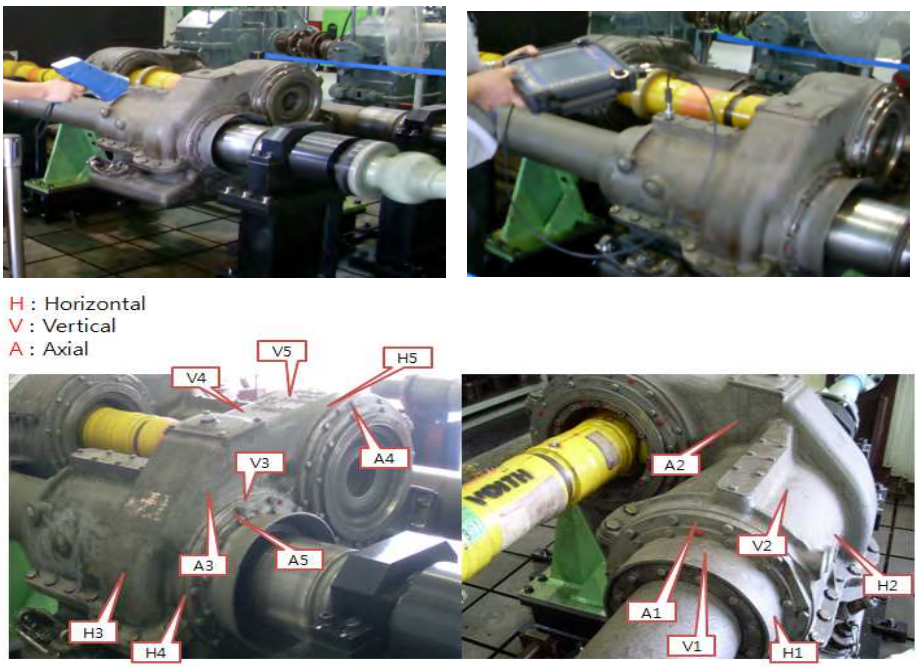



그림 2.3.60 실물 측정 사진 및 측정 조건

그림 2.3.61의 Spectrum 및 Time waveform은 센서 설치 시 가장 최적의 위치로 선정된 V5의 Overall 값과 1,2차 GMF를 Parameter로 나타낸 Data이다. 120km/h 조건으로 가동 중인 2차 감속기의 Overall값은 약 5.782mm/s RMS로 나타나고 있고, 1차 GMF 588Hz, 2차 GMF 1,176Hz로 나타나고 있다. V5위치의 경우 GMF에 비해 Shaft 진동이 상대적으로 낮게 나타나고 있지만, 감속기의 가장 큰 결함요인인 GMF를 중점으로 Data를 분석하는 것이 타당하기 때문에 센서 설치는 최적의 위치로 선정하였다.

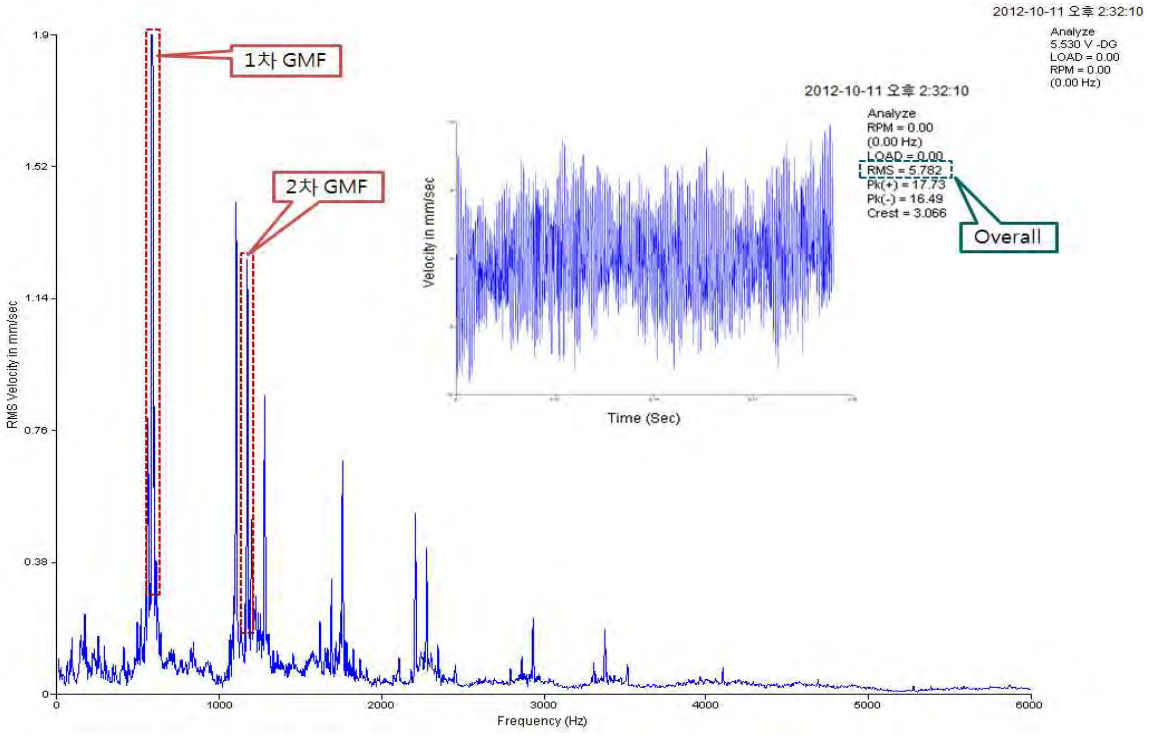



그림 2.3.61 2차 감속기 최적 측정위치 주파수(GMF, Overall, BPFI/BPFO 7X)

마. 철도기술연구원 감속기 Lab 시험 진행 (2013년 3월 26일)

2차로 진행된 시험은 최적 센서 위치를 선정하기 위하여 측정한 시험이다. 본 시험을 위하여 감속기 위치별, 방향별, 최적 포인트를 검토 하였다. 그 결과 Route 1차감속기 상부 10point, 1차 감속기 측부 10point, 1차감속기 베어링 부 10point 등 현장에서 안전을 고려하여 최종 선정하여 시험을 진행 하였다.

(1) 측정결과 내용

센서의 설치조건으로 3방향의 진동 Data가 가장 잘 취득될 수 있는 위치와 센서의 안정성 및 유지보수에 편리한 최적의 진동측정위치 선정을 필요로 한다. 안정성 및 유지보수에 유리한 부분은 감속기 Shaft 베어링 측면보다는 표면적이 넓고 충격으로부터 영향을 덜 받을 수 있는 상단이 주요하다고 사료되고, 상단 부분 중 3방향(수직, 수평, 축)의 진동 신호를 가장 잘 취득 할 수 있는 위치를 요약하면 그림 2.3.62와 같다.

바. 고속열차 진동 특성 시험 진행 (2013년 4월 1일)

(1) 시험 개요

2차년도의 3차 시험은 고속열차의 선정 진동 파라미터를 확인하기 위하여 진행을 하였다. 시험 구간은 경부선 KTX 서울역-부산역 구간으로 상행/하행 구간으로 나눠서 시험을 진행 하였다. 시험 가동 조건은 과도 운전상태/ 정상 운전 상태에서 정거장 정류/가속/감속 구간으로 구역을 세분화하여 측정을 진행하였다. 진동 파라미터의 신뢰성 검증을 위하여 총 3대의 시험 장비를 투입하여 진동을 측정 하였다. 투입된 시험 장비는 1,2차 시험에 활용한 CSI 2130과 6500 그리고 다채널 멀티 진동 측정 장비인 Alta solution을 투입하였다. 표 2.3.10은 이번 시험에 새로 투입된 Alta solution의 사양 내용이며 표 2.3.11은 각 계측기별 주요 진동 측정 주요 분석 범위를 요약한 내용이다.

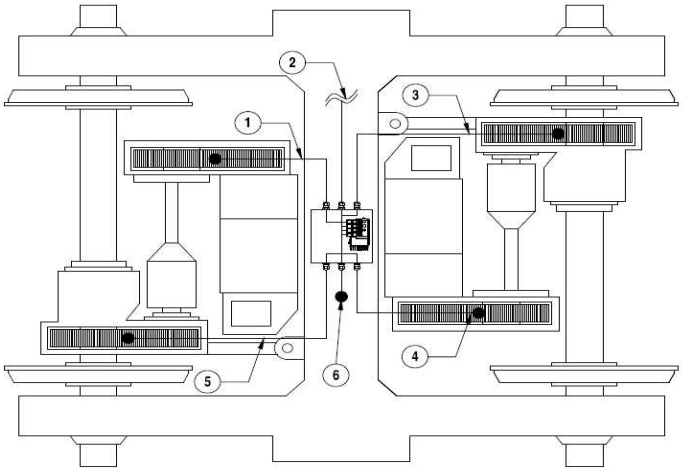



그림 2.3.62 센서장착 최적 위치 최종 설정

표 2.3.10 시험장비 : Alta Solution

| 측 정 장비명 | Multiple channel 분석 장비 (Model: Alta Solution) |
|---|---|
| 장 비<br>사 진 |   |
| 측 정<br>내 용 | • 제조사 : Alta Solution (Alta 미국)<br>• 데이타 분석 : Live, Average, Waterfall<br>• 스펙트럼 분해능 : 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, and 12800 lines<br>• 타임파형 분석 : Time Threshold, Time-based Overall, Crossings, Time Signature, Time Trigger, Crest Factor, K Form, Form Factor, Pulse Width, SMax<br>• 속도신호 분석 : Speed, Speed Rate |

표 2.3.11 측정 시험 주요 분석 범위

| 측정장비 | 주요 분석 범위 | 비 고 |
|---|---|---|
| CSI 6500 | • Motor 주요 주파수 분석.<br>• 속도 가/감속 구간 Transient data 분석.<br>• Mode shape 해석. | 경부선 하행/하행 |
| CSI 2130 | • 정거장 증/감속구간 Transient data 분석 | 경부선 하행 |
| Alta Solution | • 일정구간 Trend data 분석. | 경부선 하행 |
| 계측기<br>기본 설정값 | • 6500 ; Transient 2000Hz, 3200Line<br>Manual, 6500Hz 3200Line, Average 3<br>• 2130 ; Transient 6000Hz, 1600Line<br>• Alta ; Tend data aquisition | |

고속열차의 선정된 진동 파라미터를 확인하기 위하여 실차 시험을 2차 년도에 진행을 하였다. 시험 구간은 경부선 KTX 서울역-부산역 구간으로 상행/하행 구간으로 나눠서 시험을 진행 하였다. 시험 가동 조건은 과도 운전상태/ 정상 운전 상태에서 정거장 정류/가속/감속 구간으로 구역을 세분화 하여 측정을 진행하였다. 진동 파라미터의 신뢰성 검증을 위하여 총 3대의 시험 장비를 투입하여 진동을 측정 하였다. 다음 그림 2.3.63은 실차 시험 시 센서 설치 부위를 설정 그림이다. 주요 진동이 측정되는 부위에 다음과 같이 센서를 설치하였고 센싱 방향을 설정하였다. 그림 2.3.64는 실차 시험 당시 센서 설치 사진이다.

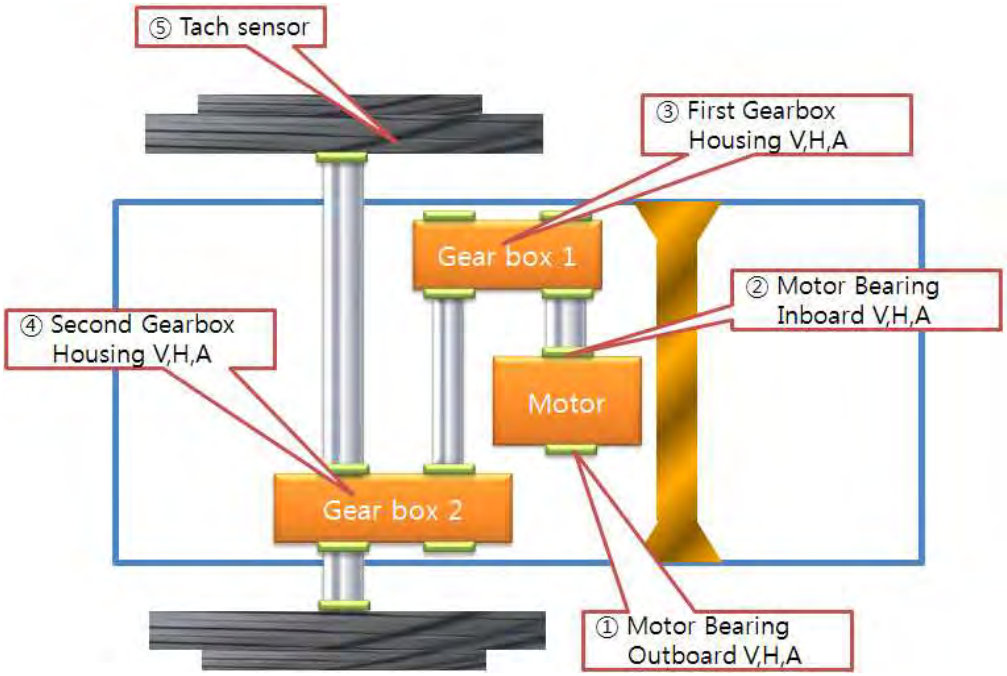



그림 2.3.63 측정 위치



그림 2.3.64 감속기 센서 설치사진

(2) 시험 측정 결과

실차 시험을 측정을 하면서 얻은 결과는 다음 그림 2.3.65와 같다. 그림의 주파수의 Transient Data는 110 ~ 266km/h의 가/감속 구간의 연속 data이다. 차륜-레일 간 충격진동에 의해서 발생하므로 KTX 열차 속도와 관계없이 특정 주파수대역에서 진동량이 일정하게 형성되며 가진 주파수와 중첩 시 크게 상승하는 대역이 공진 점으로 판단되며 697Hz, 1,090Hz가 이에 속한다. 697Hz는 1차 Modal test결과와 상호 비교해본 결과 1차 감속기의 Horizontal방향 공진주파수와 일치한다. 이는 Motor Inboard측이 Gear측과 근접하기 때문에 감속기의 공진주파수가 Motor측에서도 나타난 것으로 추정되고 한편, 1,090Hz는 Motor 공진 주파수와 일치한다. 약 192km/h속도로 달릴 때 진동량이 크게 상승하고 192km/h속도를 벗어나면 다시 진동량이 감소하는 것으로 보아 1,090Hz가 Motor의 공진점이라 판단된다. 60Hz 이상 Harmonics 주파수는 전기적인 Noise 또는 모터 측에 가해지는 누설전류에 의한 진동주파수로 판단되는 결과를 확인할 수 있었다.

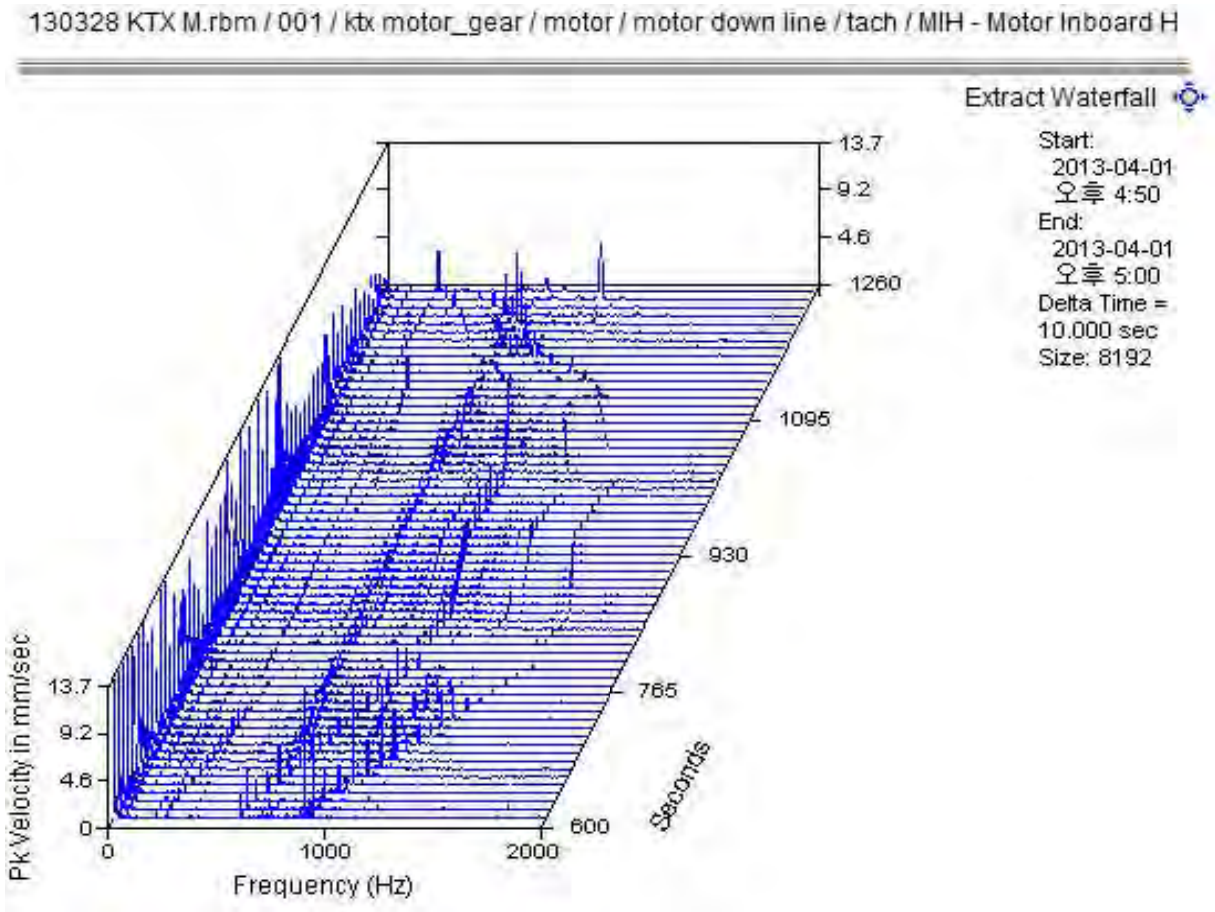



그림 2.3.65 pm 4:50 – 5:00 Waterfall data

측정된 데이터의 이론적 검증을 위하여 각 조건별 구간별로 분류하여 진동 주파수를 계산하였고 실제 데이터와 비교 작업을 진행 하였다. 시험 결과 내용은 다음과 같다.

(가) 상용속도 120km/h, 290km/h 조건에서의 주파수 계산 내용 비교

시험 진행 전 주파수 계산내용을 작성하였다. 주파수 계산표를 작성한 내용은 그림 2.3.66과 그림 2.3.67에서 확인할 수 있다. 실제 측정된 데이터 내용을 표 2.3.12에서 볼 수 있듯이 이론적으로 검증한 수치와 별 차이가 없다. 이러한 시험 데이터를 근거로 파라미터에 대한 설정에는 문제가 없다는 것을 확인할 수 있었다.

표 2.3.12 실제 측정 데이터

| 조건 | GMF Axle | GMF Trans & Drive |
|---|---|---|
| **상용속도 120 km/h** | 592.3 | 688.7 |
| **상용속도 290 km/h** | 1,453.3 | 1,657.8 |

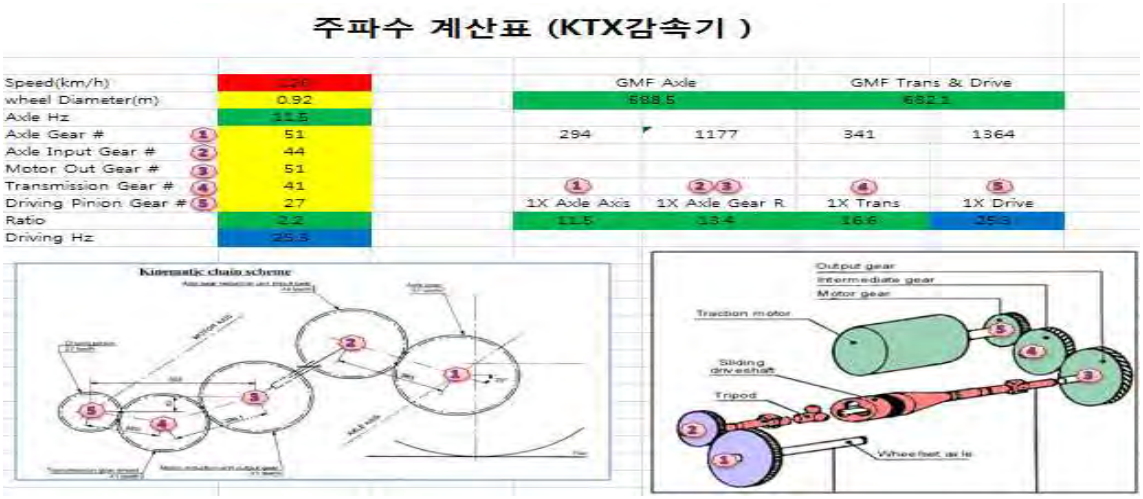



그림 2.3.66 120km/h 조건시 감속기 주파수 계산표

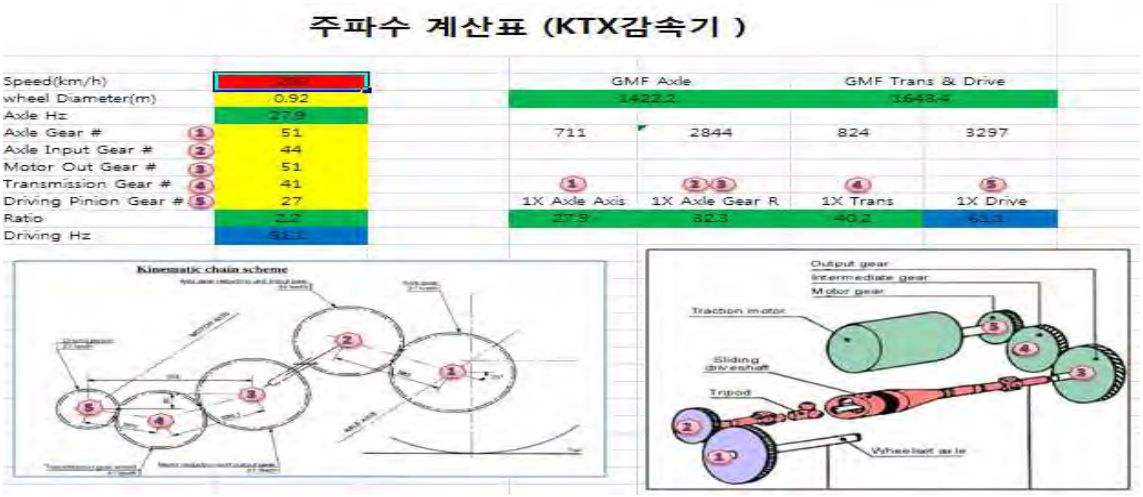



그림2.3. 67 290km/h 조건시 감속기 주파수 계산표

(나) 공진대역으로 추정되는 속도 123km/h, 192km/h 조건에서의 주파수 계산표.

공진대역으로 추정되는 속도에 대한 검증 내용도 주파수 계산표를 작성 하였다. 주파수 계산표를 작성한 내용은 그림 2.3.68과 그림 2.3.69에서 확인할 수 있다. 실제 측정된 데이터 내용인 표 2.3.13에서 확인 할 수 있듯이 이론적으로 계산된 내용과 실제 측정 데이터가 매우 유사한 경향인 것을 확인할 수 있었다.

표 2.3.13 실제 측정 데이터

| 조건 | GMF Axle | GMF Trans & Drive |
|---|---|---|
| **공진대 속도 123 km/h** | 617.3 | 710.3 |
| **공진대 속도 192 km/h** | 943.6 | 1,093.3 |

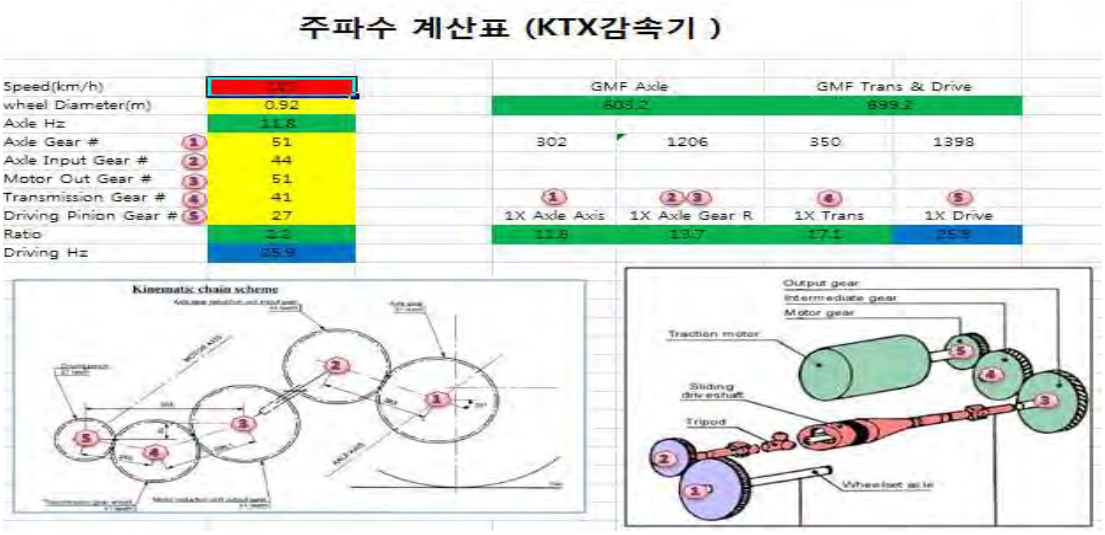



그림 2.3.68 공진대역으로 추정되는 속도 123km/h 주파수 계산표

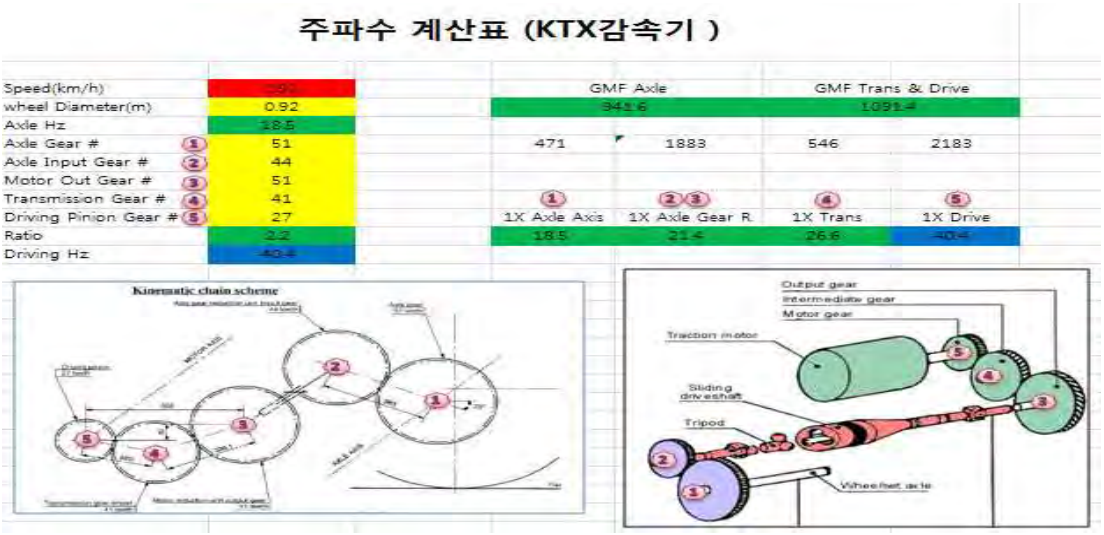
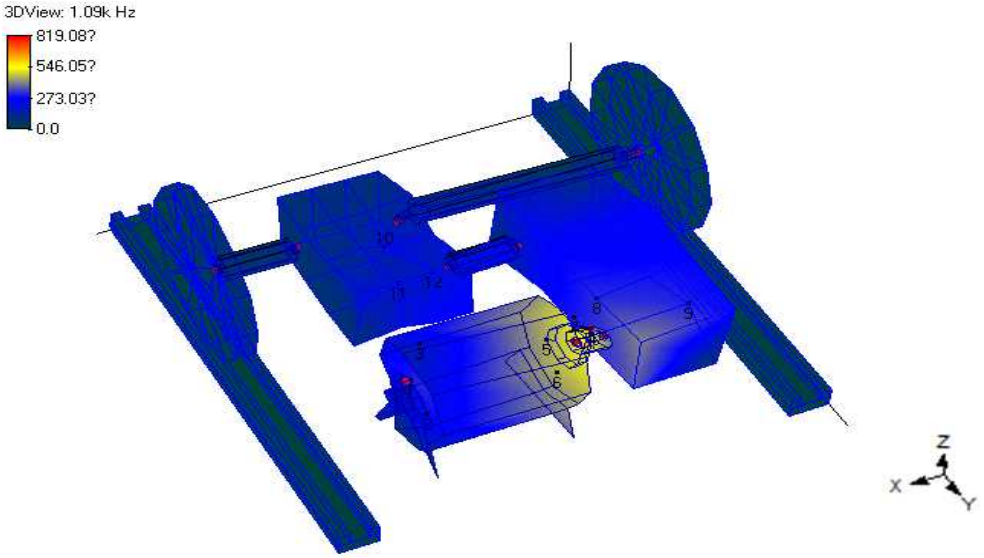


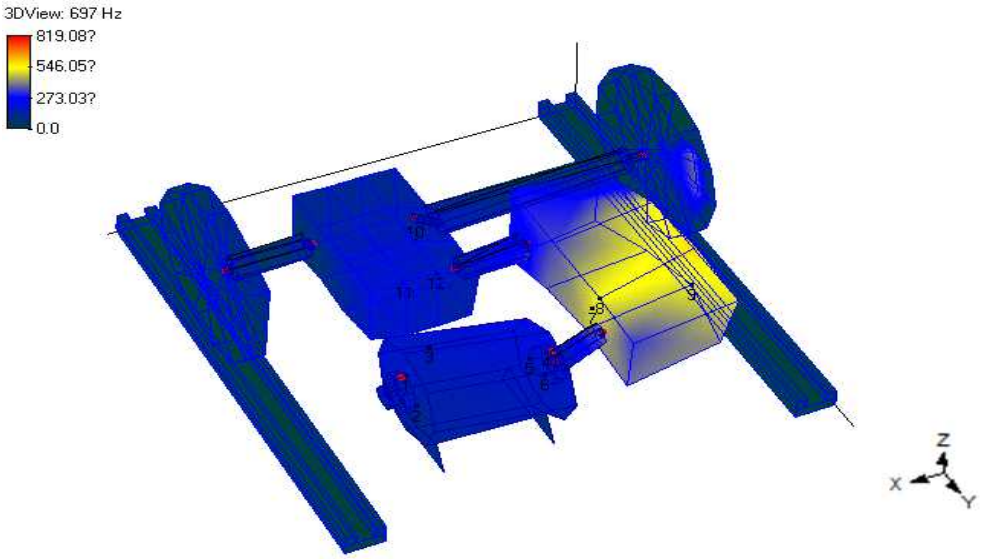

그림 2.3.69 공진대역으로 추정되는 속도 192km/h 주파수 계산표

(다) KTX Motor mode shape 해석

다음 그림 2.3.70은 123km/h-697Hz, 192km/h-1,090Hz 조건에서의 Mode shape해석 결과이다. 697Hz는 1차 감속기 고유진동수로 123km/h조건으로 열차 운행 시 1차 감속기 부분이 크게 흔들리는 것을 확인할 수 있다. Motor 또한 1,090Hz에 해당하는 고유주파수대역의 속도로 열차가 달리는 조건일 때에 Motor거동이 심하게 흔들리는 현상이 해석결과로 도출되었다.




① 1,090Hz




② 687Hz

그림 2.3.70 Mode Shape 데이터

사. 철도기술연구원 감속기 실물 시험 (2013년 9월 5일)

(1) 시험 개요

2차년도 4차 시험으로 철도기술연구원에서 시제품 실물 시험을 진행 하였다. 시험을 진행한 목적은 고속열차용 감속기 실물 시험결과와 실차 시험결과에 대한 데이터 비교 분석을 진행하기 위함이며 감속기의 결함 관련 데이터 취득 및 분석 작업을 수행하기 위하여 시험을 진행하였다. 측정 당시 무작위로 포인트를 1차 선정 측정, 출력 측 베어링과 기어박스, 기어박스 중앙부위에 대한 2차 측정, 감속기 고정 축 베어링에 대한 진동 측정과 Tacho 속도 측정으로 구분하여 측정 시험을 진행 하였다. 시험 측정 조건에 대한 내용을 표 2.3.14와 같이 정리 하였다.

표 2.3.14 시험 측정 조건 내용

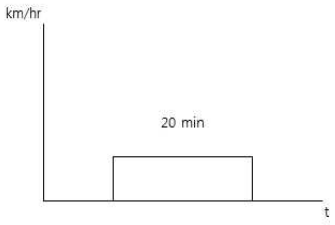
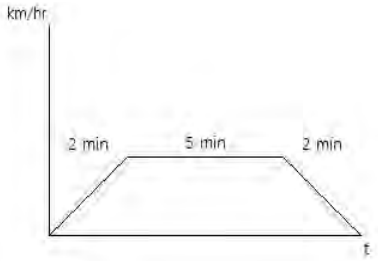
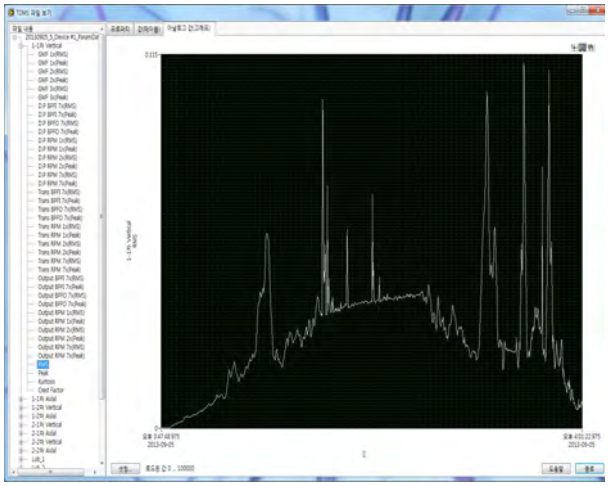
| 구분 | 내용 | 시험 구동 내용 |
|---|---|---|
| 오전 | • DB 설계<br>• 포인트 선정<br>• 정상가동 (100-300km/hr)시 측정 진행 |  |
| 오후 | • 설계결과 포인트 설치<br>• 0-300km/hr 측정 진행 |  |



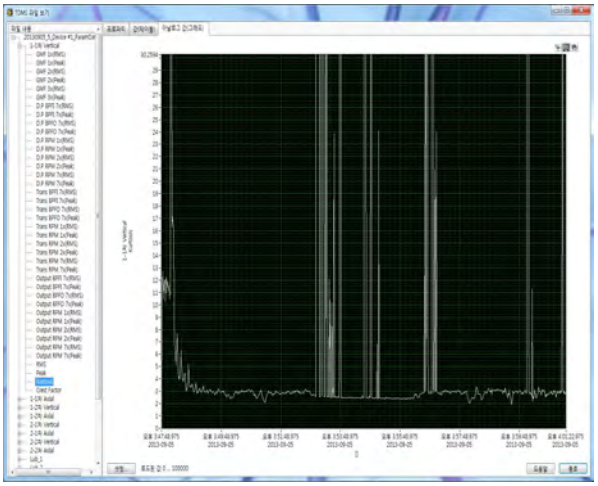
그림 2.3.71 실물 시험 사진

(2) 시험 측정 결과

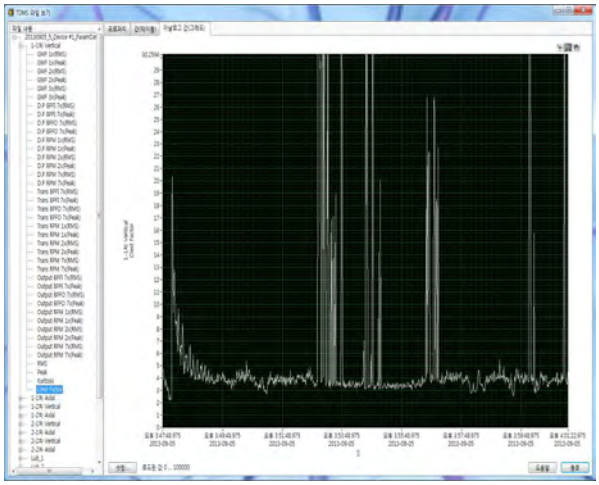
전체적으로 Overall값이 약 30~35mm/s RMS로 높게 나타나고 있고 과도상태에서는 진동량이 상승, 정상운전상태 에서는 안정적인 진동량을 보여줬다. 무부하조건과 부하조건을 비교해보면 전체적으로 비슷한 형태의 주파수가 관찰되었고 베어링 주파수로 의심되는 파라미터가 관찰되었으며 무부하 조건에서 나타나지 않았던 GMF가 부하조건에서만 나타나는 특성을 시제품으로 관찰할 수 있었다. 위의 결과는 약간의 변속에 의한 GMF주파수 변화가 생겼다는 결론을 얻을 수 있었다. 그림 2.3.72를 확인 하여 보면 각 진동 파라미터들이 비슷한 경향으로 측정이 되는 모습을 확인할 수 있다.



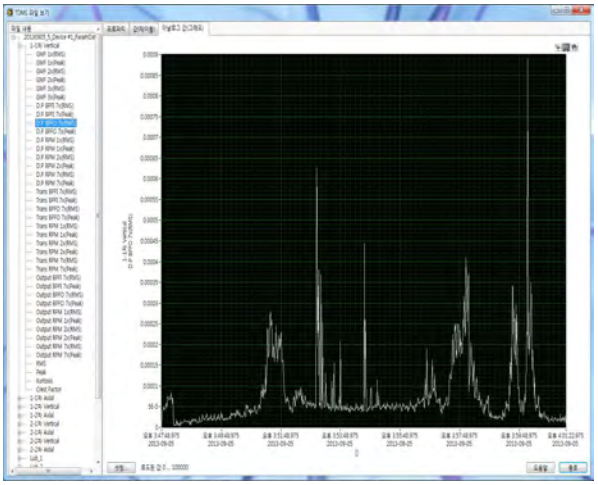
① RMS 변화 추이



② Kurtosis 변화 추이



③ Crest Factor 변화 추이



④ Driving Pinion Gear BPFO 변화 추이

그림 2.3.72 1차 감속기 Vertical 방향 각 진동 파라미터 변동추이

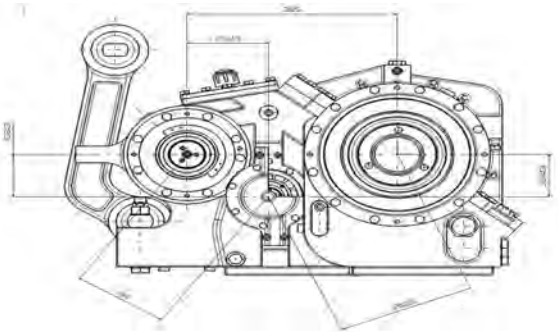
아. 차세대 고속열차 해무 실차 진동 측정 시험 (2013년 9월 30일~10월 1일)

(1) 시험의 개요

본 실차 시험에서는 구축 시제품과 상용화 계측기를 동시에 측정하여 진동 데이터 취득여부를 확인하는 목적으로 진행을 하였다. 실차 시험을 위하여 현재 시험 중인 차세대 고속 열차인 해무에 시제품을 장착하여 경부선 KTX 광명-대전-동대구-부산 구간에서 상행/하행 구간 시험을 진행하였다. 이전 시험과 마찬가지로 실차시험 과도운전상태/정상운전상태 조건 (정거장 정류/가속/감속)으로 시험을 진행 하였다. 이번 시험은 앞 서 진행하였던 시험처럼 진동 주파수 분석을 목적으로 한 시험이 아니라 개발된 소프트웨어에서 하드웨어 시제품과 계측기를 동시에 접속시켜 열차 운행 중 발생되는 진동 데이터가 얼마나 유사한 경향을 보이면서 데이터 취득이 되는지 여부를 확인하는 시험이었다. 결론적으로 시험 결과는 개발 시제품과 상용 계측기와 유사한 데이터를 취득하는 결과를 확인할 수 있었다.

(2) 시제품 성능 시험 – 실차 시험 (HEMU)

시제품 성능 검증 시험을 위한 2번째 시험으로는 구축 시제품과 상용화된 계측기를 차상에서 동시에 측정을 하여 진동 데이터 취득 여부와 경향 비교를 위한 목적으로 시험을 진행 하였다. 실차 시험을 위하여 현재 시험 중인 차세대 고속 열차인 해무에 시제품을 장착하여 경부선 KTX 광명-대전-동대구-부산 구간에서 상행/하행 구간 시험을 진행 하였다. 이전 시험과 마찬가지로 실차시험 과도운전상태/정상운전상태 조건 (정거장 정류/가속/감속)으로 시험을 진행 하였다. 이번 시험은 앞 서 진행하였던 시험처럼 진동 주파수 분석을 목적으로 한 시험이 아니라 개발된 소프트웨어에서 하드웨어 시제품과 계측기를 동시에 접속시켜 열차 운행 중 발생되는 진동 데이터가 얼마나 유사한 경향을 보이면서 데이터 취득이 되는지 여부를 확인하는 시험이었다. 결론적으로 시험 결과는 개발 시제품과 상용 계측기와 유사한 데이터를 취득하는 결과를 확인할 수 있었다. 아래의 그림 2.3.73은 이번 시험을 위하여 개발 시제품의 진동감지 기준을 설정하기 위하여 해무의 감속기 관련 사양을 조사한 내용이다. 해무의 사양을 근거로 해무의 측정 포인트를 선정하였고 가동 속도인 275 km/h로 주파수 계산표를 그림 2.3.74와 같이 작성 하였으며 해무의 사양과 작성된 주파수 계산표를 근거로 해무의 진동 기준을 설정하여 개발 시제품에 적용하였다. 그림 2.3.75는 당시 실차 시험 사진이다.



| | 입력 | 아이들 | 출력 |
|---|---|---|---|
| 잇수 | 23 | 30 | 46 |
| 모듈 | 6.5 | | |
| 압력각 | 20 | | |
| 헬릭스각 | 15 | | |

그림 2.3.73 해무 DGU 사양

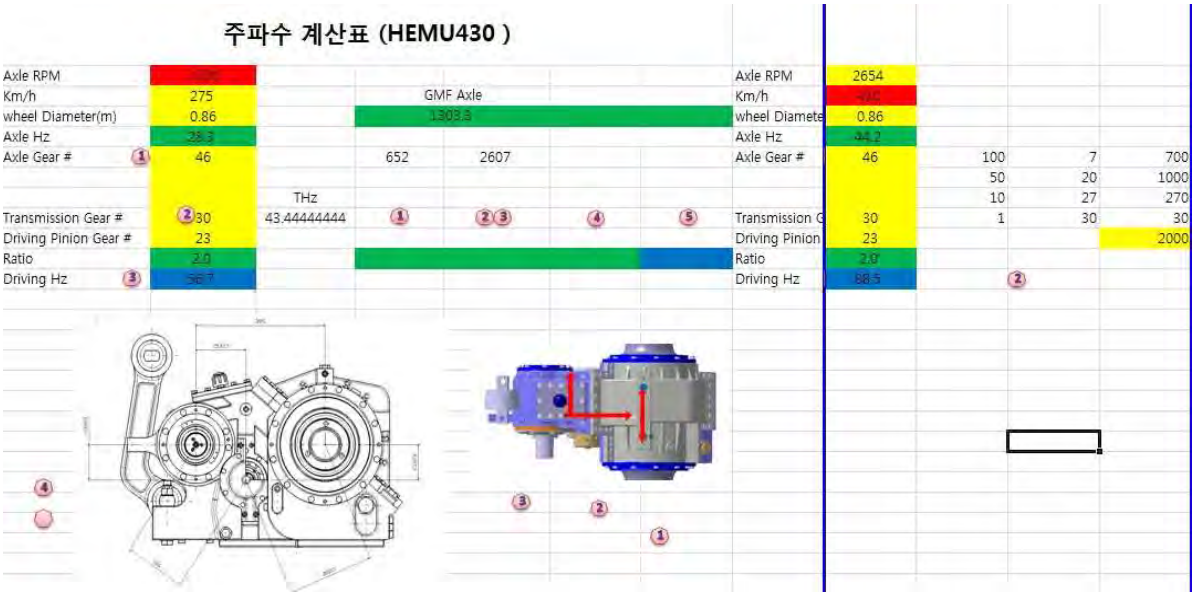



그림 2.3.74 해무 포인트 선정 및 주파수 계산(275 km/h 조건시 감속기 주파수 계산표)



그림 2.3.75 HEMU 시험

(3) 시험 측정 결과

(가) 시제품 적용 측정 결과 : 대전 → 광명 구간

대전 → 광명 구간에서 시제품과 계측기를 통하여 동시에 데이터 측정 시험을 진행 하여 각 진동 파라미터별로 주파수의 변화 추이 데이터를 추출 하여 분석을 진행 하였다. 이번 측정에서는 각 측정 포인트 별 RMS 데이터, Kurtosis, Crest Factor, GMF, BPFI 파라미터를 개발 장비와 계측기로 동시에 측정/저장하여 각 파라미터별 데이터분석을 진행 하였다. 그림 2.3.76 ~ 2.3.89는 고속구간 (대전 – 광명)구간에서 감속기의 기어 주파수와 베어링 주파수를 분석한 제품 소프트웨어와 상용화 계측기에서 동시에 구현한 내용이다. 1차적으로 개발 시제품과 상용화 계측기에서 측정/저장한 Vertical, Axial 방향의 RMS, Kurtosis, GMF, Crest Factor, BPFI등 각 파라미터 데이터는 개발 장비와 계측기의 측정 / 저장 데이터 값이 유사한 파형의 흐름을 보여주는 결과를 확인할 수 있었다.

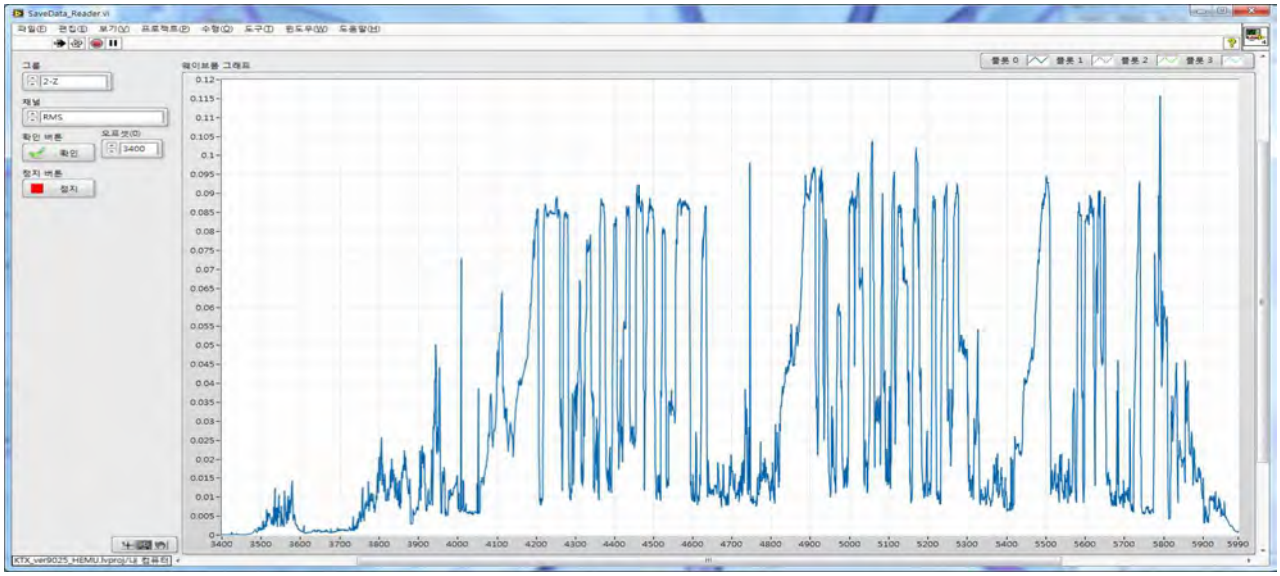


그림 2.3.76 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 RMS 데이터(대전–>광명)

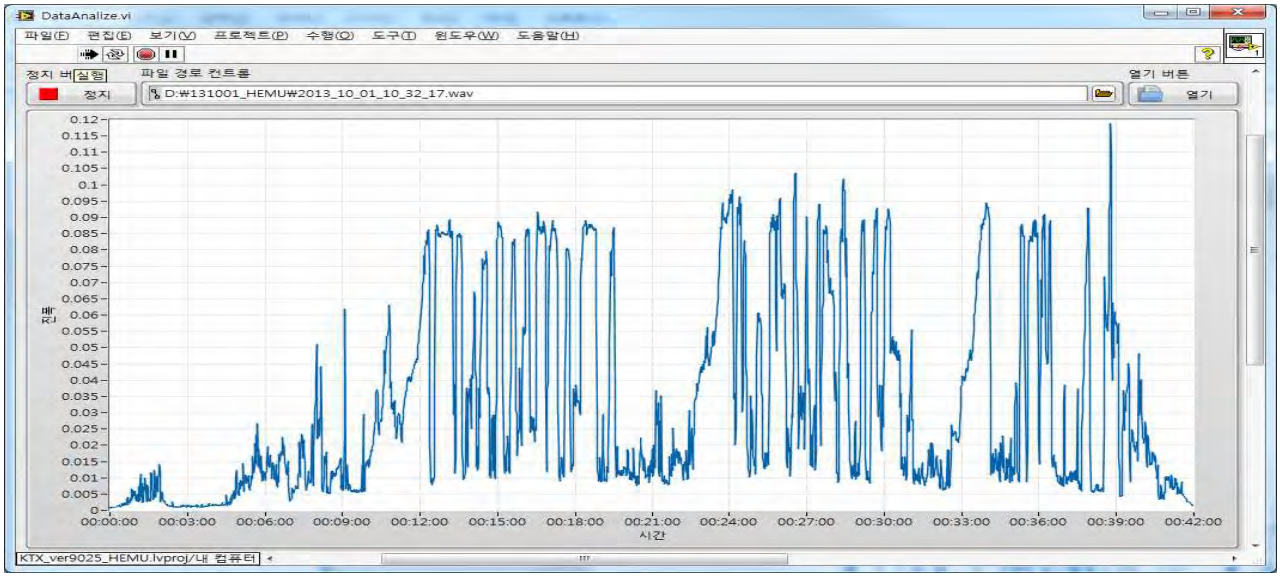



그림 2.3.77 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 RMS 데이터(대전–>광명)

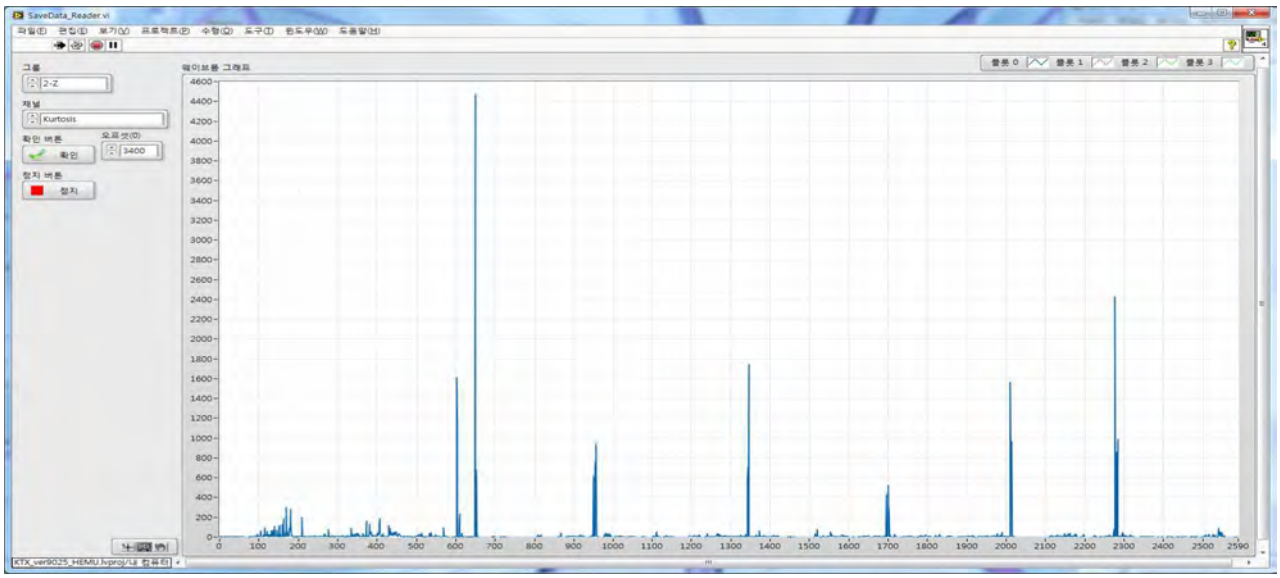


그림 2.3.78 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 Kurtosis 데이터(대전->광명)

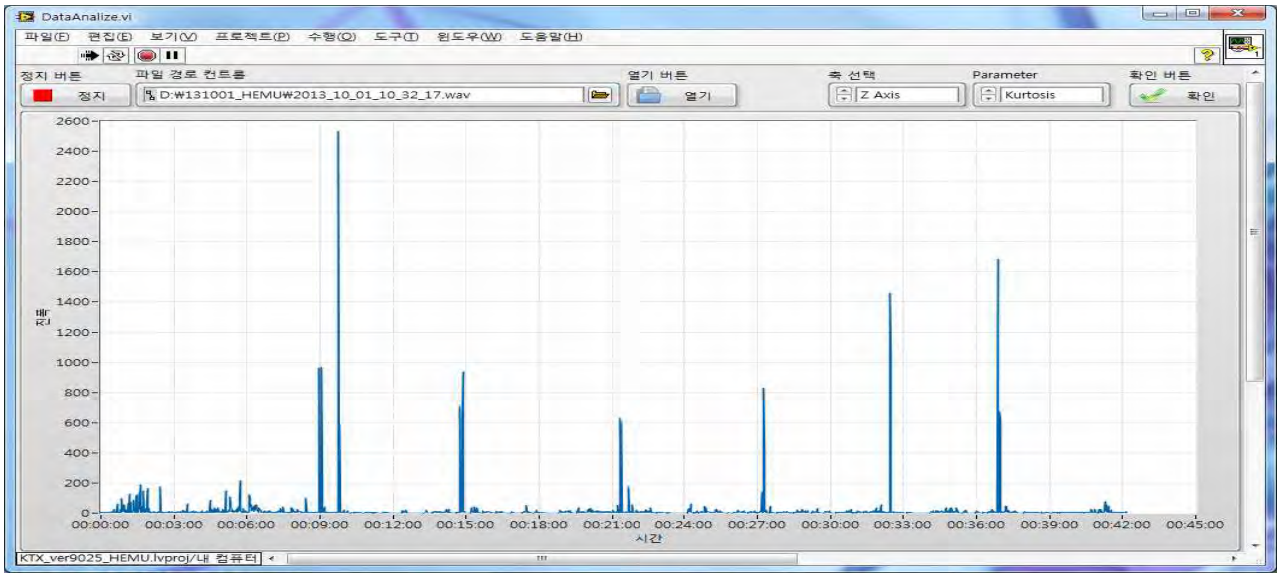



그림 2.3.79 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 Kurtosis 데이터(대전->광명)

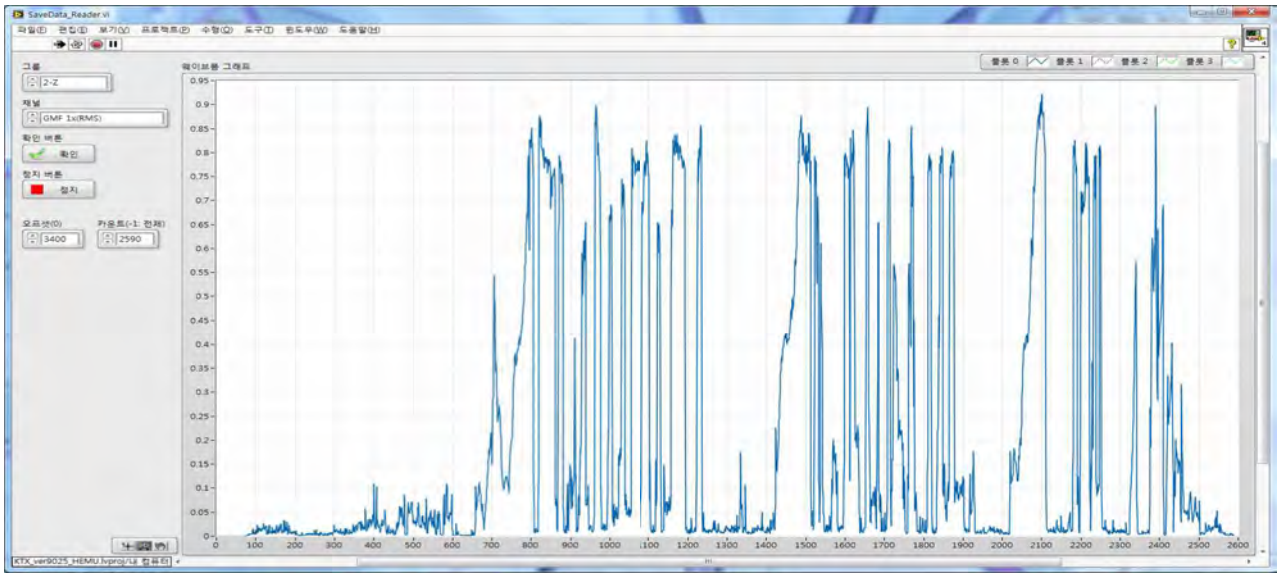


그림 2.3.80 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 GMF 1X 데이터(대전->광명)

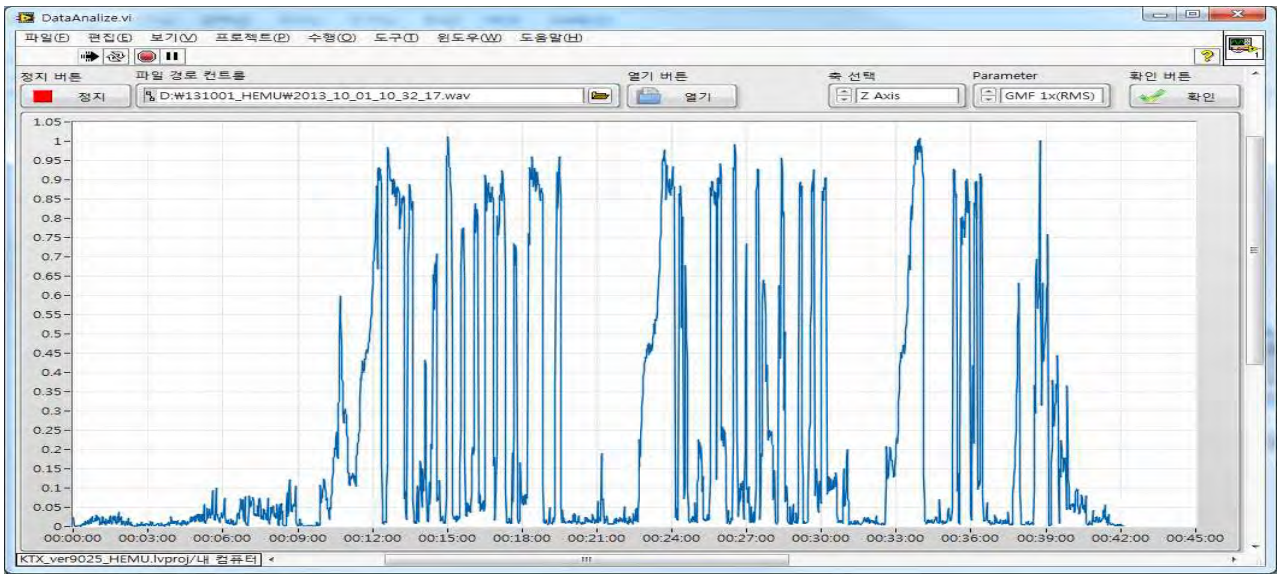



그림 2.3.81 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 GMF 1X 데이터(대전->광명)

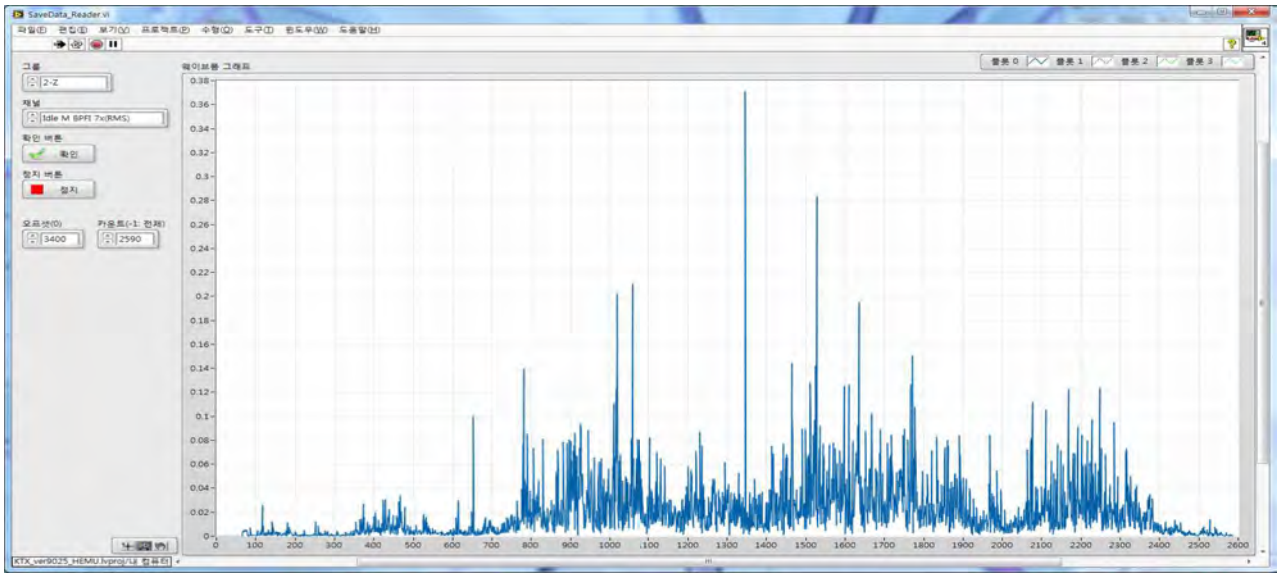



그림 2.3.82 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 Idle Gear BPFI 7x 데이터(대전->광명)

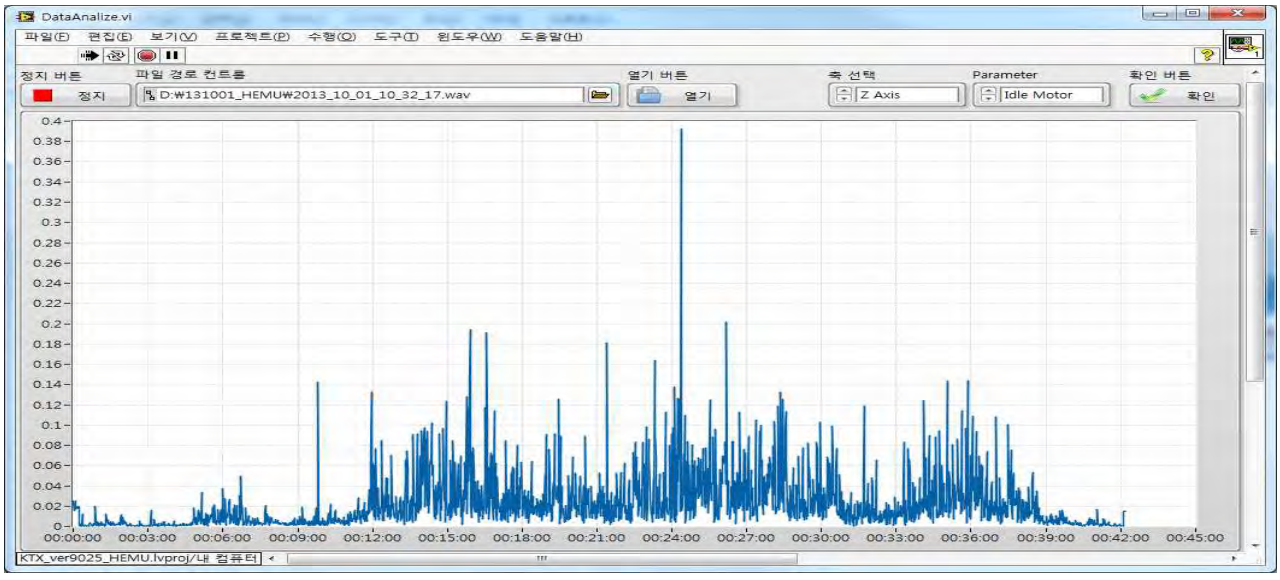



그림 2.3.83 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 Idle Gear BPFI 7x 데이터(대전->광명)

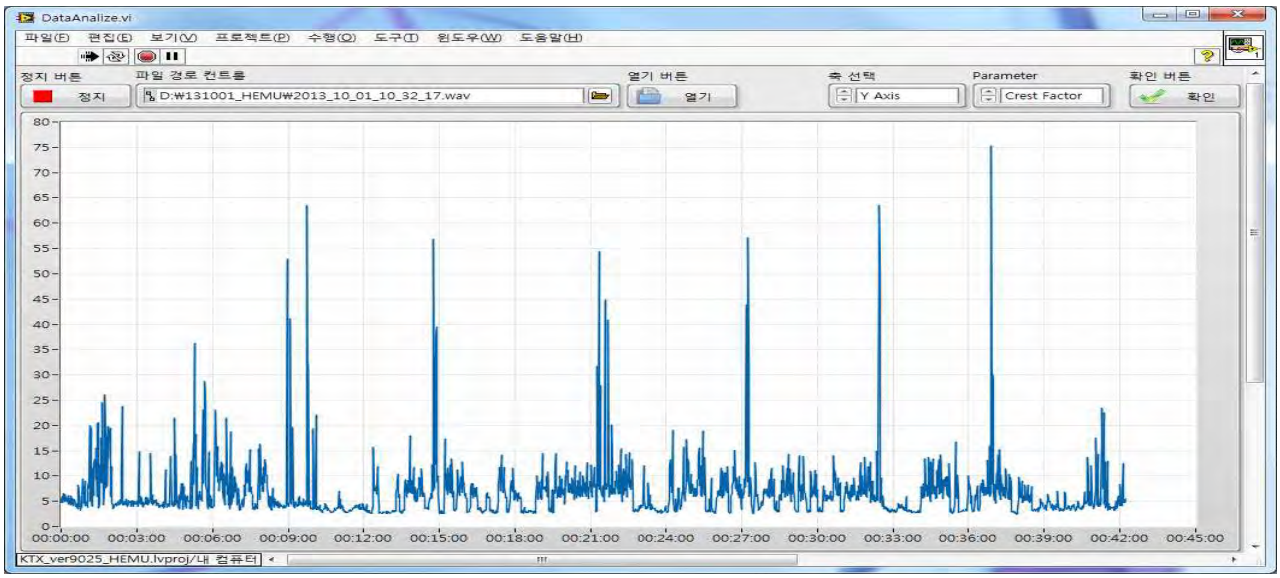



그림 2.3.84 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Crest Factor 데이터(대전->광명)

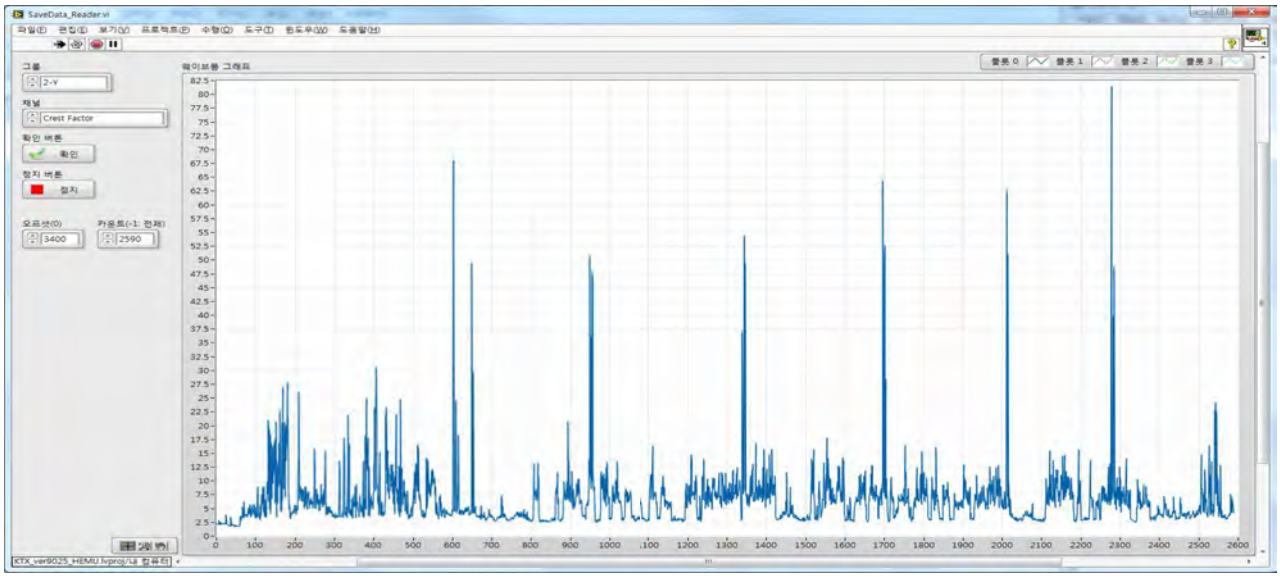



그림 2.3.85 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Crest Factor 데이터(대전->광명)

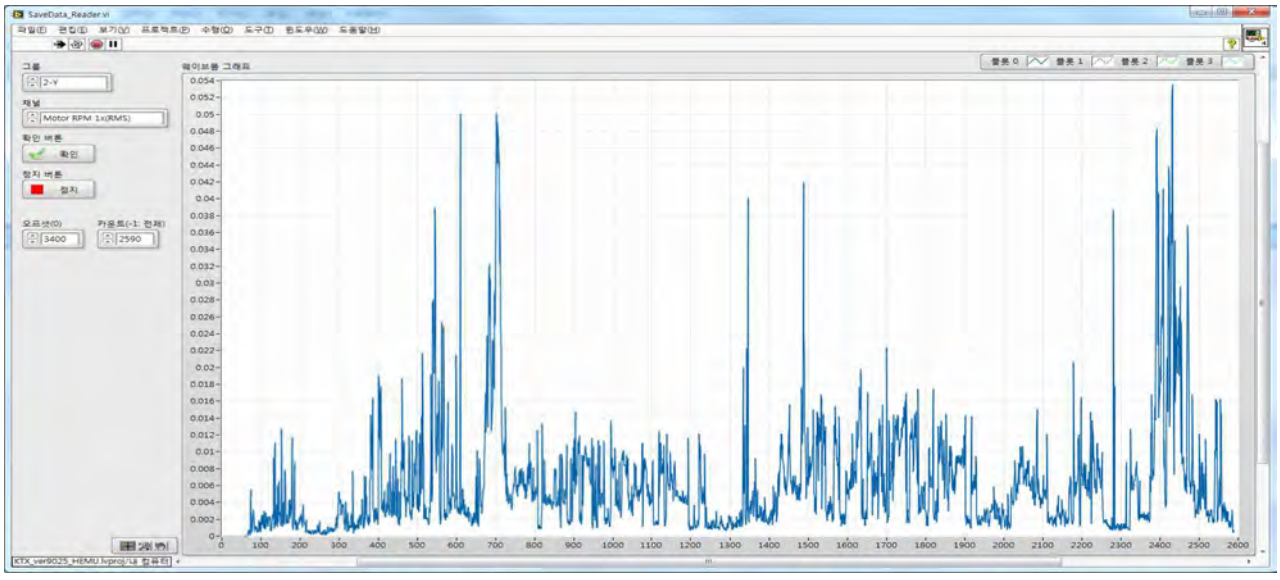



그림 2.3.86 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Motor축 RPM 1x 데이터(대전->광명)

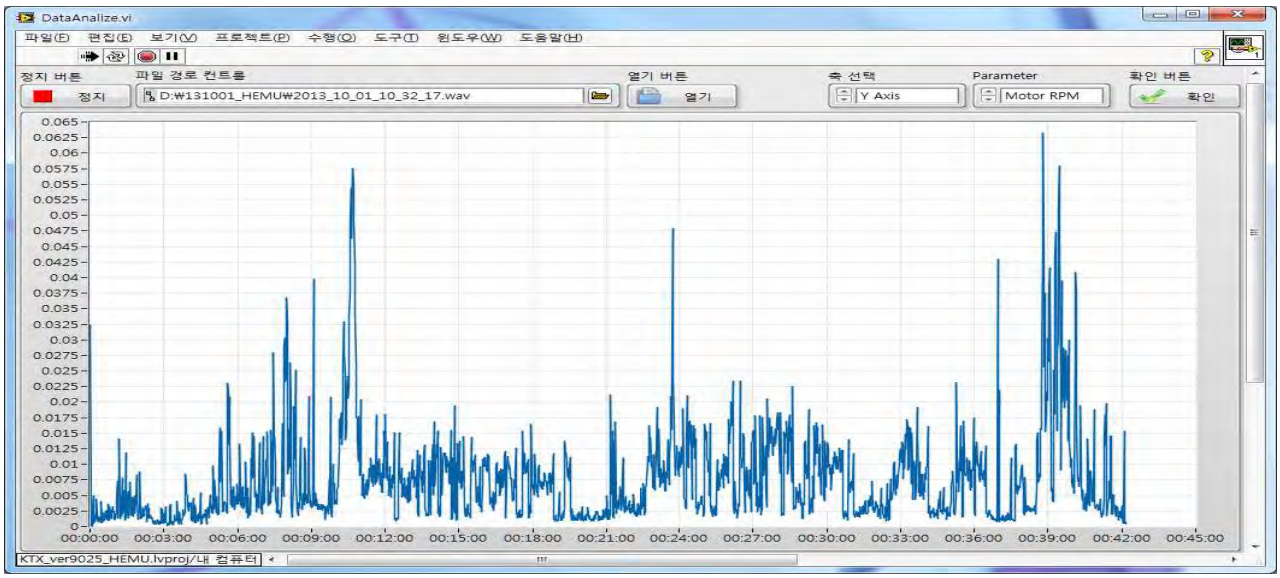



그림 2.3.87 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Motor축 RPM 1x 데이터(대전->광명)

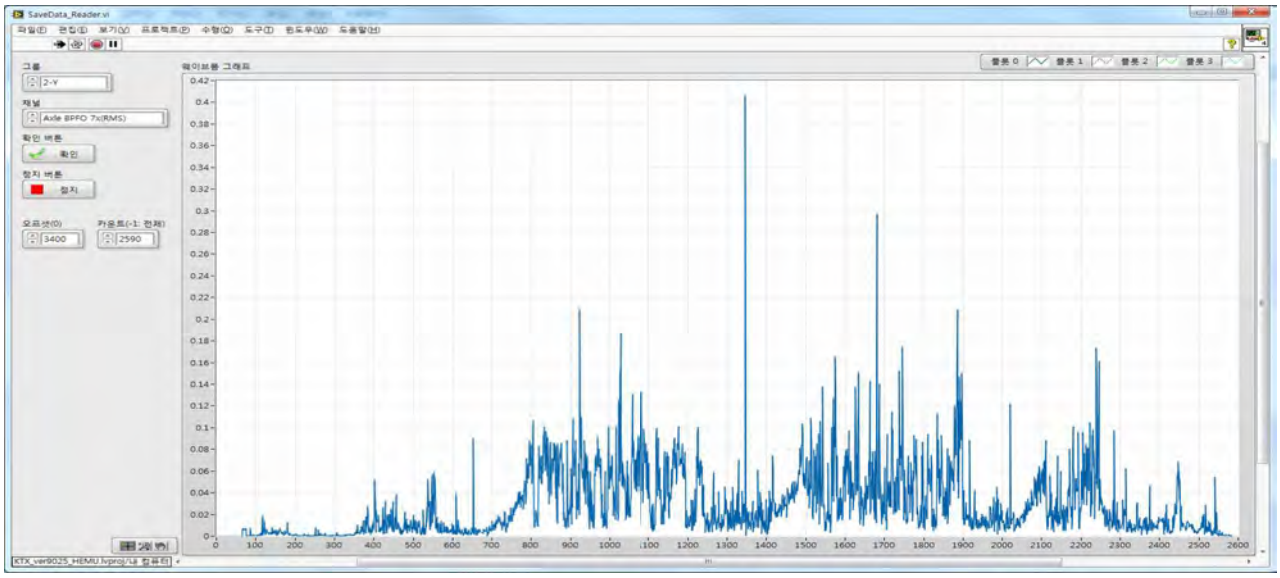



그림 2.3.88 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Axle축 BPFO 7x 데이터(대전->광명)

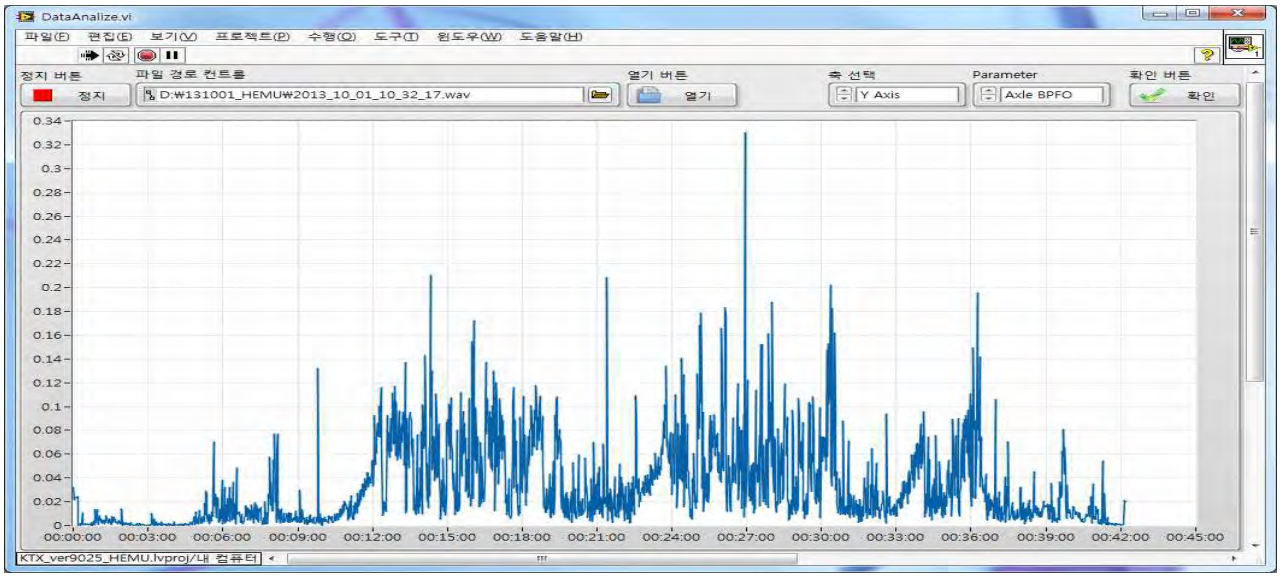



그림 2.3.89 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Axle축 BPFO 7x 데이터(대전->광명)

(나) 시제품 적용 측정 결과 : 대전 → 동대구 구간

대전 → 광명 구간에서와 마찬가지로 시제품과 계측기를 통하여 동시에 데이터 측정 시험을 진행하여 각 진동 파라미터별로 주파수의 변화 추이 데이터를 추출 하여 분석을 진행 하였다. 1차 측정 구간에서와 같이 본 구간 측정에서도 각 측정 포인트 별 RMS 데이터, Kurtosis, Crest Factor, GMF, BPFI 파라미터를 개발 장비와 계측기로 동시에 측정/저장하여 각 파라미터별 데이터분석을 진행 하였다. 측정 결과 대전 -> 동대구 구간에서 그림 2.3.90 ~ 2.3.95는 개발 시제품 소프트웨어에서 개발 제품과 상용화 계측기를 동시에 연결하여 데이터를 취득한 결과 값이다. 측정/저장한 Vertical, Axial 방향의 RMS, Kurtosis, GMF, Crest Factor, BPFI등 각 파라미터 데이터는 개발 장비와 계측기의 측정 / 저장 데이터 값이 유사한 파형의 흐름을 보여주는 결과를 다시 한 번 확인할 수 있었다.

