발 간 등 록 번 호
11-1613000-002132-01

철도기술연구사업

R&D/16RTRP-B067706-04

고속열차 효율 향상 핵심기술개발 최종보고서

2018. 1.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
협동연구기관 / 현대로템㈜
공동연구기관 / 국제전기㈜
현우시스템

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

‘고속열차 효율 향상 핵심기술개발’(연구개발 기간 : 2013.12.24 ~ 2017.10.23) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2018. 1. 9.

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나 희 승 (연구책임자) 박 춘 수

협동연구기관명 : 현대로템㈜ (대표자) 김 승 탁 (연구책임자) 민 평 오

공동연구기관명 : 국제전기㈜ (대표자) 김 봉 현 (연구책임자) 윤 상 기

현우시스템 (대표자) 남 학 기 (연구책임자) 남 학 기

위탁연구기관명 : 연세대학교 (대표자) 김 용 학 (연구책임자) 주 원 구

아주대학교 (대표자) 박 형 주 (연구책임자) 안 병 민

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>16RTRP-B067706-04</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2016.10.24 ~ 2017.10.23</td><td>단계구분</td><td>4/4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">철도기술연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">철도 수송력 향상 기술</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">고속열차 효율 향상 핵심기술 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">1세부: 고속열차 성능 및 효율 향상 핵심기술 개발
2세부: 고속열차 효율향상 차량모듈 기술개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">박 춘 수</td><td>해당단계 참여 연구원 수</td><td>총: 58 명
내부: 56 명
외부: 2 명</td><td>해당단계 연구개발비</td><td>정부: 2,320,000천원
기업: 618,210천원
정부 외: 천원
계: 2,938,210천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여 연구원 수</td><td>총: 267명
내부: 247명
외부: 20 명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부: 12,620,000천원
기업: 2,634,194천원
정부 외: 천원
계: 15,254,194천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">한국철도기술연구원
고속철도연구본부</td><td colspan="2">참여기업명: 현대로템㈜, 국제전기㈜, 현우시스템</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: 연세대학교, 아주대학교</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="4">요약</td><td colspan="2">보고서 면수 : 230</td></tr>
</table>

○ 철도교통의 수송분담률 향상으로 글로벌 철도시장의 급속한 팽창이 진행됨에 따라 세계적 수준의 경쟁력 있는 기술력 확보가 필요함

○ 2015년 250조로 예상되는 거대 철도시장을 석권하기 위해 선진각국은 치열한 기술 개발 및 속도 경쟁 중에 있으며, 기술보유국간 최고속도의 향상을 통한 기술력 과시와 더불어 운영효율성 향상을 위한 기술개발 노력 또한 경주되고 있음

○ 실제적 고속철도의 효과를 발휘하기 위해서는 운영속도의 향상이 필요하며, 국내 고속열차(KTX) 개통 10년 이상 경과를 고려하여 향후 성능 업그레이드를 위한 핵심기술의 개발이 필요한 시점임

○ 본 과제의 목표는 동력집중식 고속열차의 성능·효율 향상을 위한 핵심기술(공력, 주행성능, 추진성능) 및 시험평가 기술 개발로, KTX-산천 대비 공기저항 8% 저감을 위한 고속주행 공력성능 향상 기술개발, 동력집중식 고속열차 임계속도 20% 향상을 위한 고속 주행 안정성 향상 기술개발, 용량 증대 및 1C1M 구조 등 운영효율성 향상을 위한 고속열차 추진 시스템(주전력변환장치, 견인전동기, 주변압기) 효율 향상 기술개발, 핵심부품 경량화 및 현가장치 최적화를 통한 운영효율향상 고속열차 주행장치 기술개발 등이 수행됨

〈 국문요약문 〉

연구개발 목표	○ 고속열차 성능 및 효율 향상을 위한 핵심기술 및 시험평가 기술개발 - 고속열차 공력성능 향상 기술개발 - 고속열차 주행안정성 향상 기술개발 - 고속열차 추진시스템 효율 향상 기술 개발 - 운영효율 향상 고속열차 주행장치 기술 개발
연구개발 내용	○ 고속열차 공력성능 향상 기술개발 - KTX-산천 대비 공기저항 8% 저감 - 공기역학 및 최적설계공학 기반의 신개념 고속열차 전두부 설계기법 개발 - 다목적 공력설계 전두부 및 공기저항 저감 기술이 적용된 KTX-산천 신모델 개발 ○ 고속열차 주행안정성 향상 기술개발 - KTX-산천 대비 동력대차 임계속도 20% 향상 및 진동가속도 저감을 위한 현가장치 최적화 기술개발 - 등가감쇠비 변화를 이용한 임계속도 예측기술 개발 ○ 고속열차 효율향상 추진시스템 기술개발 - 2,750kW급 주전력변환장치, 1,200kW급 견인전동기, 7,080kVA급 주변압기 개발 ○ 운영효율향상 고속열차 주행장치 기술개발 - 고속열차 주행장치 부품 경량화, 현가장치 최적화를 통한 주행장치 효율향상 기술 개발 ○ 종합 시스템엔지니어링 및 사업 총괄 - 인터페이스 조정을 통한 전체시스템에 대한 타당성 검토 및 검증 - 사업의 총괄적 조정, 과제간 상호역할 및 업무분담 조정 · 관리
연구개발성과	○ 고속열차 공력성능 향상 기술개발 - 고속열차 전두부 공력성능 최적설계 기술 확보 · KTX-산천 형상기반으로 다목적 공력성능 최적설계 적용 · 시각디자인 기반 설계 탈피, 공학적(공기역학) 설계기술 적용 · 전두부 다목적 최적설계 형상 3종 개발 - 고속열차 공기저항 저감기술 개발 및 풍동시험을 통한 검증 완료 · KTX-산천 시험모델 대비 16~18 % 공기저항 저감 확인 · 공기저항 저감기술 각각에 대한 풍동시험 수행 및 정량적 저감 효과 확인 · 유지보수를 고려한 공기저항 저감 기법(대차커버 형상 등) 개발 ○ 고속열차 주행안정성 향상 기술개발 - 고속열차 주행안정성 수준 계측 및 분석 · KTX, KTX-산천 운전실 및 객실 진동 측정 및 분석 · 차륜답면 형상 측정 및 차륜마모 데이터 확보 - KTX-산천 동력차량 및 편성에 대한 주행안정성 향상 방안 수립 · 최적화를 통해 주행안정성을 향상한 현가장치 파라미터 도출 및 신규대차 설계 반영 - 고속차량용 대차의 Roller Rig 주행안정성 평가 방안 수립 · 등가감쇠비 변화율을 이용한 임계속도 예측 기법 개발(최초 개발)

	○ 고속열차 효율향상 추진시스템 기술개발 - 2,750kW급 주전력변환장치 · KTX-산천 대비 10% 출력 향상 · 강제 수냉각방식 적용(냉각성능 25% 향상) 및 1C1M 제어 - 1,200kW급 견인전동기 ·KTX-산천 대비 10% 출력 상상 및 효율 93% 달성 - 7,080kVA급 주변압기 개발 · KTX-산천 대비 14% 출력 향상 · Shell Type 구조(기계적 성능 향상, 냉각성능 13% 향상) ○ 운영효율향상 고속열차 주행장치 기술개발 - 350㎞/h급 주행장치 개발 · 운영속도 향상 : 300 ⇒ 350 ㎞/h · 추진 용량 10% 증대에 대응하는 최적 기어비 적용 · 차륜/차축 10% 경량화 · 기존 KTX-산천 주행장치와 호환성 유지 - 주행장치 시제품 제작 및 성능평가 ·기존 KTX-산천 주행장치 대비 임계속도 24.3% 향상
활용계획 및 기대효과	○ 세계 고속철도 시장(연간 61조 예상)을 선점할 수 있는 고속철도 기술 보유국으로 국가브랜드 가치 확보 및 고속철도의 국제 경쟁력 향상으로 고속철도 기술의 세계진출에 활용 ○ KTX-산천 및 KTX-호남 등 기존 동력집중식 고속열차 대체수요 및 신규수요 대응을 통한 국내 고속열차 서비스 향상에 기여 ○ 국내 고속열차 개통 후 반수명검사주기 등을 고려하여 기존 동력집중식 고속열차 성능 업그레이드를 통한 고속철도 운영 효율 향상 ○ 고속철도 속도향상에 따른 전국 주요거점의 신속한 연결로 이동시간 단축 등 국민편익 증진 : 241.6억원 - 고속철도 운영속도 향상에 따른 이용객 시간 절감, 타 교통수단 이용자 전환으로 인한 비용절감편익 발생 ○ 철도 운영기관 편익 : 24.6억원 - 속도 향상에 따른 이용객수 증가로 인한 추가 매출, 효율향상에 따른 운영비용 절감 등 ○ 산업체 매출 편익 : 62.2억원 - 운영속도 350㎞/h 운행을 위한 핵심기술 확보로 국내외 고속철도 시장 진출 및 부품/기술 매출 편익 발생

핵심어(5개 이내)	고속열차	효율 향상	공력성능	주행안정성	추진성능

〈 Summary 〉

Purpose	○ Development of core technology and test & evaluation technology for performance & efficiency improvement of concentrated traction type high-speed train - Technology development for aerodynamic performance improvement of high-speed train - Technology development for running stability performance improvement of high-speed train - Propulsion system efficiency improvement technology development - Bogie operating efficiency improvement technology development
Contents	○ Technology development for aerodynamic performance improvement of high-speed train - 8% reduction of air resistance comparing with KTX-Sancheon - Development of the new concept design technology of high-speed train front head section based on the aerodynamics and optimal design technology - Development of the new model of KTX-Sancheon that the multipurpose aerodynamic design front head section and the technologies of air resistance reduction are applied to ○ Technology development for running stability performance improvement of high-speed train - Development of the optimization technology of suspension system for the 20% enhancement of critical speed and the reduction of vibratory acceleration for high-speed train comparing with KTX-Sancheon - Development of the crtical speed prediction technology using the change of equivalent damping ratio ○ Propulsion system efficiency improvement Development - Motro block detail design - Motro block water cooling system and main component prototype manufacture - Traction moter first prototype manufacture and test - Traction moter second prototype manufacture - Main transformer first prototype test and second prototype manufacture ○ Bogie operating efficiency improvement technology development - Bogie design - Bogie main component prototype manufacture and test - Anti-roll bar and Axle box detail design - Anti-roll bar and Axle box first prototype manufacture and test ○ Total system engineering & project management - Feasibility study and verification for the whole system through interface mediation - Overall mediation of project, division, mediation & management of mutual roles and labors among sub-projects
Development Results	○ Technology for aerodynamic performance improvement of high-speed train - Securement of world-class level design technology of front head section by the application of optimal design technology in aviation engineering - Maximization of energy efficient in high-speed running by application of the multipurpose front head section optimal design and the air resistance minimization technologies for car body - 8% reduction of air resistance comparing with KTX-Sancheon - Aerodynamic and the newest design lay out for KTX-Sancheon and groping for commercialization plan

	○ Technology for running stability performance improvement of high-speed train - 20% enhancement of critical speed and the reduction of vibratory acceleration for high-speed train - Analysis of KTX-Sancheon running gear where running stability is secured to the running speed of 350 km/h - Ride comfort improvement effectiveness at the same speed due to the reduction of vibratory acceleration - Reduction of testing cost and new equipment build-up cost due to being possible to predict the critical speed over the maximum speed of testing equipment ○ Propulsion system efficiency improvement Development - Motro block drawing/specification - Motro block converter/inverter IGBT stack prototype - Traction moter first prototype and test result - Main transformer specification - Main transformer first prototype test and second prototype - Main transformer RAMS analysis ○ Bogie operating efficiency improvement technology development - Bogie drawing/specification - Bogie main component - Anti-roll bar and Axle box drawing/specification - Anti-roll bar first prototype - Axle box first prototype
Expected Contribution	○ Securing of national brand valuation as the country holding high-speed railway technologies that is possible to dominate the world high-speed railway market in advance ○ Making the use on expansion to the world of high-speed railway technology due to the extensive enhancement of international competitive power ○ Contribution to the improvement of domestic high-speed train service through the correspondence of substitutional demand of conventional concentrated traction type high-speed train such as KTX-Sancheon and KTX-Honam and the new demand ○ Improvement of high-speed railway operational efficiency through the performance upgrade of conventional concentrated traction type high-speed train concerning the half-life cycle inspection period after the domestic opening of high-speed railway ○ Enhancement of people convenience such as the reduction of movement time by the rapid connection of national key point positions due to the improvement of high speed railway - Occurrence of cost reduction benefit of 24.16 billion won due to the reduction of user's travel time by the improvement of high-speed railway operational speed, and the transition of other means of transportation users ○ Railway operational agency benefit : 2.46 billion won - Additional sales by virtue of enhancement of user due to the speed improvement, and the reduction of operational cost due to the efficiency improvement, etc. ○ Industry sales benefit : 6.22 billion won - Expansion to the domestic and worldwide high-speed railway markets and occurrence of sale benefit of components/technologies by virtue of securing of core technologies for the operation of the operational speed 350 km/h
Keywords	High-Speed Train, Performance Improvement, Efficiency Improvement, Aerodynamic Performance, Running Stability Performance

C O N T E N T S

I. Overview of Research and Development Project ····· 1
1. Necessity of research and development ····· 1
2. Project outline ····· 2

Ⅱ. Domestic and foreign market condition & development trend ····· 8

Ⅲ. Contents and Results of Research and Development ····· 11
1. Technology development for aerodynamic performance improvement of high-speed train 11
(1) Study outline ····· 11
(2) Advanced concept multipurpose front head section optimal design ····· 14
(3) Technology development of air resistance reduction of high-speed train car body ··· 25
(4) Optimal design of train and aerodynamic performance improvement technology evaluation · 35
(5) Study Result ····· 50
2. Technology development for running stability improvement of high-speed train ··· 51
(1) Study outline ····· 51
(2) Establishment of stability improvement plan for the hunting of running gear ···· 54
(3) Development of running stability test and evaluation criteria ····· 76
(4) Study Result ····· 92
3. High-speed Train Propulsion System Efficiency Improvement Development ····· 94
(1) Efficiency Improvement Propulsion System Motor Block Development ····· 94
(2) Efficiency Improvement Propulsion System Traction Motor Development ····· 117
(3) Efficiency Improvement Propulsion System Main Transformer Development ···· 131
4. Bogie Operating Efficiency Improvement Technology Development ····· 147
(1) Bogie Operating Efficiency Improvement Development ····· 147
(2) Anti-roll Bar and Light Weight Axle Box Development ····· 176
5. System engineering and project management ····· 191
(1) Feasibility study and verification for the whole system through interface mediation 191
(2) Overall mediation and schedule management of project ····· 203
(3) Division, mediation & management of mutual roles and labors among sub-projects · 205

Ⅳ. Research Outcome and Effect ····· 207

Ⅴ. Practical Use of Research Outcome ····· 215

Ⅵ. Representative Research Result of Research & Development Project ····· 219

References ····· 229

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1
제 1 절 연구개발의 필요성 ····· 1
제 2 절 사업 개요 ····· 2

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 8

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 성과 ····· 11
제 1 절 고속열차 공력성능 향상 핵심기술개발 ····· 11
1. 고속열차 공력성능 향상 기술개발 연구 개요 ····· 11
2. 신개념 다목적 전두부 최적설계 ····· 14
3. 고속열차 차체 공기저항 저감기술 개발 ····· 25
4. 최적설계 편성열차 공력 성능평가 및 공기저항 저감기술 검증 ····· 35
5. 소결론 ····· 50

제 2 절 고속열차 주행안정성 향상 기술개발 ····· 51
1. 고속열차 주행안정성 향상 기술개발 연구 개요 ····· 51
2. 주행장치의 헌팅에 대한 안정성 향상 방안 수립 ····· 54
3. 주행안정성 시험평가 기준 개발 ····· 76
4. 소결론 ····· 92

제 3 절 고속열차 추진시스템 효율향상 기술개발 ····· 94
1. 효율향상 추진시스템 주전력변환장치 개발 ····· 94
2. 효율향상 추진시스템 견인전동기 개발 ····· 117
3. 효율향상 추진시스템 주변압기 개발 ····· 131

제 4 절 운영효율향상 고속열차 주행장치 기술개발 ····· 147
1. 운영효율향상 주행장치 개발 ····· 147
2. 안티롤바 및 경량 액슬박스 개발 ····· 176

제 5 절 종합시스템엔지니어링 및 사업 총괄 ····· 191
1. 과제간 인터페이스 조정을 통한 시스템 타당성 검토 및 검증연구 ····· 191
2. 사업의 총괄적 조정 및 일정 관리 ····· 203
3. 과제간 상호역할 및 업무분담 조정·관리 ····· 205

제 4 장 목표 달성도 및 관련분야 기여도 ····· 207

제 5 장 연구개발성과의 활용계획 ····· 215

제 6 장 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 219

참고문헌 ····· 229

제 1 장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발의 필요성

○ 국내 고속철도는 2004년 KTX가 서울~부산구간에 개통되어 올해로 13년이 되었음. 지난 13년 동안 고속철도에 힘입어 국내에 많은 변화가 있었으며, 철도교통은 전국을 반나절 생활권으로 만들어 국민생활의 편의에 기여하고 있음. 국내 고속열차(KTX) 개통 10년 이상 경과를 고려하여 향후 성능 업그레이드를 위한 핵심기술의 개발이 필요함

○ 국내 고속철도 운영속도 향상 필요
- 기술보유국간 최고속도의 향상을 통한 기술력 과시와 더불어, 운영효율성 향상을 위한 기술개발 노력 경주
  · 서울-부산 평균속도 180.2km/h(프랑스 272km/h, 중국 316km/h, 일본 263km/h)
- 실제적 고속철도의 효과를 발휘하기 위해서는 운영속도의 향상 필요
  · 고속철도 최고 운영속도 : 중국 350km/h, 일본 320km/h, 프랑스 320km/h, 대한민국 300km/h
  · 한국철도시설공단 경부고속철도 증속 방안 검토(경부 및 호남고속철도 속도향상방안 연구용역(2011. 5)) 결과, 비용/편익 고려 시 최적속도 320km/h로 분석

○ 국내 고속철도 노선의 운영속도 향상을 위해서는 신규 노선의 경우 동력분산형 고속열차를 도입함으로써 가능할 수 있으나, 기존 노선 및 차량의 경우 현재 운영중인 운영속도 300km/h급 동력집중식 고속열차(KTX-산천)에 대한 성능 개선이 요구되며, 350km/h까지 주행 가능하게 할 수 있는 핵심기술에 대하여 사전 연구를 통한 기술 확보 필요

○ 세계 고속철도 시장의 확대 대응
- 환경, 에너지 문제 해소를 위한 철도중심 Modal Shift
- 철도시장은 연간 4.5% 성장
- 세계시장에서 통하는 경쟁력 있는 일류기술 개발 필요

○ 고속철도 시장 석권을 위한 치열한 기술 경쟁 대응
- 프랑스, 중국의 기술과시적 속도 경쟁
- 일본과 독일의 고속철도 성능 및 효율향상 기술개발
- 철도 선진국 및 중국과의 경쟁력 우위를 위한 기술개발 필요

○ 국가정책방향에 부응하여 국부기술 창출
- 철도중심 교통체계, 전국 주요거점 통근시간대 연결, 전국 단일 도시권화
- 철도산업을 통한 경제성장, 중소기업 육성, 일자리 창출
- 수출위주 한국경제의 성장동력원으로 육성키 위한 기술개발 필요

○ 운영 효율 향상을 위한 핵심기술(추진, 공력, 주행성능)의 개발 필요
- 추진출력 증가와 저항 감소로 운영속도 향상 가능
- 1C1M 방식 추진시스템으로 운영효율 향상
- 운영효율 향상을 위한 핵심기술의 개발로 경제성 확보

○ 국토교통부가 추진하고 있는 1시간 30분대 고속철도망 구축에 크게 기여할 수 있으며, 철도에 의한 국토 통합으로 지역 갈등이라는 고질적 사회문제를 해소할 수 있음

제2절 사업 개요

1. 연구 목표

○ 동력집중식 고속열차의 성능·효율 향상을 위한 핵심기술(추진, 공력, 주행성능) 및 시험평가 기술개발

- KTX-산천 대비 공기저항 8% 저감
- 동력집중식 고속열차 주행안정성 임계속도 20% 향상
- 개별제어(ICIM) 방식의 1,200kW급 동력집중식 추진시스템 개발

2. 연구기간 및 연구비

○ (연구기간) 2013. 12. 24 ~ 2017. 10. 23 (3년 10개월)

○ (연구비) 152.5억원(정부 126.2 억원 / 민간 26.3 억원)

(단위 : 백만원)

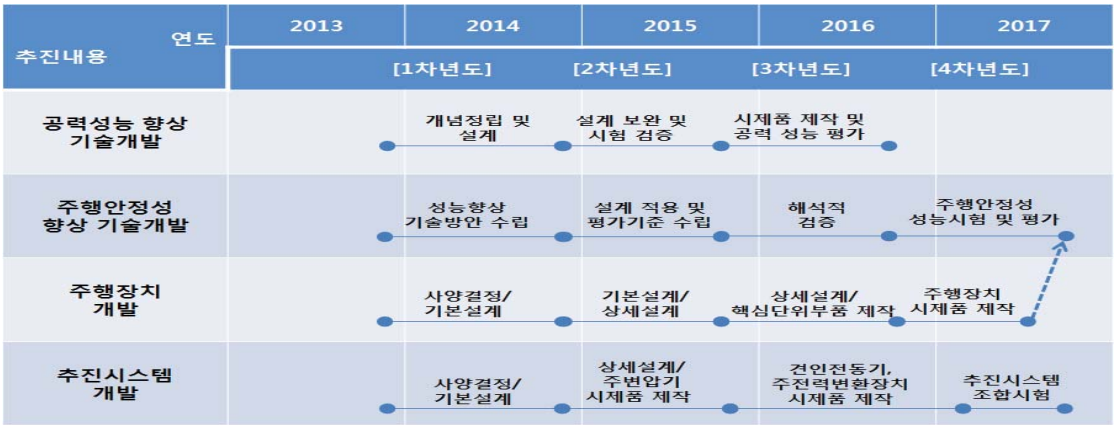
구분	1차년도 ('13.12~ '14.12)	2차년도 ('14.12~ '15.10)	3차년도 ('15.10~ '16.10)	4차년도 ('16.10~ '17.10)	계
정부	3,700	3,100	3,500	2,320	12,620
민간	422	650	944	618	2,634
계	4,122	3,750	4,444	2,938	15,254

3. 수행체계

고속열차 효율 향상 핵심기술 개발(연구단)	
주관기관	한국철도기술연구원
연구책임자	박 춘 수

1세부과제	2세부과제
(주관) 한국철도기술연구원	(협동) 현대로템㈜ (공동) 국제전기㈜ (공동) 현우시스템
연구개발내용	연구개발내용
- 세부과제명 : 고속열차 성능 및 효율 향상 핵심기술 개발 · 고속열차 공력성능 향상 기술개발 · 고속열차 주행안정성 향상 기술개발	- 세부과제명 : 고속열차 효율향상 차량모듈 기술개발 · 추진시스템 효율향상 기술개발 · 운영효율향상 주행장치 기술개발

4. 연구 추진 계획



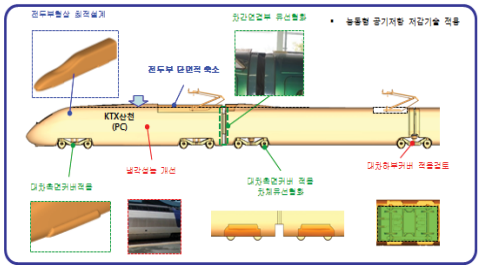
5. 주요 연구내용

○ 고속열차 공력성능 향상 기술개발
- KTX-산천 대비 공기저항 8% 저감
- 공기역학 및 최적설계공학 기반의 신개념 고속열차 전두부 설계기법
  · 산업디자인 기반의 고속열차 설계기술의 한계를 공기역학 성능 최적설계 기술과 융합함으로써 전두부 설계 수준을 세계 최고수준으로 선도
- 다목적 공력설계 전두부 및 공기저항 저감기술이 적용된 KTX-산천 신모델 개발
  · 차체 공기저항 최소화 기술 적용으로 고속주행 에너지 효율의 극대화

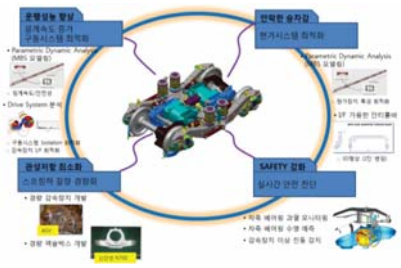
○ 고속열차 주행안정성 향상 기술 개발
- 임계속도 20% 향상 및 진동가속도 10% 저감을 위한 현가장치 최적화 기술 개발
  · 주행속도 350km/h까지 주행안정성이 확보되는 KTX-산천 주행장치 해석
  · 진동가속도 10% 저감으로 동일 속도에서의 승차감 개선 효과
- 등가감쇠비 변화를 이용한 대차 임계속도 예측 기술 개발
  · 시험장비 최고속도 이상의 임계속도 예측 가능으로 시험비용 및 신규 장비구축비용 저감효과

○ 고속열차 효율향상 추진시스템 기술 개발
- 추진시스템 출력밀도 향상을 통한 1,200 kW급 추진시스템(2.5MVA급 주전력변환장치, 1,200kW급 견인전동기, 7,080kVA급 주변압기) 개발
  · KTX-산천 추진시스템과 호환성(동일 Interface, 동일 치수 및 중량 등)을 유지하면서, 추진시스템 출력 10% 향상
  · 유지보수성 개선 및 시스템 효율 향상을 위한 동력집중식 개별 견인전동기 제어(1C1M) 적용
  · 수냉각방식 적용을 통한 추진시스템 냉각 효율 향상
  · 주변압기 냉각 효율 및 절연 성능 강화로 용량 10% 향상

○ 운영효율향상 고속열차 주행장치 기술 개발
- 현가장치 최적화 기술을 적용하여 운영효율이 향상된 주행장치 개발
  · KTX-산천 대차와 호환가능하면서 주행장치 주행 속도 증가로 열차 운행 시간/수송 시격 단축
  · 차축 베어링 과열 방지 모니터링에 의한 실시간 안전 진단
  · 차량 주행안정성 향상 및 진동 저감으로 승차감 및 승객만족도 향상
  · 곡선추종성 향상으로 차량유지보수비 절감
- 경량화된 주행장치 부품(액슬박스 등)
  · 기존 주행장치의 형상 내에서의 부품 경량화를 통한 에너지 절감



<고속열차 공기저항 저감기술 개념도>


<운영효율향상 고속열차 주행장치 개념도>



<고속열차 효율향상 추진시스템>

6. 연구과제 추진 경과

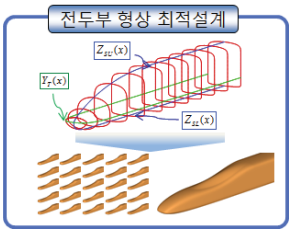
○ ‘13. 1 : ‘13년도 국토해양R&D사업 시행계획 수립

○ ‘13. 9 : 선정평가위원회 개최(한국철도기술연구원 주관기관 선정)

○ ‘13. 12 : 1차년도 협약체결 및 과제 착수

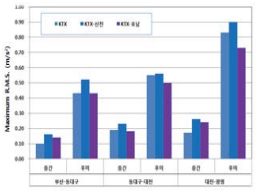
○ 1차년도 (2013.12.24 ~ 2014.12.23)

- 신개념 전두부 기본설계
  · 최적설계를 통한 공기저항 6% 저감 형상 완성
- 고속열차 공기저항 측정 및 저감기술 개념 정립
  · 현 차량의 공기저항 분포 분석, 저감기술 기본설계 및 측정시스템 구축
  · 냉각성능 개선을 위한 동력차 열환경 측정 및 열해석 완료

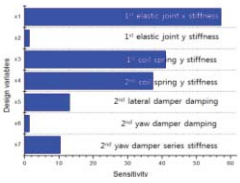




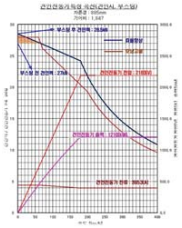
- 고속열차 주행안정성 향상 기술방안 수립
  · KTX-산천 동력차 임계속도 영향인자 분석
  · 현가장치 최적화를 통한 개선방안 도출 및 제시

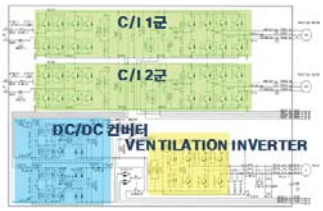


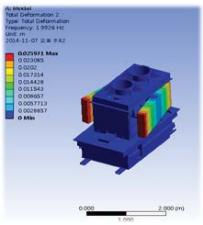




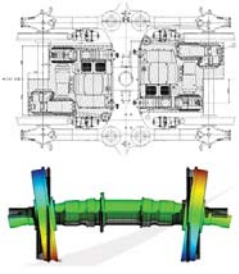
- 추진시스템 기본설계
  · KTX-산천 대비 추진성능 10% 향상을 위한 기술사양 확정
  · 주전력변환장치, 견인전동기, 주변압기 기본설계 수행



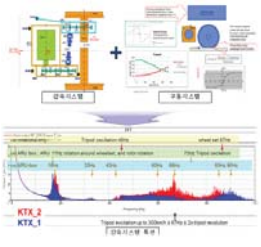




- 주행장치 선행기술 검토 및 기본설계
  · 운영속도 350km급 주행장치 기본설계 수행
  · 안티롤바 및 경량 액슬박스 모델링 및 기본설계, 해석 수행







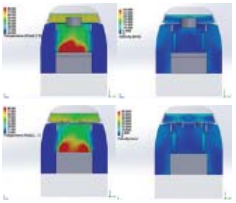
○ 2차년도 (2014.12.24 ~ 2015.10.23)

- 신개념 전두부 최적설계
  · 고속열차 전두부 다목적 최적설계 프로세스 개발
  · 공기저항, 측풍, 미기압파 등을 고려한 전두부 최적설계 형상 도출
- 고속열차 차체 공기저항 저감기술 개발
  · 공기저항 저감 형상 개발 및 검증 : 10~12% 공기저항 저감효과 확인



<고속열차 차체 공기저항 저감기술>





<동력차 열환경 데이터 및 해석기술>

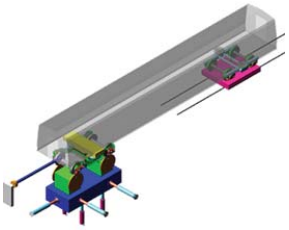




<다목적 최적설계 전두부 및 공기저항 저감기술이 적용된 편성열차>

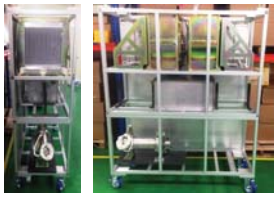
- 고속열차 주행안정성 향상 기술 설계적용 및 평가기준 수립
  · 신규 개발 주행장치 설계 검토, 개선방안 도출 및 설계 적용
  · 등가감쇠비 변화를 이용한 임계속도 예측 방법 개발 및 시험평가방안 도출

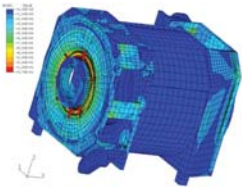






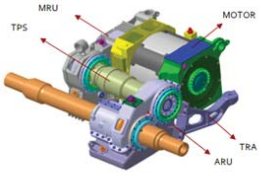
- 추진시스템 기본설계 및 상세설계
  · 주전력변환장치 기본/상세설계 및 IGBT 스택 수냉각기 단위모듈 제작
  · 견인전동기 기본/상세설계, 강도해석 및 냉각유로해석
  · 주변압기 상세설계 및 1차시제품 제작 완료



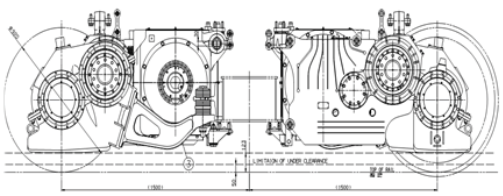




- 주행장치 기본설계 및 상세설계
  · 주행장치 기본설계 완료, 상세설계 및 해석 수행
  · 안티롤바 및 경량액슬박스 기본설계 완료, 상세설계 및 해석 수행



<350KPH급 고속전철 감속장치 조립체>



○ 3차년도 (2015.10.24 ~ 2016.10.23)

- 최적설계 편성열차 및 공기저항 저감 기술 성능평가

· 전두부 다목적 최적설계 형상 3종 개발

· 전산해석, 철도연 및 항우연 풍동시험을 통한 공기저항 저감기술 성능 검증 : KTX-산천 시험모델 대비 16~18% 공기저항 저감 확인

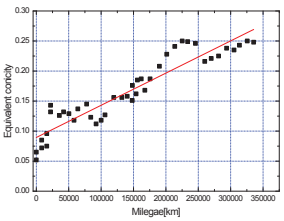


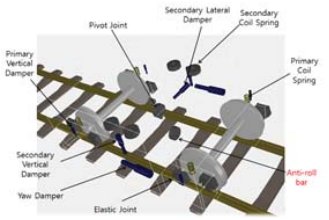


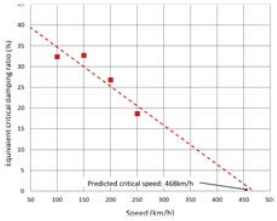
- 고속열차 주행안정성 향상 기술 해석적 검증

· 기본모델 설계안에 대한 주행안정성 해석적 검증 : 신규개발 주행장치 설계안 임계속도 KTX-산천 대비 21.2% 향상 확인

· 기존 동력대차 Roller Rig 주행안정성시험을 통한 임계속도 예측방법 검증 완료







- 추진시스템 상세설계 및 시제품 제작

· 주전력변환장치 상세설계 완료 및 구성품 제작

· 견인전동기 1차시제품 제작 및 시험 완료

· 주변압기 시험, 개선 및 2차시제품 제작 완료







- 주행장치 상세설계 및 핵심단위부품 제작

· 주행장치 상세설계 완료

· 주행장치 핵심단위부품 제작 및 시험 진행

· 안티롤바 및 액슬박스 시제품 제작 및 시험 완료









○ 4차년도 (2016.10.24 ~ 2017.10.23.)