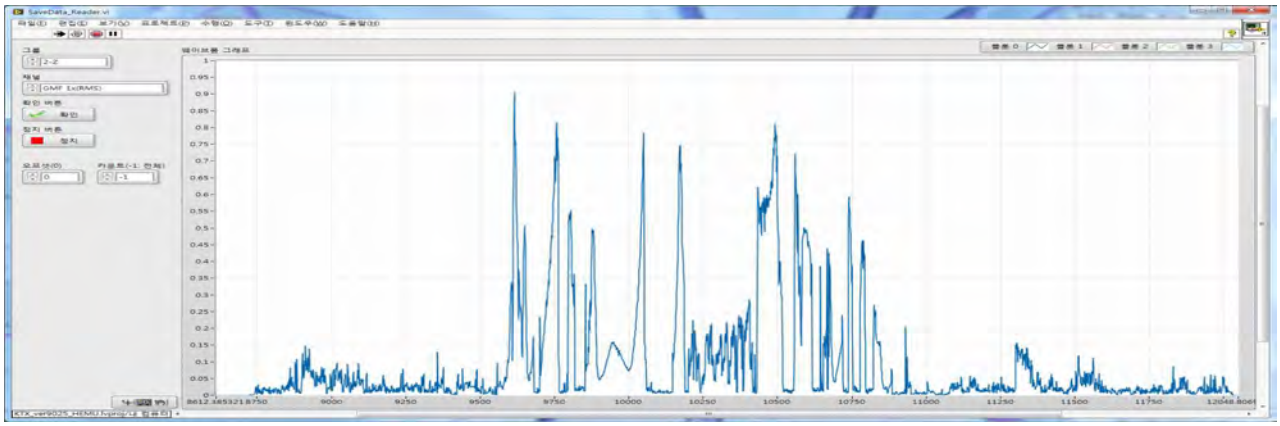


그림 2.3.90 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 GMF 1x 데이터(대전->동대구)

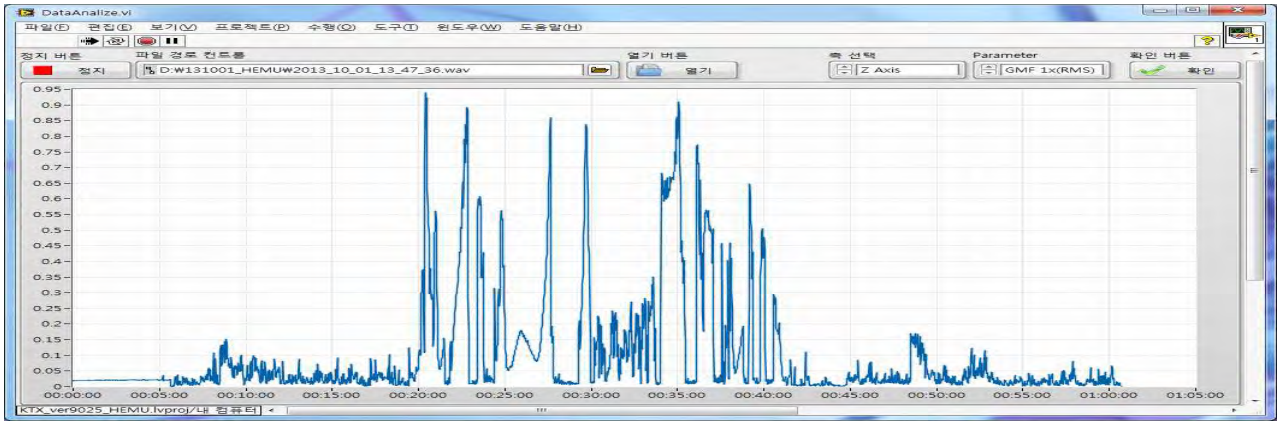



그림 2.3.91 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 GMF 1x 데이터(대전->동대구)

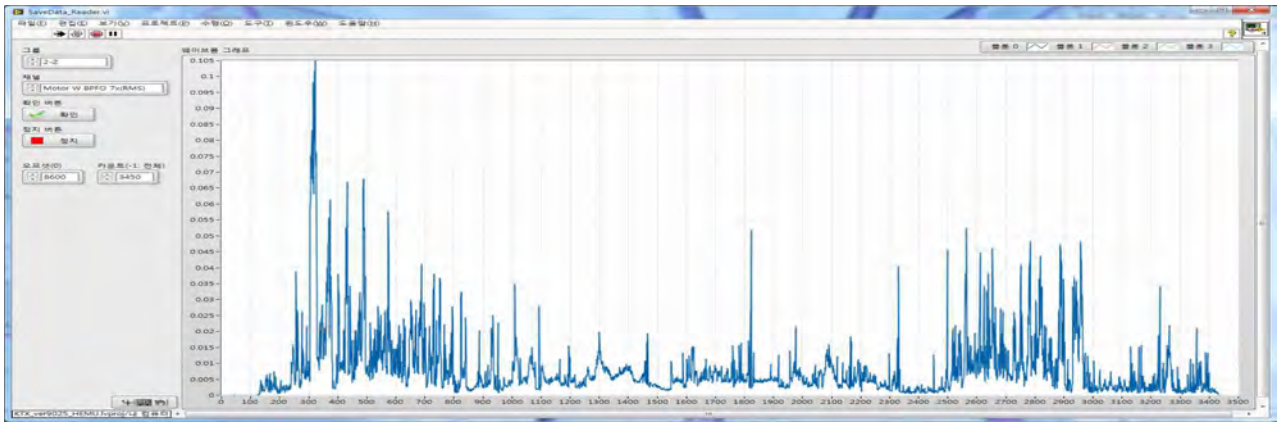


그림 2.3.92 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Vertical 방향 Motor BPFO 7x 데이터(대전->동대구)

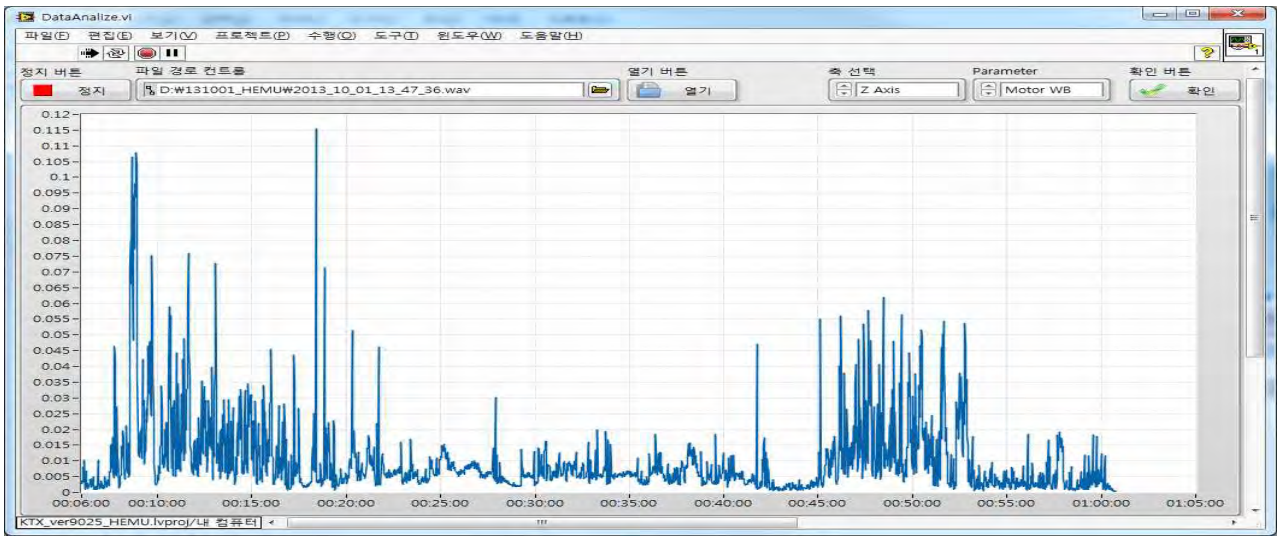



그림 2.3.93 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Vertical 방향 Motor BPFO 7x 데이터(대전->동대구)

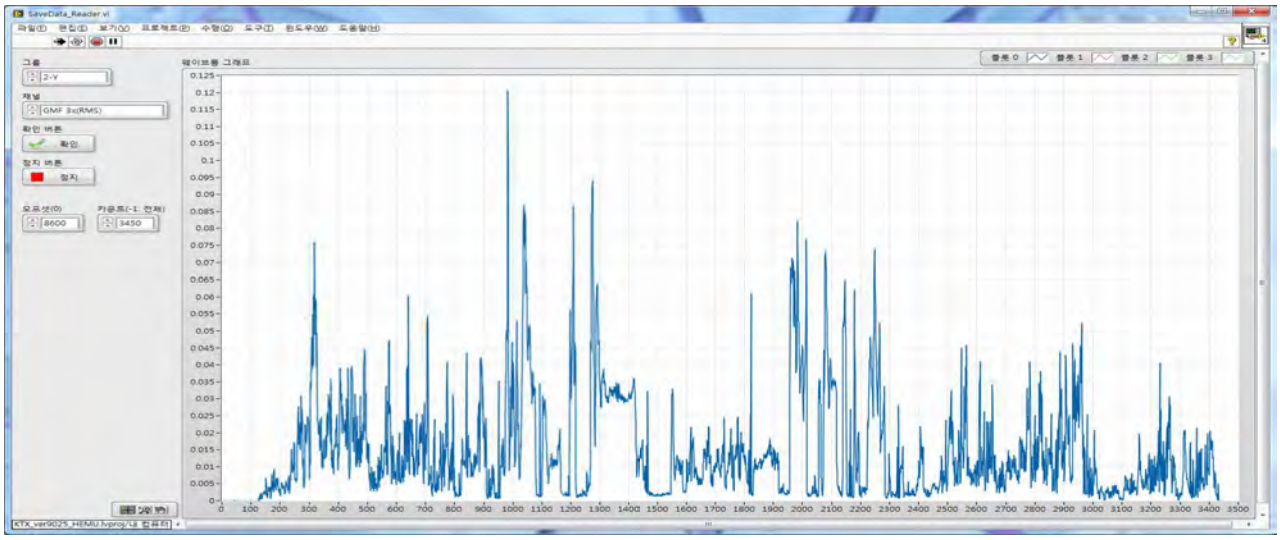


그림 2.3.94 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 GMF 3x 데이터(대전->동대구)

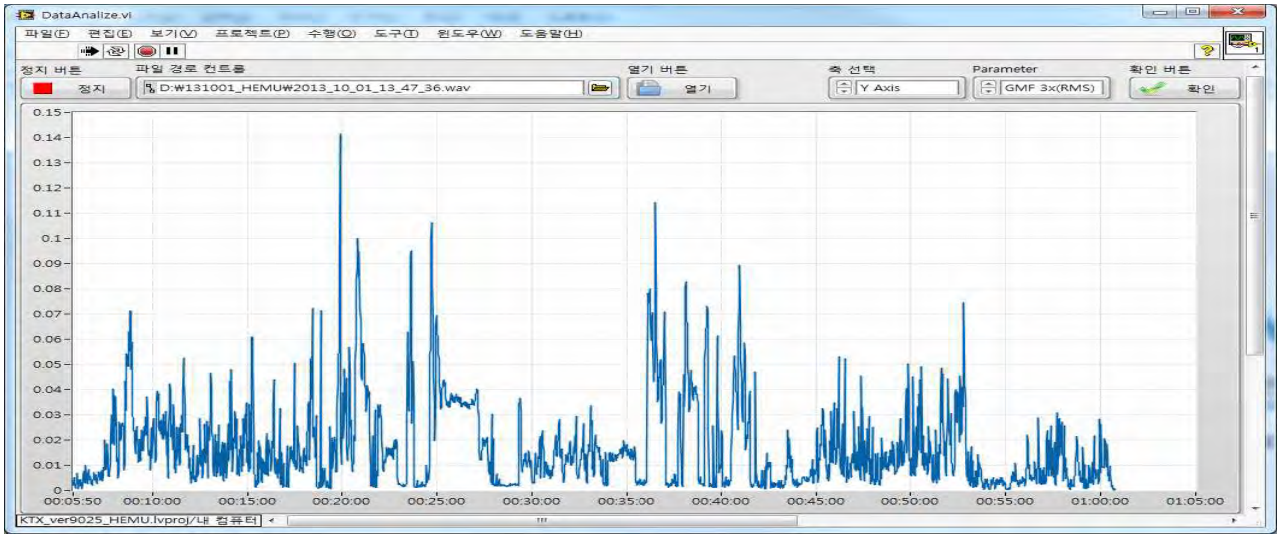



그림 2.3.95 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 GMF 3x 데이터(대전->동대구)

(다) 시제품 적용 측정 결과 : 동대구 → 부산 구간

본 구간에서도 앞서 시험한 내용과 마찬가지로 각 측정 포인트 별 RMS 데이터, Kurtosis, Crest Factor, GMF, BPFI 파라미터 데이터를 측정/저장하여 데이터 분석 비교를 진행하였다. 이번 구간에서도 역시 개발 시제품과 계측기에서 취득되는 진동데이터가 유사한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 2.3.96 ~ 그림 2.3.101은 동대구 – 부산 구간을 측정한 결과 내용이다.

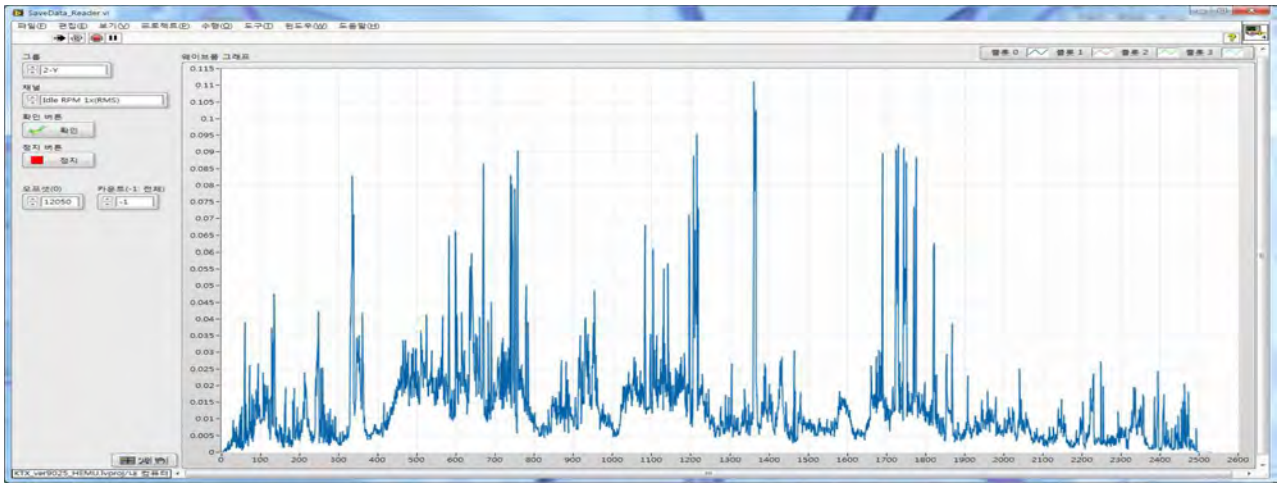


그림 2.3.96 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Idle Gear RPM 1x 데이터(동대구->부산)

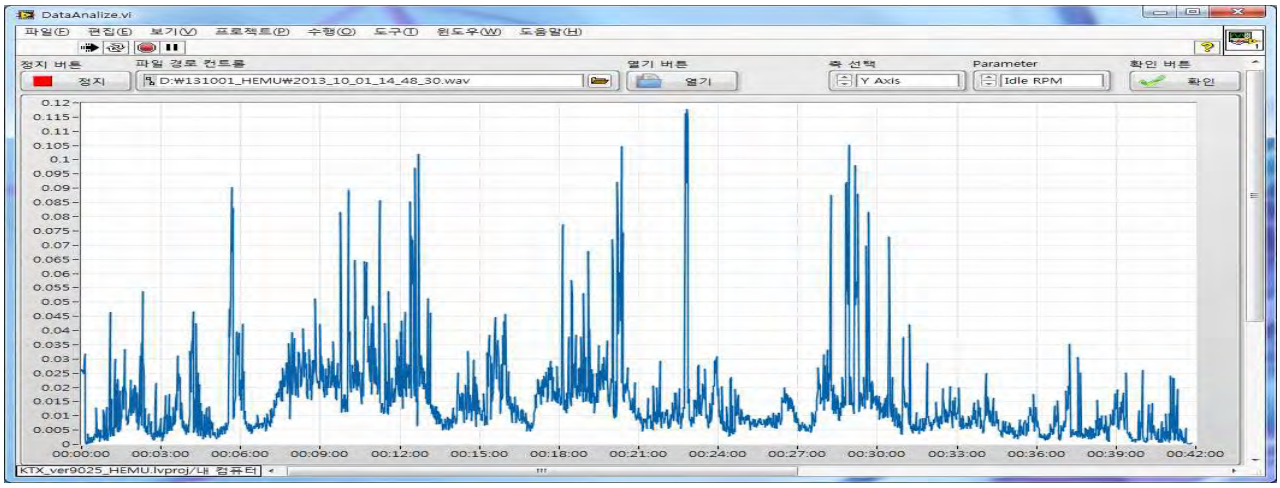



그림 2.3.97 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Idle Gear RPM 1x 데이터(동대구->부산)

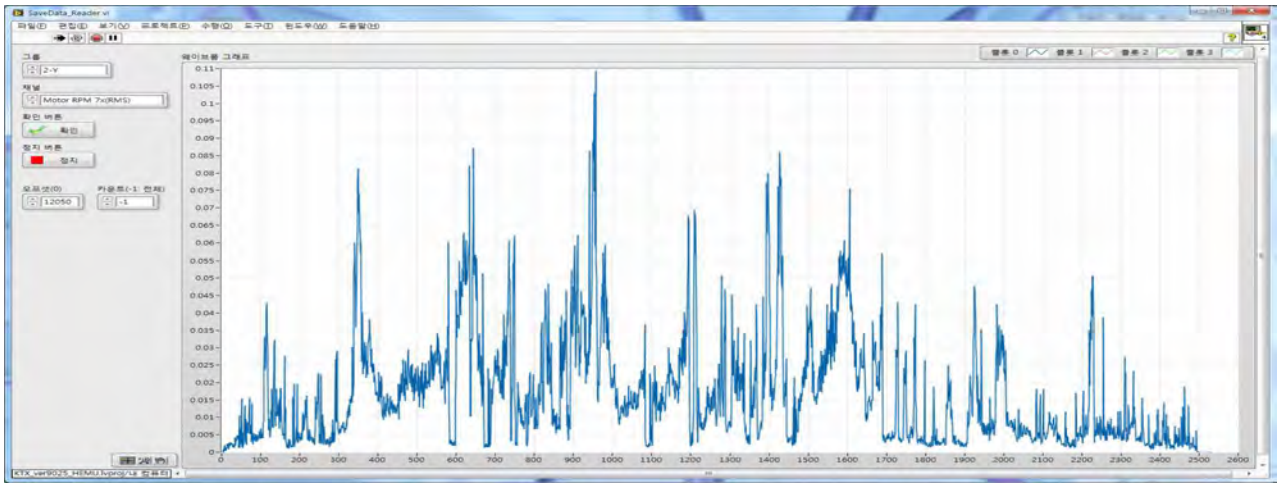


그림 2.3.98 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Motor RPM 7x 데이터(동대구->부산)

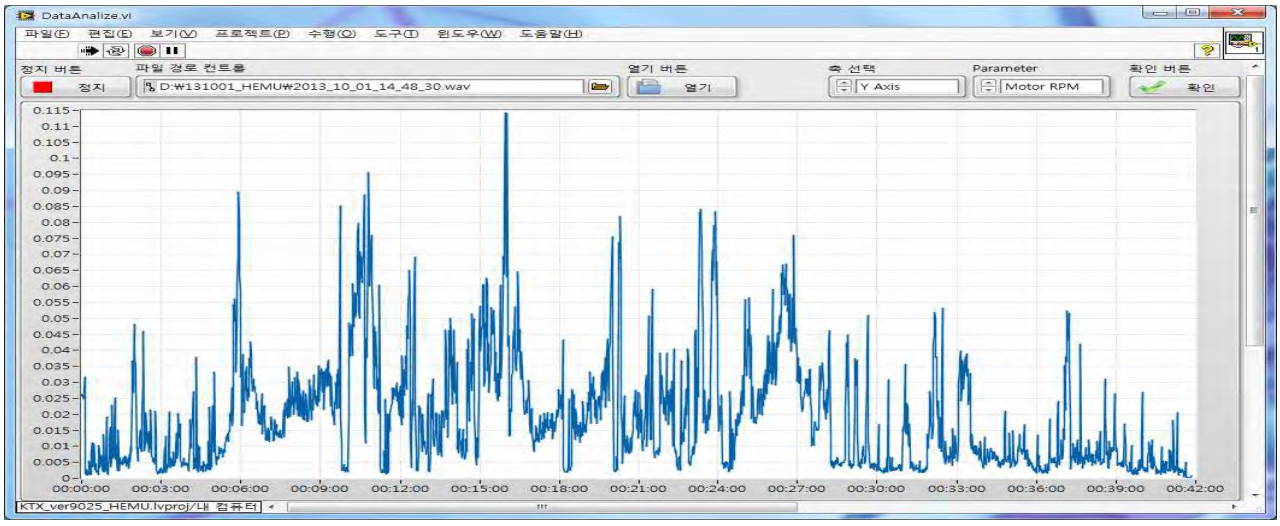



그림 2.3.99 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Motor RPM 1x 데이터(동대구->부산)

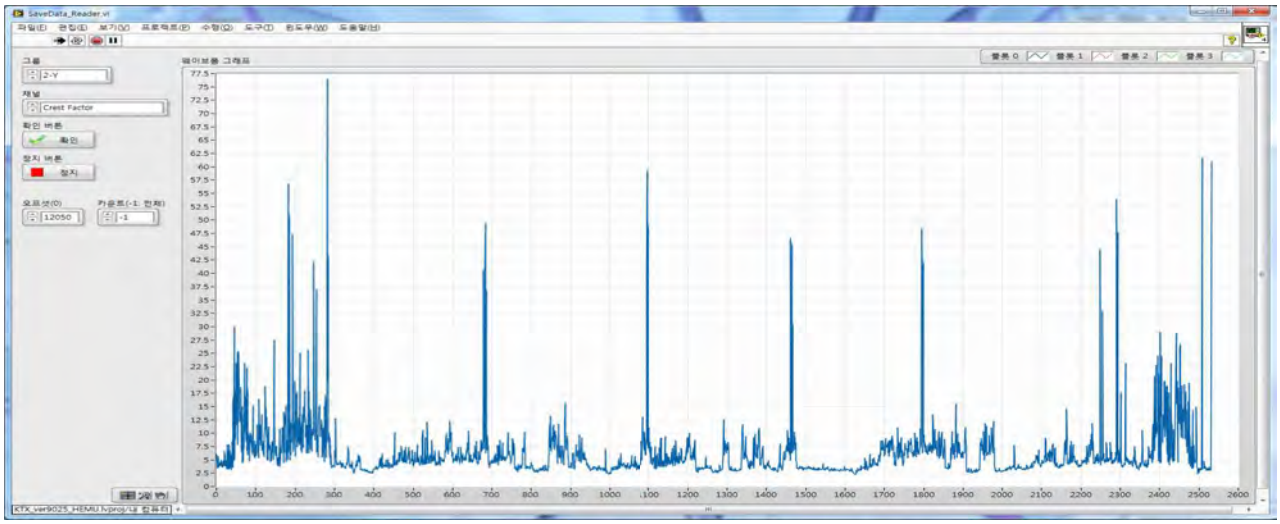



그림 2.3.100 개발 장비를 이용해 측정/저장한 Axial 방향 Crest Factor 데이터(동대구->부산)

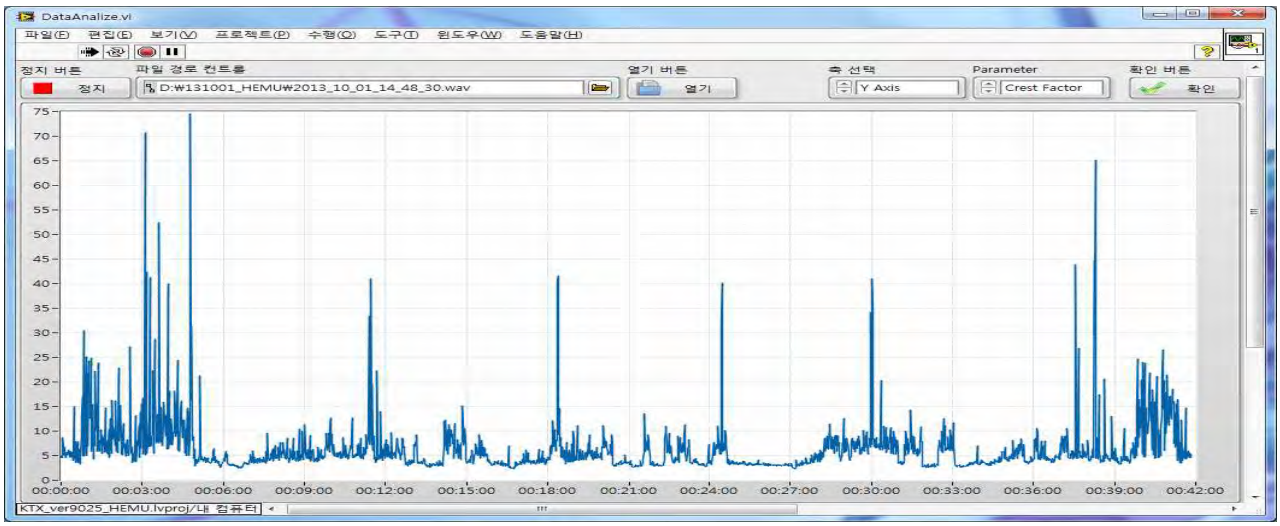



그림 2.3.101 계측기를 통해 측정한 진동파형에서 추출한 Axial 방향 Crest Factor 데이터(동대구->부산)

자. KTX 산천 실차 진동 측정 시험 (2014년 5월 ~ 6월)

(1) 시험의 개요

KTX 산천의 대차에 처음으로 클라이언트를 장착하여 운행 시험을 진행하게 되었다. 이번 시험은 클라이언트를 대차에 직접적으로 설치를 진행을 한 이외에 소프트웨어를 개선 적용을 한 첫 시험으로 굉장히 중요한 시험 이였다. 클라이언트를 대차에 직접 고정을 하고 Gearbox 및 대차의 진동상태와 주파수의 데이터 취득을 확인하기 위하여 3축 가속도센서와 속도센서를 사용해 1차 Gearbox의 수평(H: Horizontal), 수직(V: Vertical), 축(A: Axial)방향과 2차 Gearbox의 수평(H: Horizontal), 수직(V: Vertical), 축(A: Axial)방향 및 대차 Vertical방향, 차륜 Tach sensor(Speed detector)를 포함해 총 8point를 하드웨어 시스템 시제품 장비로 측정하였다. 다음 그림 2.3.102는 포인트 선정 사진이며 다음 그림 2.3.103은 현장 클라이언트 설치 사진이다.

이번 시험을 통하여 장기적인 데이터의 흐름이 어떻게 구축된 소프트웨어의 GUI에서 디스플레이 되는지 그 기능을 확인할 필요가 있었다. 예전 구축 소프트웨어 에서는 데이터 저장 시에 생기는 서버의 부하량 때문에 장기적 흐름을 저장하는 기능을 비활성화 되어 있었다. 그러나 모니터링 시스템에서 데이터의 장기적인 흐름을 표시해주는 것은 매우 중요한 과정이기 때문에 컴퓨터의 과부하를 초래하지 않으면서 장기적 흐름을 관리할 수 있는 기능 활성화 방안을 모색을 하게 되었다. 이 방안은 각 설비의 예지보전 측면에서도 매우 높은 활용성이 있다고 판단이 되는 기능이었는데 이번 KTX 산천 실차 시험을 통하여 구축된 기능에 대한 시험 검증을 실시하게 되었다.

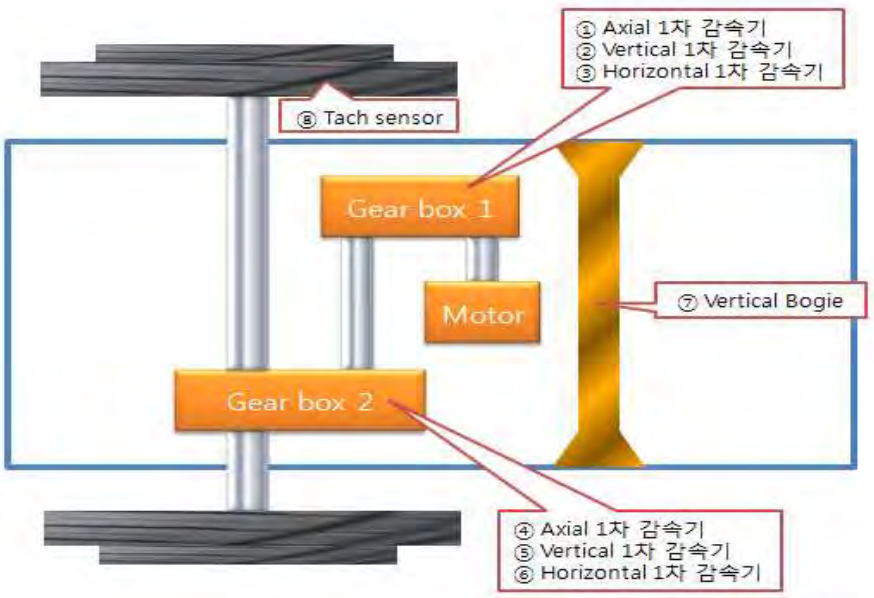



그림 2.3.102 KTX 산천 실차 시험 측정 포인트



그림 2.3.103 KTX 실차 시험 현장 사진

(2) 측정 결과

(가) MRU, Vertical 방향 진동 RMS 데이터 취득

그림 2.3.104를 보면 실차 시험을 하면서 MRU, Vertical 방향 진동 RMS 데이터가 저장이 되는 내용을 확인을 하였다. 열차 외부에 클라이언트를 장착을 하였음에도 데이터 수집이 이상 없이 되는 내용을 확인을 할 수 있었다.

(나) MRU, Vertical / Axle 방향 진동 RMS 데이터 비교

다음 그림 2.3.105는 클라이언트를 통해 서버로 전송된 저장 파일에서 추출한 MRU, Vertical / Axle 방향 진동 RMS 진동 데이터 값의 비교 그래프이다. 전체적으로 취득된 데이터의 흐름은 비슷하게 나타나고 있었으며 이는 유효한 데이터로 판단을 할 수 있었다.

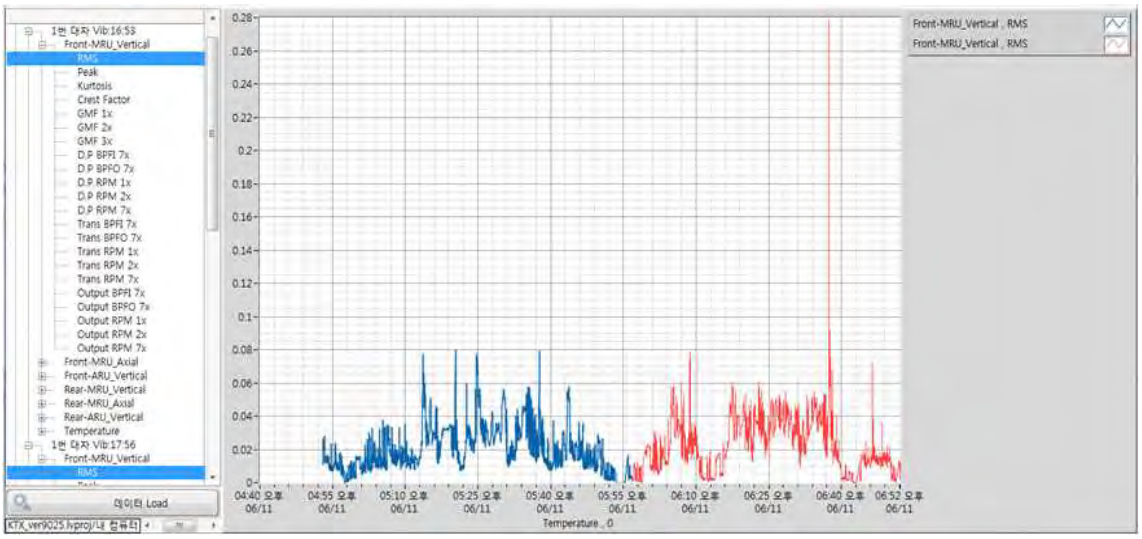



그림 2.3.104 KTX 산천 실차 시험 MRU, Vertical 방향 진동 RMS 데이터 취득

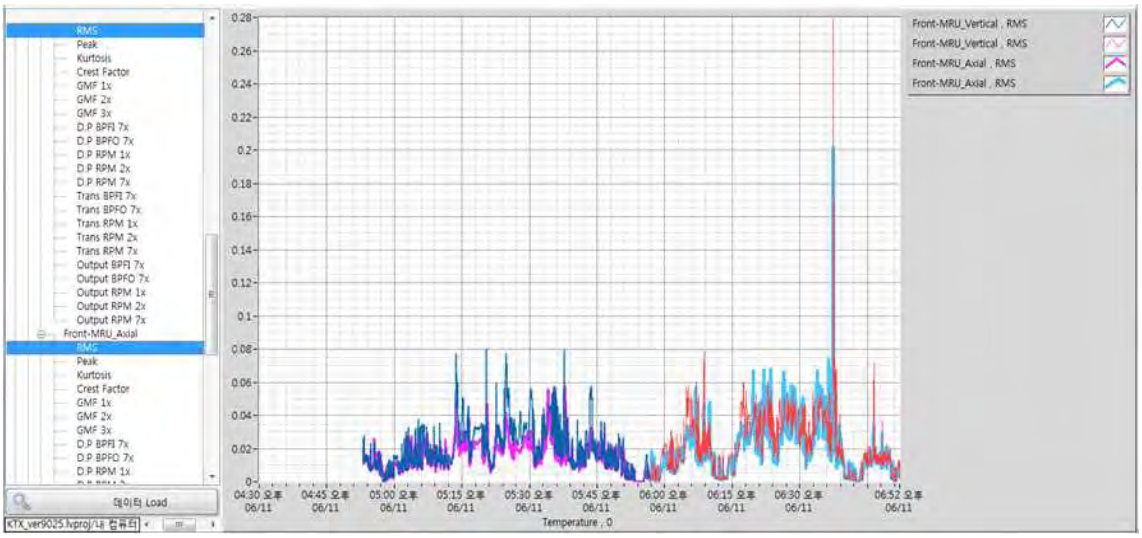



그림 2.3.105 MRU, Vertical / Axle 방향 진동 RMS 데이터

그림 2.3.106은 저장된 파일에서 추출한 MRU, Vertical / Axle 방향의 GMF 1X 파라미터에 대한 비교 그래프이다. 마찬가지로 데이터 값의 흐름은 비슷하게 나타나고 있으며 유효한 데이터로 결론을 내릴 수 있었다.

그림 2.3.107은 저장된 파일에서 추출한 ARU 출력 측 베어링의 온도 변화 추이 그래프이다. 전류의 변화량을 이용한 온도 변화량은 추출이 잘 진행이 되어 데이터가 축적이 되었지만 온도 모듈의 전류 기준 값에 대한 정보가 저장이 제대로 이루어지지 않아서 실제 온도 추출 결과는 실패를 하였다. 이 부분에 대해서는 향후 개선을 진행하기로 하였다.

그림 2.3.108은 소프트웨어 GUI 구동 화면이다.

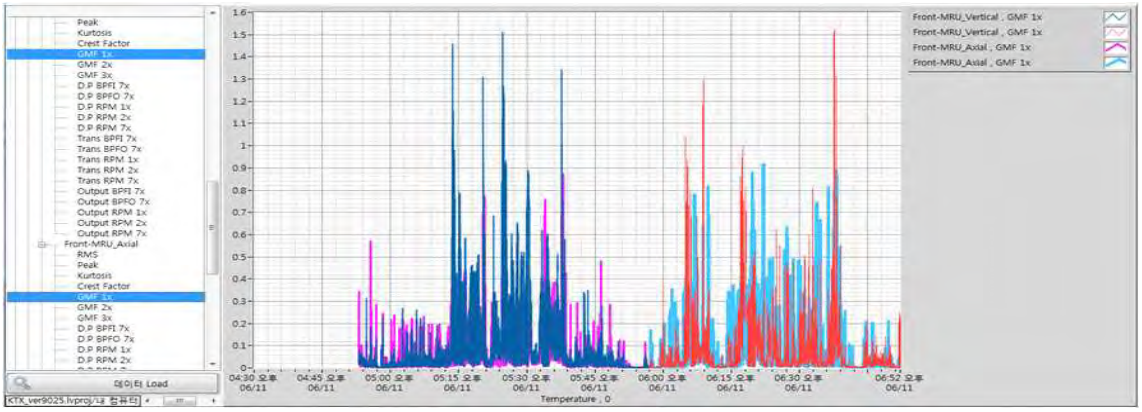



그림 2.3.106 MRU, Vertical / Axle 방향의 GMF 1X 파라미터 비교 그래프

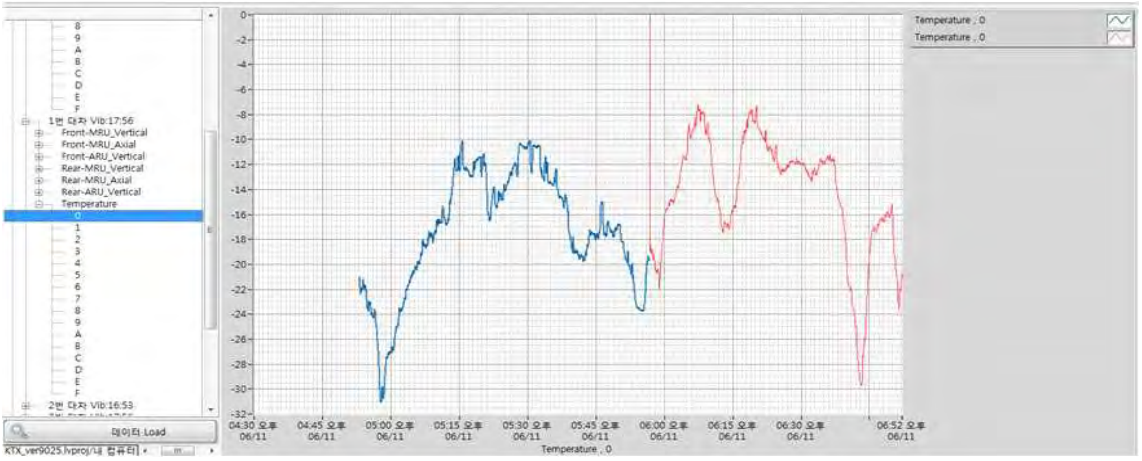



그림 2.3.107 ARU 출력측 베어링의 온도 변화 추이 그래프

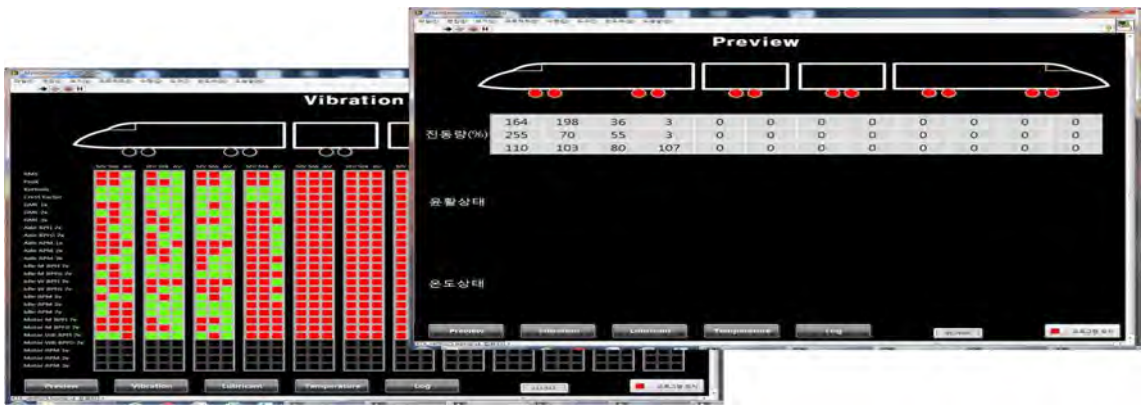



그림 2.3.108 KTX 산천 소프트웨어 GUI 구동 화면

(다) 시험 결과 정리

이번 시험을 진행을 하면서 다음과 같이 결론을 정리할 수 있었다. 소프트웨어의 UI에 표시되는 내용을 좀 더 간편화할 필요성이 있었다. 각 분석 파트에 대해서 정리를 하면 다음과 같다.

○ 진동 (Vibration) 부분에 대해서는 이상 진단 표시는 기존처럼 상대적 비교 우위 포인트에 대한 표시로 진행을 할 예정이며 사용자에게 보여주는 수치는 실제 진동 값을 표시를 하여주고, 적용 파라미터는 RMS, Kurtosis로 정리를 하는 것으로 개선방향을 설정 하였다.

○ 온도는 1개의 감속기에서 최대 값을 나타내는 위치의 온도 값만을 표시하여 주는 것으로 개선의 방향을 설정을 하였다. 또한 표시 수치는 상승량 즉 해당 위치의 온도 – 외기 온도를 표시하는 것으로 개선을 진행하기로 하였다.

○ 마지막으로 윤활 파트에 대해서는 열화도, 수분에 대한 값만을 표시할 수 있도록 변경을 하는 것으로 개선 방향을 최종적으로 설정을 하였다.

차. 대차 진동 측정 시스템 검증 시험

KTX 진동 파라미터 주파수 분석을 위하여 실시한 시험에서 대차의 진동 측정 시험을 동시에 진행 하였다. 대차의 측정 부위는 열차를 운행하면서 쌓인 이물질과 기름이 많아 센서를 장착하는데 많은 어려움이 있었다. 또한 좁은 열차 하부의 공간으로 케이블 정리가 쉽지 않은 점이 있어서 향후 본 측정 시스템을 적용하기 위해서는 열차 운행 시 발생되는 오염물질에 대한 대안을 확실하게 세워야 할 것으로 판단된다. 그림 2.3.109는 당시 시험을 진행하면서 대차에 센서를 설치한 사진과 케이블 처리를 한 사진이다.



그림 2.3.109 대차 측정 설치 사진

시험은 계측기에서 측정한 대차의 raw data를 저장한 후 이번에 개발한 시제품에서 제대로 데이터가 출력이 되는지 확인 하였다. 측정된 데이터를 분석하면 개발 소프트웨어서 표시되는 진동의 데이터와 계측기를 통하여 측정한 데이터가 유사한 진동 경향을 보이는 것으로 분석이 되었다. 그림 2.3.110 ~ 그림 2.3.111은 KTX 실차 시험 당시 측정한 대차의 Raw Data를 개발 시제품 소프트웨어로 추출하여 저장한 데이터를 소프트웨어로 출력한 그림이다.

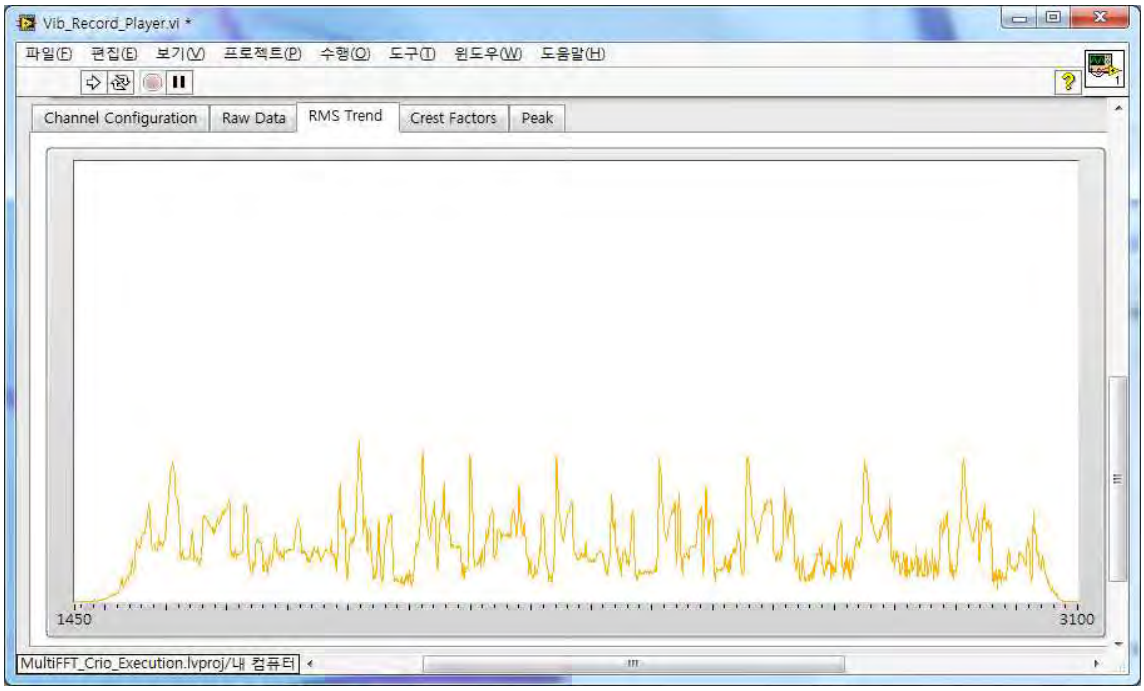



그림 2.3.110 개발 장비를 통해 측정한 대차 진동 Raw Data

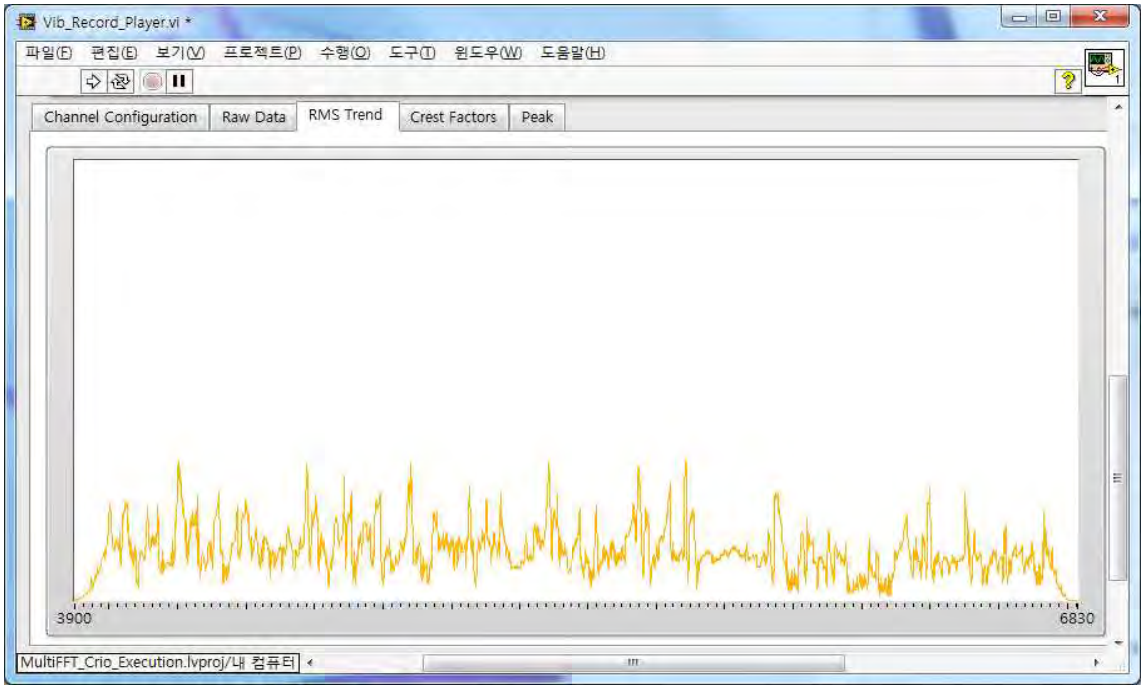
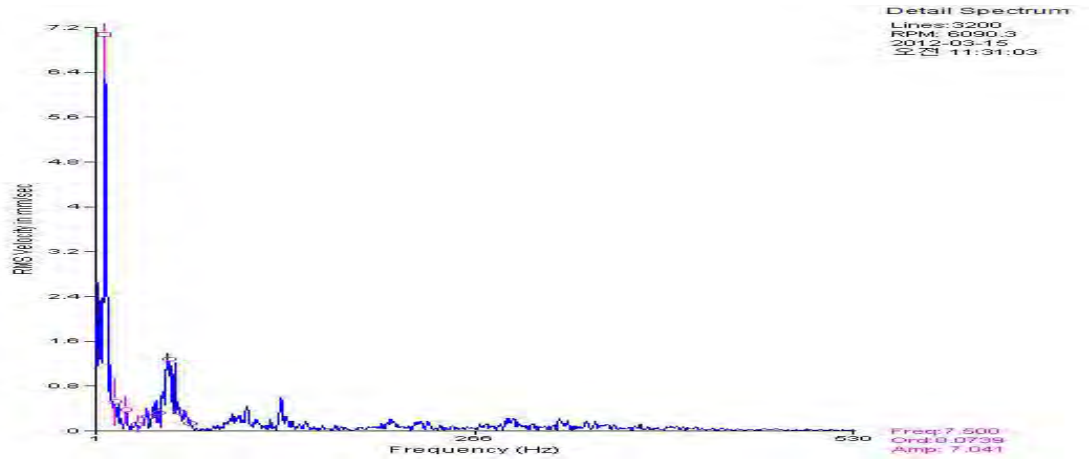


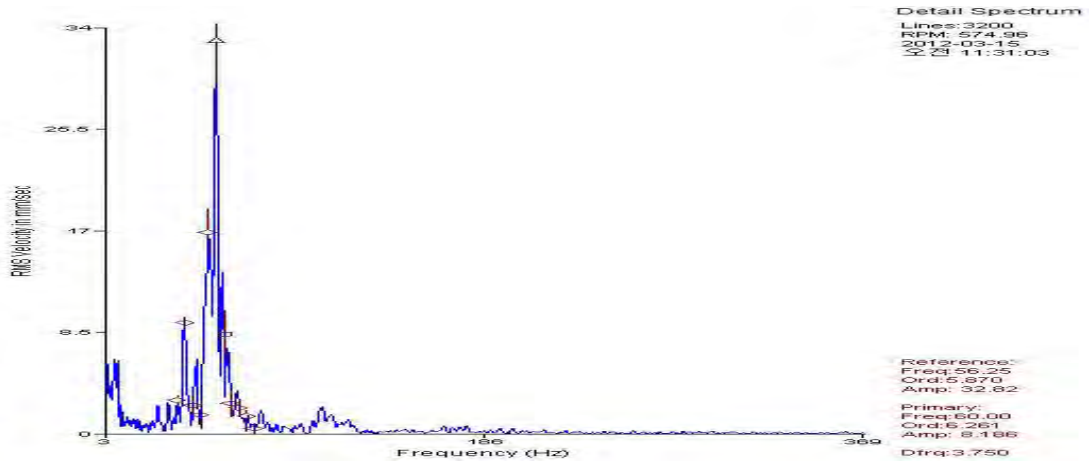

그림 2.3.111 계측기를 통해 측정한 대차 진동 Raw Data

시험을 진행하면서 감속기와 대차의 진동 특성을 비교하기 위하여 상용화 계측기 CSI 6500을 통하여 측정한 감속기와 대차의 동일 구간에서 측정한 진동의 데이터를 분석하였다. 그림 2.3.112를 보면 서로 같은 조건의 그래프이지만 감속기와 대차의 주파수 형태가 상이하게 다른 형태를 나타내고 있고, 중복되는 주파수도 발견되지 않은 결과를 확인할 수 있었다. 결과적으로 대차와 감속기에서 발생되는 진동은 전혀 다른 성분으로 대차와 감속기의 진동을 분리하여 별도의 데이터를 측정하는 연구방향은 타당하다는 결론을 도출할 수 있었다. 이러한 결과를 근거로 대차 진동을 측정하는 채널을 별도로 할당하여 데이터를 측정 및 저장을 실행하고 측정된 진동 데이터는 별도의 저장소를 활용하여 확인할 수 있도록 시스템을 구축하였다.

KTX 실차 시험 당시 측정한 대차의 Raw Data를 개발 시제품 소프트웨어로 추출하여 저장된 데이터를 분석한 결과 개발 시스템과 계측장비의 측정 결과 값이 동일하게 전개되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 대차의 시스템 구축과정에서 감속기와 대차의 진동을 비교 분석한 결과 내용은 전혀 다른 주파수 성분이 전혀 다른 성분의 주파수가 측정이 되었기 때문에 본 연구과제의 연구내용은 타당성이 있었다고 판단된다.




① Gearbox Spectrum




② 대차 Spectrum

그림 2.3.112 감속기와 대차의 스펙트럼 비교

(1) 시 제품 장기 실차 시험 – 3차년도 2014. 6월 ~ 10월

(가) 시험 개요

2차 년도까지 시험은 최적의 감시 포인트 선정, 파라미터 선정을 위하여 대부분의 시험을 진행하였지만 단 기간에 의한 시험 진행으로 장기적으로 데이터를 확인할 필요성이 있었다. 또한 어떻게 열차에 장착을 할지에 대한 구체적인 시험 방법론이 명확하게 구분이 되어 있지 않았기 때문에, 3차 년도에는 열차에 설치를 하여 장기적으로 운행을 하는 시험을 차세대 고속열차인 HEMU에서 진행하게 되었다. 차세대 고속열차(HEMU) 차량편성 중 동력차 (M-car) 하부에는 모터(Motor)와 단일 기어상자(Gearbox) 구조가 하나의 단위로 구성된 감속장치(Axle Gear Reduction Unit)가 탑재되어 있다. 차량의 감속기 진동 발생은 감속장치 내 기어나 베어링의 결함에 의해 발생하는 경우가 대부분 이므로 모니터링 시스템에 예측 진단하기 위해 그림 2.3.113과 같이 감속장치 4 단위의 견인 감속기와 견인모터를 상호 비교할 수 있도록 설치하였다.

진동 센서는 총 8개로 3축 방향 가속도계를 사용하였고 주행 중 주요한 비교자료를 취득하기 위해 수직방향(Vertical)과 열차진행의 횡방향인 유닛의 축 방향(Axial)을 모니터링 하였다. 이와 같은 설치 및 데이터 수집 방법으로 감속장치의 진동을 계측하여 주요 진단 파라미터인Overall, Trend, Kurtosis, Crest factor, GMF, 1X, 2X, 3X, BPFI(Bearing pass frequency Inner race) 등을 모니터링 하였다. 다음 그림 2.3.114는 시험 당시 측정 조건 및 현장 사진이다.

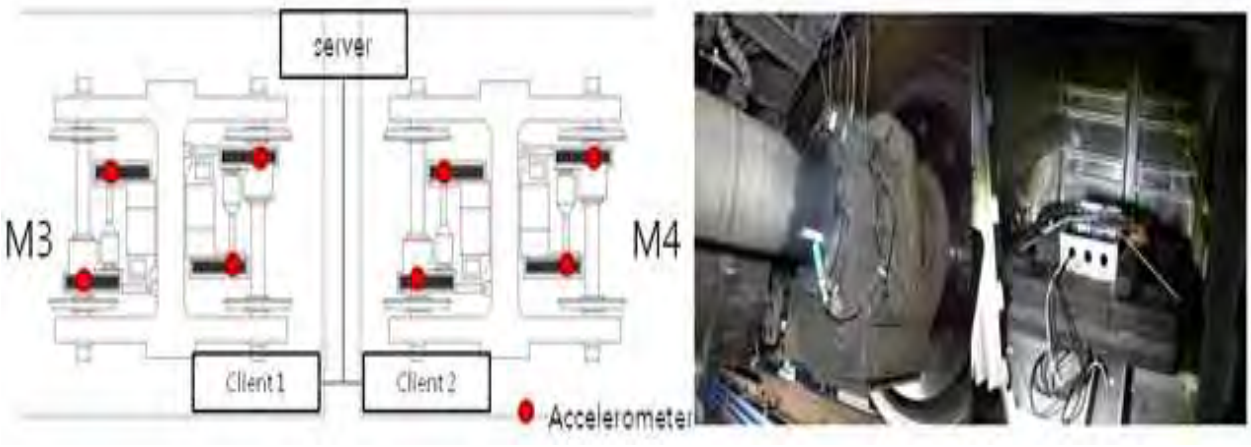



그림 2.3.113 차세대 고속열차 실차 시험조건 사진



그림 2.3.114 대차 측정 설치 사진

본 시험은 장기적인 실차 시험으로 감속기 모니터링 시스템의 모니터링을 최종적으로 검증하는 단계를 거쳤다. 아래의 그림 2.3.115를 보면 감속기 모니터링시스템의 진동 진단 파라미터는 진동량을 나타내는 RMS와 Peak, 기어의 부하상태를 설명하는 GMF(Gear Mesh Frequency)의 1X, 2X, 3X(X=Order), 각 베어링의 결함주파수 중 7배수 (BPFI, BPFO)와 각 축(Shaft)의 회전수 1X, 2X(X=Turning speed)를 대표 값으로 모니터링 하는 과정으로 실차 시험을 진행하였다. 샘플링주파수(Sampling frequency)는 1초 간격의 Long term trend data로 축적하여 감속기와 관련된 부품의 진동 상태모니터링으로 차세대 고속열차의 감속기를 모니터링 진단하였다. 시험을 진행하면서 전체적으로 모니터링 시스템은 무리 없이 구동되는 결과를 확인할 수 있었다.




그림 2.3.115 Performance test screen and raw data

그림 2.3.116과 2.3.117은 고속열차 주행 중의 수직방향과 축방향의 속도(상), 진동 RMS(중), GMF 1X(하)의 시간기반 데이터를 직접 시제품을 이용하여 측정한 값을 나타낸 것이다. 기어 수직방향(Vertical)이 축방향보다 진동 RMS값이 크고 250km 기준 2G (1client평균) 최고 40G(2Client)를 나타내고 있으며 결과와 같이 2번 Client가 감시하는 감속기의 진동이 크다는 결과를 시험을 통하여 확인을 할 수 있었다.

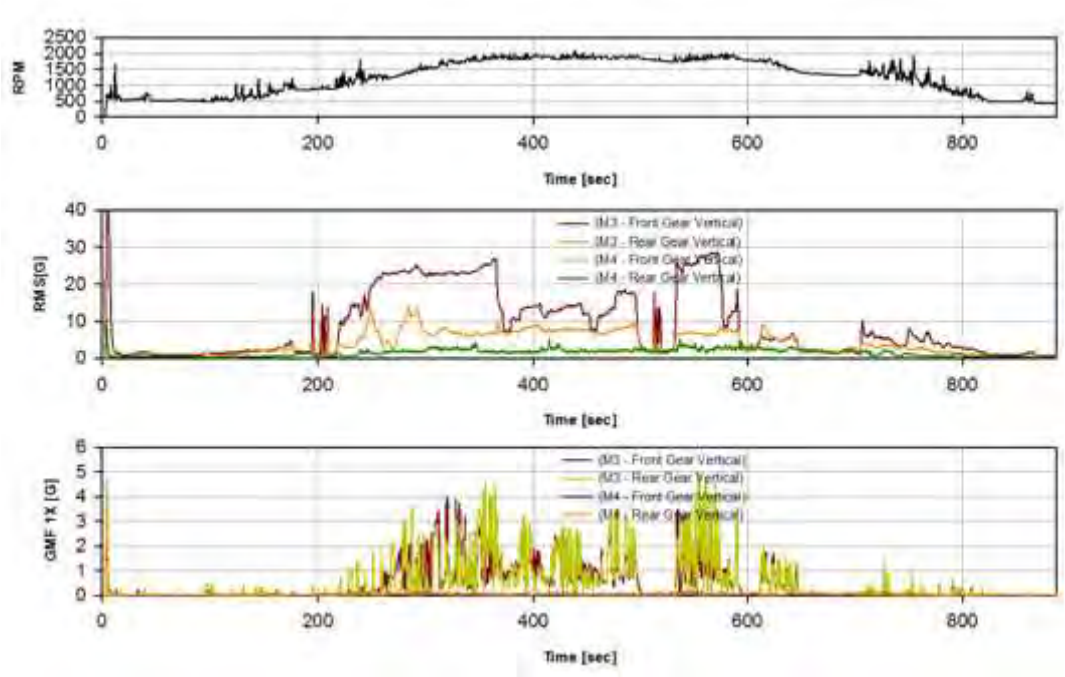



그림 2.3.116 Comparative plot of RPM and RMS, GMF1X(vertical)

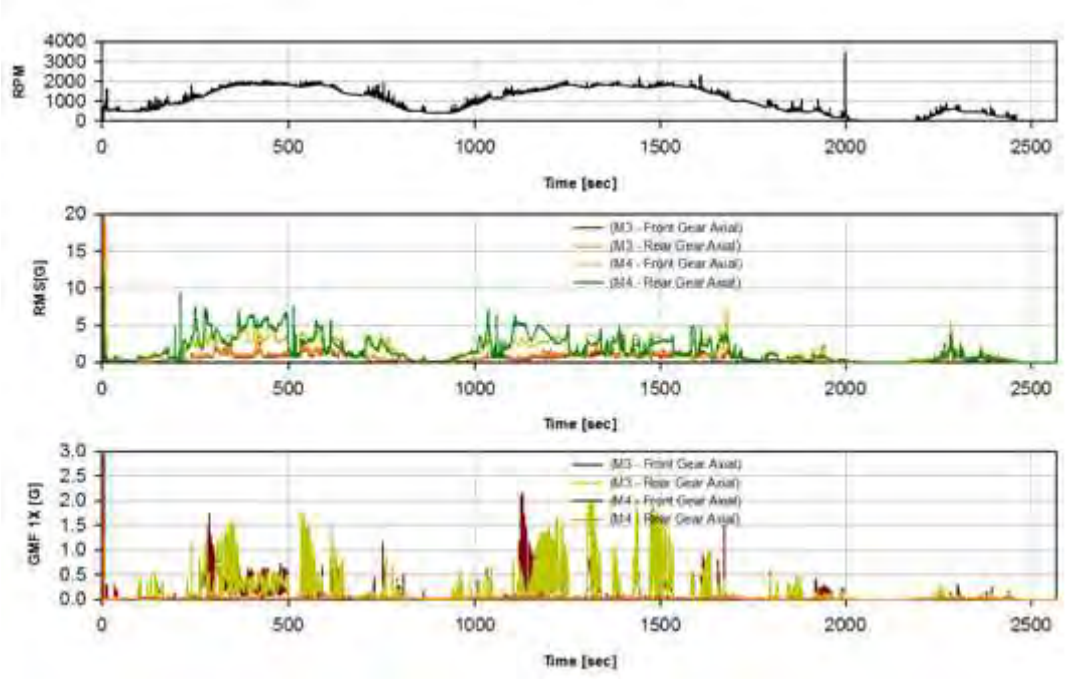



그림 2.3.117 Comparative plot of RPM RMS, GMF1X(axial)

그림 2.3.118과 2.3.119는 감속기 수직방향에서의 BPFI 7X와 Kurtosis의 시간기반 데이터를 나타낸 것이다. 위 그래프를 통해 기어의 진동량(RMS)을 주도하는 주파수를 감시하는 주요 파라미터 중 BPFI 7X는 첨예도(Kurtosis)보다 감속기와 베어링 진동의 진동 발생 정도를 잘 나타내었다. 이러한 결과는 정상파와 충격파의 비교인 실험실과 실차 데이터의 차이에서도 나타나듯이 파고율(Crest factor)과 첨예도(Kurtosis)보다 GMF와 BPFI가 실제 감속기의 진동상태를 보여주기에 적합한 것으로 판단되는 결과였다.

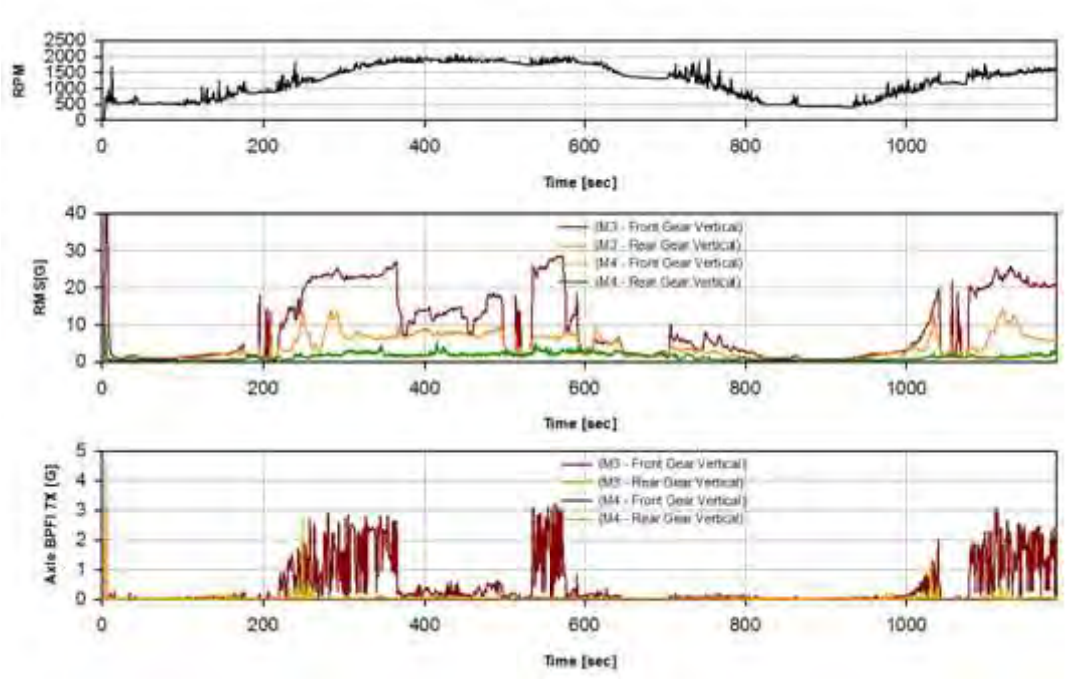



그림 2.3.118 Comparative plot of RPM and RMS, BPFI7X

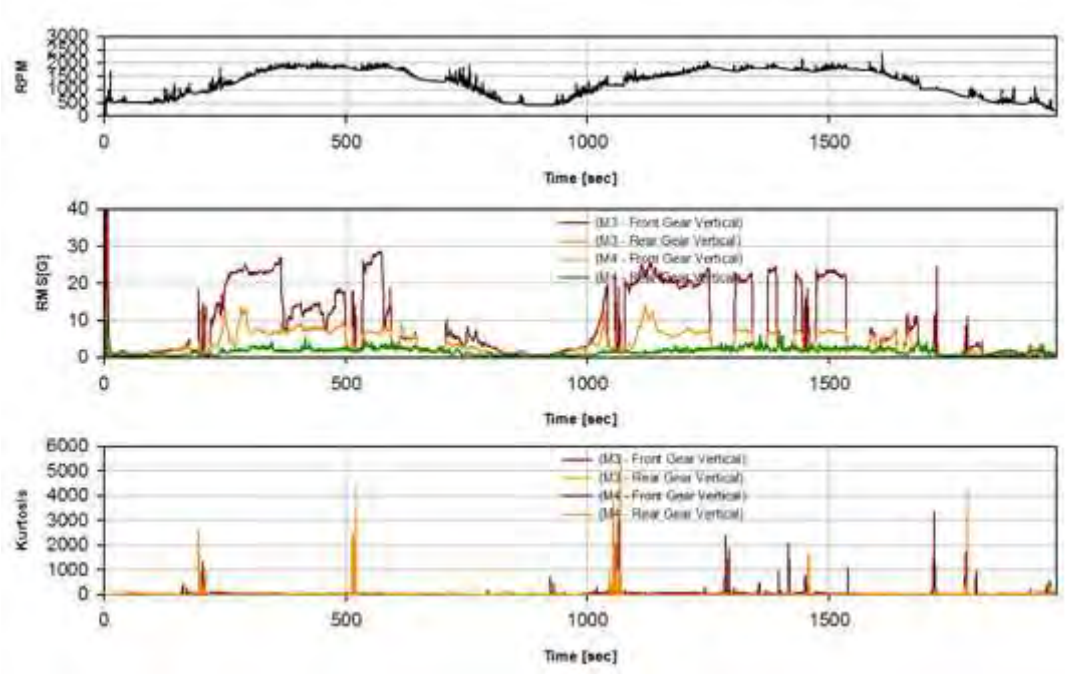



그림 2.3.119 Comparative plot of RPM and RMS, Kurtosis

그림 2.3.120은 회전수(RPM) 1X 파라미터의 시간기반 데이터로 차축의 회전속도와 상관성이 있어 보이나 전체적인 진동 RMS 데이터 형태와는 일치하지 않았다. 그러나 (RPM) 1X 파라미터는 기어진동과 관련성이 적어 차축과 차륜의 불량상태 발생할 때 가장 좋은 지시치일 것으로 사료되는 측정데이터를 얻을 수 있었다. 다음 그림 2.3.121은 모터의 진단 파라미터의 시간기반 데이터로 진동량은 기어의 진동량에 비해 1/30 수준이며 진동 RMS값의 기여도는 기어의 GMF와 BPFI 7X가 높은 상관성을 나타내므로 모터의 수명은 기어의 진동량 감소와 연관이 있을 것으로 사료되는 결과를 얻을 수 있었다.

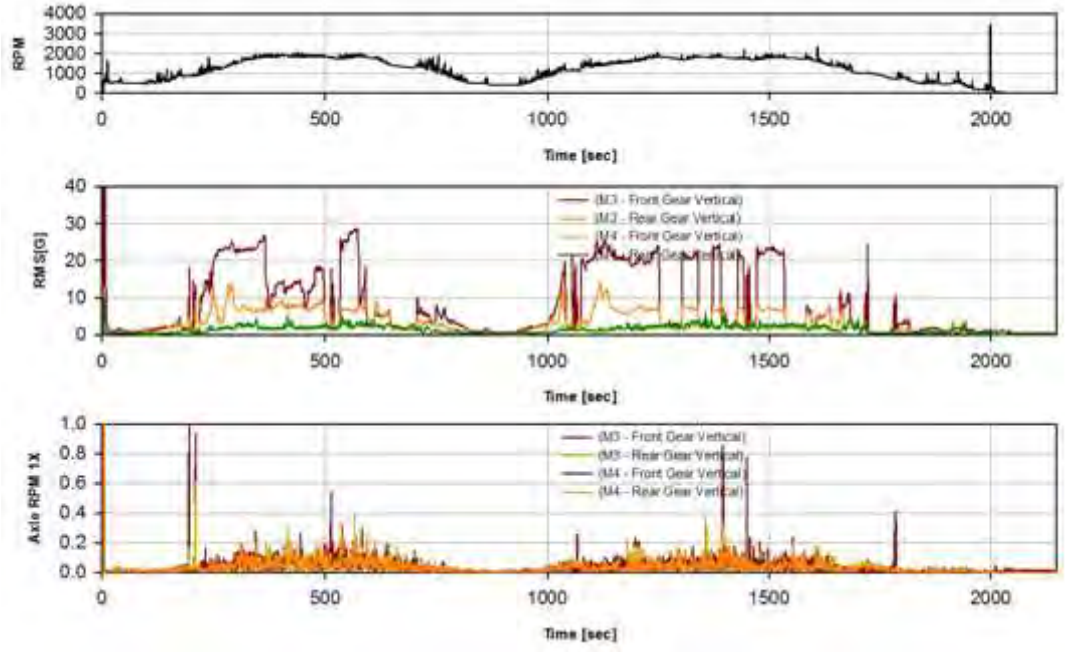



그림 2.3.120 Comparative plot of RPM and RMS, Axle PRM 1X

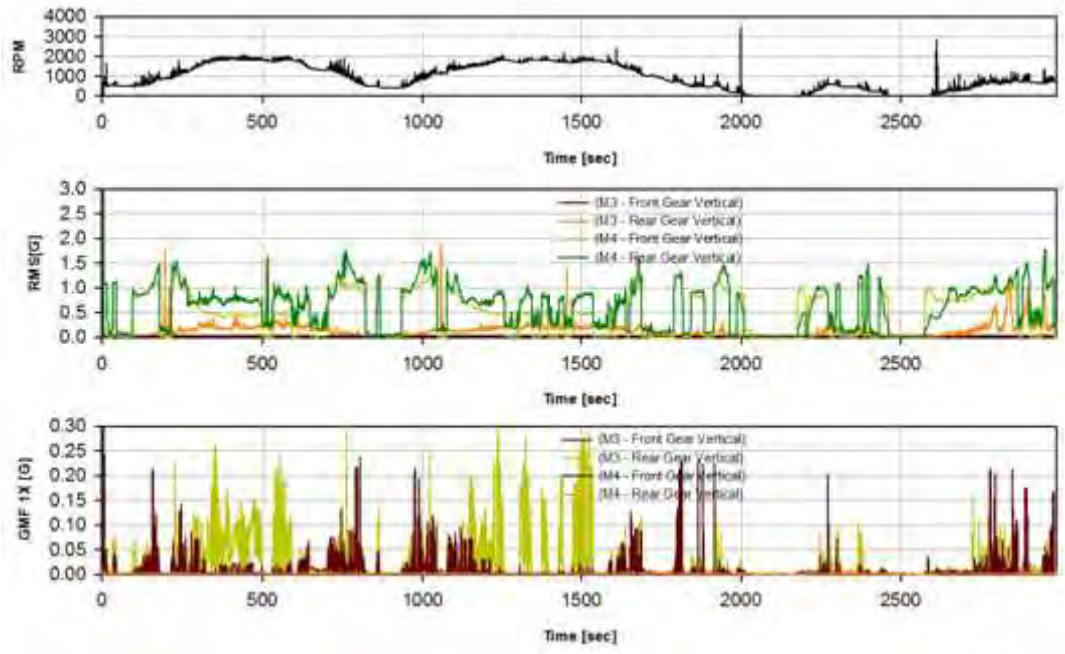



그림 2.3.121 Comparative plot of RPM and RMS, GMF1X 7X

### 카. 시제품 제 3자 인증 성능 시험

(1) 시험 개요

고속열차용 감속기 모니터링시스템에 대한 실차 시험을 진행한 후 제품 성능에 대한 실시간 감시 성능 “을 평가하기 위하여 제 3자 인증 시험을 진행할 필요가 있었다. 시험을 진행하기 위해서는 시험항목과 제품 성능에 대한 판정기준을 명확하게 할 필요가 있었다. 시험을 진행하기 이전에 RAMS(BS EN 50126-1)의 신뢰성(Reliability)기반 시스템의 성능(Performance) 확인을 중심으로 시험 절차와 기준을 정리를 하여 차세대 고속 열차인 HEMU에 설치하여 시험을 진행 하게 되었다. 시스템의 시험 항목은 시스템의 설치검사, 진동 모니터링의 시스템 성능시험, 온도 모니터링의 성능시험 크게 3가지로 구분을 하여 시험을 진행을 하였다. 시험을 진행할 때 비교 검증이 가능한 데이터가 필요하였기 때문에, 상용화된 계측기를 설치하여 상용화된 계측기와 개발 제품 두 가지 시스템으로 동시에 데이터를 측정하면서 시험을 진행하였다. 시험을 진행할 때 데이터 샘플링은 실시간 진동신호를 취득 시 12kHz이상의 샘플링 주파수(6kHz이상의 최대주파수, 0.000083초 이하의 샘플링시간)로 측정하도록 시스템을 설정을 하였다. 시험에 대한 방법은 시스템에서 샘플링 시간 0.000083초 이하로 실시간 데이터를 취득하고 있는지 확인하는 방향으로 시험에 대한 기준을 정립하였다. 다음 그림 2.3.122는 당시 제 3자 인증 시험 진행을 위한 시스템의 설치 위치를 표현한 것이며, 다음 표 2.3.15는 당시에 개발제품과 동시에 장착한 상용화 계측기 정보이다.