- 고속열차 주행안정성 성능시험 및 평가
  · 주행장치 설계 최종안 해석결과 실험적 보완 및 검증 완료
  · 동특성주행시험기를 이용한 개발 주행장치 고속열차 주행안정성 시험 및 평가 완료
  · 추진성능시험설비 개량 구축 완료 및 추진장치 조합시험 및 평가 완료





- 주행장치 시제품 제작 및 검증
  · 주행장치 핵심부품/구성품 제작 및 시험 완료
  · 안티롤바 및 액슬박스 2차시제품 제작 및 시험 완료
  · 완성대차 조립 및 Roller Rig 시험·검증 완료




- 추진시스템 시제품 제작 및 조합시험
  · 주전력변환장치 시제품 제작 및 형식시험 완료
  · 견인전동기 2차시제품 제작 및 형식시험 완료
  · 주변압기 2차시제품 형식시험 완료
  · 추진시스템 조합시험을 통한 성능 검증 완료





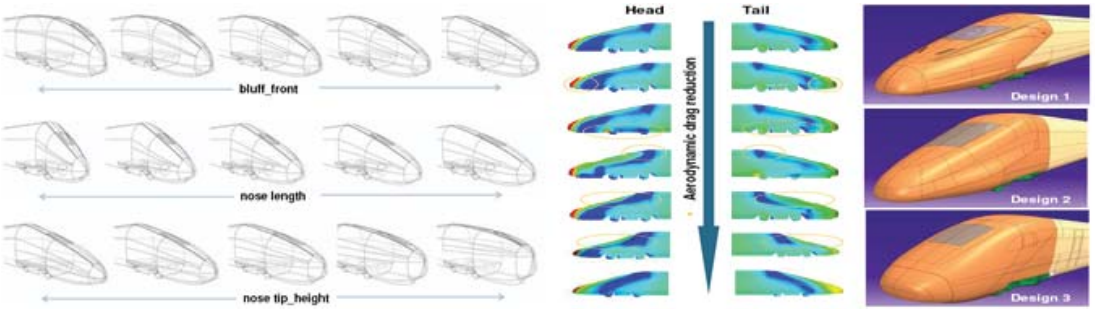
제 2 장 국내외 연구개발 현황

제1절 고속열차 공력성능 향상 기술

1. 국외 연구개발 동향

○ 일본, 중국 및 유럽 등의 고속철도 선진국에서는 최근 설계단계에서 공력설계 과정을 도입하기 위해 많은 연구가 수행되고 있으며, 공력성능 향상을 목적으로 전두부 최적설계와 차체 공기저항 저감 기술 적용 설계 등이 연구 개발되고 있음

- Bombardier는 신형 ZEFIRO 고속차량에 공기저항, 소음 및 고속주행 시 구동 에너지 저감을 목표로 개발을 진행함[1]
- 독일 항공우주센터(DLR)은 유체저항과 관련된 공력특성 개선을 통해 NGT(Next Generation Train)를 개발 중임[2]
- 일본 Hitachi는 신칸센 차량의 전두부 생산공정 개선을 위해 CAD Data를 활용하여 기존 프레임+스킨 구조에서 패널구조로 개선함[3]
- 일본에서는 터널 통과 시 미기압파로 인해 생기는 소음을 억제하기 위하여 E6계의 전두부를 E3계보다 7m 길게 제작[4]하였고, Fastech 360 시험차의 전두부 길이를 설계상 가능한 최대 길이인 16m(차체길이 27.3m)까지 연장함[5]

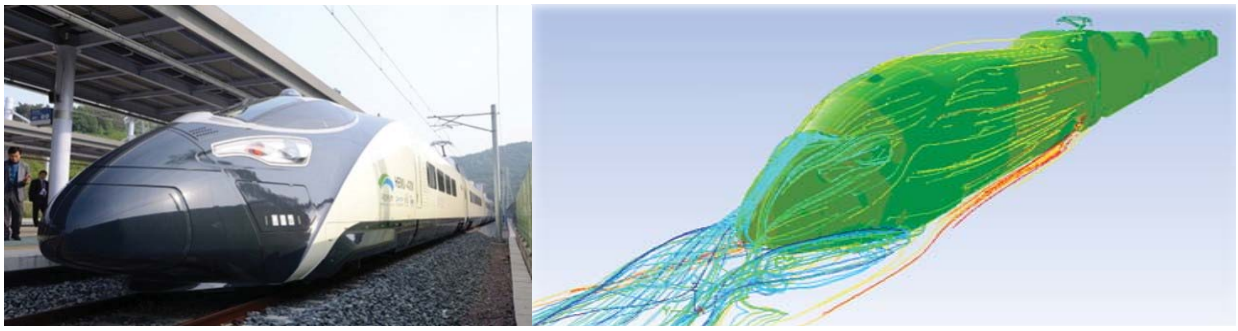


<Bombardier의 공력최적설계>

2. 국내 연구개발 현황

○ 국내에서는 HEMU-430X 개발시 400km/h 이상의 속도 구현을 위해 공력해석을 통해 주행저항을 최소화(300km/h에서 기존 KTX 대비 10% 저감)할 수 있는 전두부 형상을 구현함[6]

- 열차가 터널 진입시 가해지는 충격 및 미기압파의 영향을 최소화하기 위한 전두부 및 차량 단면 형상설계가 이루어짐



<공력해석을 통한 HEMU-430X 전두부 설계>

○ HEMU-430X는 KTX, KTX-산천 보다 좀 더 유선형의 형상을 갖도록 디자인이 되었기 때문에 전두부의 하부 구조 설계에 어려움이 있었으나, 장치 간 인터페이스를 통하여 해결하였으며 충돌해석과 공력해석 결과를 반영하여 설계를 진행함

- 차량 간 연결기, 운전실 출입문, 충돌 설계 등과의 인터페이스를 통하여 전두부 골조를 설계하였으며, 사각형상의 알루미늄 압출재와 판재를 성형하여 제작한 골조에 외판을 씌운 구조로 이루어졌음

○ HEMU-430X 전두부 제작시 충격 및 미기압파 영향을 고려하여 디자인 되었으나 dynamic simulation 및 aero dynamic simulation 해석 기술은 선진국에 미치지 못하는 것으로 나타남

- 일본 등은 고속차량의 터널 진입시 압력변화 확인이 가능한 실험설비 등을 갖추었으나 국내는 기본 시험설비 수준이 미약함
- 일본의 고속철도 전두부 구조는 기존 프레임+스킨 구조에서 패널구조로 변화하고 있으나 아직 국내에서는 용접 등의 수작업 공정이 많음
- 고속철도 전두부 재료는 주로 FRP를 활용하고 있으나 소재부문 국산화가 미흡함

제2절 고속열차 주행안정성 향상 기술

1. 국외 연구개발 동향

○ 유럽 및 일본 등에서는 승차품질 및 에너지 효율 향상, 승객안전을 확보하기 위한 모니터링 등에 초점을 맞추고 주행장치에 대한 연구개발을 진행 중임

- 승차감 향상을 위해 능동현가장치, 능동스티어링, 틸팅 제어기술의 상용화
- 트랙션 로드, Rubber Ring 등을 이용한 실내소음 저감 기술 개발
- 에너지 효율 향상을 위한 대차 경량화를 위해 복합 소재 대차프레임 적용
- 승객안전 확보를 위한 대차 및 궤도 진단장치의 구현

○ 승차감 향상 기술

- 일본 신칸센 E5 계열에는 횡방향 진동을 제어하기 위한 액티브댐퍼와 곡선구간 승차감 개선을 위한 틸팅 제어기술이 적용되었고, 신칸센 E6계 모든 차량에는 승차감 향상을 위한 능동현가장치(Full active suspension)가 장착됨

- 일본 RTRI(Railway Technical Research Institute)에서는 승차감 향상을 위해 상하방향 세미 액티브 유압 펌프 개발 및 시험을 진행 중임
- 알스톰의 AGV 차량에는 능동형 현가장치를 적용하여 350km/h 주행시의 진동 수준이 300km/h로 주행하는 TGV와 유사하도록 함
- Bombardier는 능동조향, 능동현가, HOD 등이 적용된 FLEXX-Tronic 대차 출시, 스웨덴 REGINA 250 차량을 활용한 본선시운전을 통해 200km/h에 대한 UIC 인증을 획득함. 2010년 6월 스위스연방철도(SBB)에 436량(59편성) 계약, 2019년 말에 최종납기 예정임



<FLEXX-Tronic 대차>

2. 국내 연구개발 현황

○ 국내에서는 KTX-산천 개발을 통하여 동력집중식 고속대차를, HEMU-430X 개발을 통하여 동력분산식 고속대차를 개발하였음

○ 한국철도기술연구원은 준고속열차 대상의 횡방향 능동현가장치를 개발, 실선주행 시험에서 목표성능(횡방향 진동저감 40%) 검증에 성공[7]





<한국철도기술연구원의 능동현가장치 시험>

○ 차세대고속철도 기술개발사업에서 준 고속차량용 능동 현가장치(Semi-active suspension) 기술을 시험하였으나 상용열차에는 적용하지 못하고 있음

○ 현가장치에 사용되는 댐퍼의 경우 수입에 의존하고 있으며 철도차량의 하중과 내구수명을 만족하는 국산 댐퍼는 없음

○ KTX-산천의 운행속도를 350km/h로 상승시키기 위해서는 현가장치 최적화를 통한 임계속도 향상 및 승차감 개선 연구가 필요함

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 고속열차 공력성능 향상 핵심기술개발

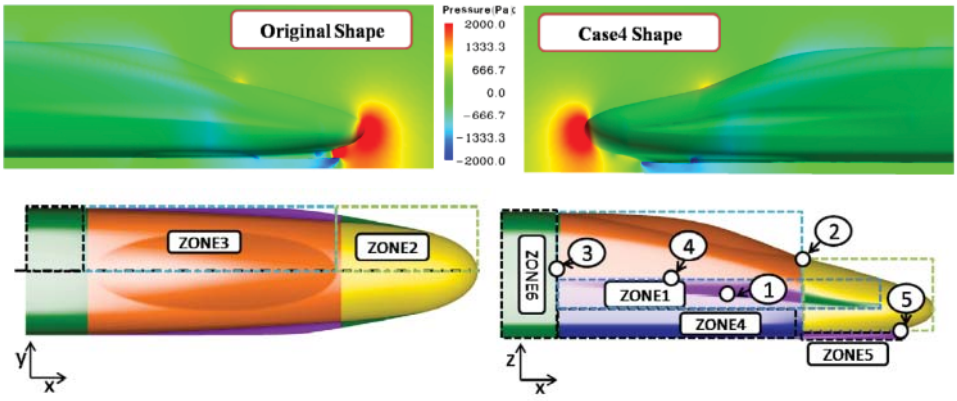
1. 고속열차 공력성능 향상 기술개발 연구 개요

가. 연구의 필요성

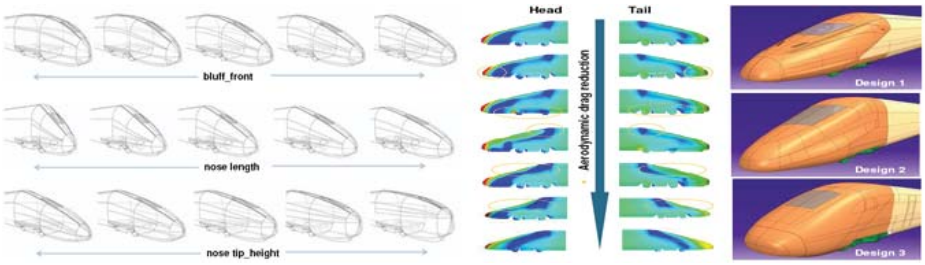
○ 고속열차의 공기저항은 고속에서 주행저항의 대부분을 차지하기 때문에 고속열차의 공력성능을 효율적으로 향상시키기 위해서는 공기저항 저감이 필수적임. 또한, 고속열차 공력성능의 우수성은 공기저항 뿐만 아니라, 강풍안정성, 미기압파와 같은 다양한 공기역학적 특성에 의해 평가받기 때문에 다목적 최적설계가 반드시 이루어져야함

○ 일본, 중국 및 유럽 등의 고속철도 선진국에서는 최근 설계단계에서 공력설계 과정을 도입하기 위해 많은 연구가 수행되고 있으며, 공력성능 향상을 목적으로 전두부 최적설계와 차체 공기저항을 줄이는 저감기술 적용 설계 등이 연구 개발되고 있음

- 중국의 경우 전두부 형상의 공력성능 향상을 목적으로 하는 최적설계를 수행하였음
- 일본, 유럽의 경우 전두부 최적설계와 더불어 차체 공기저항을 저감하려는 연구개발을 수행하고 있음



(a) 중국



(b) Bombardier

<해외에서 수행중인 공력최적설계>

○ 국내에서는 고속열차 제작시 공력최적설계 기술이 적용되지 않은 관계로 KTX-산천 설계/제작 후, 고속열차의 운영비 절감 및 친환경성 향상 기회를 놓쳤으며, 국내 고속열차 고유모델의 다양성이 부족한 상태임


(a) KTX-산천


(b) KTX-호남


(c) SRT

<단조로운 국내 고속열차 모델>

○ 따라서, 향후 국내에서 개발되는 고속열차의 공기역학적 성능 향상 및 모델 다양성 확보를 위해 공기역학적 설계기술의 확보가 절실함

나. 연구 목표

○ 고속열차 공력 성능 향상 기술개발
- KTX-산천 대비 공기저항 8% 저감
- 공기역학 및 최적설계공학 기반의 신개념 고속열차 전두부 설계기법 개발
- 다목적 공력설계 전두부 및 공기저항 저감 기술이 적용된 KTX-산천 신모델 개발

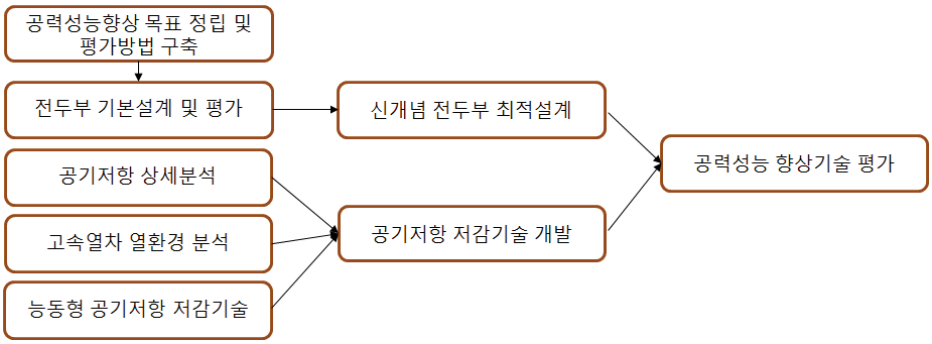
○ 목표설정의 근거
- 기수행된 전산해석 연구결과 및 해외 기술수준 등을 바탕으로 목표를 설정함
  • Bombardier의 Zefiro, 일본의 E5, 중국의 CRH380A 등에는 공기역학적 성능을 고려하여 전두부 설계 기술이 적용됨
  • 일본은 공기저항 저감을 위한 대차커버 및 차간연결막을 선도적으로 E5에 적용함

○ 기존대비 차별성 및 우수성
- 산업디자인 기반의 고속열차 설계기술의 한계를 공기역학적 공력성능 최적설계 기술과 융합함으로써 전두부 설계 수준을 세계 최고수준으로 끌어올리고자 함
- 차체 공기저항 최소화 기술을 적용함으로써 고속주행 에너지효율을 극대화 함

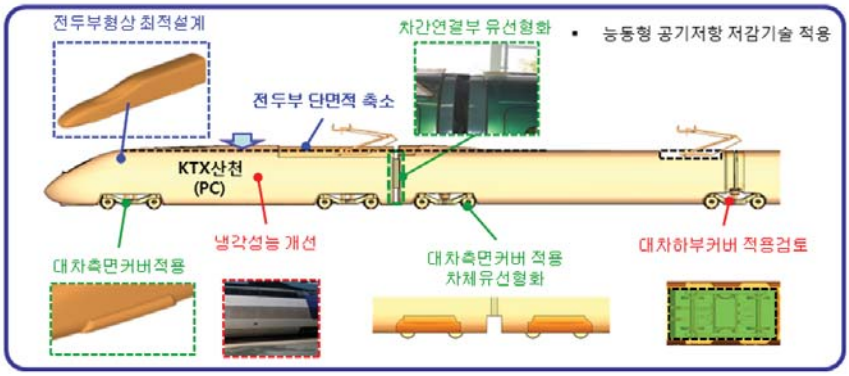
As-is(기존기술)	⇒	To-be(개발기술)
(기술수준) - 산업디자인 기반의 전두부 설계 - 차체공기저항 저감기법 미적용 - KTX-산천 공기저항계수(C_D): 0.96 (10량 1편성 기준) (해외현황) - 공기역학적 기반의 공력성능 최적설계 적용 (봄바르디아 Zefiro 380) - 공기저항 저감을 위한 대차커버 적용 등 고속열차의 공기저항 저감 극대화를 위한 기술적용 (일본 Fastech 360 등)		(개발목표) - 고속열차 전두부 공력성능 최적설계 핵심기술 · 열차 운행환경에 적합한 전두부 다목적 공력성능 최적설계 프로세스 · 다목적(공기저항, 강풍안정성, 미기압파) 공력성능 최적설계 전두부 - 고속열차 공기저항 저감 핵심기술 · 고속열차 동력차 열환경 데이터 및 전산해석 기술 · 고속열차 차체 공기저항 저감기술(친환경 대차커버 및 동력차 차체 등) · 다목적 최적설계 전두부 및 공기저항 저감기술이 적용된 편성열차 도출 - KTX-산천 대비 공기저항 8% 저감 (검증방안) - 전산해석 및 1/30 축소모형에 대한 풍동시험을 통해 공기저항 계수 산출

다. 연구 내용

○ 본 과제에서 개발되는 고속열차 공력성능 향상 기술은 “신개념 전두부 최적설계”와 “차체 공기저항 저감기술”로 구성되며, 다음 그림과 같이 3차년도에 걸쳐 연구를 수행하였음. 전두부 형상 최적설계를 통해 신개념 전두부 형상을 도출하고 공기저항 상세분석과 고속열차 열환경분석을 통한 공기저항 저감기술을 개발하여 두 가지 기술이 적용된 공력성능 최적 편성열차를 도출하고 그 기술을 검증·평가함



<공력성능 향상 기술 기술개발 프로세스>



<공기저항기술 적용 예상도>

○ 연차별 연구내용은 다음과 같음. 1, 2차년도를 통해 전두부 최적형상을 도출하고 공기저항 저감기술을 개발하여 3차년도에는 개발된 기술들의 성능 평가 및 검증을 수행하였음

연차	주요 연구내용
1차년도	■ 신개념 전두부 기본설계 및 공기저항 저감기술 검토 - 신개념 전두부 기본 설계 - 고속열차 공기저항 측정 및 저감기술 개념 정립
2차년도	■ 신개념 전두부 최적설계 및 공기저항 저감기술 개발 - 고속주행 효율향상을 위한 신개념 전두부 최적설계 - 고속열차 공기저항 저감기술 개발
3차년도	■ 신개념 최적설계 편성열차 및 공기저항 저감기술 성능평가 - 최적설계 편성열차에 대한 공력성능 평가 - 공력 최적설계 편성열차에 대한 전산해석 및 풍동시험 수행 ■ 고속열차 공기저항 저감기술 성능 평가 - 최적설계를 통한 공기저항 저감기술 성능 검증 및 보완 - 차체 공기저항 저감기법 성능 검증 및 보완

2. 신개념 다목적 전두부 최적설계

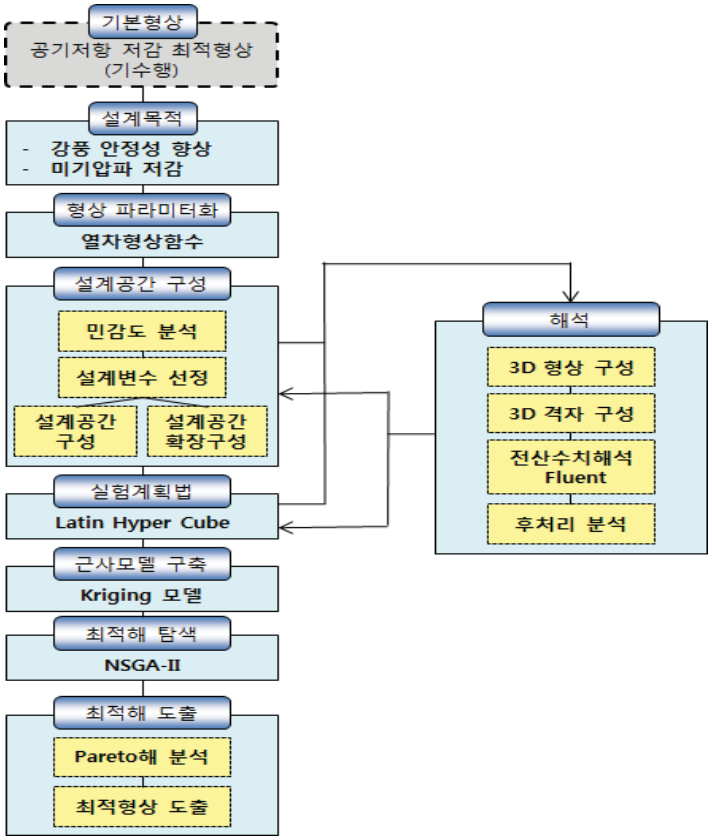
가. 다목적 전두부 최적설계

(1) 최적설계 프로세스

○ 본 연구에서는 공기저항, 측풍안정성, 그리고 터널 미기압파 세 가지 고속열차의 공력 특성에 대한 최적설계를 진행하였음. 우리나라의 고속열차 선로특성을 고려하고, 공기저항이 가장 중요한 요소임을 반영하여 기존 KTX-산천 전두부 형상의 공기저항을 저감하기 위한 최적설계를 수행하여 아래 그림과 같은 최적형상을 도출함. 도출된 공기저항 저감 최적형상을 다목적 최적설계의 설계기본형상으로 측풍안정성이 더 좋고 터널 미기압파가 저감되는 최적설계를 수행하였음



<KTX-산천 공기저항 저감 최적설계 형상>



<전두부 형상 다목적 최적설계 프로세스>

○ 고속열차 전두부 다목적 공력성능 최적설계 프로세스는 공기저항 저감 최적형상에서 시작하여 민감도 분석을 통하여 설계변수를 선정하고 설계공간을 구성함. 각 실험점의 공력특성에 대해 전산수치해석을 수행한 후 해석 결과를 바탕으로 근사모델을 구성함. 구성된 근사모델을 바탕으로 측풍안정성 향상과 미기압파 저감에 대해 공기저항을 제약조건으로 하는 다목적 최적설계를 진행함. 최적 파레토해를 분석하여 트레이드 오프 스터디를 통해 최적형상을 도출하였음

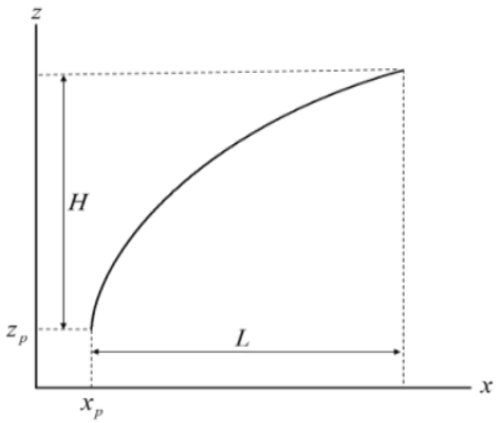
(2) 연구기법

(가) 열차형상함수

○ 고속열차의 전두부 형상을 모사하기 위하여 구요천[8]등이 제안한 열차형상함수를 이용함. 열차형상함수는 Kulfan[9]이 제안한, 다항식을 이용해 항공기날개의 익형에 대한 형상설계 방법으로 발표한 내용을 고속열차 전두부 형상을 구현하기 위해 변형/적용한 형태임. 열차형상함수는 다음 식과 같은 Bernstein 다항식을 응용한 기본식을 바탕으로 함

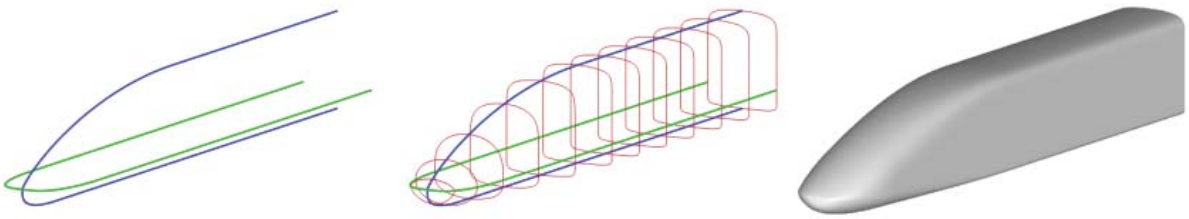
$$Z(x) = \frac{H}{L^{A_1+A_2}}(x-x_p)^{A_1}[2L-(x-x_p)]^{A_2}+z_p$$

○ 위의 식은 시작점(x_p,z_p)과 폭(L), 높이(H)에 대한 정보가 주어졌을 때 곡률을 조절하는 변수 A_1, A_2에 의해 그 형상과 형상의 위치가 결정되는 곡선을 정의하는 식임. 다음 그림은 그 식으로 그려지는 기본곡선을 나타냄. 계수 A_1, A_2의 값이 0에 가까워질수록 곡률이 커지면서 뭉툭한 곡선 형태를 나타내는 반면, 점점 그 값이 커지는 경우에는 곡률이 작아지면서 변곡점을 갖는 곡선이 됨. Kulfan의 항공기익형 형상함수에서 변경된 부분은 곡선의 시작점을 바꿀 수 있게 하였고 여러 개의 곡선들의 조합을 가능하게 함. 그렇게 기본 곡선들을 다수 조합하여 고속열차의 2차원 단면형상들을 다양하게 구성 가능함



<열차형상함수 기본곡선>

○ 열차형상함수의 기본곡선을 바탕으로 하여 열차 전두부의 3차원 형상을 정의하는 과정은 아래 그림과 같이 요약될 수 있음. 3차원 열차 형상을 측면, 평면의 두 방향에서 바라볼 때 2차원 형상으로 투영되어 나타나는 특성곡선들을 기본으로 함. 두 방향에서의 투영 곡선을 바탕으로 하여 기본 골격을 구성한 후 길이방향에 따른 각 단면의 형상들을 정의해주고 조합하여 주면 최종 3차원 형상이 완성됨

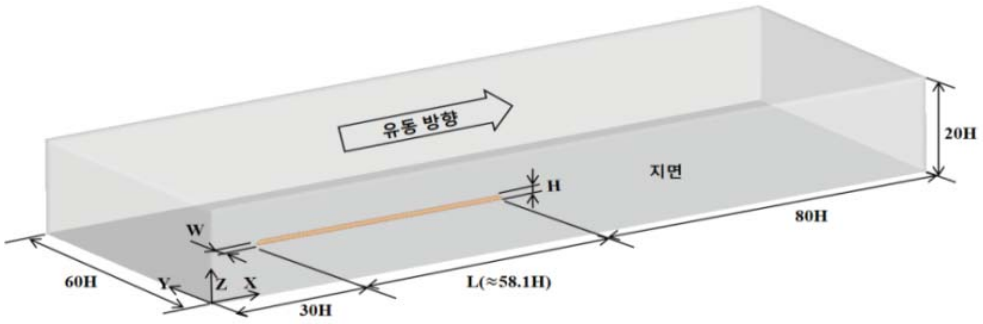


<열차형상함수를 이용한 3차원 열차형상 구성 과정>

(나) 수치해석기법

① 측풍 및 공기저항 해석

○ 측풍과 공기저항을 위한 수치해석은 KTX-산천 10량 길이의 유선형 모델을 만들어 사용함. 전두부 형상에 의한 영향을 중점적으로 살펴보기 위해 대차와 팬터그래프, 차간 틈 등의 다른 형상적인 영향 요소들을 의도적으로 제거한 모델임. 기 수행된 공기저항 저감 최적 형상을 설계 기본형상으로 수행하고 있으므로 열차모델의 크기 역시 KTX-산천을 참고함. 너비는 2.816m, 높이는 3.46m이고 총길이는 201.29m. 열차모델과 지면간의 간극은 한국철도표준규격을 참고하여 열차바닥면과 대차 바퀴형상간의 거리에 레일 높이를 더한 0.382m로 결정함. 다음 그림은 전산수치해석을 위한 전체 모델과 계산 영역을 나타냄



<측풍 및 공기저항 수치해석 계산 영역>

○ 복잡한 고속열차 형상을 구현하기 위해 비정렬 격자를 사용함. 앞서 구성한 10량 유선형 모델을 바탕으로 하여 격자를 구성함. 열차 모델 주변의 경계층에 의한 점성 유동 영향을 잘 모사하기 위해 10개의 Boundary prism layer를 적용함. Boundary prism layer의 총 두께는 약 0.102m임. 열차모델의 모든 면 조건은 고정지면조건이고 No-slip 상태를 적용함. 지면과 열차의 상대적인 운동을 모사하기 위해 지면 바닥면의 경우에만 이동지면조건을 적용함. 계산 영역 전체의 총 격자수는 약 500만개임

○ 측풍과 공기저항 해석은 상용 유동해석 프로그램인 Ansys Fluent를 이용하였고, 지배방정식은 하단의 식과 같은 3차원 압축성 Navier-Stokes 방정식임

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \overrightarrow{W} dV + \oint [\overrightarrow{F} - \overrightarrow{G}] \cdot dA = 0$$

$$\text{, where } \overrightarrow{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{bmatrix} \quad \overrightarrow{F} = \begin{bmatrix} \rho\vec{v} \\ \rho\vec{v}u + p\hat{i} \\ \rho\vec{v}v + p\hat{j} \\ \rho\vec{v}w + p\hat{k} \\ \rho v E + pv \end{bmatrix} \quad \overrightarrow{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_\xi \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij}v_j + \vec{q} \end{bmatrix}$$

○ 열차 주변 유동의 난류를 잘 모사하기 위해 난류모델은 $k-w\ sst$모델을 이용함. 본 연구에서 수행한 모든 수치해석은 현재 KTX-산천의 운영속도인 300km/h에서 효율을 향상시켜 달성하고자 하는 열차 속도 350km/h에서 수행되었으며 열차의 높이 3.46m를 기반으로 한 Re#는 2.32×10^7임

○ 측풍 상황은 수치해석의 효율을 높이기 위해 유입되는 유동속도 350km/h(97.2m/s)와 유입각 90도로 30m/s의 측풍을 벡터적으로 합산한 유동으로 가정하여 해석함

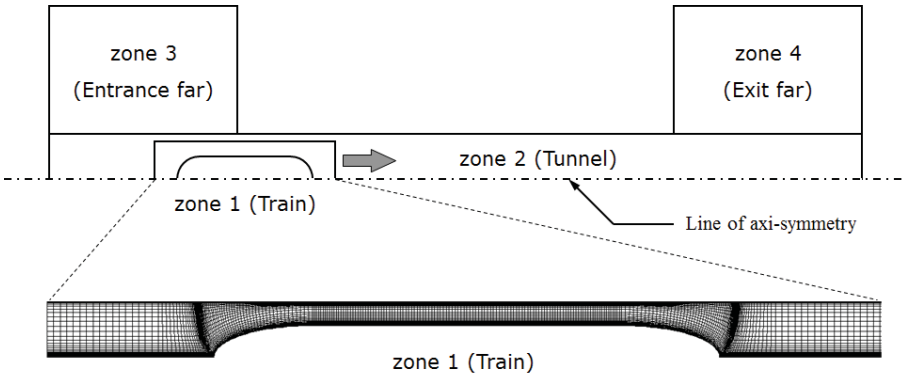
② 터널 미기압파 해석

○ 미기압파 예측을 위한 수치해석은 권혁빈 등이 제안한 방법[10]으로 다음의 식과 같이 일반 곡면 좌표계에서 유도된 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용함.