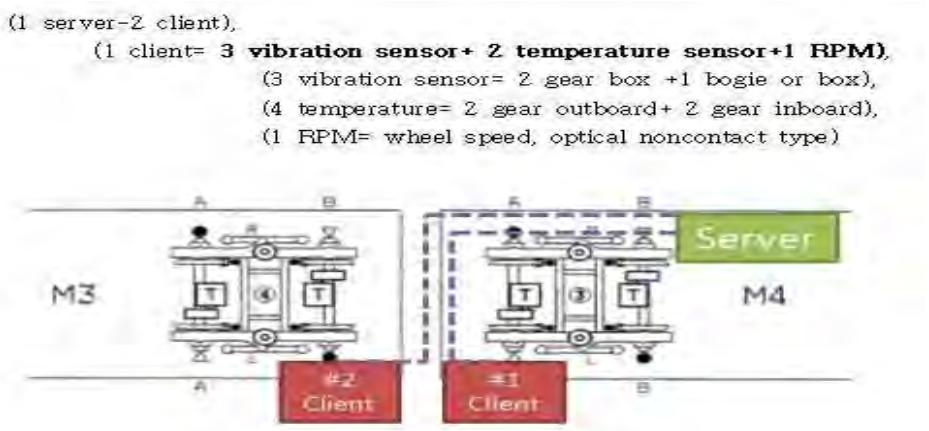



그림 2.3.122 제 3자 인증 시험 시스템 설치 개요도

표 2.3.15 제 3자 인증 시험 개발 제품 동시 설치 상용화 계측기

| 번호 | 계측기명 | 모델 NO. | S/N | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 가진기(shaker) | 9110D | 10321 | 2014-05-27 |
| 2 | FFT Analyzer | CSI 2140 | B2140130162 | 2013-07 |
| 3 | Online Monitor system | CSI 6500 | C51001C5 | - |
| 4 | 적외선 온도계 | Raytek Raynger ST | 2230950101-0006 | 2010-11-02 |

(가) 진동 모니터링 성능 시험 방법

시험 진행에 앞서 진동 모니터링 성능 시험 방법에 대하여 다음과 같이 정리를 하였다.

① 데이터 샘플링 (Data sampling)

- 진동 모니터링시스템은 실시간 진동신호를 취득 시 12kHz이상의 샘플링 주파수(6 kHz이상의 최대주파수, 0.000083초 이하의 샘플링시간)로 측정하여야 한다.
- 시험방법은 개발자 시스템에서 샘플링 시간 0.000083초 이하로 실시간 데이터를 취득하고 있는지 확인한다.

② 진동 측정 정밀도

- 진동 모니터링 시스템을 통한 측정된 데이터는 정확해야 하며 최소오차를 확보하여야 한다. 진동 측정 정밀도 시험은 절대치 비교시험과 상대치 비교시험으로 구분한다.
- 절대치 비교시험은 열차가 출발 전 시스템에 기 부착된 가속도 센서와 동일한 감도의 센서가 부착된 가진기(Shaker)를 통해 일정 주파수의 1G rms 값을 발생시킨 다음, 진동 모니터링 시스템 서버에서 측정된 결과를 읽고 비교한다.
- 상대치 비교시험은 열차가 출발 전 시스템에 기 부착된 가속도센서와 동일한 감도의 센서가 부착된 가진기(Shaker)를 통해 일정 주파수의 1G rms 값을 발생시킨 다음, 상용 진동 FFT analyzer를 통해 측정된 rms값을 읽어 진동 모니터링 시스템 서버에서 측정된 결과와 비교한다.

③ 실시간 감시 파라미터 표시기능 및 저장기능 시험 (Realtime data acquisition & saving)

- 운행 상태에서 소프트웨어는 각 측정 포인트의 진동감시파라미터(RMS, Kurtosis, BPFI, 1X, Peak, Crest factor등)를 메뉴에서 확인할 수 있어야 하며 실시간으로 변동 표기(Trending) 및 저장 해주어야 한다.
- 시험방법으로는 T-GMS 소프트웨어 실행 후 Main 화면과 Vibration화면에서 모두 확인하여 센서가 설치된 각 항목(6개 감속기 및 대차 진동채널)의 데이터가 1초에 한 번 간격으로 변동 표기되어야 한다. 또한 이를 시스템을 정지할 때까지 지속적으로 확인하여 정상여부를 판단하고 시스템이 저장된 폴더에 저장된 데이터를 확인한다. (데이터 저장 폴더- Server// KTX gear data /날짜별 폴더)

④ 감시 파라미터 정확도 시험 (Parameter reliability)

- 운행되고 있는 상태에서 각 측정 포인트의 주요 진동 감시파라미터(RMS, Kurtosis)는 올바른 값을 표시해 주어야 한다.
- 시험방법은 실제 운행 중인 상태에서 취득한 데이터를 상용 모니터링시스템과 동시에 측정한 후 결과 분석 값을 비교한다. 즉, 상용시스템은 본 시스템과 동일한 진동가속도 센서를 사용하

는 위치를 선정하여 본 시스템과 동일한 진동 신호(Raw data)를 일정속도구간 1분간 저장하여 후 연산 결과를 서로 비교한다. (상용시스템의 Raw data 저장 후 RMS, Kurtosis를 분석한 후 평균치를 비교함)

⑤ 이상상태 신호발생(Alert, Alarm) 시험

- 운행되고 있는 상태에서 각 측정 포인트의 주요 진동감시파라미터(RMS, Kurtosis)는 올바른 주의(Alert) 및 위험(Warning) 신호를 발생, 표시해 주어야 한다.
- 시험방법은 주행 중 현재 상태가 이상신호를 발생하지 않을 경우, 현재 취득하고 있는 신호를 일정 포인트에 한해 임의적으로 증폭시켜 이상신호가 발생하는 상태를 재현한다. 이때 증폭시킨 상태 결과 값이 주의일 경우 '주황색', 위험일 경우 '빨강색'으로 모니터링에 이상상태를 표기되어 구별할 수 있어야 한다.

⑥ 대차 진동측정 및 저장 기능 시험(Bogie data saving)

- 대차 진동 실시간 측정 및 저장은 Server에 지정된 저장 폴더에서 시간과 파일의 유무 검사로 이를 확인한다. (데이터 저장위치- Server// KTX gear data /날짜별 폴더)

다음 표 2.3.16은 진동 알람 기준 설정 값이다.

표 2.3.16 진동 알람 기준 값 설정 내용

<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th colspan="2">검사 항목</th></tr>
<tr><th>측정 기준값 범위</th><th>상태</th></tr>
<tr><td rowspan="4">1) 첨도<br>(Kurtosis)</td><td>0 - 3</td><td>정상</td></tr>
<tr><td>10 이상</td><td>주의 (alert)</td></tr>
<tr><td>50 이상</td><td>위험 (warning)</td></tr>
<tr><td colspan="2">• 첨도 데이터 값이 3 이상으로 1분 이상 지속 발생 시 주의(alert) 신호가 화면에 표시한다.<br>• 첨도 데이터 값이 50 이상으로 1분 이상 지속 발생 시 위험 (warning) 신호가 화면에 표시한다.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">2) RMS</td><td>2배 미만</td><td>정상</td></tr>
<tr><td>2배 이상</td><td>주의 (alert)</td></tr>
<tr><td>5배 이상</td><td>위험 (warning)</td></tr>
<tr><td colspan="2">• RMS 데이터 값이 평균 2배 이상으로 1분 이상 지속 발생 시 주의(alert) 신호가 화면에 표시한다.<br>• RMS 데이터 값이 평균 5배 이상으로 1분 이상 지속 발생 시 위험 (warning) 신호가 화면에 표시한다.</td></tr>
</table>

(나) 온도 모니터링 성능 시험 방법 (Performance test for Temperature)

① 자가진단 기능시험

- 센서 및 시스템의 정상작동 여부를 자기 진단하는 것으로서 센서의 단선 및 단락 시 표시를 해주는 자가진단 기능을 갖추고 있어야 한다.
- 시험방법은 열차 운행 전, 임의의 채널에 있는 센서를 Client 단자에서 단선시켜 놓은 후, 시스템 소프트웨어에서 이 현상이 표시(온도 표시부가 회색으로 표시)되는지 확인한다.

② 데이터 샘플링(Data sampling)

- 실시간 진동신호를 취득 시 1Hz이상의 샘플링 1초 이하의 샘플링시간으로 측정하여야 한다.
- 시험방법은 소프트웨어에서 1초 이내의 간격으로 데이터를 변동 표시해 주는지 확인한다.

③ 온도 측정 정밀도(Accuracy)

- 측정된 진동 모니터링 시스템을 통한 데이터는 정확해야하며 최소오차 ±1도 이내에 있어야 한다.
- 시험방법은 열차가 출발 전, 부착된 온도센서와 동일한 위치에 표면 적외선 온도계측기에서 읽은 값과 본 시스템의 소프트웨어에서 이를 읽어 비교한다.

④ 실시간 표시기능 및 저장기능 시험

- 운행되고 있는 상태에서 소프트웨어는 각 측정 포인트의 온도신호를 메뉴에서 확인할 수 있어야 하며 실시간으로 변동표기(Trending) 및 저장 해주어야 한다.
- 시험방법으로는 T-GMS 소프트웨어의 작동 후 Main화면과 Temperature창에서 모두 확인하여 센서가 설치된 각 항목(4개 온도채널)의 데이터가 1초에 한 번 간격으로 변동 표기되어야 한다. 또한 이를 시스템을 정지할 때까지 지속적으로 확인하여 정상여부를 판단하고 시스템이 저장된 폴더에 저장된 데이터를 확인한다. (데이터 저장위치 - Server// KTX gear data / 날짜별 폴더)

⑤ 이상상태 신호발생(Alert, Alarm) 시험

- 운행되고 있는 상태에서 각 측정 포인트의 온도신호는 과도한 온도상승이 발생하였을 경우 주의(Alert) 및 위험(Warning) 신호를 발생, 표시해 주어야 한다.
- 시험방법은 주행 중 현재 상태가 이상신호를 발생하지 않을 경우, 현재 취득하고 있는 신호를 일정 포인트에 한해 임의적으로 증폭시켜 이상신호가 발생하는 상태를 재현한다. 이때 증폭시킨 상태 결과 값이 주의일 경우 '주황색', 위험일 경우 '빨강색'으로 모니터링에 상태를 표기되어 구별할 수 있어야 한다.

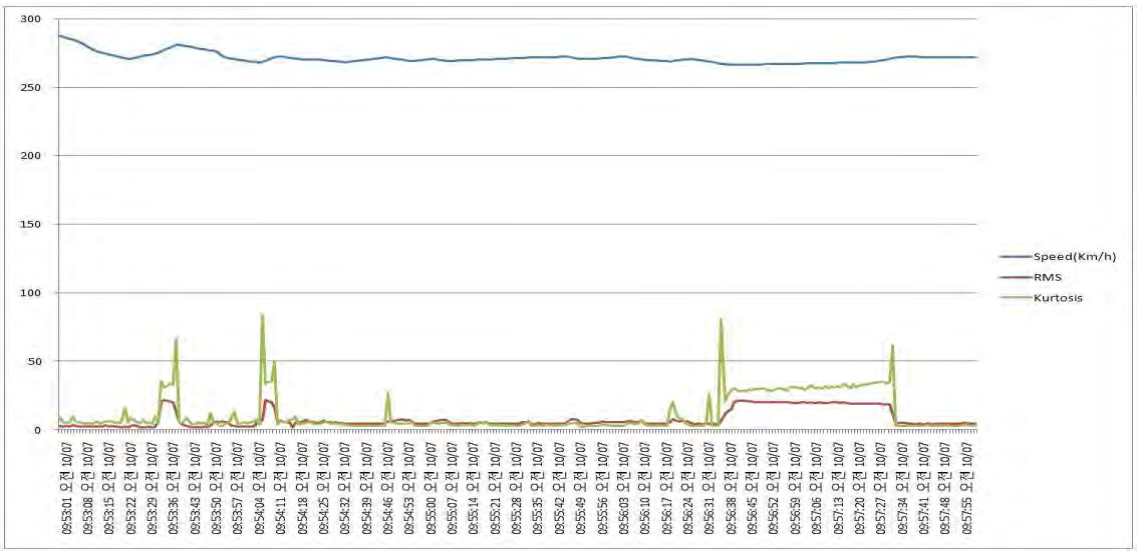
다음 표 2.3.17은 온도 알람 기준에 대한 설정 내용이다.

표 2.3.17 온도 알람 기준 설정

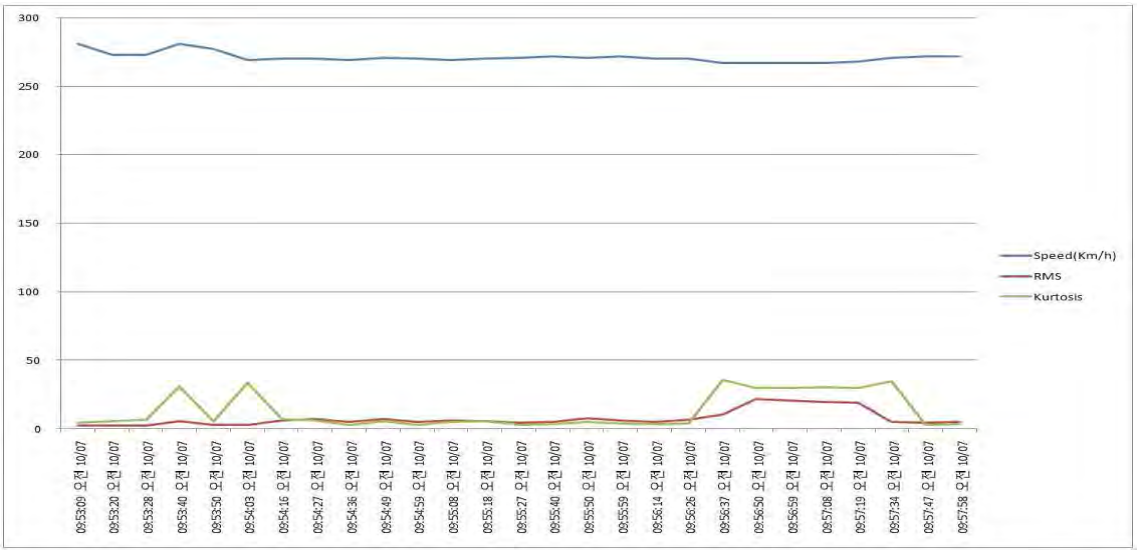
| 구분 | 검사 항목 | |
|---|---|---|
| | 온도 기준값 | 상태 |
| 감속기 케이싱 온도 | 주위 온도 + 90℃ | 주의 (alert) |
| | 주위 온도 + 100℃ | 위험 (warning) |
| | • T-GMS의 감속기 케이싱 이상 온도 기준 값에서 주의 구간을 주위 온도 + 90℃이상일 때 주의(alert) 신호를 화면에 표시한다.<br>• T-GMS의 감속기 케이싱 이상 온도 기준 값에서 주의 구간을 주위 온도 + 100℃이상일 때 위험 (warning) 신호를 화면에 표시한다. | |

(다) 시험 결과

시험 결과 개발 제품과 상용제품의 데이터 취득 경향은 매우 유사한 형태로 취득이 되는 것을 확인할 수 있었다. 다음 그림 2.3.123은 시험을 진행 하면서 취득된 데이터의 경향그래프에 대한 내용이며, 표 2.3.18은 취득 데이터의 결과를 정리한 것이다.




① 개발 제품 데이터 취득 경향




② 상용품 제품 데이터 취득 경향

그림 2.3.123 성능 시험 데이터 취득 경향

표 2.3.18 측정 데이터 평균값 비교

| 구분 | 상용품 데이터 평균 | 개발품 데이터 평균 | 데이터 오차율 |
|---|---|---|---|
| RMS | 7.42 | 7.80 | -5.12 |
| Kurtosis | 12.42 | 11.32 | 8.87 |

다음 그림 2.3.124는 대차 진동 저장 내용이다.

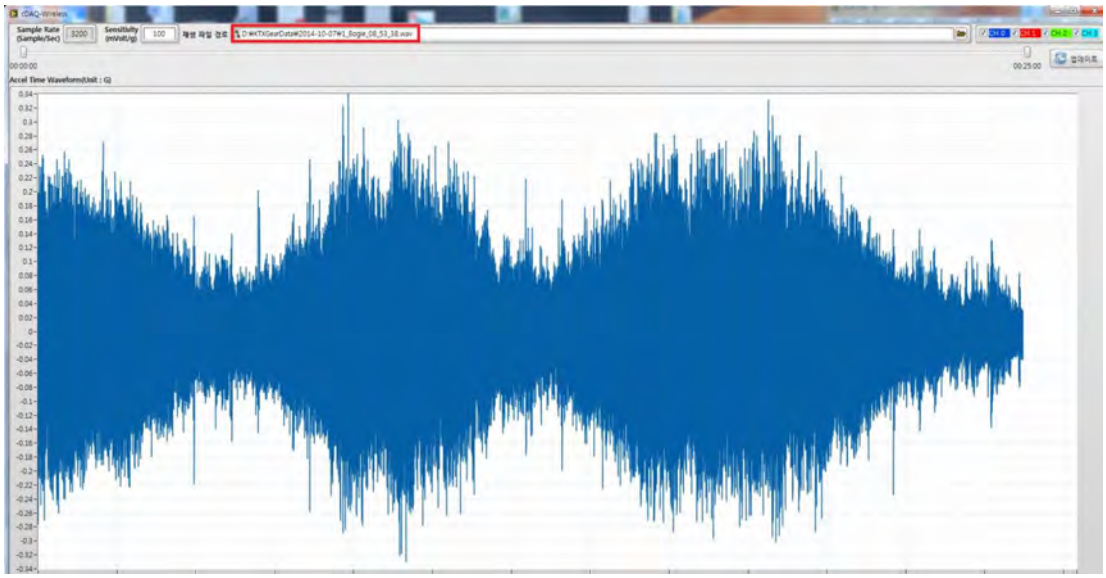


그림 2.3.124 개발 제품 대차 진동 저장 파형

타. 소프트웨어 추가 검증 작업

(1) 데이터 수집 검증 작업

소프트웨어 검증 작업으로 설정한 함수 블록화 설계 내용으로 소프트웨어 데이터 수집테스트를 진행하였다. 그림 2.3.125와 같이 12시간 데이터 수집 구동 진행시에 전혀 문제가 발생하지 않았다. 기존에 작성해둔 S/W 소스를 2차 년도 추가 구매한 C Rio에 포팅작업 하여 실차 시험 진행시 LMS 측정 장비에서 취득한 데이터를 활용하여 설계된 소프트웨어를 통하여 파라미터 주파수 추적 관련 검증을 실시하였으며 다음 그림 2.3.126과 같이 결과 값으로 만족할 수준의 성능을 확인할 수 있었다.

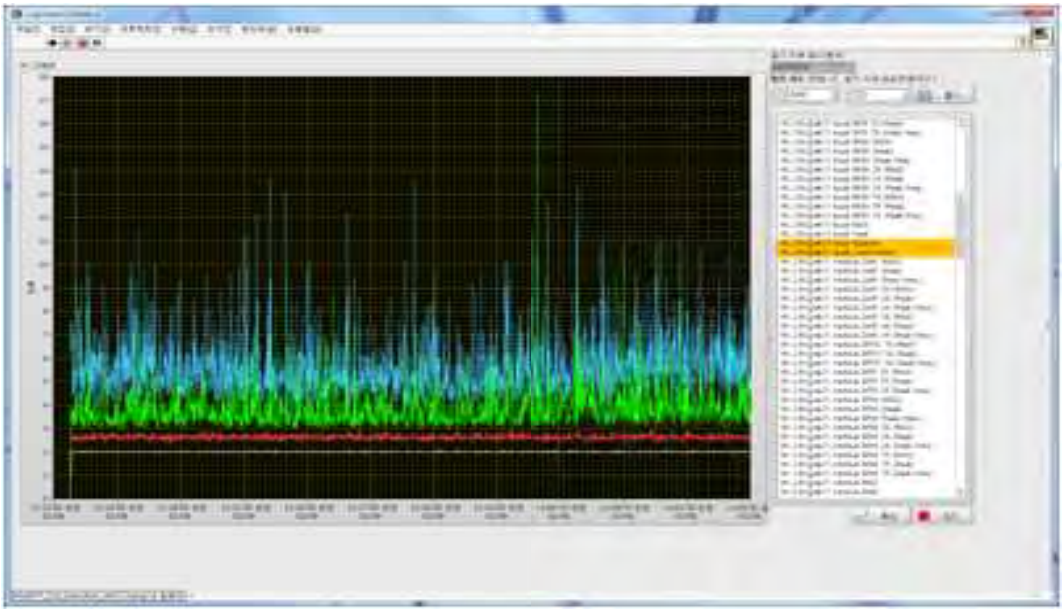


그림 2.3.125 데이터 수집 시험 진행 화면

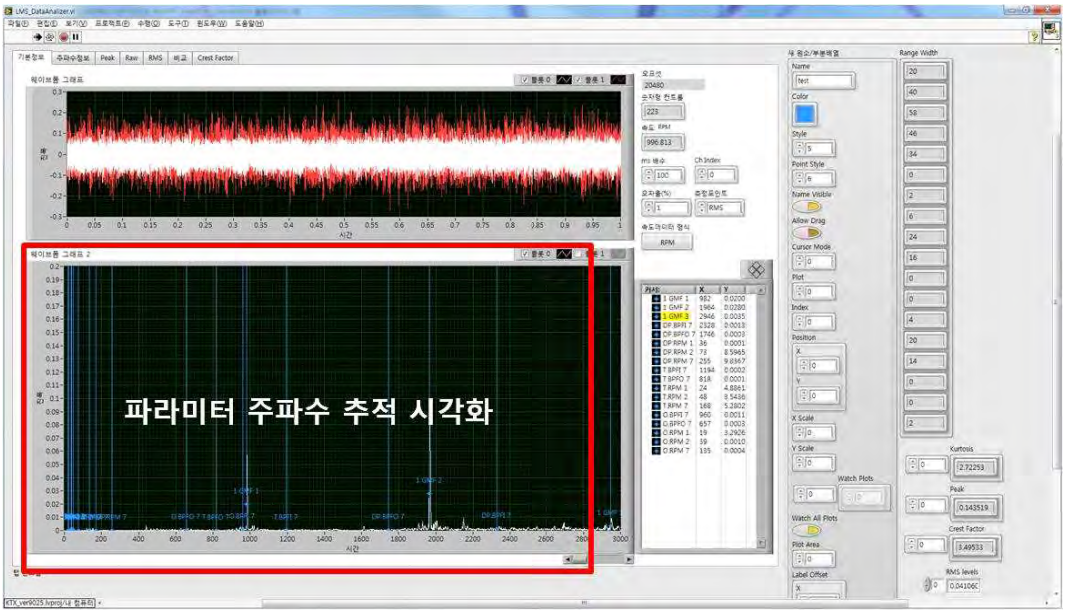



그림 2.3.126 주파수 추적 검증 (1)

그림 2.3.127은 LMS 측정 데이터 주파수 추적을 통하여 파라미터 주파수의 상하 1% 범위 내에서 Peak, RMS를 추출하고 Raw값을 추출하여 개발 소프트웨어에 적용을 하여 3가지 값을 시각화한 Chart를 확인한 결과이다. 측정 결과는 추출된 데이터가 소프트웨어에서 무리 없이 구현이 되는 결과 값을 확인할 수 있었다. 소프트웨어의 세밀한 검증을 위하여 1초 동안의 진동파형을 이용하여 RMS, Peak, Crest Factor, Kurtosis 값을 추출한 후 데이터 비교 분석 작업을 진행 하였다. 다음 그림 2.3.128은 데이터 비교 분석 내용으로 그림에서와 같이 각 진동 파형의 요소들이 유사한 파형을 그리면서 전개되는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 내용을 바탕으로 개발 소프트웨어의 성능 구현에 문제가 없다는 결론을 얻을 수 있었다.

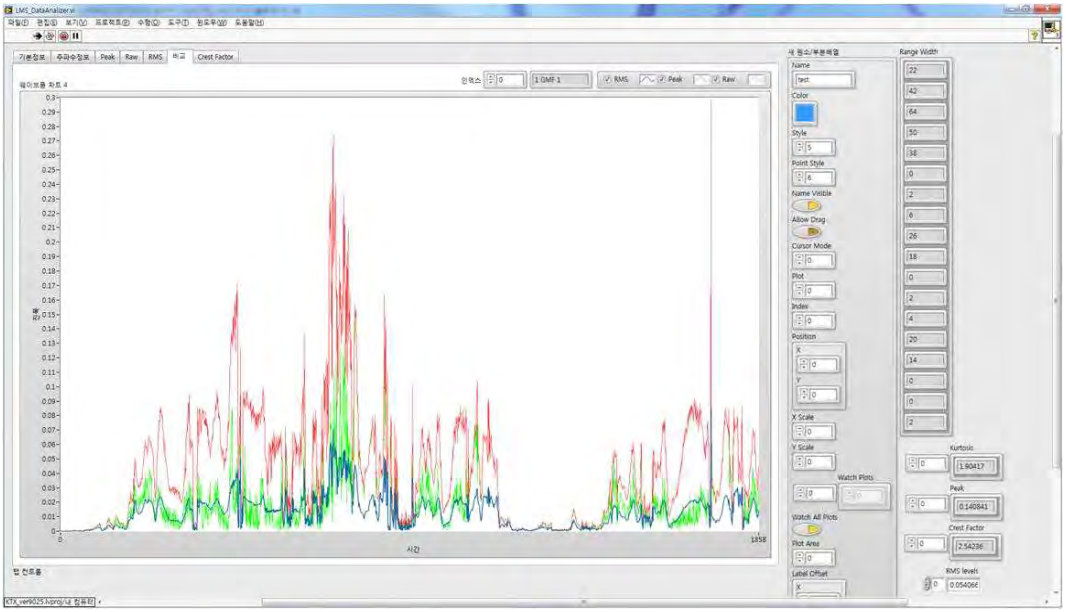


그림 2.3.127 주파수 추적 검증 (2)

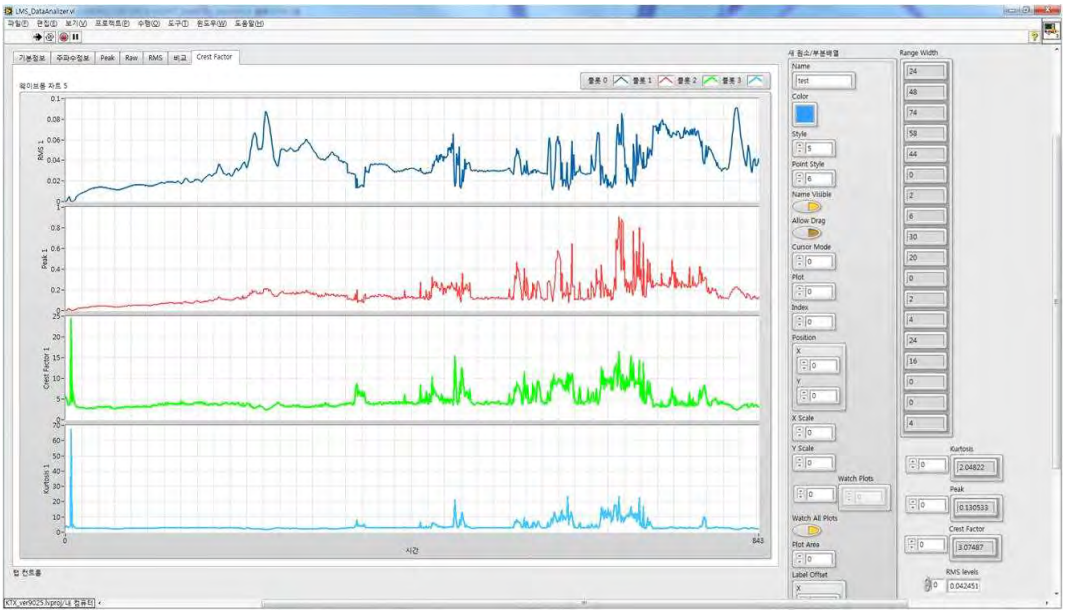


그림 2.3.128 주파수 추적 검증 (3)

파. KTX 실차 통합(진동, 윤활, 온도) 측정 시험 (2014년 12월)

(1) 시험의 개요

정비가 완료된 KTX의 대차에 최초로 통합(진동, 윤활, 온도)모니터링시스템을 가동 시험하였다. 본 시험의 목적은 개발된 감속기 모니터링 시스템의 성능 및 신뢰성을 시험하기 위한 것으로, 고속열차 운행 중 감속기에 발생하는 진동 및 온도, 윤활유의 상태를 측정, 모니터링하기 위한 동적 특성시험의 최종 실차 시험이었다. 계측 데이터는 속도별, 운행 구간별 진동, 온도, 윤활유 특성 분석 및 개발품의 신뢰성 검증자료로 활용하고자 하였으며 클라이언트를 장착하여 운행 시험을 진행하게 되었다.

❍ 시험일시 및 시험장소
- 시험일시 : 2014.12.22. ~ 12.24
- 시험장소 : 수도권 철도 차량 정비단 및 광명-부산 운행구간
- 실차시험 대상 : 고속열차 (KTX)

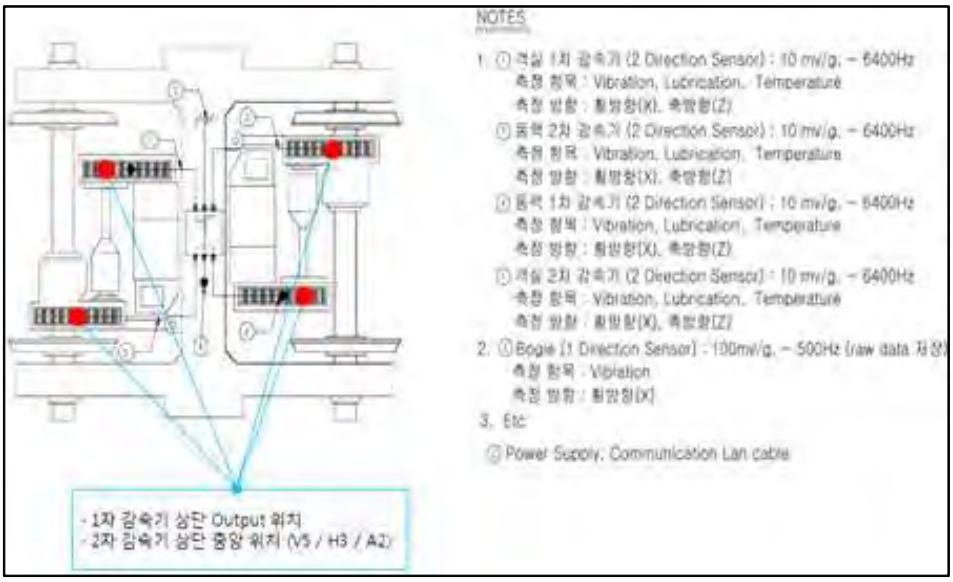
❍ 시험방법
- 고속철도 운행 시 감속기에서 발생하는 데이터 계측
- 대상 : 동력대차 감속기 (대차 2세트)
- 방법 : 감속기에 센서(진동, 온도, 윤활 센서)를 설치하고, 대차에 클라이언트, 차량 내에 서버를 설치한 후 운행 시 계측
- 경부선 또는 호남선, 3일간 계속 왕복 시험 수행
- 수집된 데이터를 활용하여 속도별, 구간별 진동/온도/윤활 특성 분석
- 모니터링시스템의 성능 및 신뢰성 검증을 위하여 약 3회 시험 실시

❍ 계측 장비

표 2.3.19 계측장비

| 구 분 | 가속도계 | 온도센서 | 클라이언트/서버 |
|---|---|---|---|
| 모델명 | Accelerometer | Thermocouple | C-Rio/Sever |
| 형 상 |  |  |  |
| 비 고 | 5개/대차 | 4개/대차 (베어링커버 외부에 설치) | 2 set (대차)/1 Set (차량내 설치) |

○ 진동센서 설치위치(5개소/대차) : 감속기 케이스 및 대차

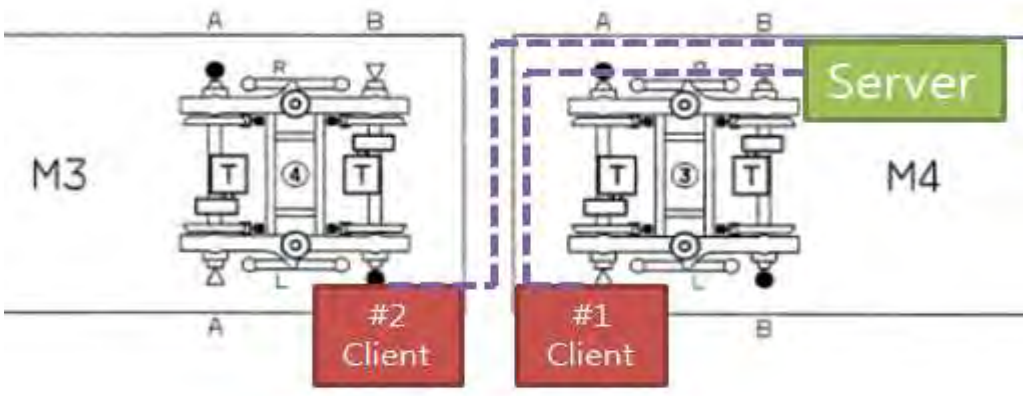



(2) 설치 위치

– 시스템 구성

고속열차용 감속기 모니터링 시스템은 아래와 같이 센서–클라이언트–서버 시스템으로 구성된다.

(1 server-2 client),
(1 client= 5 **vibration sensor+ 3 temperature sensor+ 2 lubrication sensor+ 2 RPM sensor**),
(5 vibration sensor= 4 gear box +1 bogie or box),
(3 temperature= 1 MRU+ 1 ARU+ 1 Air temp.),
(2 lubrication= 1 MRU+ 1 ARU),
(1 RPM= wheel speed, optical noncontact type)



(3) 시험항목 및 결과

(가) 시스템 설치

전체 시스템의 구성과 설치위치를 확인하고 시스템의 구성요소인 H/W와 S/W의 상태를 검사하며, 신뢰성(Reliability)과 안전성(Safety)에 입각하여 작성된 각 시험방법에 따라 검사한다.




그림 2.3.129 KTX 실차 시험 현장 사진

(나) 진동 모니터링시스템 성능 시험

전체 시스템(T-GMS) 중에서 진동 모니터링 시스템이 나타내고 있는 성능을 확인하고 신뢰할 수 있는 데이터를 축적하며 저장하고 있는지 확인한다. 신뢰성기반으로 작성된 세부항목을 각 시험 방법에 따라 시험한다.

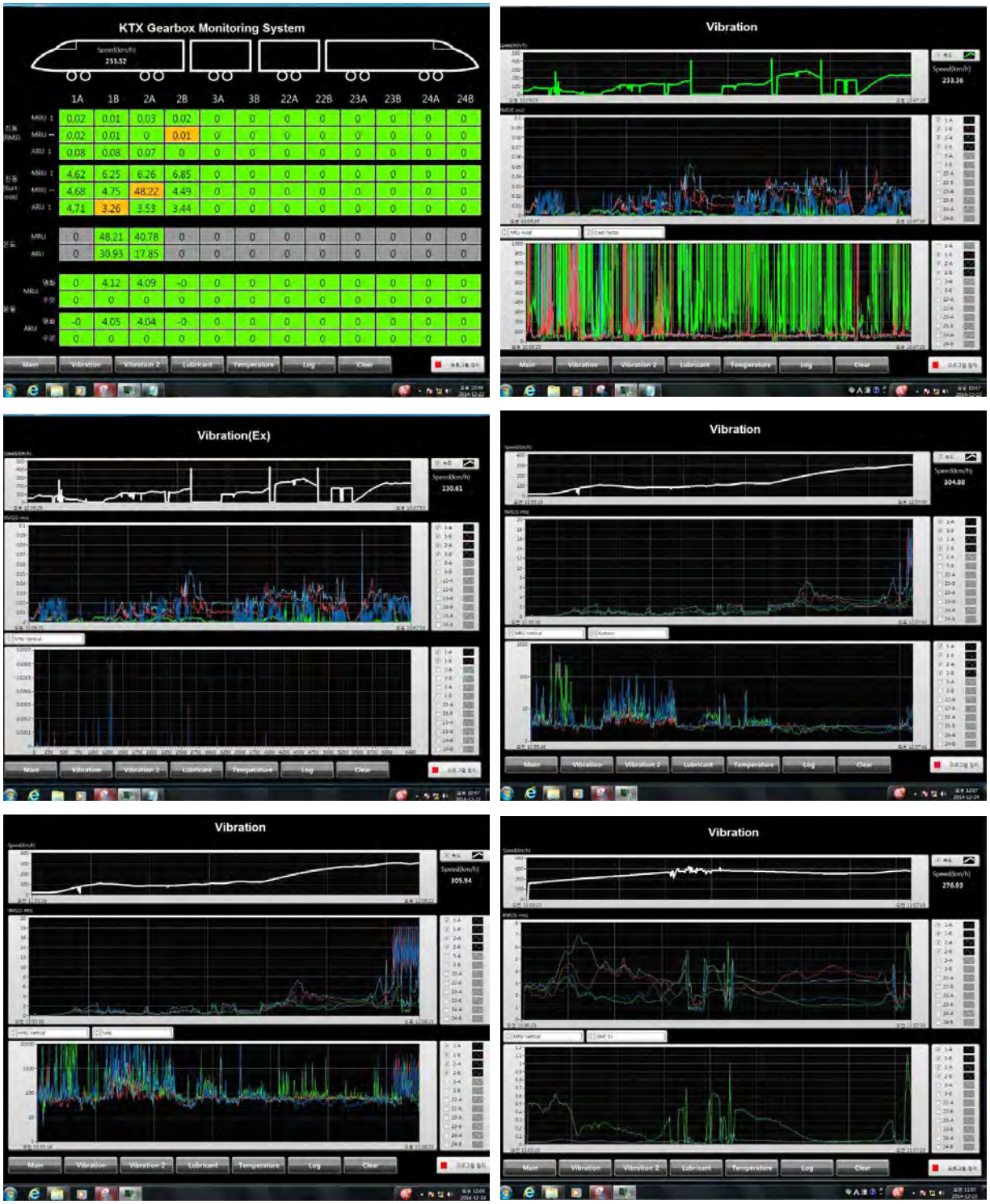



그림 2.3.130 KTX 실차 시험 현장 사진

(다) 온도 모니터링시스템 성능 시험

전체 시스템(T-GMS) 중에서 온도 모니터링 시스템이 나타내고 있는 성능을 확인되고 신뢰 할 수 있는 데이터를 축적하며 저장하고 있는지 확인한다(그림 2.3.131).

(라) 윤활유 모니터링시스템 성능 시험

전체 시스템(T-GMS) 중에서 윤활유 모니터링 시스템이 나타내고 있는 성능을 확인되고 신뢰할 수 있는 데이터를 축적하며 저장하고 있는지 확인한다(그림 2.3.132).




그림 2.3.131 KTX 실차 시험 현장 사진




그림 2.3.132 KTX 실차 시험 현장 사진

(마) 시험 결과 내용 요약

KTX 실차 성능 시험 결과를 살펴보면 Kurtosis와 NA6는 충격 등에 민감하게 반응하는 진동 Factor로서 주행하는 구간에서 발생하는 레일 충격에 의하여 높은 값들이 나타나는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 이유로 시스템 실차 성능 시험 결과 그래프에서는 전반적인 진동 변화 추이를 파악하기 어려운 면이 있어 진동 파라미터의 변화를 좀 더 쉽게 파악을 하기 위하여 Log 형태의 그래프를 적용하여 결과 그래프를 표현 하였다. 다음 아래의 그림 2.3.133 ~ 2.3.162는 KTX 실차 성능 시험 결과를 Log 형태의 그래프를 적용하여 표현한 그래프이다.

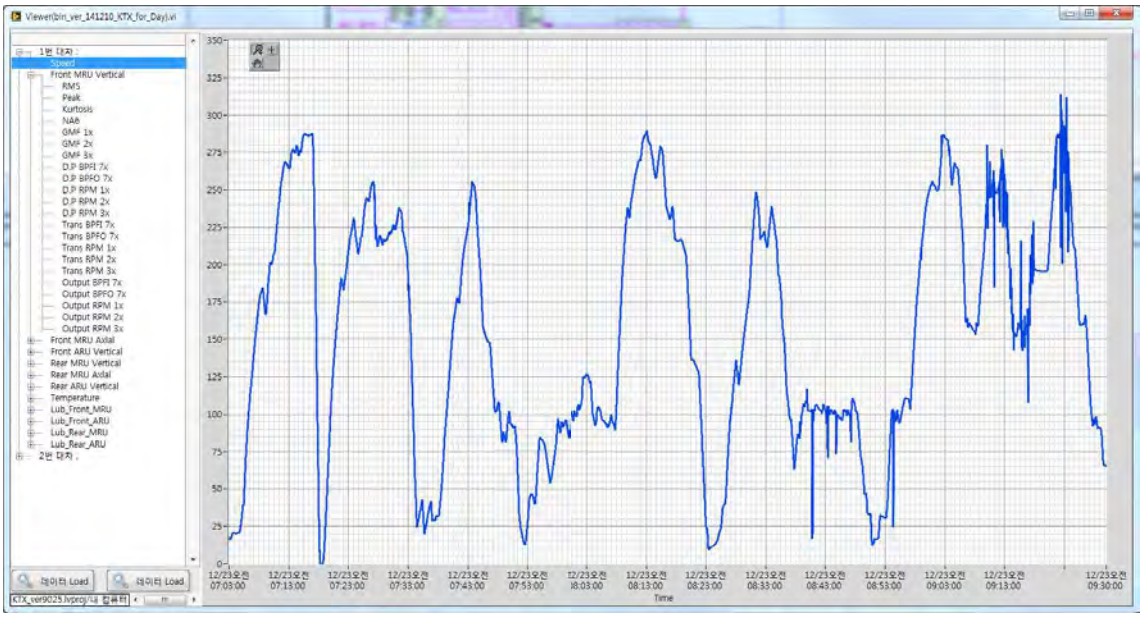


그림 2.3.133 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 속도 변화 측정 결과값

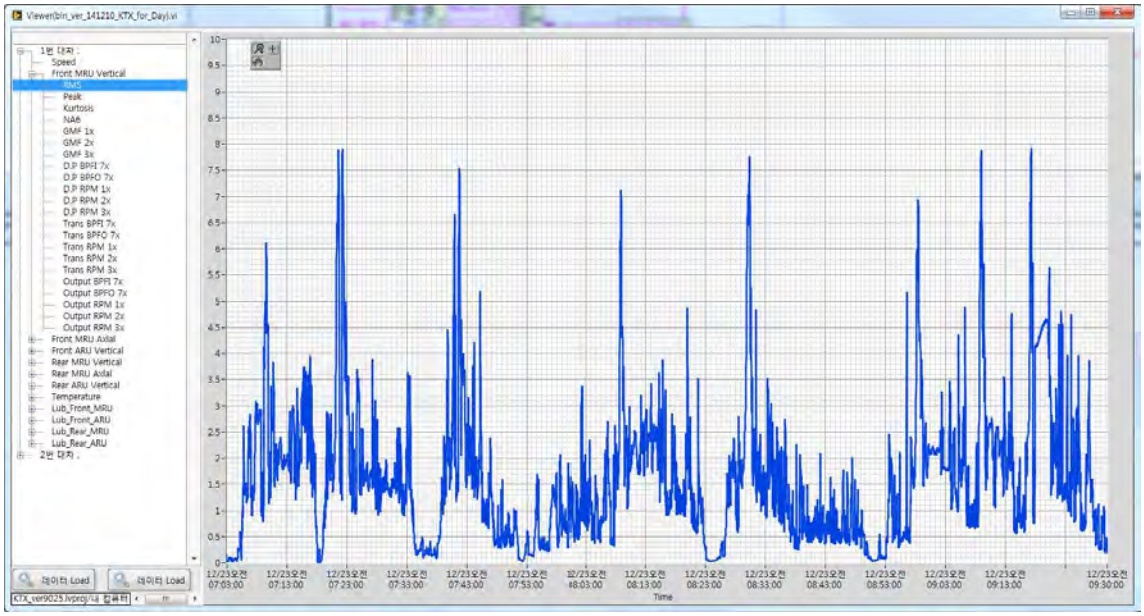


그림 2.3.134 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Vertical 축 RMS 변화 측정 결과값

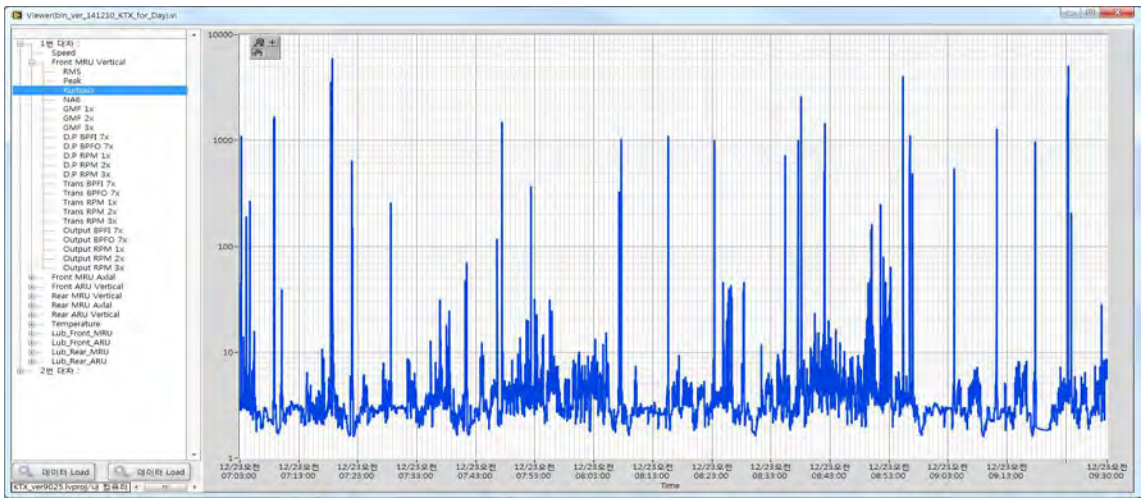


그림 2.3.135 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Vertical 축 Kurtosis 변화 측정 결과값

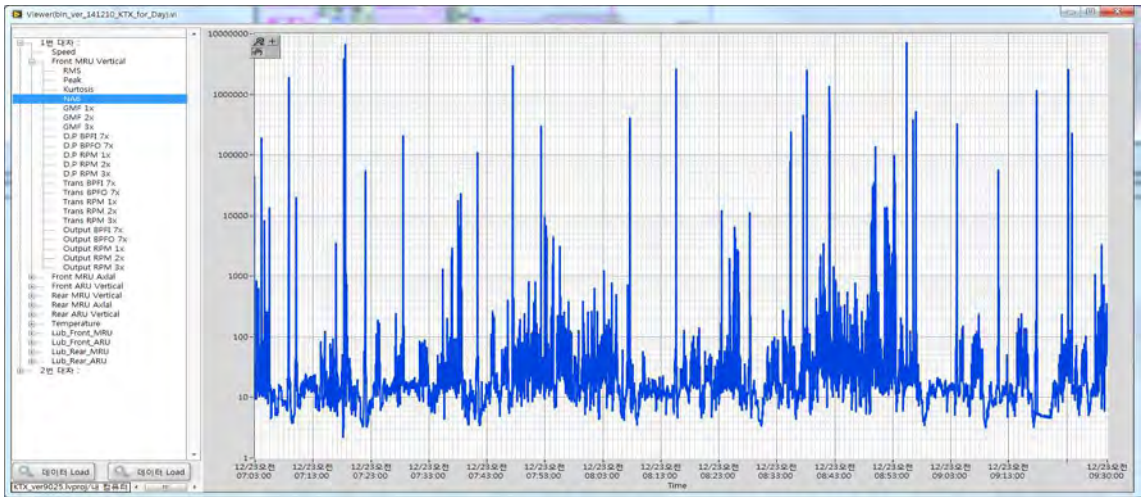


그림 2.3.136 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Vertical 축 NA6 변화 측정 결과값

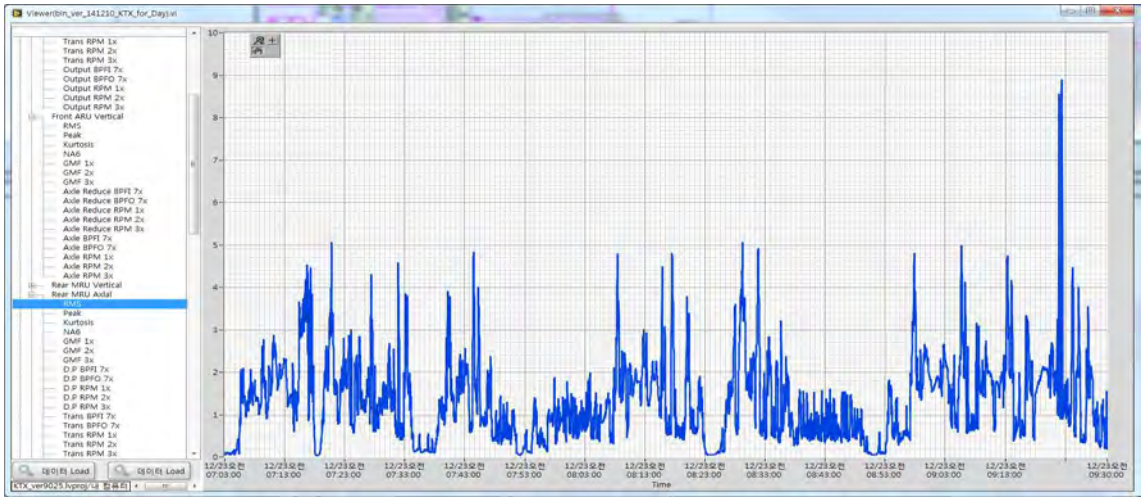


그림 2.3.137 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Axial축 RMS 변화 측정 결과값

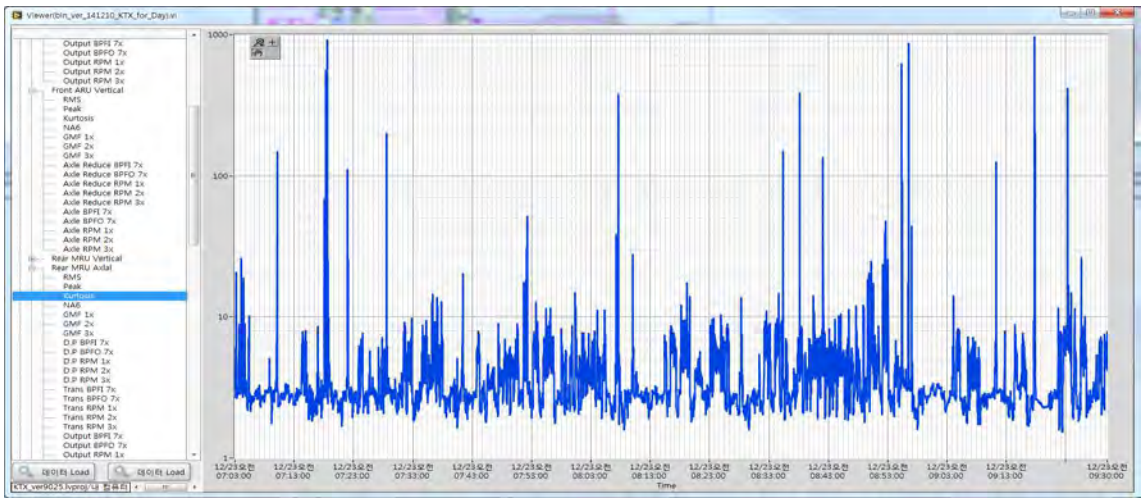


그림 2.3.138 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Axial축 Kurtosis 변화 측정 결과값

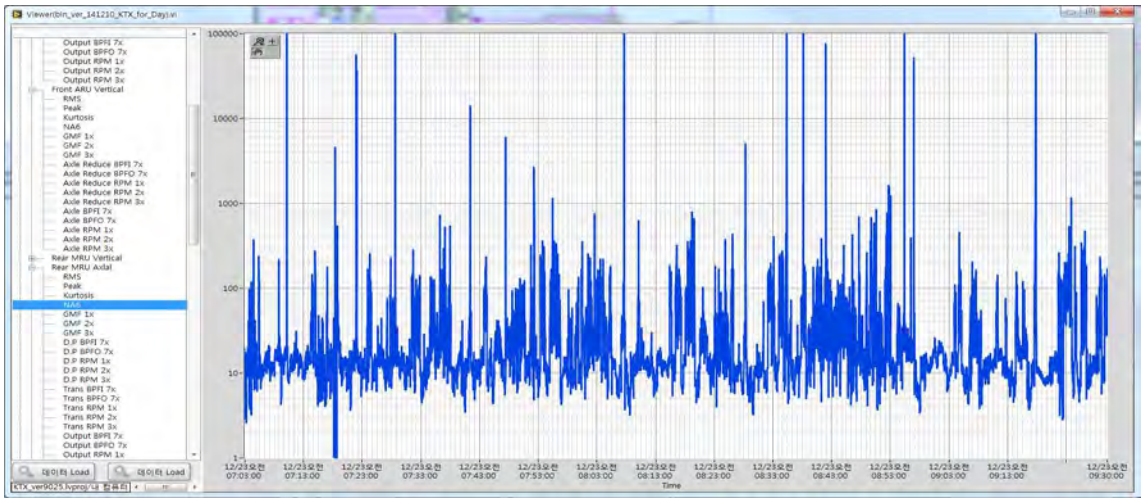


그림 2.3.139 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 MRU Axial축 NA6 변화 측정 결과값

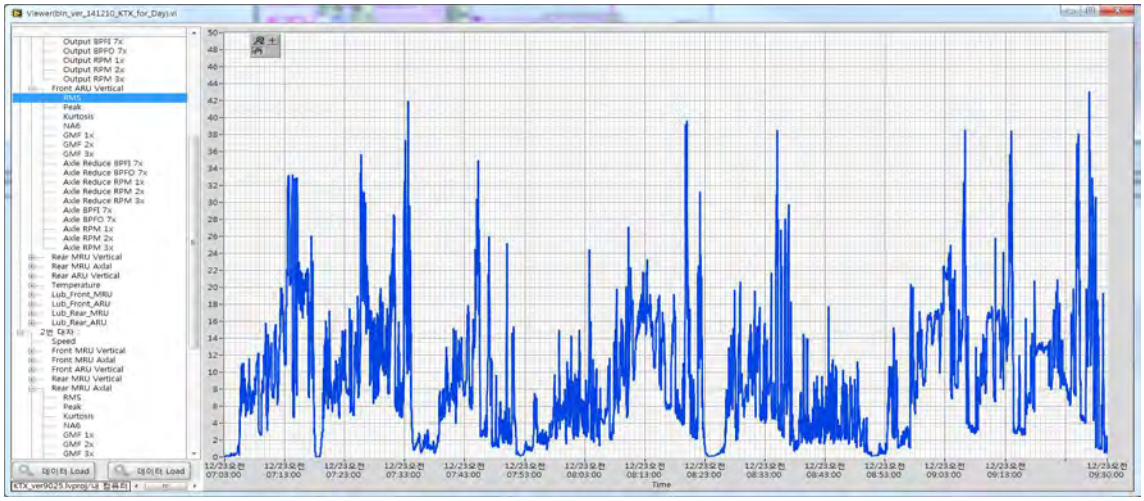


그림 2.3.140 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 ARU Vertical축 RMS 변화 측정 결과값

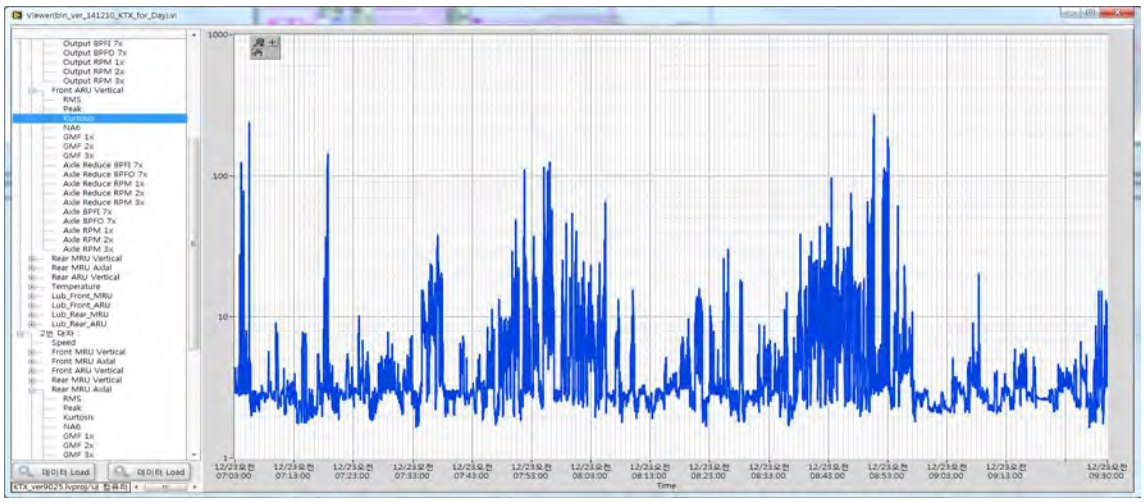


그림 2.3.141 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 ARU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과값

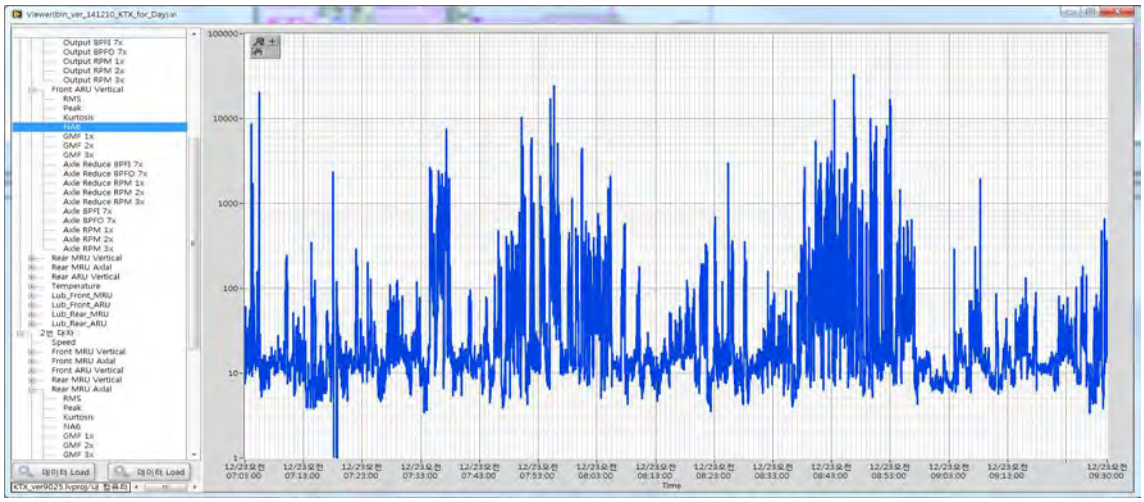


그림 2.3.142 KTX 실차 성능 시험 광명→부산 구간 ARU Vertical축 NA6 변화 측정 결과값



그림 2.3.143 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 속도 변화 측정 결과값

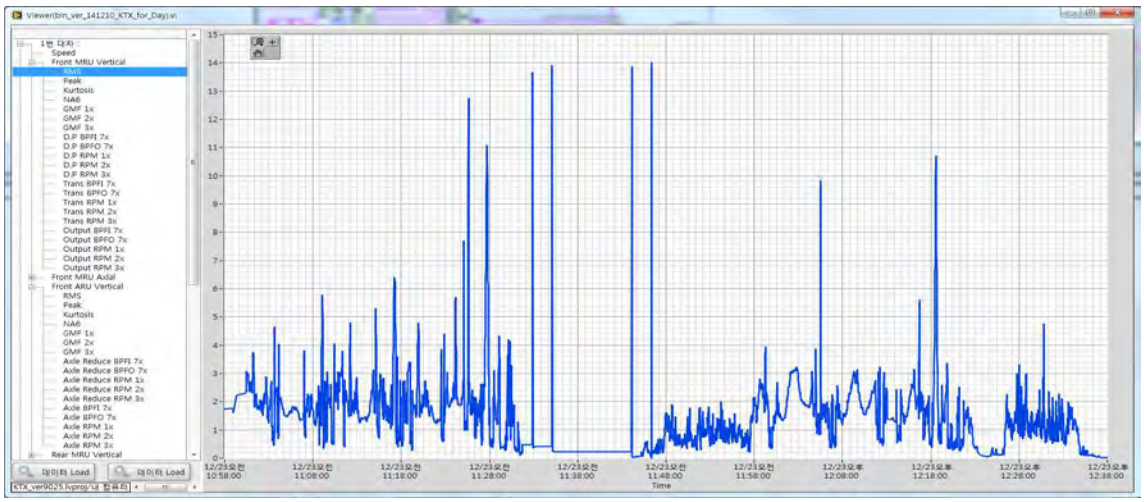


그림 2.3.144 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Vertical축 RMS 변화 측정 결과값

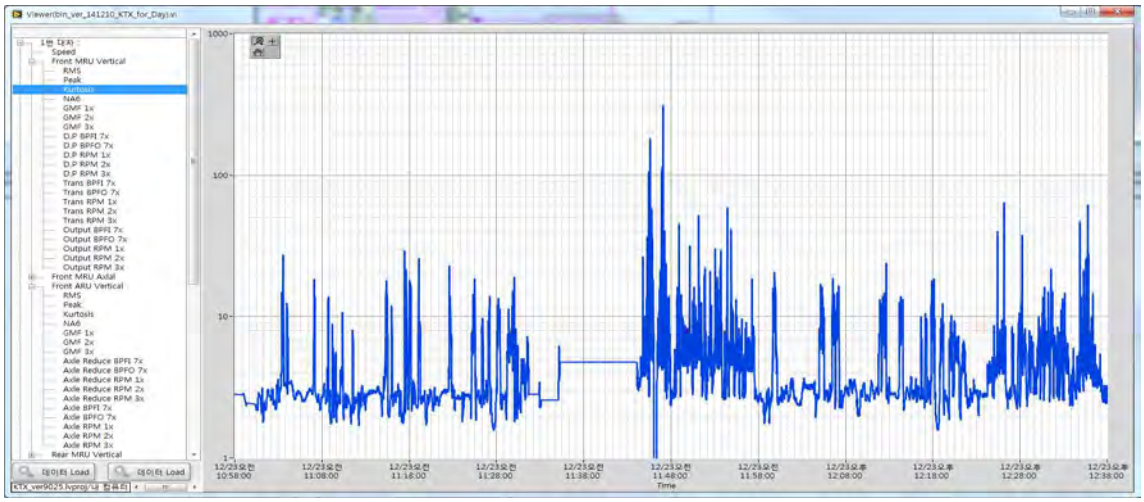


그림 2.3.145 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과값

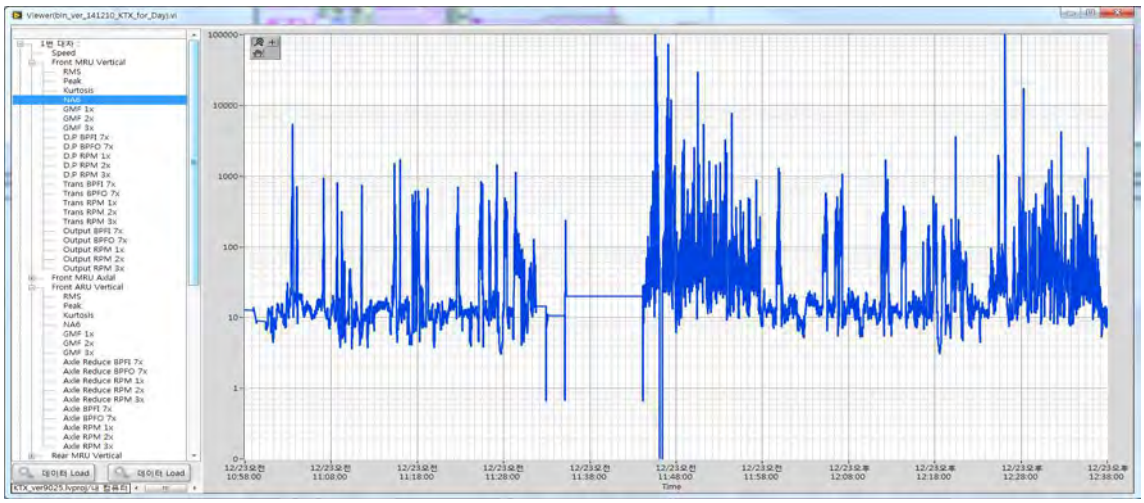


그림 2.3.146 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Vertical축 NA6 변화 측정 결과값

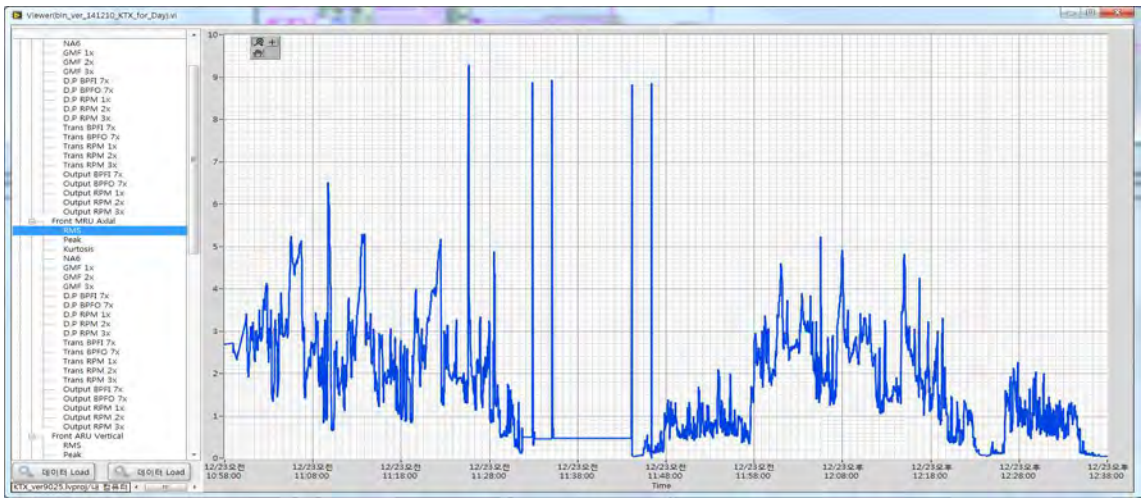


그림 2.3.147 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Axial축 RMS 변화 측정 결과값

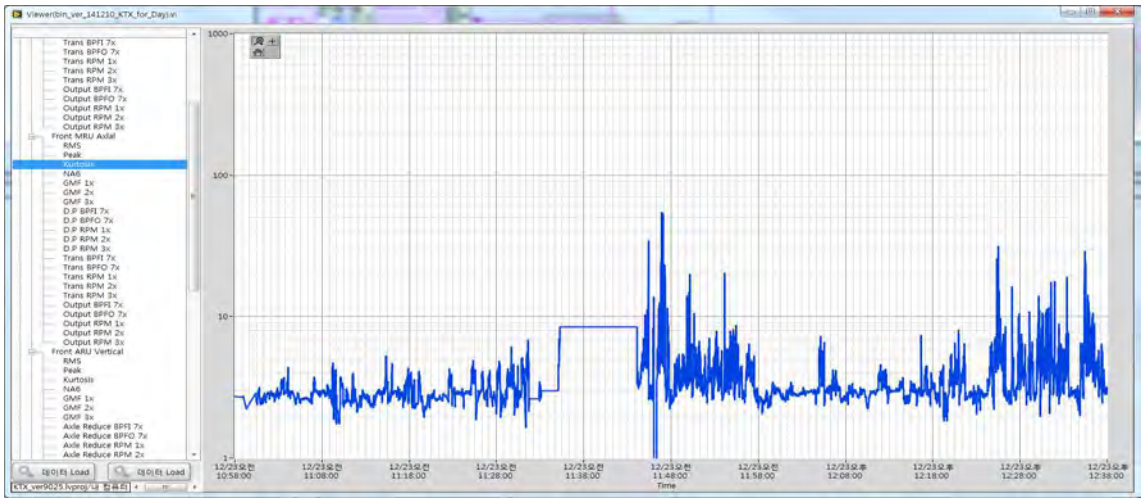


그림 2.3.148 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Axial축 Kurtosis 변화 측정 결과값

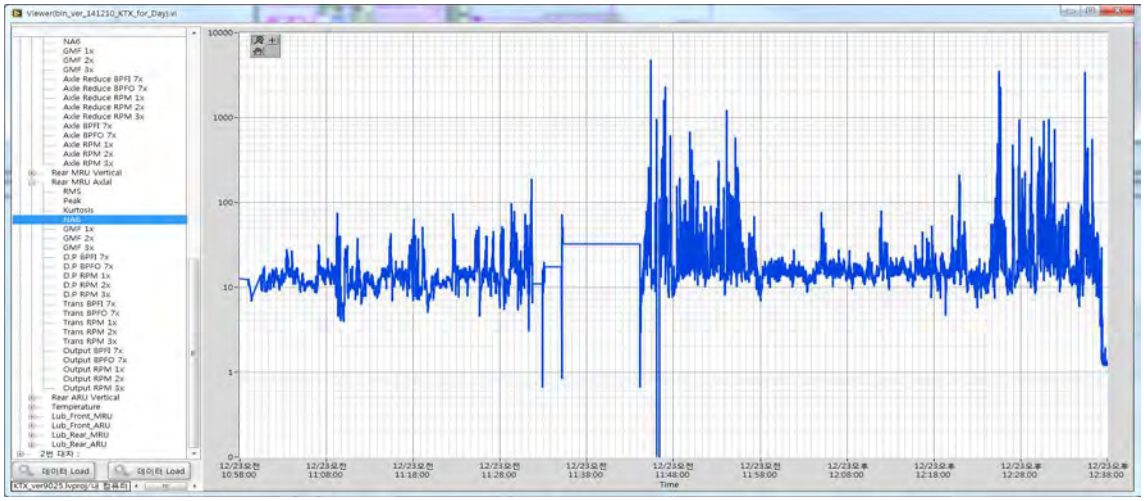


그림 2.3.149 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 MRU Axial축 NA6 변화 측정 결과값

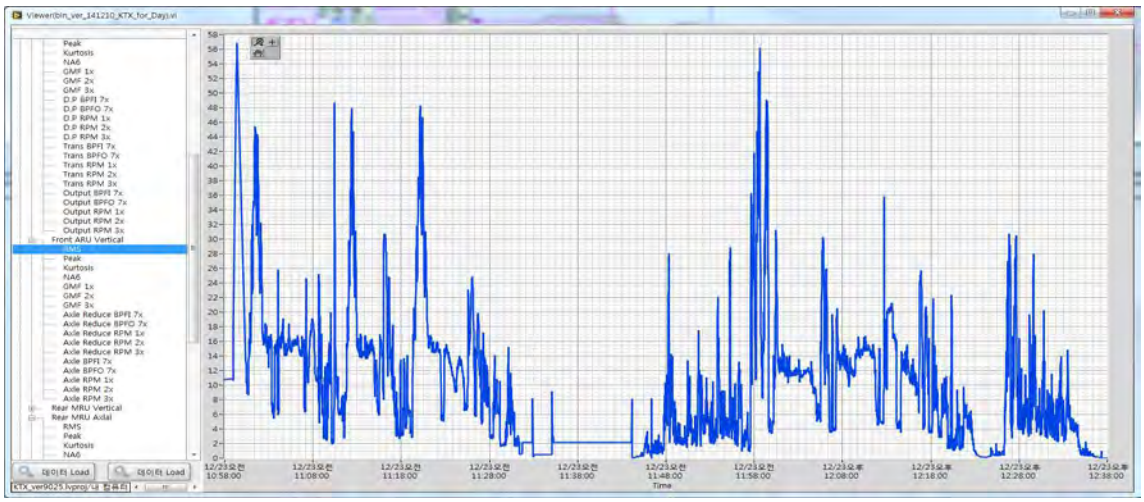


그림 2.3.150 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 ARU Vertical축 RMS 변화 측정 결과값

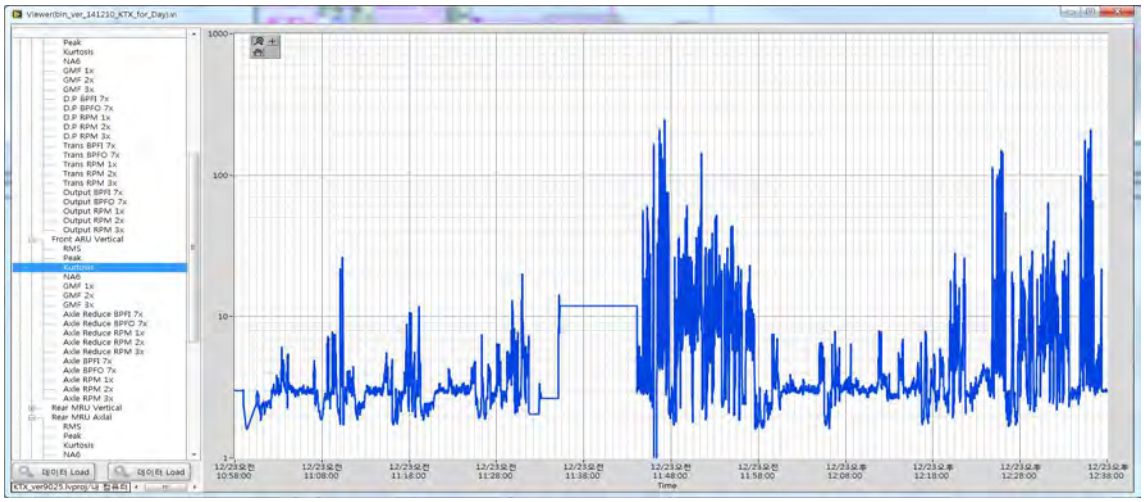


그림 2.3.151 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 ARU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과값

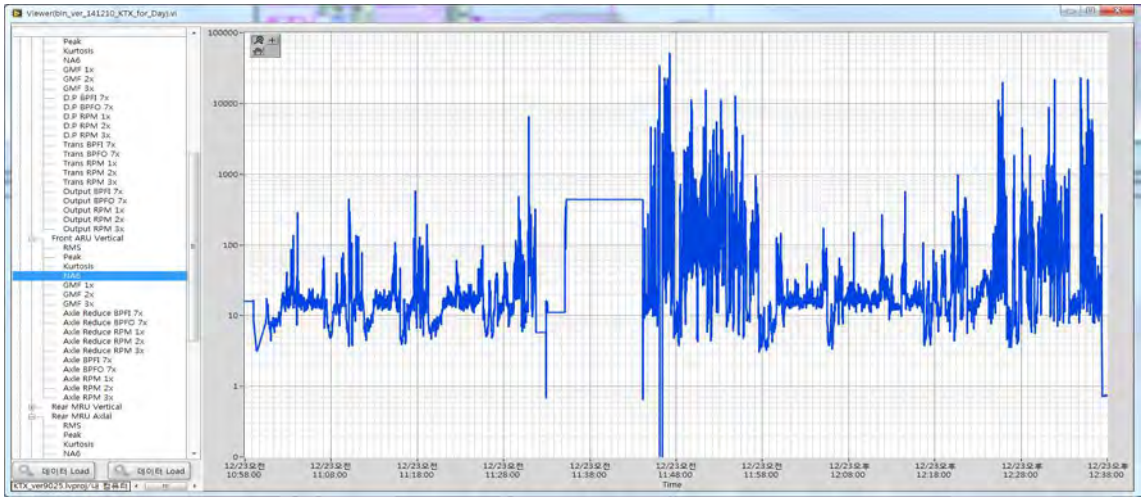


그림 2.3.152 KTX 실차 성능 시험 부산→대전 구간 ARU Vertical축 NA6 변화 측정 결과값

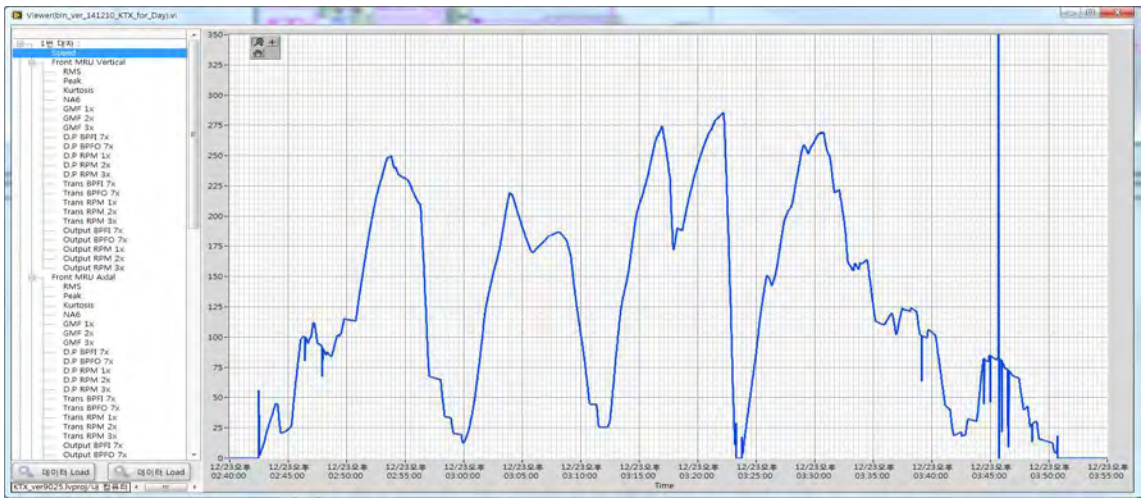


그림 2.3.153 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 속도 변화 측정 결과값

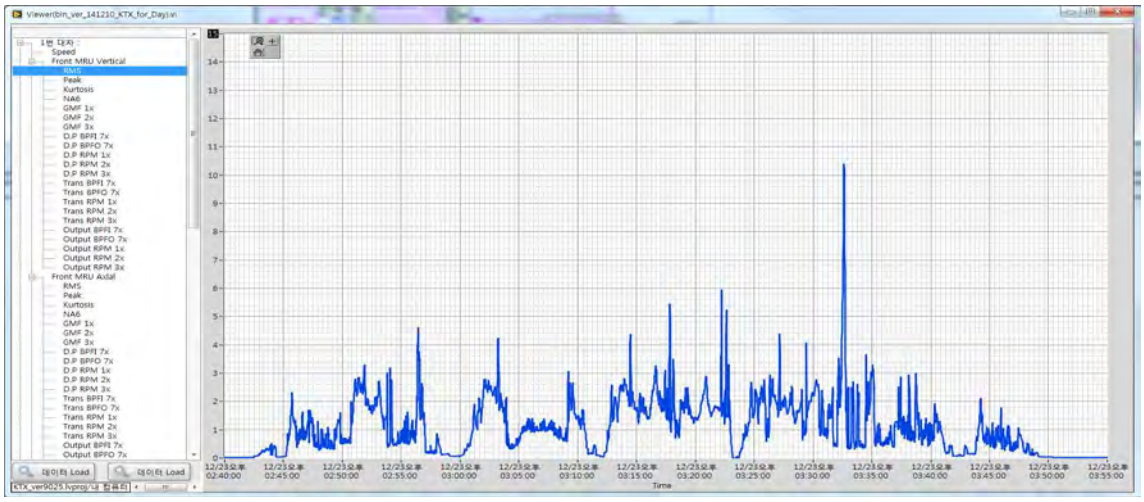


그림 2.3.154 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Vertical축 RMS 변화 측정 결과값

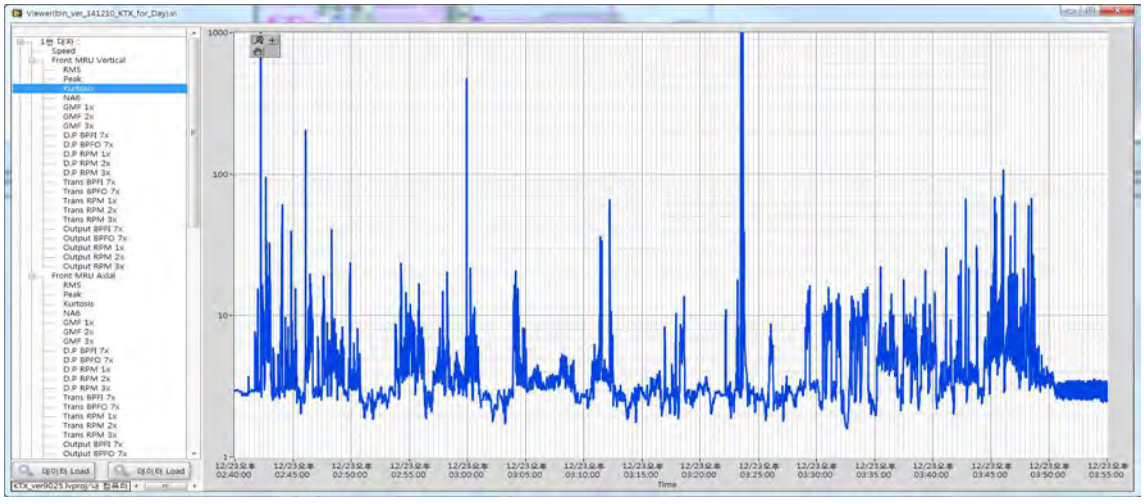


그림 2.3.155 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과값

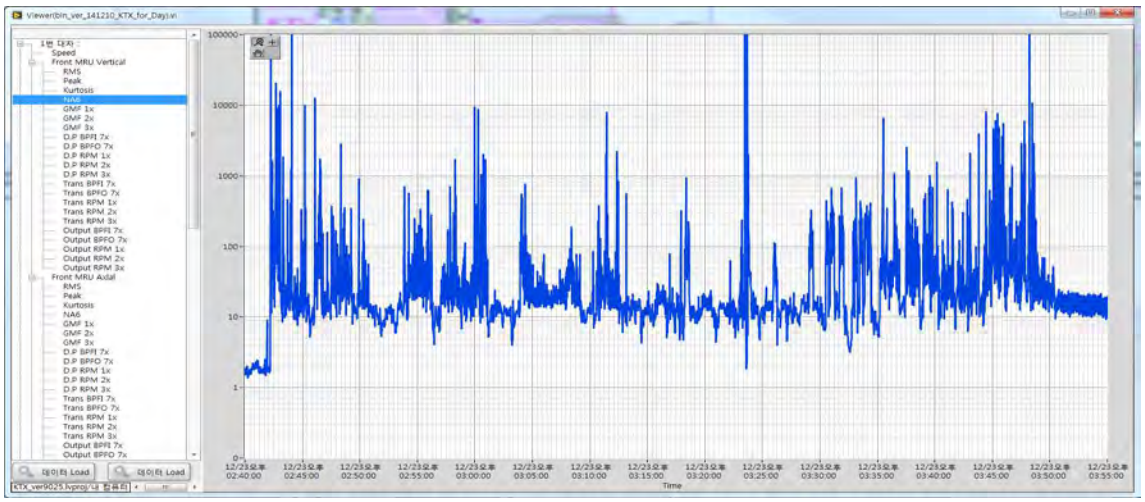


그림 2.3.156 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Vertical축 NA6 변화 측정 결과값

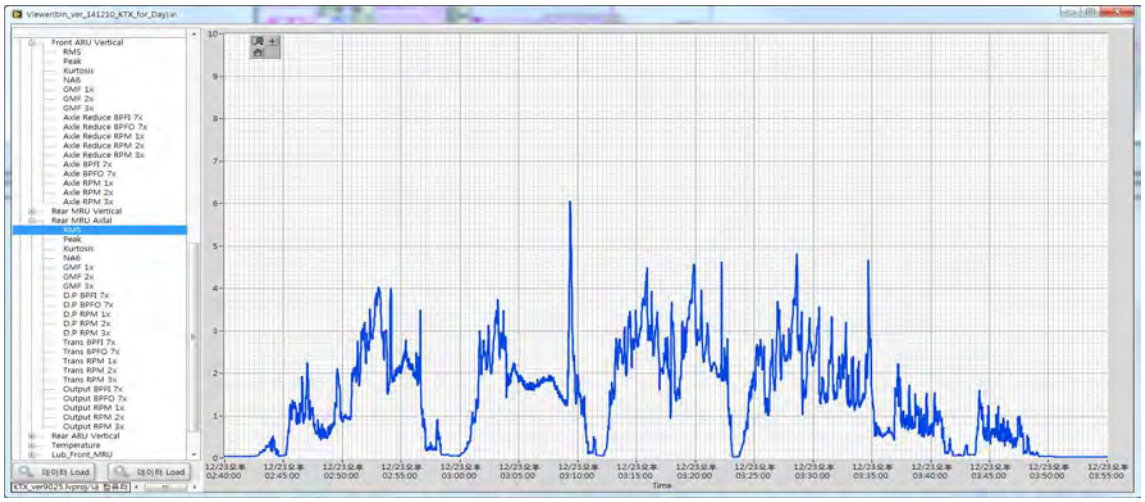


그림 2.3.157 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Axial축 RMS 변화 측정 결과값

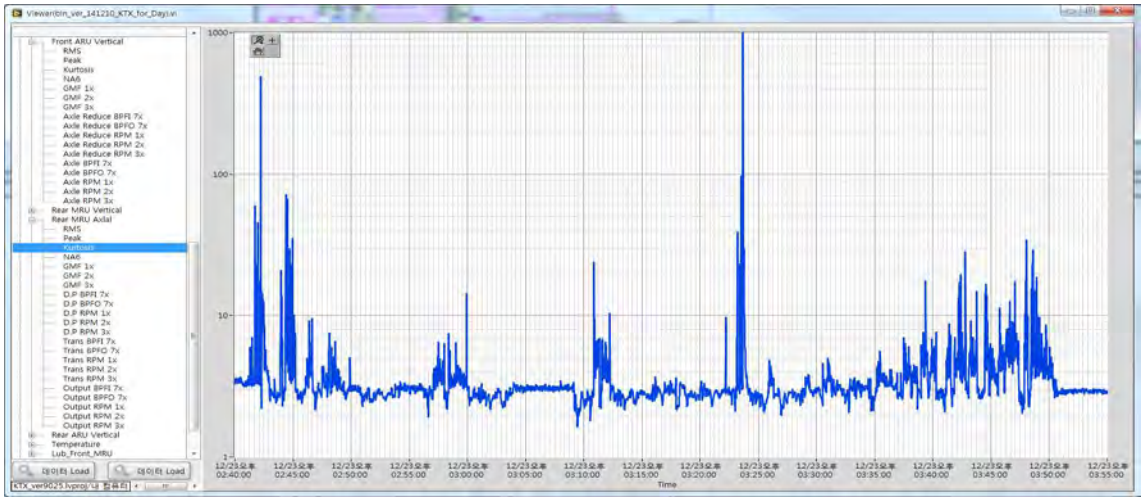


그림 2.3.158 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Axial축 Kurtosis 변화 측정 결과값

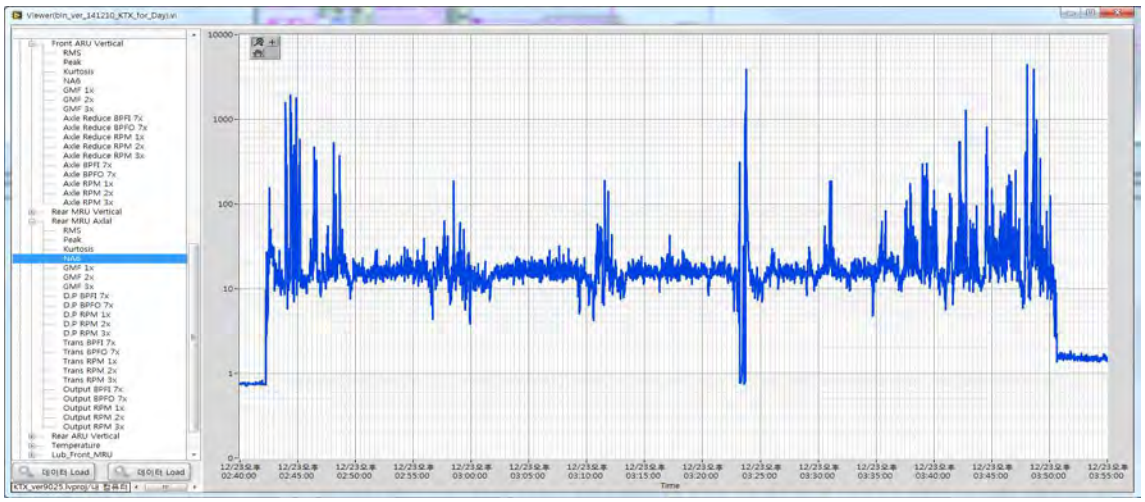


그림 2.3.159 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 MRU Axial축 NA6 변화 측정 결과값

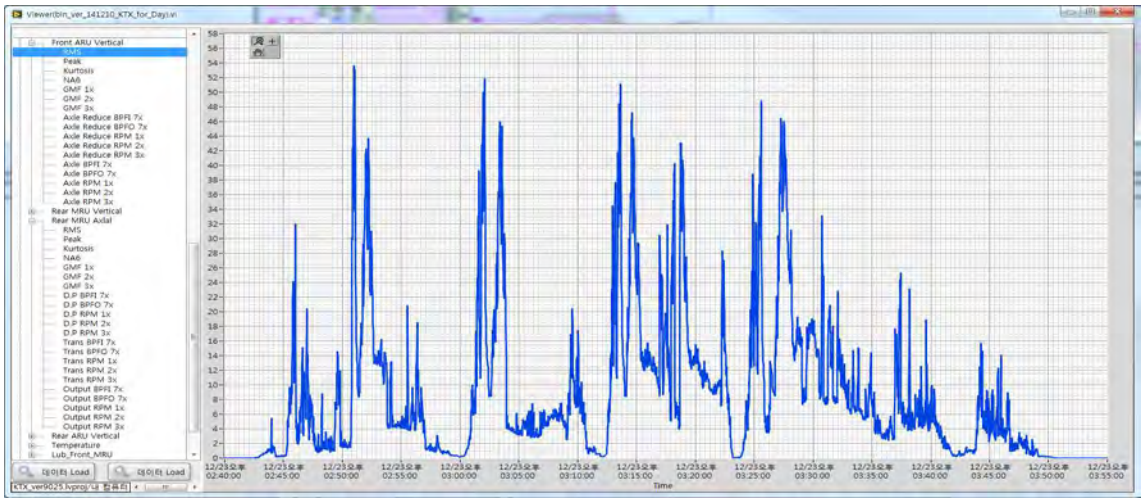


그림 2.3.160 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 ARU Vertical축 RMS 변화 측정 결과값

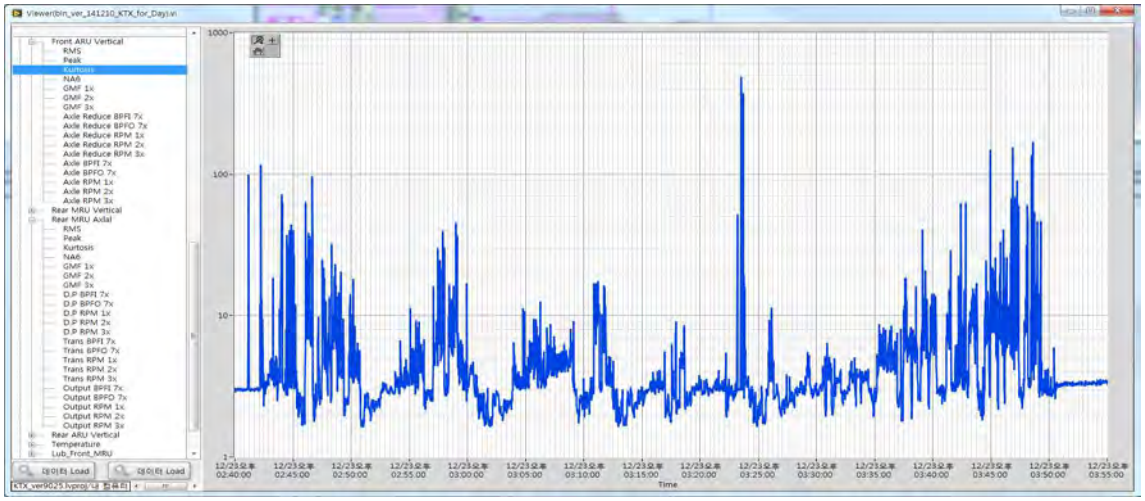


그림 2.3.161 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 ARU Vertical축 Kurtosis 변화 측정 결과값

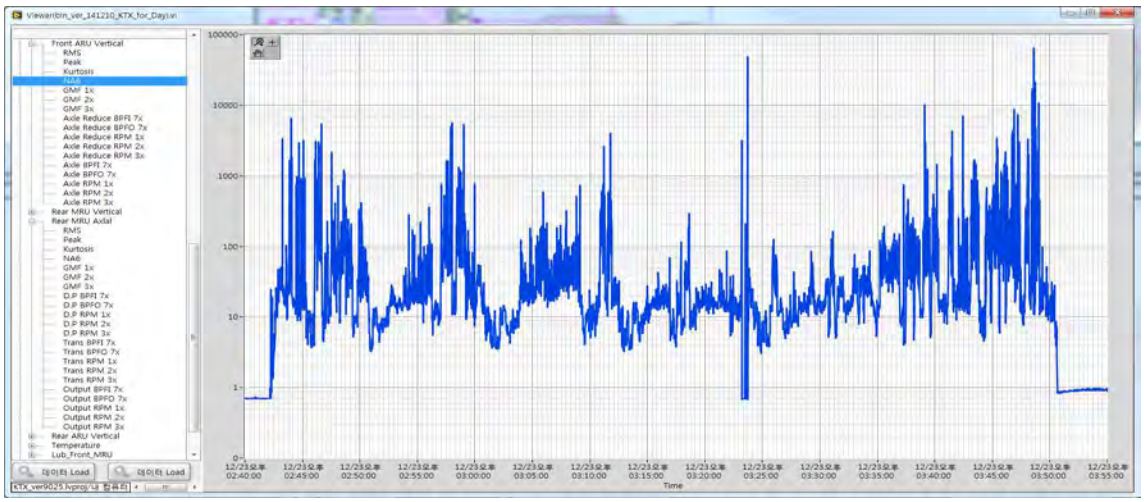


그림 2.3.162 KTX 실차 성능 시험 대전→서울역 구간 ARU Vertical축 NA6 변화 측정 결과값

(바) 시험 결과

이번 시험의 목적은 최종적으로 통합모니터링시스템을 확인하고 각 모듈(진동, 윤활, 온도)의 모니터링이 잘 작동되는 지 확인하는 과정이다. 소프트웨어의 UI에 표시되는 내용은 한결 간편화하면서 시각적이며 시간과 열차의 속도에 따라 위의 결과 자료와 같이 잘 표현이 되어 최종 결과물의 형태를 보여주고 있다.

○ 시스템 설치부분은 2개의 Client가 설치되고 설치사양대로 각 종 센서가 장착되는데 문제가 없음을 확인하였으며 시스템 철거 시까지 회전수 감지센서의 안정성 오류가 약간 있었으나 2개의 센서를 설치하여 이를 보완하였던 것이 주효하였다. 이 문제는 실차 설계 적용 시 열차로부터 추출되는 회전신호를 받아 사용하면 전혀 문제가 없을 것으로 판단된다.

○ 진동 (Vibration) 부분에 대해서는 Main화면에서 구성되는 상대적이고 절대적인 기준 값들과의 알람여부의 확인과 시간별 속도별 추이에 따른 각 파라미터의 값들의 변동이 잘 취득되고 있다. 또한 파라미터를 재추출하여 2차 스펙트럼 그래프를 구성하였던 것이 좋은 참고 결과자료로서 보이고 있다. 해당되는 대표적인 결과(RMS, BPFI, NA6, GMF, Kurtosis등의 결과는 각각 그래프로 확인할 수 있다.

○ 온도 및 윤활 부분의 적용은 이번에 최초로 동시에 확인되었으며 화면의 배치와 시간대 별 위치별 상태모니터링 자료가 측정되고 축적되는 것을 확인 할 수 있다.

종합적으로 최종 KTX 통합 모니터링시스템의 실차시험은 비교적 성공적으로 본 시스템의 결과를 보여주고 있었으며 Client의 실제 적용위치에 고정하고 Server에서 측정하는 또한 열차의 자체 회전신호로부터 추출되는 회전수신호를 받아서 측정할 수 있는 보다 안정적인 최종결과는 KTX의 운행규칙상 어려움 때문에 구현할 수 없었던 것은 아쉬움이 있었다. 그러나 최종실차 적용시험은 위와 같이 전반적으로 정상적인 시스템의 구동상태를 확인 할 수 있었던 결과를 내었다.

## 3. 모니터링 시스템 공인인증 시험

### 가. 철도차량 부품 진동 및 내구성 시험 (KS C IEC 61373)

#### (1) 시험 개요

모니터링 시스템에 대하여 실차 시험과 실물 시험을 진행을 하면서 제품의 성능을 확인을 하였고 최종 년도에는 시제품에 대한 공인 인증 시험을 진행하기 시작 하였다. 가장 먼저 공인 인증 시험에 착수한 인증 규격은 철도차량 기준의 진동 및 충격 시험 테스트 진행 (KS C IEC 61373) 시험이다. 그림 2.3.163은 시험 기준 및 충격 시험에 대한 내용을 정리한 그림이다.

본 시험은 모의장기 수명, 충격시험, 기능 랜덤 시험 3가지 항목으로 시험을 진행 하였다. 시험 결과의 판단 기준은 시료를 사용 시와 유사하게 진동 테이블에 고정을 하고 KS C IEC 61373 : 2002 2종 대차(클라이언트) 1종 (서버)의 시험 조건으로 가진을 하여 시료의 균열과 파손 등 외관상의 손상 유무를 확인하는 조건으로 시험을 진행 하였다. 표 2.3.20 ~ 2.3.22는 2종 대차에 장착되는 부품의 각 기능 시험에 대한 조건을 상세하게 정리한 내용이다.

| 시험단계 및 항목 | 규격 |
|---|---|
| 기능랜덤진동시험 | KS C IEC 61373 1종 B |
| 장기수명시험 | KS C IEC 61373 1종 B |
| 충격시험 | KS C IEC 61373 1종 B |

| 진동 측정 기준 | 차체 | 대차 | 차축 |
|---|---|---|---|
| 진동 : 5~500Hz 일 때 g-peak to peak | 0.4 | 4.0 | 10.0 |

| 충격 : shock-peak g | 차체 | 대차 | 차축 |
|---|---|---|---|
| 수직 | 2 | 20 | 50 |
| 좌우 | 2 | 10 | 20 |
| 전후 | 3 | 5 | 10 |



〈측정기준점〉

그림 2.3.163 철도 내구성 시험 관련 규격 기준

표 2.3.20 KS C IEC 모의 장기 수명 시험조건 (2종)

| 시 험 조 건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 진동방향 | 진동주파수 (Hz) | ASD Level ($(m/s^2)^2$/Hz) | Slope (dB/octave) | 가속도 (RMS Value $m/s^2$) | 시험시간 (h) |
| 상하 | 5 | - | 9 | 42.5 | 5.0 |
| | 10 | 11.83 | - | | |
| | 100 | 11.83 | - | | |
| | 250 | | -6 | | |
| 좌우 | 5 | - | 9 | 37.0 | 5.0 |
| | 10 | 8.96 | - | | |
| | 100 | 8.96 | - | | |
| | 250 | - | -6 | | |
| 전후 | 5 | - | 9 | 20.0 | 5.0 |
| | 10 | 2.62 | - | | |
| | 100 | 2.62 | - | | |
| | 250 | - | -6 | | |

표 2.3.21 KS C IEC 충격 시험조건 (2종)

| 시 험 조 건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 충격방향 | | 피크 가속도 ($m/s^2$) | 정규지속시간 (ms) | 파형 | 반복횟수 |
| 상하 | + | 300 | 18 | 반정현파 | 3 |
| | - | | | | 3 |
| 좌우 | + | 300 | 18 | 반정현파 | 3 |
| | - | | | | 3 |
| 전후 | + | 300 | 18 | 반정현파 | 3 |
| | - | | | | 3 |

표 2.3.22 KS C IEC 기능 랜덤 시험조건 (2종)

| 시 험 조 건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 진동방향 | 진동주파수 (Hz) | ASD Level ($(m/s^2)^2$/Hz) | Slope (dB/octave) | 가속도 (RMS Value $m/s^2$) | 시험시간 (min) |
| 상하 | 5 | - | 9 | 5.4 | 15 |
| | 10 | 0.190 | - | | |
| | 100 | 0.190 | - | | |
| | 250 | | -6 | | |
| 좌우 | 5 | - | 9 | 4.7 | 15 |
| | 10 | 0.144 | - | | |
| | 100 | 0.144 | - | | |
| | 250 | - | -6 | | |
| 전후 | 5 | - | 9 | 2.5 | 15 |
| | 10 | 0.0414 | - | | |
| | 100 | 0.0414 | - | | |
| | 250 | - | -6 | | |

시험을 진행을 하여 시험을 패스를 할 수 있었다. 그림 2.3.164는 클라이언트의 진동 시험 관련 사진이다.

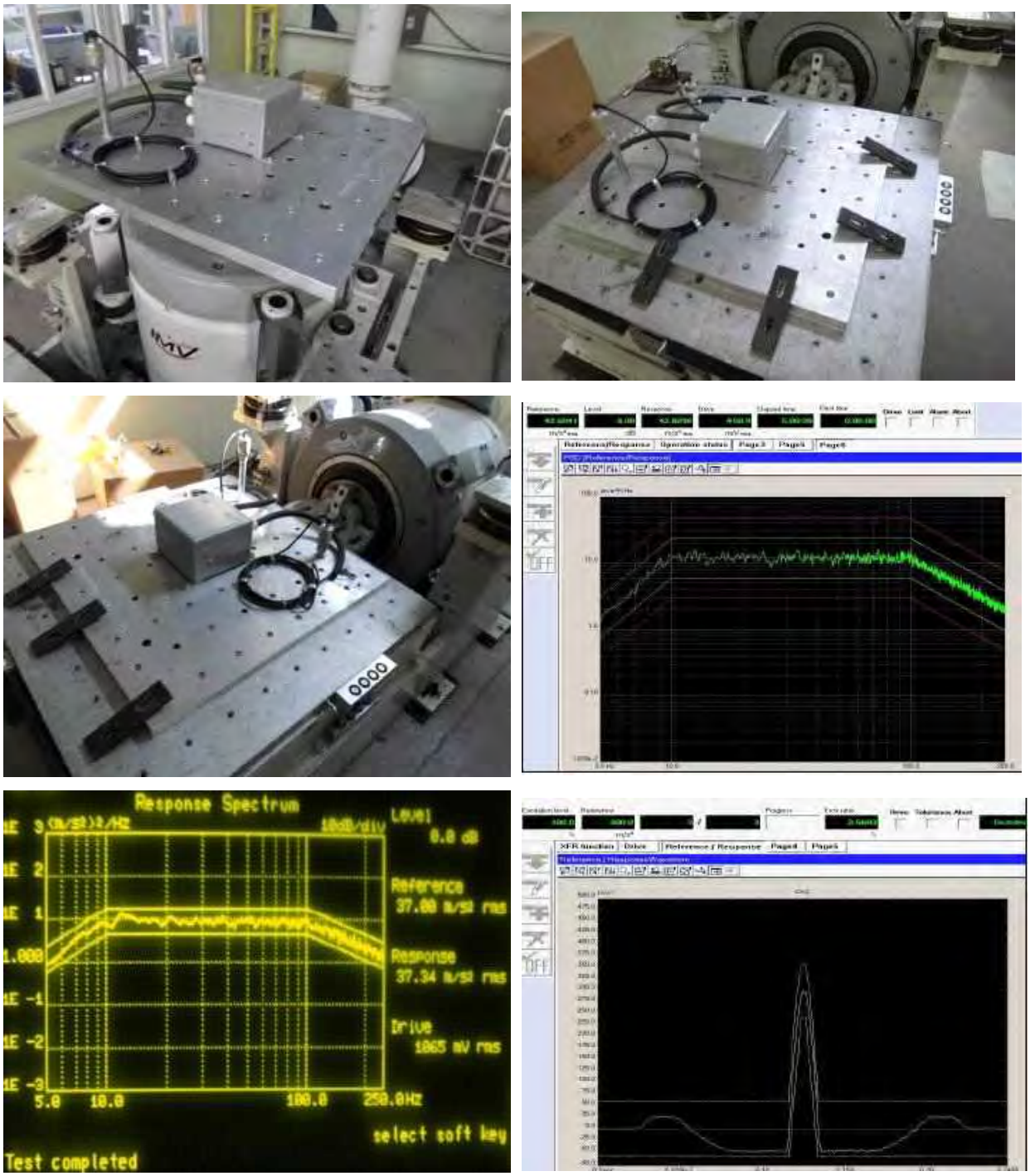



그림 2.3.164 클라이언트 인증 시험 사진

서버의 인증 시험은 1종 차체 내부 기준으로 시험을 진행을 하였다. 다음 아래의 표 2.3.23 ~ 2.3.25는 1종 차체 내부의 KS C IEC 61373의 3가지 시험 기준을 정리한 내용이다.

표 2.3.23 KS C IEC 모의 장기 수명 시험조건 (1종)

| 시 험 조 건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 진동방향 | 진동주파수 (Hz) | ASD Level ($(m/s^2)^2$/Hz) | Slope (dB/octave) | 가속도 (RMS Value $m/s^2$) | 시험시간 (h) |
| 상하 | 5 | 1.034 | - | 5.90 | 5.0 |
| | 20 | 1.034 | - | | |
| | 150 | - | -6 | | |
| 좌우 | 5 | 0.250 | - | 2.90 | 5.0 |
| | 20 | 0.250 | - | | |
| | 150 | - | -6 | | |
| 전후 | 5 | 0.452 | - | 3.90 | 5.0 |
| | 20 | 0.452 | - | | |
| | 150 | - | -6 | | |

표 2.3.24 KS C IEC 충격 시험조건 (1종)

| 시 험 조 건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 충격방향 | | 피크 가속도 ($m/s^2$) | 정규지속시간 (ms) | 파형 | 반복횟수 |
| 상하 | + | 30 | 30 | 반정현파 | 3 |
| | - | | | | 3 |
| 좌우 | + | 30 | 30 | 반정현파 | 3 |
| | - | | | | 3 |
| 전후 | + | 50 | 30 | 반정현파 | 3 |
| | - | | | | 3 |

표 2.3.25 KS C IEC 기능 랜덤 시험조건 (1종)

| 시 험 조 건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 진동방향 | 진동주파수 (Hz) | ASD Level ($(m/s^2)^2$/Hz) | Slope (dB/octave) | 가속도 (RMS Value $m/s^2$) | 시험시간 (min) |
| 상하 | 5 | 0.0164 | - | 0.750 | 15 |
| | 20 | 0.0164 | - | | |
| | 150 | - | -6 | | |
| 좌우 | 5 | 0.0041 | - | 0.370 | 15 |
| | 20 | 0.0041 | - | | |
| | 150 | - | -6 | | |
| 전후 | 5 | 0.0073 | - | 0.500 | 15 |
| | 20 | 0.0073 | - | | |
| | 150 | - | -6 | | |

아래의 그림 2.3.165는 서버의 진동 시험 관련 사진이다. 클라이언트와 마찬가지로 시험을 패스할 수 있었다.

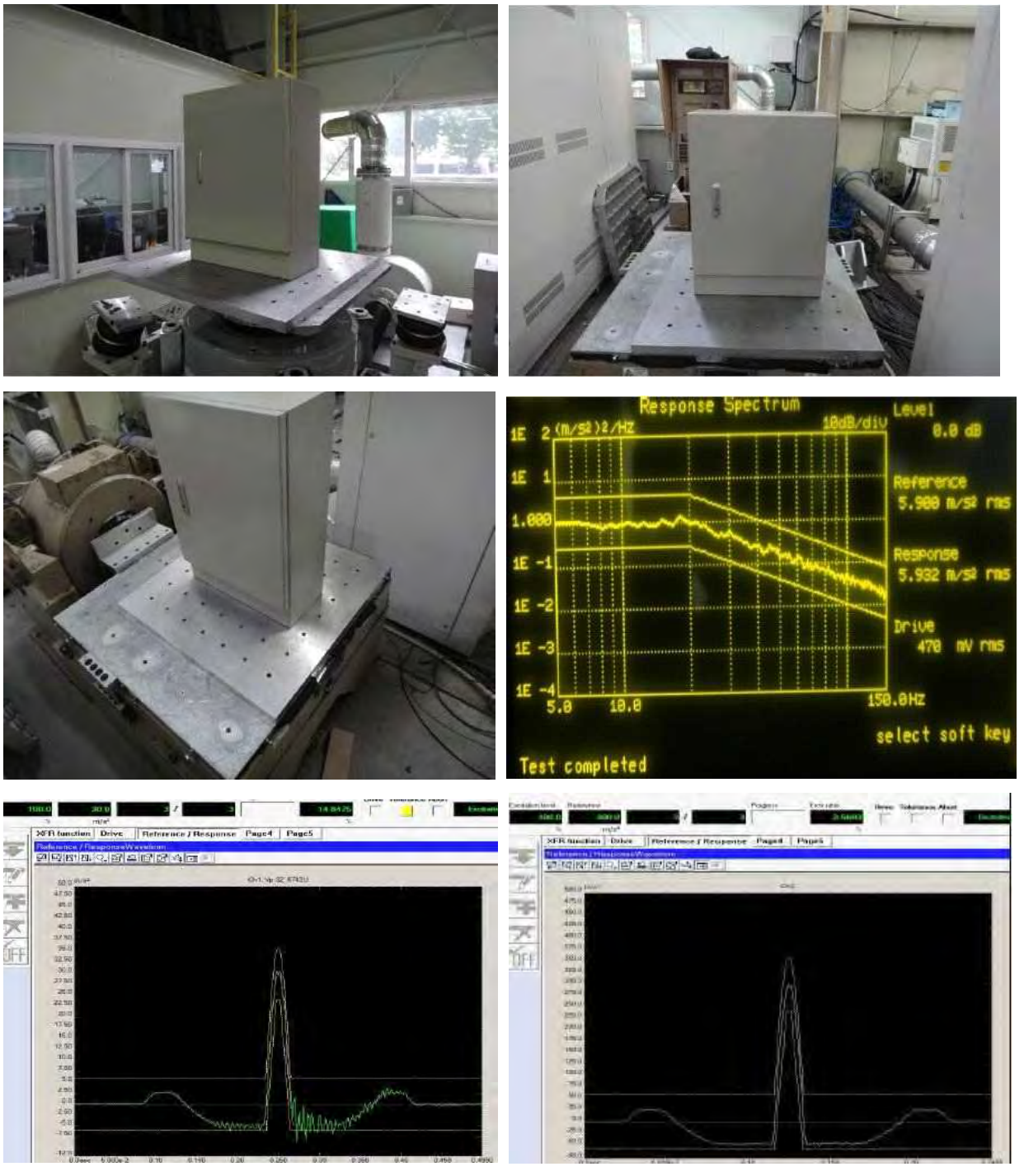



그림 2.3.165 서버 인증 시험 사진

나. 전자파 공인 인증 시험

(1) 시험의 개요

최근 여러 가지 전자기기나 정보통신기기가 폭발적으로 보급됨에 따라 기기 상호간의 전자적인 간섭 문제가 대두되어 EMC (Electromagnetic Compatibility : 전자적 양립성) 에 대한 관심이 높아지고 있다. 전기철도에 있어서도 EMC는 피해 갈 수 없는 문제이다. 전기철도가 발생하는 불요전자계 (전파 잡음, 유도, 자계 등) 혹은 전기철도에 대해 외부에서 발생하는 불요전자계는 무선통신·방송의 수신 장해나 철도내외에서 사용되는 기기의 동작불량 원인이 되는 경우가 있다. 요즈음 철도는 보다 빠르고 안정된 수송을 실현하기 위해 차량의 성능향상을 꾀하고 무선통신이나 정보처리 등의 기술도입을 추진해오고 있다. 이들 신기술의 도입 시 시스템간의 전자적인 간섭에 따른 오동작을 방지하기 위해 EMC는 중요한 요소기술이 된다. 전기철도에서의 EMC는 국제적으로도 대두되고 있으며 발생원에 대한 허용 값이나, 방해를 받는 쪽의 내성 (Immunity)을 규격화하는 움직임이 활발해지고 있다.

(2) 시험 대상

고속열차 내부에 설치되어 데이터를 취득하여 서버 랙으로 통신을 하는 시스템인 이번 개발 제품은 EMI / EMC 관련 인증 시험을 진행하여 그에 관한 내용을 증명할 필요성이 있다.

○ 시험 규격 관련 내용
- KN50, 고속철도 기기류의 장해방지 시험방법 규격
- KN51, 고속철도 기기류의 내성 시험방법 규격

(3) 성능 평가 기준

(가) KN50 (고속철도 기기류의 장해방지 시험방법 규격) 관련 내용

① 규격의 적용 범위

규격은 철도에서 운용되는 도시철도 차량을 포함하여 고속철도 전체시스템의 방사시험방법에 대하여 규정한다. 본 규격에서는 방사를 검증하기 위한 측정법에 대해 설명하며 대표적인 전자기장의 수치를 제공한다. 본 시험방법은 전자파장해방지기준[별표10]제1호의 고속철도 전체시스템의 장해방지 기준을적용하며 시험절차는 본 장의 4절과 부록 A에서 정의된 특별한 측정 점에서 적용한다. 본 규격에서 언급하는 방사는 대전된 철도궤도의 중심선에서 외측 10m 또는 변전소의 울타리로부터 3 m 떨어진 수직평면의 모든 점에 존재하는 것으로 가정한다. 철도의 상 및 하 구역에서 방사가 발생하며 특별한 경우에 대해서는 개별적으로 취급한다. 산업 환경에서의 전자파 방사 기준을 적용받는 기기는 본 적용범위에서 제외된다.

② 방사시험 및 기준 허용치

○ 개활지 철도 노선으로부터의 방사 : 9 kHz~1,000 MHz 주파수 범위 내의 방사시험 허용기준치는 전자파장해방지기준[별표10]제1호의 “개활지 철도노선으로부터의 허용기준”에 나타나 있으며 측정 방법은 4절에 규정되어 있다. 비 대전된 철도궤도에 대해서는 750 VDC의 허용기준을 적용한다. 시내운송용 차량의 경우, 750 VDC 도체에 대한 개활지 철도 노선으로 부터의 방사기준에 주어진 방사 허용기준치를 초과하지 않는다. 개활지 철도노선으로부터의 방사에 대한 첨두치 허용기준은 준-첨두치가 첨두치에 비해 최소 20 dB 이하인 것을 기본으로 한다.

○ 철도 변전소로부터의 방사 : 측정된 외부 환경에 대한 철도 변전소의 무선주파수 잡음방사는 철도변전소로부터의 방사기준의 25 kV 시스템의 허용 기준치를 초과해서는 안 된다. 정격 연속전력 이하의 전력 수치에서 측정을 실시한 경우 해당 결과를 부록A에 명시된 규칙에 따라 변환해야 한다. 측정에 사용된 대역폭은 KN 16-1에 사용된 것들이며 다음 그림 2.3.166과 같다

| | 대역폭 |
|---|---|
| 150 kHz이하의 주파수 | 200 Hz |
| 150 kHz ~30 MHz의 주파수 | 9 kHz |
| 30 MHz 이상의 주파수 | 120 kHz |

그림 2.3.166 KN 50 측정 대역폭

③ 시험 검사 항목은 다음 표 2.3.26과 같다.

표 2.3.26 KN50, KN51 규격 시험 검사 항목

| 내 용 | 적 용 규 격 | | 적 용 여 부 | 시 험 결 과 |
|---|---|---|---|---|
| 7.1 전도성 방해 시험 | KN50:2010 | | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 7.2 프로세스 측정 및 제어 포트의 전도성 방해 전압 허용기준 | KN50:2010 | | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 7.3 방사성 방해 시험 | KN50:2010 | | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 7.4 정전기방전 내성시험 | KN 51: 2008 | KN 61000-4-2: 2013 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 7.5 방사성 RF 전자기장 내성시험* | | KN 61000-4-3: 2011 | □ | □ 적합 □ 부적합 |
| 7.6 EFT/버스트 내성시험 | | KN 61000-4-4: 2011 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 7.7 서지 내성시험 | | KN 61000-4-5: 2008 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 7.8 전도성 RF 전자기장 내성시험 | | KN 61000-4-6: 2013 | ■ | ■ 적합 □ 부적합 |
| 7.9 전원 주파수 자계 시험 | | KN 61000-4-8: 2013 | □ | □ 적합 □ 부적합 |

(나) KN51 (고속철도 기기류의 내성 시험방법 규격) 관련 내용

① 규격의 적용 범위

규격은 철도 차량의 내부 환경 및 철도의 외부 환경과 휴대용 소형 무선 송신기와 같은 장치로부터 철도 차량내 기기에 대한 전자기적 장해를 고려한다. 본 규격에서 다루는 주파수 범위는 DC ~ 400 GHz이다. 현재 2 GHz를 초과하는 주파수에 대한 시험은 규정되어 있지 않다. 시험은 특정 기기와 그 기기의 구조, 단자, 기술 및 작동 조건에 따라 다르게 적용되어야 한다. 본 규격은 철도 차량의 내부 환경 및 철도의 외부 환경과 휴대용 소형 무선 송신기와 같은 장치로부터 철도 차량 내 기기에 대한 전자기적 방해를 고려한다. 철도 차량 내 단자가 무선 통신의 목적에서 송신용 및 수신용으로 사용되는 경우, 통신 주파수 대역에서는 본 규격의 내성 허용기준치를 적용하지 않는다. 본 규격의 목적은 전자파적합성의 내성 시험 요건들에 대한 시험 방법에 관하여 규정 하는 것이다. 내성 요건들은 철도 차량 내 기기에 대한 내성 기준을 보증하기 위해 적절히 선택할 수 있다,

② 시험조건

이 시험은 기기의 모든 기능을 시험할 수 있는 것은 아니다. 시험은 제조자가 고려하는 대표적인 동작모드에서 행해져야 하며, 정상적인 시험방법의 적용 시에 그리고 일치하는 주파수 대역에서의 잡음에 대해 최대 내성을 가져야 한다. 기기가 시스템의 일부인 경우 또는 기기가 보조 기기에 연결될 수 있는 경우, 기기는 KN 22에 따라 포트의 시험에 필요한 최소 구성의 보조 장치에 연결된 상태에서 시험하여야 한다. 기기를 동작시키기 위한 구성과 동작모드는 시험 계획서에 규정해 두어야 하며, 시험 중의 실제 조건들은 시험 보고서에 정확하게 기록해야 한다. 기기가 많은 수의 유사한 포트 또는 많은 수의 유사한 연결 포트를 구비하는 경우, 실제 동작 조건을 모의시험하고 상이한 유형의 모든 포트에 적용됨을 보증하기 위해 충분한 수의포트를 선택해야 한다(예를 들어, 포트 중 20% 또는 최소한 4개의 포트). 기본 규격에 별도로 지시되지 않은 한 기기에 대해 규정된 동작 범위 내에서 그리고 기기의 정격 공급 전압에서 시험이 수행되어야 한다. 다음 그림 2.3.167은 시험 규격 포트들의 주요 범례를 나타낸 그림이다.

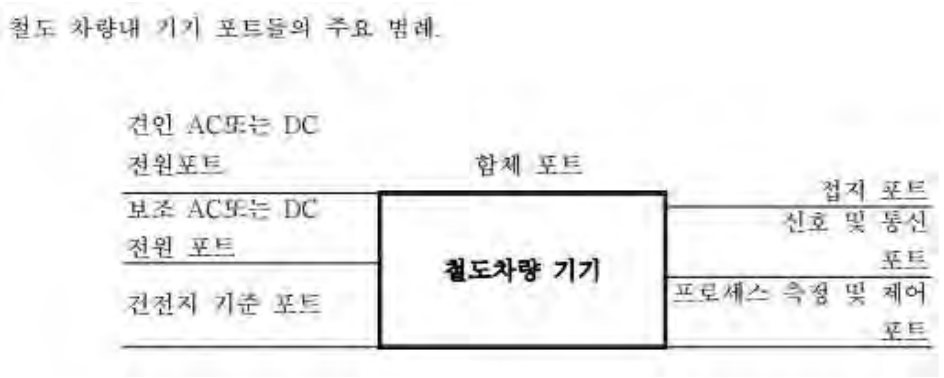
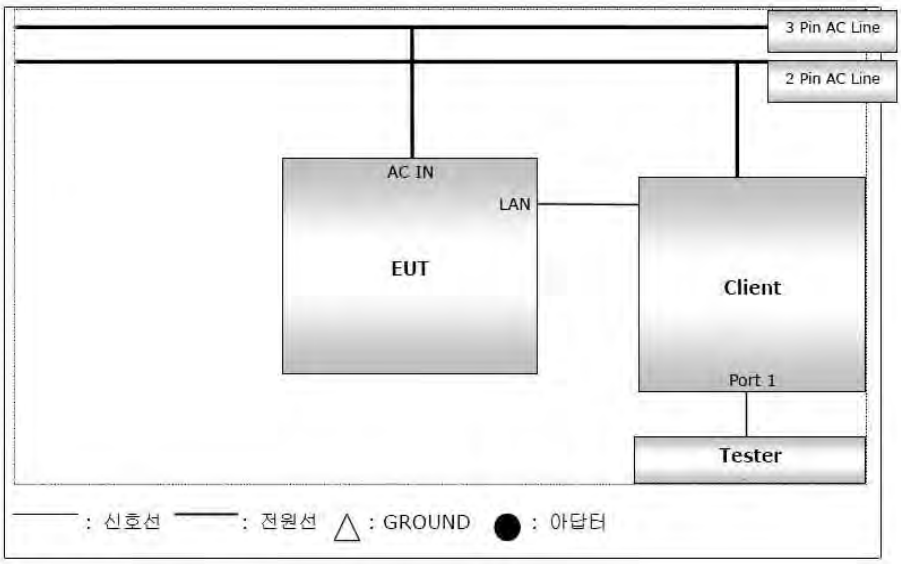



그림 2.3.167 포트들의 주요 범례

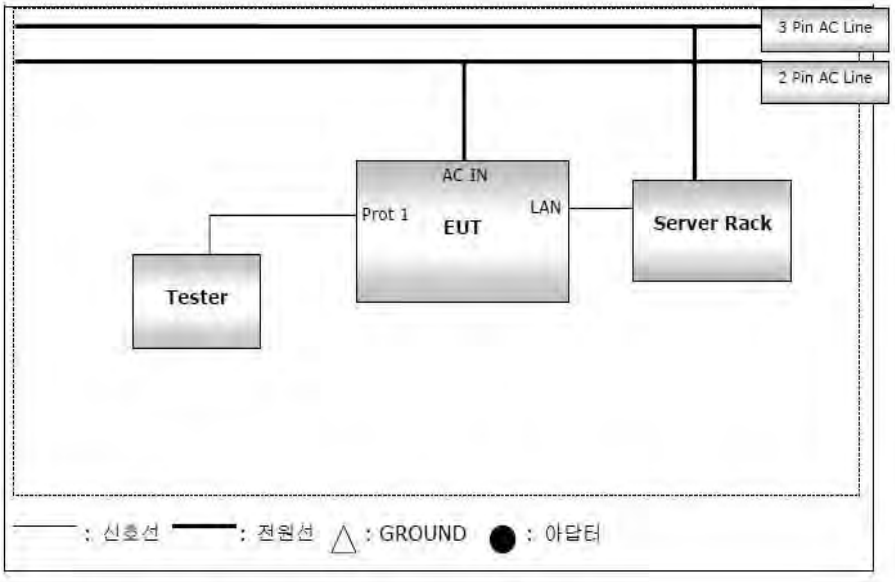
(다) 시험 결과

① 고속철도 기기류의 장해방지 시험 결과

다음 그림 2.3.168은 클라이언트, 서버에 대한 시험 장비 배치도를 보여주는 것이다.




① 서버 시험 장비 배치




② 클라이언트시험 장비 배치

그림 2.3.168 전자파 시험 배치도

본 시험은 다음 표 2.3.27의 시험 적용 규격의 각 검사 기준에 맞게 진행을 하였다.

표 2.3.27 KN50, KN51 적용 시험 규격

| 내성시험명 | 적용단자 | 내성기준 | 단위 | 성능평가기준 | 적용규격 | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 정전기 방전 | 함체포트 | ±8(기중방전)<br>±6(접촉방전) | kV<br>kV | B | KN61000-4-2 | (주1.3) |
| 방사성 RF 전자기장 | 함체포트 | 80~1000<br>20<br>80 | MHz<br>V/m(무변조, rms)<br>% AM(1 ㎑) | A | KN61000-4-3 | (주1.1),(주1.2) |
| 방사성 RF 전자기장 | 함체포트 | 80~1000<br>1400~2100<br>20<br>80 | MHz<br>MHz<br>V/m(무변조, rms)<br>% AM(1 ㎑) | A | KN61000-4-3 | (주1.2) |
| 방사성 RF 전자기장 | 함체포트 | 2100~2500<br>5<br>80 | MHz<br>V/m(무변조, rms)<br>% AM(1 ㎑) | A | KN61000-4-3 | |
| EFT/버스트 | 신호선 및 제어선단자 | ±2<br>5/50<br>5 | ㎸ kV<br>Tr / Th ns<br>kHz㎑(반복주파수) | A | KN61000-4-4 | 용량성결합 |
| | 입·출력 교류 전원단자 | ±2<br>5/50<br>5 | ㎸ kV(첨두값)<br>Tr / Th ns<br>kHz(반복주파수) | | | 직접결합 |
| 서지 | 입력교류 전원단자 | 1.2/50 (8/20)<br>±1(선-선간)<br>±2(선-접지간) | Tr / Th ns ㎲<br>kV (첨두치)<br>kV (첨두치) | B | KN61000-4-5 | (주2.2) |
| 전도성 RF 전자기장 | 신호선 및 제어선단자 | 0.15 ~ 80<br>10<br>80<br>150 | MHz<br>V(무변조, rms)<br>% AM(1 kHz)<br>Ω (소스임피던스) | A | KN61000-4-6 | (주3.1) (주3.2) |
| | 입·출력 교류 전원단자 | 0.15 ~ 80<br>10<br>80<br>150 | MHz<br>V(무변조, rms)<br>% AM(1 kHz)<br>Ω (소스임피던스) | | | (주 3.2) |

이 규격의 성능 평가 기준은 두 가지로 분류가 된다. 평가 기준에 대한 정의는 다음과 같다.

○ 성능 평가 기준 A : 기기는 시험 중 그리고 시험 후에 의도된 대로 작동을 계속해야 한다. 기기가 의도된 대로 사용될 때, 제조자에 의해 규정된 성능 수준 이하로 저하되거나 기능이 상실되는 것은 허용되지 않는다. 성능 수준은 성능에 대한 허용 손실 수준으로 대체할 수 있다. 제조자가 최소 성능 수준 또는 허용 성능 손실 수준을 규정하지 않은 경우, 제품 설명 및 자료, 그리고 사용자가 기기로부터 합리적으로 기대할 수 있는 것으로부터 이를 도출할 수 있다.

○ 성능 평가 기준 B : 기기는 시험 후 의도된 대로 계속 작동을 해야 한다. 기기가 의도된 대로 사용될 때, 제조자에 의해 규정된 성능 수준 이하의 성능으로 저하되거나 기능이 상실되는 것은 허용되지 않는다. 성능 수준은 성능에 대한 허용 손실 수준으로 대체할 수 있다. 그러나 시험 중의 성능 저하는 허용된다. 실제 동작 상태나 저장 데이터의 변경은 허용되지 않는다. 제조자가 최소 성능 수준 또는 허용 성능 손실 수준을 규정하지 않은 경우, 제품 설명 및 자료, 그리고 사용자가 기기로부터 합리적으로 기대할 수 있는 것으로부터 이를 도출할 수 있다.

○ 성능 평가 기준 C : 기능이 자가 복구식이거나 또는 조작을 통하여 복구 가능한 경우 일시적인 기능의 상실은 허용된다.

다음 표 2.3.28과 그림 2.3.169는 주전원 단자의 연속성 방해 시험 결과 내용이다.

표 2.3.28 시험 결과 – 주전원 단자의 연속성 방해 시험 결과(1)

| 주파수 [MHz] | 보정계수 dB | 극성 | 준첨두치 | | | 평균치 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 제한치 [dBuV] | F2측정값 [dBuV] | F1결과값 [dBuV] | 제한치 [dBuV] | F2측정값 [dBuV] | F1결과값 [dBuV] |
| 0.464 | 9.48 | L1 | 99.0 | 43.7 | 53.2 | 0.0 | - | 0.0 |
| 0.465 | 9.48 | N | | 43.6 | 53.1 | | - | 0.0 |
| 0.494 | 9.47 | L1 | | 47.0 | 56.5 | | - | 0.0 |
| 0.499 | 9.47 | N | | 46.4 | 55.9 | | - | 0.0 |
| 0.548 | 9.50 | L1 | | 44.3 | 53.8 | | - | 0.0 |
| 0.549 | 9.50 | N | | 43.5 | 53.0 | | - | 0.0 |
| 12.648 | 9.75 | L1 | 93.0 | 34.9 | 44.7 | 0.0 | - | 0.0 |
| 12.851 | 9.75 | N | | 36.3 | 46.1 | | - | 0.0 |
| 12.918 | 9.76 | L1 | | 35.7 | 45.5 | | - | 0.0 |
| 13.195 | 9.76 | N | | 37.1 | 46.9 | | - | 0.0 |
| 13.266 | 9.76 | L1 | | 36.1 | 45.9 | | - | 0.0 |
| 13.621 | 9.77 | N | | 35.6 | 45.4 | | - | 0.0 |

* L1 : Line - PE N : Neutral- PE

**F1 : [dBuV]=F2[dBuV]+보정계수**
**F1 : 결과값 F2 : 측정값 보정계수 : LISN 삽입손실+케이블 손실**

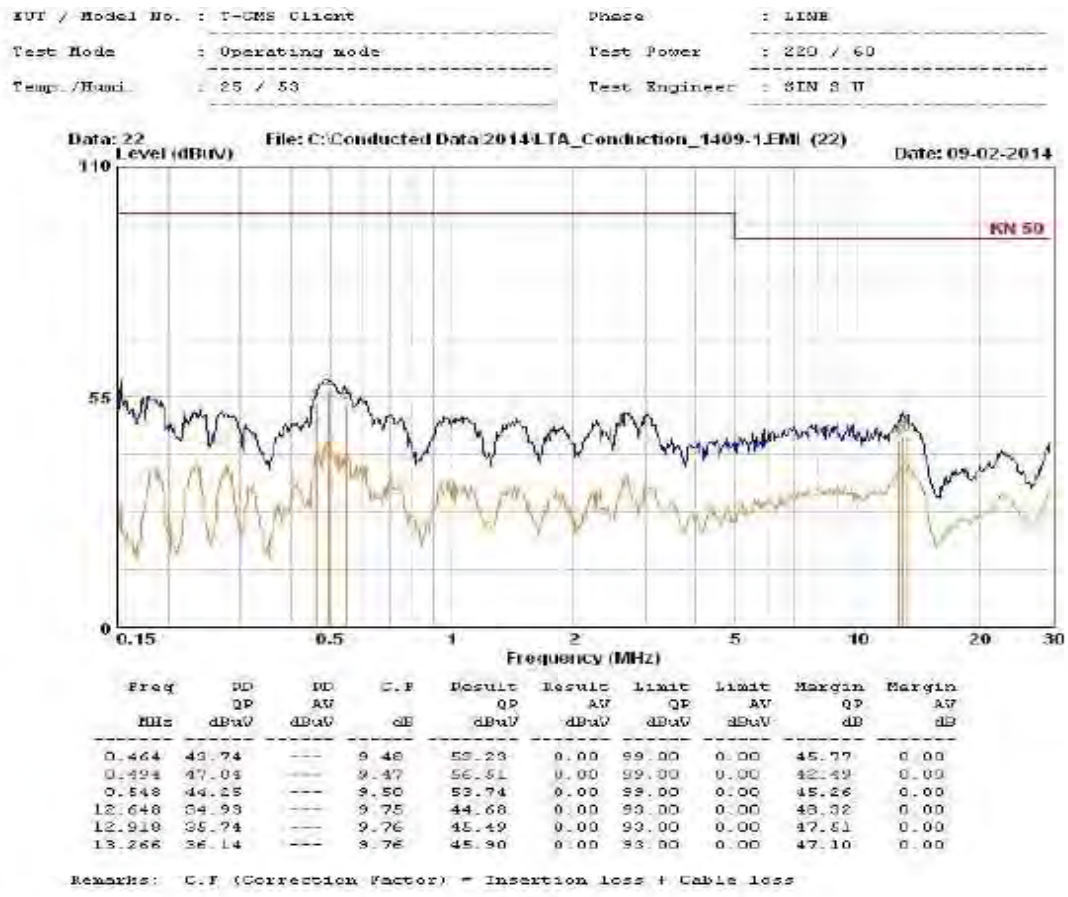



그림 2.3.169 시험 결과 – 주전원 단자의 연속성 방해 시험 결과(2)

다음 표 2.3.29는 방사성 방해 시험에 대한 결과이다.

표 2.3.29 방사성 방해 시험 결과

| 주파수 [MHz] | F2:측정값 [dBuV] | 편파 | 안테나높이 [cm] | 보정계수 [T.F] [dB] | 제한치 [dBuV/m] | F1:결과값 [dBuV/m] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 36.3 | 53.20 | V | 100 | -17.24 | 40.0 | 36.0 |
| 40.3 | 49.20 | V | 100 | -16.48 | | 32.7 |
| 42.6 | 50.10 | V | 100 | -16.35 | | 33.8 |
| 55.5 | 48.70 | V | 100 | -18.12 | | 30.6 |
| 59.6 | 48.30 | V | 100 | -19.55 | | 28.8 |
| 136.0 | 50.20 | V | 100 | -15.59 | | 34.6 |
| 336.5 | 46.20 | H | 268 | -12.01 | 47.0 | 34.2 |
| 351.4 | 46.00 | H | 355 | -11.54 | | 34.5 |
| 902.0 | 37.20 | H | 100 | 1.01 | | 38.2 |
| 924.9 | 36.50 | H | 100 | 1.43 | | 37.9 |
| 951.3 | 36.10 | H | 100 | 1.91 | | 38.0 |
| 987.5 | 36.60 | H | 100 | 2.54 | | 39.1 |
| * 편파의 H는 수평, V는 수직을 나타낸다. | | | | | | |
| * 보정계수를 보정하고 있음. | | | | | | |

**F1[dBuV/m] = F2[dBuV/m] + T.F.[dB]**
**F1 : 결과값 F2 : 측정값 T.F. : 보정계수**
**보정계수(T.F)= 안테나 + 케이블 - Amplifier**

다음 표 2.3.30은 정전기 방전 내성 시험에 대한 결과이다.

표 2.3.30 정전기 방전 내성 시험에 대한 결과

| 인가방식 | No, | 인가부위 | 방전방법 | 기준 | 결과 | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 간접인가 | 수평결합면 | | 접촉방전 | B | A | — |
| | 수직결합면 | | | B | A | — |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 직접인가 | 1 | Enclosure | 접촉방전 | B | A | - |
| | 2 | AC IN | 기중방전 | B | A | - |
| | 3 | Port 1 | 기중방전 | B | A | - |
| | 4 | LAN | 기중방전 | B | A | - |
| | 5 | SCREW | 접촉방전 | B | A | - |
| | | 이 하 여 백 | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

다음 표 2.3.31은 EFT/버스트 내성 시험의 결과이다.

표 2.3.31 EFT/버스트 내성 시험의 결과

[입출력 교류전원포트]

| 적 용 부 분 | 기 준 | 성능평가결과 | |
|---|---|---|---|
| | | (+) 버스트 | (-) 버스트 |
| L1-L2 | A | A | A |

[입출력 직류전원단자]

| 적 용 부 분 | 기 준 | 성능평가결과 | |
|---|---|---|---|
| | | (+) 버스트 | (-) 버스트 |
| - | - | 해당없음 | 해당없음 |

[신호선 및 통신단자]

| 적 용 부 분 | 기 준 | 성능평가결과 | |
|---|---|---|---|
| | | (+) 버스트 | (-) 버스트 |
| LAN | A | A | A |

다음 표 2.3.32는 서지 내성 시험의 결과이다.

표 2.3.32 서지 내성 시험의 결과

[입출력 교류전원단자]

| 적용부분 | 기준 | 성능평가결과 | |
|---|---|---|---|
| | | (+)서지 | (-)서지 |
| L-N | B | A | A |
| L-PE | B | 해당없음 | 해당없음 |
| N-PE | B | 해당없음 | 해당없음 |

[입출력 직류전원단자]

| 적용부분 | 기준 | 성능평가결과 | |
|---|---|---|---|
| | | (+)서지 | (-)서지 |
| - | - | 해당없음 | 해당없음 |

[신호선 및 통신단자]

| 적용부분 | 기준 | 성능평가결과 | |
|---|---|---|---|
| | | (+)서지 | (-)서지 |
| - | - | 해당없음 | 해당없음 |

다음 그림 2.3.33은 전도성 RF 전자기장 내성 시험 결과이다.

표 2.3.33 전도성 RF 전자기장 내성 시험 결과

[입출력 교류/직류 전원단자]

| 인가부위 | 인가방법 | 기준 | 성능평가결과 |
|---|---|---|---|
| 전원입력 | CDN | A | A |

[신호선 및 통신단자]

■ 신호선

| 인가부위 | 인가방법 | 기준 | 성능평가결과 |
|---|---|---|---|
| LAN | CLAMP | 해당없음 | 해당없음 |

다음 그림 2.3.170은 시험 측정 현장 사진이다.



그림 2.3.170 모니터링 시스템 전자파 인증 시험 사진

전자파 내성 시험 결과

다음 그림 2.3.171 ~ 2.3.172는 전자파 내성 시험 조건과 결과를 정리한 그림이다.

| 적용단자 및 인가레벨 | | 판정 기준 |
|---|---|---|
| 1. 시험 장소 | : ■ EMS Chamber | |
| 2. 주파수 범위 | : ■ 80 MHz ~ 1 000 MHz<br>■ 1 400 MHz ~ 2 100 MHz | |
| 3. 복사 전자파의 세기 | : ■ 20 V/m | |
| 4. 안테나와 시험품간의 거리 | : 3 m | |
| 5. 신호 조건 (변조 방식) | : ■ 1 kHz 정현파, 80 % 진폭변조(AM)<br>□ 200 Hz, 50 % duty 펄스 변조 | A |
| 6. 주파수 스텝 및 체제시간 | : log 1 % / 3 초 | |
| 7. 안테나 극성 | : 수평 및 수직 | |
| 8. 적용 부분 | : 시험품 표면(4면-전/후/좌/우) | |
| 9. 동작 모드 | : 정상 동작(EUT와 T-GMS Server Rack 연결된 상태에서 동작) | |
| 10. 판정 결과 | : ■ A □ B □ C | |
| 11. 시험 결과 | : ■ 적합 □ 부적합 | |
| 비고1) 시험 전 후 및 시험 중 이상 없이 정상 동작함. | | |

12. 시험 구성도

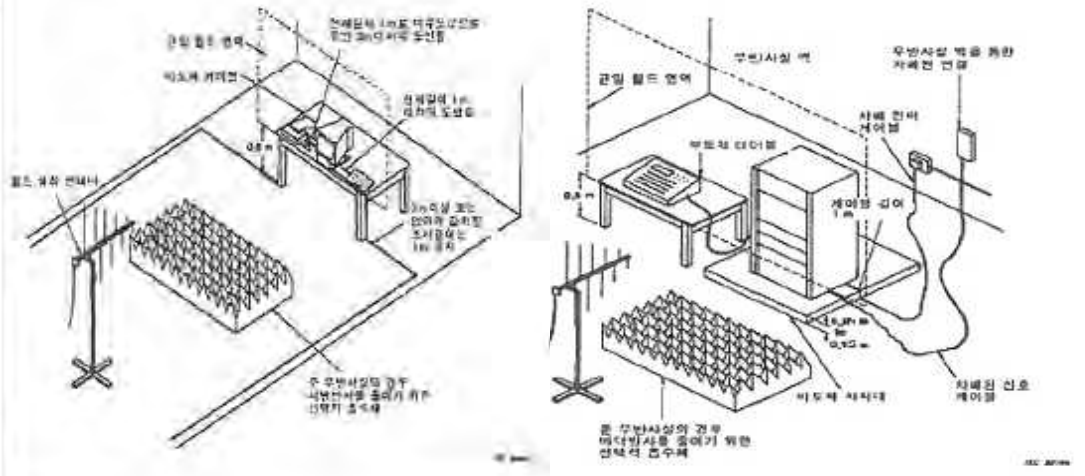


그림 2.3.171 클라이언트 전자파 내성 시험 결과 내용

| 적용단자 및 인가레벨 | | 판정 기준 |
|---|---|---|
| 1. 시험 장소 | : ■ EMS Chamber | A |
| 2. 주파수 범위 | : ■ 80 MHz ~ 1 000 MHz<br>■ 1 400 MHz ~ 2 100 MHz | |
| 3. 복사 전자파의 세기 | : ■ 20 V/m | |
| 4. 안테나와 시험품간의 거리 | : 3 m | |
| 5. 신호 조건 (변조 방식) | : ■ 1 kHz 정현파, 80 % 진폭변조(AM)<br>□ 200 Hz, 50 % duty 펄스 변조 | |
| 6. 주파수 스텝 및 체제시간 | : log 1 % / 3 초 | |
| 7. 안테나 극성 | : 수평 및 수직 | |
| 8. 적용 부분 | : 시험품 표면(4면-전/후/좌/우) | |
| 9. 동작 모드 | : 정상 동작(EUT와 T-GMS Client 연결된 상태에서 동작) | |
| 10. 판정 결과 | : ■ A □ B □ C | |
| 11. 시험 결과 | : ■ 적합 □ 부적합 | |
| 비고1) 시험 전 후 및 시험 중 이상 없이 정상 동작함. | | |

12. 시험 구성도

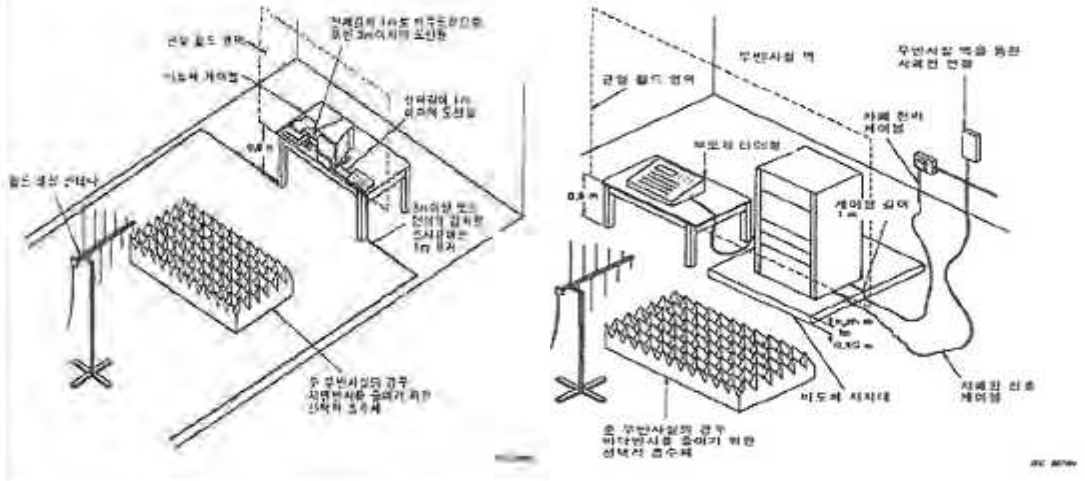


그림 2.3.172 서버 전자파 내성 시험 결과

### 다. 모니터링 시스템 환경 인증 시험

(1) 시험 개요

개발 시제품에 대하여 환경 공인인증 시험을 진행을 하게 되었다. 선정한 환경 분야의 공인 인증 시험 항목은 내한 시험, 내열 시험, 온도-사이클 시험 3가지를 선정을 하였다. 선정한 시험에 대한 정리는 다음과 같다.

○ KS C 0220 [환경시험 방법-전기·전자-저온(내한성)

- 시험방법 : 완만한 온도변화를 수반하는 저온 시험에 따라 실시하며 주위온도를 서서히(1℃/1분) 하강시켜 -25℃±3℃로 16시간 동안 방치한다.
- 초기측정 : 시험시작 전 장치의 정상 동작 상태를 확인한다.
- 중간측정 : 저온상태에서 8/16시간 방치 한 후 장치의 정상 동작을 확인한다.
- 최종측정 : 시험 종료 후 장치의 정상동작을 확인한다.

○ KS C 0221 [환경시험 방법 (전기·전자) 고온 (내열성)

- 시험 방법 : 완만한 온도변화를 수반하는 고온 시험에 따라 실시하며 주위온도를 서서히 (1℃/1분) 상승 시켜 70℃±2℃로 16시간 동안 방치한다.
- 초기측정 : 시험시작 전 장치의 정상 동작 상태를 확인한다.
- 중간측정 : 저온상태에서 8/16시간 방치 한 후 장치의 정상 동작을 확인한다.
- 최종측정 : 시험 종료 후 장치의 정상동작을 확인한다.

○ KS C 0227 [환경시험 방법 (전기·전자) 온습도 사이클 (12+12 시간 사이클)

- 시험 방법 : 상한온도 +55℃, 습도 95%로 하여 사이클 수는 2주기로 하고 온도하강 방법은 KS C 0227 6-3-3항의 방법1에 의한다.
- 초기측정 : 시험시작 전 장치의 정상동작 상태를 확인한다.
- 중간측정 : 첫 번째 주기가 끝난 후 장치를 충분히 건조시킨 상태에서 두 번째 시험을 시행한다.
- 최종측정 : 시험 종료 후 충분히 건조시킨 상태에서 정상 동작하여야 한다.

다음 아래의 그림 2.3.173 ~ 2.3.175는 고온시험, 저온 시험, 온도 변화 사이클 시험에 대한 상세 시험 규격을 정의한 내용이다.

* MIL-STD-810F (M 501.4) : HIGH TEMPERATURE

- Storage, Operation
- 온도 : Ambient Air Condition(High temp. : 33~49 'C)

  Induced Condition(33~71 'C)

* 고온시험 방법 (MIL-STD-202 Method 108, Life- at Elevated Ambient Temperature)
  - 온도 : 70±2℃, 85±2℃, 100±2℃, 125±3℃, 150±3℃, 200±5℃,
    350(tolerance as specified), 500(tolerance as specified)

  -시험시간 : 96h, 250h, 500h, 1000h, 2000h, 3000h, 5000h, 10000h, 30000h,
    50000h

* IEC 68-2-2 : Basic environmental testing procrdure, Test A : Dry heat
  - non heat, heat
  - sudden, gradual
  - 시험조건 : KS규격과 동일



그림 2.3.173 고온 시험의 사양 및 규격 시험 방법 정의

* MIL-STD-810F (M 502.4) : LOW TEMPERATURE

- Storage, Operation
- 온도 :

  Ambient : Mild(-6~-9 'C), Basic(-21~-31 'C), Cold(-37~-46 'C), Severe Cold(-51 'C)

  Induced : Mild(-10~-21 'C), Basic(-25~-33 'C), Cold(-37~-46 'C), Severe Cold(-51 'C)
- Worldwide Probability of Occurrence : - 51 'C(20%)
  - 54 'C(10%)
  - 57 'C(5 %)
  - 61 'C(1 %)

* IEC 68-2-1 : Basic environmental testing procrdure, Test B : Cold
  - non heat, heat
  - sudden, gradual
  - 시험조건 : KS규격과 동일

그림 2.3.174 저온 시험의 사양 및 규격 시험 방법 정의




그림 2.3.175 온도 변화 사이클 시험의 사양 및 규격 시험 방법 정의

온도 변화 사이클 시험은 시험을 진행하기 전에 최고 온도와 최저 온도를 결정을 하여야 한다. 이번 시험을 진행을 하면서 최저 온도는 −20℃~ 최고 온도는 60℃로 정의를 하고 시험을 진행 하게 되었다.

## 4. 모니터링 시스템 개선

### 가. 하드웨어 개선

보호함 축소를 위하여 클라이언트 보호함에는 NI하드웨어 모듈만 설치를 하고 나머지 기존에 있던 Surge Protect와 Power Supply는 실내에 별도의 공간에 설치를 하고 케이블로 연결을 하는 방안을 강구하였다. 하드웨어 모듈을 제외한 나머지 부속품을 제거하고 보호함 축소 제작을 재 진행을 하여 클라이언트 박스를 가로 115 mm, 세로 90mm, 높이 10mm를 축소할 수 있었다. 표 2.3.34는 1차 제작된 보호함 박스와 개선된 보호함 박스의 크기를 비교하여 작성한 내용이다. 하드웨어 보호함을 축소하는 것으로 결론을 도출 하였지만 클라이언트 보호함의 설치 위치를 열차 내부로 변경하는 방법도 검토를 하였다. 그러나 열차 내부에 설치를 하게 되면 중간 소형 터미널 추가 설치가 필요를 하고 배선 단계가 증가되는 문제점이 있었다. 배선 단계가 증가 되면 전기 신호 노이즈 발생 우려가 있어 결국 보류 하게 되었다. 표 2.3.35는 클라이언트 박스를 열차 내부에 설치하는 것에 대한 검토 내용이다.

표 2.3.34 클라이언트 박스 축소 안

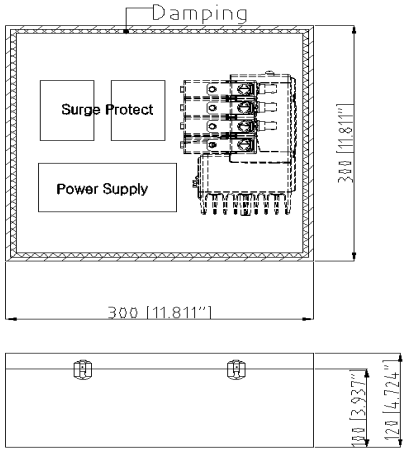
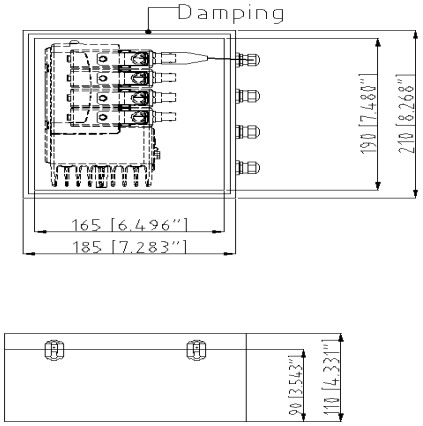
| 기존 기본 설계안 | 개선안 |
|---|---|
|  |  |

표 2.3.35 클라이언트 설치 위치 변경

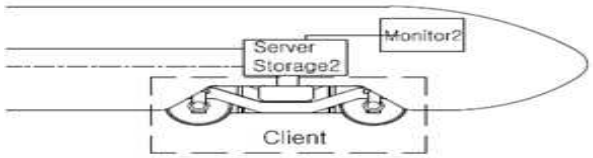
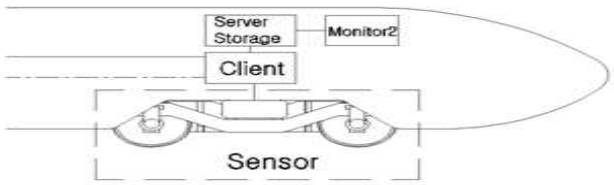
| 구분 | 도면 내용 | 특징 |
|---|---|---|
| 기본 설계안 |  | • Client 열차 하부 감속기 주위 설치<br>• 배선 형태 단순 (noise 발생 우려 적음<br>• 시제품 장착 공간이 매우 협소 |
| 개선안 |  | • Client 열차 내부 동력실 설치<br>– 중간 소형 터미널 추가 설치 필요함<br>– 배선 단계 증가<br>– noise 증가 가능성 있음<br>• 터미널 크기 최소화가 가능 |

표 2.3.36은 하드웨어 채널수 변경 내용과 클라이언트 박스 축소 내용 결과를 요약한 내용이다.