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial E}{\partial x}+\frac{\partial F}{\partial y}+H=\frac{1}{Re_c}\left[\frac{\partial E_v}{\partial x}+\frac{\partial F_v}{\partial y}+H_v\right]$$

여기서 Q는 보존량 벡터, E, F는 플럭스 벡터, H는 축대칭 소스 항을 나타냄

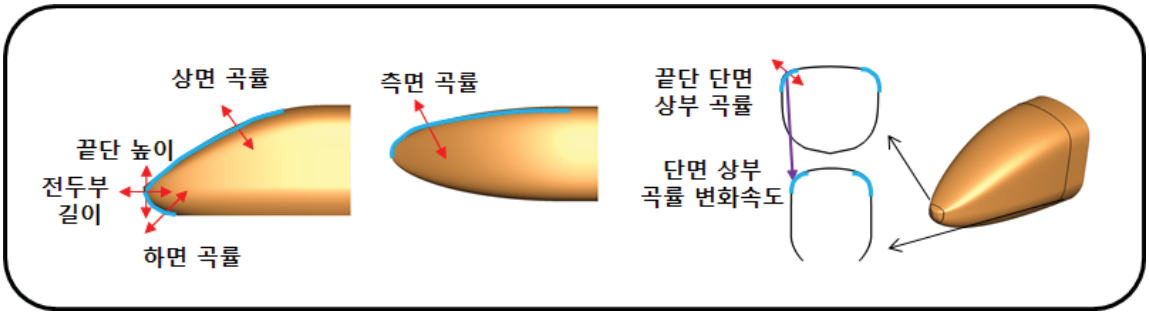
○ 다음 그림은 축대칭 해석을 위한 격자 구성도임. zone 1은 열차주변의 격자로서 터널을 나타내는 zone 2를 통과하여 움직임. zone 3와 zone 4는 터널의 입구 및 출구 지역의 격자임. 열차 격자는 KTX-산천 형상의 수치를 인용하였으며, 터널은 호남고속선의 회룡 터널의 수치를 인용하여 터널길이 550m, 터널 단면적 96.7m^2 으로 격자를 구성함



<열차와 터널 계산 영역 및 격자 구성도>

③ 최적설계기법

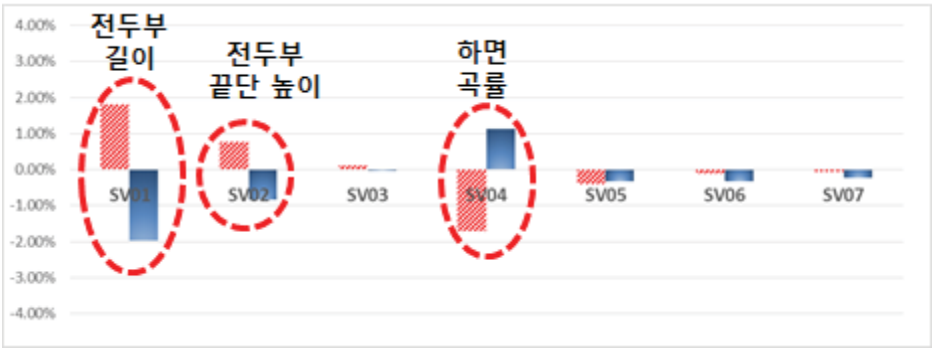
○ 아래 그림은 기 수행된 공기저항 저감 최적설계 시 사용된 형상변수 5개(전두부 길이, 전두부 끝단 높이, 상면 곡률, 하면 곡률, 측면 곡률)와 추가로 전두부 끝단 단면의 상부 곡률과 단면 상부 곡률의 변화속도 2개를 포함하여 총 7개의 형상변수를 나타냄. 7개의 형상변수에 대해 간섭조건을 해치지 않는 범위에서 변화 공간을 설정하고, 형상변수들의 측풍과 미기압파에 대한 민감도 분석을 위해 각각 하한 형상과 상한 형상에 대한 측풍과 미기압파 수치해석을 수행함



<고속열차 전두부 형상변수>



(a) 측력계수 (편성차량 전체)



(b) 미기압파

<목적함수별 설계변수의 민감도>

○ 위의 그림은 측풍과 미기압파에 대한 형상변수별 민감도 해석 결과임. 설계 기본형상에 대해 하한 형상과 상한 형상의 측력계수와 미기압파의 변화율을 나타냄. 편성차량 전체의 측력계수로 측풍에 대한 성능을 평가하였고 미기압파의 경우에는 터널 출구 20m 위치에서 처음 터져나오는 최대값으로 평가함. 측력계수의 경우에는 전두부 끝단 높이의 변화에 가장 민감하게 변화하는 것으로 나타났고 미기압파의 경우에는 전두부 길이의 변화에 가장 민감하게 변화하는 것으로 나타남. 비교적 다른 형상변수에 비해 두 목적함수에 민감한 형상변수는 전두부 길이, 전두부 끝단 높이, 하면 곡률임

○ 본 연구에서는 설계공간이 다른 두 가지 최적설계를 수행하였음. 첫 번째 최적설계는 전두부 끝단 높이와 하면 곡률만을 설계변수로 하여 전두부 길이는 고정시켜 공기저항을 제약하는 설계이고, 두 번째 최적설계는 전두부 길이를 설계변수로 포함시켜 세가지 설계변수에 대해 설계공간을 좀 더 확장시킨 설계임

○ 다음 표는 결정된 설계변수 전두부 길이, 전두부 끝단 높이, 하면 곡률의 하한형상과 상한형상을 나타냄. 3개의 설계변수의 변화를 결정하였고 설계공간을 구성하는 실험점을 도출하기 위해 Maxi-min Latin Hypercube 방법을 이용함. Maxi-min Latin Hypercube 방법은 전산해석을 이용한 실험계획법에 유리한 방법으로 향상된 Latin Hypercube 방법으로 알려짐. 첫 번째 다목적 최적설계의 경우에는 2개의 설계변수(전두부 끝단 높이, 하면 곡률)에 대해 총 10개의 실험점, 두 번째 최적설계의 경우에는 3개의 설계변수(전두부 길이, 전두부 끝단 높이, 하면 곡률)에 대해 총 20개의 실험점을 추출하여 설계공간을 구성함

<설계변수 범위와 그에 따른 전두부 형상 변화>

설계변수	하한형상	기본형상	상한형상
1. 전두부 길이			
2. 전두부 끝단 높이			
3. 하면 곡률			

○ 근사모델을 구성하기 위해 실험점에서의 측풍, 미기압파, 공기저항에 대한 유동해석을 진행함. 근사모델은 다항식에 의한 예측 모델이 아닌 주어진 데이터를 이용하여 내삽 기법으로 예측하는 크리깅 모델을 이용함. 크리깅 기법은 관심 있는 지점에서의 특성치를 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위 값들의 가중 선형 조합으로 그 값을 예측하는 지구통계적 기법으로 다수의 지역 최적해를 가지는 비선형 모델에 대한 모사가 가능한 것으로 알려짐

○ 본 연구에서의 최적설계는 다음의 조건에서 수행함.

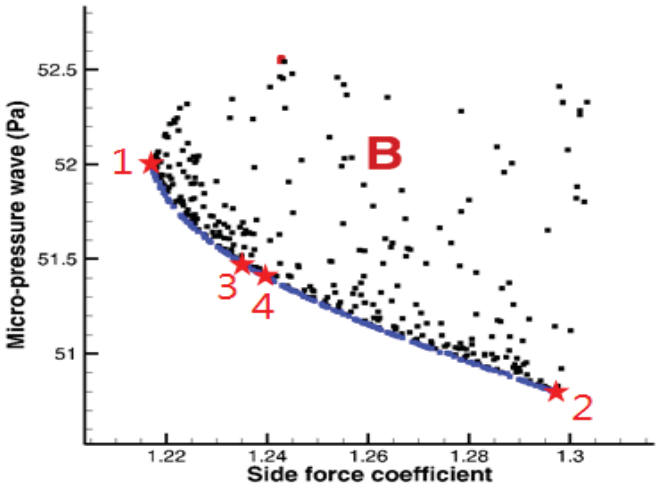
- Determine : 고속열차 전두부 3차원 형상
- Minimize : 10량 편성차량 전체 측풍계수 및 터널 미기압파
- Constraint : 10량 편성차량 전체 공기저항계수 ≤ 공기저항 저감 최적형상 편성차량 공기저항계수 × 1.015

○ 기 수행된 공기저항 저감 최적형상을 설계기본형상으로 측풍 안전성을 향상시키고 터널 미기압파를 저감시키기 위한 최적설계임. 공기저항이 증가되는 방향으로 최적형상이 도출되는 것을 방지하기 위해 본 다목적 최적설계의 기본형상인 기 수행된 공기저항 저감 최적형상의 공기저항계수보다 1.5% 증가된 값보다는 작게 도출되는 것을 제약조건으로 함. 최적설계기법으로는 다목적 최적설계 알고리즘인 NSGA-Ⅱ 기법을 이용하였음. NSGA-Ⅱ 알고리즘은 각 목적함수 간의 trade-off 관계를 형성하여 주어 다목적 최적화 문제 해결에 있어 효율적인 것으로 알려짐

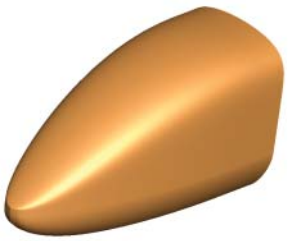
나. 최적설계 결과 및 검토

(1) 전두부 길이가 고정된 최적설계 (최적설계 #1)

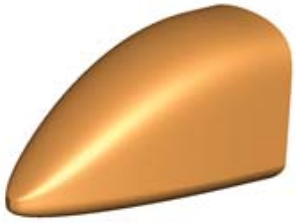
○ 아래 그림은 다목적 최적설계를 통해 도출된 파레토 최적해임. B로 표시된 부분이 최적설계의 기본형상인 공기저항 저감 최적형상이고 아래쪽의 보라색 점들의 집합이 파레토 프론트로 불리는 다목적 최적해들의 집합임. 일반적으로 다목적 최적설계의 경우에는 한 개의 최적해가 아니라 여러 개의 최적해가 존재하게 되기 때문에 파레토 프론트 중에 트레이드 오프 스터디를 통해 최적해 선택이 가능함



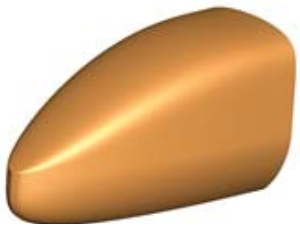
<파레토 최적해 (최적설계 #1)>



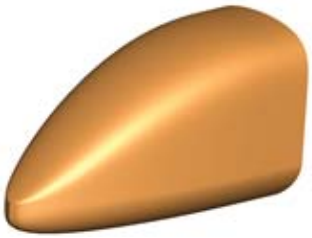
B. 설계기본형상



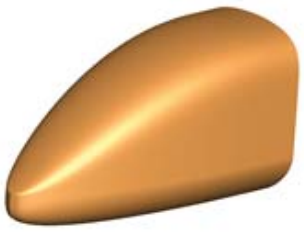
1. 측력계수 최대저감 형상



2. 미기압파 최대저감 형상



3. 접선위치 형상



4. 호남고속선 비율형상

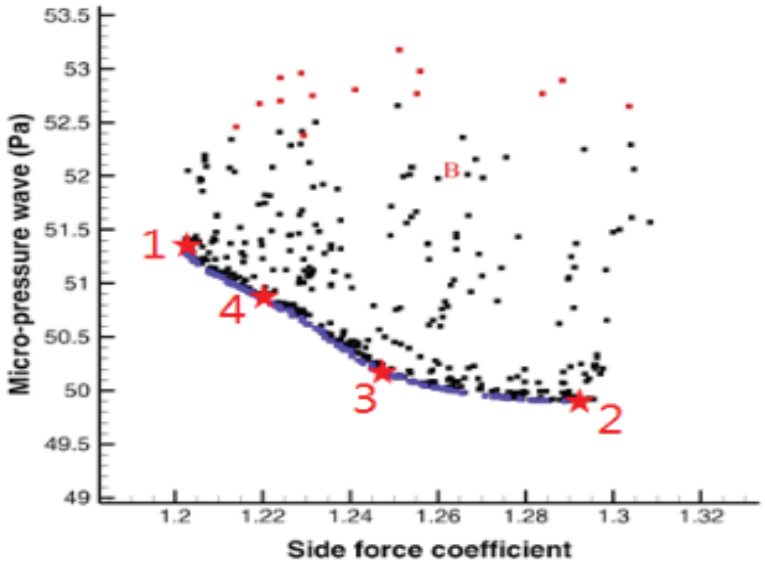
<설계기본형상과 파레토 최적형상 (최적설계 #1)>

○ 각 목적함수별로 가장 저감율이 높은 형상들을 우선 검토함. 앞의 그림 1번은 측력계수가 가장 저감된 형상이고 2번은 미기압파가 가장 저감된 형상임. 최적설계 결과 1번 형상은 측력계수가 3.6% 저감되었고 미기압파는 0.1% 저감됨. 반면 2번 형상은 미기압파는 2.4% 저감되었으나, 측력계수는 오히려 2.7% 증가함. 일반적으로 많이 선택하는 최적해인 원점에서의 최소거리 파레토 프론트 해인 3번 형상은 측력계수는 2.2%, 미기압파는 1.1% 저감됨. 설계기본형상과 최적형상들을 비교해 보면, 측력계수 저감율이 최고인 1번 형상의 경우 전두부 끝단의 높이가 낮게 나타나고, 미기압파 저감율이 최고인 2번 형상은 하단의 곡률이 크게 나타나면서 전두부 끝단의 형상이 뭉툭하게 나타남. 호남고속선의 선로 상황을 고려한 최적형상을 제안함. 측풍의 경우 교량이나 다리 위에서 더 위험한 상황이 초래될 수 있고 미기압파는 터널 출구에서 발생하는 현상임. 그러므로 오송~광주송정 사이의 호남고속선 선로 정보를 기준으로 교량연장과 터널연장의 비를 계산함. 그 비는 약 1:0.65였으며 이와 유사하게 [측력계수 저감율:미기압파 저감율]을 나타내는 형상을 탐색하여 4번 최적형상을 도출함. 4번 최적형상은 측력계수의 경우 1.9%, 미기압파의 경우 1.2% 저감되는 것을 확인함

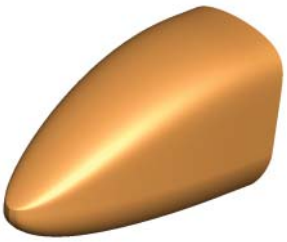
(2) 설계공간 확장형 모델의 최적설계 (최적설계 #2)

○ 다음 그림은 설계공간 확장형 모델의 다목적 최적설계를 통해 도출된 파레토 최적해임. B로 표시된 부분이 최적설계의 기본형상인 공기저항 저감 최적형상이고 아래쪽의 보라색 점들의 집합이 파레토 프론트로 불리는 다목적 최적해들의 집합임

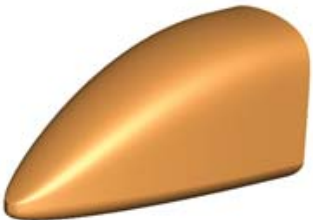
○ 각 목적함수별로 가장 저감율이 높은 형상들을 우선 검토함. 그림들의 1번은 측력계수가 가장 저감된 형상이고 2번은 미기압파가 가장 저감된 형상임. 최적설계 결과 1번 형상은 측력계수가 4.8% 저감되었고 미기압파는 1.3% 저감됨. 반면 2번 형상은 미기압파는 4.1% 저감되었으나, 측력계수는 오히려 2% 증가함. 원점에서의 최소거리 파레토 프론트 해인 3번 형상은 측력계수는 1.4%, 미기압파는 3.6% 저감됨. 앞선 전두부 길이가 고정된 첫 번째 최적설계의 프로세스에서 채택했던 호남고속선 형상인 4번 최적 형상은 측력계수의 경우 3.5%, 미기압파의 경우 2.3% 저감되는 것을 확인함



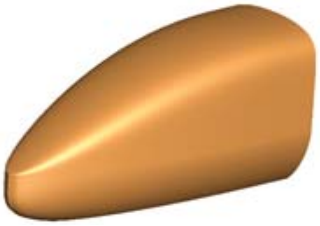
<파레토 최적해 (최적설계 #2)>



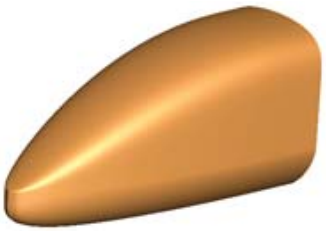
B. 설계기본형상



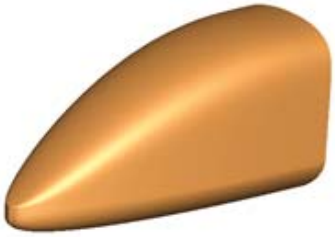
1. 측력계수 최대저감 형상



2. 미기압파 최대저감 형상



3. 접선위치 형상



4. 호남고속선 비율형상

<설계기본형상과 파레토 최적형상 (최적설계 #2)>

○ 설계기본형상과 최적형상들을 비교하면, 앞선 첫 번째 최적설계의 경우와 같이 측력계수 저감율이 최고인 1번 형상의 경우 전두부 끝단의 높이가 낮게 나타나고, 미기압파 저감율이 최고인 2번 형상은 하단의 곡률이 크게 나타나면서 전두부 끝단의 형상이 뭉툭하게 나타남

(3) 전산수치해석을 통한 최적형상 성능 평가

○ 최적설계 1과 2의 각각 도출된 네 종류의 최적형상에 대해 수치해석을 통해 공력성능을 검토함. 각각의 공력성능 결과를 설계기본형상에 대한 변화율로 비교하여 다음의 표에 나타냄. 대부분 최적형상에 의한 변화율이 최적설계 프로세스를 통해서 나타난 결과와 수치해석을 통해서 나타난 결과가 비슷한 수치를 보여주는 것을 확인함. 또한 2번 최적형상의 측력계수가 증가하는 부분도 똑같이 보여줌. 공기저항계수도 모두 저감되어 제약조건을 어기지 않는 것으로 나타남. 근사모델이 실제의 형상모델의 공력성능이나 형상변화에 따른 경향성을 비교적 정확하게 나타내고 있어 근사모델 자체의 정확도가 좋은 것으로 판단됨

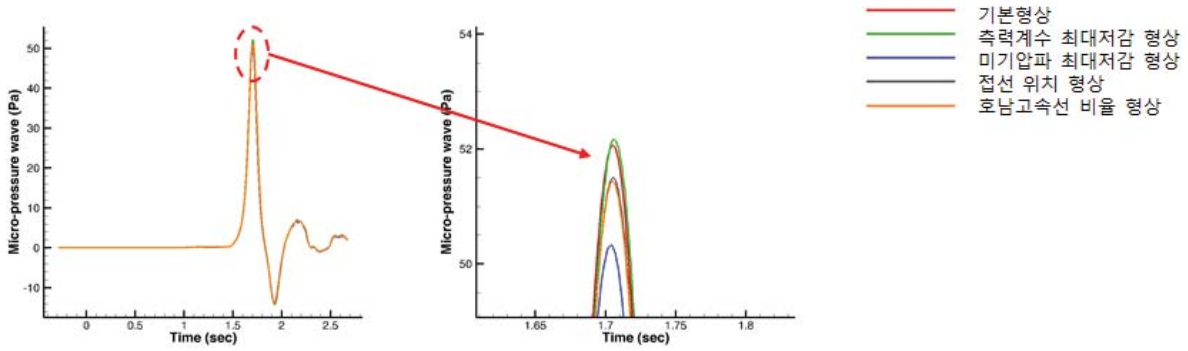
<최적설계#1의 최적형상 수치해석 결과 비교>

	측력계수 변화율		미기압파 변화율		공기저항계수 변화율
	최적설계 결과	수치해석 결과	최적설계 결과	수치해석 결과	수치해석 결과
최적형상 1	-3.6%	-5.5%	-0.1%	-0.2%	-0.4%
최적형상 2	+2.7%	+1.6%	-2.4%	-3.3%	-2.4%
최적형상 3	-2.2%	-3.3%	-1.1%	-1.1%	-1.0%
최적형상 4	-1.9%	-3.0%	-1.2%	-1.2%	-1.3%

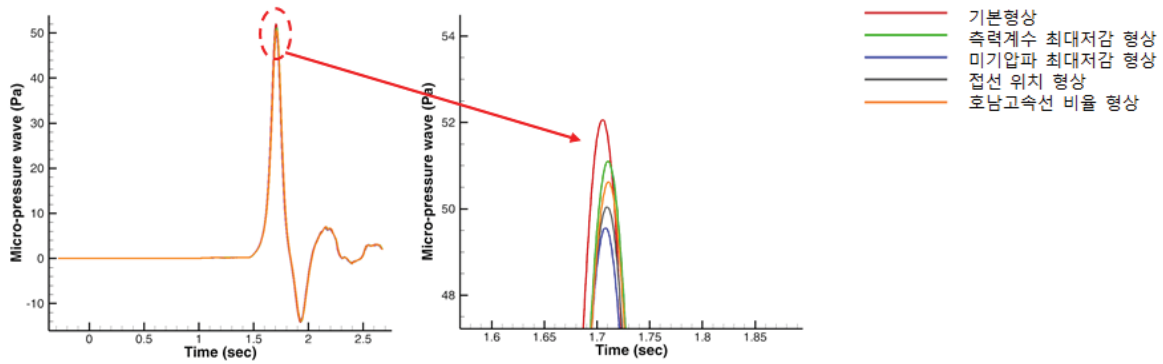
<최적설계#2의 최적형상 수치해석 결과 비교>

	측력계수 변화율		미기압파 변화율		공기저항계수 변화율
	최적설계 결과	수치해석 결과	최적설계 결과	수치해석 결과	수치해석 결과
최적형상 1	-4.8%	-5.2%	-1.3%	-1.8%	-2.1%
최적형상 2	+2%	+1.6%	-4.1%	-4.8%	-4.2%
최적형상 3	-1.4%	-1.2%	-3.6%	-3.9%	-4.1%
최적형상 4	-3.5%	-3.6%	-2.3%	-2.7%	-3.1%

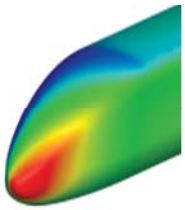
○ 다음의 그림들은 최적설계 1과 2의 설계기본형상과 최적형상들의 미기압파 그래프임. 미기압파 최대값은 설계기본형상의 경우에 가장 크게 나타나고 2번 최적형상의 경우가 가장 저감율이 좋은 것 역시 확인 가능함



<최적설계#1의 설계기본형상과 최적형상들의 미기압파 해석 결과>



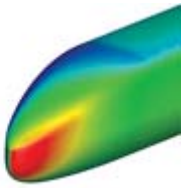
<최적설계#2의 설계기본형상과 최적형상들의 미기압파 해석 결과>



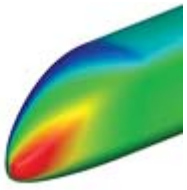
B. 설계기본형상



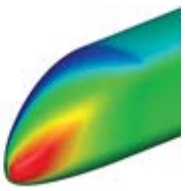
1. 측력계수 최대저감 형상



2. 미기압파 최대저감 형상

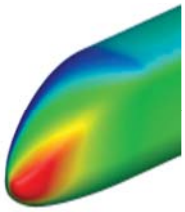


3. 접선위치 형상

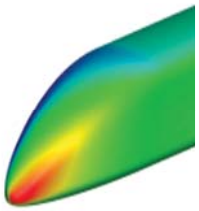


4. 호남고속선 비율형상

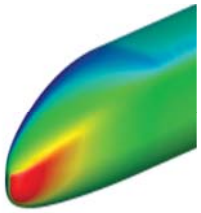
<설계기본형상과 최적형상들의 측풍해석결과 선두차량 압력컨투어 비교 (최적설계 #1)>



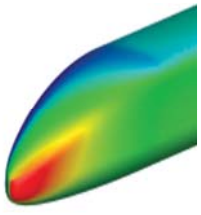
B. 설계기본형상



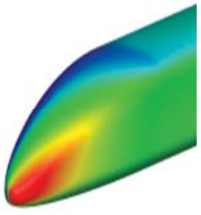
1. 측력계수 최대저감 형상



2. 미기압파 최대저감 형상



3. 접선위치 형상



4. 호남고속선 비율형상

<설계기본형상과 최적형상들의 측풍해석결과 선두차량압력 컨투어 비교 (최적설계 #2)>

○ 최적설계 1과 2의 설계기본형상과 최적형상들의 측풍 상황에서의 선두차량의 압력 컨투어를 위의 그림에 비교함. 그림에 보이는 열차의 측면이 측풍이 유입되는 방향임. 첫 번째 최적설계와 두 번째 최적설계 모두 측력계수가 저감되는 형상들인 1, 3, 4의 최적형상들은 고압영역이 설계기본형상에 비해 작게 나타나는 것을 확인함. 반면 측력계수가 증가했던 2번 최적형상은 고압영역이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있음

3. 고속열차 차체 공기저항 저감기술 개발

가. 고속열차 공기저항 상세검토

(1) KTX-산천 구성요소별 공기저항 상세검토

○ KTX-산천의 공기저항을 분석하기 위하여 10량 1편성 열차의 구성요소를 다음 그림과 같이 선두차, 후미차, 중간객차(8량), 대차(13개), 판토그래프로 구분하고, 개활지 주행속도 350km/h에 대하여 3차원 전산해석을 수행하여 KTX-산천의 공기저항을 계산함



<공기저항 분석을 위한 KTX-산천 구성요소 구분>

○ KTX-산천의 구성요소별 공기저항 분포를 다음 표에 제시함. 각 구성요소별 공기저항은 선두차와 후미차가 각각 23%, 20%, 중간객차 8량은 47%, 대차 13기는 10%임. 공기저항이 가장 많이 나타나는 구성요소는 중간객차로 보여질 수 있지만, 단위구성요소, 즉, 중간객차 1량의 공기저항은 약 5.9%로 선두차 23%, 후미차 19%에 이어 세 번째로 높게 나타남

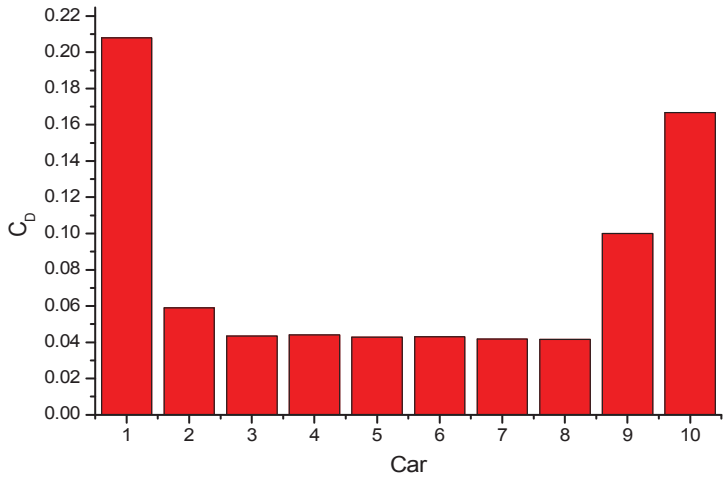
<KTX-산천의 구성요소별 공기저항 분포(투영면적:10m^2)>

구성요소	공기저항계수	공기저항분포(%)	압력/점성저항 비
선두차	0.22	23	6
후미차	0.19	20	7
중간객차(8량)	0.45	47(5.9)	1
대차(13기)	0.10	10(0.8)	39
총합	0.96	100	3

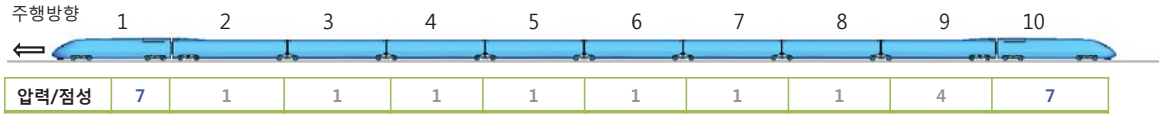
※괄호안은 단위구성요소의 값을 의미함

○ 한편, 압력/점성저항 비는 구성요소의 압력저항과 점성저항의 비로 그 값이 크면 압력저항을 대상으로, 그 값이 작으면 점성저항을 대상으로 공기저항 저감기법을 적용해야 함. 표에 나타난 압력/점성저항비는 판토그래프와 대차에서 높은 값이 나타나는데 이는 판토그래프와 대차 등의 구조물을 유선형으로 설계 시 압력/점성저항 비의 저감 효과가 크게 나타날 수 있음. 하지만, 각 구성요소들이 전체 공기저항에서 차지하는 비중이 크지 않기 때문에 공기저항 저감효과는 크지 않을 것으로 예상됨. 반면 선두차와 후미차에서는 공기저항분포가 크기 때문에 압력저항이 저감하여 공기저항 저감효과를 얻을 수 있을 것으로 판단됨