표 2.3.36 시제품 기본 설계 내용 대비 변경 사항

| 구분 | 기본 설계안 | 변경 내용 | 내용 |
|---|---|---|---|
| 채널 | 진동 9ch<br>온도 16ch<br>윤활 4ch<br>속도 1ch | 진동 7ch<br>온도 16ch<br>윤활 4ch<br>속도 1ch | • 2차 감속기 axle측 기어 진동 측정 포인트 삭제<br>• 2차 감속기 axle측 기어는 1차 감속기 헬리컬 기어가 아닌 일반 평기어로 진동에 의한 기어 부하가 적어 이번 진동 측정 대상에서 제외 하여도 문제가 없음 |
| Client 크기 | 300 X 300 X 120 (mm) | 200 X 200 X 110 (mm) | • 기존 Client 박스 내부에 NI모듈 및 파워서플라이, 서지 프로텍터, 터미널 블럭 으로 구성된 시제품에서 Client 박스 내부에는 NI 모듈만 설치하고 나머지 부품들은 객차 내부로 설치 변경 진행 |

| | 기본 설계안 | 변경안 |
|---|---|---|
| 시제품 사진 |  |  |
| 크기 비교 |  | |

나. 소프트웨어 부적합 개선

(1) 소프트웨어 설계 내용 개선

1차년도 소프트웨어 기본 설계안 내용으로 초안을 제작하여 sample rate를 51.2 Ks/s로 설정을 하고 데이터 취득 작업을 진행하였다. 그러나 많은 데이터가 쌓이는 감속기 고속열차의 모니터링 특성상 과도한 연산에 의한 데이터 유실이 발생을 하였다. 다음 그림 2.3.176은 당시 데이터가 유실되는 그래프의 파형을 보여주고 있다. 이러한 문제점이 발생을 하게 되어 sample rate를 25.6 Ks/s, 12.8 Ks/s로 변경을 하면서 데이터 손실 유무 내용을 검증작업을 수행하였으며, 12.8 Ks/s 에서는 데이터 유실 없이 수집 및 연산을 처리하는 것을 확인할 수 있었다. 다음 그림 2.3.177은 sample rate를 12.8 Ks/s로 설정을 하여 데이터 수집을 한 결과 그래프이다.

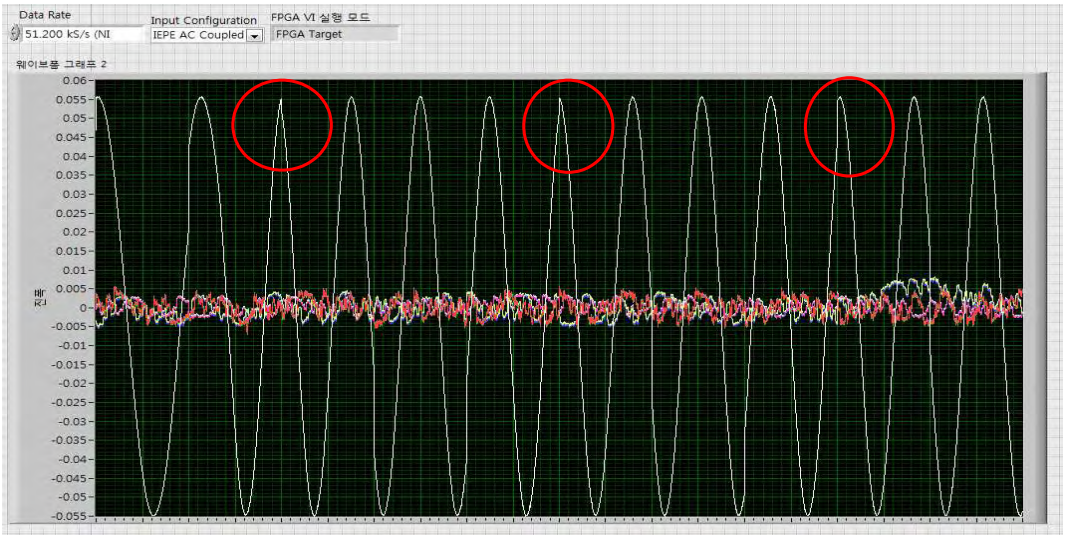



그림 2.3.176 51.2kS/s 로 샘플링 수행시 RawData

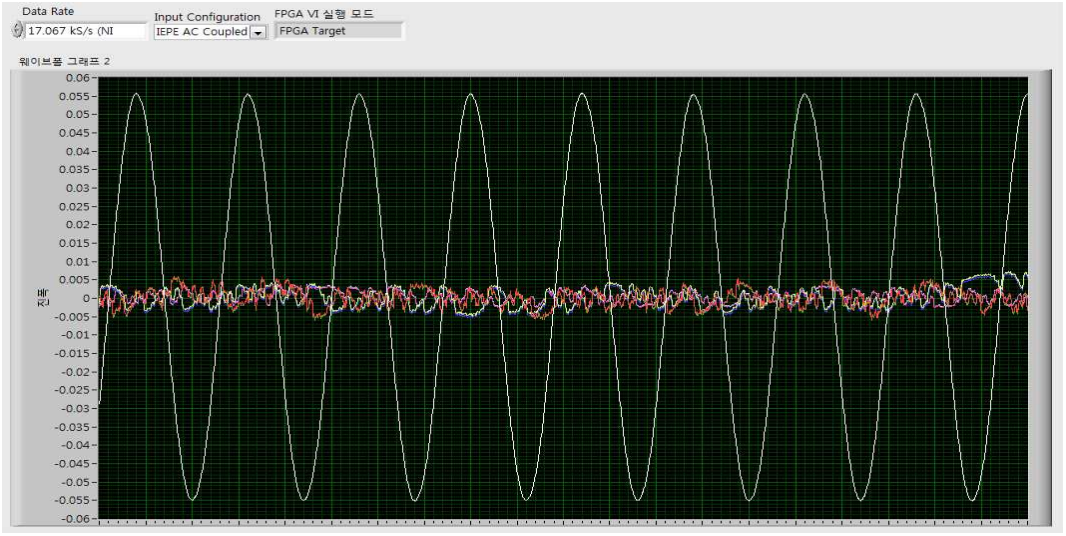



그림 2.3.177 12.8 kS/s 로 샘플링 수행시 RawData

또 다른 발견된 문제점의 하나는 신호의 불규칙성에 관련된 문제점이 있었다. Client 내부에서 블록화한 함수의 파라미터 연산 처리 후 전송하는 과정에서 H/W의 성능상의 문제로 채널신호가 뒤바뀌는 현상이 발생 하였다. 이러한 현상이 발생한 원인은 Client에서 Tachometer의 Pulse 간격을 이용한 회전속도 연산 처리 때 생기는 연산부하에 의한 것으로 밝혀졌다.

이를 해결하기 위해서는 전체 프로그래밍에 블록화 함수를 별도로 분리하여 Tachometer의 연산부하를 줄여야 하였다. 블록화 함수를 별도로 구분을 하고 Tachometer 연산부하를 줄이기 위하여 나눗셈 연산을 상수를 이용한 다른 연산방법으로 대체하여 신호 불규칙 문제를 수정할 수 있었다.

그림 2.3.178은 데이터 신호가 불규칙적으로 들어오는 화면을 발췌한 것이다. 그림을 보면 각 진동 파라미터의 데이터들이 채널별로 구분이 되지 않고 데이터가 서로 섞여서 데이터 해석 자체가 불가능한 상황이다. 실제 열차운행 시 데이터가 이렇게 들어온다면 모니터링 시스템의 기능을 수행할 수 없기 때문에 이 문제점 해결은 향 후 모니터링 시스템 구성에 있어 좋은 사례가 될 것으로 보인다.

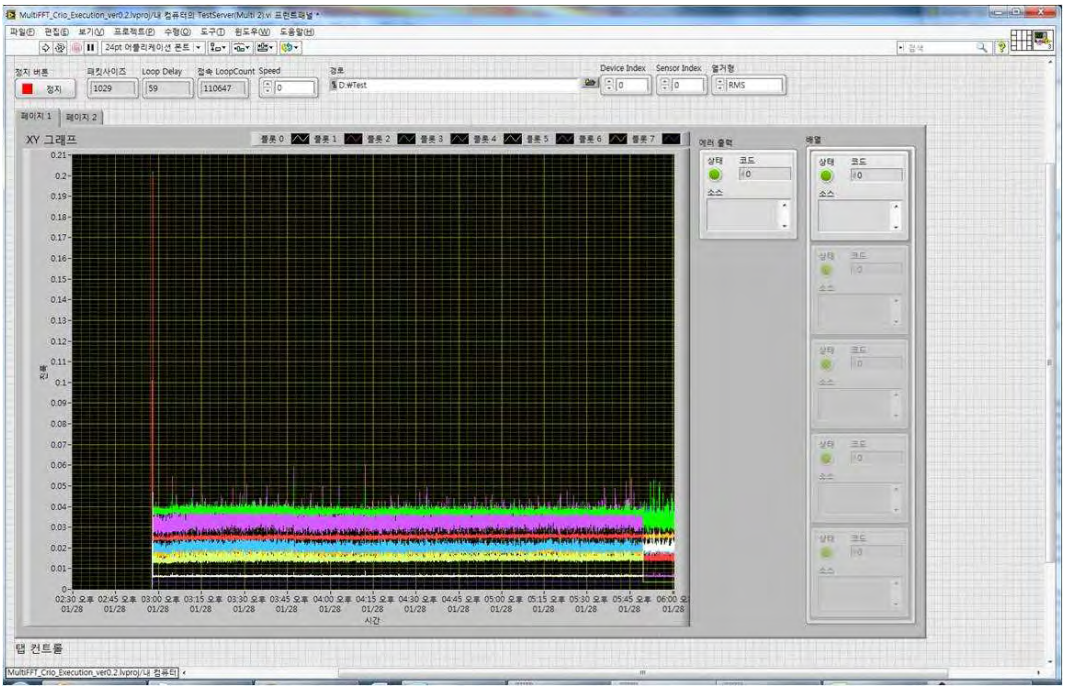



그림 2.3.178 문제 발생 화면 (1)

소프트웨어 성능 시험을 진행하면서 발생된 다른 하나의 문제점은 소프트웨어가 일정시간을 동작한 이후부터 갑자기 대부분의 데이터가 깨져서 전달되는 현상이 발견되었다. 이러한 현상의 원인은 실시간 그래프 출력을 위한 데이터 버퍼(메모리) 사용량이 PC의 한계수치를 넘어서며 발생하는 것으로 판명 되었다. 이를 해결하기 위해 많은 연구를 진행하여 실시간 데이터 그래프를 통해 출력하는 데이터의 크기를 줄여(최근 2시간) 메모리 사용량의 한계치를 넘지 않도록 소프트웨어 수정하는 방법으로 문제점을 해결할 수 있었다. 그림 2.3.179는 데이터가 손상이 되어 들어오는 화면이다. 이 시스템에 대한 사용자는 진동에 대한 전문가가 아니므로 상세한 내용의 데이터를 화면에 보여준다 하더라도 증상이나 상태 이상 유무에 대한 판단을 내리기 어려운 문제점이 있었다. 직관적인 UI(User Interface)를 사용하여 이상이 발생한 것으로 추정되는 위치를 한눈에 확인할 수 있도록 해줘서 주요한 진동주파수 파라미터의 값이 어떻게 변하였는지 확인할 수 있도록 그래프를 이용한 디스플레이를 적용하여 과거로부터 데이터의 변화추이를 확인할 수 있도록 소프트웨어를 일부 개선하였다.

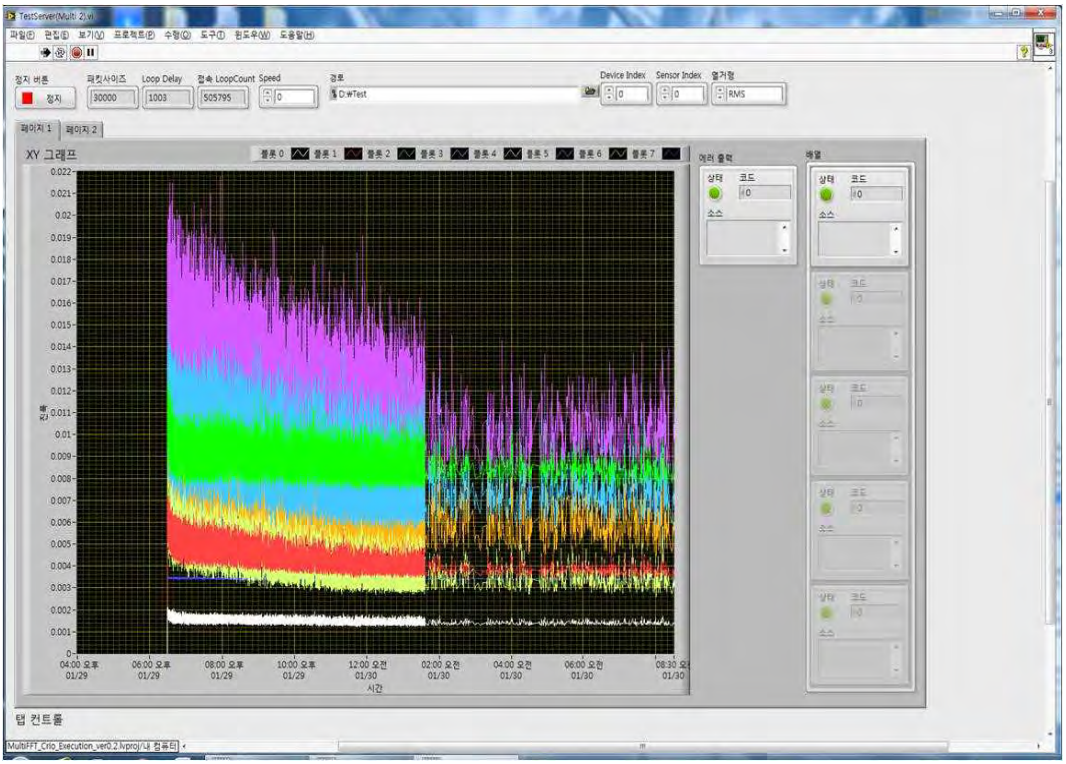



그림 2.3.179 문제 발생 화면 (2)

(2) 소프트웨어 구조 최종 개선 설계

(가) 소프트웨어 시스템 구조 변경

2차년도 시제품 제작을 진행하게 되면서 NI 하드웨어의 모듈이 일부 변경이 되었고 채널수가 조정이 되면서 1차년도 기본설계 내용에서 서브시스템  모델의 구성 내용에 변경이 발생하게 되었다. 1차년도 기본 설계안은 진동 모듈 3개가 설치되고 온도와 윤활 데이터는 아날로그 모듈로 데이터를 취득하는 방식 이였지만 온도 채널수가 늘어나면서 모듈에 대한 구성을 새롭게 구성을 하면서 온도, 윤활 각 요소의 하드웨어 모듈을 별도로 구성을 하여 시스템을 구성하였다. 그림 2.3.180 ~ 그림 2.3.185는 변경된 서브시스템의 메인 모듈의 자료 흐름에 대한 개선 변경내용이다.




그림 2.3.180 배경도(레벨0)

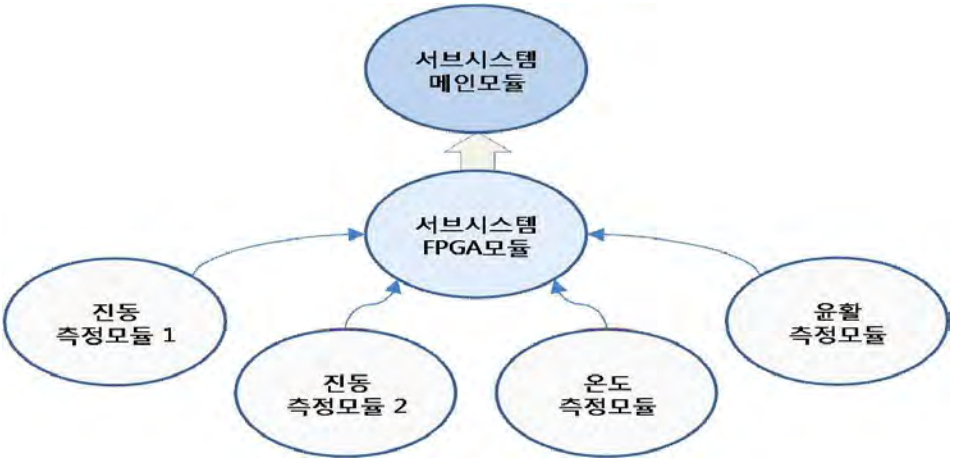



그림 2.3.181 서브시스템 (레벨1)

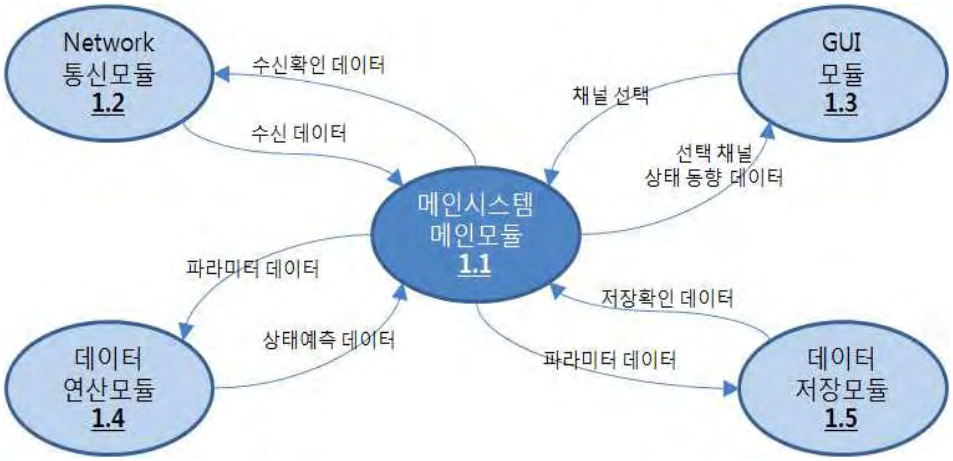



그림 2.3.182 메인시스템 모듈(레벨2)

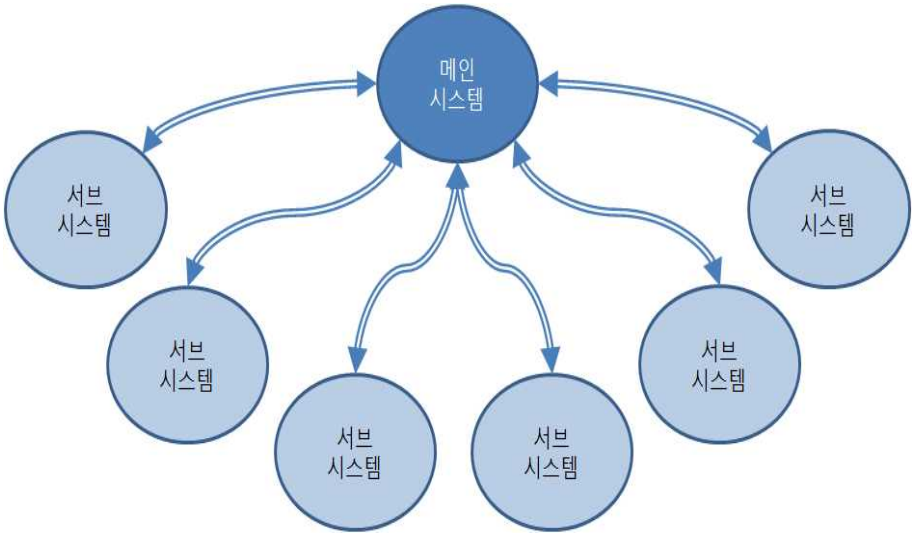



그림 2.3.183 시스템 구조(레벨1)

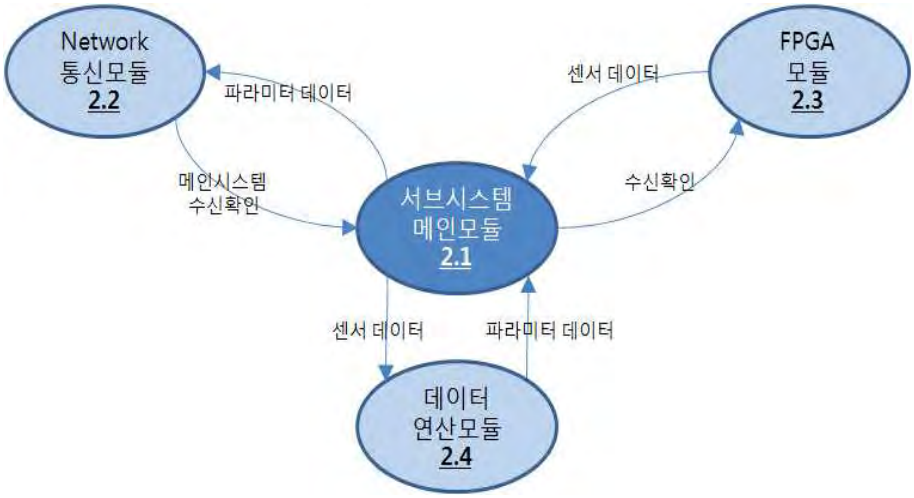



그림 2.3.184 서브시스템 모듈(레벨3)

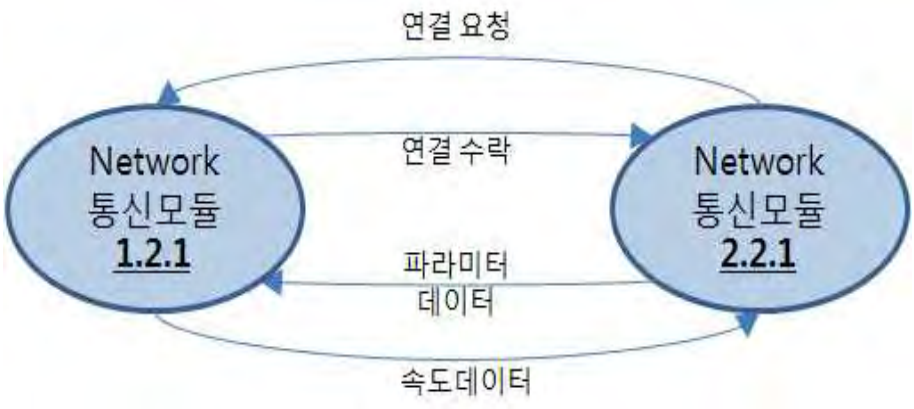



그림 2.3.185 C/S 모델

(나) 프로세스 명세서 최종 확정 내용

변경된 내용을 근거로 소프트웨어의 프로세스 명세서를 최종 확정 할 수 있었다. 표 2.3.37은 그림 2.3.180 ~ 그림 2.3.185 구조 설계내용을 근거로 개선한 소프트웨어 프로세서 명세서 내용의 최종 확정 내용이다.

표 2.3.37 소프트웨어 프로세스 명세서 내용

| 번호 | 1.1 |
|---|---|
| 이름 | 메인시스템 메인모듈 |
| 입력 / 출력 | 파라미터 데이터 수신 From 1.2<br>수신확인 To 1.2<br>상태감시채널 선택 From 1.3<br>선택채널 상태 동향 데이터 To 1.3<br>파라미터 데이터 To 1.4<br>상태예측 데이터 From 1.4<br>파라미터 데이터 To 1.5<br>저장확인 From 1.5 |
| 내용 | 서브시스템에서 전달되어지는 파라미터 데이터를 수신하여, 데이터 연산모듈(1.4)로 전달하고, 모듈에서 감속기의 상태에 재한 예측 진단 데이터를 수신하여, 메모리에 저장한다. 사용자 요청이 들어올 경우 사용자가 선택한 채널의 데이터 변화 동향을 그래프로 보여준다. |
| 번호 | 1.2 |
| 이름 | Network 통신모듈 |
| 입력 / 출력 | 수신확인 To 1.1<br>파라미터 데이터 From 1.1 |
| 내용 | 서브시스템에서 연산해낸 결과 파라미터를 받아 메인시스템 메인모듈(1.1)로 전달하고, 피드백을 받는다. |
| 번호 | 1.2.1 |
| 이름 | Network 통신모듈 |
| 입력 / 출력 | 연결요청 From 2.2.1<br>연결수락 To 2.2.1<br>상태감시 파라미터 데이터 From 1.2.1<br>열차 운행속도 데이터 To 1.2.1 |
| 내용 | 서브시스템과 실제적인 네트워크 세션을 생성하고 열차의 운행속도 데이터를 전달하고, 속도에 따라 추출되는 파라미터 데이터를 수신한다. |
| 번호 | 1.3 |
| 이름 | GUI 모듈 |
| 입력 / 출력 | 채널 선택 정보 From 1.1<br>선택 채널의 상태 누적데이터 To 1.1 |

| | |
|---|---|
| 내용 | 사용자로부터 채널 선택 정보를 입력받고, 그에 해당하는 채널의 데이터를 화면에 표시해준다. |
| 번호 | 1.4 |
| 이름 | 데이터 연산모듈 |
| 입력 / 출력 | 파라미터 데이터 From 1.1<br>감속기 상태 예측 정보 To 1.1 |
| 내용 | 서브시스템들에서 취합한 파라미터 데이터를 메인모듈(1.1)로부터 전달받고, 이상상태의 종류와 진행정도를 계산하여 메인모듈로 되돌려 준다. |
| 번호 | 1.5 |
| 이름 | 데이터 저장모듈 |
| 입력 / 출력 | 파라미터 데이터 From 1.1<br>저장확인 To 1.1 |
| 내용 | 데이터를 저장장치에 저장하는 기능을 수행한다. |
| 번호 | 2.1 |
| 이름 | 서브시스템 메인모듈 |
| 입력 / 출력 | 각 센서의 RawData From 2.3<br>RawData 수신확인 To 2.3<br>각 센서의 RawData To 2.4<br>추출된 파라미터 데이터 From 2.4<br>추출된 파라미터 데이터 To 2.2<br>수신확인 From 2.2 |
| 내용 | 메인모듈은 FPGA에서 수집된 진동/온도/윤활데이터를 전달받아, 데이터 연산모듈을 통해 각종 데이터를 추출해내고, 추출해낸 결과를 통신모듈을 통하여 메인시스템으로 전달한다. |
| 번호 | 2.2 |
| 이름 | Network 통신모듈 |
| 입력 / 출력 | 추출된 파라미터 데이터 From 2.1<br>수신확인 To 2.1 |
| 내용 | 메인모듈로부터 파라미터를 전달받아 메인시스템으로 전달하고, 메인시스템에서 넘어온 수신확인 데이터를 메인모듈로 전달한다. 이때 전달받은 수신확인데이터에는 열차의 현재 운행속도 정보를 포함한다. |
| 번호 | 2.2.1 |
| 이름 | Network 통신모듈 |
| 입력 / 출력 | 연결요청 To 1.2.1<br>연결수락 From 1.2.1<br>파라미터 데이터 To 1.2.1<br>속도 데이터 From 1.2.1 |

| | |
|---|---|
| 내용 | 서브시스템이 가동되면, 메인시스템에 연결을 요청하고, 연결이 수락되면 파라미터 데이터를 보내고 속도데이터가 포함된 수신확인 데이터를 받아 메인모듈(2.1)로 전달한다. |
| 번호 | 2.3 |
| 이름 | FPGA 모듈 |
| 입력 / 출력 | 센서 데이터 To 2.1<br>수신확인 From 2.1 |
| 내용 | 센서로부터 측정된 각각의 센서데이터를 취합하여 메인시스템(2.1)로 전달하고, 수신확인을 받는다. |
| 번호 | 2.4 |
| 이름 | 데이터 연산 모듈 |
| 입력 / 출력 | 센서 데이터 From 2.1<br>연산된 파라미터 데이터 To 2.1 |
| 내용 | FPGA 모듈(2.3)을 통해 취득된 센서데이터와 네트워크 통신모듈(2.2)을 통해 전달받은 운행속도 정보를 메인모듈(2.1)에서 전달받고, 연산된 파라미터 데이터를 메인모듈로 되돌려 준다. |

(3) 소프트웨어 GUI 개선

(가) 메인화면

초기에 소프트웨어의 GUI 메인화면은 아래의 그림 2.3.186과 같이 구성을 하였다. 초기의 그림은 직관적으로 사용자에게 운행정보를 전달하기 위하여 각 시스템에서 발생하는 이벤트를 기록하고 감속기가 장착된 시스템에서 이상 징후가 발생이 되면 즉각 화면에 표시를 해주어 운전자가 쉽게 알아볼 수 있도록 시스템을 구성하였다. 초기의 감시 진단 GUI는 아래의 그림 2.3.187과 같이 구성을 하였다. 감속기 모델링 화면에 진동, 윤활, 온도의 각 인자가 그림과 같이 적색 그래프로 즉시 하나의 화면에 표시가 되어 운전자가 즉시 이상부위에 대하여 확인이 가능할 수 있도록 구성을 하였으나 사용자 측면에서 봤을 때, 이상이 발생이 되었을 때 어떠한 이상이 있는지 구분이 어려운 점이 발견되었다.

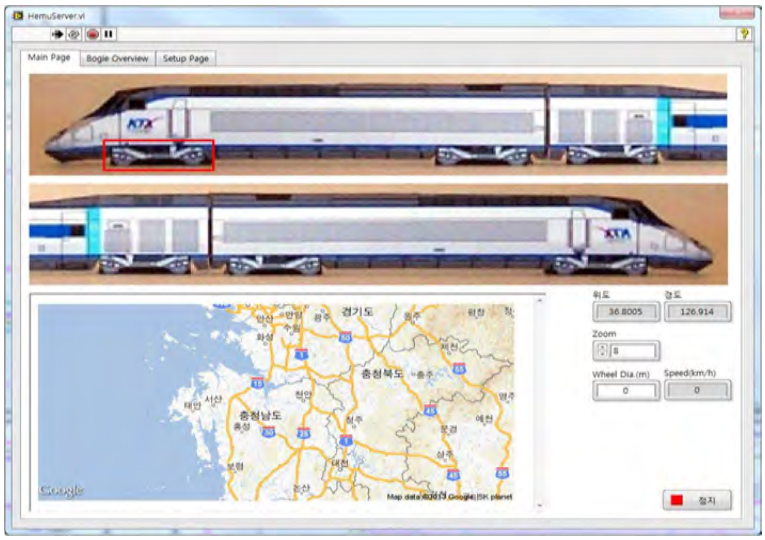



그림 2.3.186 개선 전 GUI 구성 화면




그림 2.3.187 개선 전 진동 진단 알람 발생 화면

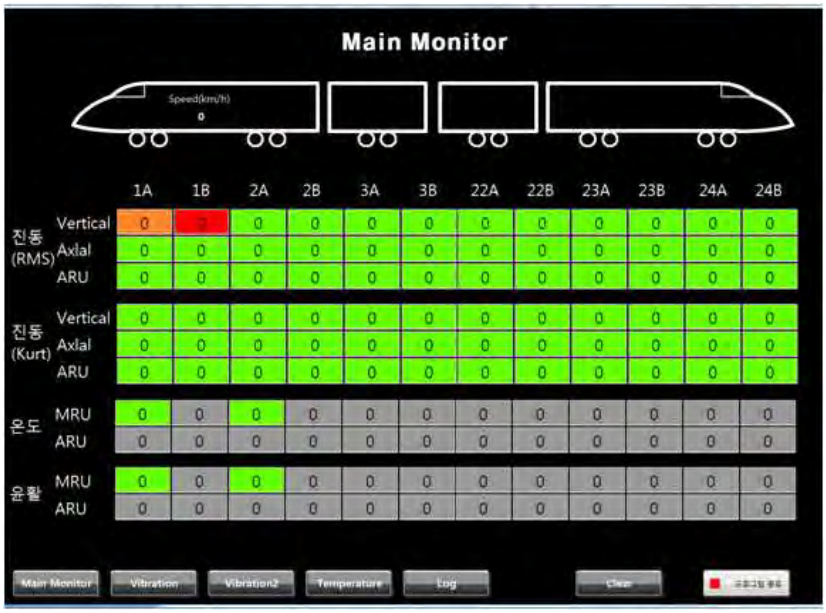



그림 2.3.188 개선 소프트웨어 GUI 메인 화면

사용자가 알람이 발생을 하였을 때 어떠한 이유로 감속기에서 이상이 발생하였는지 좀 더 쉽게 확인이 가능할 수 있도록 소프트웨어 GUI를 진동, 윤활, 온도를 메인 화면에서는 동시에 확인을 하고 각각 진동, 윤활, 온도를 별도로 확인이 가능하도록 소프트웨어를 수정 하였다. 개선된 소프트웨어의 메인 화면은 진동요소 진단 파라미터 2종(RMS, Kurtosis), 온도, 윤활을 메인화면에 수치화 하여 보여주고, 이상상태를 배경색을 이용해 2단계로 표시할 수 있도록 수정 하였다. 다음 그림 2.3.188은 개선된 소프트웨어의 메인 화면이다.

(나) 진동 주파수 표시 화면

진동 파라미터 화면은 그래프를 이용하여 실시간으로 열차속도, 진동량, 각 파라미터별 진동 수치를 표시를 해주고 변화 추이를 계속 확인이 가능하도록 개선을 하였다. 다음 그림 2.3.189는 진동 파라미터 취득 화면이다.




그림 2.3.189 진동 데이터 취득 화면

(다) 온도 표시 화면 개선

온도 표시 화면은 각 포인트별 온도를 한 눈에 볼 수 있도록 구성을 하였으며, 실시간으로 변화 추이를 확인이 가능하도록 그래프를 추가 하였다. 또한 온도센서가 단선이 될 경우 해당 포인트에 대한 값은 배경색이 회색으로 보일 수 있도록 처리를 하였다. 다음 그림 2.3.190은 온도 표시부에 대한 화면이다.

다음 그림 2.3.191은 윤활 취득 내용에 대한 개선 화면이다.

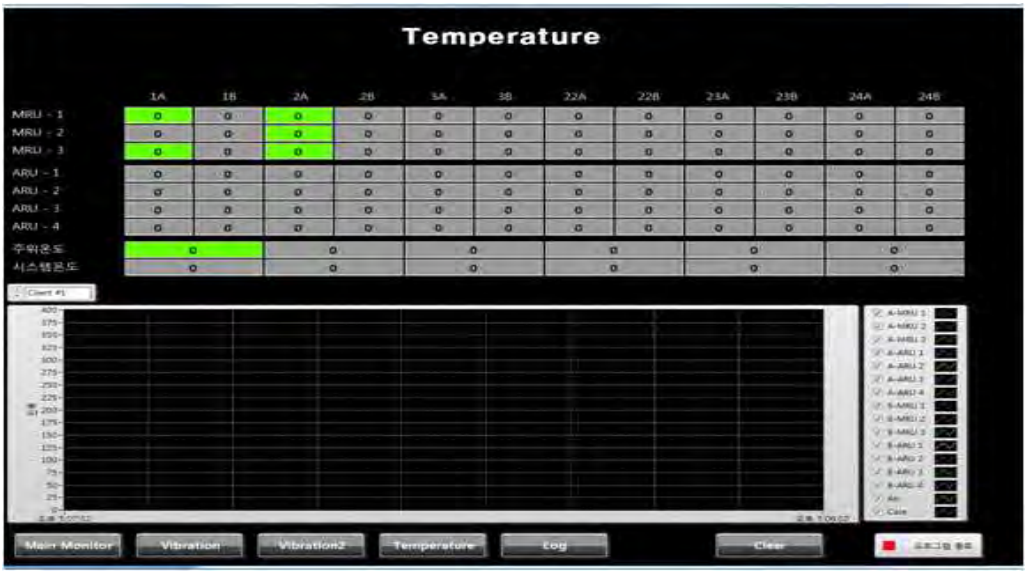



그림 2.3.190 온도 표시 화면 개선

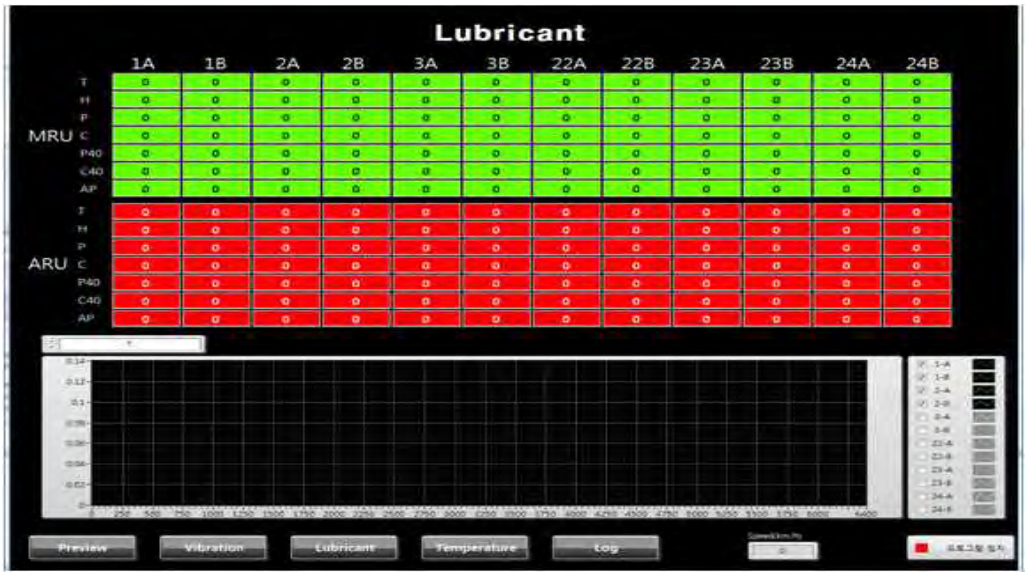



그림 2.3.191 윤활 표시 화면 개선

GUI 구성 별도로 저장된 데이터를 조회가 가능하도록 각 파라미터에 대한 데이터를 시간별로 조회를 할 수 있도록 하여 감속기 이상 데이터의 이력관리가 가능할 수 있도록 소프트웨어를 개선하였다. 다음 그림 2.3.192와 그림 2.3.193은 저장된 데이터 조회용 소프트웨어의 화면이다.

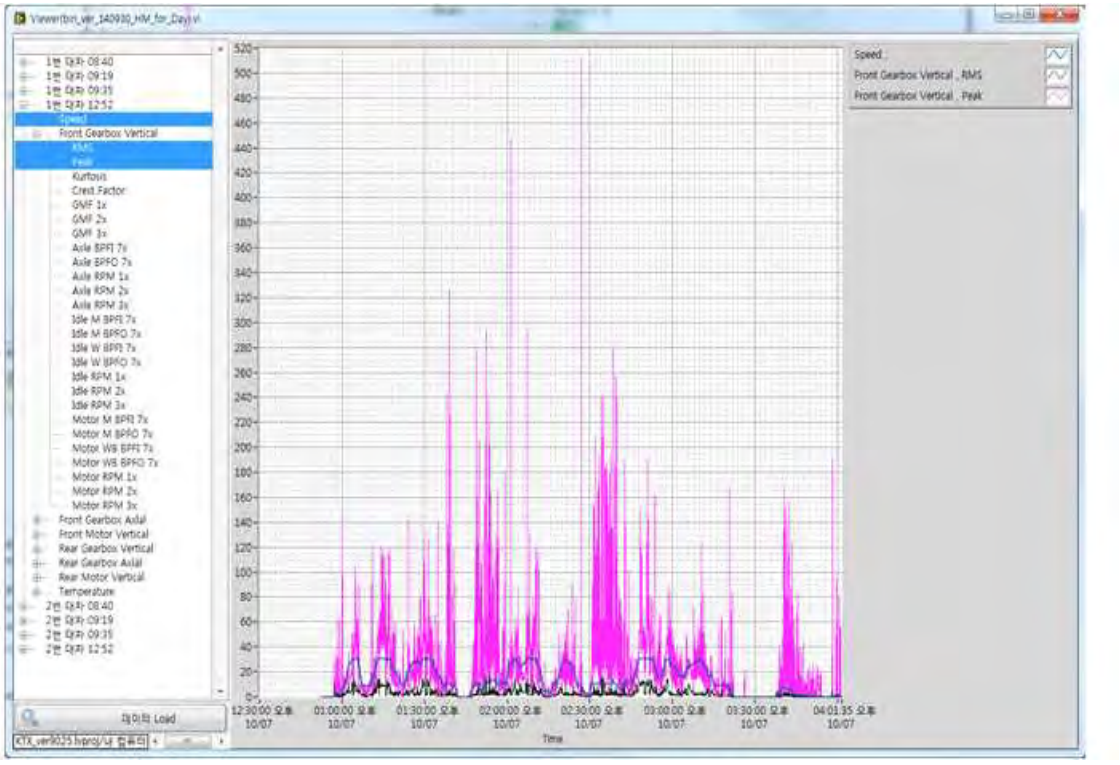



그림 2.3.192 데이터 과거 이력 조회용 소프트웨어 화면 (1)

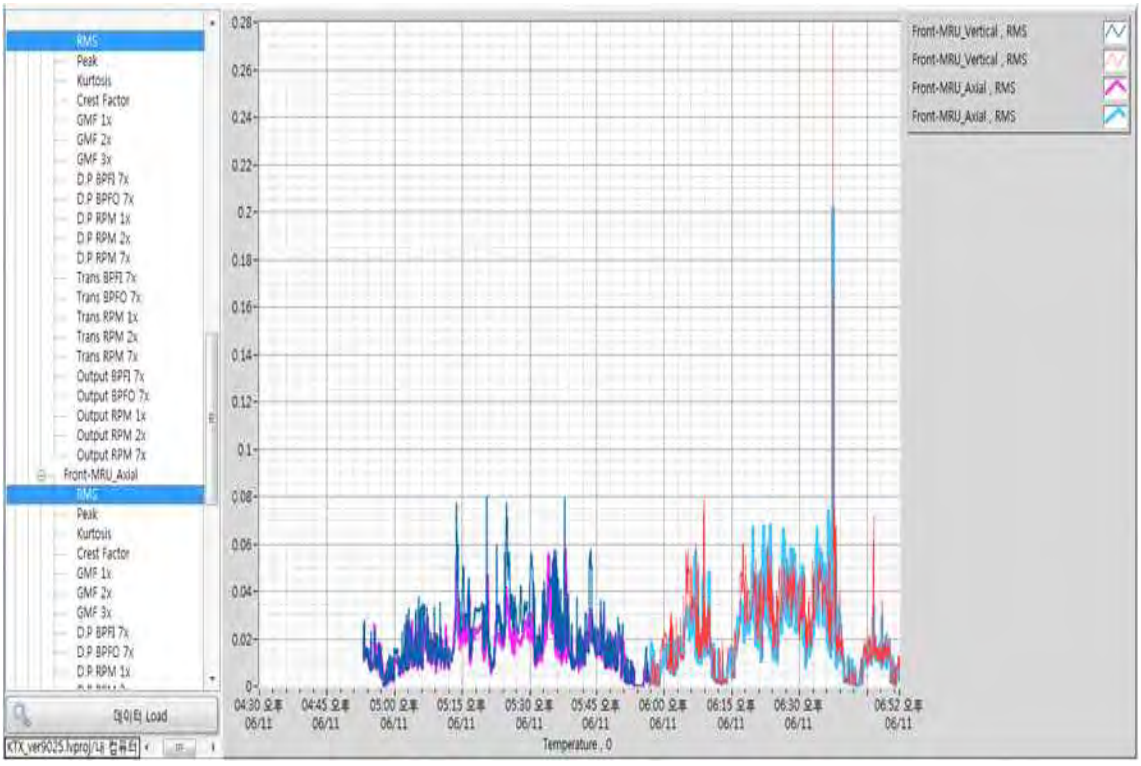



그림 2.3.193 데이터 과거 이력 조회용 소프트웨어 화면 (2)

## 5. 모니터링 시스템 설명서 및 매뉴얼

가. 센서 결선 정보

1대의 Client는 1대의 대차(기어박스 2세트)를 담당하도록 설계되어 있으며, 각 채널의 센서 연결정보는 아래의 표 2.3.38을 따른다.

표 2.3.38 각 채널의 센서 연결 정보

| 모듈 이름 | 채널 No. | 센서 포인트 | 기타 |
|---|---|---|---|
| 가속도 모듈 #1 | 0 | #1 Gearbox MRU Vertical | IEPE Sensor |
| | 1 | #1 Gearbox MRU Axial | IEPE Sensor |
| | 2 | #1 Gearbox ARU Vertical | IEPE Sensor |
| | 3 | Bogie Axial | IEPE Sensor |
| 가속도 모듈 #2 | 0 | #2 Gearbox MRU Vertical | IEPE Sensor |
| | 1 | #2 Gearbox MRU Axial | IEPE Sensor |
| | 2 | #2 Gearbox ARU Vertical | IEPE Sensor |
| | 3 | RPM Sensor | - |
| 온도 모듈 | 0~2 | #1 Gearbox MRU Bearing | T type |
| | 3~6 | #1 Gearbox ARU Bearing | T type |
| | 7~9 | #2 Gearbox MRU Bearing | T type |
| | 10~13 | #2 Gearbox ARU Bearing | T type |
| | 14 | System Box | T type |
| | 15 | Outside | T type |
| 윤활모듈 | 0 | #1 Gearbox MRU | |
| | 1 | #1 Gearbox ARU | |
| | 2 | #2 Gearbox MRU | |
| | 3 | #2 Gearbox ARU | |

나. 사용설명서

(1) 프로그램 설치

(가) Setup.exe 파일을 실행한다. 다음 그림 2.3.194 참조

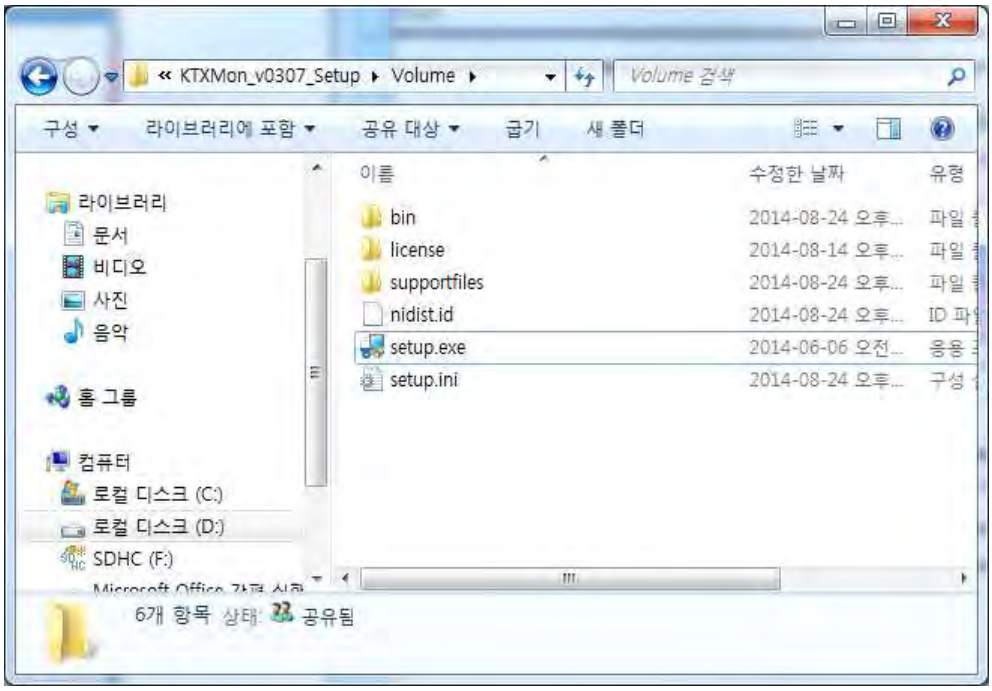



그림 2.3.194 Setup.exe 파일을 실행 화면

(나) 설치경로를 지정해준다. 그림 2.3.195 참조

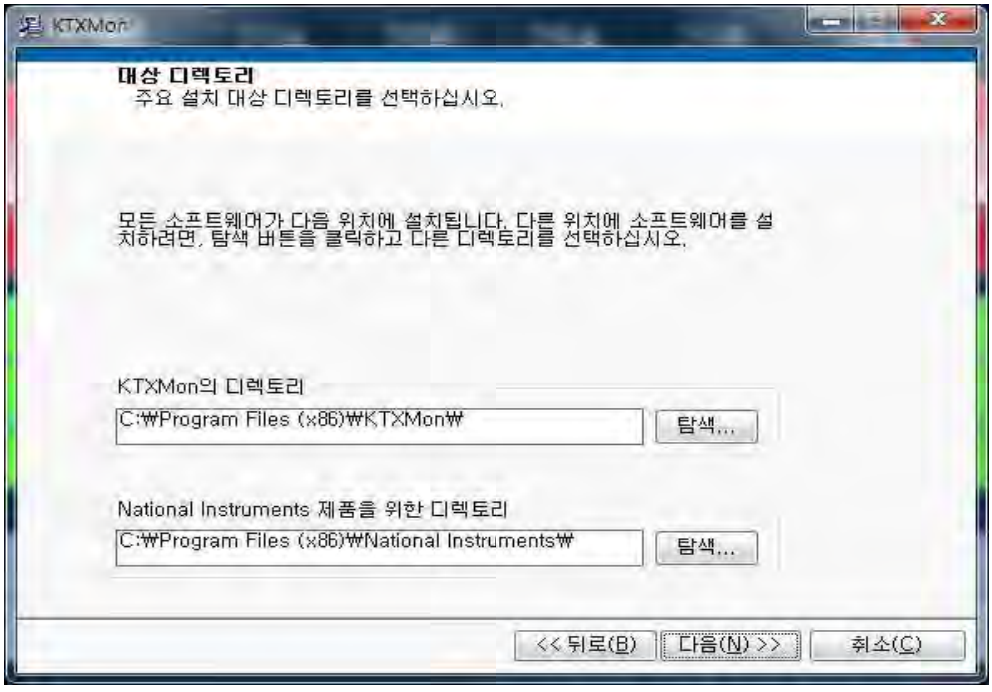



그림 2.3.195 설치 경로 설정 화면

(다) 라이센스 협약에 동의하라는 메시지가 나타난다. 일반적인 프로그램 라이브러리 사용에 대한 라이센스이며, 과금 되는 부분이 아니므로 동의하고 다음단계로 진행한다. 다음 그림 2.3.196 참조

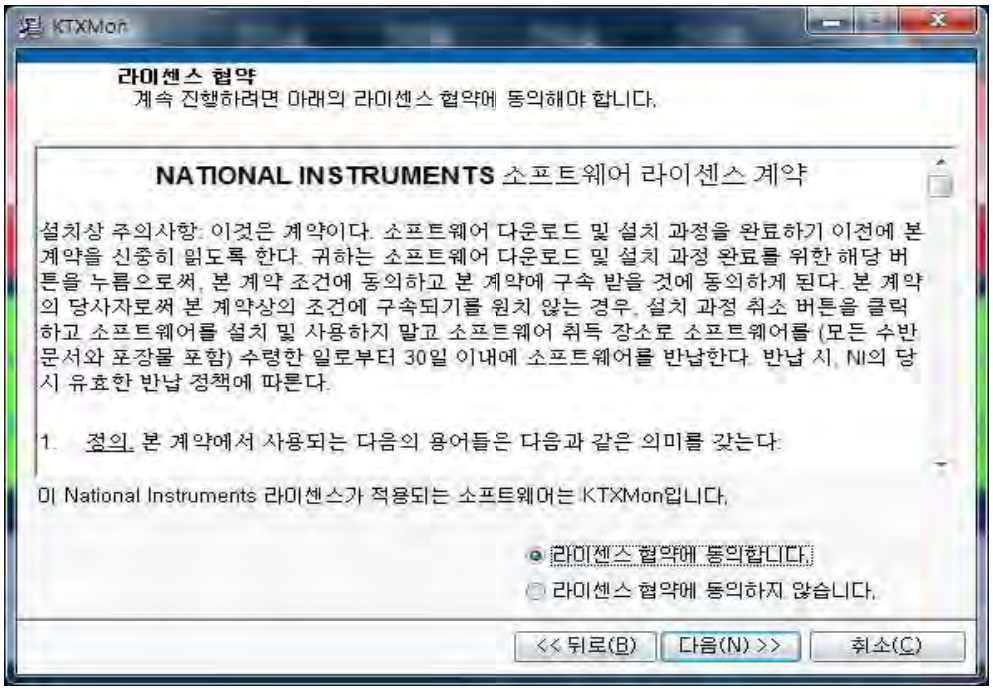



그림 2.3.196 라이센스 동의 화면

(라) 설치정보를 확인하자. 만약 설치될 파일들보다 더 높은 버전이 설치되어 있는 경우 해당 라이브러리에 대한 설치는 제외된다.(이런 경우에는 라이브러리 설치가 되지 않아도 실행하는데 문제가 없는 것이므로, 그냥 진행해도 된다.) 다음 그림 2.3.197을 참고한다.

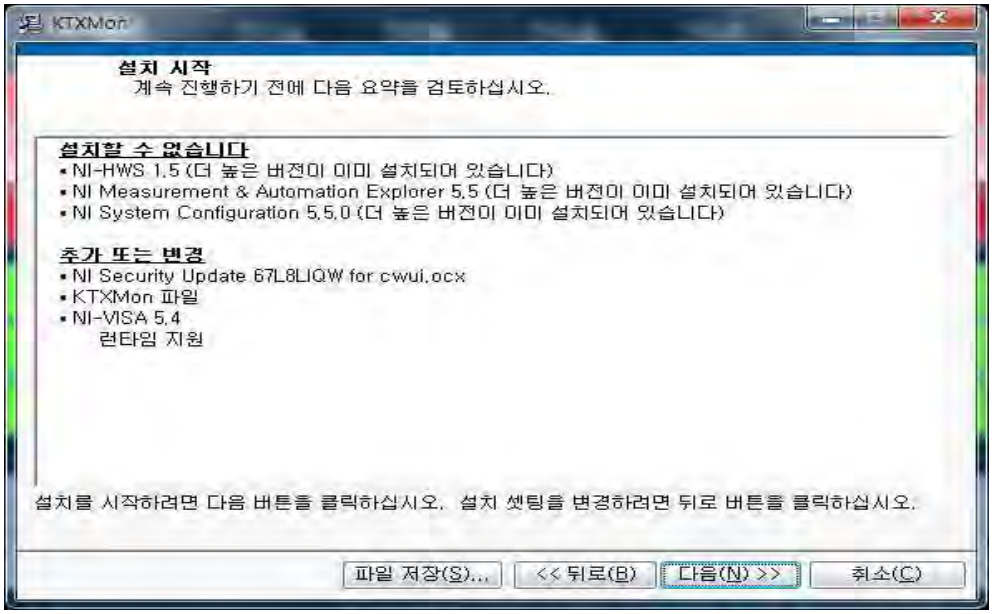



그림 2.3.197 설치 정보 확인 화면

(마) 프로그램이 설치완료 되기를 기다린다. 다음 그림 2.3.198을 참고한다.

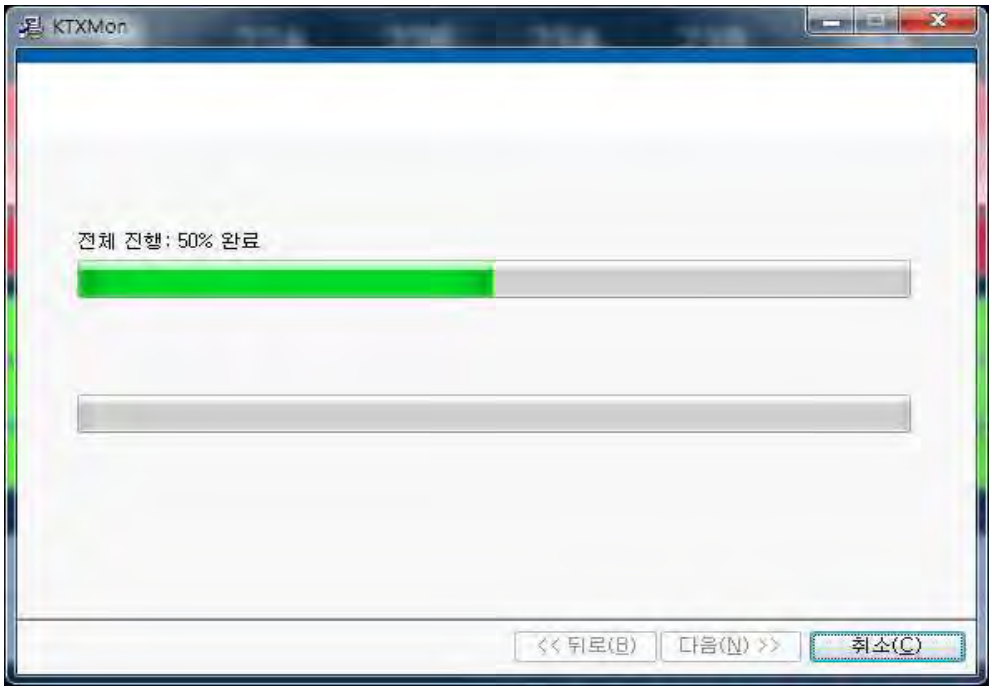



그림 2.3.198 설치 진행 화면

(바) 설치가 완료되었다. 다음 그림 2.3.199를 참고 한다.

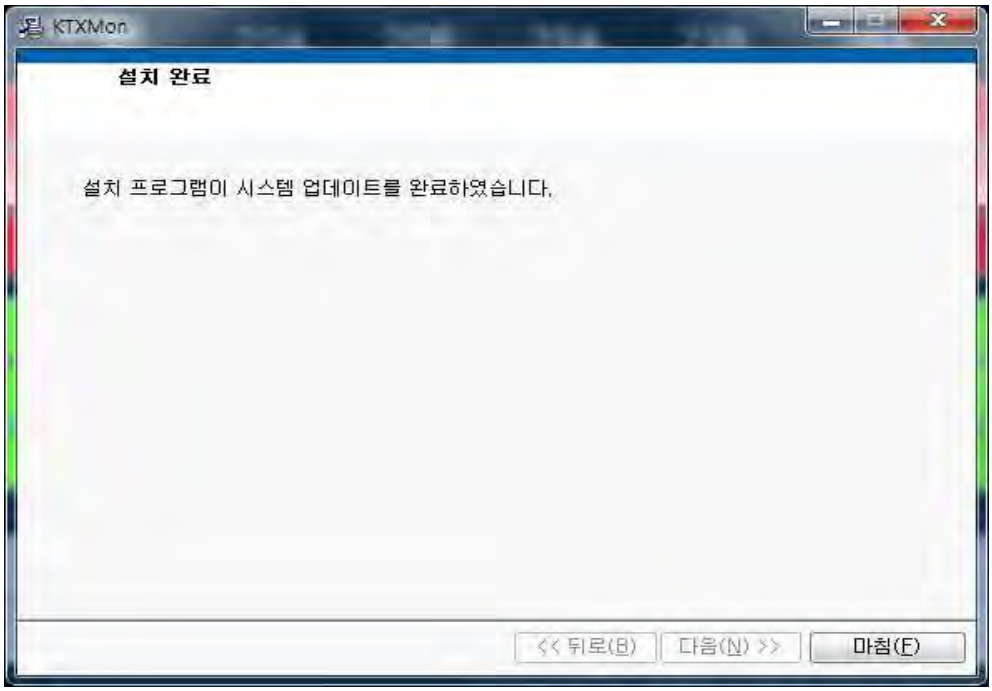



그림 2.3.199 설치 완료 화면

(2) 모니터링 시스템 초기 설정

시스템의 초기 설정은 Server프로그램이 설치된 폴더에 존재하는 setup.ini 파일에 저장되며, 사용자의 환경에 맞추어 설정해주어야만 정상적으로 사용할 수 있다. 다음 그림 2.3.200은 파일을 열어 모니터링 시스템의 데이터를 초기 설정을 하는 시작화면이다.

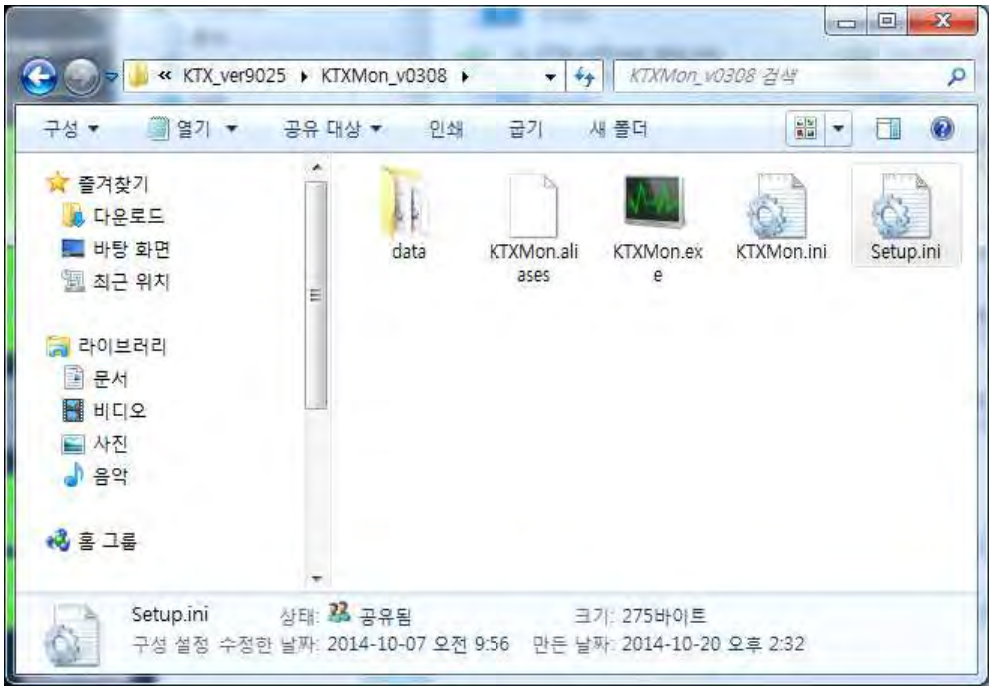



그림 2.3.200 데이터 파일 초기 설정 화면

파일을 열어 항목을 확인하자. 다음 그림 2.3.201은 파일을 열은 화면이다.

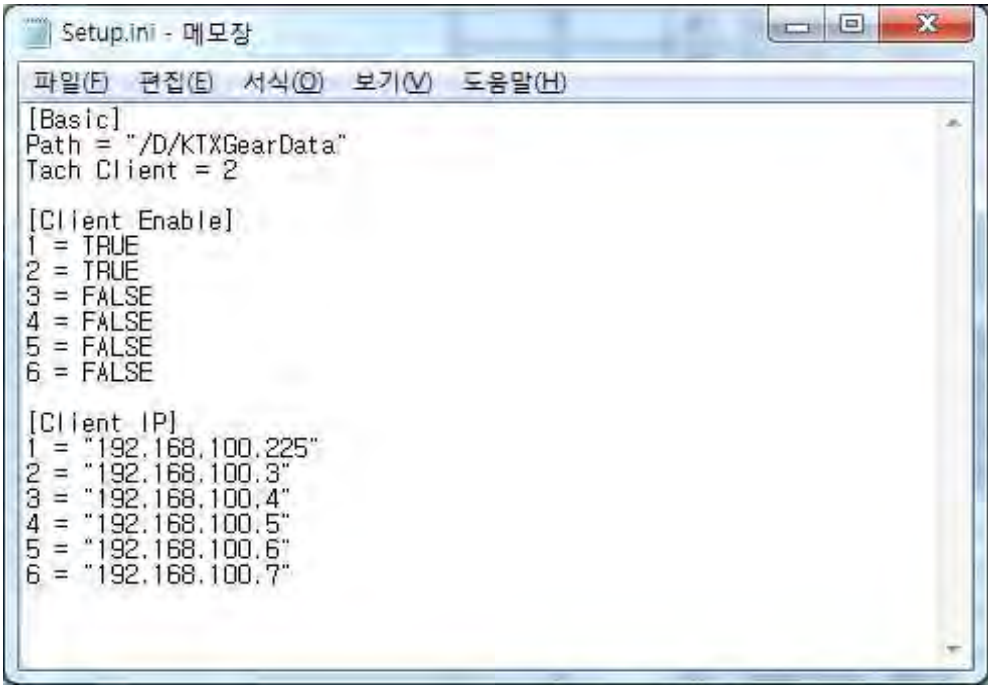



그림 2.3.201 파일을 오픈한 화면

위의 그림 2.3.194~ 201 각 항목에 대한 설명은 아래와 같다.

- Path(Basic) : 데이터 저장경로를 설정하는 항목이다.
- Tach Client(Basic) : 6개의 클라이언트 시스템 중에서 기준으로 삼을 RPM센서를 설정하는 항목이다. 각각의 클라이언트에 RPM센서가 연결될 경우에는 사용자 모니터링 화면에 표시하는 속도값의 기준으로만 사용되며, RPM센서가 연결되지 않은 클라이언트는 이 기준데이터를 가져가서 활용하도록 되어있다.
- Client Enable 그룹 : 각각의 클라이언트와의 연결여부를 설정하는 항목이다. 이는 클라이언트에 문제가 발생한 경우, 서버는 해당 클라이언트와의 연결시도에 꽤 많은 리소스를 낭비(통신구조상 어쩔 수 없이 발생되는 부분이다.)하여 시스템 전반적인 성능을 저하시키는 문제점을 해결하기 위하여 추가되었다.
- Client IP 그룹 : 각각의 클라이언트 연결 IP 주소를 설정하는 부분이다.

위의 내용들을 설치된 환경에 맞게 설정해주도록 한다.

(3) 프로그램 실행

(가) Windows XP이하 OS에서 실행시킬 경우 설치 시 설정한 경로로 직접 찾아가거나, 시작메뉴의 프로그램 그룹에서 프로그램을 실행시킨다. 다음 그림 2.3.202는 확인한다.

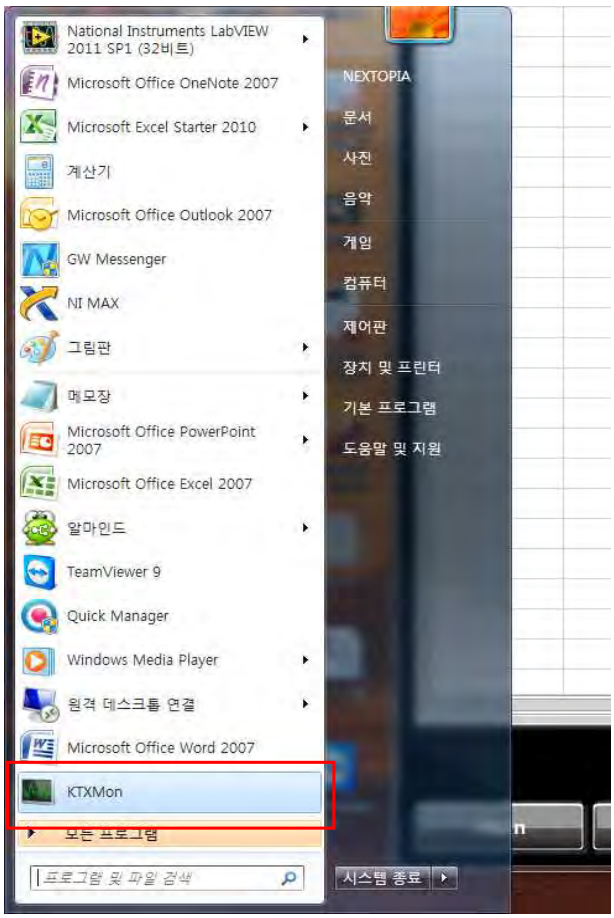



그림 2.3.202 초기 프로그램 실행화면

(나) Windows 7이상의 OS에서는 보안이 강화되어 일반적인 실행으로는 데이터를 저장시킬 수 없다. 따라서 관리자권한을 이용해 실행해 주어야만 한다. 관리자권한으로 실행시키는 방법은 먼저 해당 프로그램의 실행파일이나, 바로가기 파일에서 마우스 오른쪽버튼을 눌러 팝업 메뉴를 나타나게 한 후에, 아래와 같이 메뉴 중에서 “관리자 권한으로 실행(A)” 항목을 실행시키면 된다. 다음 그림 2.3.203을 확인한다.




그림 2.3.203 관리자 권한 실행 화면

(4) 프로그램 메뉴 설명

(가) 공통메뉴

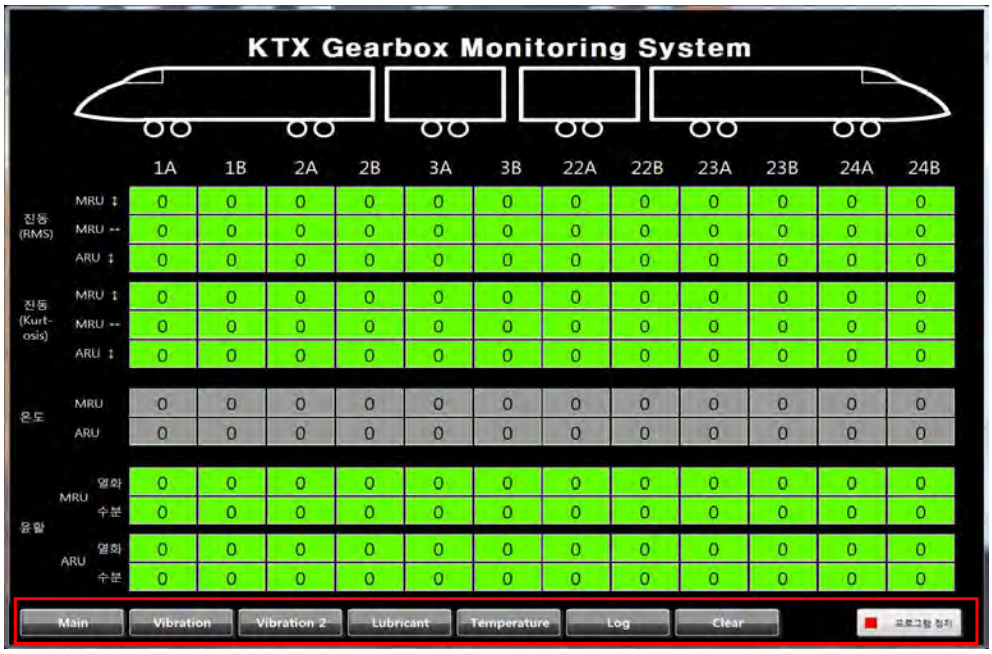



그림 2.3.204 모니터링 시스템 메뉴 함목 화면

프로그램 하단의 버튼들은 공통메뉴로 어느 화면에서나 동일하게 나타나고, 동일하게 동작하는 기능을 가지고 있다.

각각의 기능은 아래와 같다.

① Main : 진동, 윤활, 온도에 대한 전반적인 부분을 한눈에 볼 수 있는 메인화면으로 전환시켜준다.
② Vibration : 진동에 대한 변화추이를 볼 수 있는 그래프 화면으로 전환시켜준다.
③ Vibration2 : 실시간으로 전달되는 센서별 진동데이터를 조합하여 동일주파수 항목끼리 비교해 확인할 수 있는 화면으로 전환시켜 준다.
④ Lubricant : 감속기에 설치된 센서를 통해 실시간으로 전달되는 윤활정보를 한눈에 확인할 수 있는 표와 채널을 선택하여 변화추이를 확인할 수 있는 그래프가 배치된 화면으로 전환시켜준다.
⑤ Temperature : 감속기에 연결된 온도센서를 통해 전달되는 온도정보를 한눈에 확인할 수 있는 표와 채널을 선택하여 변화추이를 확인할 수 있는 그래프가 배치된 화면으로 전환시켜준다.
⑥ Log : 현재 운행 중인 상황에서 발생했던 주의/경고 이력을 볼 수 있는 화면으로 이동시켜준다.
⑦ Clear : 현재 메모리 내부에 저장된 센서데이터 버퍼를 초기화시켜 그래프를 지워준다.(데이터는 프로그램에서 수신과 동시에 파일로 저장하기 때문에 후에 Viewer 프로그램을 이용해서 다시 조회가 가능하다.)
⑧ 프로그램 종료 : 프로그램을 종료시킨다.

(나) 메인 화면

아래의 그림 2.3.205의 모니터링 시스템의 메인화면은 각 요소별로 중요한 정보들을 모아서 표시해주는 화면으로, 진동/온도/윤활정보 중에서 이상 진단 요소 중에서 중요한 항목들만을 추출해놓았다. 만일 각각의 요소 중에서 주의/경고에 해당하는 임계값을 넘거나, 이상 진단 조건에 충족하는 데이터가 수신될 경우 해당 위치의 배경색이 주황(주의)/빨강(경고)색으로 바뀌므로, 배경색이 바뀌어 계속 유지되는 경우, 설비상태의 점검을 의뢰하도록 한다. 다음 그림 2.3.206을 참고 한다.

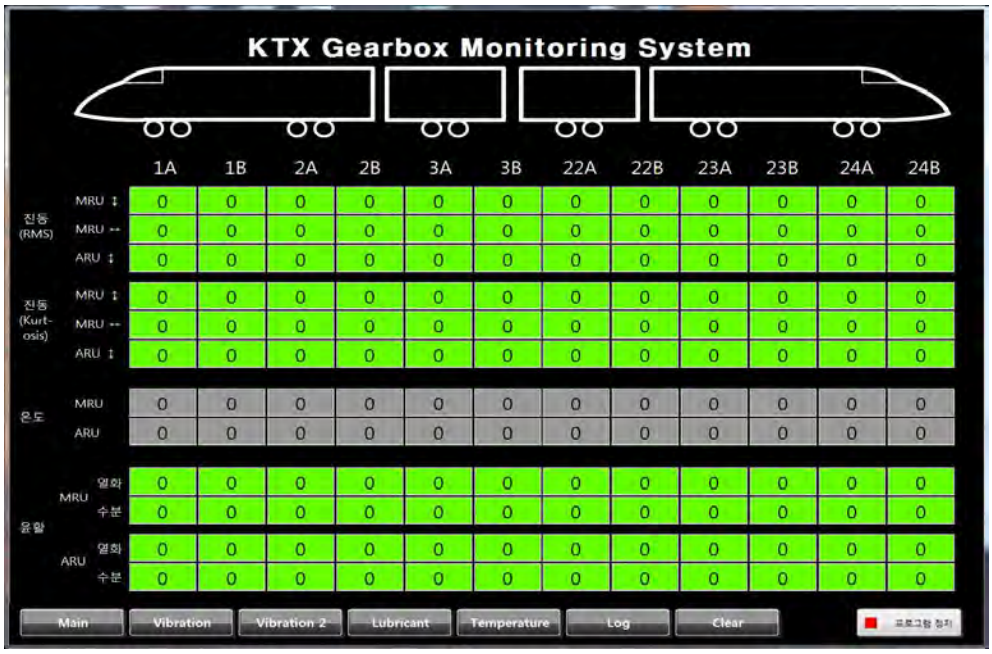



그림 2.3.205 모니터링 시스템 메인 화면




그림 2.3.206 HEMU에 실제 적용하여 테스트하던 중 나타났던 주의/경고 알람화면

(다) Vibration 화면

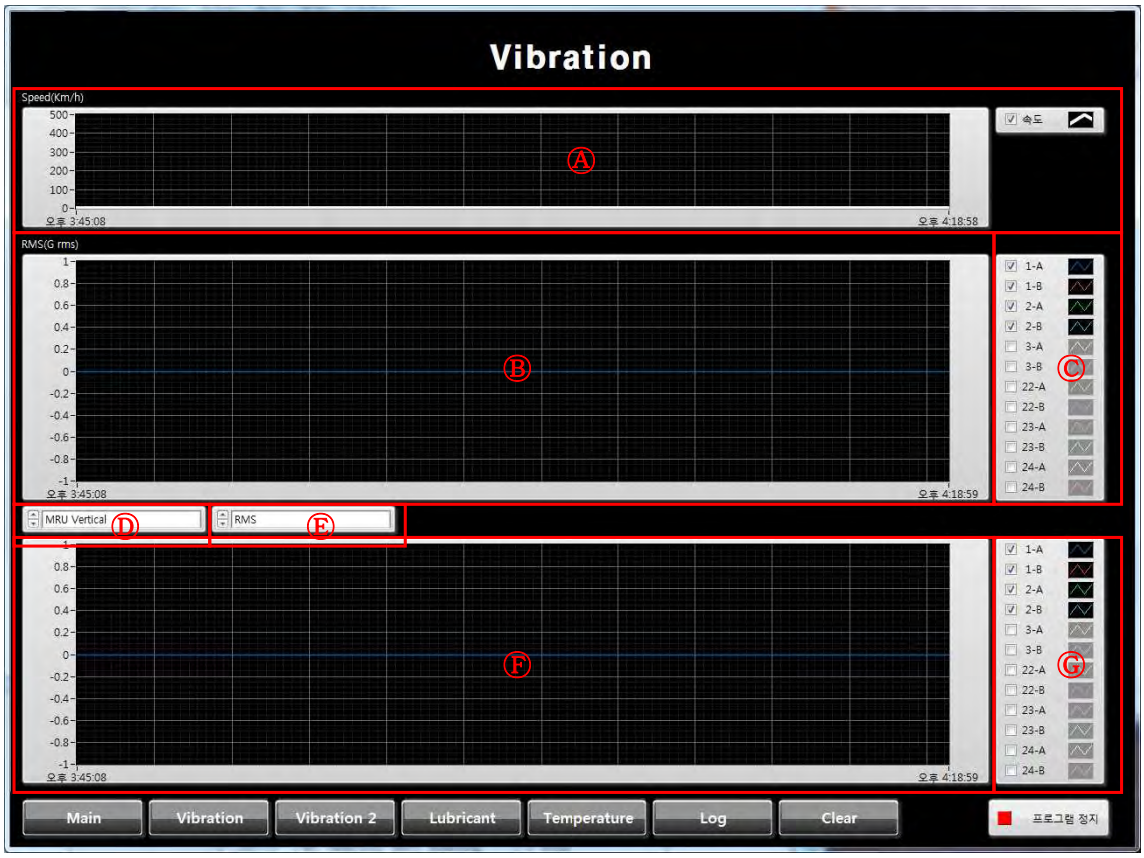



그림 2.3.207 모니터링 시스템 진동 화면

현재 운행상태에 대한 진동 변화추이를 볼 수 있는 화면이다. 각각의 부분에 대한 설명은 아래와 같다. 위의 그림 2.3.207의 영문 표시를 확인 하여 다음 자료를 참고한다.