○ 각 차량별 공기저항 분포와 압력/점성저항 비를 다음 그림에 나타냄. 중간객차 중에서 2번 객차와 9번객차가 다른 객차에 비해 상대적으로 크게 나타나며, 이는 해당 차량에서 압력저항이 증가하기 때문에 나타나는 현상임



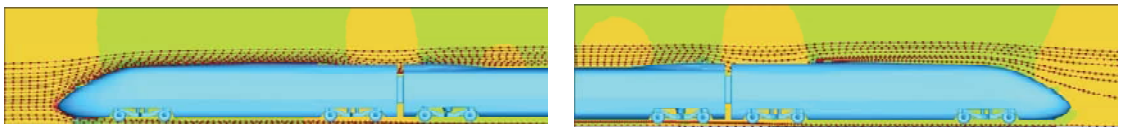
<각 차량별 공기저항 분포>



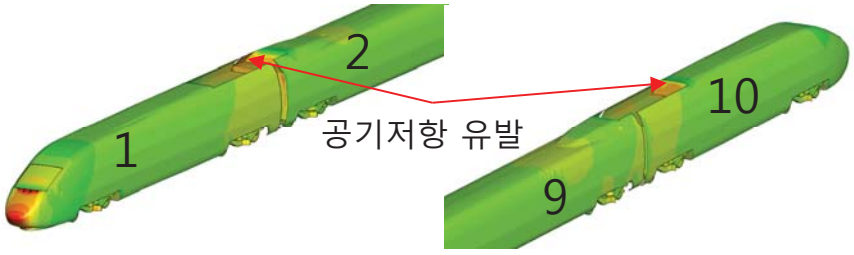
압력/점성	7	1	1	1	1	1	1	1	4	7

<각 차량별 압력/점성저항 비 분포>

○ 2번객차와 9번객차의 공기저항 증가요인을 분석하기 위하여 선두차와 후미차 주변의 유선 및 압력분포를 다음 그림에 도시함. 그림 (a)의 유선을 살펴보면 선두차 상부를 지난 유선이 2번객차 상부에 영향을 미치고, 9번객차에서는 상부유동이 상단커버를 지나 후미차 판토그래프 영역 단벽에 수직으로 유입됨. 이로 인해, 그림 (b)와 같이 2번객차와 9번객차 그리고 후미차 상부 표면압력이 높게 나타나며, 그 결과 해당 압력분포가 공기저항으로 나타남



(a) 선두차와 후미차 상부 유선분포



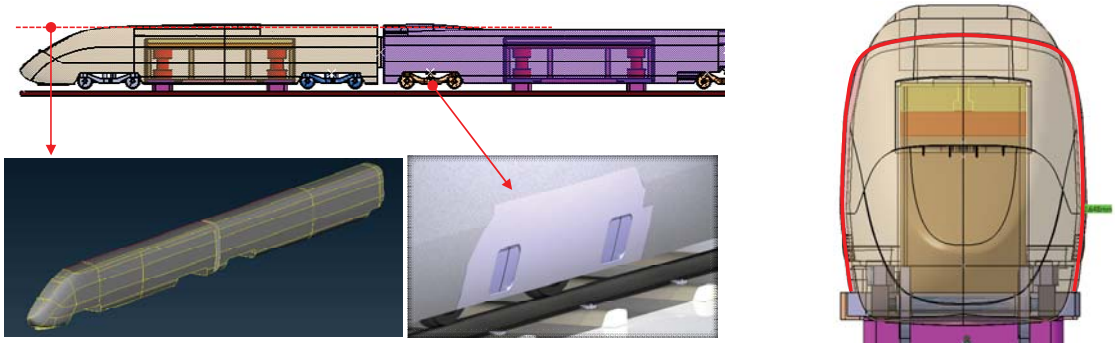
(b) 선두차와 후미차 주변 표면압력 분포

<2번객차와 9번객차의 공기저항 증가요인>

나. 공기저항 저감형 선두차 형상도출

(1) 동력차 형상변경에 따른 공력평가

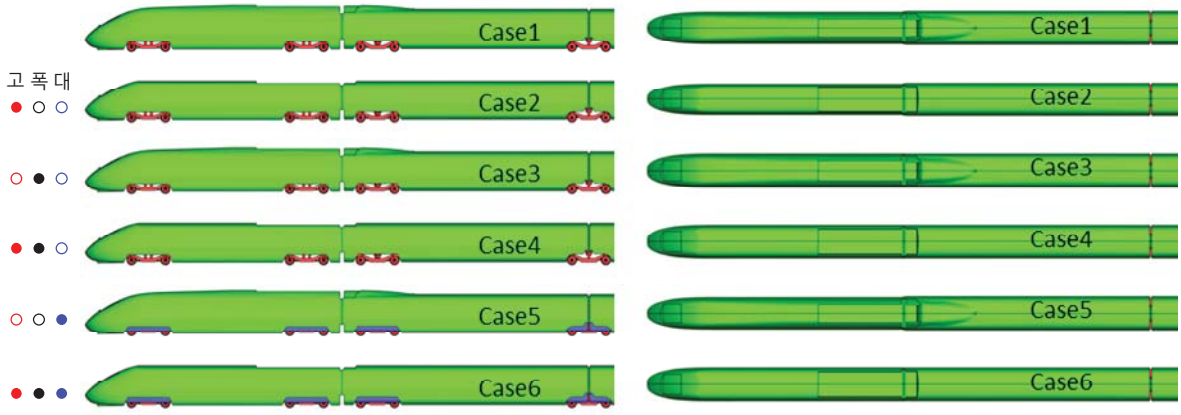
○ KTX-산천의 공기저항을 가장 효율적으로 저감키는 방법은 공기저항을 증가시키는 형상 요소를 제거하거나 고속유동에 노출되는 돌출부 등을 제거하는 방법임. 이러한 공기저항을 저감할 수 있는 형상변경 요소들을 표시하면 아래 그림과 같음. 먼저, 선두차와 객차의 상부단차 제거, 측면 대차커버 적용 그리고 선두차/객차의 측면단차 제거임



(a) 선두차/객차의 상부단차제거 (b) 측면 대차커버 적용 (c) 선두차/객차의 측면단차제거

<공기저항 저감을 위한 KTX-산천 형상변경 요소>

○ KTX-산천의 형상변경에 따른 공기저항변화를 검토하기 위하여 다음 그림과 같이 총 6가지의 해석조건을 설정함



<KTX-산천의 형상변경 해석모델>

○ 다음 표들은 각각 Case별 형상변경을 설명한 표와 각각의 차량치수 및 동력차 투영면적을 정리한 표이며, 비교대상 Case별 형상 비교를 그림에 나타냄

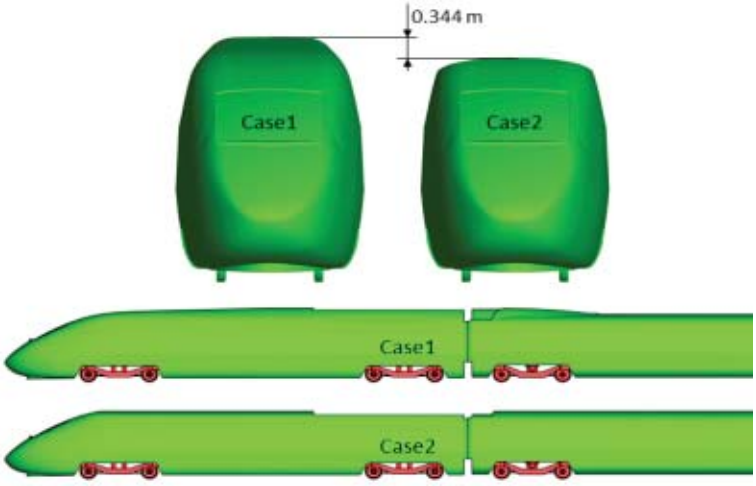
○ Case1은 현 KTX-산천 형상에 대한 것으로 형상변경모델의 공기저항 저감평가를 위한 기준모델이고 Case2는 동력차 즉, 선두차와 후미차의 높이를 0.344m 낮춰서 2번객차와 9번객차의 차고를 일치시킨 모델임. 그리고 Case3은 동력차의 폭을 0.164 확대시켜 객차와의 차폭을 일치시킨 모델이며, Case4는 동력차와 객차의 차고와 차폭을 모두 일치시켜 단차를 없앤 모델임. Case5는 기준모델인 Case1에서 대차커버를 적용한 모델이며, Case6은 Case4에서 대차커버를 적용한 모델임

<공기저항 저감효과 검토를 위한 형상변경모델 설명>

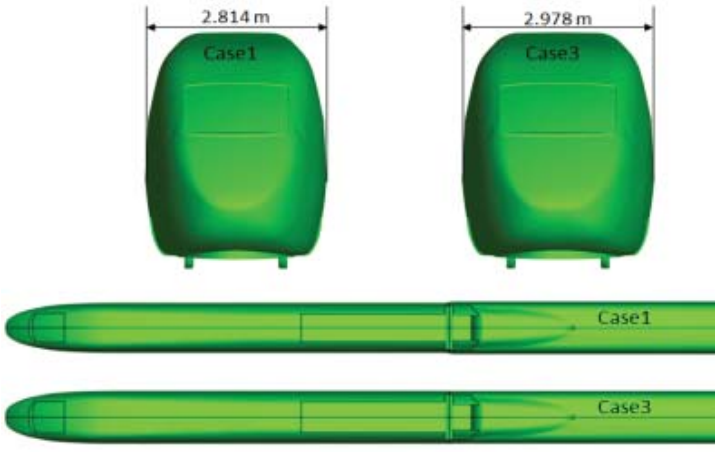
Case	설명
1	현 KTX-산천 형상에 대한 기준모델
2	동력차/객차의 차고를 일치시킨 모델
3	동력차/객차의 차폭을 일치시킨 모델
4	동력차/객차의 차고와 차폭을 일치시킨 모델
5	기준모델에서 대차커버를 적용한 모델
6	Case4에서 대차커버를 적용한 모델

<각 Case별 차량치수 및 동력차 투영면적>

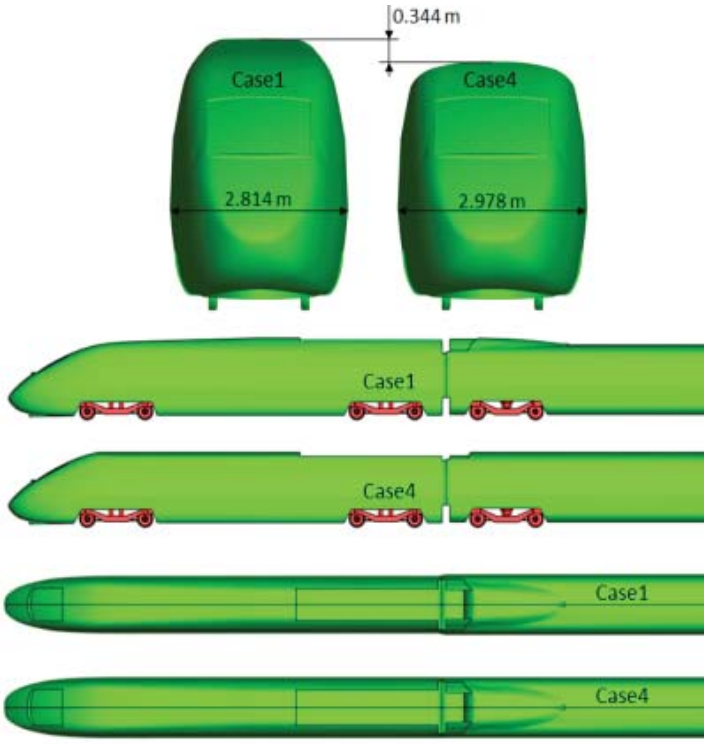
Case	동력차 폭 X 높이 (m)	2번객차 폭 X 높이 (m)	동력차 투영면적 (m^2)
1	2.81 X 4.02	2.98 X 4.02	10.30
2	2.81 X 3.68	2.98 X 3.68	9.62
3	2.98 X 4.02	2.98 X 4.02	10.48
4	2.98 X 3.68	2.98 X 3.68	9.70
5	2.81 X 4.02	2.98 X 4.02	10.30
6	2.98 X 3.68	2.98 X 3.68	9.70



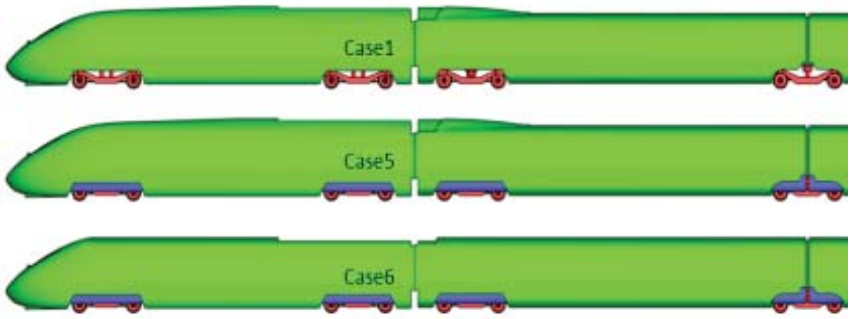
<Case1과 Case2의 형상비교>



<Case1과 Case3의 형상비교>



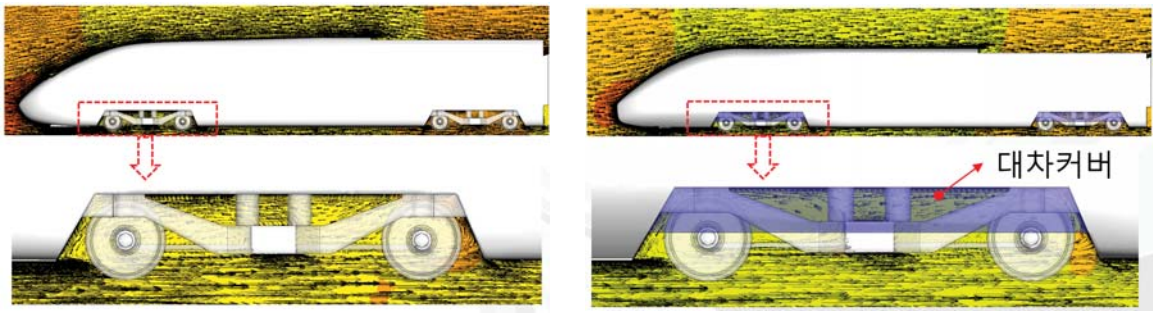
<Case1과 Case4의 형상비교>



<Case1, Case5, Case6의 형상비교>

○ 대차커버의 적용이 대차 주요부품(제동디스크, 액셀박스 등)의 냉각성능에 미칠 수 있는 영향에 대한 검토 결과

- 대차영역에서 나타나는 대차커버 적용 전/후 공기유동흐름은 동일하게 나타남을 확인함
- 대차주요부품들은 대부분 공냉방식이기 때문에 대차커버가 적용되더라도 대차 주요부품의 냉각성능에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상됨



(a)대차커버 적용 전(현재) (b)대차커버 적용 후

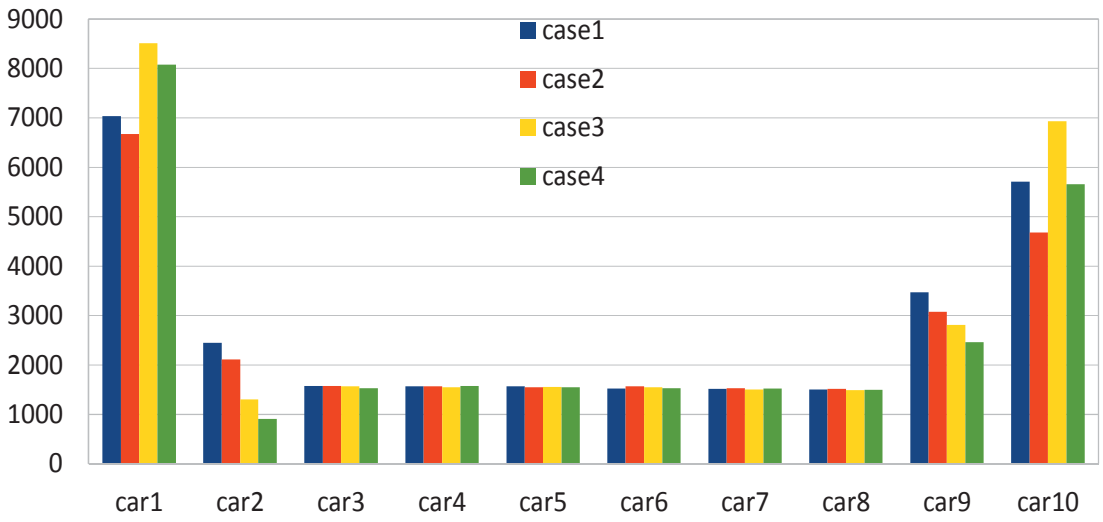
<대차커버 적용 전/후에 따른 대차영역 공기유동 분석>

○ 전산해석을 통해 6가지 형상변경모델의 항력계수를 비교하면 다음 표와 같음. 기준모델 Case1과 Case2를 비교하면 Case2의 공기저항이 Case1에 비해 약 7% 저감함. 즉, 동력차의 차고를 0.344m 낮춰 2번객차와 일치시키면 공기저항이 약 7%로 감소함. 이에 반해, 동력차의 차폭을 0.164m 확대한 Case3은 약 3% 증가하는 것으로 나타남. 결국, 동력차의 차고를 낮추고, 차폭을 확대하더라도 Case4와 같이 전체 공기저항은 5% 저감하는 것으로 나타남. 그리고 대차커버를 설치한 Case5는 기준모델 Case1에 비해 공기저항이 약 8% 저감됨. 전체적으로 차고 축소, 차폭 확대, 대차커버 적용을 통해 최고 약 15%까지 공기저항이 낮아질 것으로 예상됨

<KTX-산천 형상변화에 따른 공기저항 변화>

Case	형상변경 요소	공기저항 저감	저감효과(%)
1	현재 KTX-산천	0.96	0
2	동-객 차고 일치	0.89	7
3	동-객 차폭 일치	0.99	-3
4	차고/차폭 일치	0.91	5
5	대차커버 적용	0.88	8
6	차고, 차폭, 대차커버	0.82	15

○ 각 동력차 형상에 따른 차량별 공기저항 분포를 다음 그림에 제시함. 동력차형상이 변경됨에 따라 각 차량에서 나타나는 공기저항의 변화는 역시 주로 car1, car2, car9, car10에서 민감하게 나타남. 해당 차량을 제외한 차량(car3~8)에서는 공기저항 변화를 일으키는 요소가 없기 때문에 모두 동일하게 나타남



<각 형상별, 차량별 공기저항 분포>

(2) 고속열차 유선형화를 위한 열환경 분석

(가) 고속열차 열환경 분석 필요성

① 고속열차 동력실 내 주요 전장품과 냉각시스템

○ 고속열차의 동력실은 차량에 추진력을 공급하기 위한 다양한 전장품으로 구성됨

○ 고속열차는 전장품을 통하여 전기에너지를 동력에너지로 변환하며, 이 때 발생하는 에너지 손실은 열에너지로 전환되어 전장품의 발열을 야기함

② 고속열차 동력실 내 발열량 검토의 필요성

○ 동력실 내 전장품 냉각시스템에 따른 차량 단면적의 증가로 주행저항 및 에너지소비량이 증가됨

○ 고속열차의 에너지 효율 향상을 위해서는 동력실 내 발열량의 정확한 평가/해석 및 이에 맞는 냉각시스템의 최적화를 통한 동력차량의 단면적 축소가 필요함

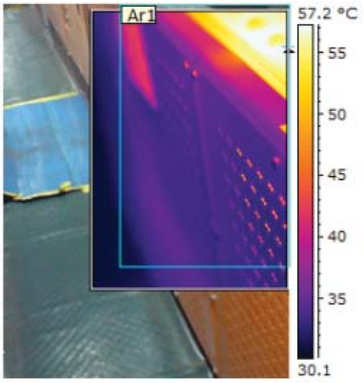
○ KTX-산천 및 KTX-호남 열차의 동력실 내 전장품의 이론적인 발열량을 제시하고, 이를 열해석을 위한 기초자료로 활용함



<KTX-산천/호남 동력실 내 주요 전장품 발열량 평가>

(나) 고속열차 전장품 발열특성 측정

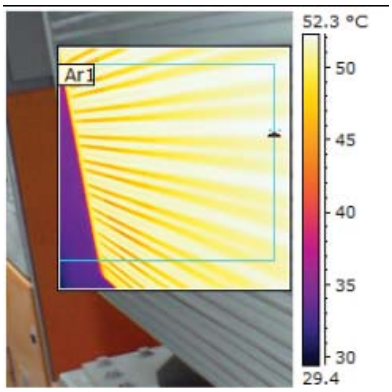
① 동력차 적외선 열 측정 결과



<주변압기 1 적외선영상>

<주변압기 1 측정결과>

Date	2014-07-01
Filename	IR_2014-07-01_0019.jpg
이미지 시간	9:41:05 오전
Ar1 최고 온도	57.6 ° C



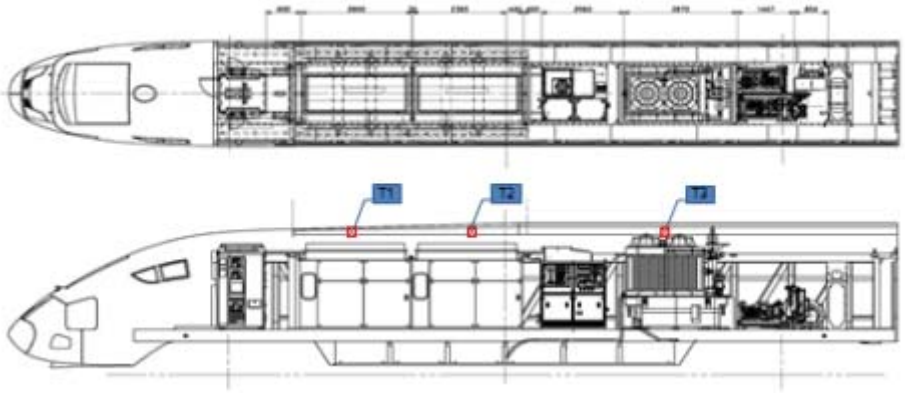
<주변압기 1 적외선영상>

<주변압기 1 측정결과>

Date	2014-07-01
Filename	IR_2014-07-01_0021.jpg
이미지 시간	9:41:24 오전
Ar1 최고 온도	52.3 ° C

* 변압기중 최고 온도로 57.6℃ 확인됨

② 동력차 발열특성 측정



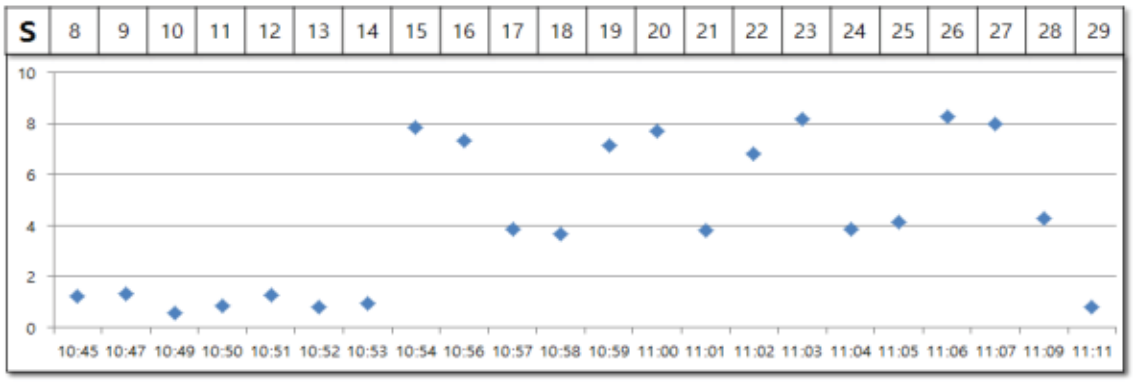
〈동력차 상부 센서설치 위치〉



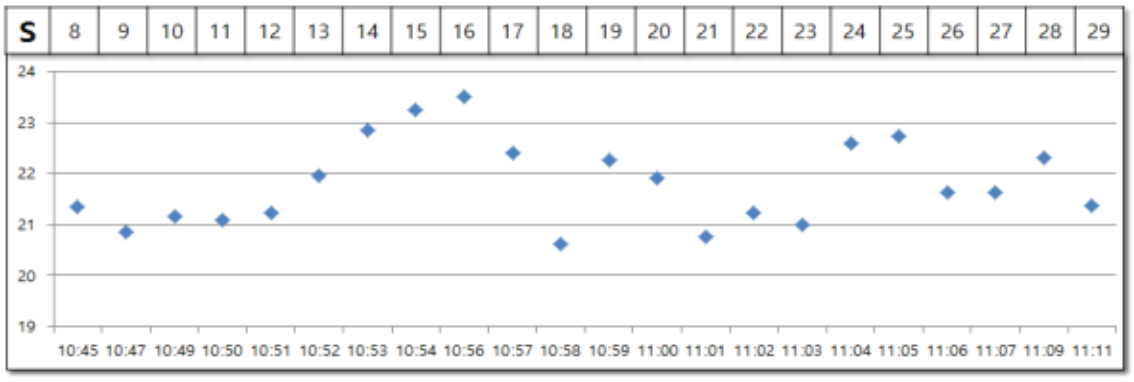
〈동력차 상부 센서〉



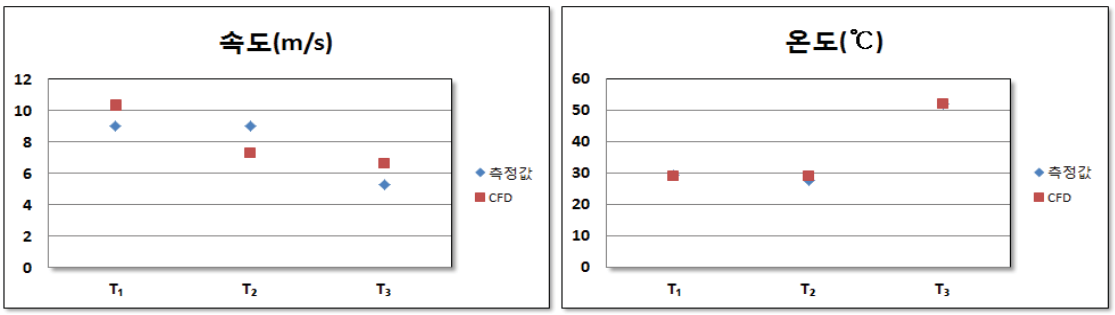
〈동력차 내부벽면 온도 측정〉



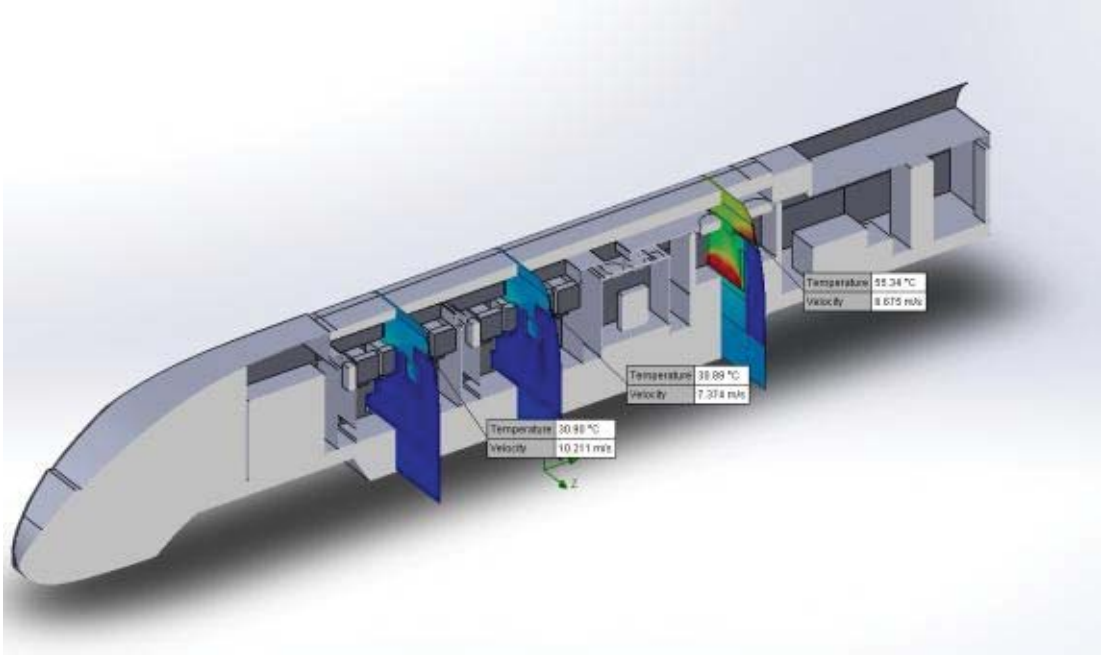
〈이동형 장치를 이용한 속도 [m/s]〉



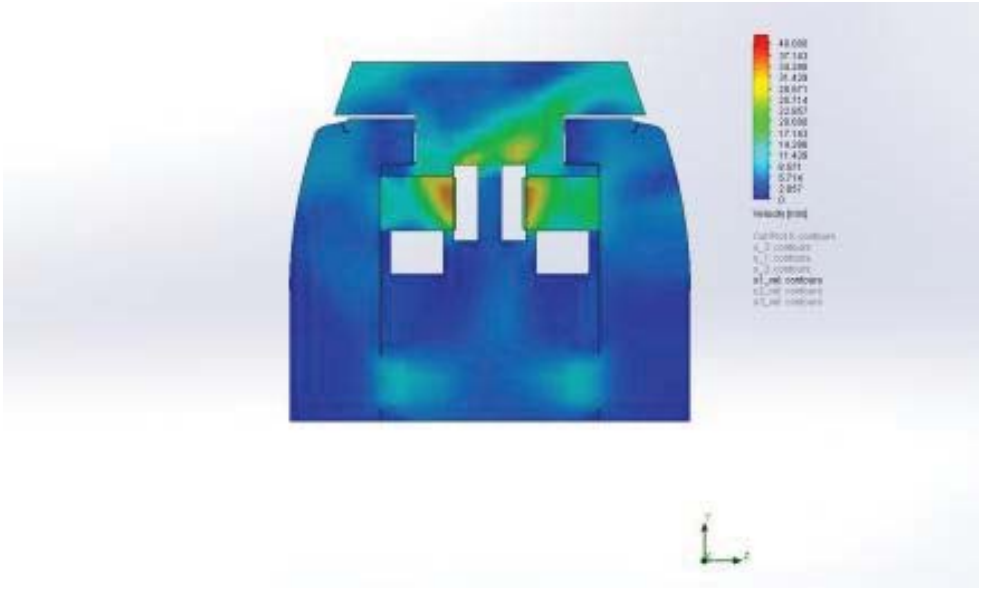
〈이동형 장치를 이용한 온도 [℃]〉



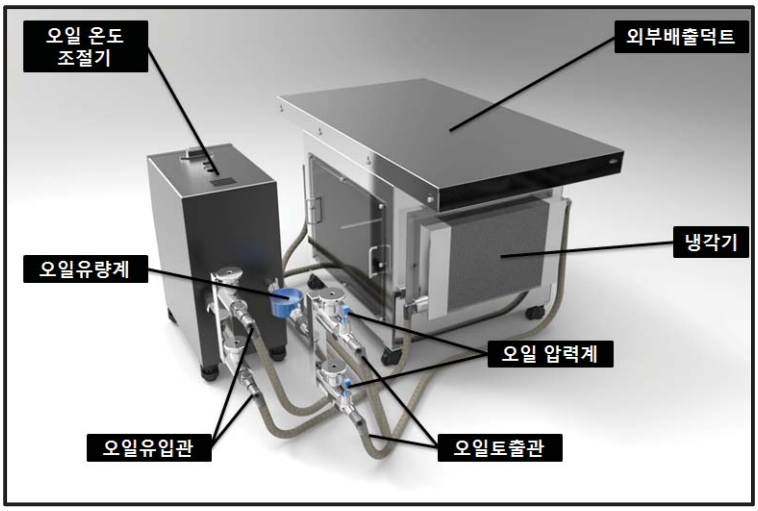
<T1, T2, T3 지역 온도/속도 분포>



<해석결과와 측정값 비교분석 위치>



<T1 속도섹션>



<주변압기 축소모형장치 후면>

○ KTX 동력차의 각 전장품 발열량을 추정하기 위해 CFD 해석 수행

○ 외부 환경 및 동력차 내부 유동 경계조건은 측정 데이터를 활용

○ 열차 운행중 290 ~ 300 km의 운행 조건에 해당하는 데이터를 평균

○ 전장품의 Fan 성능은 비슷한 용량을 가지는 Fan의 성능곡선을 가정하여 경계조건으로 사용

○ 데이터는 10분간의 데이터를 평균하여 사용
- 측면그릴의 공기 유입량은 경계조건
- 상부 외부유출 그릴의 값은 CFD 해석결과 값과 비교분석 값으로 활용

○ 경계조건 중 발열량은 앞서 계산한 이론 발열량 값을 사용하여 실험결과와 비교

○ 최종적으로 실제 전장품의 발열량을 추정

○ 해석결과
- 모터블록의 경우 이론 발열량의 70%가 발생함
- 보조블록의 경우 모터블록과 마찬가지로 이론발열량의 70%가 발생함
- 주변압기의 경우 이론 발열량의 90%가 발생함

<KTX 동력차 전장품 이론발열량 및 CFD 추정 발열량>

모터블록 발열량	이론값	: 192,000[W]
	CFD 추정값	: 134,400[W]
보조블록 발열량	이론값	: 21,340[W]
	CFD 추정값	: 14,938[W]
주변압기 발열량	이론값	: 310,000[W]
	CFD 추정값	: 279,000[W]

(다) 결론

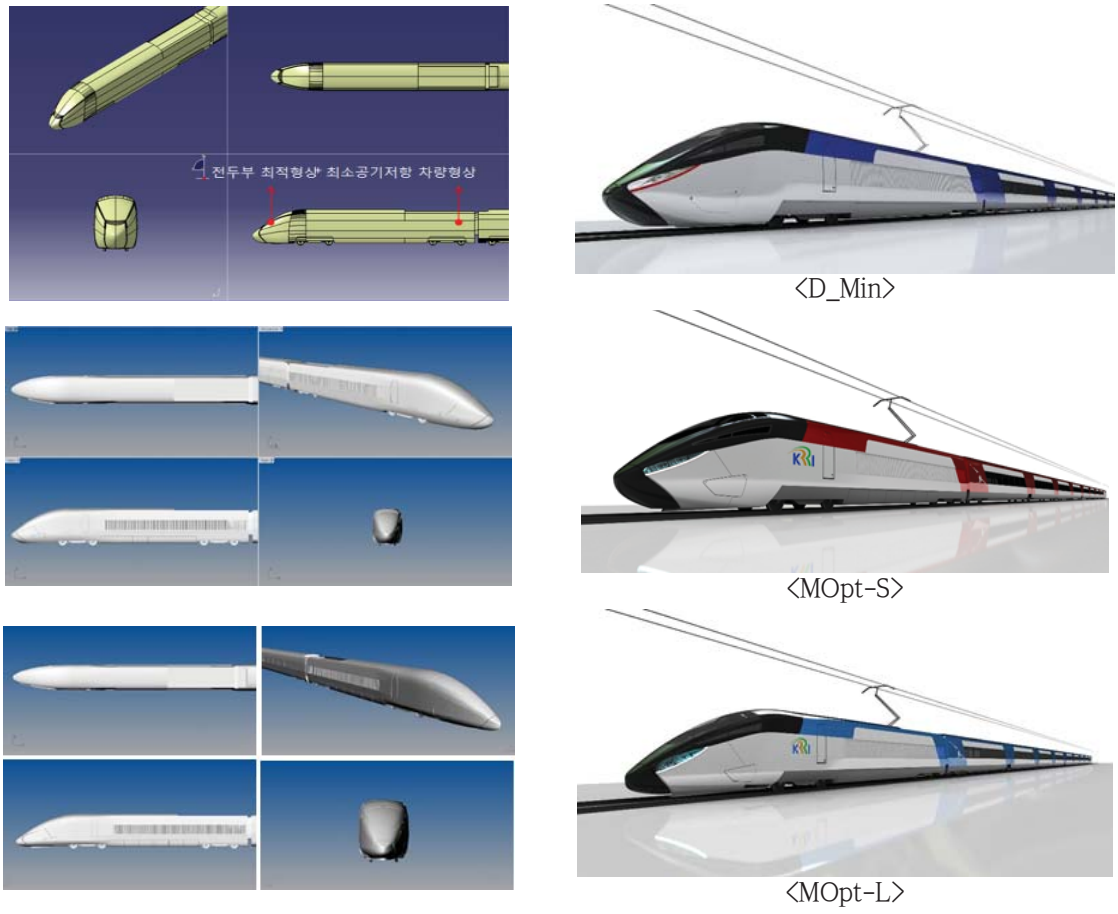
○ 본 연구에서는 동력차의 단면축소를 위한 방안 도출을 위하여 실차시험에 대한 열환경 계측 시험을 수행하였음. 계측된 결과를 경계조건으로 KTX-산천 동력차에 대한 열환경 전산해석 및 축소모형 실험을 통해 차량 높이변화, 주변압기 냉각시스템의 용량 변화에 따른 냉각성능을 분석함. CFD 해석 및 축소모형 실험 분석결과 고속열차 동력차 높이 총 축소량은 0.42m로 분석되었으며, 후드 상부덮개(냉각성능과 무관한 외관)이 0.34m, 본 연구에서 해석 검증된 외부토출덕트 축소량 0.08m로 분석 및 검증되었음

4. 최적설계 편성열차 공력 성능평가 및 공기저항 저감기술 검증

가. 최적설계 편성열차 공력성능 평가

(1) 최적설계 편성열차 모델

○ 최적설계된 편성열차 형상은 총 3종으로 다음 표에 명칭과 모델 설명을 나타냄. 본 과제에서 최종적으로 제안하는 모델은 MOpt-S로서, KTX-산천 보다 전두부가 약 1m 길어지는 반면, 국내 주행환경을 고려하여 공기저항, 미기압파, 강풍안정성의 공력성능이 보다 향상된 형상임



<D_Min>

<MOpt-S>

<MOpt-L>

<최적설계 전두부 형상 모델>

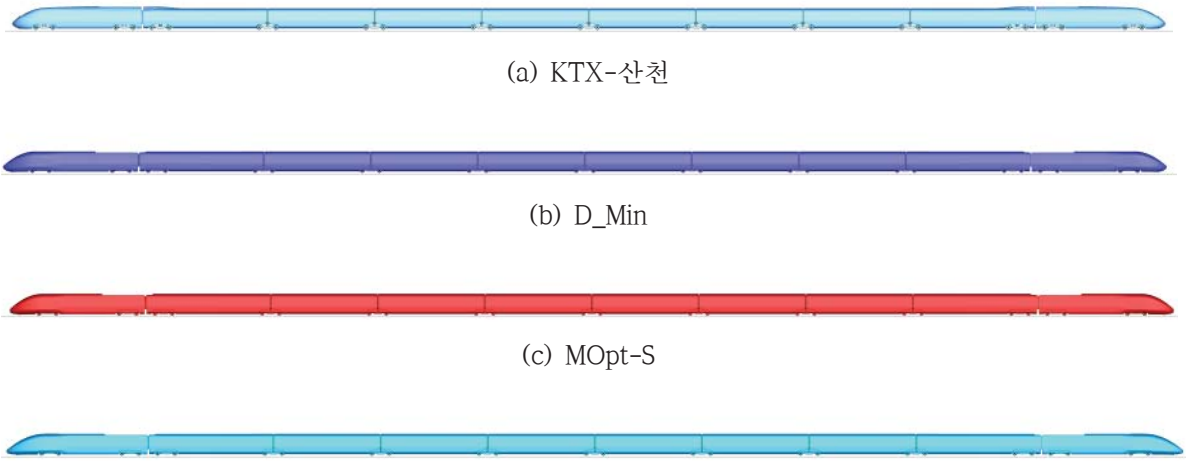
<최적설계 전두부 형상>

모델명	모델 설명 및 특징	목적함수
D_Min	· KTX-산천 형상을 기반으로 최소공기저항 편성열차 · KTX-산천 내 전두부 기기배치 및 시야각 고려 · KTX-산천 전두부 대비 약 1m 증가	공기저항
MOpt-S (최종 제안모델)	· D_Min 형상 기반 다목적(강풍안정성, 미기압파) 최적설계 편성열차 · KTX-산천 전두부 대비 약 1m 증가 · 350km/h 고속열차로 KTX-산천 개량시 가장 적합	공기저항, 미기압파, 강풍안정성
MOpt-L	· D_Min 형상 기반 다목적(공기저항, 강풍안정성, 미기압파) 최적설계 편성열차 · KTX-산천 전두부 대비 약 2m 증가 · 공기저항 저감율 가장 높지만, KTX-산천 개량에 상대적으로 불리함	공기저항, 미기압파, 강풍안정성

(2) 전산해석적 방법

(가) 공기저항

○ 최적설계 편성열차에 대한 전산해석적 공력성능 평가를 위해 각 형상에 대한 전산해석 모델을 구성함. 전산해석모델은 모두 10량 1편성으로 구성하였고, 주행속도는 350km/h로 설정함



(a) KTX-산천

(b) D_Min

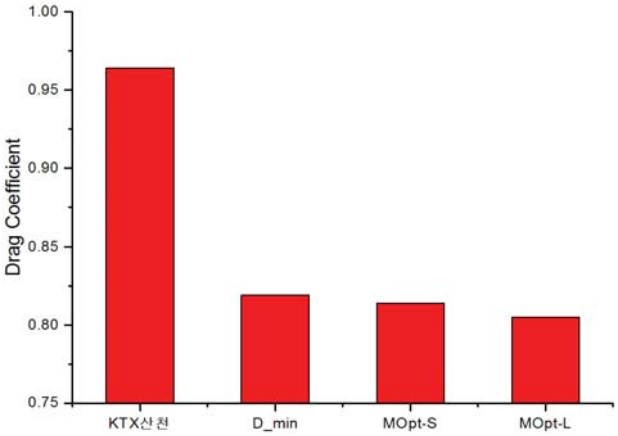
(c) MOpt-S

(d) MOpt-L

<공력성능 평가를 위한 전산해석 모델>

○ 전산해석 결과, 각 모델별 편성열차의 공기저항계수를 다음 그림 및 표에 나타냄. KTX-산천(0.964)을 기준으로 설계된 모델의 공기저항계수를 살펴보면, D_Min 형상은 0.819, MOpt-S 형상은 0.814, MOpt-L 형상은 0.805로 계산됨

○ 따라서, KTX-산천 대비, D_Min, MOpt-S, MOpt-L의 공기저항 저감율은 각각 15.0%, 15.6%, 16.6%로 나타남



<설계형상별 공기저항>

	공기저항	저감율(%)
KTX-산천	0.964	-
D_Min	0.819	15.0
MOpt-S	0.814	15.6
MOpt-L	0.805	16.6

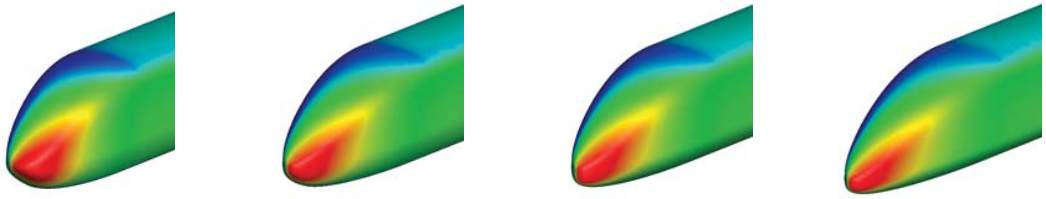
<설계형상별 공기저항 계수 및 저감율>

(나) 강풍 안정성

○ 강풍 안정성은 10량 편성의 유선형 모델의 측력계수로 검토함. KTX-산천 형상에 비해 D_Min은 0.9%, MOpt-S는 3.9%, MOpt-L은 4.5% 저감된 것으로 계산됨. KTX-산천 형상에 비해 D_Min 형상은 강풍 안정성을 향상시키는 최적설계가 이루어지지 않아 거의 변화가 없는 반면, 다목적 최적형상들의 경우 전두부 끝단의 높이가 낮아지면서 측풍의 영향에 덜 민감해지는 것으로 판단됨. MOpt-S에 비해 MOpt-L의 측력계수가 더 작게 나타나 전두부의 길이가 영향을 미치는 것으로 판단됨

<최적형상 강풍안정성 향상 효과>

	KTX-산천	D_Min	MOpt-S	MOpt-L
측력계수	1.275	1.263	1.225	1.217
변화율	-	-0.9%	-3.9%	-4.5%



(a) KTX-산천 (b) D_Min (c) MOpt-S (d) MOpt-L

<최적형상 측풍해석 결과 선두차량 압력 분포 비교>

(다) 미기압파

○ 터널 미기압파는 10량 편성 길이의 축대칭 형상을 이용하여 검토함

○ KTX-산천 형상에 비해 D_Min 형상은 2.8%, MOpt-S는 3.9%, MOpt-L은 5.4% 저감됨. KTX-산천 형상에 비해 최적형상들의 전두부 길이가 길어지면서 대부분 저감되는 것으로 나타남. D_Min 형상에 비해 MOpt-S와 MOpt-L 형상의 하부 면의 곡률이 커지면서 뭉툭한 형태를 형성하여 미기압파의 크기가 추가로 저감되는 것으로 분석됨. 또한 MOpt-S에 비해 MOpt-L의 전두부 길이가 길어진 효과로 인해 터널내 압력파의 파두의 기울기가 줄어들면서 미기압파의 크기가 더 작게 나타나는 것으로 판단됨

<최적형상 미기압파 저감효과>

	KTX-산천	D_Min	MOpt-S	MOpt-L
미기압파(Pa)	53.5	52.1	51.4	50.6
변화율	-	-2.8%	-3.9%	-5.4%

(3) 축소모형 풍동시험

(가) 풍동 및 계측시스템

항목	결과(2 σ)
시험부 크기(m)	4 × 3 × 10
시험 유속(m/s)	1~120 m/s
△q/qo	±0.30%
△Cp/dx	0.002/m
△ α , β	±0.08o, ±0.12o
u'/ V∞	0.07%
v', w'/ V∞	0.12%
△T	±0.3℃

<시험부 제원 및 유질>



<한국항공우주연구원 중형아음속풍동(KARI LSWT)>

○ 최적설계 편성열차의 공기저항 성능평가를 위해 축소모형을 이용한 풍동시험을 한국항공우주연구원이 보유한 중형아음속 풍동에서 수행함. 풍동시험부의 크기는 폭 4m, 높이 3m, 길이 10m 이며, 유속은 1~120m/s까지 가능함. 시험부 내부는 경계층의 성장에 의한 수평 부력효과를 보상하기 위하여 시험부 단면이 점진적으로 증가하도록 tapered corner fillet이 부착됨. 풍동의 main fan은 4,100kW 모터를 사용하고, 12개의 블레이드와 7개의 흐름안정지지부로 구성되어 있으며, 최대 회전수는 387 rpm 임. 시험부 길이는 10 m이며, 시험부 중심에 직경 2.7 m 회전판이 장착됨. 기타 시험부의 주요제원 및 유질은 위의 표와 같음

○ 시험에 사용된 주요 측정변수 및 계측장비는 다음과 같으며, 표에 나타난 정밀도는 제품의 사양에 나타난 정밀도임. 항공우주연구원 중형 아음속 풍동에서 사용하는 기본적인 계측장비는 NEFF471과 HBM으로 풍동운영조건에 관련된 장비는 NEFF471로 측정함

○ 공기저항 계측시스템은 본 과제에서 구축된 정밀계측시스템을 이용하였으며, 공력계측 정밀센서의 주요 기술사양은 다음 표와 같음



<공력계측 정밀센서
ATI MINI40 로드셀>

Sensor Dimension			
Diameter(mm)	40		
Thickness(mm)	12.2		
Material	Stainless steel		
	Fx, Fy	Fz	Mx, My, Mz
Measurement Range(Nm)	±40	±120	±2
Resolution(Nm)	1/100	1/50	1/4000
Analog voltage output(V)			± 10

<공력계측 정밀센서 주요 기술사양>

○ 시험데이터 수집시스템은 공력계측센서 연결모듈, 계측장비와 저장장치 연결, 운영프로그램으로 구성함. 공력계측 센서는 각각의 DAQ Interface PowerSupply Box에 연결되고, 각 DAQ Interface PowerSupply Box는 데이터 수집부와 연결되며 전원은 독립적인 단자로 연결되고, 각 신호 커넥터들은 계측 장비와 연결됨. 아날로그-디지털 변환기의 주요 사양은 다음 표와 같음

<아날로그-디지털 변환기의 주요사양>

모델	NI CompactDAQ	제작사	National Instruments(USA)
모델 섀시	NI cDAQ-9174 1ea	계측모듈	NI 9220 3ea
입력채널	48 아날로그 채널	분해능	16bit
측정전압	±10VDC	샘플링 속도	100 hS/s/ch



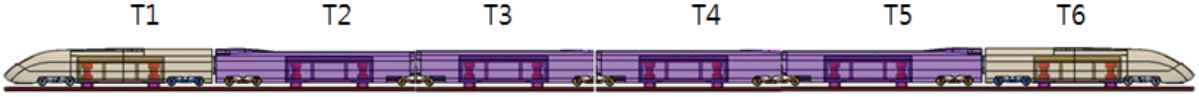
<아날로그-디지털 변환기>

(나) 풍동시험모델

○ 풍동시험모델은 실차 대비 1/30 크기로 축소제작함. 동력차(선두차, 후미차) 및 객차 4량으로 하여 총 6량으로 구성하였으며, 동력차 차량모델은 KTX-산천 형상과 최적설계에서 도출된 전두부 형상을 적용하여 제작함. 시험모델 길이방향 단면적은 약 0.011 m^2임

<풍동시험모델 차량별 길이(단위:m)>

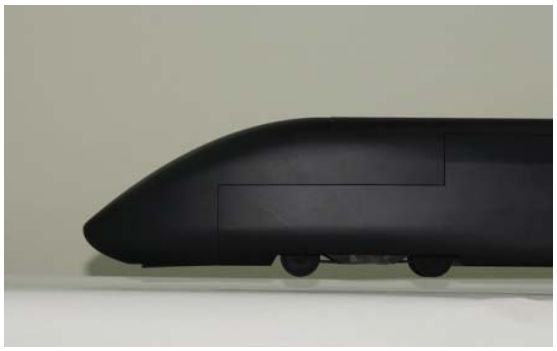
T1	T2	T3	T4	T5	T6	Total
0.795	0.725	0.627	0.627	0.725	0.795	3.667



<풍동시험모델 구성도>



(a) KTX-산천



(b) D_Min



(c) MOpt-S

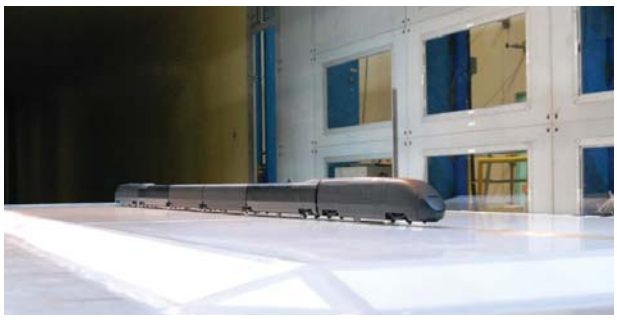


(d) MOpt-L

<풍동시험모델 전두부 형상>

○ 공력 하중을 측정하기 위한 6분력 센서를 각 차량에 설치하고, 차량은 모델 고정판이 시작되는 지점부터 1,200mm 위치한 곳에 전두부 앞단이 위치하도록 설치함. 차량의 주행 방향 정렬은 레이저와 표시된 중심선을 이용하여 일직선이 되도록 수행하였으며, 각 차량에 설치되어있는 센서 케이블은 모델 고정판의 셀서 케이블 통로에 설치되어 계측시스템에 연결됨

○ 시험부 바닥면 경계층의 영향을 줄이기 위해 폐쇄형 시험부 지상판 시스템을 설치함. 지상판 시스템은 폭 4m, 길이 7m이며, 앞단은 타원형상을 가지고 있고, 후방에는 상/하부 압력차 조정을 위한 플랩(flap)이 설치됨. 지상판 상/하부의 압력차를 실시간으로 확인할 수 있도록 지상판 상/하부에 총 8개의 압력 센서를 부착함. 지상판은 모델설치 및 변경 편의성을 고려하여 시험부 바닥면에서 482mm 위치에 설치함



<6량 풍동시험모델>

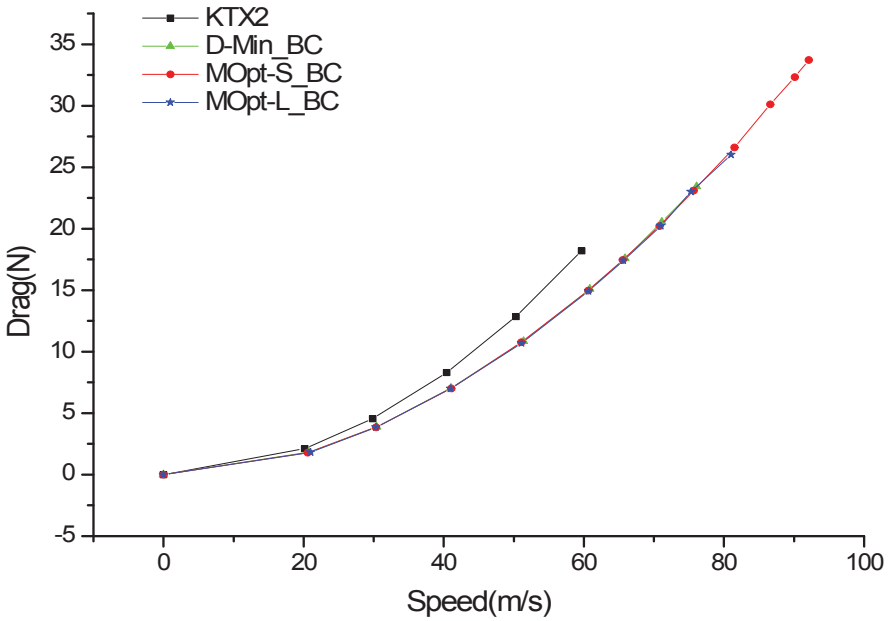


<항공우주연구원 풍동에 설치된 시험모델>

○ 철도차량 모델은 지상판 상부에 모델 고정판을 설치한 후, 위의 그림과 같이 시험베드 위에 설치함. 시험베드의 크기는 길이 6,600mm, 폭 4,000mm, 높이 65mm 이고, 지상판의 평판이 시작되는 지점, 즉 타원 앞전이 끝나는 지점에 설치함

(다) 풍동시험 결과

○ 시험모델별 공기저항 변화를 시험한 결과를 다음 그림에 제시함. 최적설계된 형상의 공기저항 그래프가 모든 속도영역에서 기준모델인 KTX-산천보다 낮게 나타남. 따라서, 모든 최적설계 모델은 KTX-산천 보다 낮은 공기저항이 유발됨



<시험모델별 공기저항 변화>

○ 시험모델별 공기저항 저감율을 다음 표에 제시함. 6량 시험모델 기준으로 KTX-산천, D_Min, MOpt-S, MOpt-L의 공기저항계수는 각각 0.77, 0.65, 0.63, 0.63으로 나타나며, 10량으로 환산 시, 각각 1.09, 0.94, 0.92, 0.92로 계산됨

○ 각 시험모델의 공기저항 저감율은 6량 기준으로 15.3%, 18.0%, 18.3% 이며, 이를 10량으로 환산 시, 각각 13.7%, 15.7%, 15.8%임

<시험모델별 공기저항 저감율>

No.	시험모델	시험모델 6량		시험모델 10량 환산	
		공기저항계수	저감율(%)	공기저항계수	저감율(%)
1	KTX-산천	0.77	-	1.09	
7	D_Min	0.65	15.3	0.94	13.7
10	MOpt-S	0.63	18.0	0.92	15.7
9	MOpt-L	0.63	18.3	0.92	15.8

나. 공기저항 저감기법 성능 검증 및 보완

○ 공기저항 저감기법의 성능을 검증하고 보완하기 위해 다음과 같은 시험모델에 대해 풍동 시험을 수행함

<풍동시험모델>

No.	시험모델	모델 설명
1	KTX-산천	KTX-산천
2	KTX-산천_IGC	KTX-산천 동력차와 객차 사이에 차간연결막 적용
3	KTX-산천_BC_IGC	KTX-산천_IGC의 모든 대차에 대차커버 적용
4	KTX-산천_BC	KTX-산천의 모든 대차에 대차커버 적용
5	KTX-산천_BC-W	KTX-산천의 모든 대차에 돌출형 대차커버 설치
6	KTX-산천_BC-(T1&T6)	KTX-산천 T1과 T6(동력차)에만 대차커버 설치
7	D_Min_BC	KTX-산천 형상을 기반으로한 최소공기저항 편성열차
8	D_Min-1_BC	D_Min_BC에서 동력차의 폭을 객차 폭과 일치
9	MOpt-L_BC	D_Min 형상 기반 다목적(공기저항, 강풍안정성, 미기압파) 최적설계 편성열차
10	MOpt-S_BC	D_Min 형상 기반 다목적(강풍안정성, 미기압파) 최적설계 편성열차
11	MOpt-S_BC_H	MOpt-S_BC에서 KTX-산천 높이와 동일하게 변경
12	MOpt-S_BG	MOpt-S_BC에서 대차커버 제거

※ IGC(Inter-car Gap Cover):차간연결막 BC(Bogie Cover):대차커버
BC-W:돌출형 대차커버 BG(Bogie):대차
T1: 1번차량(선두 동력차) T6:6번차량(후미 동력차)

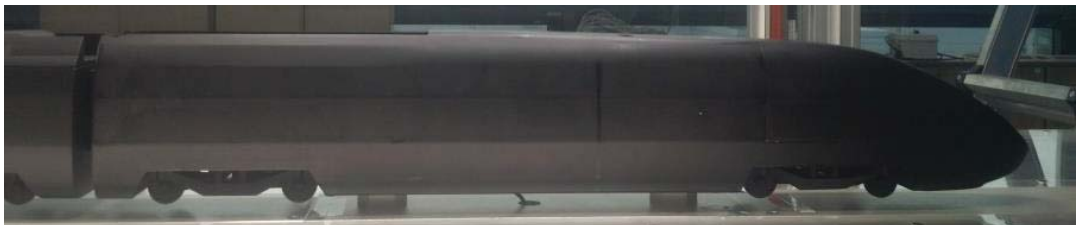
(1) 전두부 최적설계를 통한 동력차 공기저항 저감기술 검증 및 보완

(가) 전두부 최적설계 공기저항 저감 효과

○ 전두부 최적설계를 통한 공기저항 저감효과 검증을 위해 4_KTX-산천_BC와 11_MOpt-S_BC_H 모델의 시험결과를 비교함. 다음 표와 같이 두 비교모델은 전두부 형상을 제외하고 나머지 형상은 동일함

<최적설계 전두부 공기저항 저감 효과 비교 모델>

No.	시험모델	설명
4	KTX-산천_BC	KTX-산천에 대차커버 적용
11	MOpt-S_BC_H	최적설계 전두부에 대차커버를 적용한 후, KTX-산천 높이와 동일하게 변경



(a) 1_KTX-산천



(b) 4_KTX-산천_BC



(c) 11_MOpt-S_BC_H

<KTX-산천형상과 최적설계 전두부 형상>

<최적설계 전두부 공기저항 저감효과>

No.	시험모델	시험모델 6량		시험모델 10량 환산	
		공기저항계수	저감율(%)	공기저항계수	저감율(%)
1	KTX-산천	0.77	-	1.09	-
4	KTX-산천_BC	0.71	7.3	1.00	8.1
11	MOpt-S_BC_H	0.67	13.3	0.95	12.3

○ 4_KTX-산천_BC의 공기저항계수는 0.71이며, 10량 환산 시 공기저항 계수는 1.00으로 예상됨. 반면 11_MOpt-S_BC_H의 공기저항 계수는 0.67이며, 10량 환산 시 공기저항 계수는 0.95로 예상됨. 따라서, 최적설계 전두부 형상(MOpt-S)은 약 4~5%의 공기저항 저감효과가 있는 것으로 분석됨

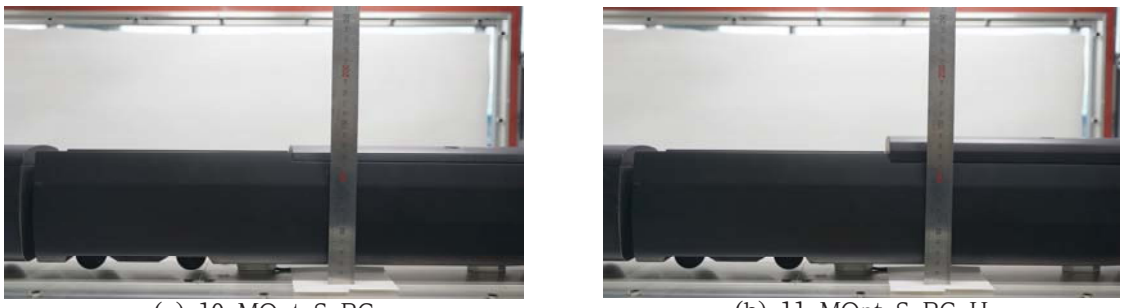
(2) 차체 공기저항 저감기법 성능 검증 및 보완

(가) 동력차 높이 변화에 따른 공기저항 변화

○ 1, 2차년도 동력차 냉각성능 평가를 통해 동력차 높이를 축소할 수 있는 가능성을 확인함. 본 절에서는 최적설계 편성열차에서 차량제작 상황에 따라 동력차 높이 증가 시 공기저항의 변화 범위를 검토하였으며, 이를 위하여 최적설계 편성열차 모델(10_MOpt-S_BC)과 현재 KTX-산천 동력차 높이와 동일하게 변경한 모델(11_MOpt-S_BC_H)의 공기저항을 비교함