① 속도의 변화추이를 나타내는 그래프
② Ⓓ항목에서 선택된 축의 RMS(진동)값에 대한 변화추이를 나타내는 그래프
③ Ⓑ그래프에서 나타낼 대차를 선택할 수 있는 체크박스
④ Ⓑ,Ⓕ그래프에서 표시할 대차를 선택하는 드롭다운 리스트박스 (그림 2.3.186)
⑤ Ⓕ그래프에서 표시할 진동 파라미터를 선택하는 드롭다운 리스트박스. Ⓓ항목에서 어떤 축을 선택하느냐에 따라 선택할 수 있는 리스트가 바뀐다.

다음 아래의 그림 2.3.208 ~ 2.3.210를 참고 한다.

⑥ Ⓓ,Ⓔ항목에서 선택된 진동데이터 변화추이를 나타내는 그래프
⑦ Ⓕ그래프에서 나타낼 대차를 선택할 수 있는 체크박스

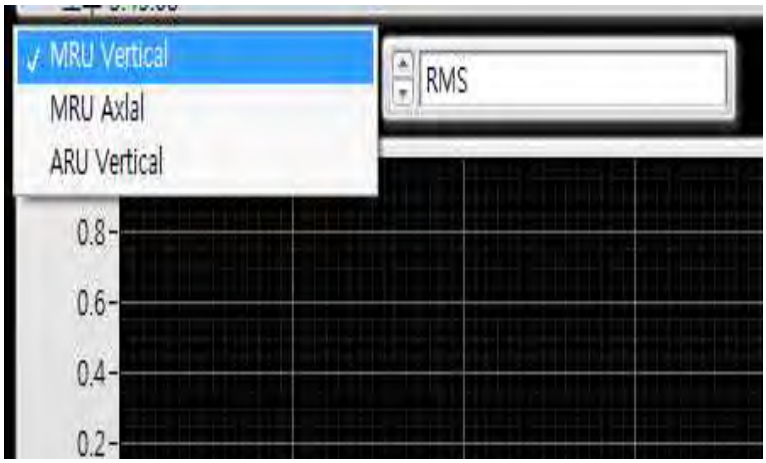



그림 2.3.208 대차 선택 리스트 박스

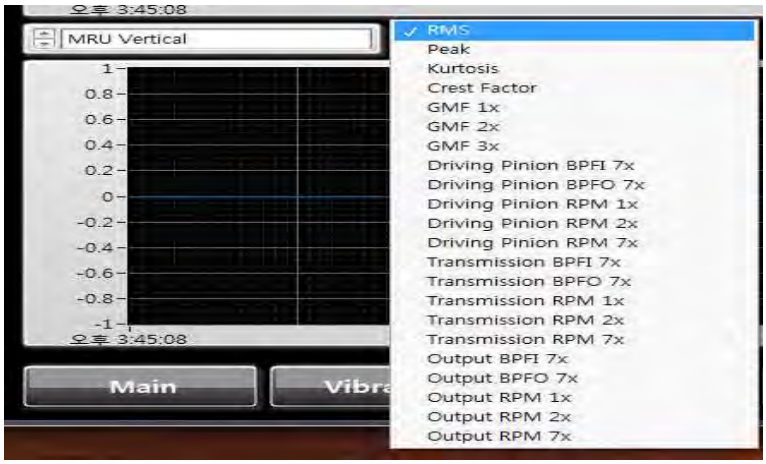



그림 2.3.209 MRU의 주파수 파라미터 리스트

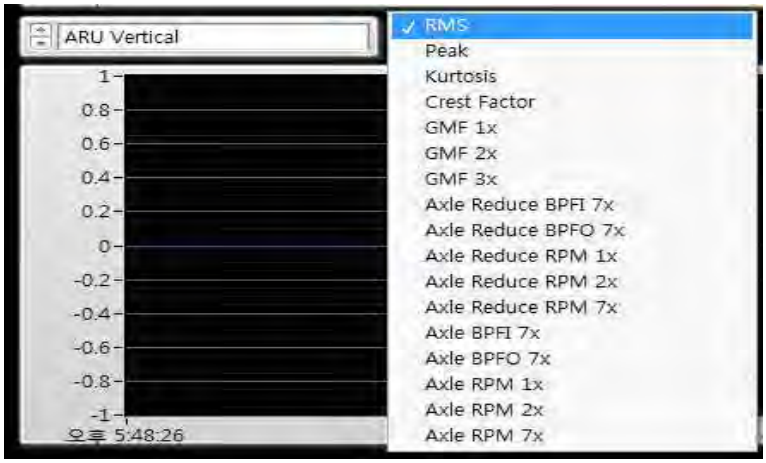



그림 2.3.210 ARU의 주파수 파라미터 리스트

다음 표 2.3.39는 모니터링 시스템에 적용된 주파수 파라미터의 의미를 정리한 것이다.

표 2.3.39 주파수 파라미터의 의미 정리

| 주파수 파라미터 이름 | 기어박스 구분 | 해당 파라미터가 나타내는 내용 |
|---|---|---|
| RMS | 공통 | 센서를 통해 전달되는 진동신호에 대한 RMS 값 |
| Peak | 공통 | 센서를 통해 전달되는 진동신호의 순간 최대치를 나타낸 값 |
| Kurtosis | 공통 | 센서를 통해 전달되는 진동신호를 이용하여 추출한 첨도값 |
| Crest Factor | 공통 | RMS, Peak값을 이용해 연산한 첨도값 |
| GMF 1x | 공통 | 기어 맞물림 주파수에 해당하는 값 |
| GMF 2x | 공통 | 기어 맞물림 주파수의 2배에 해당하는 주파수 진동값 |
| GMF 3x | 공통 | 기어 맞물림 주파수의 3배에 해당하는 주파수 진동값 |
| Driving Pinion BPFI 7x | MRU | 모터와 연결된 MRU 회전축 베어링의 내륜결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Driving Pinion BPFO 7x | MRU | 모터와 연결된 MRU 회전축 베어링의 외륜결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Driving Pinion RPM 1x | MRU | 모터와 연결된 MRU 회전축의 회전주파수 진동값 |
| Driving Pinion RPM 2x | MRU | 모터와 연결된 MRU 회전축의 회전주파수의 2배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Driving Pinion RPM 7x | MRU | 모터와 연결된 MRU 회전축의 회전주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Transmission BPFI 7x | MRU | MRU 중간기어의 회전축 베어링의 내륜결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Transmission BPFO 7x | MRU | MRU 중간기어의 회전축 베어링의 외륜결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Transmission RPM 1x | MRU | MRU 중간기어의 회전축의 회전주파수 진동값 |

| | | |
|---|---|---|
| Transmission RPM 2x | MRU | MRU 중간기어의 회전축의 회전주파수의 2배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Transmission RPM 7x | MRU | MRU 중간기어의 회전축의 회전주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Output BPFI 7x | MRU | ARU로 동력을 전달하는 축에 결합된 베어링의 내륜결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Output BPFO 7x | MRU | ARU로 동력을 전달하는 축에 결합된 베어링의 외륜결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Output RPM 1x | MRU | ARU로 동력을 전달하는 축의 회전주파수 진동값 |
| Output RPM 2x | MRU | ARU로 동력을 전달하는 축의 회전주파수의 2배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Output RPM 7x | MRU | ARU로 동력을 전달하는 축의 회전주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Axle Reduce BPFI 7x | ARU | MRU에서 동력을 전달받는 축에 결합된 베어링의 내륜결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Axle Reduce BPFO 7x | ARU | MRU에서 동력을 전달받는 축에 결합된 베어링의 외륜결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Axle Reduce RPM 1x | ARU | MRU에서 동력을 전달받는 축의 회전주파수 진동값 |
| Axle Reduce RPM 2x | ARU | MRU에서 동력을 전달받는 축의 회전주파수 2배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Axle Reduce RPM 7x | ARU | MRU에서 동력을 전달받는 축의 회전주파수 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Axle BPFI 7x | ARU | 차축에 결합된 베어링의 내륜결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Axle BPFO 7x | ARU | 차축에 결합된 베어링의 외륜 결합 주파수의 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Axle RPM 1x | ARU | 차축의 회전주파수 진동값 |
| Axle RPM 2x | ARU | 차축의 회전주파수 2배수에 해당하는 주파수 진동값 |
| Axle RPM 7x | ARU | 차축의 회전주파수 7배수에 해당하는 주파수 진동값 |

그림 2.3.211은 HEMU열차에 적용하여 실제 주행 중에 나타난 Vibration 항목 화면을 캡쳐한 화면이다.

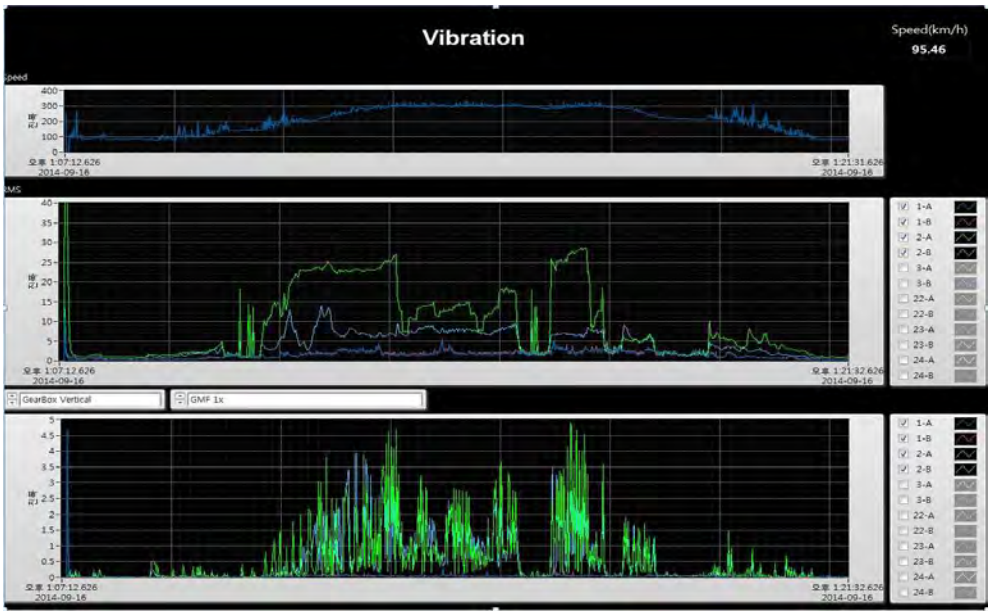



그림 2.3.211 실차 시험 중 진동 데이터 취득 화면

(라) Vibration(EX) 화면

그림 2.3.212의 그림은 실시간으로 전달되어 들어오는 진동데이터들을 속도에 따른 주파수연산을 통해 주파수 위치로 조합하여 실제 FFT화면에 가깝게 조합한 화면을 보여준다. 이는 진동에 대해 깊은 지식을 가진 전문가들이 실제로 들어오는 주파수들을 비교하여 진동이 높은 이유를 분석하고, 나아가 진동발생 원인이 되는 부품이 어떤 것 인지를 파악하는데 도움이 된다.

각각의 부분이 나타내는 항목에 대한 설명은 다음과 같다.

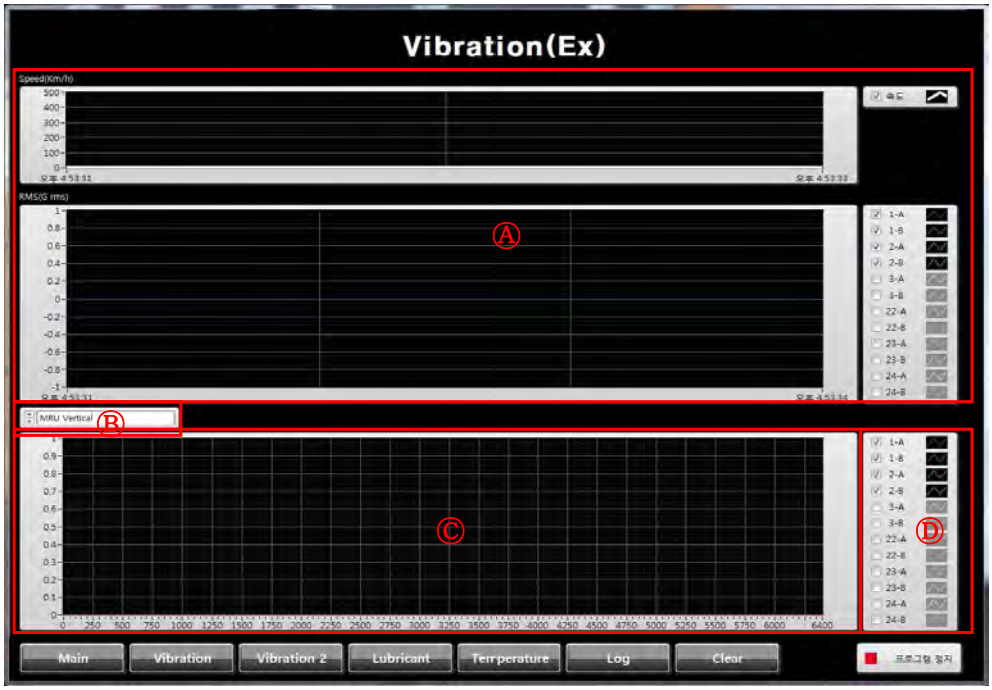



그림 2.3.212 모니터링 시스템 진동 파트 화면

① Vibration 화면에서 표시하는 것과 동일한 내용을 표시해준다. 상세내용은 Vibration 화면 항목 참조
② Ⓒ 그래프에서 표시할 센서위치를 선택한다. 그림 2.3.213 참고

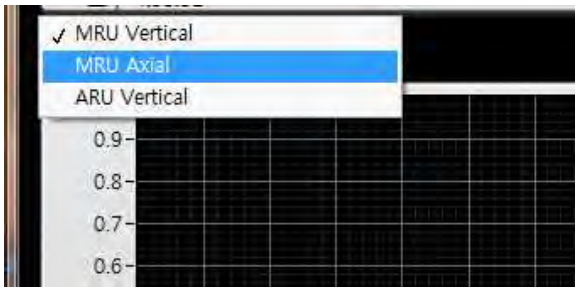



그림 2.3.213 센서 위치 선택 화면

③ 선택된 축에 대한 진동정보를 보여주는 그래프
④ 선택된 대차의 정보에 대해서만 표시하도록 하는 체크박스

(마) Lubricant 화면

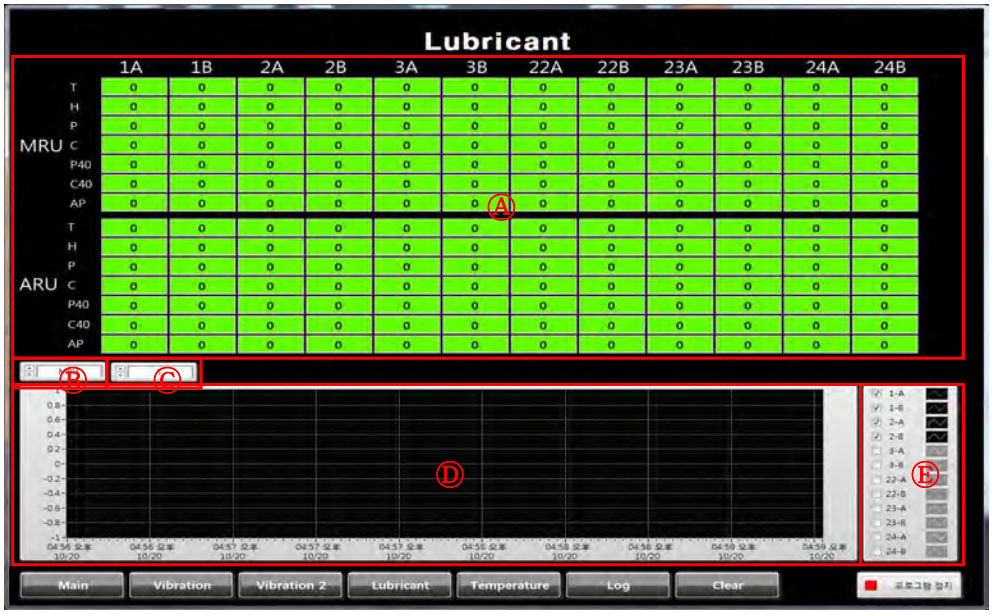



그림 2.3.214 윤활 설정 화면

위의 그림 2.3.214의 화면은 윤활센서를 통해 수신된 모든 정보를 한눈에 확인할 수 있는 화면이다. 상세설명은 아래와 같다.

① 각 요소별 대차별 센서데이터를 실시간으로 업데이트 해준다. 윤활유 요소의 특성상 급박하게 변화하는 정보가 아니므로 데이터는 30초마다 한 번씩 업데이트 된다.
② 그래프로 변화추이를 확인할 기어박스 그룹을 선택한다.




그림 2.3.215 윤활 선택 화면

③ 그래프로 변화추이를 확인할 윤활요소를 선택한다.

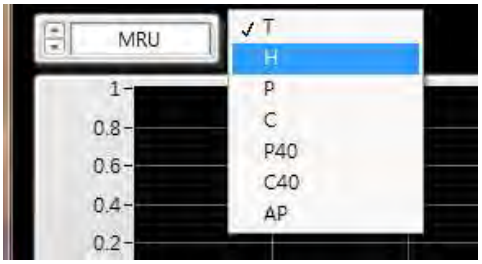



그림 2.3.216 윤활 요소 선택 화면

④ ②,③에 의해 선택된 요소의 변화추이를 그래프로 나타내준다.
⑤ 선택된 대차의 정보에 대해서만 표시하도록 하는 체크박스

(바) Temperature 화면

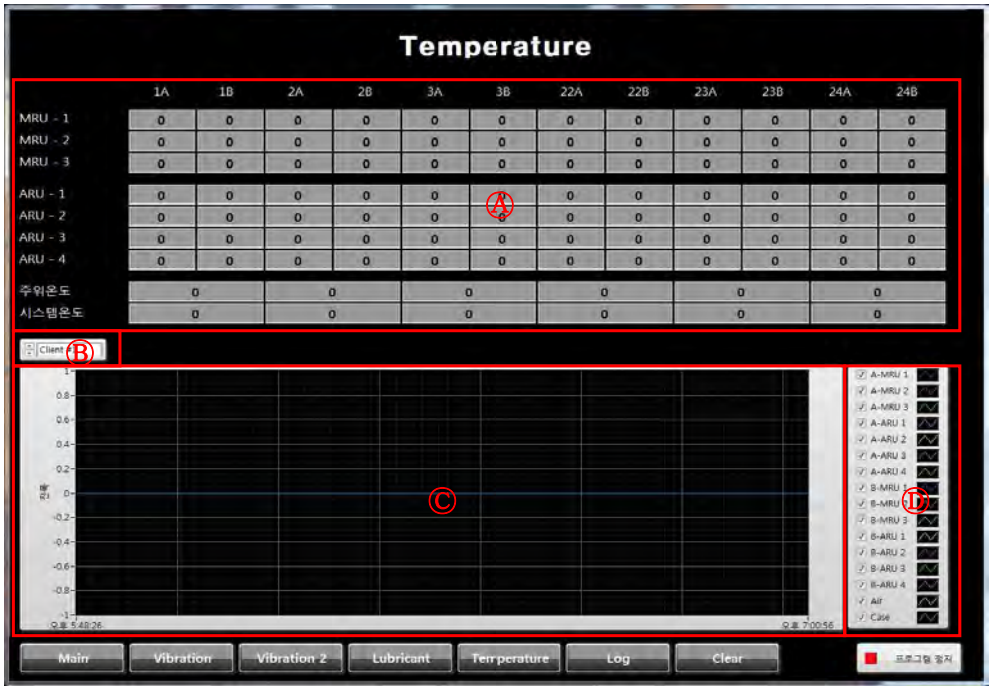



그림 2.3.217 온도 설정 화면

위의 그림 2.3.217는 온도센서를 통해 들어온 각각의 센서 값을 한눈에 볼 수 있는 화면. 상세설명은 아래와 같다.

① 각각의 센서데이터를 실시간으로 업데이트 해주고, 데이터가 설정된 임계값을 넘어갈 경우 단계에 따라 바탕색이 변한다. 바탕색에 따라 센서의 상태를 표시하는데,

정상 상태일 때는 형광색, 센서가 단선되었을 경우에는 회색, 온도가 주의단계에 진입했을 경우에는 주황색, 경고 단계에 진입했을 때는 붉은색으로 변하게 되어있다.

② 그래프로 변화추이를 확인할 대차를 선택한다. (온도센서는 각 대차별로 온도를 조회하도록 구성되어있다.) 다음 그림 2.3.218을 참고한다.

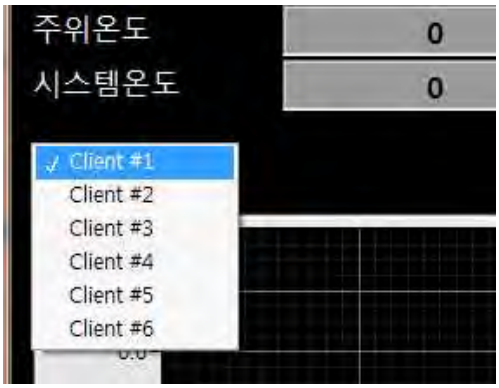



그림 2.3.218 온도 대차 선택 화면

③ ②에 의해 선택된 대차의 온도 변화추이를 그래프로 나타내준다.
④ 선택된 온도 요소에 대해서만 표시하도록 하는 체크박스

아래의 그림 2.3.219는 HEMU열차에 장착된 시험기의 동작화면을 카메라를 이용해 촬영한 화면이다.

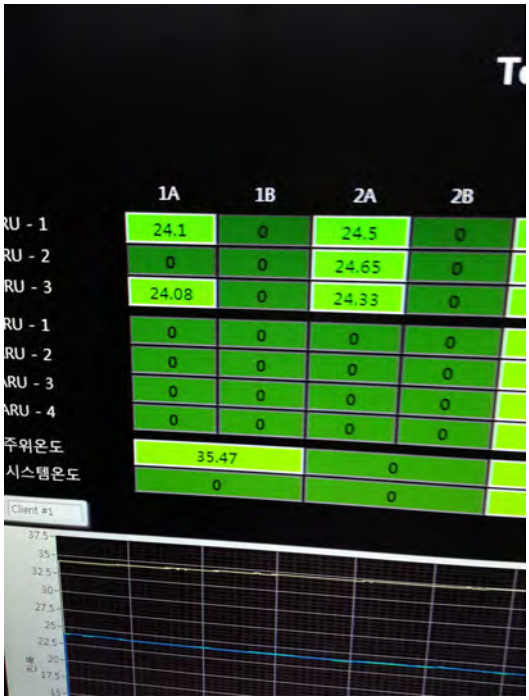



그림 2.3.219 온도 동작 화면

(사) Log 화면




그림 2.3.220 로그 파일 화면

위의 그림 2.3.220는 현재 운행 중에 발생했던 주의/경고에 대한 경보의 발생/소멸 기록을 보여준다.

① 대차번호 : 각각의 대차번호를 나타내주는 항목.
② 센서타입 : 진동/윤활/온도 중 어느 분야의 경보였는지 나타내주는 항목.
③ 센서번호 : 어느 부분에 부착된 센서인지 나타내주는 항목.
④ 발생시간 : 알람발생 시간을 나타내주는 항목
⑤ 알람내용 : 주의 혹은 경고 단계의 알람이 발생/등급변화(ex. 주의->경고)/소멸에 대한 정보를 나타내주는 항목

# 제3장 최종 연구성과 및 적용실적

# 제1절 KTX 감속기 온라인 모니터링 시스템 연구 개발 성과

## 1. 모니터링 시스템 연구 성과 내용

### 가. 감속기 모니터링 시스템 (T-GMS)

#### (1) 시스템 설명

고속열차용 감속기 모니터링 시스템(T-GMS, Train Gearbox Monitoring System)은 다양한 감속기의 상태(진동, 온도, 윤활) 진단 기술을 적용하여 실시간으로 예지보전기법의 진단 파라미터를 제공함과 아울러 위험신호를 감지하는 역할을 수행한다. T-GMS는 철도차량의 대차 구조상 차량 하부에 서버 시스템(Sever System) 탑재가 어렵고 대차 하부 구동부의 센서로부터 객차 내부로 신호 케이블의 동선이 길고 복잡하여 이를 간소화하는 것에 초점을 두어 대차 하부에는 클라이언트(Client)를 상부에는 서버 시스템을 설치하는 방법으로 구성하였다. 위와 같은 구성은 클라이언트에서는 모든 신호연산처리를 완료하고 이 신호를 서버에 TCP/IP 프로토콜로 간단하게 전송하므로 이미 연산된 데이터가 케이블 노이즈의 영향이 없을 뿐만 아니라 서버는 그래픽과 클라이언트 네트워킹 운용만 담당하므로 시스템의 안정성이 높다. 다음 그림 3.1.1은 T-GMS 시스템의 시스템 구성 내용이다.

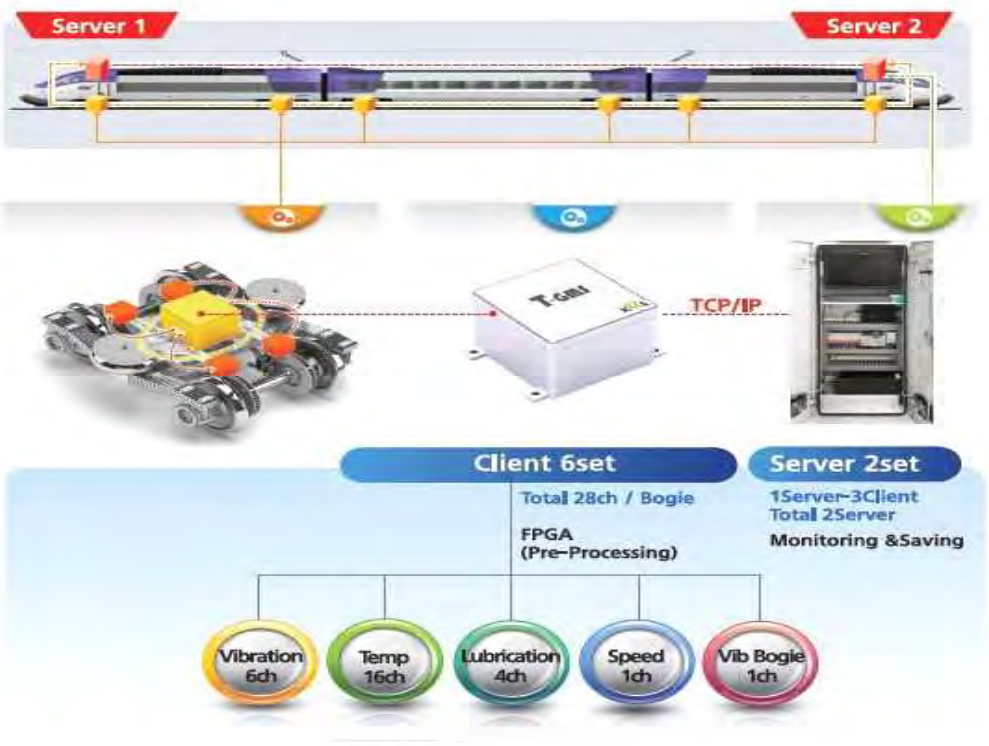



그림 3.1.1 T-GMS 시스템 개요

(2) 하드웨어 주요 기능 및 동작

(가) 하드웨어 동작 내용

구축 하드웨어 Client는 열차 1편성 당 총 6대를 설치할 수 있도록 설계 하였다. 주요 기능으로는 각각의 동력대차와 감속기의 진동 상태를 감시하고 서버와의 통신을 이용하여 진동데이터를 즉시 전달을 해주는 기능을 담당하게 된다. 이때 데이터의 수집이 매우 중요한 요소로 작용을 하게 되는데 속도 데이터의 경우 각 감속기에서 1개의 데이터를 가져오며 진동 데이터는 4개의 감속기에서 7채널에서 데이터를 수집하여 저장을 한다. 온도데이터는 2개의 구동축에서 각각 7채널 앞 차량과 뒤 차량 각각 외부 온도 2개의 채널로 총 16개의 채널로 구성이 되었다. 데이터를 취득하는 과정은 카운터 입력용 모듈을 통하여 전달되어진 Pulse 신호를 이용하여 각각의 Gear의 회전수를 산출해낸다. 수집된 센서 데이터를 이용하여 대차와 감속기 해당 부위의 진동 파라미터를 분석하여 진동 정보를 열차 운용자에게 디스플레이 하는 구조로 시스템은 작동하게 된다. 이때 분석하는 진동 파라미터는 RMS, Overall, Peak - to - Peak, 1X는, GMF, Crest Factor, Kutosis, BPFI, BPFO 등이 있다. 진동 모니터링 시스템의 서버 스토리지 구성은 열차 1편성에 총 2대를 설치할 예정이다. 서버는 상행/하행 구간으로 분리가 되어 열차를 관리하게 된다. 유의 할 점은 1대의 서버는 연산기능과 터미널 기능을 동시에 수행을 하게 되며 다른 1대의 서버는 터미널 기능만을 수행하게 된다. 이유는 취득되는 데이터를 확인하는 운용자는 1곳으로 둘 다 연산기능을 수행할 필요는 없다 그러나 시스템의 과부하와 데이터 취득량에 대한 문제가 발생할 수 있기 때문에 2대로 운용을 할 수 있도록 설계를 하였다. 통신 방식은 TCP/IP 방식으로 클라이언트와 통신을 하게 되며 이더넷 방식으로 데이터를 수집하게 된다. 분석하는 진동 파라미터는 위에서도 언급 하였듯이 RMS, Overall, Peak-to-Peak, 1x, GMF, Crest Factor, Kutosis, BPFI, BPFO 등이 있다. 서버에는

별도로 GPS를 장착하여 열차의 운행 위치 정보를 전송할 수 있도록 시스템을 구성하였다. GPS 통신은 USB포트를 이용하여 RS-232 통신을 활용하는 방안으로 시스템을 설계 하였다. 다음 표 3.1.1은 제작된 시스템 하드웨어 클라이언트와 서버 스토리지 이다.

표 3.1.1 모니터링 시스템 클라이언트 & 서버

| 클라이언트 | 서버 | |
|---|---|---|
|  |  |  |

(3) 소프트웨어 주요 기능 및 동작

모니터링 시스템의 소프트웨어는 FPGA, FFT, RMS를 측정 및 진단을 하는 기능을 탑재를 하였다. 하드웨어에서 진동 신호의 진원지를 파악하여 데이터를 축적을 하면 진동 신호를 설계된 알고리즘에서 분석을 하고 감속기의 이상을 진단하여 출력을 하는 구조로 동작을 수행하게 된다. 이때 발생되는 알람 신호는 단계별 출력으로 운전자에게 Display 되는 구조로 데이터의 안정성과 저장 공간에 대한 문제가 없도록 구현을 하였다. 구동 소프트웨어의 진동, 온도, 윤활 각 화면에 그림 3.1.2와 같이 알람 화면으로 즉시 화면에 표시가 되어 운전자가 즉시 이상부위에 대하여 확인이 가능할 수 있도록 구성을 하였다. 6개의 대차가 각각 확인이 가능할 수 있도록 GUI를 구성하여 수시로 언제든지 각 대차의 상태 확인이 가능할 수 있도록 최대한 실무자의 편의성을 고려하였다. 감시진단 GUI에서는 진동, 윤활, 온도의 계측되는 값이 화면에 수치로 바로 표현이 되며 측정된 데이터 값이 저장이 되어 언제든지 수치 값을 확인이 가능하도록 설정 하였다. Kurtosis 카운트시간과 기준 값을 세팅하고 위험도 기준치를 설정하여 열차 운행 시 설정된 기준 값에 대하여 감시진단 화면에서 위험도를 체크하여 즉시 디스플레이 할 수 있는 구조로 시스템을 설계 하였다. 열차 운행 중 알람이 발생하게 되면 그림과 같이 빨간색 표시 화면이 깜빡 거리면서 이상 부위에 대하여 지속적으로 운전자에게 정보를 디스플레이 할 수 있도록 프로그램을 설계 하였다. 다음 그림 3.1.2는 소프트웨어 구성 화면이다.

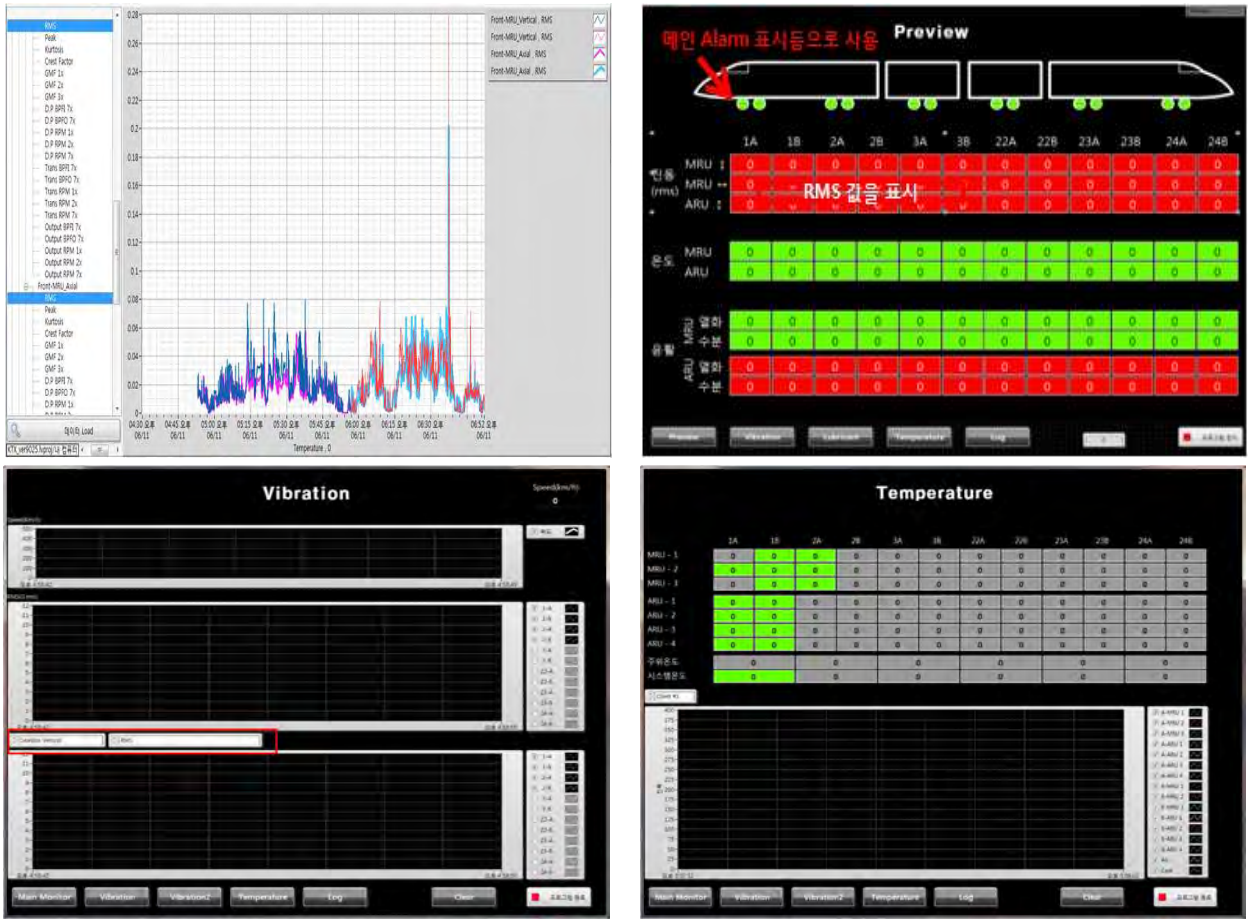



그림 3.1.2 소프트웨어 구성 화면

# 제2절 특허 및 논문 연구 성과

이번 연구개발을 진행을 하면서 특허 출원과 논문을 게재를 하였다. 이번 연구 개발 개별 성과 내용에 대해서는 다음과 같이 정리를 하였다.

## 1. 특허 출원 관련 내용

### 가. 전동열차의 진동 측정 시스템

본 특허는 전동열차의 진동측정 시스템에 관한 것이고, 구체적으로 고속 전동열차의 설치된 감속기의 진동 측정 및 그에 따라 감속기의 상태를 감시할 수 있도록 하는 진동열차의 진동측정 시스템에 관한 것이다.

#### (1) 기술 내용 요약

일반적으로 고속철도란 여객 철도의 일종으로 기존의 철도 차량에 비하여 빠른 차량을 의미하고 200 km/h 이상 또는 250 km/h 이상의 속도로 운행될 수 있도록 설계된 철도를 말한다. 철도는 철 차륜으로 이루어지거나 또는 자기 부상 방식으로 이루어질 수 있다. 철 차륜으로 운행되는 고속 철도는 전동기로 차륜을 회전시켜 궤도를 달리는 방식이 사용되고 전차선에서 전력을 공급받아 차량으로 전달하는 팬터그래프(pantagraph), 전차선에서 공급받는 전력의 전압을 변환시켜 전동기의 고정자 및 회전자에 전달하는 주변압기, 주변압기에서 전달되는 전압을 전동기 고정자에 전달하여 회전 자장을 발생시키는 모터 블록 및  모터 블록의 전력을 회전자를 통해 차륜으로 전달하는 보조 블록으로 이루어진 전동차; 모터 블록으로부터 전달되는 전류 및 주파수에 따라 출력을 발생시키는 견인 전동기(traction motor), 플렌지를 이용하여 견인 전동기와 결합된 감속기, 차체와 대차 사이의 상대 운동을 허용하도록 감속기와 차축 기어 감속 장치 사이에 위치하는 트리포드(tripod) 및 입력 기어와 차축 기어로 이루어지고 동력을 차축으로 전달하는 차축 치자 감속 장치로 이루어진 동력 대차; 그리고 차체의 하중을 지지하면서 견인력과 제동력을 전달하기 위한 관절 대차를 포함할 수 있다.

고속 철도는 전기에 의하여 운행되고 운행 시스템이 기간산업 형태가 되므로 차량 상태 또는 운행 상태에 대한 감시는 대형 안전사고의 발생을 방지하기 위하여 필수적으로 이루어져야 하고 자동으로 이루어지는 것이 유리하다. 그리고 이와 같은 감시는 실시간으로 이루어지는 것이 유리하다.

고속 철도의 전동 대차에 사용되는 감속 장치의 경우 주기적으로 점검하여 운행 과정에서 발생될 수 있는 결함을 방지하도록 하고 있다. 그러나 점검 주기에 비하여 부품이 빠르게 손상이 되면 운행 위험이 발생될 수 있고 그리고 부품 마모가 느리게 진행되면 불필요하게 부품이 교체될 수 있다는 문제점을 가진다.

철도 차량의 장치 또는 운행의 감시와 관련된 다양한 기술이 개발되었고 특허공개번호 제 2001-0111905호 '철도의 대차 감시 시스템과 그 감시방법' 은 센서를 사용하여 철도 차량의 대차를 감시하는 시스템에 대하여 개시하고 있다. 상기 선행기술은 차축 온도, 대차의 균열 상태, 바퀴 마모, 바퀴 편마모의 대차 상태를 감시하기 위해 부착된 대차 상태 감시 센서 부; 상기 대차상태감시 센서부로부터 출력된 신호들을 수집 및 분석하여 경로를 출력하거나 데이터베이스화하여 데이터를 저장장치에 기록하는 주 제어반 부를 구비한 대차감시 시스템 부; 상기 대차감시 시스템부

로부터 통신선을 통해 시리얼 통신으로 대차의 현 상태와 기록된 데이터를 전송받아 대차의 검수를 지원하는 철도차량 모니터링 시스템 부를 포함하는 철도의 대차 감시 시스템에 대하여 개시하고 있다.

철도 차량의 감시와 관련된 다른 선행기술로 특허공개번호 제2006-0077593호 '전기철도차량의 전동기 진동 가속도 측정 시스템' 이 있다. 상기 선행기술은 철도의 차륜에 설치되어 철도 차량의 주행 중 차륜의 회전수에 부응하는 펄스 신호를 발생시키는 속도 센서와; 상기 속도 센서를 통해 검출되는 단속 펄스의 주파수를 전압으로 변환하여 주는 주파수/전압 변환부와; 상기 주파수/전압 변환부에서 출력되는 아날로그의 철도 차량 속도 전압을 디지털 신호로 변환시켜 주는 A/D 변환부와; 상기 A/D 변환부의 출력 신호를 입력받아 철도 차량의 현재 주행 속도를 검출하는 차속 검출부와; 상기 속도 센서를 통해 검출되는 단속 펄스를 계수하는 카운터와; 상기 카운터의 출력 신호를 입력받아 펄스의 수에 대응되는 철도 차량의 주행 거리를 산출하여 그 위치를 검출하는 위치 정보 검출부와; 기관사에 의해 조작되는 마스콘이 추진 측으로 작동되는지를 검출하는 추진신호 검출부와; 기관사에 의해 조작되는 마스콘이 제동 측으로 작동되는지를 검출하는 제동신호 검출부와; 기관사에 의해 마스콘이 추진 또는 제동 측으로 작동될 때 펄스폭 변조 방식을 통해 그 위치 및 조작 량에 부응하여 최대 동력 대비 %로 읽어 들이는 PWM값 입력부와; 상기 추진 및 제동신호 검출부에서 직류 전압으로 출력되는 추진 및 제동 전압을 컴퓨터가 인식할 수 있는 직류 전압으로 변환시켜 주는 DC/DC 변환부와; 상기 PWM 값 입력부에서 출력되는 추진 및 제동 신호를 100분률로 환산하여 변환시켜 주는 신호변환기와; 각 차량에 설치되어 있는 전동기에서 전후, 좌우 및 상하 방향에 대한 진동 가속도 값을 디지털 신호로 변환시켜 주는 제2 A/D 변환부와; 상기한 각부의 출력 신호를 실시간으로 입력받아 각 차량의 전동기에서 발생되는 전후, 좌우, 상하 방향에 대한 진동 가속도와 마스콘의 상태 및 주행 속도와 위치 정보를 기억함과 동시에 해당 정보를 출력하는 컴퓨터로 구성된 전기 철도 차량의 전동기 진동 가속도 측정 시스템이 있다.

철도 차량이 감시와 관련된 다른 선행기술로 특허공개번호 제2010-0021327호 '궤도틀림 실시간 감시시스템' 이 있다. 상기 선행기술은 철도 차량에 탑재되어 철도의 궤도 틀림을 검측하고 이상을 감시하기 위하여 좌우측 차륜의 상하 움직임과 함께 각각 운동하는 축상 부재의 일 측에 고정 장착하여 차륜의 상하방향 운동을 검측 하는 좌우 두 개의 상하 진동센서와; 차륜의 좌우 방향 움직임과 함께 운동하는 축 상 부재의 일 측에 고정 장착하여 차륜의 좌우 운동을 검측 하는 좌우 진동센서와; 상기 축 상의 부재에 고정 장착되어 휠 셋과 양측 궤도간의 수평거리를 측정하는 수평거리감지수단으로 궤도검측 수단을 구성하고, 차륜 또는 차륜과 연계하여 회전 운동하는 부재의 회전속도를 감지하여 차량의 속도를 검측 하는 차량속도센서와 침목 또는 노반에 설치되며 궤도 정보를 내장하고 있는 RFID TAG와, 철도 차량에 탑재하여 이 TAG를 가까이 지나갈 때 무선으로 TAG의 내장 정보를 받아들이는 RFID READER와, 이 정보를 처리하는 RFID 프로세서로 구성되어 궤도상의 차량위치를 자동으로 인식하는 RFID 시스템을 가지며; 이들 수집된 자료로부터 궤도의 틀림량을 계산하고 측정 자료 지점의 궤도상의 위치를 계산해주는 데이터처리장치와; 데이터를 실시간으로 궤도관리시스템으로 전송하는 무선통신장치로 구성하여; 주행하는 철도차량에 탑재되어 각 차량위치에서의 궤도 틀림 상태를 비접촉식으로 검측하여 실시간으로 무선으로 송신하여 궤도관리에 활용하는 궤도 틀림 실시간 감시시스템에 대하여 개시하고 있다.

상기 선행기술은 철도 차량 일반에 적용될 수 있는 기술에 해당하지만 정밀하게 관련 장치로부터 발생되는 신호를 측정하여 처리하기 어렵고 센서로부터 측정되어 전달되는 신호의 신뢰성이 낮다는 문제점을 가진다. 아울러 구체적으로 관련 장치에 대한 정보를 얻기 위하여 요구되는 탐지 대상이 명확하지 않으면서 이와 동시에 탐지 대상의 작동 상태와 관련성이 작다는 단점을 가진다.

본 발명은 선행기술이 가진 문제점을 해결하기 위한 것으로 아래와 같은 목적을 가진다. 다음 그림 3.2.1은 특허 출원 관련 그림이다.

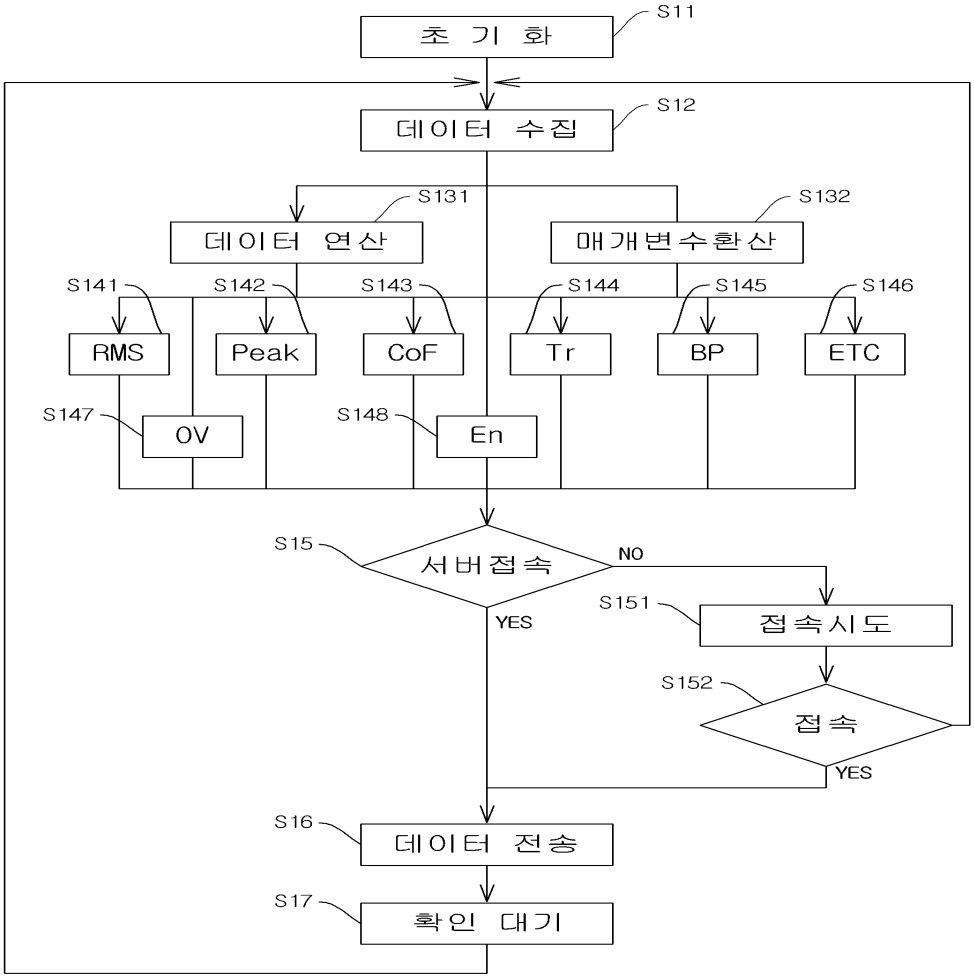



그림 3.2.1 전동열차의 진동 측정 시스템 특허 출원 관련 청구 도면

(2) 본 특허의 효과

본 발명에 따른 진동 측정 시스템은 전동 대차로부터 발생되는 진동과 관련된 신호를 실시간으로 다양한 매개 변수를 기초로 처리하는 것에 의하여 탐지의 신뢰성이 향상될 수 있도록 한다는 이점을 가진다. 또한 탐지된 신호가 자동으로 처리되면서 운행자에 의하여 관리가 될 수 있도록 하는 것에 의하여 시스템의 효율성이 향상될 수 있도록 한다는 이점을 가진다. 추가로 본 발명에 따른 시스템은 고속철도의 관리 자동화가 가능하도록 하면서 운행의 안전성이 향상될 수 있도록 한다는 장점을 가진다.

나. 전동열차의 진동 측정 장치

(1) 기술 내용 요약

본 발명은 전동 열차의 진동 측정 장치에 관한 것이고, 구체적으로 고속 전동 열차의 동력 대차에 설치되어 주행 과정에서 발생되는 진동을 측정하여 고속 전동 열차의 실시간 진단이 가능하도록 하는 전동 열차의 진동 측정 장치에 관한 것이다.

(2) 배경 기술

일반적으로 고속 철도란 여객 철도의 일종으로 기존의 철도 차량에 비하여 빠른 차량을 의미하고 200 km/h 이상 또는 250 km/h 이상의 속도로 운행될 수 있도록 설계된 철도를 말한다. 철도는 철 차륜으로 이루어지거나 또는 자기 부상 방식으로 이루어질 수 있다. 철 차륜으로 운행되는 고속 철도는 전동기로 차륜을 회전시켜 궤도를 달리는 방식이 사용되고 전차선에서 전력을 공급받아 차량으로 전달하는 팬터그래프(pantagraph), 전차선에서 공급받는 전력의 전압을 변환시켜 전동기의 고정자 및 회전자에 전달하는 주변압기, 주변압기에서 전달되는 전압을 전동기 고정자에 전달하여 회전 자장을 발생시키는 모터 블록 및  모터 블록의 전력을 회전자를 통해 차륜으로 전달하는 보조 블록으로 이루어진 전동차; 모터 블록으로부터 전달되는 전류 및 주파수에 따라 출력을 발생시키는 견인 전동기(traction motor), 플렌지를 이용하여 견인 전동기와 결합된 감속기, 차체와 대차 사이의 상대 운동을 허용하도록 감속기와 차축 기어 감속 장치 사이에 위치하는 트리포드(tripod) 및 입력 기어와 차축 기어로 이루어지고 동력을 차축으로 전달하는 차축 치자 감속 장치로 이루어진 동력 대차; 그리고 차체의 하중을 지지하면서 견인력과 제동력을 전달하기 위한 관절 대차를 포함할 수 있다.

고속 철도는 전기에 의하여 운행되고 운행 시스템이 기간산업 형태가 되므로 차량 상태 또는 운행 상태에 대한 감시는 대형 안전사고의 발생을 방지하기 위하여 필수적으로 이루어져야 하고 자동으로 이루어지는 것이 유리하다. 그리고 이와 같은 감시는 실시간으로 이루어지는 것이 유리하다. 고속 철도의 전동 대차에 사용되는 감속 장치의 경우 주기적으로 점검하여 운행 과정에서 발생될 수 있는 결함을 방지하도록 하고 있다. 그러나 점검 주기에 비하여 부품이 빠르게 손상이 되면 운행 위험이 발생될 수 있고 그리고 부품 마모가 느리게 진행되면 불필요하게 부품이 교체될 수 있다는 문제점을 가진다. 고속 철도의 안전은 다양한 요인에 의하여 영향을 받을 수 있고 그리고 다양한 방법으로 고속 철도의 상태가 탐지될 수 있다. 고속 철도에서 발생되는 진동은 고속 열차의 진단에 필요한 다양한 정보를 제공할 수 있다.

진동 측정과 관련된 선행기술로 미국특허공보 US 7,487,679 '차량 진동 분석기(VEHICLE VIBRATION ANALYZER)'가 있다. 상기 선행기술은 차량 또는 산업 장비에서 발생되는 선형 또는 비틀림 진동을 측정하여 구동 라인을 따른 진동의 발생 원인을 정확하게 식별할 수 있도록 하는 진동 측정 장치에 대하여 개시하고 있다.

진동 측정과 관련된 다른 선행기술로 WO 2006/064303 '철도 트랙을 감시하기 위한 휴대용 장치(A PORTABLE APPARATUS FOR MONITORING RAILWAY TRACK)'이 있다. 상기 선행기술은 철도 차량 및 철도 트랙의 수직 및 수평 가속을 탐지 및 기록하기 위한 마이크로 컨트롤러 및 트랜스듀서 어셈블리, 분리 가능한 프린터 유닛, 전기 로터리 펄스 발생 장치, 사건 마커 유닛

및 외부 전력 공급원으로 이루어진 진단 장치에 대하여 개시하고 있다.

진동 측정과 관련된 다른 선행기술로 특허등록번호 제1066095호 '진동신호분석기법을 이용한 기어검사장치' 가 있다. 상기 선행기술은 베드, 베드에 설치된 이송 레일에 설치되는 기어 장착 암, 검사하고자 하는 기어가 결합되는 검사 기어 스핀들, 베드의 상면에 장착되고 검사 기어와 맞물려 회전하는 상대 기어, 상대 기어에 적절한 부하가 걸리게 하는 부하 장치, 검시 기어 스핀들을 회전시키는 기어 구동 모터 및 진동 센서가 감지한 진동 신호를 분석하여 기어의 가공 이상 여부를 판단하는 컨트롤러로 이루어진 기어 검사 장치에 대하여 개시하고 있다.

선행기술에서 개시된 진동 측정과 관련된 시스템은 다양한 형태의 신호를 처리하기 어렵고 특정 구성 요소의 진단만 가능하다는 문제점을 가진다. 진동 측정 장치는 다양한 부위에서 발생되는 다양한 형태의 진동을 측정 및 분석하여 관련 장치 전체의 진단할 수 있도록 하는 것이 유리하다.

본 발명은 선행기술이 가진 문제점을 해결하기 위한 것으로 아래와 같은 목적을 가진다.

다음 그림 3.2.2 ~ 그림 3.2.3은 이번 특허 출원에 관련된 청구도면이다.

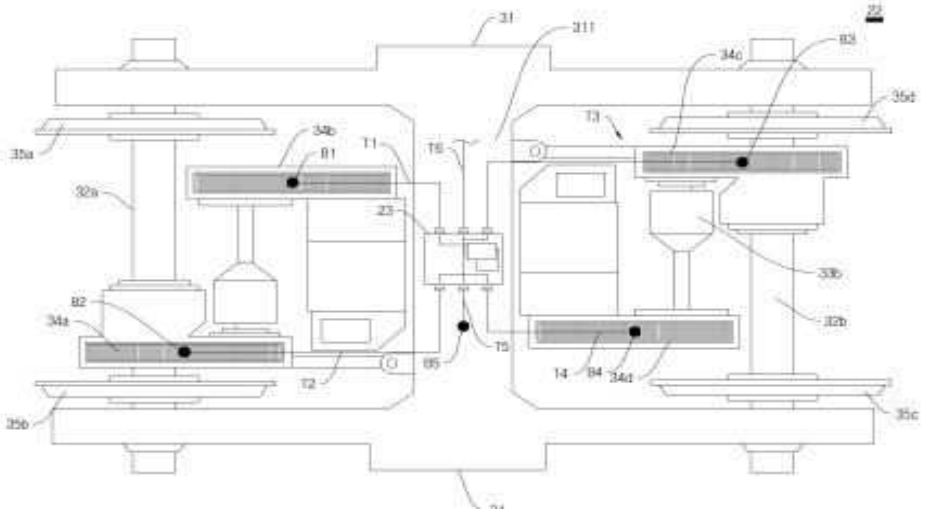


그림 3.2.2 전동열차의 진동측정 장치 청구도면 (1)

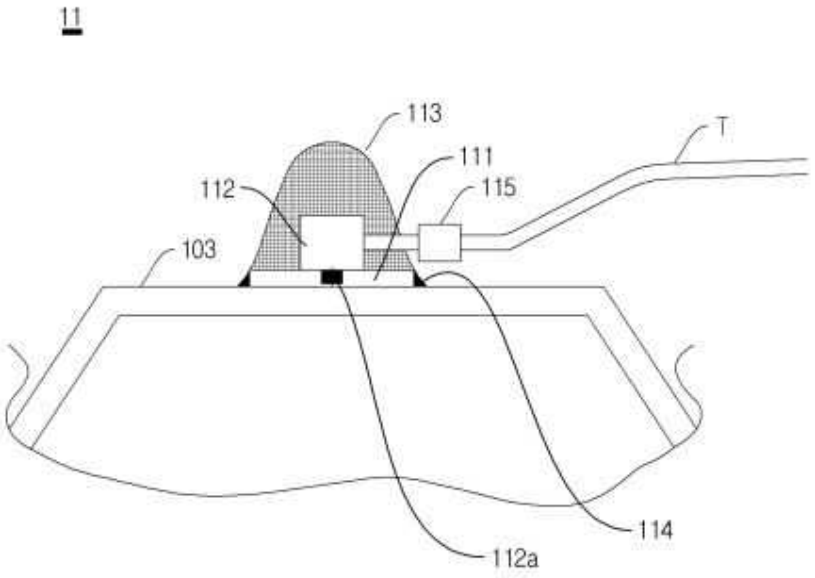



그림 3.2.3 전동열차의 진동측정 장치 청구도면 (2)

다. 진동 센서에 의한 발광식 오작동 탐지 장치

(1) 기술 분야

본 발명은 진동 센서에 의한 오작동 탐지 장치에 관한 것이고, 구체적으로 점검 대상이 되는 장치 또는 설비로부터 발생되는 진동으로부터 장치 또는 설비의 작동 상태를 분석하고 분석 결과에 기초하여 오작동 여부를 판단하여 필요한 경보를 발생시킬 수 있도록 하는 진동 센서에 의한 오작동 탐지 장치에 관한 것이다.

(2) 배경 기술

물체의 위치 또는 전류의 세기와 같은 것이 규칙적으로 변하는 현상을 진동이라고 하고 모든 물체는 외부에서 충격이 가해지면 진동을 발생시키게 된다. 기계, 장치 또는 설비는 작동 과정에서 진동을 발생시키게 되고 대부분의 경우 일정한 오차 범위 내에서 정해진 형태의 진동을 발생시키게 된다. 기계, 장치 또는 설비에서 발생하는 진동이 정해진 형태에서 벗어나는 경우 기계, 장치 또는 설비 자체의 작동에 이상이 발생하였거나 또는 외부의 일시적인 충격에 기인한 것일 수 있다. 진동이 미리 정해진 형태 또는 패턴과 다르고 그리고 일정 시간 지속이 되면 기계, 장치 또는 설비의 작동 오류에 기인할 가능성이 높다. 그러므로 기계, 장치 또는 설비 자체로부터 발생되는 진동을 분석하여 작동 오류가 여부가 탐지될 수 있다.

진동 구조물의 진단과 관련된 선행기술로 특허공개번호 제2005-0077181호 '진동센서 자동 고정 장치 및 진동 구조물의 진단장치' 가 있다. 상기 선행기술은 진동 구조물의 측정 장치에 압착되어 진동 신호를 검출하며 진동 신호를 분석하는 진동 분석기에 연결된 진동 센서; 한쪽 끝에 진동 센서가 고정되는 고정구와 다른 끝에 공압이 작용하는 피스톤이 형성된 로드; 공압에 의해 이동되도록 피스톤을 안내하는 공압 실린더; 상기 공압 실린더에 공압을 공급하는 공압 작동 부; 및 상기 공압 실린더에 작용하는 공압을 제어하고 상기 진동 센서를 진동 구조물에 압착되도록 제어하는 제어기를 포함하는 진동센서 자동 고정 장치에 대하여 개시하고 있다.

다음 그림 3.2.4는 청구도면 항목이다.

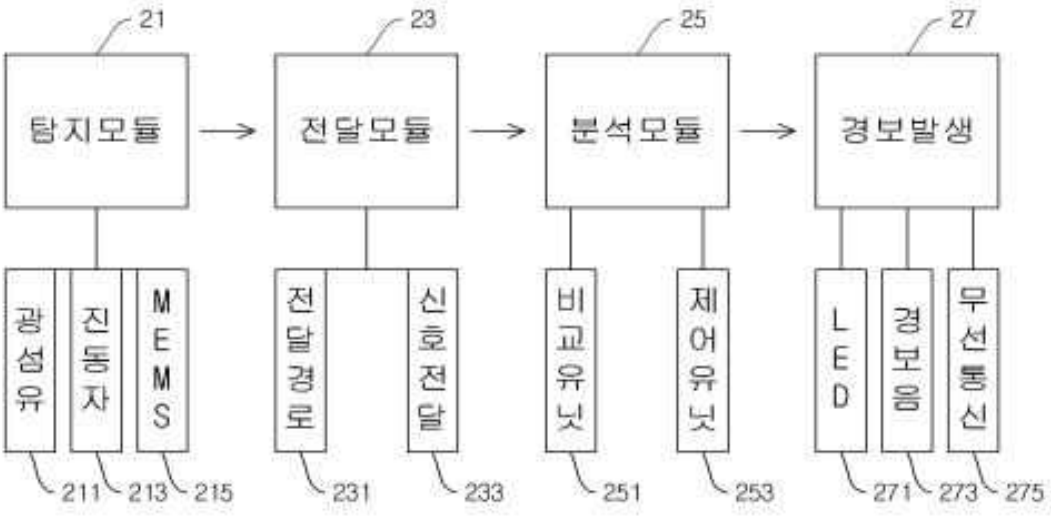



그림 3.2.4 발광식 계측장비 청구 도면

라. 고속전동 열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템

(1) 기술 분야

본 발명은 고속 전동 열차의 진동 분석에 의한 위험 예방 시스템에 관한 것이고, 구체적으로 실시간으로 고속 전동 열차에서 발생되는 진동을 분석하여 위험의 예측이 가능하도록 하는 위험 예방 시스템에 관한 것이다.

(2) 배경 기술

일반적으로 고속철도란 여객 철도의 일종으로 기존의 철도 차량에 비하여 빠른 차량을 의미하고 200 km/h 이상 또는 250 km/h 이상의 속도로 운행될 수 있도록 설계된 철도를 말한다. 철도는 철 차륜으로 이루어지거나 또는 자기 부상 방식으로 이루어질 수 있다. 철 차륜으로 운행되는 고속 철도는 전동기로 차륜을 회전 시켜 궤도를 달리는 방식이 사용되고 전차선에서 전력을 공급받아 차량으로 전달하는 팬터그래프(pantagraph), 전차선에서 공급받는 전력의 전압을 변환시켜 전동기의 고정자 및 회전자에 전달하는 주변압기, 주변압기에서 전달되는 전압을 전동기 고정자에 전달하여 회전 자장을 발생시키는 모터 블록 및 모터 블록의 전력을 회전자를 통해 차륜으로 전달하는 보조 블록으로 이루어진 전동차 모터 블록으로부터 전달되는 전류 및 주파수에 따라 출력을 발생시키는 견인 전동기(traction motor), 플렌지를 이용하여 견인 전동기와 결합된 감속기, 차체와 대차 사이의 상대 운동을 허용하도록 감속기와 차축 기어 감속 장치 사이에 위치하는 트리포드(tripod) 및 입력 기어와 차축 기어로 이루어지고 동력을 차축으로 전달하는 차축 치자 감속 장치로 이루어진 동력 대차 그리고 차체의 하중을 지지하면서 견인력과 제동력을 전달하기 위한 관절 대차를 포함할 수 있다. 고속 철도는 전기에 의하여 운행되고 운행 시스템이 기간산업 형태가 되므로 차량 상태 또는 운행 상태에 대한 감시는 대형 안전사고의 발생을 방지하기 위하여 필수적으로 이루어져야 하고 자동으로 이루어지는 것이 유리하다. 그리고 이와 같은 감시는 실시간으로 이루어지는 것이 유리하다.

고속 철도의 전동 대차에 사용되는 감속 장치의 경우 주기적으로 점검하여 운행 과정에서 발생될 수 있는 결함을 방지하도록 하고 있다. 그러나 점검주기에 비하여 부품이 빠르게 손상이 되면 운행 위험이 발생될 수 있고 그리고 부품 마모가 느리게 진행되면 불필요하게 부품이 교체될 수 있다는 문제점을 가진다.

열차 차축 감시와 관련된 선행기술로 특허공개번호 10-2013-0060816 광섬유 에프비지 센서를 이용한 연속식 열차 차축 감시 시스템 및 방법이 있다. 상기 선행기술은 열차의 축 상에서 발생한 온도 및 진동을 측정하는 FBG 센서로 이루어진 측정 수단과, 상기 측정 수단에서 측정된 광섬유 FBG 센서의 브래그 격자의 파장 변화량을 진동에 의한 동적 변형율과 온도로 환산하여 지상의 열차 축 상 관리서버로 전송하는 신호처리수단을 포함하는 연속식 열차 차축 감시 시스템에 대하여 개시한다. 철도 차량용 대차의 감시와 관련된 선행기술로 특허공개번호 10-2009-0069471 철도 차량용 대차의 피로도 감시 장치 및 이를 이용한 철도 차량 보호방법이 있다. 상기 선행기술은 철도 차량용 대차의 각 구성요소에 설치되는 다수개의 가속도 센서와, 상기 가속도 센서에서 측정된 가속도 값을 디지털화하는 입력신호 변환부와, 상기 입력신호 변환부에서 디지털화된 가속도 값을

주파수 영역의 진동특성으로 변환하는 디지털 신호 처리부와, 상기 디지털 신호 처리부를 통해 입력된 진동 특성을 분석하는 마이크로프로세서를 포함하는 철도 차량용 대차의 피로도 감시 장치에 대하여 개시한다.

실질적으로 진동은 다양한 위치에서 다양한 형태로 발생될 수 있고 진동의 발생원의 선정 및 각각의 진동 발생원으로 발생되는 진동의 분석 방법이 실시간 위험 예측을 위하여 주요한 인자가 될 수 있다. 상기 선행기술은 진동원에 따른 진동 분석 및 그에 따른 위험 예측 방법에 대하여 개시하지 않는다.

다음 그림 3.2.5는 이번 특허의 청구도면 내용이다.

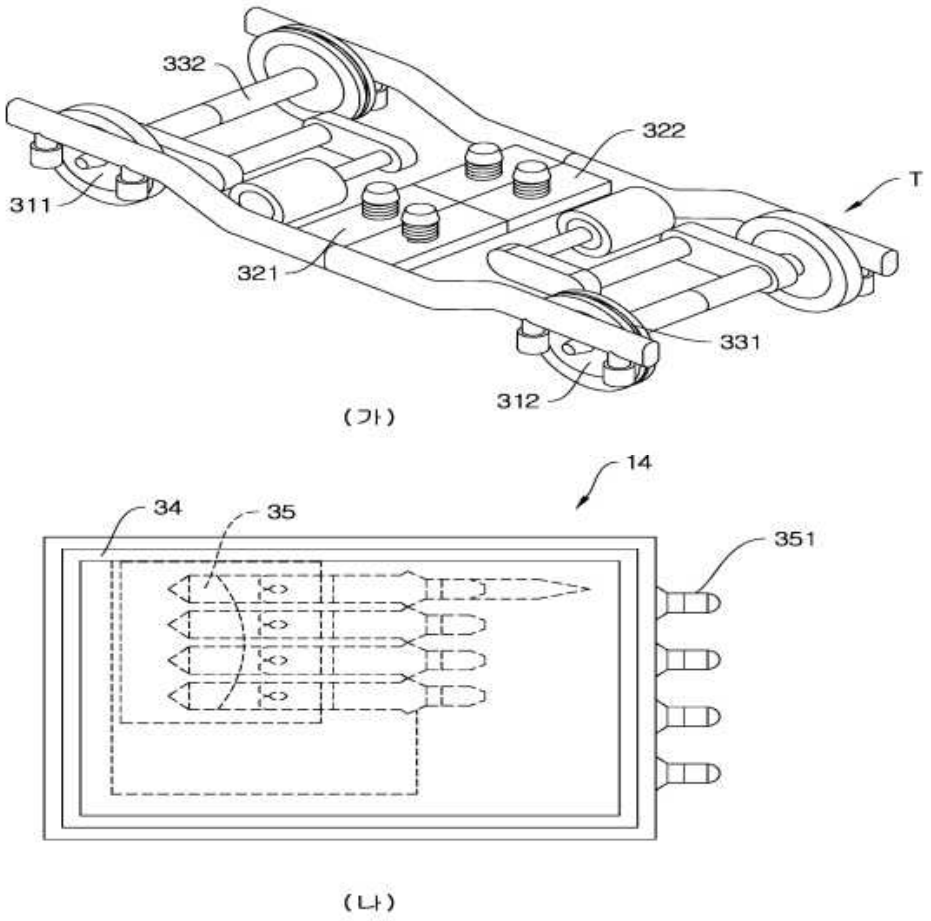



그림 3.2.5 고속열차의 안전 예방을 위한 진동 측정 시스템 청구 도면(1)

## 2. 논문 게재 내용

### 가. 논문 게재의 배경

대한민국의 고속철도차량은 프랑스TGV와의 기술협약에 이은 1세대 KTX에 이어 'KTX-산천', 최근에는 'HEMU-430X'로 발전하고 있으며 430km/h의 속력으로 주행이 가능한 우수하고 안전한 고속열차로서의 역할을 지향하고 있다. 그러나 고속열차의 핵심 동력원인 모터감속기(MRU)에는 제조사로부터 받은 진동해석에 대한 기본 자료가 전무하고 또한 기본설계 이후에 발생하는 Trouble shooting에 대한 자료는 매우 귀중한 자료이나 수집이 불가한 실정이 다. 또한 설비의 유지보수 효율화 측면에서 상시감시시스템(online monitoring system)이 요구되고 있으며 이 시스템은 각 감속기의 현재의 운행상태에 대한 안정성과 향후 정비시점의 적절한 파악을 위해 진동과 온도 그리고 윤활기술을 통한 실시간 데이터 저장, 진단, 위험 등을 모니터링 역할을 수행할 예정이다. 따라서 이 시스템의 기본적인 설계 자료를 위해서는 감속기 관련 위험속도를 포함한 기본적인 진동특성에 관한 검토가 필요하다.

철도차량은 기본적으로 차륜-레일간의 강한 충격진동이 있으며 가 변속(variable speed)이므로 상시감시시스템을 설계함에 그 어떤 기기보다 가장 어려운 조건을 가지고 있다. 또한 주행 중에 발생이 가능한 결함을 파악하는데 있어 설비진단의 개념이 중요하게 포함되어야 하는 이유는 가변상태의 주요 가진 주파수와 감속기 유닛이 내포하고 있는 고유치와의 관련성(공진)을 검토해야 하기 때문이다. 본 논문에서는 감속기를 대상으로 계측장비를 활용한 실험적 모드해석을 수행하고 데이터를 분석한 내용을 언급하였다. 본 연구결과는 고속철도차량(KTX)의 핵심 주요 부품인 감속기의 상시 감시시스템 설계 및 고속철도의 주행 시 안정성 향상 확보를 위한 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

### 나. 감속기 구조 및 상시 감시 시스템 설계

KTX 모터감속기는 견인전동기로부터 발생되는 회전력을 차륜에 전달하는 동력전달장치로서 편성된 차량의 선두 및 후미에 있는 각각 3개의 동력 대차(bogie)의 하부에 배치되어 있으며 각 대차별로 2세트가 서로 마주보고 설치된 구조로서 대차 1세트 당 2개의 감속기(1차감속기, 2차감속기)로 구성되어 있다. 따라서 KTX차량 1개 편성에는 총 12세트의 감속기가 설치되어 있다. 일반적인 편성(8~12)으로 구성된 KTX 감속기유닛의 배치도(중간 객차 생략)와 대차 및 감속기의 주요 구성도는 그림 3.2.6(????)과 같다. 또한 KTX의 감속기 상시감시시스템의 주요 구성도는 다음 그림 3.2.6과 같다.

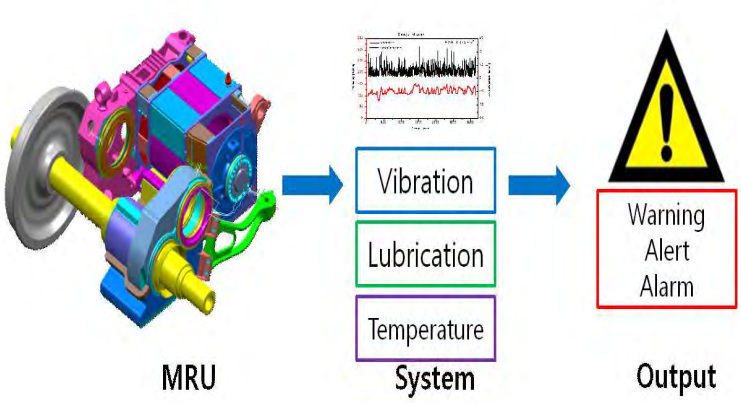



그림 3.2.6 Online Monitoring System Design Concept for KTX

다. 논문 결과 내용 요약

이 연구에서는 다양한 실험적인 방법을 이용하여 KTX MRU의 실차 및 구성부품의 고유진동수를 산출하고 MRU에 관련된 위험속도를 구하여 Mode shape를 통해 그 거동을 분석하였다. 또한 MRU에서 발생할 수 있는 가진 주파수를 열거하고 고유주파수와의 연동성을 확인하였다. 특히 단일부품 및 조합형 부품으로부터 산출한 고유주파수와 실차 시험에서 산출한 고유주파수가 종합적인 조립상태와 레일에 지지한 상태의 강성 및 질량의 변동으로 인해 거의 유사하지 않은 것을 확인하였으며, 상용 주행속도 120km/hr에서는 MRU의 위험속도와 1차 감속기의 GMF와도 일부 근접하는 것으로 파악되므로 MRU의 상태측면에서 주파수의 조정을 확인해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같이 정리를 하였다.

(1) KTX MRU의 각 단일부품 및 조립부품의 각 고유주파수 산출
(2) KTX MRU 작동주파수(가진 주파수)의 산출과 고유주파수와의 연관성
(3) 주요 상용속도에서의 KTX MRU 위험속도와의 연관성 검토

다음 아래의 표 3.2.1은 논문 게재를 하면서 정리한 KTX 감속기의 치명 결함 주파수를 정리한 것이다.