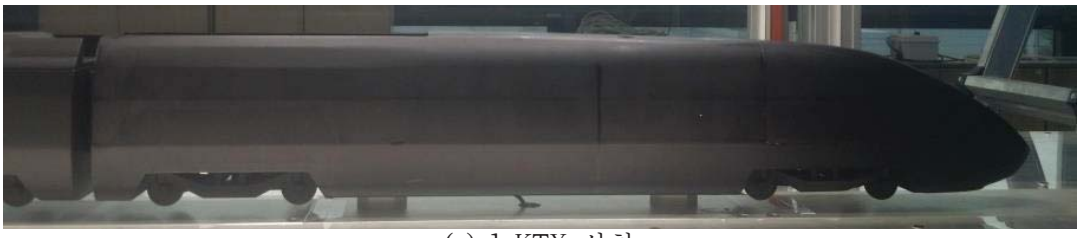
<동력차 높이 변화 시험모델>

No.	시험모델	설명
10	MOpt-S_BC	최적설계 편성열차
11	MOpt-S_BC_H	최적설계 전두부에 대차커버를 적용한 후, KTX-산천 높이와 동일하게 변경



(a) 10_MOpt-S_BC　　(b) 11_MOpt-S_BC_H

<MOpt-S_BC 동력차 시험모델의 높이 변화>



(a) 1_KTX-산천



(b) 10_MOpt-S_BC



(c) 11_MOpt-S_BC_H

<동력차 높이 변화 시험모델>

○ 최적설계 편성열차 10_MOpt-S_BC와 KTX-산천 동일 높이 모델 11_MOpt-S_BC_H의 공기저항을 비교한 결과 동력차 높이 축소를 통해 약 4~5% 수준의 공기저항이 저감된 것을 확인함. 동력차 높이 변화에 따라 최적설계 편성열차의 공기저항 저감율은 최소 12%에서 최대 16% 범위로 나타남

<동력차 높이 변화에 따른 공기저항 변화>

No.	시험모델	시험모델 6량		시험모델 10량 환산	
		공기저항계수	저감율(%)	공기저항계수	저감율(%)
1	KTX-산천	0.77	-	1.09	-
10	MOpt-S_BC	0.63	18.0	0.92	15.7
11	MOpt-S_BC_H	0.67	13.3	0.95	12.3

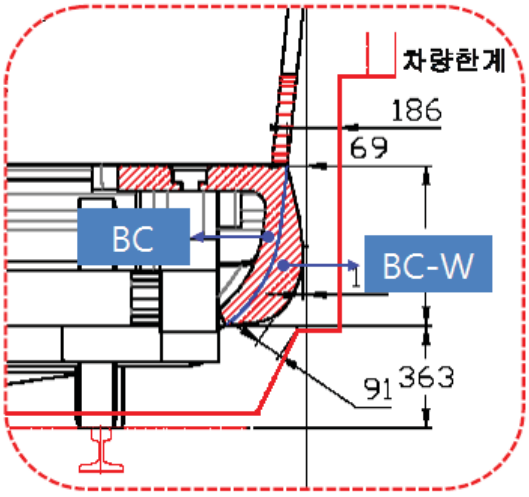
(나) 대차측면커버 적용방법 및 형상에 따른 공기저항 저감효과 변화

○ 1차년도, 2차년도 연구결과를 통해 대차측면커버의 공기저항 저감효과를 확인함. 본 연구에서는 대차측면커버를 설치하였을 때, 대차의 간섭 효과, 유지보수의 편의성 및 설치방법 등에 따른 공기저항 저감효과를 검토하였음

○ 대차측면커버의 저감효과 비교를 위한 모델인 4_KTX-산천_BC, 5_KTX-산천_BC-W, 6_KTX-산천_BC-(T1&T6)의 설명을 다음 표에 제시함

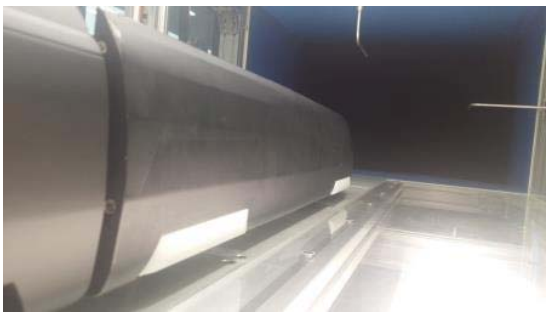
<대차측면커버 적용 시험 모델>

No.	시험모델	설명
4	KTX-산천_BC	KTX-산천의 모든 대차에 대차측면커버 설치
5	KTX-산천_BC-W	KTX-산천의 모든 대차에 돌출형 대차측면커버 설치
6	KTX-산천_BC-(T1&T6)	KTX-산천 T1과 T6(동력차)에만 대차측면커버 설치





(a) BC



(b) BC-W

<대차측면커버 형상종류 및 적용방법>

○ 대차측면커버(BC)의 형상은 앞의 그림과 같이 차량측면의 형상 레이아웃을 따라 덮는 구조임. 하지만 유지보수를 용이하게 하고 대차와 부속구조물과의 간섭에 대비하여 도출된 돌출형 대차측면커버(BC-W)는 차량한계와 약 91mm 이격된 구조로 설계됨

○ 모든 대차에 측면커버를 적용한 4_KTX-산천_BC의 경우, KTX-산천과 비교했을 때 시험모델(6량) 기준 약 7%, 10량 환산시 약 8%의 공기저항 저감효과가 예상됨. 반면 돌출형 대차측면커버를 적용한 5_KTX-산천_BC-W의 경우, 시험모델(6량) 기준 약 6%, 10량 환산시 약 5%의 공기저항 저감효과가 예상됨. 대차커버를 적용했을 때 가장 효과가 클 것으로 예상되는 동력차에만 대차측면커버를 적용한 6_KTX-산천_BC-(T1&T6)의 경우, 시험모델(6량) 기준 약 3%, 10량 환산시 약 2%의 공기저항 저감효과가 예상됨. 따라서, 대차측면커버(BC)에 의해 약 7~8%, 돌출형 대차측면커버(BC-W) 적용시 약 5~6% 그리고 동력차만 적용 시, 약 2~3%의 공기저항이 저감될 것으로 예상됨



(a) 1_KTX-산천



(b) 4_KTX-산천_BC



(c) 5_KTX-산천_BC-W



(d) 6_KTX-산천_BC-(T1&T6)

<대차측면커버 적용 시험모델>

<대차측면커버 형상 및 적용방법에 따른 공기저항 변화>

No.	시험모델	시험모델 6량		시험모델 10량 환산	
		공기저항계수	저감율(%)	공기저항계수	저감율(%)
1	KTX-산천	0.77	-	1.09	-
4	KTX-산천_BC	0.71	7.3	1.00	8.1
5	KTX-산천_BC-W	0.72	6.0	1.03	5.2
6	KTX-산천_BC-(T1&T6)	0.75	2.9	1.07	2.0

(다) 동력차 차간연결막 공기저항 저감효과

○ 동력차와 객차사이에 연결막구조를 적용하여 차간 공동부를 없앤 경우에 대해 공기저항의 변화를 검토함. 시험모델 2_KTX-산천_IGC은 동력차와 객차 사이에 차간연결막을 설치한 형상임

<차간연결막 적용 시험모델>

No.	시험모델	설명
2	KTX-산천_IGC	KTX-산천 동력차와 객차 사이 차간연결막을 설치하여 공동부 제거



(a) 1_KTX-산천



(b) 2_KTX-산천_IGC

<차간연결막 적용 시험모델>

○ 차간연결막을 적용한 시험모델 2_KTX-산천_IGC의 경우, 시험모델(6량) 기준 0.7%, 10량 환산시 0.5%로 공기저항 저감효과가 미약한 것으로 나타남

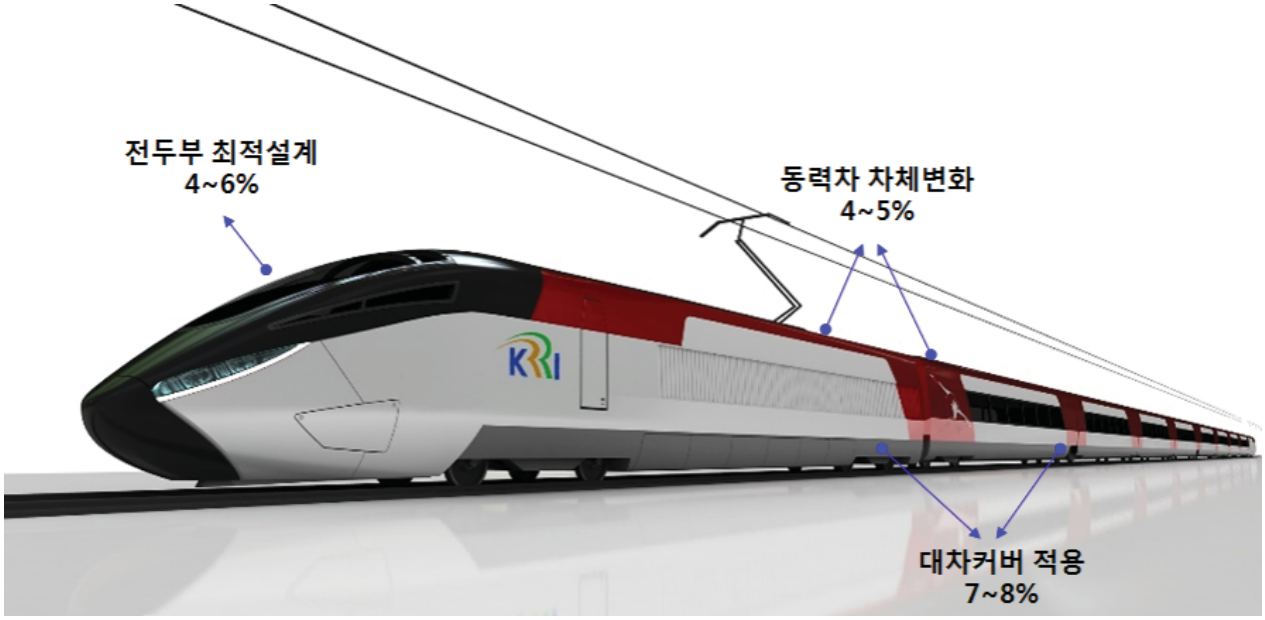
<차간연결막 적용에 따른 공기저항 변화>

시험모델		시험모델 6량		시험모델 10량 환산	
		공기저항계수	저감율(%)	공기저항계수	저감율(%)
1	KTX-산천	0.77	-	1.09	-
2	KTX-산천_IGC	0.76	0.7	1.08	0.5

(라) 고속열차 공기저항 저감기술 적용 및 효과 검증

○ 고속열차 공기저항 유발요소에 대해 공기저항 저감기술을 적용하여 각각에 대한 효과를 정리하면, 다음과 같음

- 전두부 최적설계 4~6%의 저감효과
- 동력차 차체변화 4~5%의 저감효과
- 대차커버 적용 7~8%의 저감효과



<공기저항 저감기술 적용에 따른 공기저항>

(마) 고속열차 공력성능 향상에 따른 에너지비용 절감효과 검토

○ 공력성능 향상을 통해 얻을 수 있는 에너지비용 절감효과는 운영속도 350km/h 기준 연간 약 86억원 수준으로, KTX-산천이 운행되는 총 25년의 기간으로 환산 시 약 2,162억원의 에너지비용 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 예상됨

<고속열차 공력성능 향상에 따른 에너지비용 절감효과 비교>

속도	소비전력[1]	사용요금[2]	1회 운행 요금[3]	소비전력 절감효과	전력요 금절감	1일 운행 횟수[4]	1일 절감 비용	1년절감 비용	25년절감 비용
(km/h)	kWh	원/kWh	원 (400km 기준)	소비전력 (%)	원/편도1 회	전국편도 기준	만원	억원	억원
300	7,916	133	1,052,828	5.5	57,906	384	2,224	**81**	**2,029**
350	9,665	133	1,285,445	4.8	61,701	384	2,369	**86**	**2,162**

- 소비전력[1]:KTX-산천 소비전력량 19.79kWh/km(경부고속선 기준),
  (참고: KTX산천 영업운행 조건 소비전력량 측정 결과보고서(2010.12.17., 한국철도기술연구원))
- 사용요금[2]:KORAIL 전력사용요금 : 133.18원/kWh(고속선 기준)
  (참고 : 2015년도 KORAIL 전철전력월보)
- 1회운행요금[3]: 경부고속선 연장 총 423.8km 참조
- 1일운행횟수[4]: 국내 고속열차 총 운행 편도횟수 384회, 서울, 용산, 수서 <=> 부산, 진주, 포항, 목포, 여수 등(2016년 10월 28일 기준)

(바) 공력성능 향상과 관련 점착력 예상 효과 검토

○ 공력성능 향상과 관련하여 고속열차의 점착력에 미치는 예상 효과를 검토함. 공력 성능에서 점착력과 관계는 양력을 분석하면 점착력에 대한 영향을 파악할 수 있음

○ KTX-산천과 최종 제안형상(MOpt-S) 동력차(선두차, 후미차)의 양력을 수치해석으로 분석하여 아래 표에 제시하였음

○ KTX-산천의 동력차 중량은 약 68,000kg중이며, 350km/h로 주행 시 선두차에서 약 -403kgf, 후미차에 약 -8kgf의 양력이 지면방향으로 발생함. 이는 동력차의 중량 대비 각각 -0.6%, -0.01%로 점찰력을 미소하게 증가시키나, 양력이 차량의 점착력에 미치는 영향은 매우 미미하다고 할 수 있음

○ 같은 방법으로 MOpt-S의 양력을 분석하면, 선두차에서 약 -347kgf, 후미차에서 약 -46kgf의 양력이 지면방향으로 나타나며(즉 점착력을 미소하게 증가시키며), 중량 대비 양력비가 각각 -0.5%, -0.11%로 KTX-산천과 마찬가지로 공력특성(양력)이 점착력에는 영향을 미치지 않는 것으로 분석됨

<고속열차 양력 분석 비교>

차량	중량(kg)	양력(kgf)		양력/중량(%)	
		KTX-산천	MOpt-s	KTX-산천	MOpt-s
1	68,000	-403	-347	-0.6	-0.5
10	68,000	-8	-46	-0.01	-0.11

('-' 부호: 지면방향)

5. 소결론

○ 고속열차의 에너지효율, 친환경성 그리고 강풍안정성을 동시에 향상시킬 수 있는 ‘고속열차 다목적 공력성능 최적설계’ 기술을 개발하고, 국내 최초로 고속열차 편성차량의 형상설계에 적용하였음. 적용대상 고속열차는 KTX-산천으로 크게 ‘전두부 다목적 공력성능 최적설계’ 단계와 ‘공기저항 저감형 차체설계’ 단계로 구분하였음. 먼저 전산해석적 방법을 이용한 공력최적설계 단계를 도입하여 총 3종의 최적설계 후보형상을 도출하였으며, 후보형상들은 최적설계 결과검증 및 공력성능 평가를 위해 1/30 축소모형으로 제작되어 풍동시험을 수행하였음. 풍동시험 결과 최종모델의 공기저항 저감율은 KTX-산천 대비 약 18%로 초기 연구목표였던 공기저항 저감 8% 보다 월등히 높은 공기저항 저감율을 나타냄. 본 기술은 추후 새로운 고속열차 개발 시 공기역학 기반의 공력설계 단계를 적용가능하게 함으로써 우리나라의 고속열차 공력설계 기술을 한 단계 상승시킬 수 있는 원천기술로 활용 가능함

○ 전두부 다목적 공력성능 최적설계
- KTX-산천 전두부 3차원 형상에 대하여 함수기반의 형상정의 기법을 도입하였음
- 5개의 설계변수에 대하여 LHD(Latin Hypercube Design)을 이용 총 30개의 전산실험점을 추출한 후, 각 실험점에 대하여 전산해석을 수행하였으며, 인공신경망기법과 크리깅기법을 이용한 근사모델을 구축하고, BFGS(Broden-Fletcher-Goldfard-Shanno)과 NSGA-II 기법을 적용하여 3가지 목적함수(공기저항, 미기압파, 강풍안정성) 대한 최적설계를 수행하였음. 그 결과 총 3종의 공력성능 최적설계 전두부 형상을 도출하였음
- 공력성능 기반의 전두부 형상 최적설계는 형상변화에 따른 공력성능 예측이 가능하므로 고속성능 및 심미도 향상효과를 동시에 확보할 수 있으며, 설계목적(ex: 공기저항, 미기압파 등)에 따른 전두부 형상을 도출함으로써, 고속열차의 운행환경을 고려한 형상설계가 가능함

○ 공기저항 저감형 차체설계
- KTX-산천에 대한 공기저항 정밀분석 결과, 선두차와 후미차의 공기저항이 23%, 20%로 크게 나타나고, 대차는 압력저항 비율이 매우 크게 나타났음. 따라서 동력차의 폭/높이 변화로 약 7% 공기저항 저감 가능성을 확인하고, 형상변화에 따른 동력차 열환경 적합성을 분석함
- 또한, 대차측면커버를 적용하여 대차 공기저항 저감효과를 정량적 도출하였음. 이와 함께, 차간연결막, 대차커버 적용방법에 따른 공기저항 저감효과를 분석함으로써, 편성열차 차체에 대한 공기저항 설계 결과를 도출하였음
- 전두부 최적설계와 공기저항 저감형 차체설계를 조합하여 총 3종(D_Min공기저항 저감형, MOpt-S, MOpt-L: 다목적 공력성능 최적형상) 공력성능 최적설계 편성열차를 도출하였음. 각 형상에 대해서는 전산해석적 방법을 통해 공기저항 15~16%, 강풍안정성 약 4%, 미기압파 4~5% 저감가능성을 확인함

○ 공력성능 최적설계 검증 및 평가
- 공력성능 최적설계 과정과 도출된 최적형상 성능검증을 위해 한국항공우주연구원(KARI) 중형 아음속풍동을 이용하여 풍동시험을 수행하였으며, 최적설계 형상의 1/30 축소모형을 제작하고 총 12가지 설계형상에 대한 공기저항을 도출하였음
- 풍동시험 결과 도출된 최적설계 형상 모두 KTX-산천 형상에 비해 약 16~18% 수준의 공기저항 효과가 나타남. 또한, 대차커버의 공기저항 저감효과는 약 8%이며, 동력차에만 적용한 경우 약 2%, 돌출형 대차커버 적용 시 약 5%로 분석되었음. 한편, 동력차 차간연결막의 경우 공기저항 저감효과가 미약한 것으로 나타났음

○ 공력성능 향상을 통해 얻을 수 있는 에너지비용 절감효과는 운영속도 350km/h 기준 연간 약 86억원 수준으로, KTX-산천이 운행되는 총 25년 기간으로 환산 시 약 2,162억원의 에너지비용 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 예상됨

제2절 고속 주행안정성 향상 기술개발

1. 고속열차 주행안정성 향상 기술개발 연구 개요

가. 연구 동향 및 배경

○ 국내에서는 최초 고속열차인 KTX 도입 당시에 철도차량의 횡방향 진동이 발생하여 이에 대한 다양한 연구들이 수행되었음

- Kim[11], Lee[12] 등은 KTX 차량의 후미진동을 해석 및 실험적 방법으로 연구하였으며, 후미 횡진동은 차륜 답면구배의 영향을 많이 받는 것을 확인하였음. 차륜 답면 구배를 GV40(1/40)에서 XP55(1/20)로 바꾸었을 때 횡방향 진동이 사라지는 것을 보고하였음
- Lee[13], Chang[14] 등은 ADAMS/RAIL 프로그램을 이용하여 KTX 차량의 사행동 특성에 대해 연구하였으며 후미 진동의 원인은 차륜답면 형상과 2차 횡강성에 의한 것임을 확인하였음
- Kang[15]은 편성 차량수에 따른 후미 불안정 진동의 측정결과가 고유모드 해석시에 나타난 차체의 불안정모드의 진동수와 거의 일치하는 것을 확인하였음

○ 해외에서도 차체 횡방향 진동 저감에 관해 연구한 사례가 있음

- Fujimoto[16] 등은 일본 신칸센 고속열차의 후부 차량이 터널에서 공력이 가해질 때 흔들리는 것을 확인하였고, 시뮬레이션 결과 열차 진행방향으로 차량간 요댐퍼를 설치함으로써 이를 저감할 수 있다는 것을 알았음. 실제 요댐퍼 시제품을 제작하여 차량에 설치해 본 결과 310km/h까지 문제가 없음을 확인하였음
- Huang[17] 등은 중국 고속열차에서 차체의 저주파 횡진동이 승차감을 저해시키는 문제를 일으킴을 확인하였음. 차체 진동을 일으키는 인자들의 영향 고찰을 통해 2차 횡방향 강성, 요댐퍼 등가 강성 및 댐핑 계수가 차체 진동을 일으키는 원인으로 지목되었으며, 요댐퍼의 등가 강성을 낮춤으로써 이 문제를 해결하였음

○ 차륜 마모와 철도차량 진동의 상호 관계에 대한 연구들도 수행되었음

- Hur[18] 등은 고속철도차량의 안정성 및 효율적 유지보수를 위하여 영업중인 고속철도차량을 대상으로 차륜의 마모 특성 분석을 위한 실험적 연구를 수행하였는데, 측정된 차륜의 등가 답면구배는 0.4 미만 임을 확인하였음
- Hur[19] 등은 전동차 차륜에 대한 마모 특성과 차륜의 마모가 차량 진동특성에 미치는 영향을 분석하였는데, 차륜 삭정 후 주행 초기(30,000km 이하)에는 차륜 치수 및 등가답면구배 변화가 심한 직립마모 특성을 보이고 있음을 확인하였음. 또한 누적주행거리가 증가함에 따라 차륜의 마모가 진전되고 그에 따른 차체의 진동 수준은 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인하였음

나. 연구의 필요성 및 추진경과

○ 국내외 고속철도 차량 객실 진동가속도 측정 결과를 아래 표에 나타내었음. EN14373 기준에 기반한 주행거동 항목의 허용한도 기준은 차체 횡방향 가속도 0.5m/s^2, 차체수직방향 가속도 0.75m/s^{2}임. 측정값들은 모두 기준치 이내이나 해외차량과 비교하여 국내차량의 진동값이 큼을 알 수 있음

<국내외 고속열차 차체 진동 측정 결과>

[단위 : m/s^2, Max RMS]

측정 차량	측정구간	횡방향	수직방향	비고
AGV 575	나폴리-로마	0.20	0.30	동력분산식/관절대차
ETR 500	로마-나폴리	0.18	0.24	동력집중식/독립대차
HEMU-430X	광명-대전	0.26	0.37	동력분산식/독립대차
KTX-산천	광명-대전	0.27	0.45	동력집중식/관절대차
KTX	광명-대전	0.13	0.32	동력집중식/관절대차

※ 상기 측정 결과는 영업열차에서 측정된 자료임

○ 세계적인 고속철도 운영 속도 경쟁에 대응하기 위하여 운행속도 300km/h인 KTX-산천을 350km/h로 향상시키기 위해 신규 동력대차(운영속도 350km/h, 설계속도 385km/h) 개발이 필요함. 기존 주행안정성 평가는 차륜 신조상태에서 평가가 실시되어 차륜 마모에 따라 임계속도 저하로 승차감 저하가 발생할 수 있어 마모차륜상태에서도 임계속도가 높은 대차 개발이 필요함

○ 국내 대차 동특성시험기(Roller Rig Tester)의 최고속도는 428km/h이며, 이 속도를 초과하는 임계속도를 가진 고속대차의 임계속도 확인은 불가능함. 따라서, 낮은 속도에서의 시험으로도 높은 임계속도를 예측할 수 있는 시험평가 방법의 개발이 필요함

○ 추진경과

- 1차년도에는 KTX-산천의 주행안정성 향상을 위하여 실제 영업운전 중인 차량에서 차체의 진동수준을 측정하였으며, 누적주행거리에 따른 차륜 마모형상도 측정하였음. KTX-산천 동력차의 해석모델을 작성하여 임계속도에 영향을 미치는 인자들에 대한 고찰을 수행하였고, 주행안정성 및 승차감을 향상시키는 방안을 제시하였음. 또한 신규 개발되는 동력대차의 주행안정성을 시험평가하기 위한 Roller Rig 시험방법의 오차 등을 분석하였고, 이를 고려한 시험절차서를 작성하였음
- 2차년도에는 1차년도 동력차에 이어 KTX-산천 객실의 진동 수준을 측정하였고, KTX-산천 편성에 대한 주행안정성 해석모델을 작성하여 현가장치 최적화를 통한 주행안정성 향상방안을 제시하였음. 신규 개발되는 동력대차 설계안에 대한 검토 및 주행안정성 해석 수행을 통하여 주행안정성 향상 방안을 도출하였음. 시험기의 최고속도를 초과하는 임계속도 시험 방안에 대한 연구를 수행하였음. 아울러 휠과 레일 사이의 점착 특성을 개선하기 위한 마찰재 기초기술 개발에 관한 연구를 수행하였음
- 3차년도에는 신규 개발대차 기본모델에 대한 거시적 관점에서 주행안정성 해석을 수행하였음. 신규 개발대차 설계안에 대해 현가장치 파라미터별 효과를 해석적으로 검토하였으며, 주행장치 설계안에 대해 실궤도 주행안정성 해석을 수행하였음. 또한 기존 주행장치에 대해 Roller Rig 시험데이터와의 비교 보완을 통해 해석의 정확도를 높이는 연구를 수행하였음. 아울러 신규 개발 대차와의 비교데이터 확보를 위하여 기존 대차의 실궤도 Roller Rig 시험도 수행하였음
- 4차년도에는 주행장치 설계 최종안에 대한 해석결과를 Roller Rig 시험결과를 이용하여 실험적으로 보완 및 검증을 수행하였으며, 또한 신규로 개발되는 동력대차에 대한 Roller Rig 주행안정성 시험평가를 수행하였음

다. 연구 목표

○ 고속열차 주행안정성 향상 기술개발
- KTX-산천 대비 임계속도 20% 향상 및 진동가속도 저감을 위한 현가장치 최적화 기술
- 등가감쇠비 변화를 이용한 대차 임계속도 예측 기술

○ 목표설정 근거
- KTX-산천의 운영속도를 350km/h까지 상승시키기 위하여 해석을 통하여 신규 개발 주행장치의 설계 파라미터 설정 방향을 구축하고, 현가장치 최적화를 통한 속도 향상
- 동력집중식 고속열차 진동 저감을 통한 승차감 개선 필요
- 현재 국내 대차 동특성 시험장비는 시험가능 최고속도의 한계가 있으므로, 그 이상의 임계속도를 갖는 대차에 대한 임계속도 예측방법 개발 필요

○ 기존대비 차별성 및 우수성
- KTX-산천은 주행속도 300km/h까지 영업운전 중이나, 개발 기술을 통하여 350km/h까지 주행안정성이 확보되는 주행장치 개발
- 또한, 진동가속도 저감을 통하여 동일 속도에서 동력집중식 고속열차의 승차감 개선 효과 기대
- 임계속도가 시험장비의 최고속도 이상일 때 등가감쇠비 변화 등을 이용한 임계속도 예측이 가능하여 시험비용 및 신규 장비구축비용 저감 효과

<기존기술과 개발기술 비교>

As-is(기존기술)	To-be(개발기술)
(기술수준) - 국내 고속열차(KTX, KTX-산천) 최고운행속도 300km/h - 고속 주행안정성 확보 300km/h 수준 - 신차기반의 주행안정성 평가 기준 보유 - 국내 보유 대차동특성시험기는 428km/h 속도까지 시험 가능 (해외현황) - 고속열차 최고운행속도 350km/h - 고속 주행안정성 확보 350km/h 수준 - UIC, EN, TSI 등 안전성 평가기준 개발 경험 보유	(개발목표) - 국내 주행 데이터 기반 주행안정성 평가모델 개발 (수명주기 고려) · 기존 KTX-산천 진동수준 측정 및 분석 · 영업운행 고속열차 휠 마모 특성 연구 - 고속열차 주행안정성 향상을 위한 현가장치 최적화 기술 개발 · 현가장치 파라미터별 임계속도 영향 분석 · 임계속도 20% 향상을 위한 현가장치 파라미터 도출 · 동일 속도대에서의 진동가속도 저감 효과 - 시험장비 허용 속도 이상에서의 임계속도 예측 기술 개발 · Roller Rig 시험과 실차시험과의 오차 분석 및 보정 방안 연구 · 등가감쇠비 변화를 통한 428km/h 이상 속도에서의 임계속도 예측 기법 개발 및 시험을 통한 검증 (검증방안) - 신규 개발 동력대차에 기술방안을 적용하고, 해석과 Roller Rig 시험을 통하여 기술 검증

2. 주행장치의 헌팅에 대한 안정성 향상 방안 수립

가. 고속차량 운행 데이터를 이용한 주행안정성 수준 분석

(1) 고속차량 주행안정성 수준 파악 및 분석

(가) 개요

○ 1차년도에 고속철도 차량의 후미운전실 진동 특성을 파악하기 위하여 실제 차량의 운행 시 발생하는 진동을 측정하고 분석을 수행함

○ 2차년에는 1차년도 결과에 추가하여 선두운전실, 중간 및 후미객실의 진동을 측정함

○ 측정 차량은 KTX 및 KTX-산천이며, 각 차량의 운행 시 진동측정 시스템을 통해서 차량의 운전실 및 객실 바닥에서 발생하는 진동을 측정하고 분석하여, 차량에 따른 주행거동 특성을 검토하였음

(나) 측정 장비

○ 본 연구에서 수행한 측정시스템의 구체적인 사항은 다음과 같음
- 측정센서 : PCB Piezotronics 사의 가속도계 (Model 3711D1FA3G)를 사용
- 센서전원 공급장치 : PCB Piezotronics 사의 DC 전원공급장치 (Model 478A) 이용
- 데이터 수집 장치 : National Instrument사의 High-Speed USB Carrier
- 데이터 수집 프로그램 : National Instrument사의 Signal Express
- 데이터 분석 : National Instrument사의 DIAdem 프로그램 이용

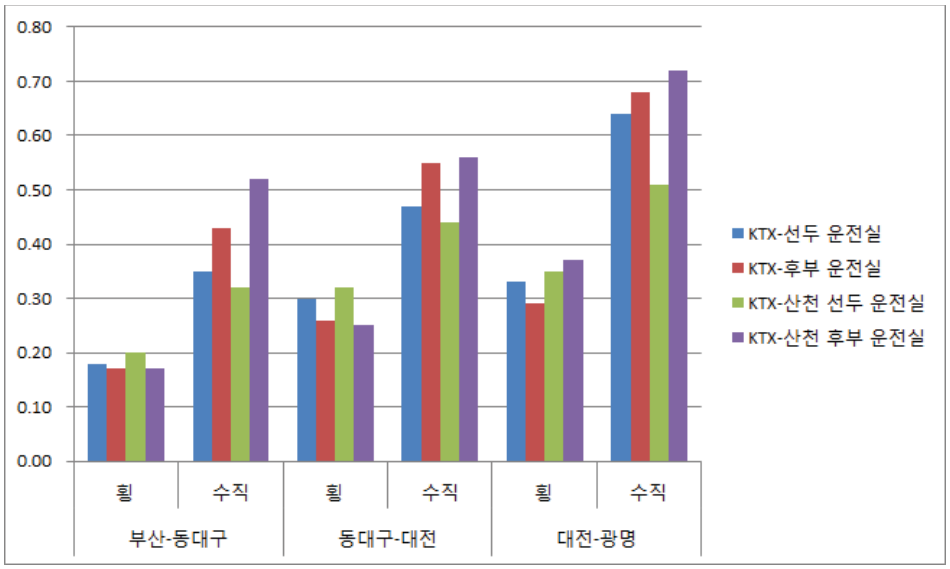


<진동가속도 측정장비>

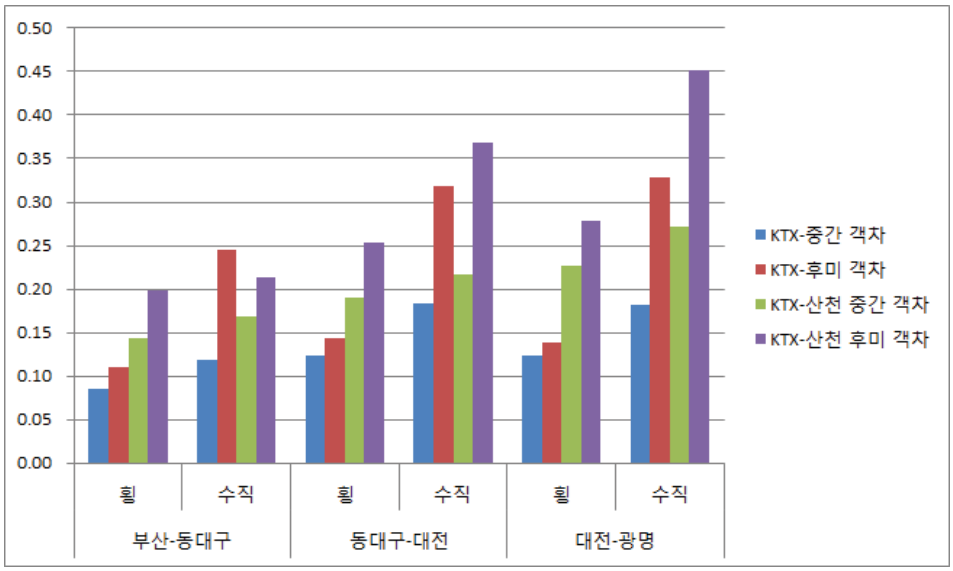
(다) 측정 결과

○ 주행거동 분석은 KTX-산천 동력차 선두 및 후미 운전실, 중간객차 및 후미객차 차량을 대상으로 진동가속도를 측정하여 실제 운행 중에 나타나는 주행 거동을 분석하였으며, 비교를 위하여 KTX 차량도 측정하였음