표 3.2.1 KTX speed versus MRU critical frequency

| km/hr | 690Hz | 790Hz | 1,045Hz | 1,835Hz |
|---|---|---|---|---|
| 121 | GMF Trans & Drive | | – | – |
| 141 | GMF Axle | | | |
| 70 | – | 2XGMF Trans & Drive | – | – |
| 81 | – | 2XGMF Axle | | |
| 92 | – | – | 2XGMF Trans & Drive | – |
| 106 | – | – | 2XGMF Axle | – |
| 139 | – | GMF Trans & Drive | – | – |
| 161 | – | GMF Axle | – | – |
| 161 | – | – | – | 2XGMF Trans & Drive |
| 187 | – | – | – | 2XGMF Axle |
| 184 | – | – | GMF Trans & Drive | – |
| 213 | – | – | GMF Axle | – |
| 323 | – | – | – | GMF Trans & Drive |
| 374 | – | – | – | GMF Axle |

## 3. 소프트웨어 저작권 등록

이번 연구 과제를 진행을 하면서 고속열차용 감속기 모니터링 시스템 구동 소프트웨어를 한국저작권협회에 등록 신청을 하여 프로그램등록을 완료 하였다. 다음 그림 3.2.7은 소프트웨어 등록 정리 내용이다.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 등록번호 | C-2014-024616 | 등록일자 | 2014년 10월 01일 |
| 등록부문 | 프로그램 등록(저작자성명, 창작연월일) | | |
| 제 호 | T-GMS(티 - 지엠에스) | | |
| 종 류 | 시스템프로그램 | | |
| 저작자 | 케이티엠엔지니어링 주식회사 | | |
| 등록원인 | 저작자 : 케이티엠엔지니어링 주식회사, 창작 : 2014.09.01 | | |
| 권리자 | 케이티엠엔지니어링(주) | 주 소 | 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124 |

그림 3.2.7 소프트웨어 등록 내용

# 제4장 연구목표 달성 및 효과

# 제1절 연구개발 최종목표 달성도

## 1. 연구개발 최종 목표

본 과제의 최종 목표는 감속기에서 발생하는 신호(온도, 진동, 윤활유 상태)를 상시 모니터링하고 실시간 분석, 진단하여 이상발생시 기관사에게 즉시 통보되는 감속기 이상 상태 모니터링시스템 기술개발 이다.

- 진동을 이용한 감속기 모니터링 및 진단시스템 개발 (측정범위10㎐~20㎑)
  (대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함)
- 최고속도 400㎞/h까지 적용 가능 (실차 검증속도 300㎞/h)
- 주요 고장에 대한 이상상태 모니터링 및 진단시스템 신뢰도 95% 이상

가. 정량적 성과 목표 및 성과 지표

표 4.1.1 정량적 성과 목표 및 성과지표

| 연차 | 연차별 성과목표 | 성과지표 | 측정방법 | 목표치 | 가중치 (%) | 달성치 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1차년도 | 감속기손상 특성분석 및 모니터링 시스템계 | (1-2) 센서 종류의 최적 선정 및 부착위치 설정 | 현황 실측 및 진단 | 1건 | 20 | 1건 |
| | | (7-1) 모니터링시스템 H/W 기본설계서 개발 | 기본설계서 개발건수 ×1 | 1건 | 50 | 1건 |
| | | (7-1) 모니터링시스템 S/W 기본설계서 개발 | 기본설계서 개발건수 ×1 | 1건 | 30 | 1건 |
| | 소 계 | | | | 100 | |
| 2차년도 | 모니터링 시스템 제작 및 성능시험 | (1-1) 국내외 학술지 논문게재 건수 | 국내외 학술지게재 논문건수 ×1 | 1건 | 15 | 1건 |
| | | (1-2) 국내외 학술대회 논문발표 건수 | 국내외 학술대회 논문발표건수 ×1 | 1건 | 15 | 1건 |
| | | (2-1) 특허출원건수 | 특허출원건수 ×1 | 2건 | 20 | 3건 |
| | | (6-1) 시제품 제작 | 시제품 제작(항목별) ×1 | 1건 | 50 | 1건 |
| | 소 계 | | | | 100 | |
| 3차년도 | 현차 시험 및 통합시스템 구축 | (2-1) 특허출원건수 | 특허출원건수 ×1 | 1건 | 20 | 1건 |
| | | (2-4) 소프트웨어 출원 건수 | 소프트웨어 등록건수 ×1 | 1건 | 30 | 1건 |
| | | (6-1) 시제품 제작 | 시제품 제작(항목별) ×1 | 1건 | 50 | 1건 |
| | 소 계 | | | | 100 | |

나. 연구목표 및 내용 (총괄)

표 4.1.2 연구목표 및 내용

| 연 차 | 연구목표 | 주요 연구내용 |
|---|---|---|
| 1차년도 | ■ 현황실측 및 진단(실물/현차)<br>센서 부착위치 및 종류 최적 선정 | ■ 현황실측 및 진단실측 열차 주행시험 및 LAB Test<br>■ GEAR BOX 정밀 진단 내용 발표 진행 |
| | ■ 관련 시스템 기술 적용 및 TEST<br>■ 결함신호처리, 차속&결함 신호처리 판별방법 등 이론 확립 | ■ 국내외 기술 현황 점검<br>→ 해외 기술 현황 조사<br>→ 관련 전문 시스템 시험 진행<br>■ 결함 확률, 결함 분포, 실차 특성 요소 등 감시 파라미터 이론 확립 |
| | ■ 최적 기술 선정 및 모니터링 시스템 기본 설계<br>■ S/W 적합성 테스트 수행 | ■ 모니터링 시스템 H/W, S/W 초기설계 (대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업 기능 포함)<br>■ 최적 기술 s/w 적용 및 적합성 Test<br>■ 온라인 모니터링 시스템 구비<br>■ 필요 Module 선정 및 test |
| 2차년도 | ■ 감속기 시스템 이상상태 진단 S/W (알고리즘 포함) 구축 | ■ 시제품 시스템 성능 평가를 위한 진단 파라미터 재정립 및 확정<br>■ 사용자 요구사항을 최적 반영한 User interface 구축 |
| | ■ 감속기 이상상태 진단 H/W 구축 및 성능 시험 | ■ 시스템 하드웨어 시스템 구축<br>■ 감속기 모니터링 시스템 실물 및 실차 적용 시험 |
| | ■ 대차 진동 측정, 저장 및 데이터 백업용 S/W, H/W 구축 및 성능 시험 | ■ 대차 진동 백업 기능 추가 및 성능 시험 (S/W, H/W) |
| 3차년도 | ■ 진동/윤활/온도 Monitoring 통합 H/W. S/W 최종 설계안 확정 | ■ 통합신호의 Input/Output 알고리즘<br>■ 통신 유/무선화 및 KTX-OBCS 연계방안 수립 |
| | ■ 진동에 의한 결함 및 이상상태 분석/평가 시스템 실차적용 시험 및 업그레이드 | ■ 모니터링 시스템 적용 및 시운전을 통한 감속기 결함 및 이상상태 H/W, S/W, 알고리즘 검증 및 보완<br>■ 진동 이상상태 기준 확립<br>■ 실차 장착용 하드웨어 시스템 내구성 테스트 등 공인인증 시험 진행<br>■ 최종 승인 시험 진행 - 제품 상용화 실현 |
| | ■ 통합시스템 매뉴얼 작성 | ■ 통합시스템 실용화 방안제시<br>■ 통합 시스템 유지보수 매뉴얼 작성 |

다. 각 연차별 연구 목표 수행 결과

(1) 1차년도 연구 수행 결과 정리

(가) 현황실측 및 진단(실물/현차) 센서 부착위치 및 종류 최적 선정

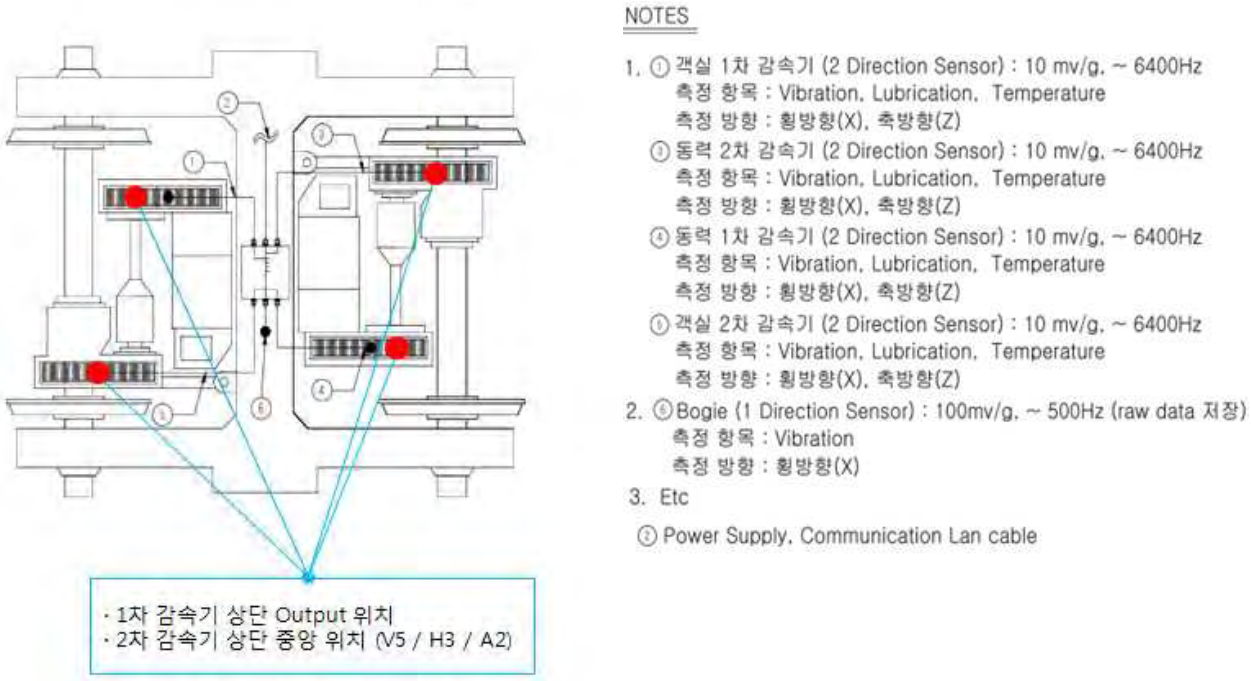


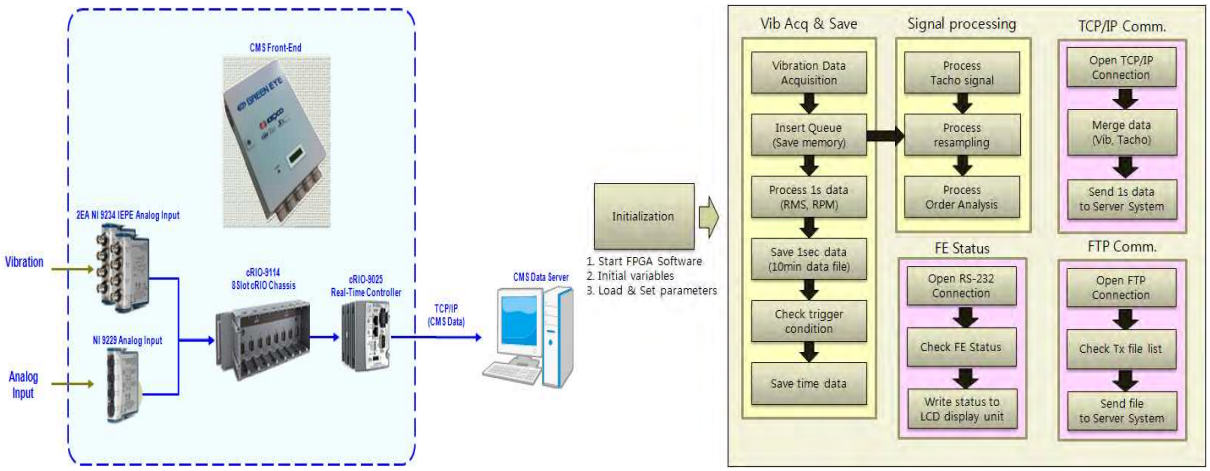

그림 4.1.1 감속기 최적센서 위치의 선정



그림 4.1.2 전동차용 감속기 현황 진단 측정 시험 사진

(나) 관련 시스템 기술 적용 Test 및 결함 파라미터 확립

① 풍력 발전용 기어박스 모니터링 시스템 철도차량 적용 시험




<Hardware 구성> <Software 구성>

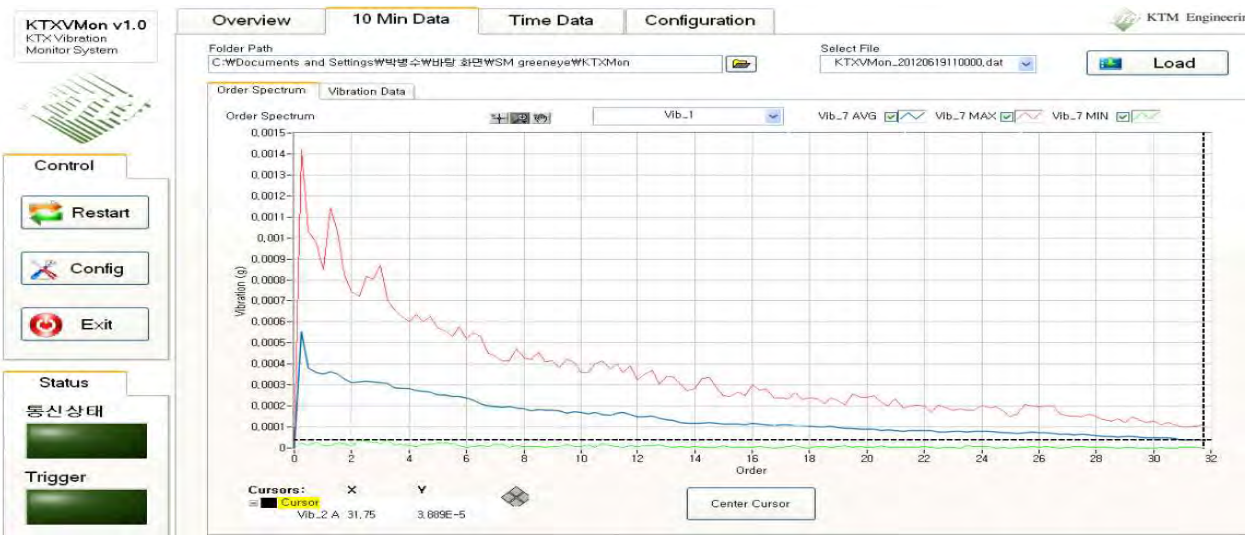



그림 4.1.3 풍력발전용 모니터링 시스템 실차 적용 시험 진행

② 무선 모니터링 시스템 실차 적용 시험 진행



그림 4.1.4 무선 모니터링 시스템 실차 적용 시험

③ 산업용 플랜트 모니터링 시스템 열차 차량 적용 시험

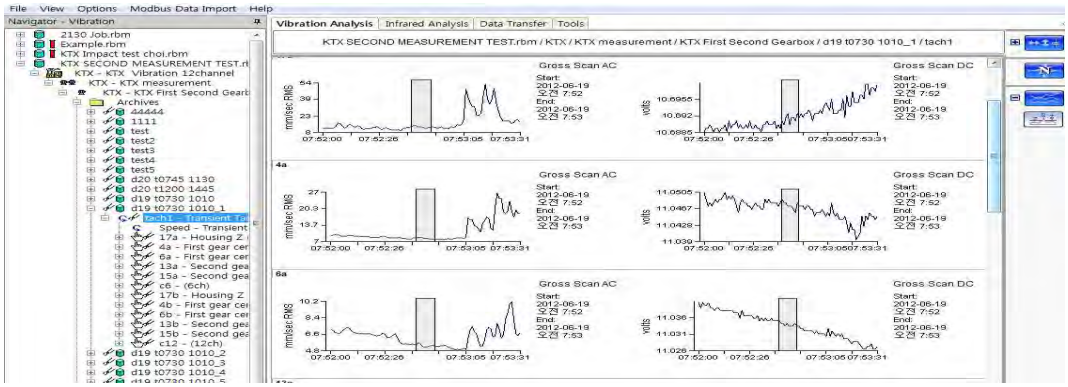









그림 4.1.5 산업용 발전 모니터링 시스템 열차 차량 적용

표 4.1.3 각 산업 분야 모니터링 시스템 비교 분석

| 분류 | EMERSON | SM INSTRUMENT | SKF | KTM |
|---|---|---|---|---|
| H/W 채널 | • 24 Ch. | • 진동 : 12 Ch.<br>• AI : 8 Ch.<br>• 온도 : 4 Ch.<br>• DI : 8 Ch. | • 온도 : 8 Ch.<br>• 진동 : 8 Ch.<br>• 속도 : 4 Ch. | • 진동 : 9 Ch.<br>• 온도 : 16 Ch.<br>• 윤활 : 4 Ch.<br>• 속도 : 1 Ch.<br>(1 Client 기준) |
| 주요 용도 | • 산업용 터빈, 발전기, 기어, 블로워 | • 풍력발전기<br>(산업용 변형) | • 철도차량<br>(제지, 철강, 산업용 변형) | • 철도차량 전용, 변속기어박스 전용 |
| 가격 | • 약 1억~1억 5천 | • 약 1억~1억5천 | • 약8천~1억 | |
| 데이터 수집 및 전송 | • Real time 데이터 전송<br>• Hub and Nic 이더넷 통한 서버 전송 | • Real time 데이터 전송<br>• FTP 통신 이용 측정 데이터 자동 전송 | • Real time 데이터 전송<br>• CM Data 이더넷을 통한 서버전송 | • Real time 데이터 전송<br>• 이더넷을 이용한 서버-클라이언트 구조 |
| 측정 가능 주파수 | • 2ch. 모니터 0-40 kHz | • Vibration RMS 산출 (0.1-100Hz, 10-1kHz) | • 최대 250km/h 적용 가능 주파수 | • 12.8 ks/s 샘플링 데이터 FFT데이터, RMS 데이터 |
| 주요 측정 진동 | • 40kHz Fmax, 6400 lines resolution<br>• Peakvue 베어링 충격 파형 Demodulation<br>• FFT 시간 파형 및 위성 분석 자동 진단 기능<br>• 2kHz, 12800lines waveform 저장 가능(Transient)<br>• 100시간 이상 waveform 저장 가능 | • order analysis : 10분 평균 Power Vibration 1MA, 3MA 산출<br>• HFBP (1k~10kHz) 산출<br>• 10분 주기 데이터 파일 저장<br>• Trigger에 의한 시간 파형 저장<br>• 10분 평균 order spectrum | • Hot Axle Box 베어링 온도 상승시 기차 운행 정지<br>• Boogie hunting Detection<br>• TSI 파라미터 에서 Relay 기능<br>• 철도차량의 안정성 측정 | • FFT, RMS 측정 및 진단<br>• 6.4khz, 5~120 line resolution search Demodulation<br>• 대차 진동 측정<br>• 감속기 진동 측정<br>• 10시간(1일기준) 진동파형 저장 (Raw Data) |
| 부가 기능 | • 네트워크 손실을 고려한 8MB 저장 | • FTP 통신을 이용한 측정 데이터 자동 전송 | • 실시간 데이터 LCD 모니터 display 기능 탑재 진행 | • 실시간 데이터 감시 및 선택적 FFT 파라미터 실시간 모니터링 |

④ 결함 이론 및 최적 파라미터 정의

표 4.1.4 감시 및 진단 알고리즘이 포함된 감시 파라미터

| Parameters | 설 명 |
|---|---|
| Peak / RMS Crest factor | • 파형의 첨예한 정도를 나타내며 값이 클수록 열차의 진동 충격이 심하다는 것을 의미 |
| GMF | • 기어의 이빨이 맞물리는 부분 상태를 의미하는 것으로 기어의 편심, 치형 마모, 과도 백래쉬의 상태를 진단하기 위하여 선정 |
| GMF 2X, 3X | • 기어의 Misalignment 등을 진단하기 위하여 선정 |
| BPFI 7X | • 베어링 내륜 주파수 7배 성분<br>• 베어링의 외륜, 내륜에 손상이 가면 베어링 주파수의 특성은 고주파에서 주파수가 감지가 되어 점차 저주파수로 옮겨가면서 주파수가 나타남. 초기 베어링 결함을 감지하기 위하여 선정 |
| BPFO 7X | • 베어링 외륜 주파수 7배 성분 |
| 1X Shaft | • 고속열차 감속기 축에서 Unbalnce, Angle Misalignment, 치의 절손 등이 발생하게 되면 1x의 주파수가 발생. 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 2X Shaft | • 감속기 축에서 Offset Misalignment가 발생하면 shaft 2~3X의 주파수가 발생. 이러한 결함을 진단하기 위하여 선정 |
| 7X Shaft | • 감속기 축에서 Looseness가 발생하면 shaft 3~8X의 주파수가 발생. Looseness가 발생하는 이유는 기계적 조립상태에 문제가 있는 것으로 조기 이러한 결함을 검출하여 조치를 취하기 위하여 선정 |
| Kurtosis | • 베어링과 기어에서 발생하는 충격진동의 파형의 첨도(尖度)를 나타내는 것으로 파라미터 선정 |

표 4.1.5 KTX 진동 분석 파라미터

| Parameters | Additional (harmonics) | 120 km/hr | 290 km/hr |
|---|---|---|---|
| GMF Axle | ~3X | 588.5 Hz | 1422.2 Hz |
| GMF Trans & Drive | ~3X | 682.1 Hz | 1648.4 Hz |
| 1X Axle Axis | ~10X | 11.5 Hz | 27.9 Hz |
| 1X Axle Gear R | ~10X | 13.4 Hz | 32.3 Hz |
| 1X Trans | ~10X | 16.6 Hz | 40.2 Hz |
| 1X Drive | ~10X | 25.3 Hz | 61.1 Hz |
| Motor reduction unit output gear bearing | | | |
| NU2315 BPFI (1X) | ~10X | 95 Hz | 230 Hz |
| NU2315 BPFO (1X) | ~10X | 65 Hz | 158 Hz |
| NU2315 BSF (1X) | ~10X | 5 Hz | 13 Hz |
| NU2315 FTF (1X) | ~10X | 34 Hz | 83 Hz |
| NUP2314 BPFI (1X) | ~10X | 95 Hz | 230 Hz |
| NUP2314 BPFO (1X) | ~10X | 65 Hz | 158 Hz |
| NUP2314 BSF (1X) | ~10X | 5 Hz | 13 Hz |
| NUP2314 FTF (1X) | ~10X | 34 Hz | 83 Hz |
| Transmission gear Wheel bearing | | | |
| NU2315 BPFI (1X) | ~10X | 119 Hz | 286 Hz |
| NU2315 BPFO (1X) | ~10X | 81 Hz | 196 Hz |
| NU2315 BSF (1X) | ~10X | 7 Hz | 16 Hz |
| NU2315 FTF (1X) | ~10X | 43 Hz | 104 Hz |
| NUP 2314 BPFI (1X) | ~10X | 119 Hz | 286 Hz |
| NUP 2314 BPFO (1X) | ~10X | 81 Hz | 196 Hz |
| NUP 2314 BSF (1X) | ~10X | 7 Hz | 16 Hz |
| NUP 2314 FTF (1X) | ~10X | 43 Hz | 104 Hz |
| Driving Pinion bearing | | | |
| NU2220 BPFI (1X) | ~10X | 231 Hz | 558 Hz |
| NU2220 BPFO (1X) | ~10X | 173 Hz | 419 Hz |
| NU2220 BSF (1X) | ~10X | 11 Hz | 26 Hz |
| NU2220 FTF (1X) | ~10X | 87 Hz | 209 Hz |
| Demodulation(Peakvue) | | | |
| Overall RMS | | | |
| Crest factor | | | |
| Special sidebands | | | |
| Natural frequencies | | 697,790,1045,1845 | |

(다) 최적 기술 선정 및 모니터링 시스템 기본 설계 및 S/W 적합성 테스트 수행

① 하드웨어 기본 설계

표 4.1.6 각 하드웨어 채널별 센서 연결 위치 정리

| 모듈 이름 | 채널 No. | 센서 포인트 | 기타 |
|---|---|---|---|
| 가속도 모듈 #1 | 0 | #1 Gearbox MRU Vertical | IEPE Sensor |
| | 1 | #1 Gearbox MRU Axial | IEPE Sensor |
| | 2 | #1 Gearbox ARU Vertical | IEPE Sensor |
| | 3 | Bogie Axial | IEPE Sensor |
| 가속도 모듈 #2 | 0 | #2 Gearbox MRU Vertical | IEPE Sensor |
| | 1 | #2 Gearbox MRU Axial | IEPE Sensor |
| | 2 | #2 Gearbox ARU Vertical | IEPE Sensor |
| | 3 | RPM Sensor | - |
| 온도 모듈 | 0~2 | #1 Gearbox MRU Bearing | T type |
| | 3~6 | #1 Gearbox ARU Bearing | T type |
| | 7~9 | #2 Gearbox MRU Bearing | T type |
| | 10~13 | #2 Gearbox ARU Bearing | T type |
| | 14 | System Box | T type |
| | 15 | Outside | T type |
| 윤활모듈 | 0 | #1 Gearbox MRU | |
| | 1 | #1 Gearbox ARU | |
| | 2 | #2 Gearbox MRU | |
| | 3 | #2 Gearbox ARU | |

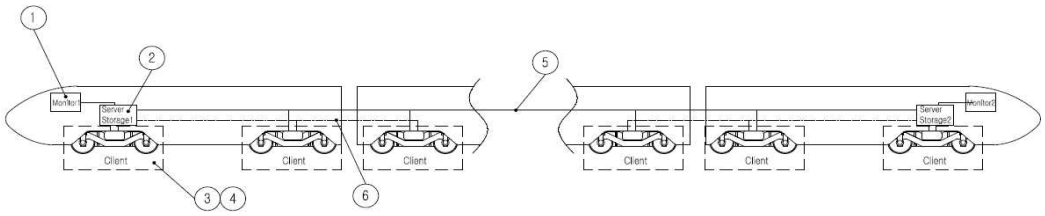



그림 4.1.6 시스템 레이아웃 기본 설계 도면

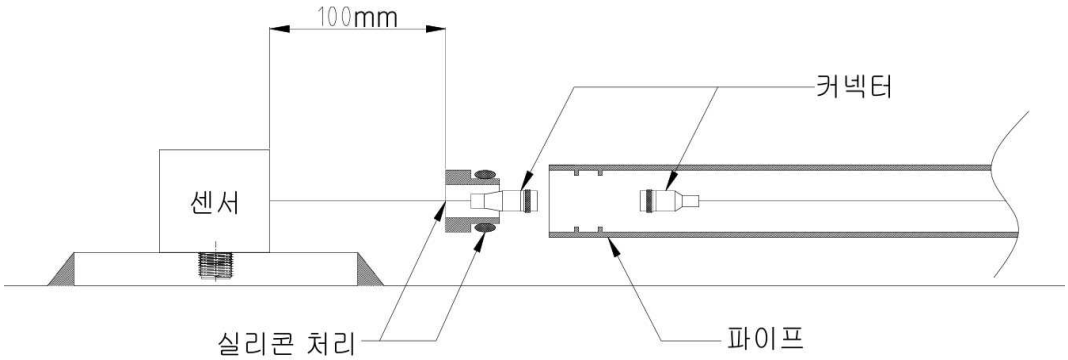



그림 4.1.7 센서 취부 방법

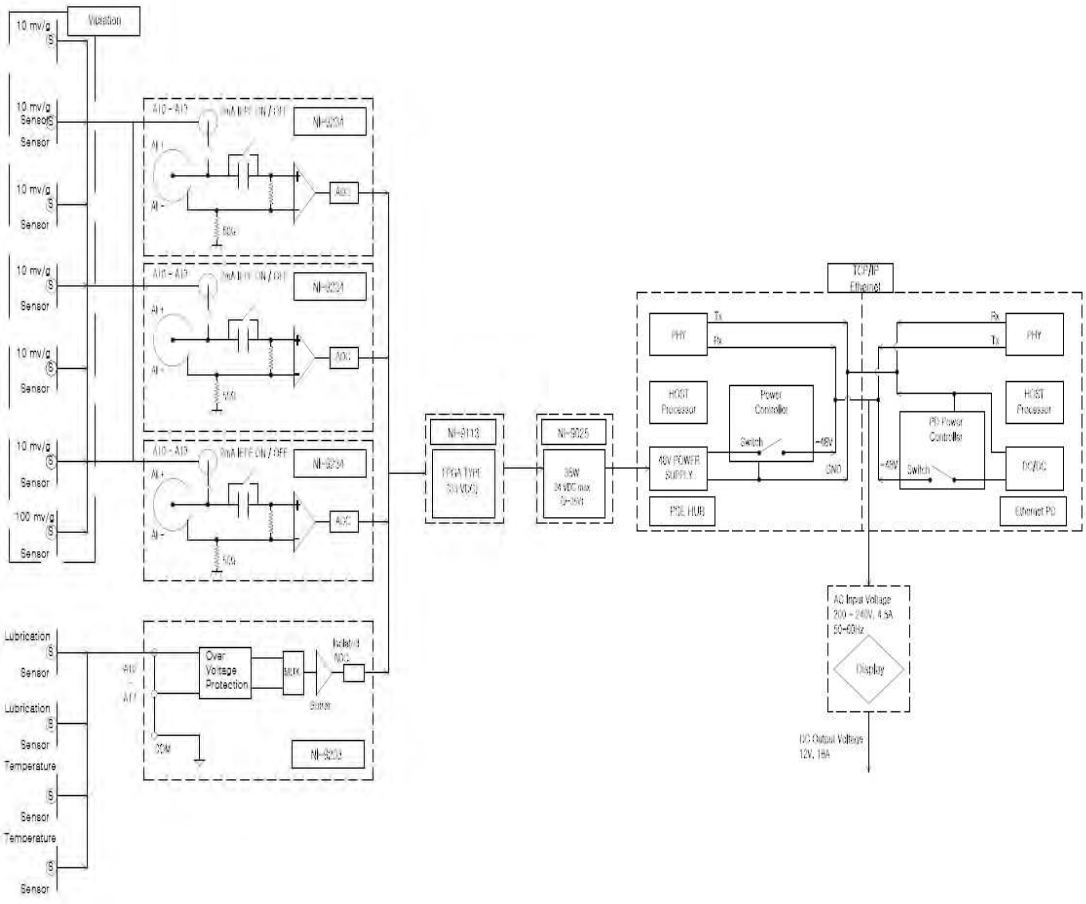



그림 4.1.8 시스템 전기도면 내용

② 소프트웨어 기본 설계

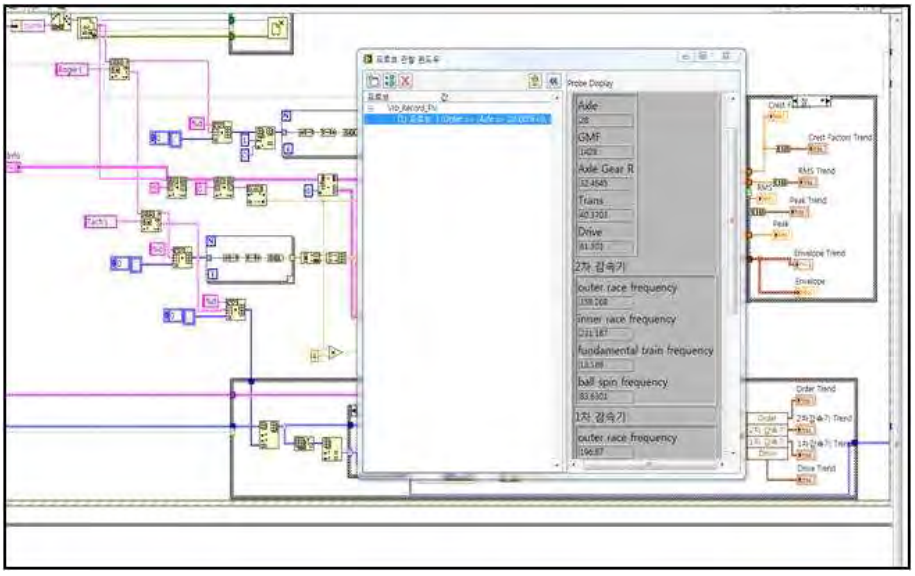



그림 4.1.9 소프트웨어 시스템 구성 설계 (Labview)

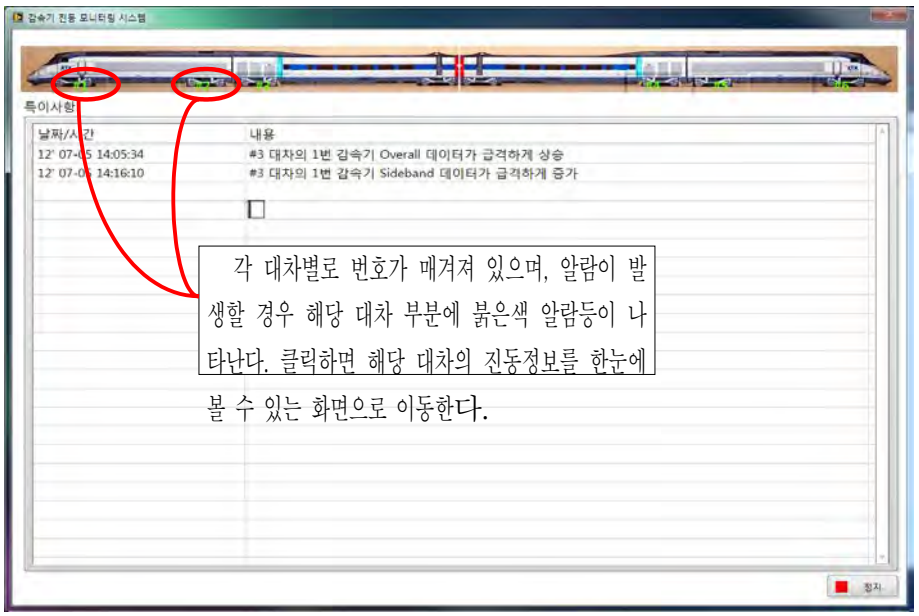



그림 4.1.10 사용자 프로그램 인터페이스 기본 설계

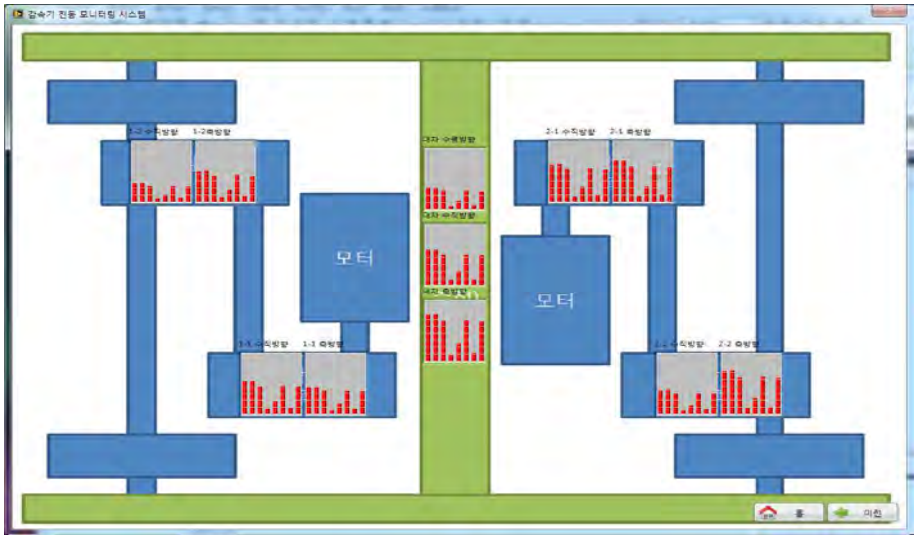



그림 4.1.11 사용자 프로그램 인터페이스 기본 설계

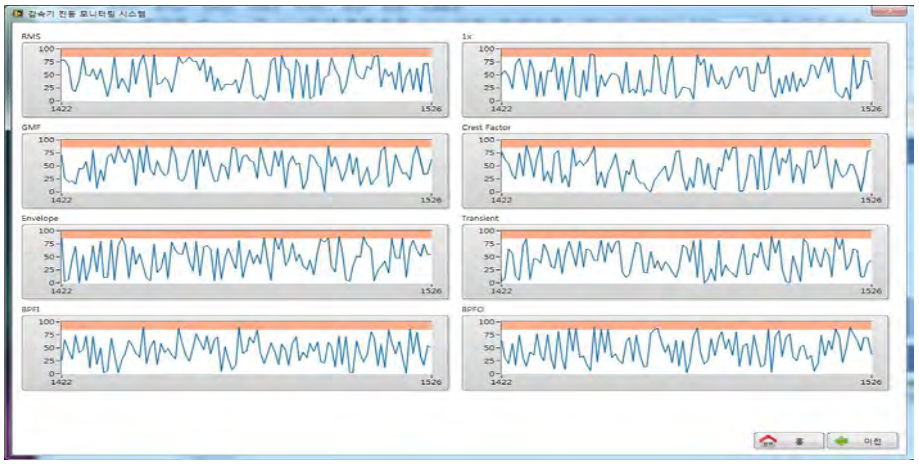



그림 4.1.12 사용자 프로그램 인터페이스 기본 설계

③ 최적 기술 적용 및 적합성 테스트 수행

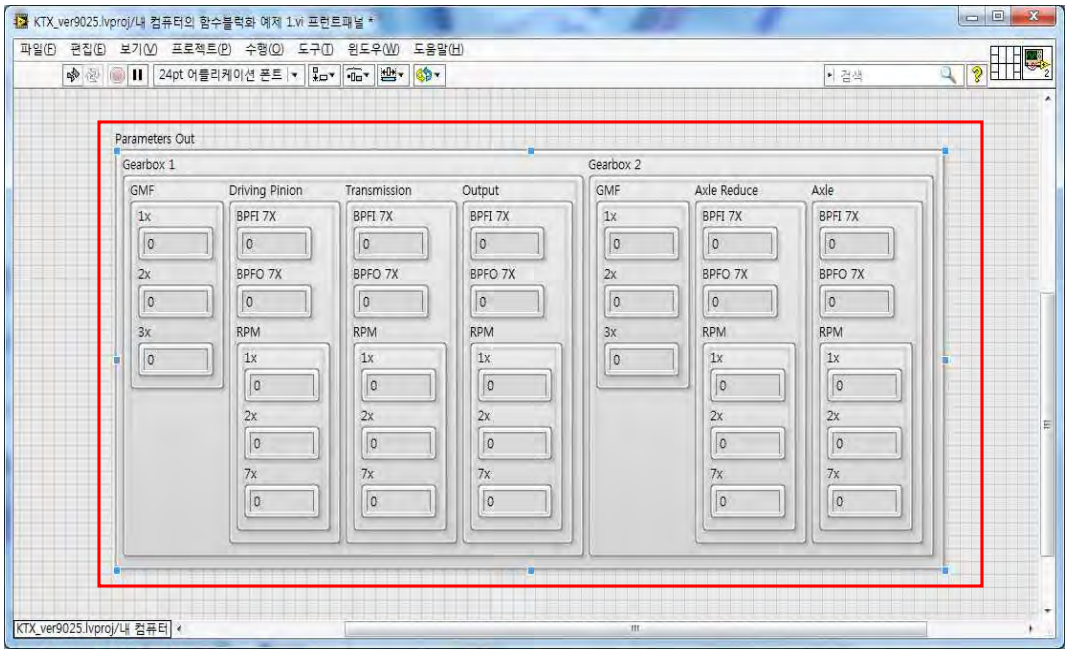



그림 4.1.13 31개의 출력 파라미터 구성 설계

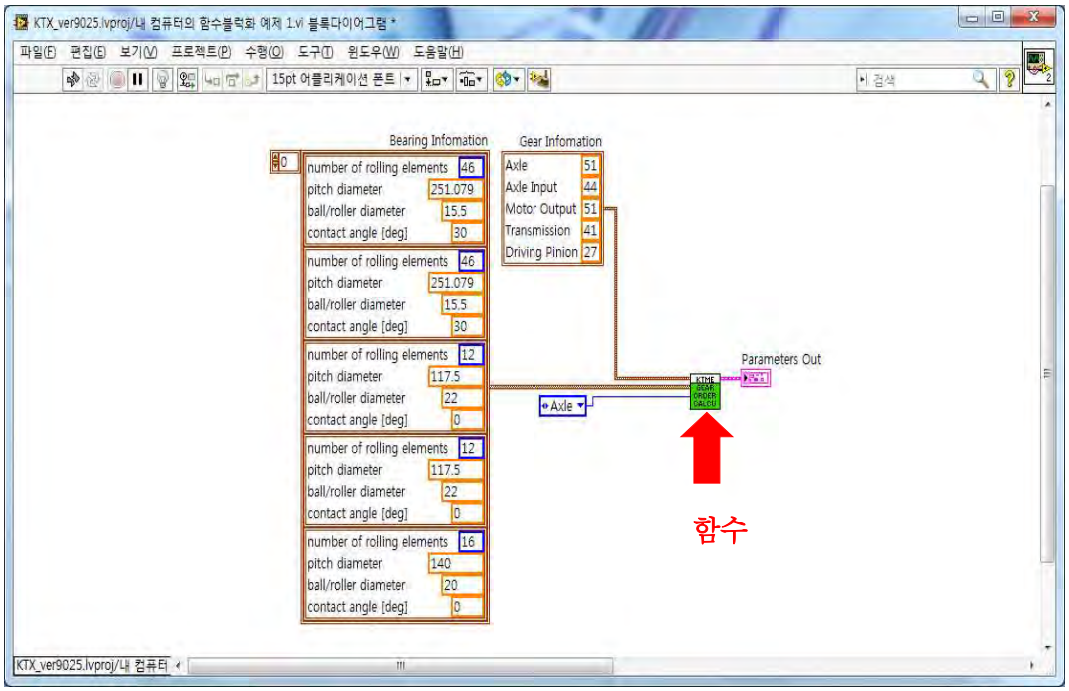


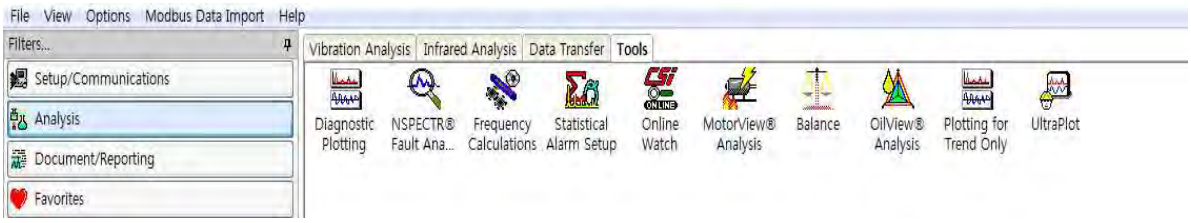

그림 4.1.14 모니터링 시스템 함수 블록화 설정 적용

④ 온라인 모니터링 시스템 구비

○ 산업용 발전 감시 모니터링 시스템 구비

표 4.1.7 산업용 발전용 모니터링 시스템



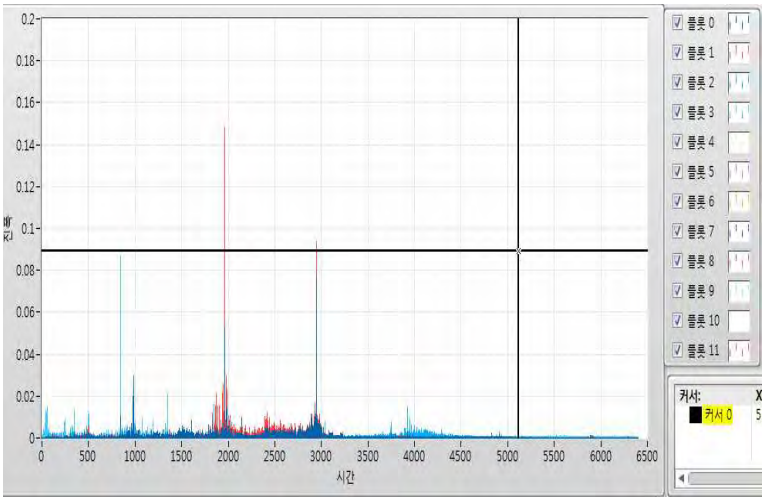

- CSI 6500 system의 장점
  ① 분석 Tool system이 잘 갖추어져 있어 측정 후 감속기 결함 분석에 용이하다.

- -CSI 6500 system의 단점
  ① Raw data 최대 주파수 측정 범위가 2000Hz까지로 한정되어 있다.
  ② 전용 Software에서만 분석이 가능할 뿐, 다른 프로그램으로의 Export가 불가능하다.
  ③ 고가이다.

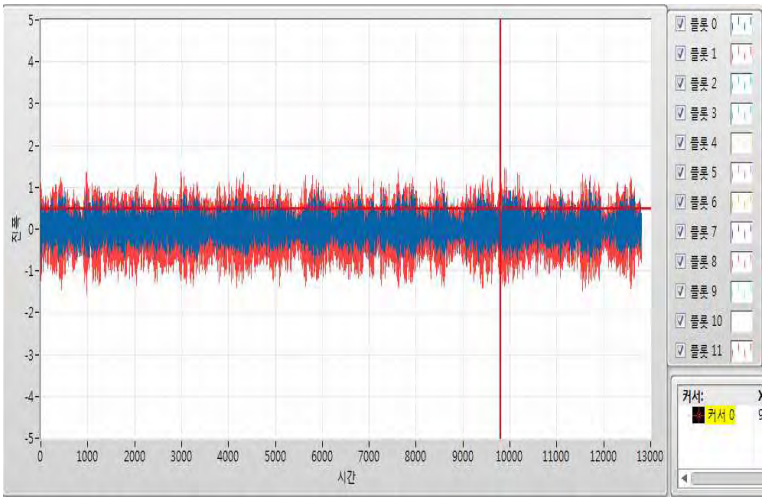
- -CSI 6500 system의 분석 Tool 및 감속기 Fault frequency에 관련된 Tracking 모드(속도가 변화함에 따라 변하는 결함주파수 성분 추적)등의 분석기능은 시작품 개발의 좋은 Reference가 되고 이와 관련된 CSI 6500 system의 장점을 살려 시작품 개발에 반영될 것이다.

○ NI 하드웨어 시작품 구비

표 4.1.8 NI 하드웨어 모듈 시작품







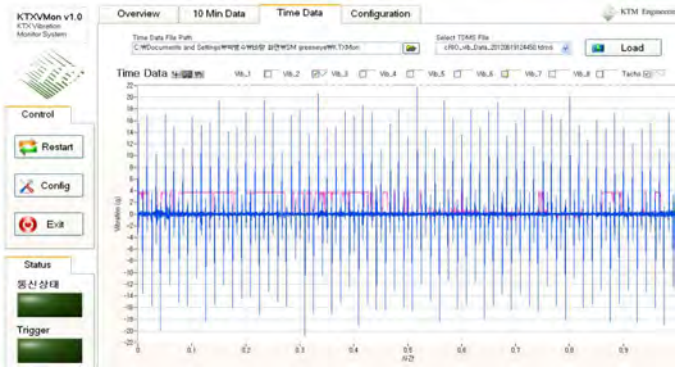

- 시작품(NI Module)의 장점.
  ① 다채널 Raw data 수집 속도 및 처리 속도 우수.
  ② Raw data 범위 개발여하에 따라 고주파수 대역의 범위까지도 가능.
  ③ KTX 운영 시 부하에 따른 시스템 오류 미약 혹은 없음.
  ④ 다양한 분석 Tool 개발 가능.
  ⑤ KTX 조건에 따라 시작품 소형 모듈 장착 가능.

- 시작품(NI Module)의 단점.
  ① 개발 진행 중.

- 금번 여러 계측기를 사용해 KTX 감속기 측정을 수행한 결과를 토대로 각 계측기별 장점만을 취합해 시작품 개발 중에 있다.

○ 풍력 발전용 모니터링 시스템 구비

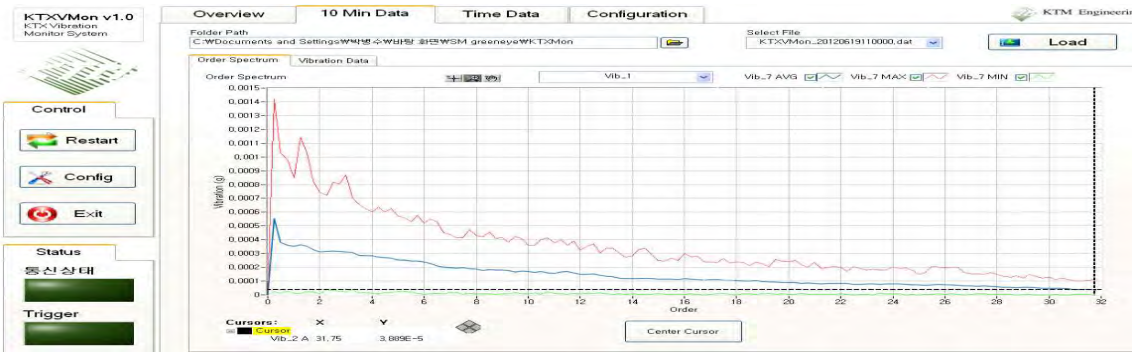
표 4.1.9 풍력 발전용 모니터링 시스템










- -SM Instrument(풍력발전소 모니터링 시스템)의 장점.
  ① 10분 Data는 결함이 심화되는 감속기의 상태를 파악하는 기능이 있다.
- -SM Instrument(풍력발전소 모니터링 시스템)의 단점.
  ① 과부하가 걸리면 시스템이 shutdown되는 치명적인 현상이 발생한다.
- -KTX 실차 모니터링 모드일 때 Trend(Overall 경향)를 볼 수 있는 10분 Data저장은 KTX 운행 시 감속기상태를 파악하는데 주요할 것으로 사료된다. 속도가 변화함에 따라 나타나는 진동 Overall값의 변화폭을 모니터링 함으로서, 개발품의 기능적인 측면으로 현재 감속기의 결함이 얼마나 심화되고 있는지를 판단하는데 중요한 기능이 될 전망이다. 그러나 SM Instrument장비자체를 실차에 적용하기에는 무리가 있다.

○ 무선 통신 모니터링 시스템 구비

표 4.1.10 무선 통신 모니터링 시스템








- -Wireless module(무선 통신 시스템)의 장점.
  ① 센서만 부착되어 있으면 송수신기의 설치 및 Data 수집이 간단하다.

- -Wireless module(무선 통신 시스템)의 단점.
  ① Data 수집 속도가 매우 느리다.
  ② Data 신뢰성이 낮다.

- -무선통신 방식이 시스템 구성이 쉽고 간단하지만, 감속기 모니터링 시스템을 구축하기에는 Data 수집 속도(통신방식의 한계) 및 Data 신뢰성면에서 이번측정에 사용된 4개의 계측 장비 중 가장 떨어진다고 판단된다. 그러므로 시작품 개발 시 고려사항이 되었던 무선통신 시스템 방식은 이번 감속기 모니터링 시스템 개발과정에서는 활용되지 않을 전망이다.

⑤ 필요 모듈 선정 및 테스트




그림 4.1.15 선정 하드웨어 모듈(NI)

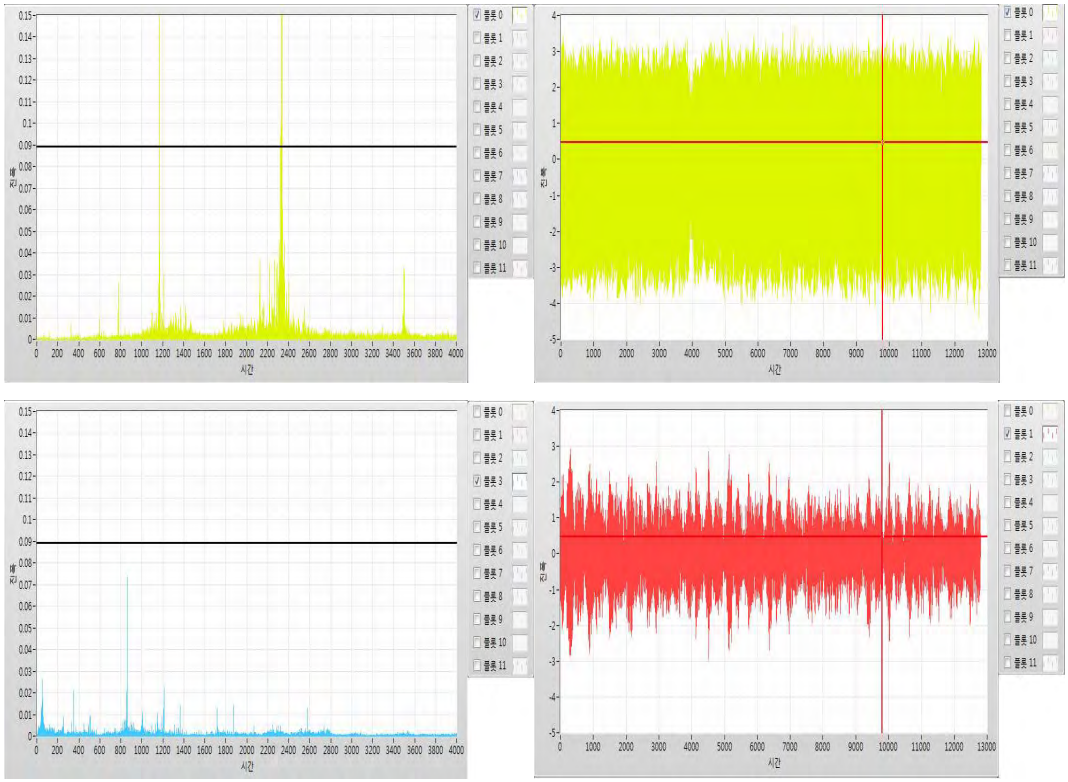


그림 4.1.16 선정 Module KTX 장착 시험 주파수

(2) 2차년도 연구 수행 결과 정리

(가) 감속기 이상상태 진단 소프트웨어(알고리즘) 구축

① User Interface 구축

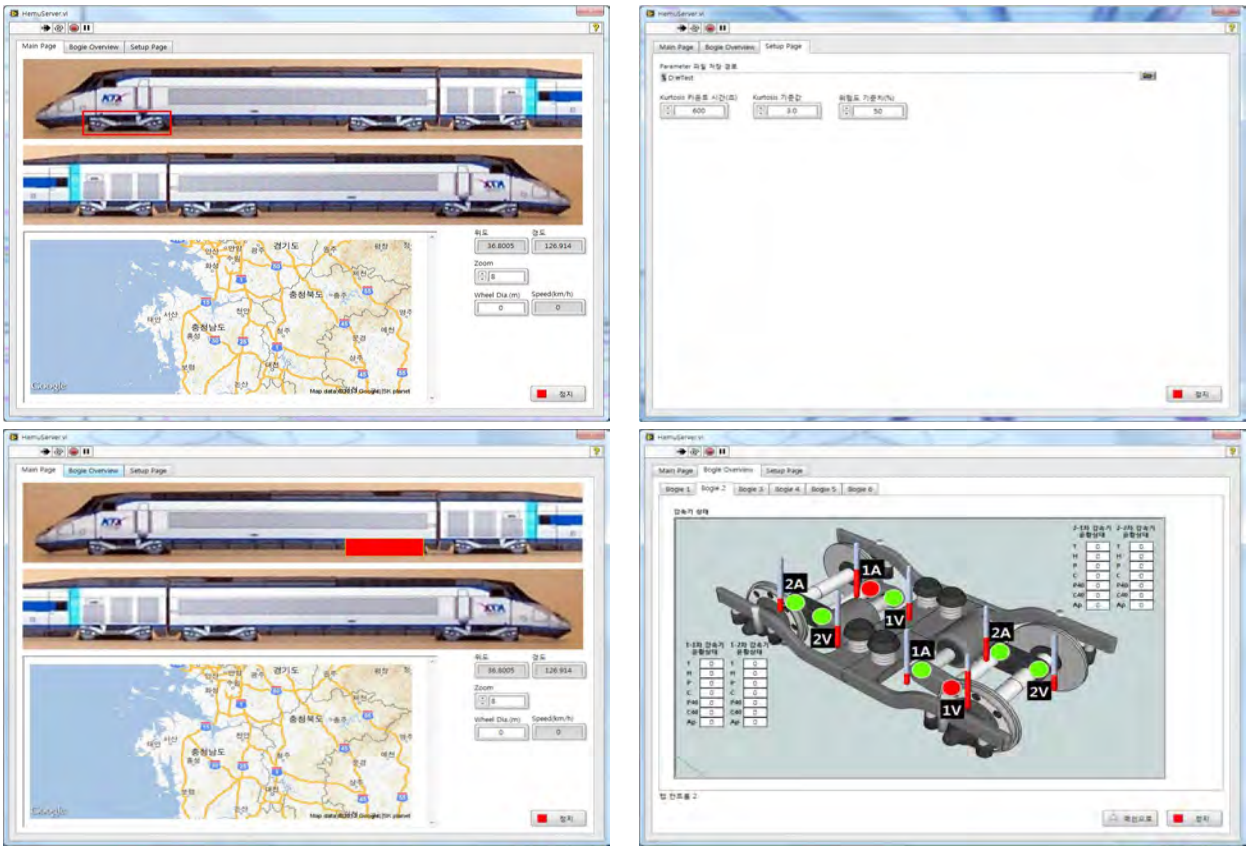



그림 4.1.17 사용자 인터페이스 구축

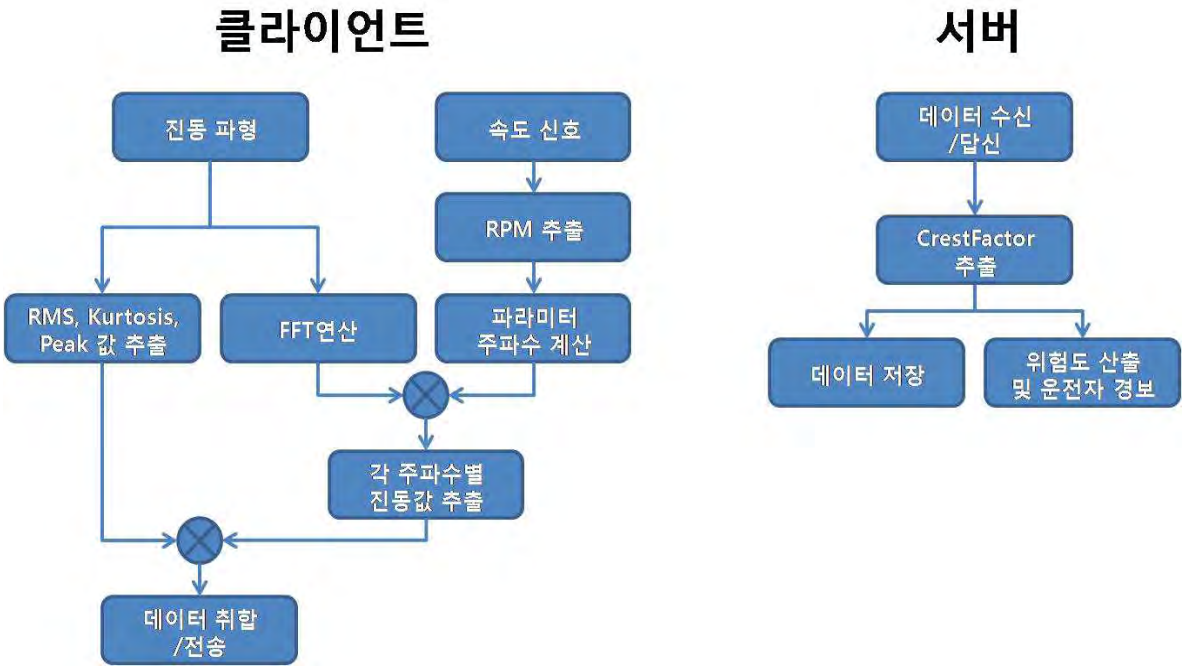



그림 4.1.18 프로그램 알고리즘

② 하드웨어 구축 및 성능 시험

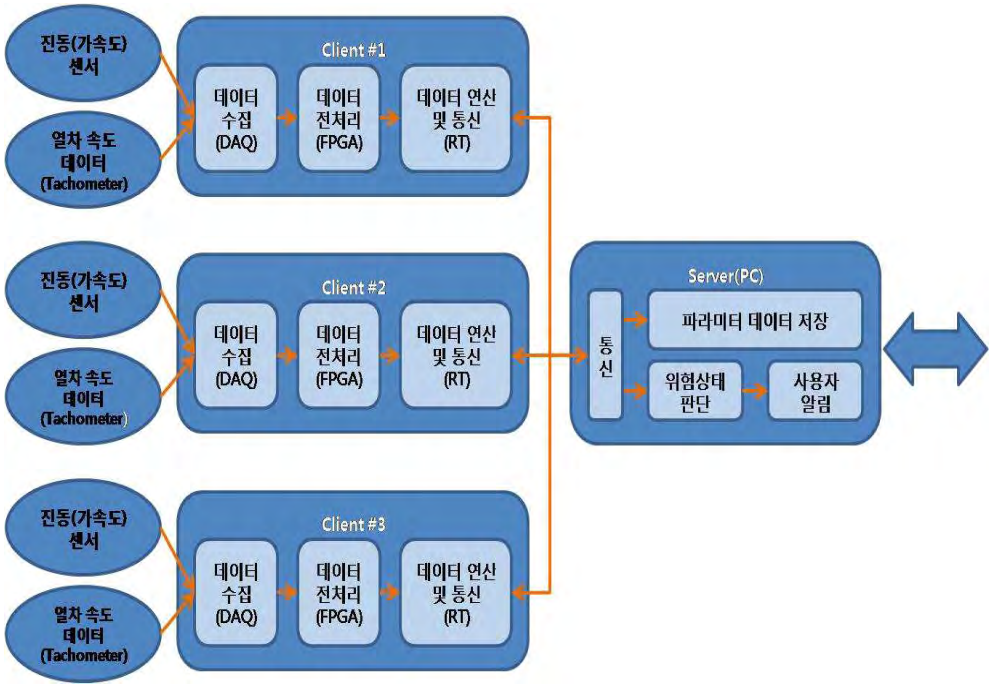



그림 4.1.19 모니터링 시스템 진단 구성도 (하드웨어)

표 4.1.11 구축 하드웨어 시스템 사양 내용

| 구분 | 내용 |
|---|---|
| (H/W) 채널 | • 진동: 7 ch , 온도: 16ch, 윤활:4ch, 속도:1ch |
| 주요 용도 | • 철도차량 전용, 변속기어박스 전용 |
| 데이터수집및전송 | • Real Time 데이터 전송<br>• 이더넷을 이용한 server – client 구조 |
| 측정 가능 주파수 | • 12.8ks/s의샘플링데이터 FFT 데이터, RMS 데이터 전송(최대 400 km/h) 적용 가능 |
| 주요측정진동 | • FFT, RMS 측정 및 진단<br>• 6.4khz, 5,120line resolution search Demodulation<br>• 10분 주기 데이터파일 저장<br>• 파라미터 Relay 기능<br>• 대차 진동 측정<br>• 감속기 진동 측정 |
| 부가 기능 | • 실시간 데이터 감시 및 선택적 FFT 실시간 모니터링 |



그림 4.1.20 서버 클라이언트 보호함 제작(좌 – 1차, 우 – 2차

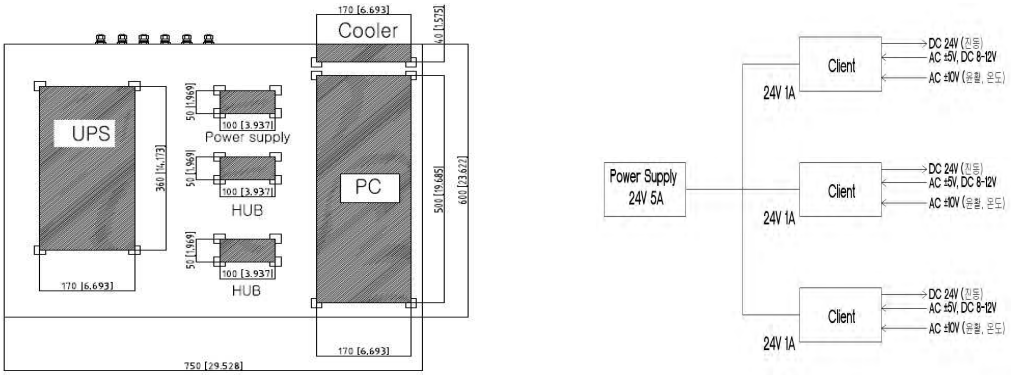



그림 4.1.21 하드웨어 서버 구성도

③ 구축 시스템 성능 실차 시험

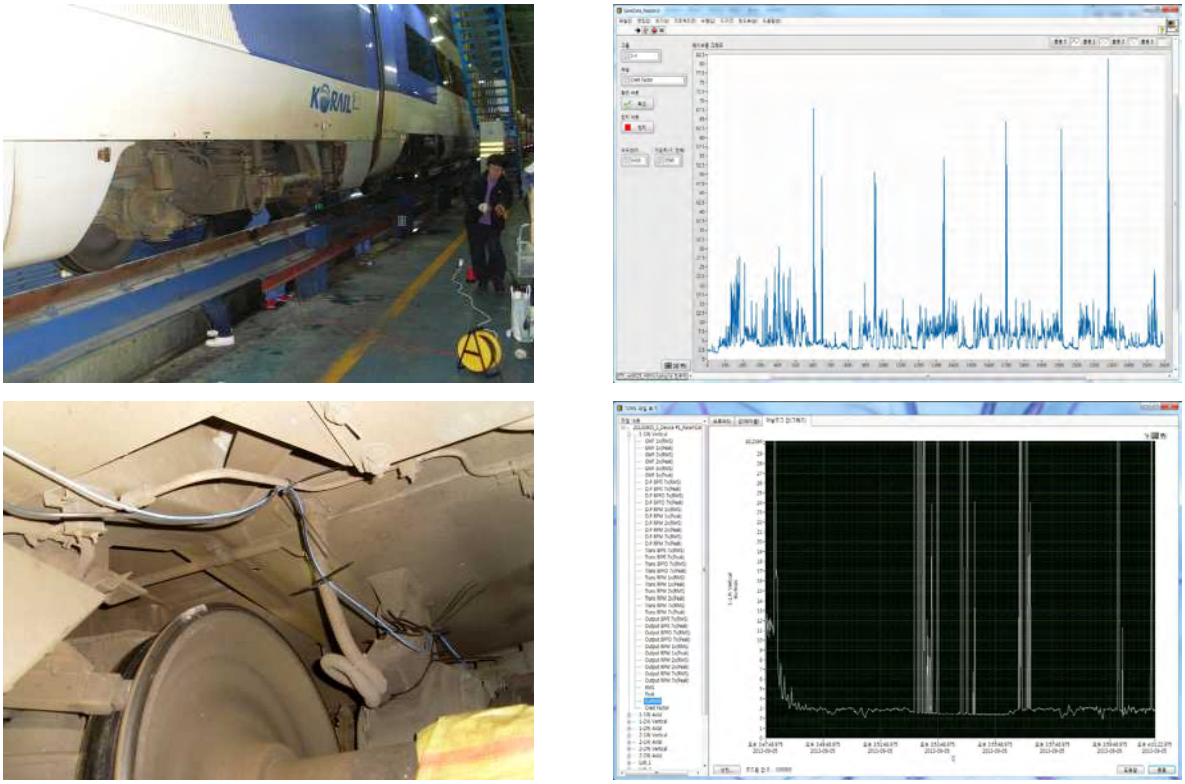


그림 4.1.22 하드웨어 성능 시험

④ 대차 진동 백업 기능 추가 및 시험



그림 4.1.23 대차 측정 진동 시험 설치 사진

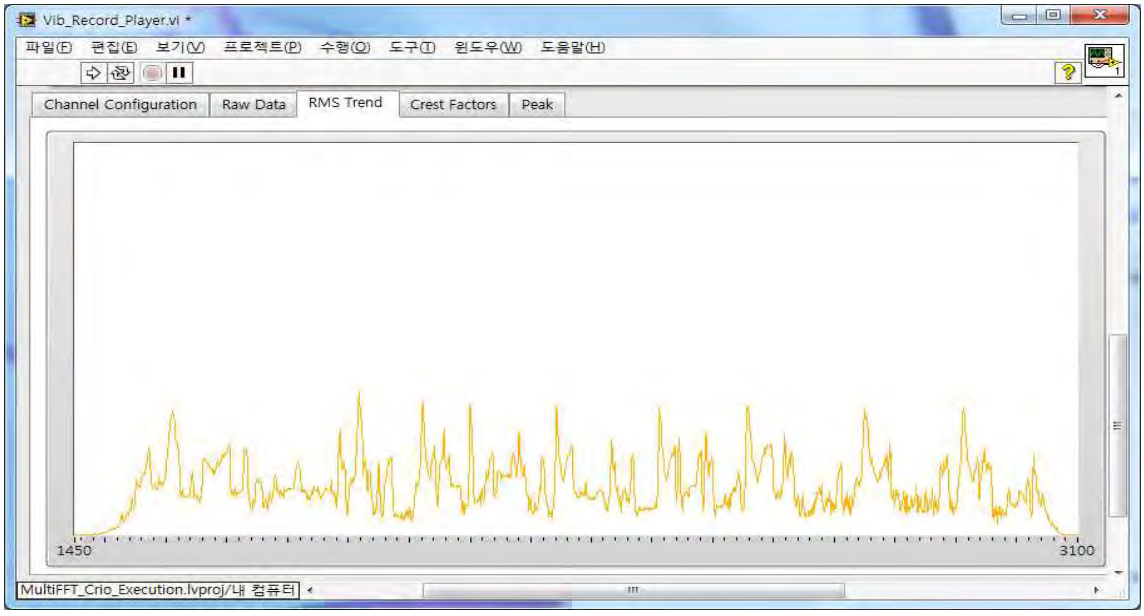



그림 4.1.24 대차 진동 Raw Data 취득

(3) 3차년도 연구 수행결과 정리

(가) 모니터링 시스템 최종 설계안 확정

① 통합신호의 알고리즘 최종 확정

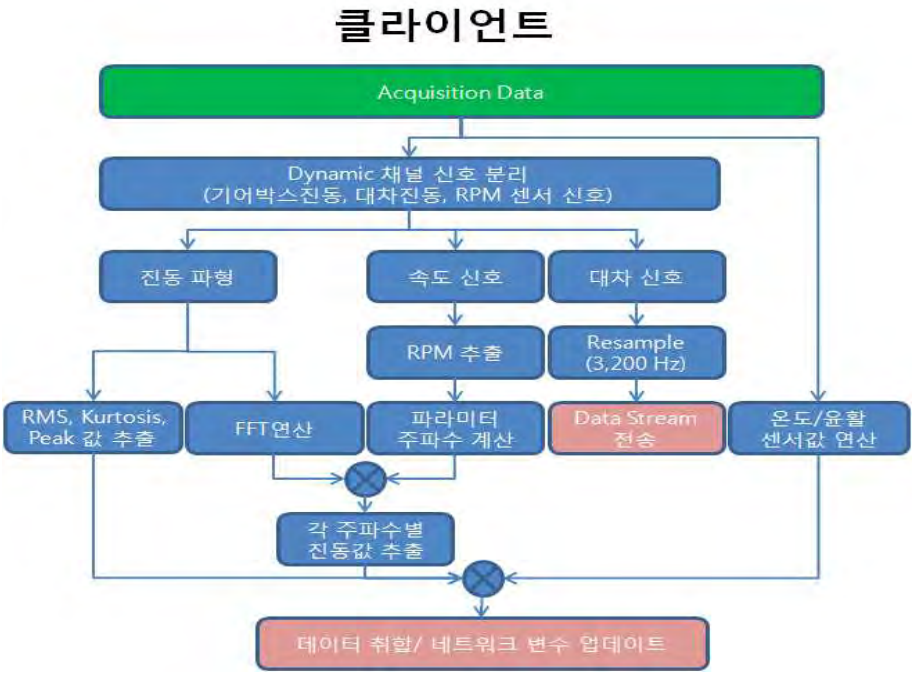



그림 4.1.25 클라이언트 프로그램 설계 구성도 및 흐름도

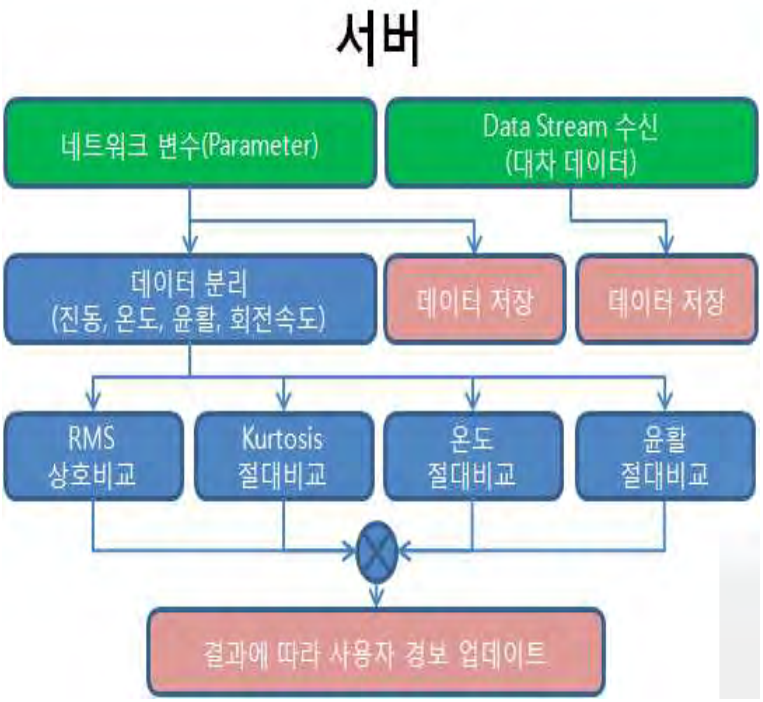



그림 4.1.26 프로그램 구성도 및 흐름도

② 통신 연계방안 수립




그림 4.1.27 OBCS 연계구상안 내용

(나) 시스템 하드웨어, 소프트웨어 보완

① 모니터링 시스템 보완 작업




그림 4.1.28 모니터링 시스템 하드웨어 보완

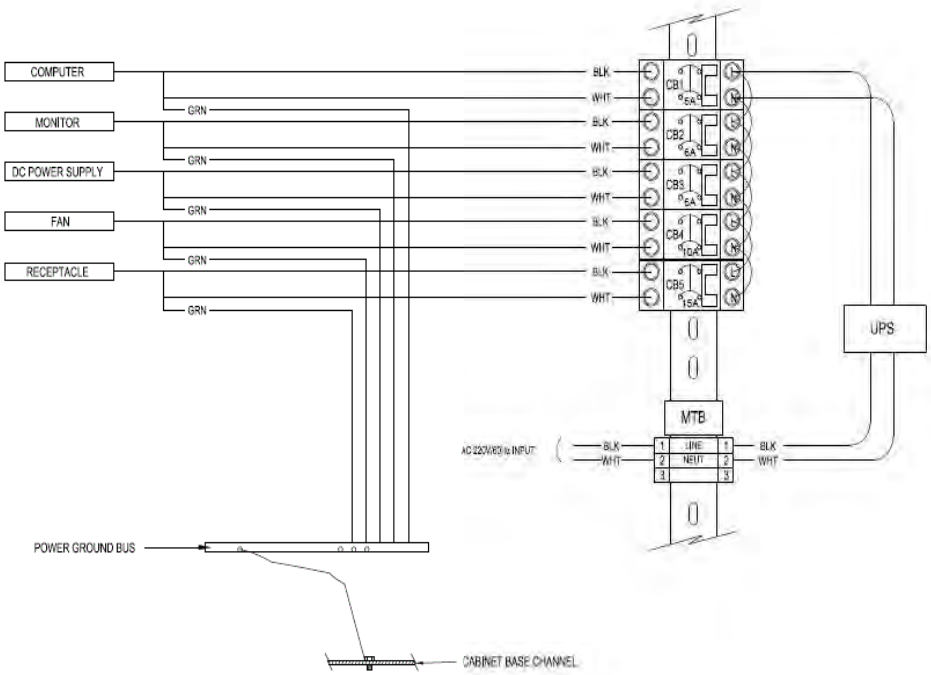



그림 4.1.29 모니터링 시스템 서버랙 파워 Distribution 개선 내용

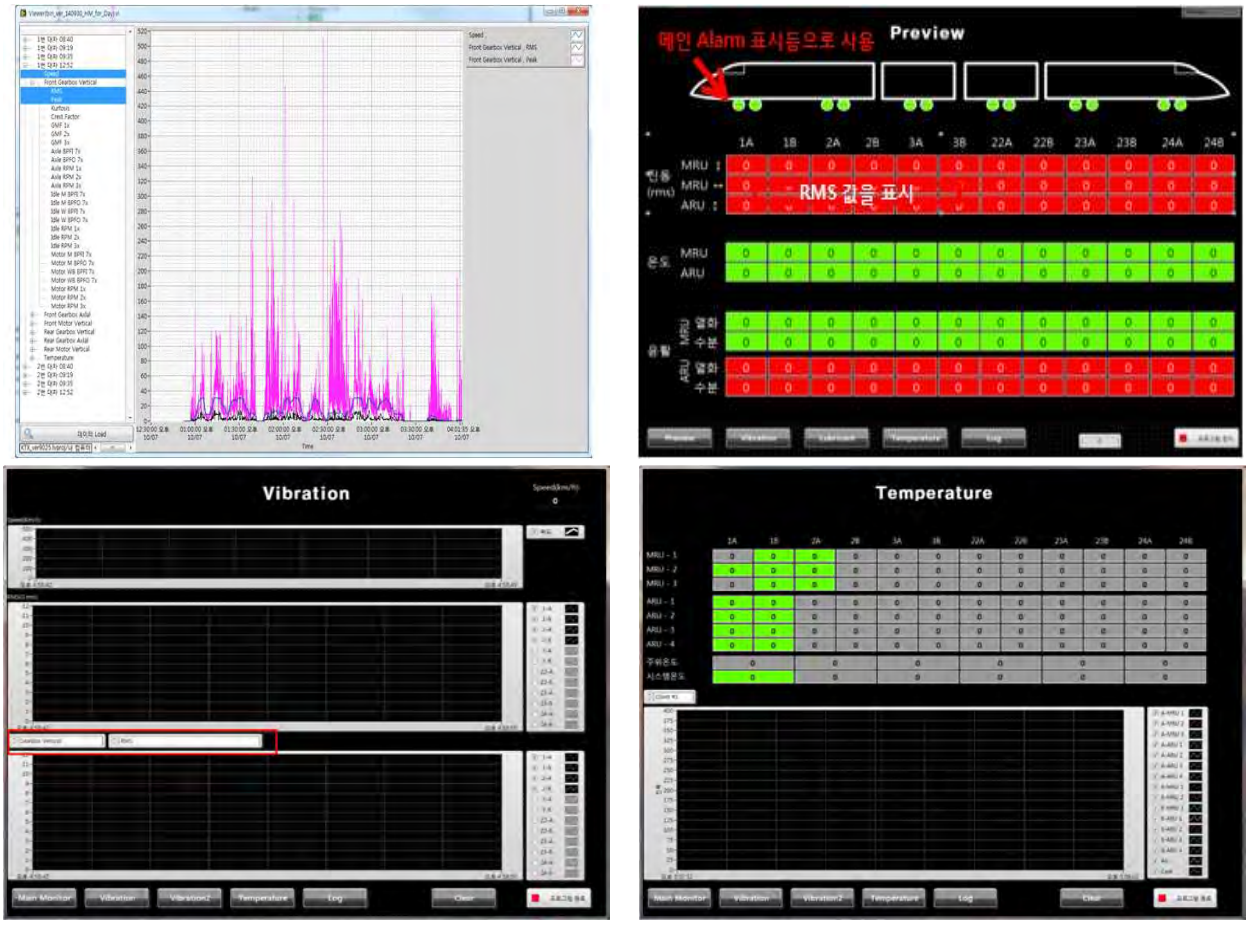



그림 4.1.30 소프트웨어 GUI 구성 개선 화면

② 모니터링 시스템 하드웨어 공인인증 시험 진행



전자문서서비스

# 시험성적서

1. 성 적 서 번 호 : CT14-085383
2. 의뢰자
   - ○ 업 체 명 : 케이티엠엔지니어링(주)
   - ○ 주 소 : 경기도 성남시 중원구 상대원동 190-1 SK테크노파크 비즈센터 1416호
   - ○ 의뢰일자 : 2014.08.12
   - ○ 시험발급일 : 2014.08.19
3. 시험성적서의 용도 : 거래처 제출
4. 시료명 : 고속철도용 통합 감시 모니터링 시스템 서버랙
5. 시험방법
(1) KS C IEC 61373:2002 1종 A
6. 시험환경 : 온도:(25.5±0.5) ℃, 습도:(59±1) % R.H.
7. 시험결과

| 시험 항목 | 시험 결과 |
|---|---|
| 모의 장기 수명 시험 | 외관상 이상 없음 |
| 충격 시험 | 외관상 이상 없음 |
| 기능 랜덤 시험 | 외관상 이상 없음 |

| 확인 | 작성자 성 명 | 최성은 | 최성은 | 기술책임자 성 명 | 남궁연 | |
|---|---|---|---|---|---|---|

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

한국인정기구 인정 한국건설생활환경시험연구원장

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

가산시험연구동 : 153-803 서울특별시 금천구 가산디지털로 199, 02-2102-2500
결과문의 : 포장물류팀 ☎ (02)2102-2775

양식QP-20-01-01(2)

전자문서서비스

# 시험성적서

부본 (R1)
2014.07.11

1. 성 적 서 번 호 : CT14-072906
2. 의뢰자
   - ○ 업 체 명 : 케이티엠엔지니어링(주)
   - ○ 주 소 : 경기도 성남시 중원구 상대원동 190-1 SK테크노파크 비즈센터 1416호
   - ○ 의뢰일자 : 2014.07.07
   - ○ 시험발급일 : 2013.07.11
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리
4. 시료명 : 고속철도용 통합 감시 모니터링 시스템
5. 시험방법
(1) KS C IEC 61373:2002 2종
6. 시험환경 : 온도:(26.5±0.5) ℃, 습도:(58±1) % R.H.
7. 시험결과

| 시험 항목 | 시험 결과 |
|---|---|
| 모의 장기 수명 시험 | 이상 없음 |
| 충격 시험 | 이상 없음 |
| 기능 랜덤 시험 | 이상 없음 |

| 확인 | 작성자 성 명 | 최성은 | 최성은 | 기술책임자 성 명 | 남궁연 | |
|---|---|---|---|---|---|---|

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

한국인정기구 인정 한국건설생활환경시험연구원장

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

가산시험연구동 : 153-803 서울특별시 금천구 가산동 459-28 02-2102-2500
결과문의 : 포장물류팀 ☎ (02)2102-2775

양식QP-20-01-01(2)

TEST REPORT

성적서 번호 : CUS2014-3070

신청자 ㅇ 회 사 명 : 케이티엠엔지니어링(주)
ㅇ 주 소 : 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124 비즈-1416(상대원동, SK테크노파크)
ㅇ 대표자명 : 송영철

시험성적서의 용도 : 품질관리용
시험대상품목 : 고속열차 감속기 모니터링 시스템
모델 / 정격 : T-GMS Client/a.c. 220 V, 60 Hz, 35 W
접수일자 : 2014년 08월 27일 시험기간 : 2014년 08월 11일 ~ 2014년 09월 11일
시험방법 : 의뢰자 제시 : KN 61000-4-3 : 2011.10
시험환경 : 온도 : (21.8 ± 1.0) ℃ 습도 : (56.8 ± 1.0) % R.H 기압 : (98.8 ± 1.0) kPa
시험결과 : 적합
비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며 성적서의 진위 확인은 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(원본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Bae Yong su
작성자 : 배용수
Tel : 031)679-9664

Sung Kwan Young
기술책임자 : 성관영
E-mail : sky@ktr.or.kr

2014년 09월 24일

KTR 한국화학융합시험연구원장

위변조 확인용 QR코드

KTR-QL-Y013-F09(01)

방송통신기자재등의 적합등록 필증

*Registration of Broadcasting and Communication Equipments*

| | |
|---|---|
| 상호 또는 성명 *Trade Name or Applicant* | 케이티엠엔지니어링 (주) |
| 기자재 명칭 *Equipment Name* | 고속열차 감속기 모니터링 시스템 |
| 기본모델명 *Basic Model Number* | T-GMS Client |
| 파생모델명 *Series Model Number* | |
| 등록번호 *Registration No.* | MSIP-REM-kte1-T-GMS-Client |
| 제조자/제조(조립)국가 *Manufacturer/Country of Origin* | 케이티엠엔지니어링 (주) / 한국 |
| 등록일자 *Date of Registration* | 2014-09-24 |
| 기타 *Others* | |

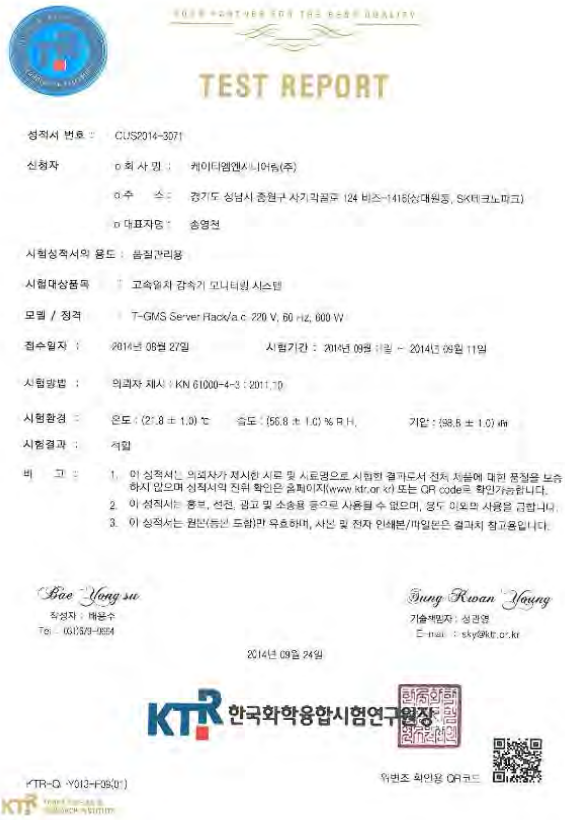
위 기자재는 「전파법」 제58조의2 제3항에 따라 등록되었음을 증명합니다.
It is verified that foregoing equipment has been registered under the Clause 3, Article 58-2 of Radio Waves Act.