○ 고속철도 차량의 주행 시 발생하는 진동은 수직방향의 진동이 횡방향에 비해서 상대적으로 높게 발생하고 있음. 또한 대부분이 콘크리트 도상인 부산~동대구 구간에 비해 자갈궤도인 동대구~대전, 대전~광명 구간에서 높은 진동이 발생하고 있음을 확인할 수 있음. 또한 선두 운전실보다 후미운전실이, 중간객차 보다 후미객차의 진동가속도가 상대적으로 큼



<주행구간에 따른 운전실 최대 가속도 측정 결과>



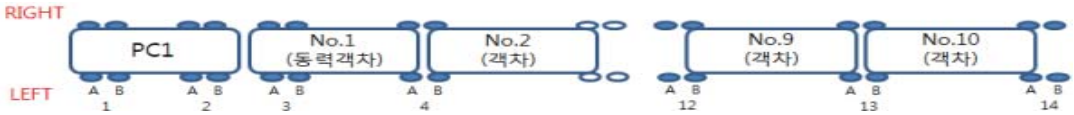
<주행구간에 따른 객실 최대 가속도 측정 결과>

(2) 고속차량 차륜마모형상 측정

(가) 개요

○ 국내 철도안전법, 유럽 등의 주행안정성 평가기준은 신차조건으로 되어 있으나, 차량의 수명주기 동안 안전성을 보장한다고 보기 어려움. 따라서 국내 환경에 맞는 주행데이터를 기반으로 신조 조건 뿐만 아니라 수명주기 조건도 고려한 평가모델의 개발이 중요함. 고속열차의 주행안정성 척도인 임계속도(Critical speed)는 차륜의 마모와 이에 따른 형상 변화에 매우 민감하게 변화되기 때문에 신조 조건만으로 평가하는 것은 무의미하며, 국내 주행 데이터를 기반으로 마모된 형태를 통계 분석하고, 이를 토대로 평가 조건을 수립하여야 함. 이를 위해 국내에서 운행 중인 KTX 및 KTX-산천 고속열차의 운행 누적거리별로 가능한 많은 량의 차륜 답면의 형상 데이터 획득이 필요함

○ 본 연구에서 국내 운용 중인 KTX 및 KTX-산천 열차의 누적 운행거리에 따른 차륜 답면 형상(Wheel Profile)을 측정하였음. 측정은 KTX 8호, 23호 열차와 KTX-산천 1호, 12호 열차에 대하여 약 60,000km 정도 운행하는 동안 진행되었음. 삭정 후 누적주행거리는 0km부터 335,500km까지 다양한 휠에 대해 측정함. KTX 및 KTX-산천 차량에 대해 아래 그림에서 파란색으로 표시된 14축, 28개의 차륜에 대해 측정하였으며, 측정에 사용된 장비는 nextSENSE사의 비접촉식 휠프로파일 측정기인 CALIPRI를 사용함



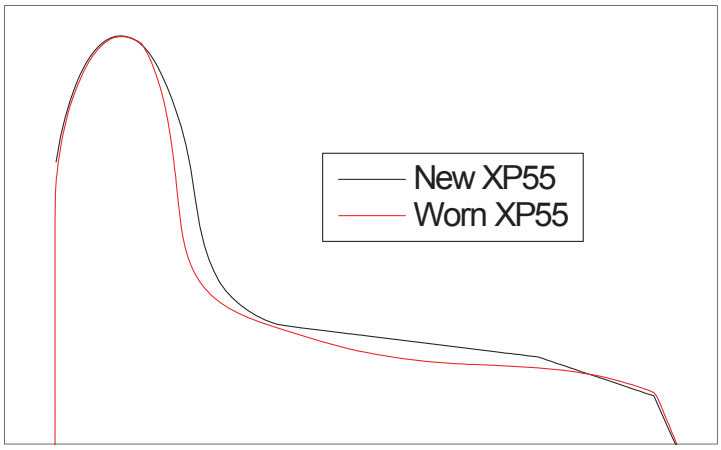
<KTX 차량 측정 휠>



<KTX-산천 차량 측정 휠>

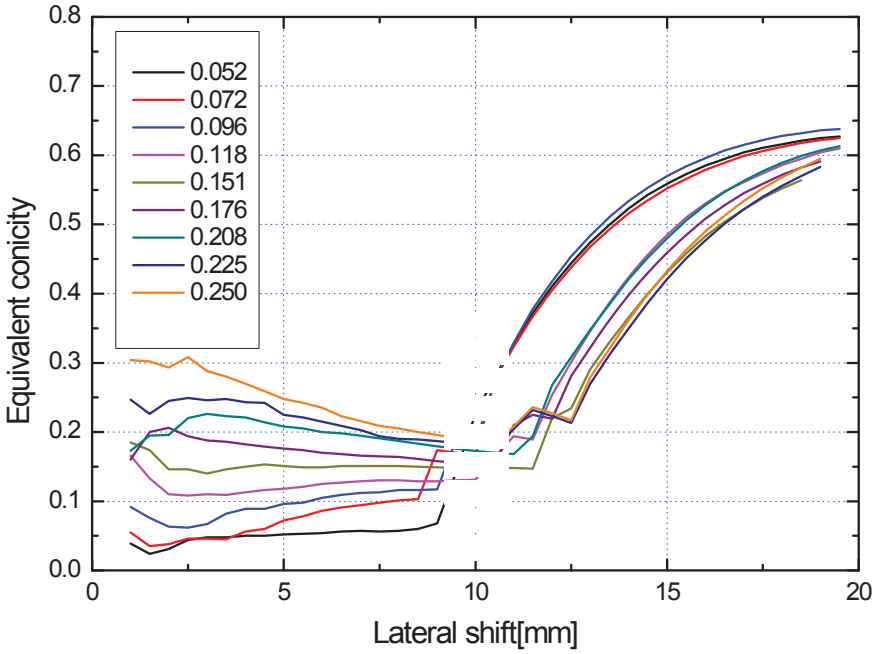
(나) 측정결과

○ 누적주행거리 0km일 때와 누적주행거리가 가장 긴 335,500km일 때의 차륜프로파일 측정결과를 아래 그림에서 볼 수 있으며, 누적주행거리가 늘어날수록 플렌지부분의 직립마모와 답면(Thread) 부분의 마모가 상당히 많이 진행된 것을 알 수 있음



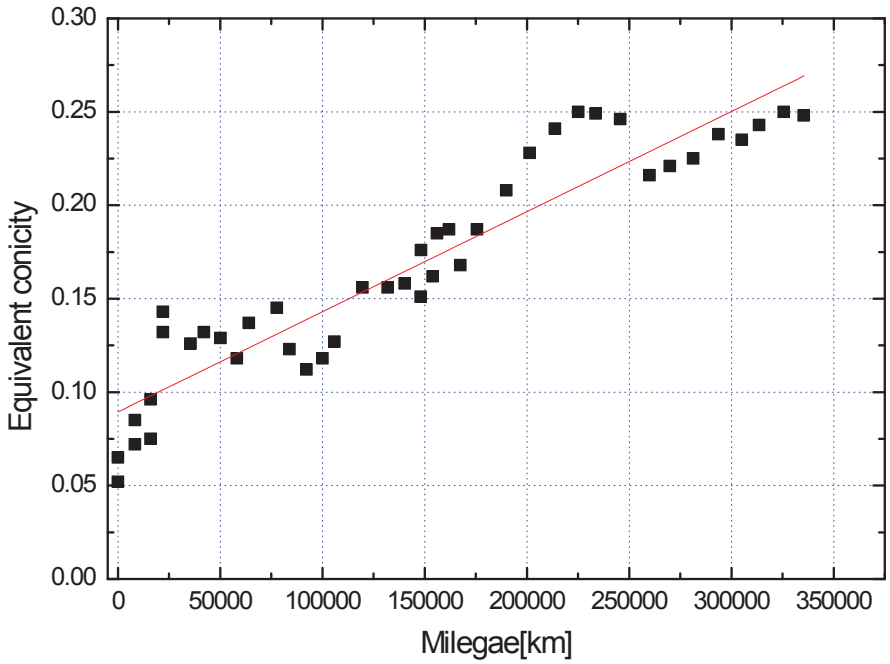
<XP55 신조 및 마모차륜 비교>

○ 측정된 XP55 휠과 신조상태의 UIC60-20에 대한 등가답면구배를 아래에 나타내었음. 신조 차륜 상태일 때는 편평하다가 누적주행거리가 증가할수록 등가답면구배는 커짐



<등가답면구배 계산>

○ 계산된 등가답면구배에 대해 5mm 지점의 값을 누적주행거리에 따라 아래 그림에 표시함. 그림에서 알 수 있듯이 등가답면구배는 초기에 0.052 정도에서부터 누적주행거리가 증가할수록 커지며, 그 값은 0.25 정도까지 커졌음. 이상의 결과에서 누적주행거리가 증가할수록 등가답면구배가 증가한다는 사실을 알 수 있음



<누적주행거리에 따른 등가답면구배>

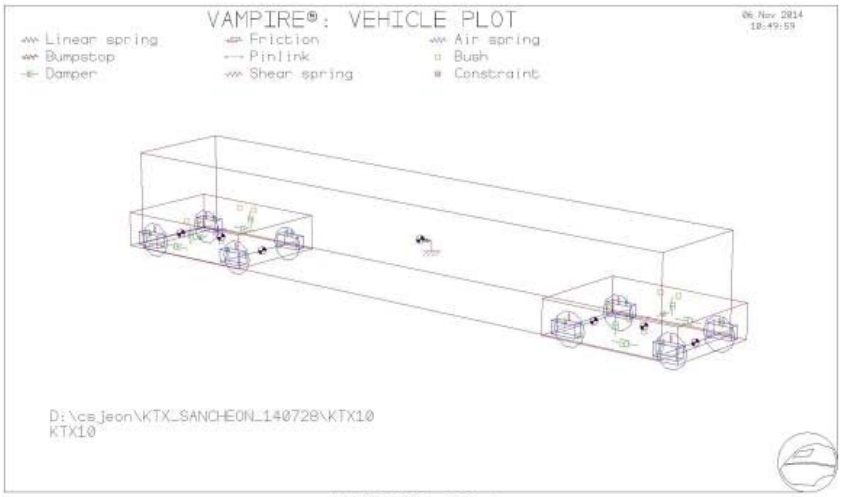
나. KTX-산천 주행안정성 향상 방안 수립

(1) KTX-산천 동력차 주행안정성 향상 방안 수립

(가) KTX-산천 동력차 주행안정성 해석 모델 작성

○ 동력차 주행안정성 해석은 VAMPIRE를 사용하였으며, 모델은 아래와 같음

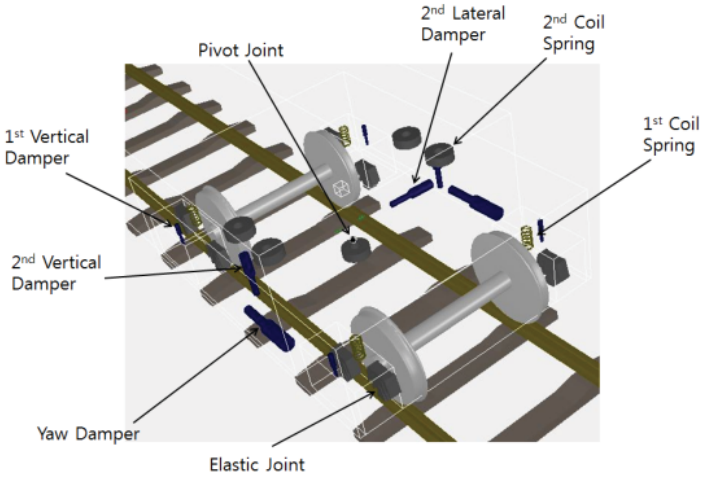
○ 동력차는 운전실과 동력실로 구분되는데, 동력실에는 주변압기, 추진장치, 보조전원장치 등이 있음. 동력차는 차체와 동력대차 2대로 구성되어지며, 동력대차는 윤축과 대차프레임 등으로 구성되며, 윤축, 대차, 차체는 스프링과 댐퍼 등의 현가장치를 이용하여 연결됨



<KTX-산천 동력차 모델>

○ 동력차의 길이는 22.705m, 높이는 4.062m, 폭은 2.814m이고, 대차간 거리는 14m임. 대차의 고정축거(Wheelbase)는 3m이고, 차륜은 신조일 때 0.92m, 마모한도는 0.85m임

○ 동력 대차는 아래와 같이 모델링하였음. 동력대차의 윤축과 대차프레임을 연결하는 1차 현가장치는 코일스프링, 수직댐퍼, 탄성조인트로 이루어짐. 대차와 차체를 연결하는 2차 현가장치는 코일스프링, 수직 댐퍼, 횡댐퍼, 요댐퍼, 피봇 조인트로 구성됨. 각각의 물성치는 제작사에서 제공된 값을 사용하였음



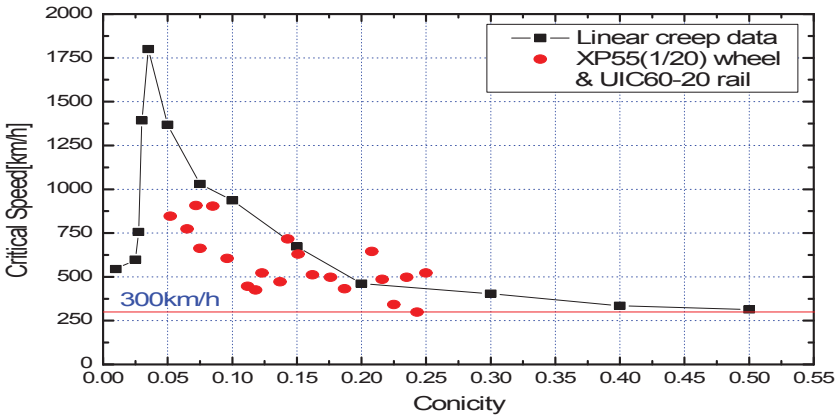
<KTX-산천 동력대차 모델>

(나) 주행안정성에 영향을 미치는 각 인자별 영향 분석

① 차륜 답면구배(Wheel conicity)

○ 차륜 답면구배와 임계속도의 관계를 아래 그림에 나타내었음. 먼저 임계속도의 경향을 확인하기 위하여 앞의 선형 크립 모델을 이용하여 해석을 수행하였음. 임계속도는 답면구배가 0.035일 때 최대치가 되며, 좌측은 차체 헌팅에 의해 임계속도가 감소하고, 우측은 대차 헌팅에 의해 임계속도가 감소함. 앞에서 측정한 XP55 차륜 형상을 이용한 비선형 차륜레일 접촉 데이터를 이용하여 구한 임계속도도 함께 표시하였음. 전체적으로 선형 모델을 이용하여 구한 임계속도 보다 비선형 모델을 이용하여 구한 임계속도가 낮아지는 경향을 보임

○ 차륜 마모가 진행될수록 등가답면구배는 증가하게 되며, 이에 따라 임계속도도 감소하는 것을 확인할 수 있음

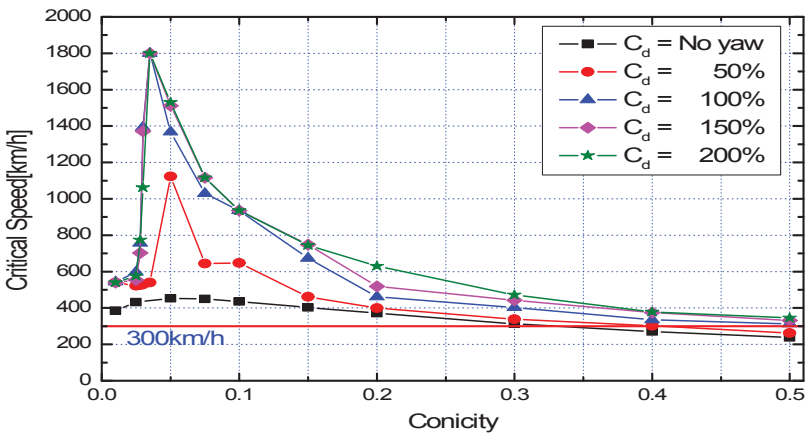


<차륜답면구배에 따른 임계속도>

② 요댐퍼 댐핑계수

○ 철도차량의 사행동을 억제하기 위하여 차체와 대차 사이에 요댐퍼를 설치하는데, 이 요댐퍼의 댐핑계수가 임계속도에 영향을 크게 미침. 요댐퍼의 댐핑계수는 비선형적 특성을 나타내며, 현재 KTX-산천에 설치된 요댐퍼의 댐핑계수를 100%라고 봤을 때 이를 50, 150, 200%로 가변하면서 임계속도와의 관계를 고찰하였음

○ 아래 그림에는 요댐퍼가 없는 경우 및 댐핑계수를 가변함에 따른 임계속도를 표시하였음. 요댐퍼가 없을 경우 임계속도가 가장 낮으며, 댐핑계수가 커질수록 임계속도는 상승함. 댐핑계수가 150, 200%쪽으로 갈수록 임계속도의 증가폭은 감소하게 됨

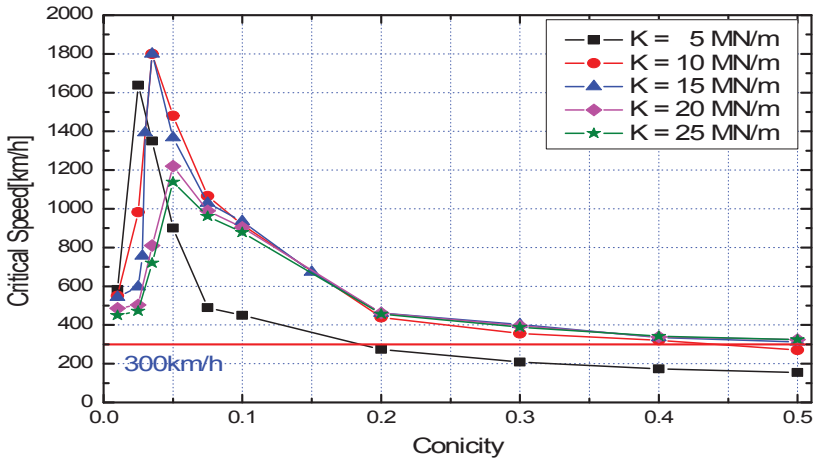


<요댐퍼 댐핑계수에 따른 임계속도>

③ 1차 탄성조인트 진행방향 강성

○ 철도차량의 사행동에 영향을 미치는 또 하나의 요소는 윤축과 대차프레임을 연결하는 탄성조인트의 열차 진행방향 강성임. 현재 KTX-산천에는 한쪽 휠에 2개의 탄성조인트가 있으며, 이 강성은 15 MN/m로 설정되어 있음

○ 이 강성 변화에 따른 임계속도의 영향을 살펴보기 위하여 해석을 수행하였으며, 그 결과를 아래 그림에 나타내었음. 강성이 5 MN/m일 때가 임계속도가 전체적으로 가장 낮으며, 강성이 높아질수록 임계속도는 증가하다가 다시 감소함. 따라서, 현 상태의 15 MN/m의 값이 1차 탄성조인트 진행방향 강성의 최적 설계점 근처의 값이라고 판단됨

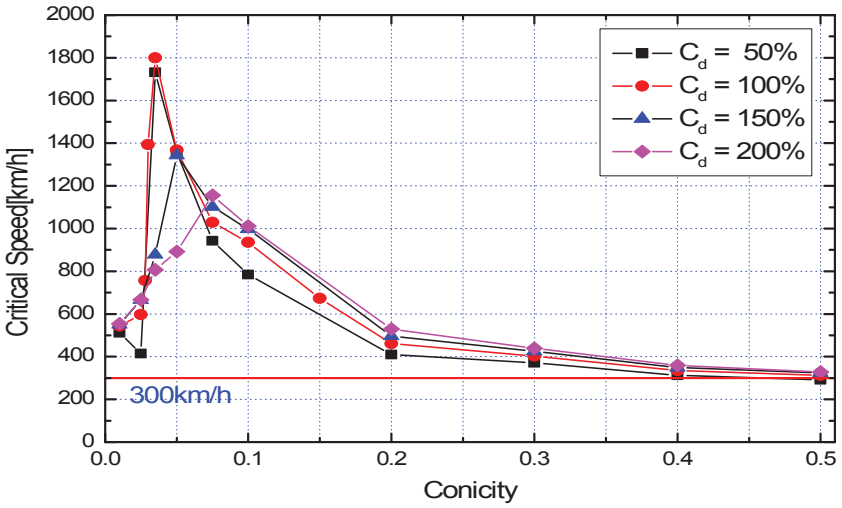


<1차 탄성조인트 강성에 따른 임계속도>

④ 2차 횡댐퍼 댐핑계수

○ 대차와 차체를 연결하는 2차 횡댐퍼는 철도차량의 횡방향 사행동을 억제하는 요소 중 하나로, 이 횡댐퍼 댐핑계수에 따른 임계속도 경향을 고찰하였음. 현재 상태의 횡댐퍼 댐핑계수는 0.1 MNs/m이고, 이 값을 50, 150, 200%로 가변하면서 해석을 수행하였음.

○ 아래 그림에서 보는 것과 같이 댐핑계수가 높아질수록 임계속도의 최대점은 등가답면구배가 높은쪽으로 이동함. 전체적인 임계속도는 댐핑계수가 증가할수록 전 등가답면구배에 대해 조금씩 증가하나, 그 증가폭은 조금씩 감소함. 횡댐퍼의 댐핑계수 측면에서 봤을 때 임계속도를 향상시키기 위해서는 댐핑계수를 현재보다 키우는 방안을 고려할 수 있음



<2차 횡댐퍼 댐핑계수에 따른 임계속도>

(다) KTX-산천 동력차 주행안정성 향상 방안

① 최적화 개요

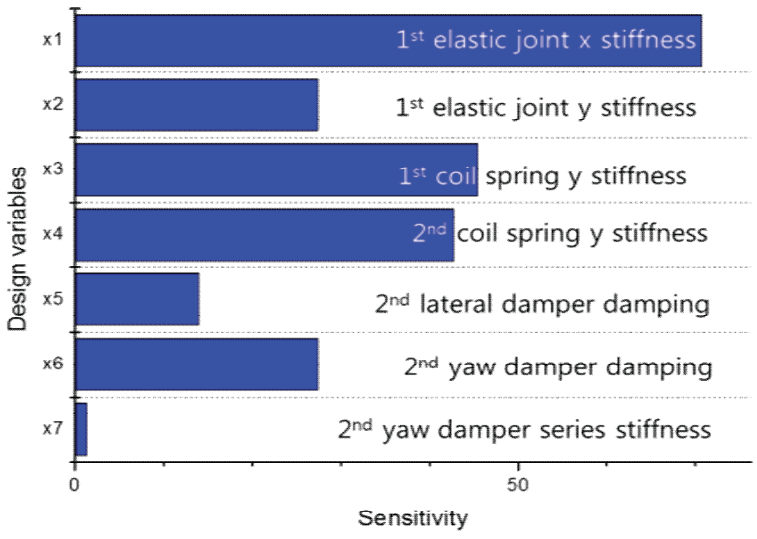
○ 실험 계획법을 이용하여 시스템 최적 설계를 실시는 과정을 요약하면 다음과 같음

○ 먼저 시스템이 사용되는 특성치와 설계 변수, 구속조건을 정의함. 특성치는 최대화 또는 최소화시킬 시스템의 성능 값이며 설계 변수는 시스템의 성능에 영향을 주는 조건으로 설계 변수를 정의할 때 설계 변수의 수준을 정의해 주어야 함. 수준이란 변수가 취할 수 있는 값의 개수로 예를 들어 2수준 인자는 최대값, 최소값만을, 3수준 인자는 최대값, 최소값, 중간값을 가질 수 있음. 구속조건은 설계 변수가 반드시 만족시켜야 하는 조건으로 이는 선형 또는 비선형 대수 방정식으로 주어짐. 시스템의 성능을 결정하는 설계 변수는 많지만 시스템의 특성치에 큰 영향을 끼치는 변수만을 추려내기 위해 민감도 분석을 수행함

○ 본 연구에서는 2수준요인 실험을 이용한 민감도 분석 방법 중 하나로써 실험 횟수를 획기적으로 줄인 Plackett-burman design[20]을 이용하였음. Plackett-Burman design은 직교 배열표에 비해 생성이 쉽기 때문에 민감도 분석을 위한 실험 계획표로 많이 사용되고 있음. 최적화 시킬 설계 변수를 설정한 후에 반응 표면 분석법[21]을 이용하여 설계 변수와 출력 변수(반응 함수)간의 관계를 보여주는 2차의 회귀 모형함수를 추정하였음. 이때, 회귀 모형함수를 적은 횟수의 실험으로 추정하기 위하여 중심점과 축점을 2수준 요인 실험에 추가시킨 실험계획인 중심 합성 실험 계획표[21]를 사용하여 설계 변수값과 출력 변수값을 획득하였음. 추정된 모형함수는 분산 분석표를 이용한 F-검정법[22]에 의하여 그 신뢰도를 검증하였음. 마지막으로 SQP 방법[23]에 의거하여 추정된 모형함수를 최소화 시키는 설계 변수들의 값을 찾음

② 민감도 분석

○ 민감도 분석 결과 아래 그림과 같이 차량의 임계속도에 대하여 1차 탄성조인트 x-방향 강성, 1차 코일스프링 y-방향 강성, 2차 코일스프링 y-방향 강성, 1차 탄성조인트 y-방향 강성 순으로 민감도가 크며, 본 연구에서는 이 중 민감도가 상대적으로 큰 상위 4개의 인자를 선정하고, 차륜답면구배가 큰 쪽의 임계속도를 높이기 위하여 차륜답면구배가 0.187일 경우의 최적설계를 수행하였음



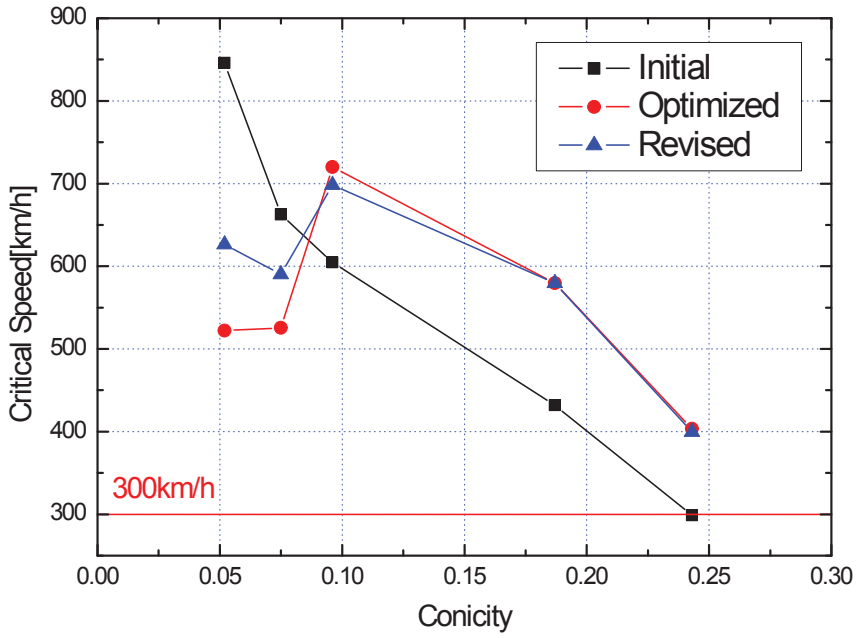
<민감도 해석 결과>

③ 반응 표면 분석을 이용한 최적화

○ 민감도 분석 결과 중요한 설계변수 4개에 대하여 차륜답면구배가 0.187일 경우의 최적 설계를 수행하였음. 이 경우 임계속도는 579.6km/h로 최적화시키기 전보다 34.1% 정도 증가함. 실제 차량에서는 차륜답면구배가 0.05 ~ 0.3 정도까지 존재하므로, 이 영역에서 최적화 전후의 임계속도를 아래 그림에 표시하였으며, 최적화 후 낮은 차륜답면구배에서 임계속도가 감소하는 경향을 보임

○ 이를 개선하기 위하여 1, 2차 코일스프링의 y방향 강성을 초기상태로 복귀하였더니, 낮은 차륜답면구배에서도 임계속도가 조금 상승하는 결과를 보였음