2014년(Year) 09월(Month) 24일(Date)

국립전파연구원장

*Director General of National Radio Research Agency*

그림 4.1.31 모니터링 시스템 공인인증시험 성적서 (1)



TEST REPORT

성적서 번호 : CUS2014-3071

신청자 ㅇ 회 사 명 : 케이티엠엔시니어링(주)

ㅇ주 소 : 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124 비스-1418(상대원동, SK테크노파크)

ㅇ 대표자명 : 송영철

시험성적서의 용도 : 품질관리용

시험대상품목 : 고속열차 감속기 모니터링 시스템

모델 / 정격 : T-GMS Server Rack/a.c 220 V, 60 Hz, 600 W

접수일자 : 2014년 08월 27일 시험기간 : 2014년 09월 01일 ~ 2014년 09월 11일

시험방법 : 의뢰자 제시 : KN 61000-4-3 : 2011.10

시험환경 : 온도 : (21.8 ± 1.0) ℃ 습도 : (56.8 ± 1.0) % R.H. 기압 : (98.5 ± 1.0) kPa

시험결과 : 적합

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며 성적서의 진위 확인은 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 증거로 사용할 수 없으며, 당도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(등본 포함)만 유효하며, 사인 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Bae Yong su
작성자 : 배용수
Tel : 031)579-9654

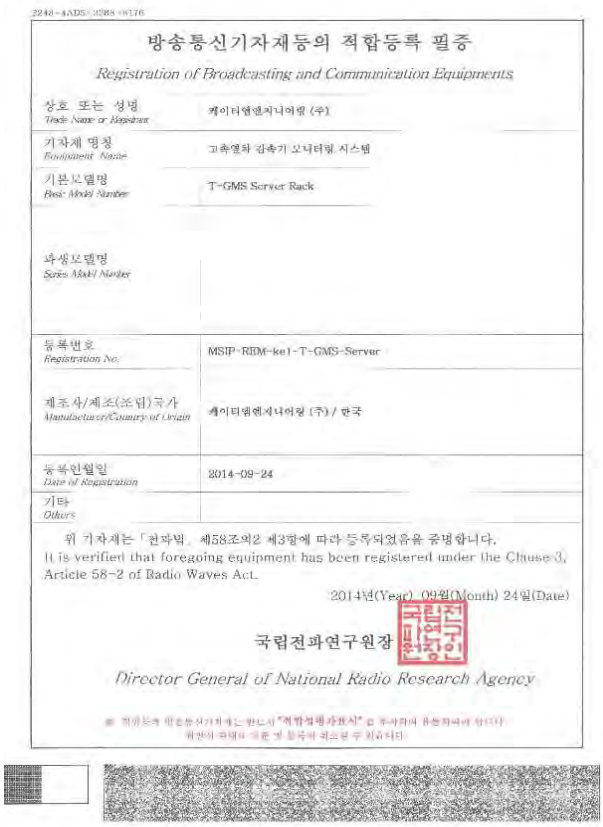
Sung Kwan Young
기술책임자 : 성관영
E-mail : sky@ktr.or.kr

2014년 09월 24일

KTR 한국화학융합시험연구원장

위변조 확인용 QR코드

KTR-Q-Y013-F09(01)



방송통신기자재등의 적합등록 필증

Registration of Broadcasting and Communication Equipments

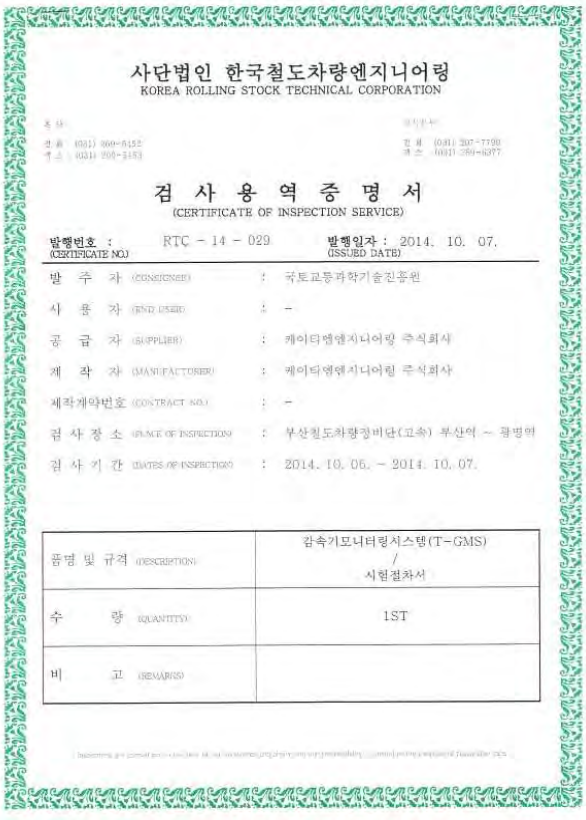
| | |
|---|---|
| 상호 또는 성명 Trade Name or Registrant | 케이티엠엔지니어링 (주) |
| 기자재 명칭 Equipment Name | 고속열차 감속기 모니터링 시스템 |
| 기본모델명 Basic Model Number | T-GMS Server Rack |
| 파생모델명 Series Model Number | |
| 등록번호 Registration No. | MSIP-RBM-ke1-T-GMS-Server |
| 제조자/제조(조립)국가 Manufacturer/Country of Origin | 케이티엠엔지니어링 (주) / 한국 |
| 등록연월일 Date of Registration | 2014-09-24 |
| 기타 Others | |

위 기자재는 「전파법」 제58조의2 제3항에 따라 등록되었음을 증명합니다.
It is verified that foregoing equipment has been registered under the Chuse 3, Article 58-2 of Radio Waves Act.

2014년(Year) 09월(Month) 24일(Date)

국립전파연구원장

Director General of National Radio Research Agency



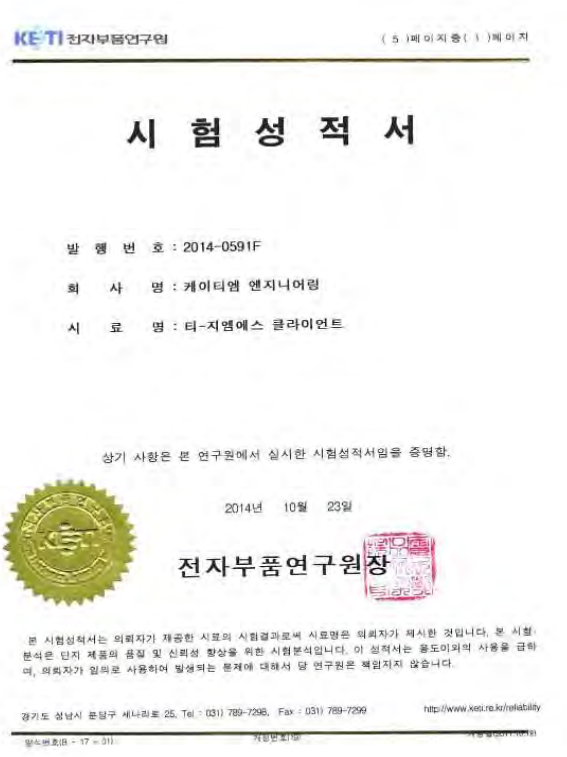
사단법인 한국철도차량엔지니어링
KOREA ROLLING STOCK TECHNICAL CORPORATION

검 사 용 역 증 명 서
(CERTIFICATE OF INSPECTION SERVICE)

발행번호 : RTC - 14 - 029 (CERTIFICATE NO.) 발행일자 : 2014. 10. 07. (ISSUED DATE)

| | | |
|---|---|---|
| 발 주 자 | (CONSIGNEE) | : 국토교통과학기술진흥원 |
| 사 용 자 | (END USER) | : - |
| 공 급 자 | (SUPPLIER) | : 케이티엠엔지니어링 주식회사 |
| 제 작 자 | (MANUFACTURER) | : 케이티엠엔지니어링 주식회사 |
| 제작계약번호 | (CONTRACT NO.) | : - |
| 검 사 장 소 | (PLACE OF INSPECTION) | : 부산철도차량정비단(고속) 부산역 ~ 광명역 |
| 검 사 기 간 | (DATES OF INSPECTION) | : 2014. 10. 06. - 2014. 10. 07. |

| | |
|---|---|
| 품명 및 규격 (DESCRIPTION) | 감속기모니터링시스템(T-GMS) / 시험절차서 |
| 수 량 (QUANTITY) | 1ST |
| 비 고 (REMARKS) | |



KETI 전자부품연구원 ( 5 )페이지중( 1 )페이지

시 험 성 적 서

발 행 번 호 : 2014-0591F

회 사 명 : 케이티엠 엔지니어링

시 료 명 : 티-지엠에스 클라이언트

상기 사항은 본 연구원에서 실시한 시험성적서임을 증명함.

2014년 10월 23일

전자부품연구원장

본 시험성적서는 의뢰자가 제공한 시료의 시험결과로써 시료명은 의뢰자가 제시한 것입니다. 본 시험·분석은 단지 제품의 품질 및 신뢰성 향상을 위한 시험분석입니다. 이 성적서는 품도이외의 사용을 금하며, 의뢰자가 임의로 사용하여 발생하는 문제에 대해서 당 연구원은 책임지지 않습니다.

경기도 성남시 분당구 세나리로 25, Tel : 031) 789-7298, Fax : 031) 789-7299 http://www.keti.re.kr/reliability

그림 4.1.32 모니터링 시스템 공인인증시험 성적서 (2)

## (다) 유지보수 및 매뉴얼

□ 개요

본 지침은 고속열차 감속기 모니터링 시스템(T-GMS)의 안정적인 운용을 위한 운용환경, 운용자료, 점검보수 등 유지관리방법을 설명하였다.

□ T-GMS Client 유지 관리

- 운용환경관리

  * 공급전원 : UPS DC단상 24V를 안정적으로 공급받는다.
  * 온. 습도 : Panel 주위는 -40° C ~ 70° C 온도와 10% ~ 90% 습도를 유지한다.
  * 진동 : 전해지는 충격량이 50G를 넘지 않도록 한다.

- 운용자료 기록 관리

  * 시설 초기의 각종 도면, 매뉴얼, 동작 정격 값, 시험성적서, 부품명세를 적정 장소에 보관하고, 유지관리 상태를 체계적으로 기록 관리한다.
  * 설치 도면은 현행으로 수정 유지하고, 수정 변경된 내용을 도면관리기록부에 기록한다.
  * 제반 장비 및 부품의 유지보수사항, 운전 값 재설정사항은 기록 관리한다.
  * 운전중 발생한 모든 Alarm, Fail 사항은 자동으로 기록 관리된다.

- 주요 예비품 및 공구 비치

  * 주요 예비부품 비치

  ○ 긴급조달이 어려운 외자 장비 및 사용량이 많은 주요부품은 관리체계에 적절한 수량의 동일형 예비품을 확보 관리 한다.( Acc 10mV/g, Acc 100mV/g, T-type 열전대 )

  * 주요공구 및 측정기 활용

  ○ 기본적인 측정기를 확보하여 활용한다(휴대용 가진기, 휴대용 진동 측정기, 적외선 온도 측정기)

- 자체 점검 보수(1차/운용자 점검 보수)

  * 점검 시 유의사항

  ○ 제반 점검은 인명의 안전과 기기보호를 우선으로 한다.
  ○ 공급전원 선로계통 보수작업 후에는 양극(+, -) 점검 후 전원을 공급한다.
  ○ 센서신호 이상 시에는 먼저 연결선로 점검 후 선로에 이상이 없다고 판단되면 센서를 교체
  ○ 세부점검을 위한 부품, 센서, 결선 분리는 열차가 차량기지에 입고되었을 때만 수행한다.

  * 다음의 경우는 제작업체 또는 전문가와 협의하여 필요한 조치를 취할 것을 권고한다.
    (2차 점검 보수)

  ○ 계측장비가 정상적인 동작을 하지 않을 때.
  ○ 센서 및 계측기 등의 주요부품이 소손 또는 파손되었을 때.
  ○ 설치된 센서의 건전성에 이상이 있다고 판단될 때
  ○ 시스템 일부를 Up-Grade, 교체, 제거하거나 추가로 구성 등 변경하여 운용하고자 할 때.
  ○ Server에서 각종 센서의 데이터 값이 확인되지 않을 때.
  ○ Client와 Server간 통신이 원활하지 않을 때.
  ○ Client의 각종 오동작상황이 Reboot( Reset )로 복구가 되지 않을 때.

* 점검 기록관리 계획

표 4.1.12 점검 기록관리 계획

| 번호 | 점 검 항 목 | 적용규격 판정기준 | 점검 주기 | 점 검 방 법 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | • 센서 육안 점검<br>– 센서 Tip 상태 점검<br>– 센서 케이블 피복 점검<br>– 센서 부착 상태 점검<br>• Client 보호함 외관 상태 점검<br>– 전원 Cable 연결 상태 점검<br>– 통신 Cable 연결 상태 점검<br>– 보호함 손상 상태 점검<br>– 부착부위 결합상태 점검<br>• Server 상태 점검<br>– 전원 점검.<br>– 통신상태 점검. | 공사시방서 및 품질검사 절차서 (QIR) | 1M | – 외관 점검<br>– 내부 결선 점검<br>– 전원 점검. |
| 2 | • 센서 및 시스템 교정 점검<br>– Channel Calibration 특성 점검<br>( Accelerometer, Thermocouple, RPM sensor )<br>– Simulation 검증 점검<br>– 동작점검 | | 6M | – 가진기를 통한 가속도센서 신호 점검<br>– 적외선 온도 측정기를 통한 온도 센서 신호 점검<br>– 가속도 센서 신호 점검<br>– 육안 및 S/W Input 점검<br>AC Input 점검 ( 가진값 ) |
| 3 | • 휴대용 가진기와 진동측정기를 통한 센서 선형성 점검<br>– 센서 선형성 특성 점검<br>– 센서 상태 점검 | | 1Y | – 가진기를 통한 센서 Input 신호 점검<br>DC Input 점검 ( 10Vdc~12Vdc )<br>AC Input 점검 ( 가진값 ) |
| 4 | • 통신 설정 값 확인 및 통신 Test<br>– Client와 Server 통신 상태 확인. | | 1M | – Server UI에서 통신 상태 점검.<br>– 케이블 결선/손상상태 확인<br>– 커넥터 결합상태 확인 |
| 5 | • 소프트웨어 동작상태 확인<br>– Display 확인 | | | |

* 점검 기록관리 가이드

표 4.1.13 점검 기록관리 가이드

Troubleshooting Guide

| | Item | Trouble | Solution |
|---|---|---|---|
| T-GMS | Server | 1 전원이 켜지지 않음 | 1. 상시 전원 공급장치 및 전원 케이블 점검<br>2. Contact to KTM |
| | | 2 화면이 나오지 않음 | 1. 모니터 전원케이블 , 커넥터 상태 확인<br>2. Contact to KTM |
| | | 3 통신 상태 불량 | 1. 통신 Cable/Connector 및 네트워크 설정 점검<br>2. 통신 Hub 상태 점검<br>3. Contact to KTM |
| | Client | 1 전원 미인가 | 1. Power Supply 점검 배전반 점검<br>2. Contact to KTM |
| | | 2 통신 상태 불량 | 1. 통신 Cable/Connector 및 네트워크 설정 점검<br>2. 통신 Hub 상태 점검<br>3. Contact to KTM |
| Sensor | Accelero-meter | 1 진동값 변화 없음 | 1. 센서 점검<br>2. Contact to KTM |
| | Thermo-coupler | 1 센서 디스플레이 비활성화 | 1. 센서 및 접점 점검 |
| | | 2 온도변화 없음 | 1. 센서 부착상태 점검 |
| | Tachometer | 1 Do not Speed Detection | 1. 설치 상태 점검 ( 전원, 반사 테이프, 각도 )<br>2. 센서 커넥터/케이블 점검<br>3. 반사체 표면 먼지 제거 |
| | | 2 실제 속도와 다름 | 1. Contact to KTM |
| | Lubricant Sensor | 1 데이터가 전달되지 않음 | 1. 센서 케이블/커넥터 점검<br>2. Contact to Solge |
| Software | A474505 | 1 All of Error Message | 1. Contact to KTM |
| | | 2 | |
| | | 3 | |

## 제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

### 1. 모니터링 기술적 효과

#### 가. 기술적 의의

철도차량의 감속기 설비의 결함을 조기에 찾아서 고장 발생 원인을 규명하여 올바른 대처가 무엇보다 중요하지만 현재 한국의 현실은 조기에 이상 징후를 파악하여 대처하는 방식이 아닌 이상 현상 발생 시 인력을 투입하여 측정을 하는 후 처리 방식이 보급화 되어 있다. 그러나 이러한 방식은 이미 기계가 고장이 일정 수준 진행이 된 상태로 기계의 고장을 예방하는 데에는 한계가 있다. 이에 새로운 개념의 모니터링 진단 기술에 대한 니즈가 증대되고 있다. 이러한 측면에서 소형화, 측정-분석-경고의 통합화가 가능한 모니터링 진단 기술에 대한 관련 기업의 큰 관심 사항으로 부상하고 있다. 업계의 이러한 관심 사항은 새로운 설비진단 기술에 대한 니즈로 연계될 것으로 판단되어 향후 동 분야의 기술개발이 더욱 촉진될 것으로 보인다.

모든 기계적 장치에서 진동이 발생하고 정상적인 상태에서 발생되는 진동과 비정상적인 사태에서 발생되는 진동은 서로 다르다. 본 장치는 기계적 장치에 진동센서를 설치하여 발생되는 진동을 탐지하고 수신된 신호를 분석하여 장치의 정상작동 여부를 판단하면서 간단하게 관리자에게 정보를 제공할 수 있다. 또한 철도 산업 설비 현장에 바로 접목할 수 있으며, 철도 차량 설비 운영자의 관리에 따른 업무의 손실을 획기적으로 줄이고 산업체의 설비관리 비용을 최소화할 수 있는 제품의 형태이다. 본 개발 기술을 적용한 제품은 기계의 가동 정지 전에 미리 조치를 취할 수 있어 생산성 증대와 설비의 수명을 연장 시킬 수 있어 회사나 국가적으로 막대한 이익을 가져올 수 있다. 가전제품, 자동차, 건설 현장 등 현재 거의 모든 산업 분야에서 진동에 대한 문제점이 발생하고 있고 이를 개선하기 위한 활동이 끊임없이 수행되고 있다. 이러한 이유로 인하여 이번 개발 제품은 산업설비 현장에만 한정하여 생각할 수 없다. 건축, 토목건설 현장 뿐 아니라 세탁기 같은 가전제품, 설비를 제작하는 제조업에서도 진동은 매우 민감한 사안이다.

진동에 의한 환경평가 용역이 수행이 되고 있으며 건설 현장에서도 지반에 대한 진동 문제는 끊임없이 문제가 야기되어 해결점을 모색하려고 하는 활동이 계속 되고 있다. 이러한 이유로 이번에 발광식 진동 센서를 개발하여 이런 분야의 산업 분야에도 연관 시키면 그 파급력이 매우 높을 것으로 판단된다.

본 개발 제품을 철도 산업현장에 적용하여 감속기 설비의 가동정지를 사전에 예방을 할 수 있도록 조치하면 결국 철도차량 운행 저하의 문제를 예방하는데 도움이 될 수 있고 결국 각 회사와 국가의 예산 낭비를 예방할 수 있어 결과적으로 막대한 이익을 창출할 수 있을 것이라 판단된다.

감속기의 이상 상태 감시는 주기적인 검사에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 이상 감시 시스템은 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상의 감시에 효과적이며, 주기적 검사 비용 및 철도 운행 중단에 따른 경제적인 손실을 최소화 할 수 있다. 국내에서 특히 발전소의 일반기계 및 대형 설비에는 모니터링 및 진단 기술은 활발하게 연구가 되어 실용화 단계에 있지만 철도차량의 감속기 모니터링 기술은 연구 및 실용화가 미흡한 실정이다. 해외에서는 기계의 설비진단 기술의 발달로

표 4.2.1 개발 기술의 응용분야 및 파급효과

| 구 분 | | 내 용 |
|---|---|---|
| 응용분야 | 제조 산업 | • 전동기를 사용하는 제조공장의 설비 진단 |
| | 건설 산업 | • 대형건축물의 안정성 진단 |
| | 전력산업 | • 발전기의 설비 진단 |
| 파급효과 | 기술적 측면 | • 진단 장비의 소형화를 통해 설치의 용이성 제공<br>• 철도차량 설비 결함의 진단-분석-경고를 통합하여 기술적 경쟁력 확보 |
| | 경제·산업적 측면 | • 철도 산업설비의 결함을 조기에 발견함으로써 비관리비용의 절감과 가동률의 향상에 따른 생산비용 절감.<br>• 고가의 수입 설비진단 장비의 대체를 통한 수입대체 및 수출 증대. |

자동검사기술과 정밀측정, 품질관리 등을 통하여 철도차량의 부품을 최적의 상태로 관리하고 있는 실정이지만 본 개발 기술로 인하여 철도 차량의 감시 기술력 확보가 가능할 것으로 판단된다. 표 4.2.1은 본 개발기술의 응용분야 및 파급효과에 대하여 정리한 것이다.

나. 기술수명 주기상 위치

철도차량 산업 기계 설비가 대형화 되고 고급화됨에 따라 철도차량 설비의 고장은 수리비의 막대한 증가 및 운행율의 급격한 초래를 초래하게 되면서 오랜 기간 동안 사용 되어진 검사 장비의 주기적인 검사는 한계에 부딪치고 있어서 새로운 개념의 철도차량 설비 진단장치가 필요로 하게 되었다. 본 개발 기술은 이러한 필요에 부응하고자 개발된 기술로서 국산화 장비는 현재 도입기의 기술로 판단이 되고 있다. 다음 그림 4.2.1은 기술 수명 주기강의 위치를 표현한 그림이다.

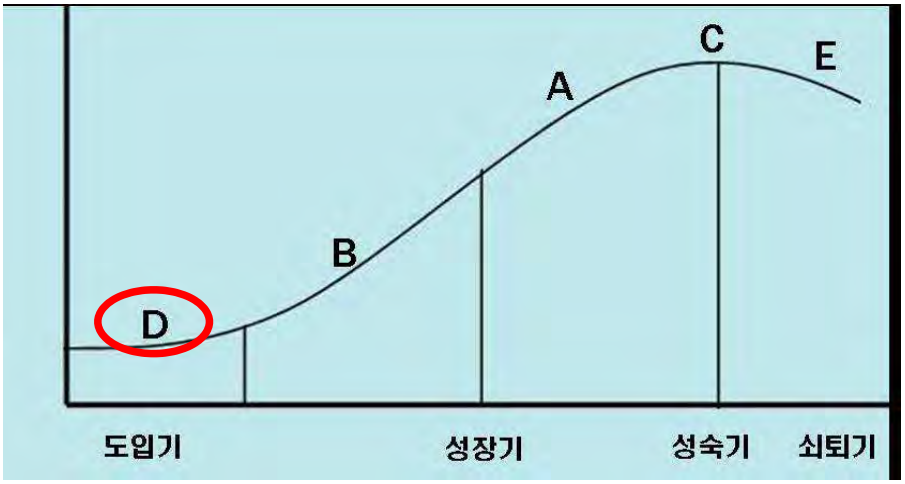



그림 4.2.1 개발기술의 기술 수명 주기상 위치

다. 기술경쟁력

(1) 기술의 자립도

본 개발 기술이 적용되는 부분은 철도차량 감속기의 통합 감시 시스템 분야이며, 본 기술을 개발하기 위한 주요 핵심기술은 다음과 같이 구분할 수 있다.

(가) 감속기 진동 분석 파라미터 기술
(나) 감속기 온도 분석 파라미터 기술
(다) 감속기 윤활 분석 파라미터 기술
(라) 파라미터에 의한 알람 제어 설정 기술

본 기술은 철도차량 분야 뿐 만이 아니라, 건설 분야 및 다양한 설비가 적용된 분야에서 활용이 가능할 것으로 판단이 된다. 즉 본 개발 기술은 타 분야로의 응용 및 확장 가능성이 다소 높을 것으로 사료된다.

# 제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)

고속열차용 감속기 이상상태 감시시스템 기술개발에 의하여 실시간으로 상태감시를 수행하기 때문에 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상 감시에 대단히 효과적이며 주기적 감시 및 서비스 중단에 따른 비용을 감소시킬 수 있는 효과가 있다. 또한, 감속기 이상상태 감시 시스템 기술을 통하여 철도차량을 공공 교통 수송 수단으로 신속, 정확하게 승객의 안전수송 역할을 충실하게 수행할 기술이다. 또한 감속기 이상상태 감시시스템 기술 개발 수준은 KTX와 KTX 산천의 차량에 적용을 목표로 기술 개발할 것이며, 완성된 기술을 통하여 전동차에도 적용하여 철도차량의 안전성을 한층 더 업그레이드 하는 기술을 개발할 계획이다. 또한, 상태감시 기반 정비 절차 도입으로 철도분야 유지보수 선진화에 기여하고 유지보수 비용 절감 기술 개발에 지속적으로 활용 가능하며, KTX 고장에 의한 국민들의 불안 해소와 대형사고 미연 방지를 통하여 운행 정지 사고로 인한 경제적 손실(660억/년, 2건 기준)을 최소화 할 수 있는 기술로 예측 가능하고 철도를 믿고 신뢰할 수 있는 사회기반의 토대가 될 것이며 세계 최고 수준의 안전성 확보 기술구현이 가능하다.

## 1. 시장 창출 효과

### 가. 제품화 용이성

본 기술의 제품화와 관련하여, 제품을 생산하기 위한 생산 설비 시설은 아직 제대로 구축이 되어 있지 않으나 소량 생산을 위한 기본적인 제반 시설은 구축되어 있으며 본 기술개발의 제품화를 위하여 하드웨어 설계 인력과 소프트웨어 설계 인력을 보유하고 있어 개발 및 생산에 어려움이 없을 것으로 보인다. 또한 양산을 위한 공장부지가 확보가 되어 있지만 추가 인력 및 설비 확보는 필요할 것으로 판단된다.

### 나. 시장 창출의 효과

#### (1) 설비진단 기술에 대한 니즈 증대

산업설비의 결함을 조기에 찾아서 고장 발생 원인을 규명하여 올바른 대처가 무엇보다 중요하지만 현재 한국의 현실은 조기에 이상 징후를 파악하여 대처하는 방식이 아닌 이상 현상 발생 시 인력을 투입하여 측정을 하는 후 처리 방식이 보급화 되어 있다. 그러나 이러한 방식은 이미 기계가 고장이 일정 수준 진행이 된 상태로 기계의 고장을 예방하는 데에는 한계가 있다. 이에 새로운 개념의 설비진단 기술에 대한 니즈가 증대되고 있다. 이러한 측면에서 소형화, 저가격화, 측정-분석-경고의 통합화가 가능한 설비진단 기술에 대한 관련 기업의 큰 관심 사항으로 부상하고 있다. 업계의 이러한 관심 사항은 새로운 설비진단 기술에 대한 니즈로 연계될 것으로 판단되어 향후 동 분야의 기술개발이 더욱 촉진될 것으로 보인다.

(2) 국내 설비진단(센서 및 모니터링 시스템 장비) 산업의 낙관적 전망

최근의 고령화 및 저 출산 등 노동인력의 감소로 인하여 산업 현장의 직접인력이 현격하게 줄어들고 있다. 따라서 생산현장의 자동화에 대한 요구가 증대됨에 따라 각종 측정 장비의 수요가 확대될 것으로 보인다.

그러나 국내 설비진단에 사용되는 모니터링 관련 생산업체는 대부분 중소기업으로 자체 생산보다는 수입 조립/가공을 하고 있는 실정이다. 국내 센서 업체는 2008년도 통계청 자료에 의하면 약 150여개 업체로 파악이 되고 있으며 자체 생산 비중 보다는 수입 제품의 교정 가공을 통한 국내 산업 현장에 맞게 개량된 센서로 교정하여 판매되고 있다.

(3) 기존 설비진단(센서 및 모니터링 시스템 장비) 장치의 높은 시장 점유율

현재 센서 및 모니터링 시스템의 국내 시장을 살펴보면, 대부분 외산 제품이 시장을 점유하고 있다. 이는 그 동안 국내에서 센서 및 계측장비의 개발이 제대로 진행되지 않는 가운데 국내 설비관련 기업에서 기존의 거래처를 상대로 제품을 구입하기 때문이다. 따라서 시장에 대한 검증이 이루어지지 않은 새로운 제품군으로 신청기술이 제품화되어 국내 시장에 진입할 경우 기존 센서 및 계측장비에 대하여 신뢰도가 쌓인 구매자의 인식을 전환하기에는 상당한 기간이 걸릴 것으로 보인다.

(4) 시장의 향 후 확장 전망

감시 시스템 장비는 설비에 포함되어 있는 엔진이나 모터 등의 회전체의 진동 패턴을 센서를 통하여 확인하고 수집된 주파수와 진폭 등의 데이터를 수집하는 기능을 가지고 있다. 이 장치는 기계류나 구조물의 고장을 진단하고 해결하는데 널리 쓰이는 방법이다. 이러한 진단 방식은 예기치 못한 고장으로 인한 심각한 문제가 발생하는 것을 방지하여 비용과 가동시간 측면에서 중요한 역할을 하고 있다. 진동 감시 시스템 장비는 크게 고정식과 이동식의 두 가지로 구분할 수 있다. 고정식(또는 온라인 방식)은 설비에 고정된 일련의 센서를 포함하고 있으며 수집된 정보를 연결되어 있는 컴퓨터 또는 고정 서버로 전송하여 분석한다. 이동식은 전원이나 센서 등이 독립되어 있어서 이동이 가능하며 데이터 수집부터 분석의 전 과정을 독립된 장비 내에서 독자적으로 수행할 수 있는 특징이 있다.

아직도 진행되고 있는 전 세계적인 경기 침체는 수요자들의 소비를 제한하고 있으며 진동 감시 시스템 장비 시장의 성장에도 영향을 미치고 있으며, 장비의 가격에 민감한 분위기가 형성되므로 고가의 고정식 장비에 대한 수요가 줄어들고 있는 추세이다. 이와 관련해서 저가 제품에 대한 수요로 인하여 장비의 생산기지가 동유럽이나 아시아-태평양 지역으로 이전하는 추세이며, 북미나 유럽시장에서도 역시 가격인하에 대한 수요자들의 요구사항이 높아지고 있다.

감시 시스템 장치 시장과 관련하여 설비의 유지 기술이 새로운 분야로 떠오르고 있는데 설비의 가동 정지 시간을 단축시킴으로서 생산성을 높이기 위하여 기계류의 신뢰도를 개선하려는 노력이 다양하게 시도되고 있다. 감시 시스템 장치의 자동화나 원격 조정 기능을 향상시키기 위한 새로운 기술들이 개발되고 있다. 저비용의 무선 온라인 감시 시스템, 고장 및 진단을 자동으로 처리하는 방식, 광대역 인터넷 통신의 적용, 스마트폰이나 웹을 기반으로 하는 감시 프로그램 등이 여기에 포함된다.




그림 4.3.1 진동 감시 시스템 장비 시장 전망

출처 : Frost & Sullivan

감시 시스템 장치 시장에서 가장 뚜렷한 변화는 추가 인력이 요구되는 오프라인 감시에서 온라인 지속 감시 방식으로의 수요 전환이다. 네트워크 기술의 진보와 인터넷이나 스마트폰의 확산은 연결 편리성이 매우 높아짐에 따라서 중앙에서 전 세계 장비를 감시하는 것이 가능하게 되었으므로 수요자 측면에서는 비용절감을 위한 온라인 감시가 시장의 추세로 판단된다. 그림 4.3.1에 진동 감시 시스템 장비 시장의 전망 내용이 표시되어 있다.

Global Industry Analysts, Inc.(GIA)에서 2013년 7월에 발표한 "Machine Condition Monitoring Equipment: A Global Strategic Business Report"에 따르면 가동 중지시간의 단축을 통한 생산성 향상과 작업장과 개인 안전에 대한 정부의 규제가 강화, 기계류가 계속 복잡해짐에 따라서 안정적인 설비의 작동을 위한 감시 시스템 시장은 지속적으로 증가할 것으로 설명하고 있다. 특히, 연속공정이 진행되는 발전소나 제조업 분야에서는 설비 중단에 따르는 피해를 줄이기 위하여 감시 시스템 장치에 많은 투자를 할 것으로 전망하고 있다. Frost & Sullivan에서의 보고와 마찬가지로 진동 감시 시스템 시장이 가장 큰 부분을 차지할 것이며 진동 감시, 윤활 분석, 열화상 분석 가운데 열화상 분석 분야의 성장률이 앞으로 가장 높을 것으로 보고 있으며, 중국과 인도, 동남아시아에서의 빠른 산업화로 인한 수요 증가와 생산비용 절감을 위하여 생산기지가 아시아로 이전할 것으로 전망하고 있다. 전체 감시 시스템 장비 시장 규모는 Frost & Sullivan과 비슷한 수준인 2018년에 23억 달러가 될 것으로 전망하였다.

## 2. 철도차량 운영 및 유지보수 시장 규모 및 전망

세계 철도 시장은 1,310억 유로(약210조원) 규모로 2010년 기준 매년 6% 성장 추세이며, 시장비중은 서유럽(30%), 아시아(28%), 북미(15%), CIS (7%), 기타(20%) 수준으로 15년 기준 1,600억 유로 규모로 성장이 예상되며 분야별로는 차량 56.8%, 인프라 32.1%, 시스템 11.1%로 추정되고 있다. 다음 아래의 그림 4.3.2는 세계 철도 시장의 성장을 예측한 그래프이며, 아래의 표 4.3.1은 세계 지역별 철도 시장 규모 및 성장률을 정리한 내용이다.

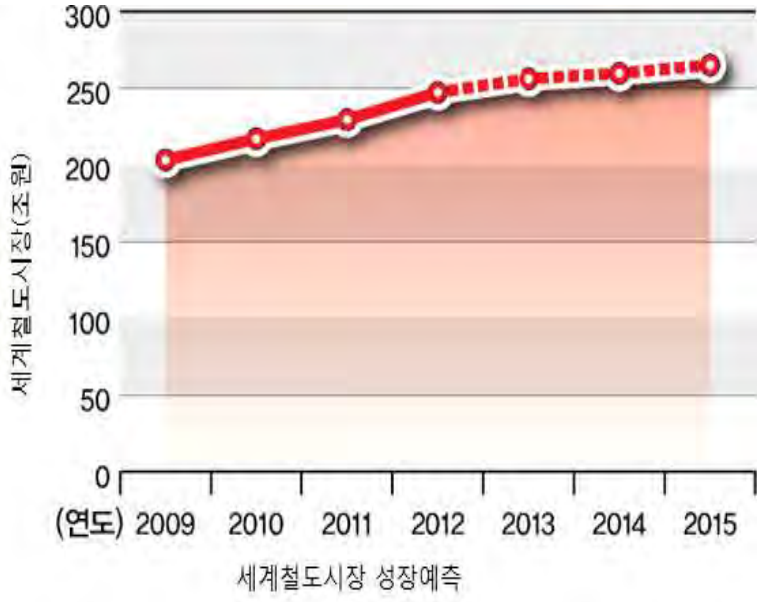



그림 4.3.2 세계 철도시장 성장 예측

※출처: 철도기술연구사업 공공전문위 사업설명회, 한국건설교통기술평가원, 2012.

표 4.3.1 세계 지역별 철도 시장 규모 및 성장률

| 지역 | 연간 시장 규모 (EUR millions) | 연평균 시장 성장률(%) (2009~2014) | 표준편차 (2009~2014) |
|---|---|---|---|
| 서유럽 | 39,000 | +3.5 | 2.1 |
| 동유럽 | 8,850 | +3.3 | 3.8 |
| 북아메리카 | 23,500 | +4.3 | 4.5 |
| 중앙/남아메리카 | 3,000 | +7.1 | 4.7 |
| 아시아 | 317,000 | +5.2 | 2.4 |
| 아프리카/중동 | 4,250 | +5.8 | 4.3 |
| CIS(독립국가연합) | 13,700 | +3.7 | 2.3 |
| 호주/태평양부근 | 2,500 | +3.8 | 7.5 |
| 총 합계 | 12,600 | +4.2 | 1.0 |

※출처: 철도교통 위치검지시스템 기술개발 기획연구 기획보고서, 국토해양부, 2012.

표 4.3.2 철도유지관리 분야 국내외 시장 규모 전망

| 구분 | 2010년 | 2017년 |
|---|---|---|
| 국내시장 | 530억원 | 736억원 |
| 세계시장 | 2.1조원 | 3.0조원 |

※출처: 철도차량 스마트 유지보수 기술 개발 기획연구 기획보고서, 국토해양부, 2012.

전 세계적인 철도 시장 상황을 감안하였을 때 중국은 고속철도, 주요 간선, 도시 철도의 확장과 인도의 철도 투자 확대로 아시아, 태평양 지역의 철도 산업은 대규모/고성장이 전망이 되고 있는 상황이며 서유럽은 세계에서 철도시장이 가장 활발하게 운영이 되고 있는 상황으로 시설 및 장비표준화 등 대규모 시장 확대를 위한 정책이 추진되고 있다.

또한 미국은 총 568억 달러 규모의 고속철도건설을 계획하고 있으며 브라질은2016년 올림픽 개최를 앞두고 여객수송을 위한 511km, 190억 달러 규모의 철도건설이 계획되고 있는 상황으로서 장기간 관점에서 철도 수요는 철도 관련 생산품의 수요와 연관이 있는 것으로 판단되는데, 시장규모는 차량 분야가 가장 크며 인프라 분야는 가장 높은 성장세를 보이고 있는 상황이다.

이러한 철도 산업의 확대 정책으로 인하여 국내의 시장 규모 또한 지속적으로 확대될 가능성이 매우 높은 상황으로 철도 산업이 발전하게 되면 감속기 등 철도 차량에 대한 유지보수 관리 분야의 시장 규모 또한 매우 높은 규모의 성장률을 기록할 것으로 판단이 되고 있는 상황이다. 다음 아래의 표 4.3.2는 철도 유지 관리 분야의 국내외 시장규모의 전망을 정리한 내용이다.

국내의 경우 제2차 국가철도망 구축계획에 따라 230km/h급 이상의 고속화 철도 운행노선의 연장이 2,362.4km로 확대되면 총 철도연장은 3,557km에서 4,934km로 늘어나 이로 인한 관련 사업이 지속적으로 발생할 것으로 기대되고 있는 상황으로 이번에 개발된 감속기 모니터링 시스템 기술 개발 결과물도 향 후 시장에 적용이 되면 많은 기대효과를 창출할 수 있을 것으로 판단된다.

현재는 국내 철도차량시장은 세계시장규모의 약 1.2% 수준으로서, 신규철도차량발주시장 및 유지보수시장의 규모는 대략 년 평균 5,500억 수준이다. 유지보수시장의 10%를 모니터링 기술 제품으로 적용한다면 550억 원의 시장규모가 형성될 것으로 예상이 되고 있는 상황이다.

## 3. 고용 창출 효과

동사는 그림 4.3.3에서 보는 바와 같은 조직구조를 갖추고 있으며 이에 따른 인력의 배치 및 업무분장 등을 통하여 사업을 추진하고 있다. 제품의 개발과 생산을 위한 제품개발팀, 제품시험팀, 생산팀 3개 팀을 구성하여 제품개발팀은 기구개발, 펌웨어개발 및 시스템 설계 등을 수행하며 소요인력은 기구개발 및 하드웨어개발에 필요한 기계공학전공인력, 회로 및 아트워크 설계 담당 전자공학 전공인력 그리고 펌웨어 개발을 위한 소프트웨어공학 전공인력이 약 5명 정도 요구된다. 제품시험팀은 철도차량 현장 진동시험, 제품 현장적용 시험 및 국내외 규격인증 취득을 수행하므로 현장측정, 기구검증작업을 담당할 기계공학 전공인력, 전자 기준 점검과 규격인증을 맡을 전자공학 전공인

력, 펌웨어검증 및 규격인증을 위한 소프트웨어공학 정공인력이 약 3명 정도 필요하다. 생산팀은 생산기준의 정립과 생산 공정을 직접 수행하므로 제품 생산 공정과 설비선정 및 세팅을 담당하는 기계공학 전공인력이 2명 정도 필요하다. 사업기획팀은 사업기획 및 관리, 예산수립 및 관리 그리고 프로젝트 관리 등을 수행하며 이를 담당할 2명 정도의 인력이 요구된다. 마케팅팀은 국내외 마케팅과 영업 관리 업무를 담당하며 제품과 영업 지식을 겸비한 기계공학 및 전자공학 전공인력이 약 3명 정도 요구된다.

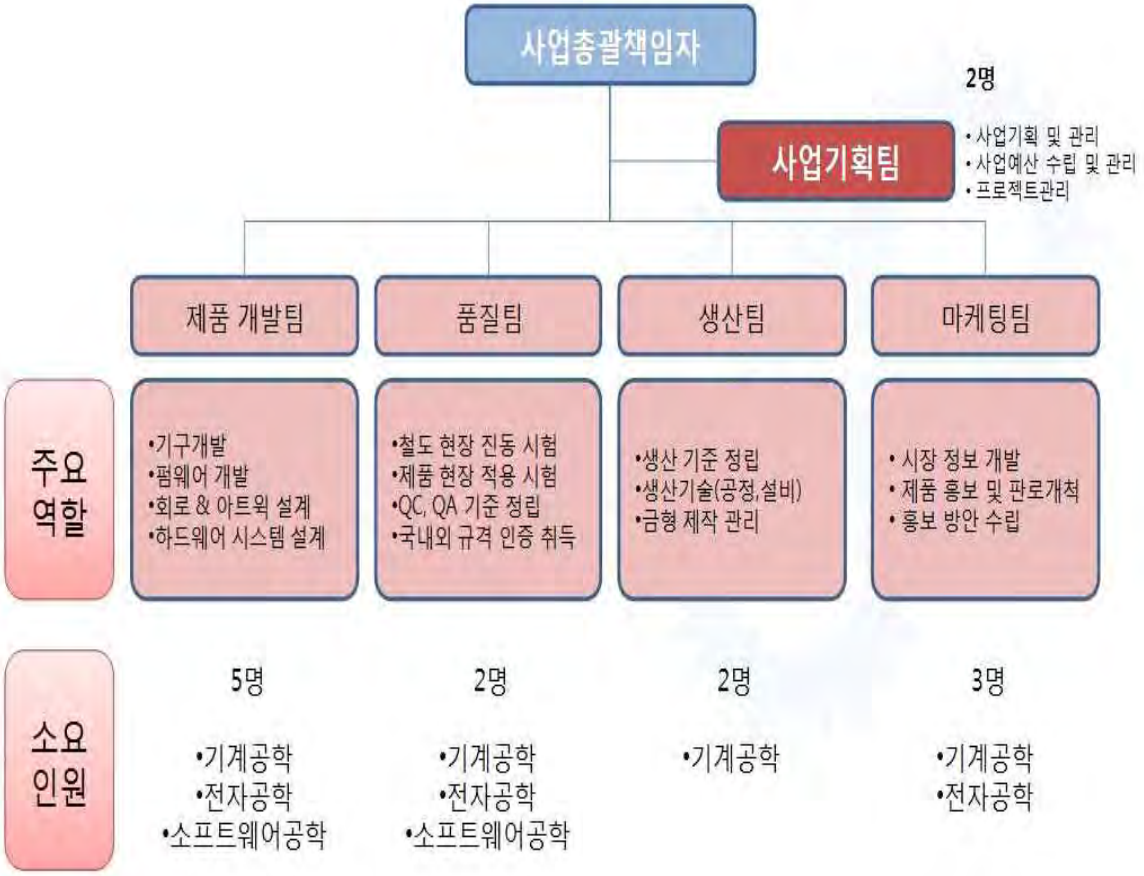



그림 4.3.3 사업화에 대한 인력 운용 계획

## 제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

철도는 에너지 효율, 수송효율, 토지이용률 등 친환경적인 부분에서 가장 확실한 미래의 교통기술이며, 국가적인 수송수단으로 거듭나고 있다. 유럽, 일본 등의 철도선진국들은 이러한 철도의 친환경성에 주목해 1990년대 후반부터 국가의 교통정책을 철도 중심으로 전환하여 철도에 대한 투자를 급속히 확대해 가고 있는 추세이며, 실제 철도 선진국들은 첨단 기술로 세계 철도시장을 점유하기 위해 단순히 철도투자를 확대하는 것이 아니라, 철도 교통을 국가의 차세대 성장 동력으로 인식하고 철도 중심의 정책과 연구개발을 추진하고 있는 실정이다. 현재 전동차에 들어가는 부품의 90~95%가 국내 부품회사들이 만든 제품이나 (KTX-산천 차량 부품의 국산화율도 90%) 해외에 수출하는 철도차량의 대부분은 해외발주기관의 지정사양부품을 장착해야 하는 부분이 있다. 그 중 한국 부품이 차지하는 비중은 20~30%에 불과하며 전기 제어시스템이나 제동장치 등 핵심부품은 외국 제품을 대부분 사용하고 있는 실정으로. 해외 수주차량에 따라 국내 부품을 사용하는 경우도 있지만 전체 물량에서 차지하는 국산화 부품의 비중은 극히 작은 부분을 차지하고 있다.

2011년도 우리나라 철도차량 부품의 대륙별 수입현황을 보면 유럽이 압도적이고 다음이 아시아로 최근 들어 증가하고 있는 추세이다. 전통적으로 철도차량 부품에 대한 노하우와 기술력을 가지고 있는 프랑스, 독일, 영국에 대한 의존도가 높으며, 최근 중국의 시장 확대로 중국으로부터의 부품수입도 증가하고 있음. 연도별 철도차량의 부품 수입현황에서 보면 전년도 대비 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

이러한 현실에서 부품 및 소재산업의 뒷받침 없이 단순한 철도건설에만 집중하면 부품 및 소재산업 분야가 선진국의 소비시장으로 전락할 수도 있을 것으로 판단된다. 그러나 철도차량 부품 중에는 철도 선진국 제품에 비해 우수하지만 적용 사례가 없다는 이유로 현장 적용에 제한을 받고 있는 경우도 있으므로 이러한 신기술 및 신제품에 대한 시범설치 및 적용을 확대하기 위해서는 국산화 부품의 적용을 위한 시범설치 구간의 의무 지정 등 제도적 지원 필요할 것으로 판단된다.

우리나라는 이미 고속철도와 같은 철도건설 기술은 물론 철도차량 및 부품에 대한 신기술, 그리고 100년 이상의 철도운영 및 유지보수에 대한 노하우 등을 갖고 있으므로 부품 및 소재 기술에 대한 적극적인 기술개발이 이루어진다면 해외 철도시장에서 충분한 경쟁력을 보유하게 될 것이라고 판단된다. 이러한 경쟁력을 통해 철도산업이 국가적 전략산업이 될 것으로 예상할 수 있으며, 이와 함께 철도교통을 보다 안전하게 이용하기 위해서는 반드시 지속적인 원천기술의 확보 및 관련 핵심부품의 국산화가 이루어져야 하며 관련 부품산업에 대하여 세계적인 경쟁력을 확보해야 할 시기라고 사료된다. 다음 표 4.4.1은 해외의 자국 부품 사용 의무화 현황에 대한 내용이며 그림 4.4.1은 세계 주요 철도 산업 규모이다.

표 4.4.1 국외 자국부품사용 의무화 현황

| 국가 | 조 건 |
|---|---|
| 미국 | Buy America 조건 (미 연방자금 활용 사업)<br>– 계약 가 중 재료비의 60% 미국산 부품 활용<br>– 최종조립은 미국 내 수행(미국에서, 미국인이)<br>※시행 청 자체자금 구입의 경우 조건변경 가능하며, 통상적으로 더 강화됨 (뉴욕 메트로의 경우 100% 미국산 부품활용 조건) |
| 중국 | 총 계약가의 70%이상 자국 부품 사용 의무화(차량)<br>※ 전장품 계약의 경우 40%이상 자국 부품 사용 의무화 |
| 터키 | 계약 가 중 재료비의 25~30% 자국 부품 사용 의무화 |
| 브라질 | 계약 가 중 재료비의 30%이상 자국 부품 사용 의무화 |
| 대만 | 계약 가 중 재료비의 20%이상 자국 부품 사용 의무화 |
| 우크라이나 | 현지 생산 조건(현지 공장 설립) |

표 4.4.2 세계 철도 산업 규모

| Nation | Total Route Km | Passengers ( *1000) | Passenger-Km ( *1000000) | Freight Ton ( *1000000) | Freight Ton-Km ( *1000000) | Traffic Density |
|---|---|---|---|---|---|---|
| China | 62,200 | 1,106,510 | 583,320 | 2,309.20 | 1,934,612 | 40.5 |
| Russia | 85,245 | 1,338,723 | 172,217 | 1,281.30 | 1,858,100 | 23.8 |
| India Total | 63,273 | 6,524,377 | 769,956 | 727.7 | 480,993 | 19.8 |
| EU 10(동유럽) | 61,678 | 744,400 | 45,188 | 575.7 | 142,816 | 3 |
| Spain(*) | 14,484 | 610,700 | 21,047 | 29.7 | 11,586 | 2.3 |
| EU 15(서유럽) | 150,224 | 6,361,900 | 326,941 | 860.3 | 243,648 | 3.8 |
| Japan Total | 12,217 | 8,987,944 | 309,741 | 36.2 | 23,166 | 27.2 |
| North America Total | 224,490 | 34,988 | 11,910 | 2,115.7 | 2,996,762 | 13.4 |
| Iran(**) | 7,131 | 19,400 | 11,149 | 30.3 | 19,127 | 4.2 |
| Turkey(**) | 8,697 | 76,306 | 5,036 | 18.9 | 9,078 | 1.6 |
| Korea(**) | 3,392 | 921,300 | 31,004 | 44.5 | 10,108 | 12.1 |
| Total All Other Railways(**) | 258,311 | 3,343,434 | 275,889 | 3,454.40 | 1,165,056 | 5.6 |
| World Total | 917,638 | 28,442,276 | 2,495,162 | 11,360.50 | 8,845,153 | 12.4 |

Note : (*) EU150에 포함, (**) Total All Other Railways에 포함 출처 : Forum Paper 2010

# 제5장 연구성과의 사업화 방안

# 제1절 연구성과 사업화 방안

## 1. 양산 및 판로 확보 계획

○ 생산 규모 : 소규모 생산

센서 및 계측기 관련 상품은 다품종 소량 생산으로 산업 형태가 구성이 되어 있기 때문에 현재 본사에서도 일단 처음에는 소규모 생산으로 초점을 맞춰서 사업을 진행할 예정에 있다. 현재 본사 또한 고객의 요구에 따른 맞춤형 제품에 대한 소량 생산으로 진행을 해왔기 때문에 이에 관련된 생산 제반 시설을 갖춰야 할 필요성이 있다. 그러나 기본적으로 고객의 요구 조건에 맞춰 소량 생산을 위한 기본적인 제반 시설은 이미 갖추고 있는 상황으로 본 제품의 개발을 진행하면서 필요한 생산시설에 대하여 파악을 진행할 예정으로 이번 개발에 모든 역량을 결집시킬 준비를 진행 중에 있다. 다음 그림 5.1.1은 생산 계획에 대한 구상 내용이다.




그림 5.1.1 생산 계획 구상 내용

생산 관련 원재료 투입은 현재 시장 상황에 대한 1차적인 조사를 완료한 상태이다. 전체적인 원재료 확보 방안을 이미 마련한 상태로 생산 진행이 되면 원재료 확보에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 다음 표 5.1.1은 수요 변동에 따른 생산 운영 계획을 정리한 것이다.

표 5.1.1 수요 변동 생산 운영 계획

| 가동 구분 | 계획 내용 |
|---|---|
| 표준 가동 | • 평균 작업자의 부하(작업량)를 설비 Capa의 90% 할당 운영<br>• 다기능 작업자가 여러 조립 공정을 진행 |
| 수요증가에 따른 가동 | • 임시 작업자를 고용하여 설비 Capa의 100% 운영<br>• 조기 출근 및 초과 근무 실시 |
| 수요 감소에 따른 가동 | • 작업자 전환 배치<br>• 시간외 근무 단축<br>• 준비/교체 작업 단축 연습 전개<br>• 설비 및 생산 제반 사항 점검 |

○ 수요처 발굴 및 마케팅 전략

프로모션(Promotion) 측면에서 동사의 제품은 소비재가 아닌 생산설비의 한 부분에 해당하므로 일반 매스미디어 홍보보다는 수요대상 업체 및 기관을 대상으로 하는 직접 마케팅이 효과적일 것이다.

- 첫 번째로는 동사가 기존 사업을 영위하면서 구축한 네트워크를 통하여 홍보하는 방법이다. 동사가 수입하여 판매하고 있는 센서제품의 대상수요자들의 경우 대부분이 설비를 보유한 업체로서 동사의 신규제품에 대한 수요가 가능하므로 이 들에 대한 홍보는 실질적인 구매로 연결될 가능성이 높다.

- 두 번째로는 대규모 철도차량 관련 제조업체나 공기업 설비에 초기 진입하여 시장에서 자연스러운 구전 홍보효과를 기대할 수 있다. 특히 발전소와 같은 공기업 성격의 설비에 성공적으로 공급이 될 경우 제품의 인지도와 신뢰도를 인정받아 사기업 등에 대한 공급이 수월히 진행될 수 있다.

- 세 번째로 동사가 진행하고 있는 교육프로그램을 통하여 관련 사업체의 담당자들에게 간접적으로 홍보하는 방법도 효과적일 것이다. 교육 참여 기업과 참가자야말로 동사제품의 직접적인 수요자이므로 피교육자들에게 진동에 대한 조기경보의 필요성을 강력히 전달함으로써 매출로 연결될 수 있을 것이다.

본사는 제품 상업화 이후 여러 마케팅 전략을 수립하여 홍보 활동을 진행을 해서 점차적으로 시장 점유율을 높일 예정으로 센서 전체 시장 중 19%를 점유하고 있는 산업 현장 분야를 1차 공략 시장으로 선정하여 마케팅 활동을 진행할 예정이다. 일단 제품 상업화 이후 목표 시장 점유율은 약 15% 정도를 초기 공략 목표로 하고 이후 제품의 다품종 연구를 지속적으로 수행하여 각 옵션별 기능에 맞춘 다양한 모델 출시로 시장 점유율을 점진적으로 높여나갈 예정이다. 최종적으로는 국내 계측기 분야 시장을 포괄적으로 포함시킬 수 있는 제품으로 판단되기 때문에 최종 공략 시장 점유

율은 약 40% 공략을 목표로 하고 있다.

그러나 고객 사용자들의 편의를 위하여 간단한 구조로 개발을 진행할 예정으로 기존 센서 제조업체들이 유사한 제품을 출시할 수 있는 가능성이 큰 만큼 구조 설계 내용에 대하여 다각적으로 연구를 진행하여 특허 및 실용실안을 확대하여 제품의 경쟁력을 지속적으로 향상시킬 계획에 있다.

판매 촉진 방안 강구 : 신문, 잡지를 통한 광고를 1차 적으로 전개해 나갈 예정이고 지속적으로 활용한 기계 관련 전시회를 개최할 예정이며 기존 케이티엠 고객을 직접 방문하는 활동으로 제품 홍보를 지속적으로 추진할 예정이다. 시장의 반응을 검토하고 인터넷 판매 방안까지 고려하여 진행 예정에 있다.

○ 예상 제조 원가

본 과제의 결과물인 감속기 모니터링 시스템은 기술 개발 과제로서 아직 제품 개발 단계는 아니다. 그러나 기술개발을 제품화 였을 경우 제품의 제조 원가는 대략적으로 KTX 1대에 6개의 클라이언트에 각각 Tach 센서 1개, 진동 센서 4개, 온도 센서 16개, 윤활 센서 1개가 적용이 된다. 또한 서버 클라이언트는 열차의 전면부와 후면부로 배치가 되어 2대가 투입이 되는 구조로서 대략적으로 본 기관에서 제조 원가를 산출하면 다음 표 5.1.2와 같다.

표 5.1.2 T-GMS 예상 제조 원가 산출 내역

| 구 분 | | T-GMS | 비 고 |
|---|---|---|---|
| 재료비 | 하드웨어 모듈 | 90,000,000 | • 클라이언트 총 6대 :<br>- 1,500만원 * 6 = 9,000 만원 |
| | Tach 센서 | 2,700,000 | • Tach 센서 :<br>- 45만원 * 6 = 270 만원 |
| | 진동 센서 | 48,000,000 | • 진동 센서 :<br>- 200만원 * 24 = 4,800 만원 |
| | 온도 센서 | 48,000,000 | • 온도 센서 :<br>- 50만원 * 96 = 4,800 만원 |
| | 윤활 센서 | 6,000,000 | • 윤활 센서 :<br>- 100만원 * 6 = 600 만원 |
| | 서버 스토리지 | 30,000,000 | • 서버 스토리지 :<br>- 1,500만원 * 2 = 3,000 만원 |
| | 소 계 | 224,700,000 | |
| 노무비 | 직접노무비 | 18,900,000 | • 설치 공사 : 1주일 기준 :<br>- 투입인원 12명<br>- 일일노무비 산출 : 225,000 |
| | 간접노무비 | 1,890,000 | • 직접 노무비 10% 산정 |
| | 소 계 | 20,790,000 | |
| 순원가 | | 245,490,000 | |
| 일반관리비 및 경비 산출 | | 24,549,000 | • 순 원가 10% 계상 |
| 이 윤 | | 19,639,200 | • 순 원가 8% 계상 |
| 총원가 | | 289,678,200 | |

## 2. 타 분야 적용 관련 검토 내용

○ 도시 철도 차량 감속기 적용 검토 내용

연구 과제를 수행하면서 고속철도 차량 뿐 아니라 도시 철도차량에 대하여 검토를 진행하였다. 부산지하철 1호선에서 실시하였던 본 연구는 노포역에서 신평역 3개의 역 구간을 선정을 하여 분석을 진행하였다. 레일-차륜 진동 혹은 바닥진동에 의한 충격파를 제외하고 3구간 모두 일정한 주파수 형태를 나타내는 결과를 확인하였으며, 고속철도 차량 운행 조건에 비하여 양호하며 일정한 환경이 제공이 되어 오히려 이상을 검출하는 조건은 더 양호하다는 것을 확인할 수 있었다.

다음 아래의 그림 5.1.2는 부산 지하철의 감속기 구조를 나타낸 것이며, 그림 5.1.3은 부산 지하철 차량에 센서를 설치한 사진이다.

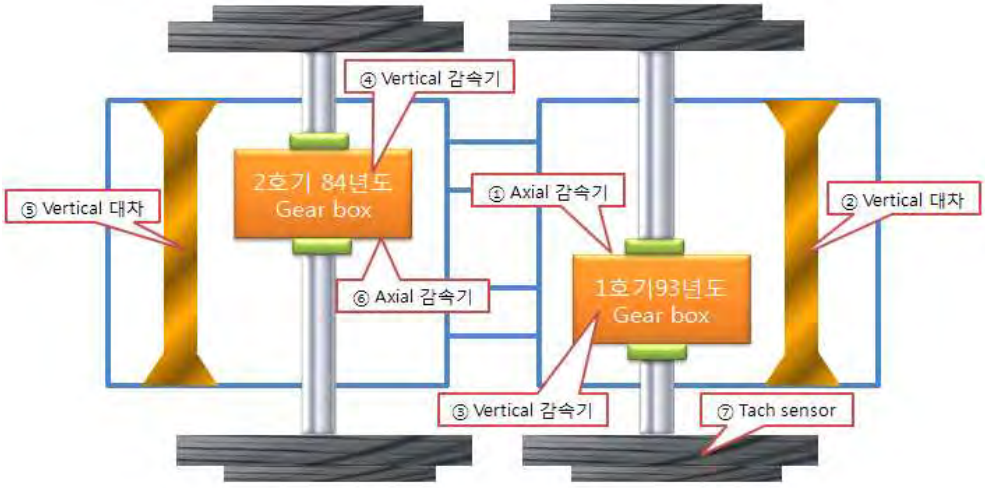



그림 5.1.2 부산지하철 감속기 구조



그림 5.1.3 부산지하철 센서 설치 사진

도시 철도 차량은 운행 중 균일하지 못한 레일 환경에서 발생하는 다양한 진동 성분과는 달리 일정한 환경이 지속이 되며 오히려 레일-차륜 혹은 바닥진동에 의한 충격파를 제외하면 거의 일정한 형태의 주파수를 보여주는 결과를 확인할 수 있었으며, 온도와 윤활 부는 KTX 같은 고속 철도 차량과 거의 비슷한 형태로서 본 시험의 결과물을 도시 철도 환경에 맞게 개량만 한다면 쉽게 적용이 가능할 것으로 판단된다.

그러나 도시 철도차량에 적용을 하여 신뢰성 있는 이상감시를 위해서 반드시 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 본 기관은 본 과제가 종료된 이후에도 도시철도 차량 적용을 위한 추가 연구를 기획하여 진행할 수 있도록 하겠다.

○ 유사 산업 분야와의 연계 추진 계획 수립

본 고속철도 감속기 모니터링 시스템의 개발 내용은 고속철도 분야 뿐 만이 아니라 추 후 도시철도 차량, 지하철 등 철도 유사 관련 산업 분야에도 적용이 가능하도록 유관기관과 연계를 추진하여 실용화가 가능할 수 있도록 추가적인 연구를 진행할 예정이다. 가장 측정 조건이 까다로운 고속철도 차량의 감속기에서도 통합으로 모니터링 하는 기술을 개발을 하였기 때문에 도시철도차량 및 지하철과 같은 유사한 환경에서는 적용에 대하여도 추가 연구가 필요할 것으로 판단이 된다.

1차적으로 본 기술 개발 결과 내용을 정량적으로 정리를 한 후 철도공사, 철도기술연구원, 서울 및 지방 지하철 공사등과 같은 유사 시설 관리 기관과 연계를 통하여 상용화를 위한 추가적인 연구 도출 진행 및 실용화를 위한 시험을 지속적으로 추진을 진행할 예정이다. 추가적인 연구를 진행하면서 철도차량 제작사와 유기적인 협조 체제를 구축하여 고속철도 차량 운영 시스템과 연계가 될 수 있도록 제작사와 적용 관련 협의를 도출을 하여 본 기술개발 과제의 결과물이 철도차량 시방서에 적용이 될 수 있도록 추진을 진행할 예정이다.

표 5.1.3 추가 연구 진행 및 상용화 실행 방안 수립

| 구분 | 계획 내용 |
|---|---|
| 추가 연구 계획 | • 철도공사, 지하철 공사 등 유사 철도 차량 운영처 와 제품 개발 추가 연구 추진<br>• 추가 연구를 통한 개발 기술의 검증 시험을 통한 신뢰성 확보 및 사용화 위한 추가 인증 취득 추진 진행 |
| 상용화 수립 위한 추가 전략 | • 철도차량 제작서 접촉 시스템 적용 위한 협의 추진 진행<br>• 개발 기술 모듈화 개발을 통한 현차 차량 적용 필드 시험 추진을 통한 제품 신뢰성 확보 방안 수립<br>• 철도차량 운행 관리자에게 알람 전달 방법 구체화 하여 제품의 신뢰성 확보가 될 수 있도록 추가 적인 연구 진행 |

# 참고문헌


1. Lee, S. H, Kim, K. J, Ha, J. Y 2000, An Experimental Study on Tooth-Meshing Frequency Components in Noise/Vibration of a Gearbox Under Operational Conditions, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference 2000, KAIST. DAEWOO HEAVY INDUSTRIES LTD, pp. 1096~1101.
2. Eom, B. G, Lee, H. S 2012, Dynamic Analysis for Improvement of Running Stability of Rubber Tired AGT Localization Bogie, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 22, No. 4, pp. 307~317.
3. 김필관, 2003, 진동소음 점검장비, 경영사
4. D. J. Ewins, 2000, Modal Testing 2nd Ed, Research Studies Press LTD. Hertfordshire.
5. Randall, Robert Bond, 2011, Vibration-based Condition Monitoring, John Wiley & Sons, Inc. West Sussex.
6. J. Derek Smith, 2003, Gear Noise and Vibration 2nd Ed, Marcell Dekker INC, New York.
7. James E. Berry, 2003, Analysis Special Vibration Signature Analysis Time waveforms and related Technologies Required to Evaluate Low High and Variable Speed Machines, Technical Associates Of Charlotte, P.C, Charlotte.
8. Arthur R. Crawford, Steve Crawford, 1992, The Simplified Handbook Of Vibration Analysis Volume 2, Computational Systems Incorporated, Knoxville.
9. Rotor Kit, 2011, Vibration Measurement of Rolling Element Bearing, Lambert Academic Publishing.
10. Tom Proulx, 2011, Rotating Machinery Structural Health Monitoring Shock and Vibration Volume5, SEM Springer.
11. Dave S. Steinberg, 2000, Vibration Analysis for Electronic Equipment, Third Edition, Wiley Inter Science
12. William T. Thomson, 1998, Theory of Vibration With Application, 5th Edition, Pearson
13. David I. G. Jones, 2001, Handbook of Viscoelastic Vibration Damping,Wiley Inter Science
14. Victor Works, 1991, Machinery Vibration Measurement and Analysis, Mcgrawhill
15. William T. Thomson, 1998, Theory of Vibration with Applications, Pearson
16. S.O Reza Moheimani, Andrew J. Flemin, 2006, Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping, Springer
17. Anand Parey Naresh Tandon, 1997, Fault Detection of Spur Gears Using Vibration Monitiring, Lambert
18. Giancarlo Genta, 1999, Vibration Of Structures And Machines, Springer
19. Vladmir I. Babitsky, 2001, Vibration Strongly Nonlinear Discontinuous Systems, Springer
20. V.A. Svetlitsky, 1998, Engineering Vibration Analysis, Springer
21. Randall, Robert Bond, 2011, Vibration-based Condition Monitoring, John Wiley &

Sons, Inc. West Sussex.
22. J. Derek Smith, 2003, Gear Noise and Vibration 2nd Ed, Marcell Dekker INC, New York.
23. James E. Berry, 2003, Analysis Special Vibration Signature Analysis Time waveforms and related Technologies Required to Evaluate Low High and Variable Speed Machines, Technical Associates Of Charlotte, P.C, Charlotte.
24. Arthur R. Crawford, Steve Crawford, 1992, The Simplified Handbook Of Vibration Analysis Volume 2, Computational Systems Incorporated, Knoxville.
25. Rotor Kit, 2011, Vibration Measurement of Rolling Element Bearing, Lambert Academic Publishing.
26. Tom Proulx, 2011, Rotating Machinery Structural Health Monitoring Shock and Vibration Volume5, SEM Springer.
27. Dave S. Steinberg, 2000, Vibration Analysis for Electronic Equipment, Third Edition, Wiley Inter Science
28. William T. Thomson, 1998, Theory of Vibration With Application, 5th Edition, Pearson
29. David I. G. Jones, 2001, Handbook of Viscoelastic Vibration Damping,Wiley Inter Science Victor Works, 1991, Machinery Vibration Measurement and Analysis, Mcgrawhill
30. Shipley, R.J. and Becker, W. T., "ASM Handbook volume 11 ; Failure Analysis & Prevention", ASM Int., 2002
31. Darle W. Dudley, Townsend, Dennis P., DUDLEY'S GEAR HANDBOOK, McGraw-Hill", New York, 1991
32. Ales Belsack and Joze Flasker, "Detecting cracks in the tooth root of gears", Engineering Failure Analysis, Vol. 14, 2007
33. Chee Keong Tan, Phil Irving and David Mba, "A comparative experimental study on the diagnositc and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectometric oil analysis for spur gears", Mechanical systems and signal processing, Vol. 21, 2007
34. T.H. Loutas, G. Sotiriades, I. Kalaitzoglou, V. Kostopoulos, "Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurements", Applied Acoustics, Vol. 70, 2009
35. Howard, I.M., "A Review of Rolling Element Bearing Vibration Detection, Diagnosis and Prognosis", Research Report DSTO-RR-0013, Department of Defence, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, October 1994.
36. Bearing failures and their causes, SKF product information 401
37. Frost & Sullivan, "World Condition Monitoring Equipment Market", 2011.06.29
38. Frost & Sullivan, "World Condition Monitoring Equipment and Services Markets", 2008.07.14
39. Global Industry Analysts, Inc., "Machine Condition Monitoring Equipment: A Global Strategic Business Report", 2013.07