○ 결국 1차 탄성조인트의 특성치만 조정하여도 전체 차륜답면구배 영역에서 임계속도는 400km/h 이상으로 개선 전보다 높아질 것으로 예상됨

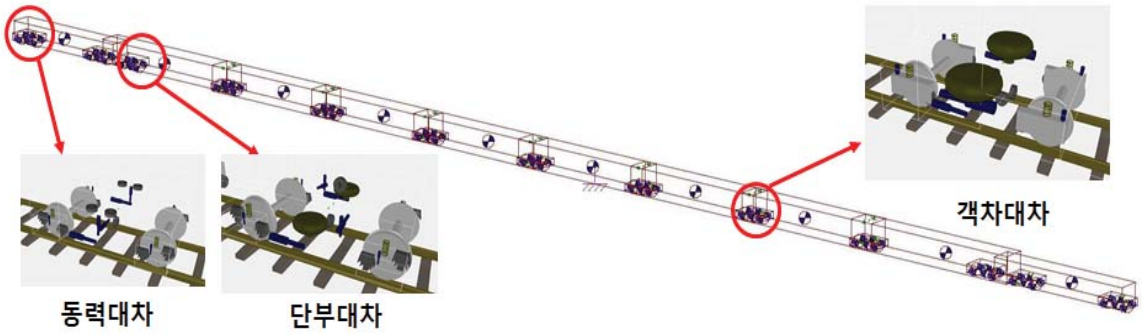


<현가장치 최적화 결과>

(2) KTX-산천 편성 모델 주행안정성 향상 방안 수립

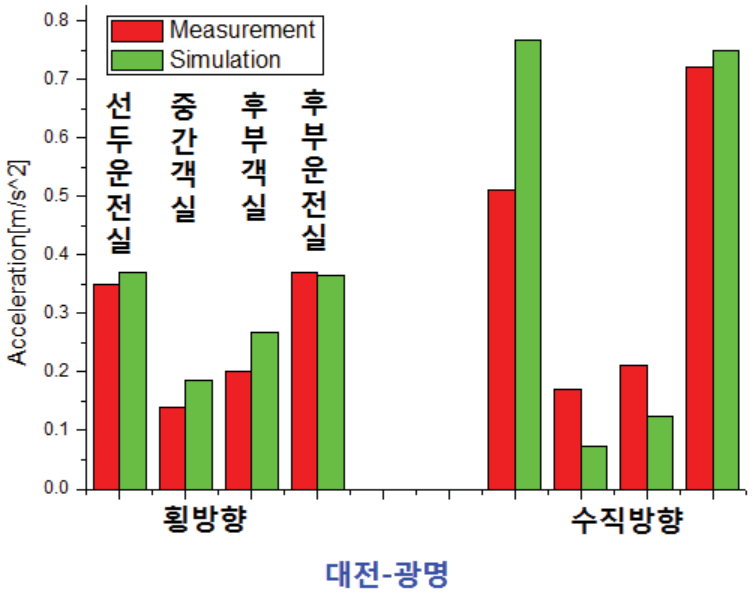
(가) KTX-산천 편성에 대한 주행안정성 해석 모델 작성

○ 본 해석에서 모델링된 KTX-산천 편성 모델은 10량 1편성이고, 대차는 동력대차, 단부대차, 객차대차 등 3종류임



<KTX-산천 10량 1편성 모델>

○ 해석 모델의 검증을 위해 차체 횡가속도 및 상하가속도의 RMS값을 시험결과와 비교하면 아래 그림과 같이 유사한 경향을 보임. 따라서, 해석모델을 이후의 연구에 사용하는 것은 타당함

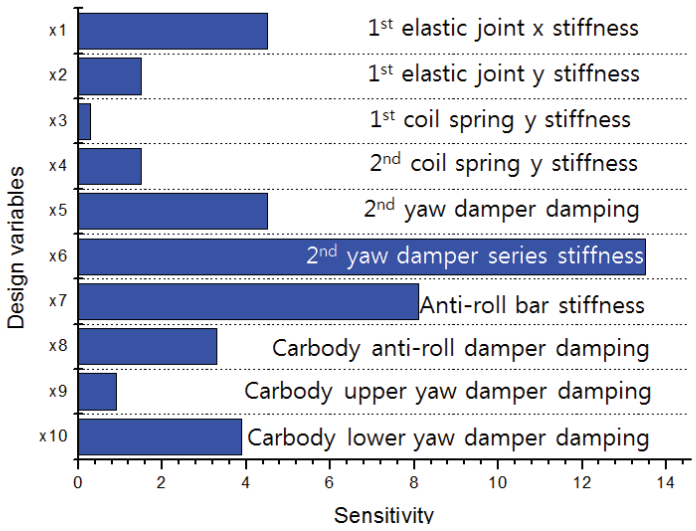


<해석결과와 시험결과 비교>

(나) KTX-산천 편성에 대한 현가장치 최적화를 통한 주행안정성 향상 방안

① 민감도 분석

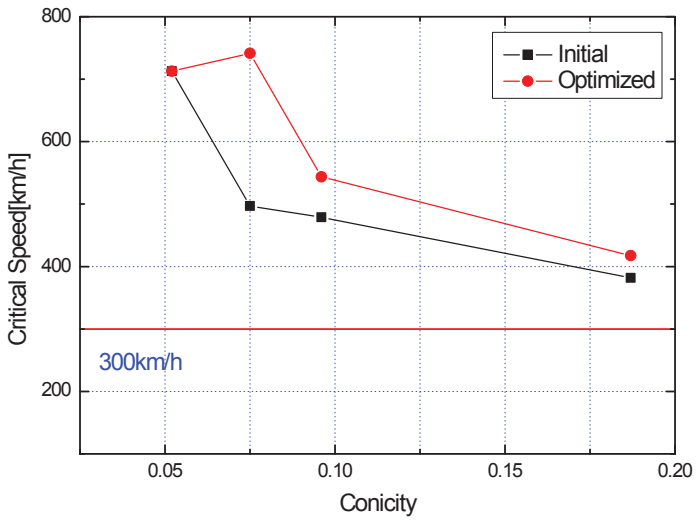
○ 민감도 분석 결과 차량의 임계속도에 대하여 2차 요댐퍼 x방향 시리즈 강성, 안티롤바 x(T)방향 강성, 1차 탄성조인트 x방향 강성, 2차 요댐퍼 x방향 댐핑계수 순으로 민감도가 크며, 본 연구에서는 이 중 민감도가 상대적으로 큰 상위 4개의 인자를 선정하고, 차륜답면구배가 큰 쪽의 임계속도를 높이기 위하여 차륜답면구배가 0.187일 경우의 최적설계를 수행하였음



<KTX-산천 편성 모델 민감도 해석 결과>

② 현가장치 최적화

○ 차륜답면구배가 큰 쪽의 임계속도를 높이기 위하여 차륜답면구배가 0.187일 경우의 최적설계를 수행하였음. 이 경우 임계속도는 417.6km/h로 최적화시키기 전보다 9.4% 정도 증가함. 실제 차량에서는 차륜답면구배가 0.05 ~ 0.3 정도까지 존재하므로, 이 영역에서 최적화 전후의 임계속도를 아래 그림에 표시하였음. 최적화 후 전체 차륜답면구배에서 임계속도가 상승하는 경향을 보임



<차륜답면구배에 따른 영향>

다. 신규 개발 대차 모델에 대한 주행안정성 향상 방안 수립

(1) 주행장치 최적안 이론적 임계속도 해석

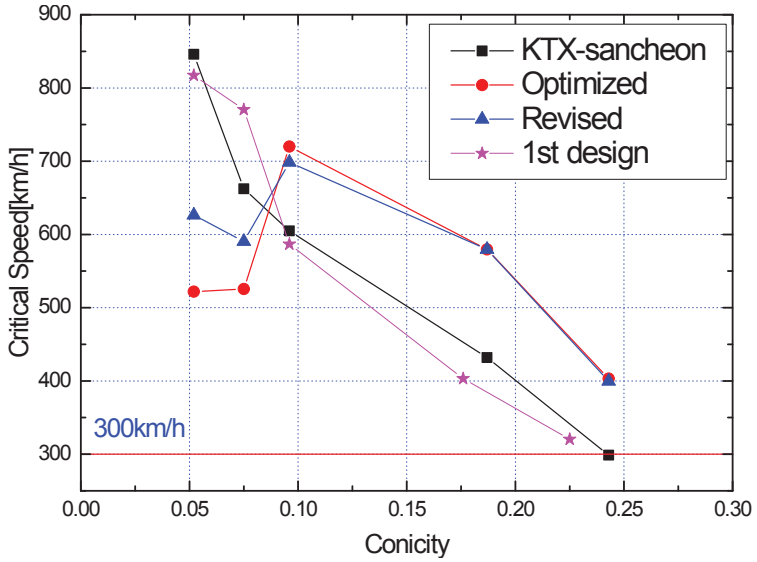
(가) 1차 설계안에 대한 해석적 검증

○ 신규 개발되는 동력대차 1차 설계안의 물성치와 KTX-산천 동력대차 물성치의 비교 결과를 다음 표에 나타내었음. 1차 현가장치의 경우 기존 대차와 차이가 있으며, 2차 현가장치의 경우 요댐퍼 댐핑계수만 증가하였고, 나머지는 동일하게 유지하였음

<신규개발 동력대차 1차 설계안 현가장치 물성치>

구분	항목		1차 설계안 물성치 (KTX-산천 대비)
1차 현가장치	코일스프링		+20%
	수직댐퍼		+10%
	안내 스프링	Cx	-20%
		Cy	동일
		Cz	+20%
2차 현가장치	코일스프링+탄성베어링		동일
	수직댐퍼		동일
	횡댐퍼		동일
	요댐퍼		+50%

○ 1차년도에 수행하였던 동력대차 최적화안과 1차 설계안 및 기존 동력대차에 대한 임계속도 해석 결과를 아래 그림에 나타내었음. 신규개발 동력대차 1차 설계안의 임계속도는 기존 KTX-산천 동력대차의 임계속도와 유사하였음. 또한 최적화를 통한 개선안은 높은 차륜답면 구배(Conicity) 구간에서 KTX-산천보다 임계속도가 상승하는 결과를 보였음



<KTX-산천 동력차 및 편성 임계속도 비교>

○ 동력대차 임계속도를 향상하기 위해서는 현가장치 횡방향 파라미터를 조절하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있었음. 상기의 연구와 1차년도에 수행한 현가장치 최적화 결과를 종합하여, 현가장치 횡방향 파라미터에 대해 다음 표와 같이 제안한 후 실제 제작이 가능한 범위에서 2세부 과제 주행장치 개발분야에서 2차 설계안 작성에 반영하였음

<현가장치 파라미터 제안>

구분	항목		1세부 제안 (KTX-산천 대비)	비고
1차 현가장치	코일스프링	y	-30%	감소
	안내스프링	Cx	+30%	증가
		Cy	-30%	감소
2차 현가장치	코일스프링+탄성베어링	y	+30%	증가
	횡댐퍼		0%	현행유지
	요댐퍼		0%	현행유지

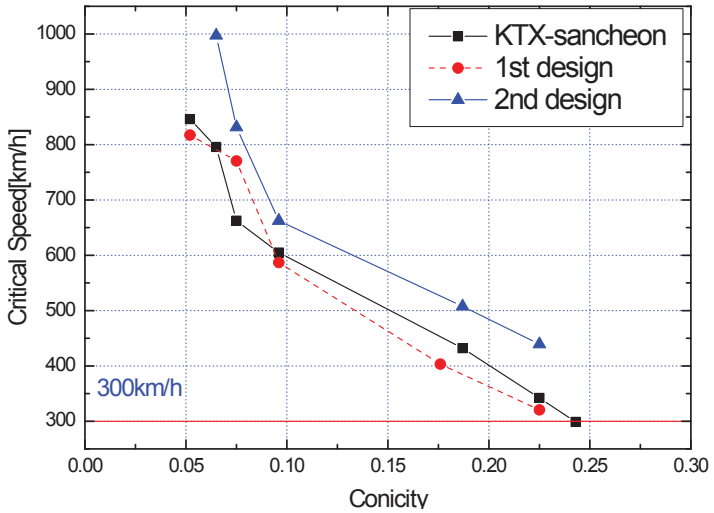
(나) 2차 설계안에 대한 해석적 검증

○ 1차 설계안에 대한 검토 이후 수정이 필요한 사항을 반영하여 2세부 과제에서 2차 설계안이 제안되었으며, 이에 대한 해석적 검토를 수행하였음. 신규 개발되는 동력대차의 1차 설계안과 2차 설계안의 물성치의 비교 결과를 아래 표에 나타내었음. 2차 설계안에서 특이한 것은 아래 그림과 같이 임계속도 향상을 위해 기존에 없던 안티롤바가 신규 추가되었다는 점임

<1, 2차 설계안 현가장치 물성치 비교>

구분	항목		1차 설계안 물성치 (KTX-산천 대비)	2차 설계안 물성치 (KTX-산천 대비)	비고
1차 현가장치	코일스프링	y	0%	0%	
		z	+20%	+33%	
	수직댐퍼	z	+10%	+10%	
	안내스프링	Cx	-20%	-11.7%	
		Cy	0%	-20%	
		Cz	+20%	-23%	
2차 현가장치	코일스프링 + 탄성베어링	y	0%	0%	
		z	0%	0%	
	수직댐퍼	z	0%	0%	
	횡댐퍼	y	0%	0%	
	요댐퍼	x	+50%	+50%	
	안티롤바	T	-	신규적용	

○ 신규개발 동력대차 2차 설계안에 대한 임계속도 해석 결과는 아래 그림과 같음. 기존 KTX-산천 동력대차보다 전체 차륜답면구배에서 높았으며, 평균 21.2% 정도 높은 결과를 보였음



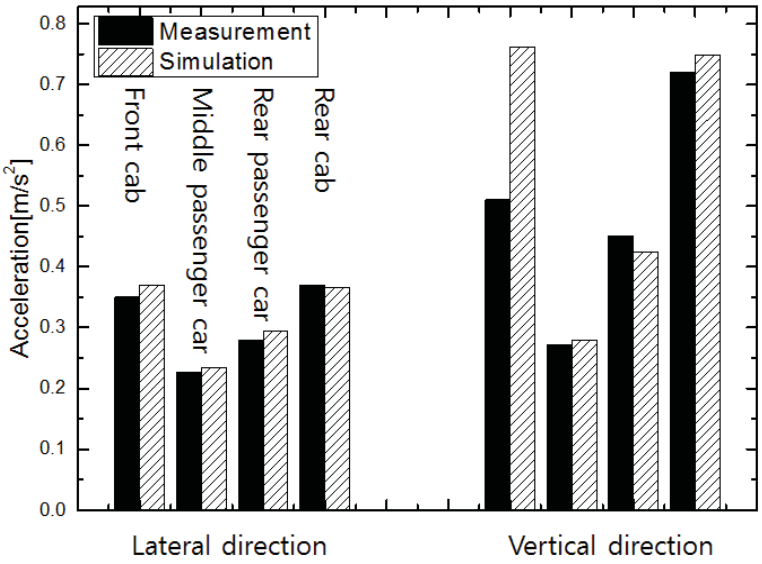
<1, 2차 설계안 임계속도>

(2) 주행장치 해석 결과에 대한 실험데이터 비교 보완

(가) 시험 결과와의 비교를 통한 해석 검증

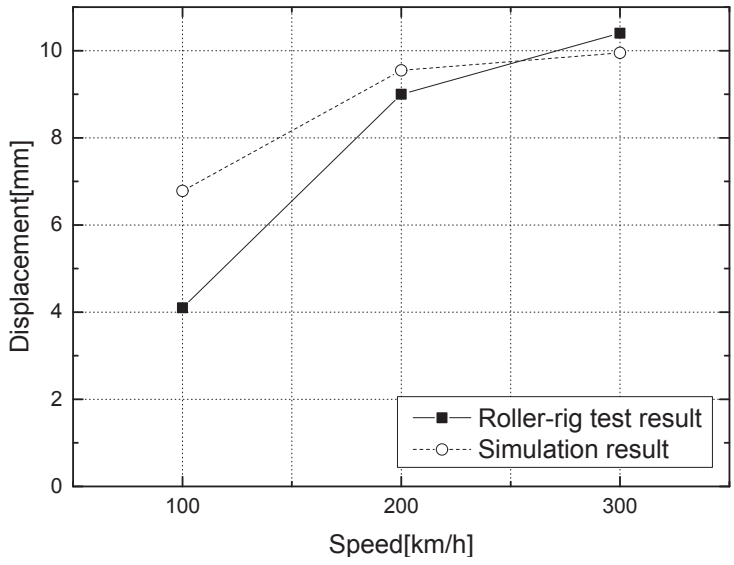
○ 해석 결과를 검증하기 위하여 시험 결과와 비교 분석을 실시하였음

○ KTX-산천 편성에 대한 시험 결과와 해석 결과를 비교한 결과 횡방향 가속도와 수직방향 가속도 RMS값이 유사한 결과를 보였음



<KTX-산천 차체 가속도>

○ 또 다른 검증 방법으로 윤축의 변위 해석 결과와 Roller Rig 시험 결과를 비교하였는데, 아래 그림과 같이 그 결과가 유사하여 해석방법의 타당성을 확인할 수 있었음

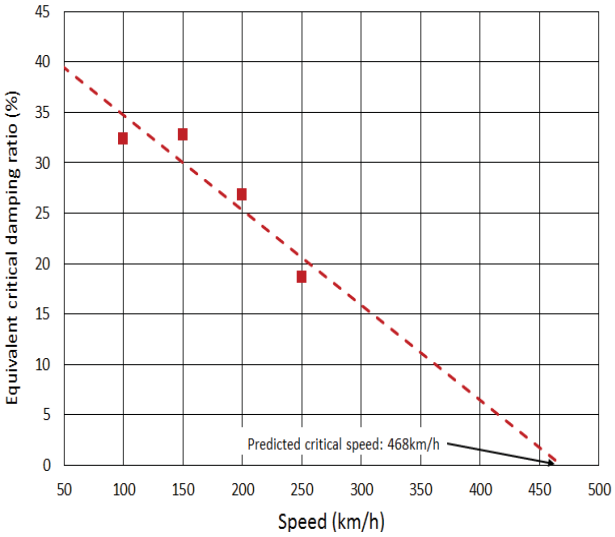


<Roller Rig 시험과의 비교(윤축 변위)>

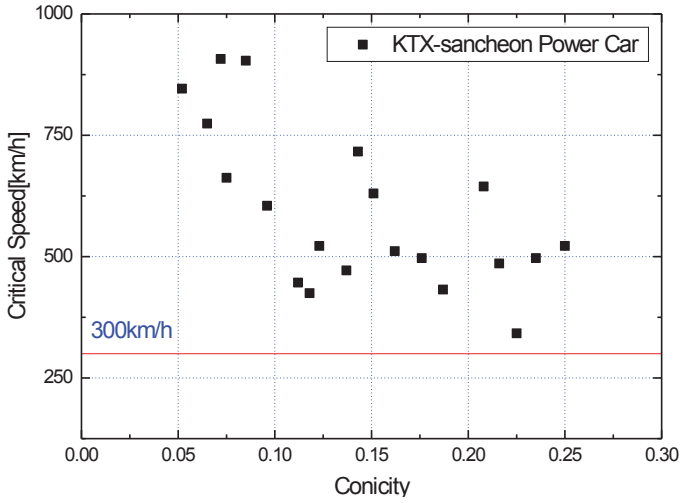
(나) Roller Rig 주행안정성 시험 결과를 이용한 해석기술 보완

① 동력대차 임계속도 예측 결과 비교 분석

○ Roller Rig 시험을 통해 윤축의 등가감쇠비 변화율 분석으로 기존 동력대차의 임계속도를 예측한 결과는 다음 그림에서와 같이 468km/h 정도임. 또한, KTX-산천 동력차량 주행안정성 해석을 통한 임계속도 예측 결과는 다음 그림에서와 같이 신조차륜(Conicity = 0.05~0.07)일 때 750km/h 이상으로 예측됨. 등가감쇠비 변화를 이용하여 예측한 468km/h에 대한 차륜답면 구배는 0.1 ~ 0.2 정도이며, 이 임계속도 차이에 대한 검토를 수행하였음

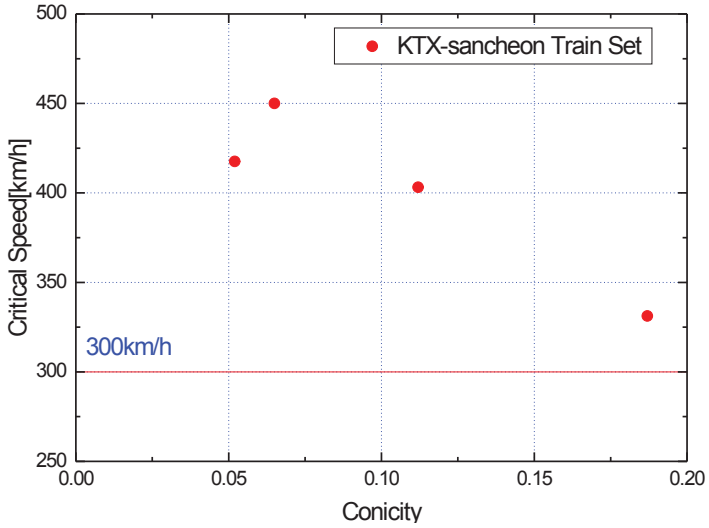


<등가감쇠비 변화에 따른 동력대차 임계속도 예측>



<주행안정성 해석을 통한 동력대차 임계속도 예측>

○ KTX 도입 당시 입수한 프랑스 SNCF 자료 검토 결과 TGV-A차량(12량 1편성)에 대한 임계속도 예측 결과는 XP55 차륜 신조상태(Conicity=0.05)일 때는 430km/h, GV40 차륜 신조상태(Conicity=0.025)일 때는 450km/h, 마모차륜(Conicity=0.3)일 때는 350km/h 정도였음. 이를 참고하여 KTX-산천 해석모델에 대한 정밀 튜닝을 실시하였는데 그 대상은 공기스프링이었음. 기존 선형 특성을 적용하였던 공기스프링을 비선형 특성으로 변경하여 해석을 수행하였을 때, XP55 차륜 신조상태일 때의 임계속도 예측 결과는 다음 그림과 같이 417~450km/h로 프랑스 SNCF 자료와 윤축의 등가감쇠비 변화를 이용한 임계속도 예측 결과인 468km/h와 유사하였음



<모델 정밀 튜닝을 통한 동력대차 임계속도 예측>

② 현가장치 특성별 시험결과와의 비교를 통한 해석기술 보완

○ KTX-산천 신규개발 동력대차 Roller Rig 시험에서는 안티롤바 및 안티요댐퍼 유무에 따른 주행안정성 시험을 수행할 예정이었고, 이를 고려하여 해석을 수행하였음. Roller Rig 시험 시 측정항목인 가속도, 변위 등 12개 항목에 대해 주행속도 300km/h일 때의 해석 결과는 다음 표와 같음. 해석 결과 안티롤바 및 요댐퍼 탈거시에 축상, 대차, 차체 좌우방향 가속도는 악화될 것으로 예상되었음

<안티롤바 및 요댐퍼 유무에 따른 주행안정성 해석>

연번	측정 항목	단위	정상 상태	안티롤바 탈거	비율[%]	요댐퍼 탈거	비율[%]
1	전륜축 좌우변위	mm	2.778	3.036	-9.3	2.003	27.9
2	후륜축 좌우변위	mm	2.564	2.834	-10.5	2.001	22.0
3	전륜축 좌우 가속도	m/s^2	0.255	0.285	-11.8	0.379	-48.6
4	후륜축 좌우 가속도	m/s^2	0.234	0.264	-12.8	0.353	-50.9
5	전륜축상 대차프레임 좌우 변위	mm	4.071	4.288	-5.3	3.620	11.1
6	후륜축상 대차프레임 좌우 변위	mm	4.017	4.239	-5.5	3.822	4.9
7	전륜축상 대차프레임 좌우 가속도	m/s^2	0.280	0.320	-14.3	0.382	-36.4
8	전륜축상 대차프레임 상하 가속도	m/s^2	0.511	0.509	0.4	0.463	9.4
9	후륜축상 대차프레임 좌우 가속도	m/s^2	0.345	0.391	-13.3	0.480	-39.1
10	후륜축상 대차프레임 상하 가속도	m/s^2	0.540	0.539	0.2	0.493	8.7
11	차체 좌우 가속도	m/s^2	0.173	0.200	-15.6	0.328	-89.6
12	차체 상하 가속도	m/s^2	0.394	0.394	0.0	0.391	0.8

○ 상기 해석 결과와의 비교를 위하여 Roller Rig 시험을 수행하였음. Roller Rig 시험은 개발된 신규 대차 정상상태에서 다음 그림과 같이 안티롤바와 요댐퍼를 각각 탈거한 상태로 실시하였음. 시험기의 여건상 해석에서 사용한 동일한 선로불규칙도를 사용할 수 없었기에 해석 결과와 상대적인 값을 비교하였음

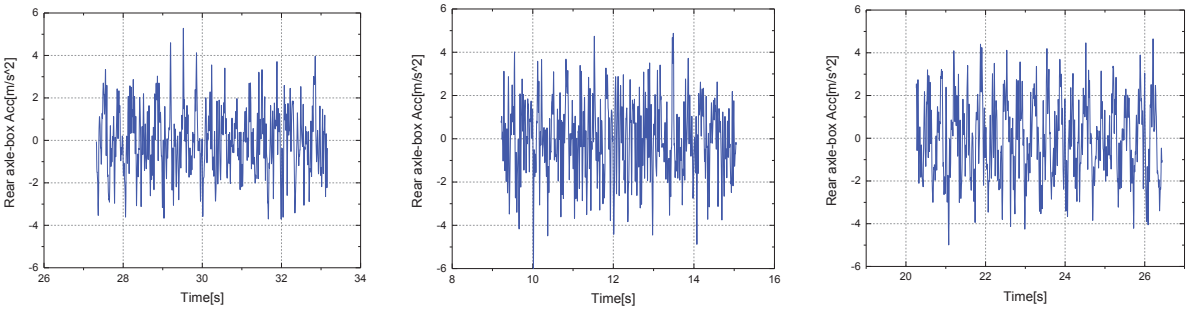


<안티롤바 탈거>



<요댐퍼 탈거>

○ 시험 결과 중 정상상태, 안티롤바가 없을 때, 안티요댐퍼가 없을 때 후륜축상 횡가속도를 다음 그림에 나타내었음. 또한 다음 표에 대차와 축상 횡가속도 시험 결과의 RMS값을 나타내었음. 시험 결과 안티롤바가 없을 때의 윤축 및 대차 좌우방향 가속도는 평균 10.1% 정도 커졌으며, 이는 해석 결과 13.0%와 비슷한 결과임. 요댐퍼 탈거에 따른 가속도 시험값과 해석값은 각각 평균 32.5%와 43.7% 커짐. 이상의 결과를 통하여 해석 방법에 대한 유효성 검증이 되었다고 사료됨



(a) 정상상태 (b) 안티롤바 탈거 (c) 요댐퍼 탈거

<후륜 축상 횡가속도 측정 결과>

<안티롤바 및 요댐퍼 유무에 따른 Roller Rig 시험 결과>

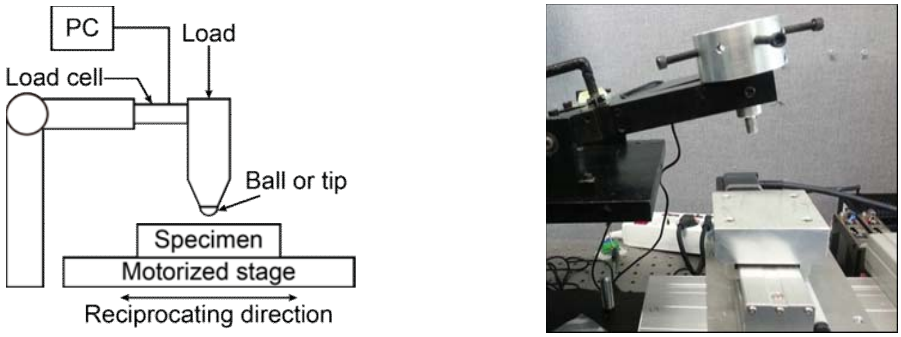
연번	측정 항목	단위	정상 상태	안티롤바 탈거	비율[%]	요댐퍼 탈거	비율[%]
1	전륜축 좌우 가속도	m/s^2	1.463	1.639	-12.0	1.894	-29.5
2	후륜축 좌우 가속도	m/s^2	1.479	1.666	-12.6	1.795	-21.4
3	전륜축상 대차프레임 좌우 가속도	m/s^2	0.994	1.096	-10.3	1.133	-14.0
4	후륜축상 대차프레임 좌우 가속도	m/s^2	0.836	0.882	-5.4	1.382	-65.3

라. 휠/레일 마찰 마모 성능 향상 기초연구

(1) 휠/레일 마찰 마모 특성 연구

(가) 실험 장치 구축

○ 휠/레일 소재간의 마찰 특성을 고찰하기 위해 왕복 미끄럼 운동방식의 시험기를 구축하였음. 아래 그림 (a)는 실험 장치 구성의 개략도, (b)는 실제 구축된 실험 장치의 사진임. 미끄럼 속도와 거리를 정밀하게 제어하기 위해 리니어 액추에이터 기반의 자동 스테이지를 사용하여 시편을 왕복운동 시켜주었으며, 액추에이터 구동 시 발생하는 진동 등에 의한 노이즈를 줄이기 위해 상대면 팁 부분에 로드셀을 부착하여 마찰력을 측정하였음. 팁 상부에 무게추를 올려놓아 접촉면에 일정한 하중을 지속적으로 가할 수 있도록 설치하였음



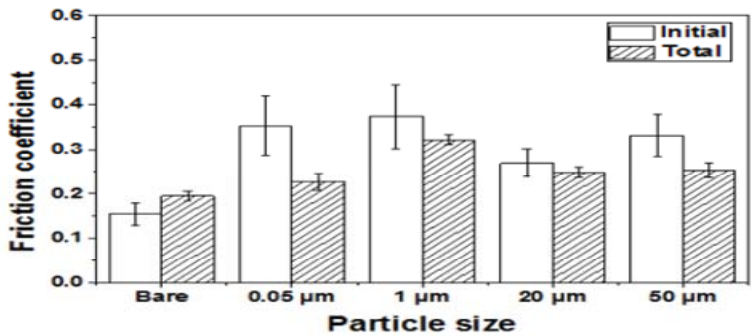
(a) 실험 장치 구성 개략도 (b) 실제 실험 장치

<실험장치 구성의 개략도 및 장치 사진>

(나) 실험 수행 내용 및 결과

① 입자 크기에 따른 영향

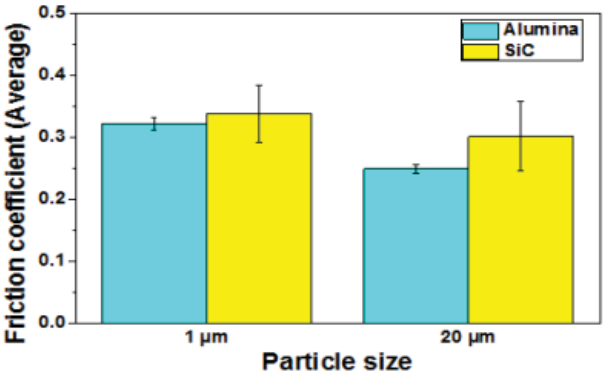
○ 실제 휠/레일 소재와 같은 재료인 주철로 시편과 팁을 제작하여 상대 미끄럼 마찰 실험을 진행하였음. 팁의 재질 변화에 따라 접촉 압력을 1 GPa로 유지하기 위해 하중을 600 gf로 변경하고 나머지 조건은 동일하게 실험을 진행하였음. 실험 결과, 마찰 계수는 입자 크기가 커짐에 따라 대체로 증가하는 경향을 보이나 1 μm 입자를 뿌린 경우 가장 크게 나타났음. 왕복 횟수에 따른 마찰계수 변화 그래프를 통해 알 수 있듯이 입자를 뿌린 경우 실험 초기에 마찰계수가 높게 나타났다가 다시 감소하는 경향을 보였음. 왕복 횟수 10회까지의 마찰계수의 평균값을 구해본 결과, 입자를 주입한 직후에는 입자 크기가 비교적 작을 때 마찰계수 증가 효과가 크다는 것을 알 수 있었음



<입자 크기 별 마찰계수 초기/전체 평균값>

② 입자 재질에 따른 영향

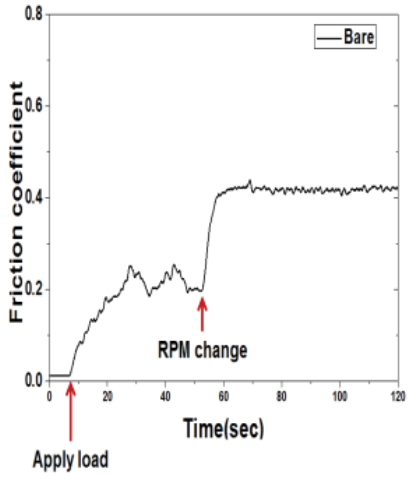
○ 주철 시편과 주철 팁 사이에 주입된 입자의 재질에 따른 마찰계수 변화를 파악하기 위해 알루미나 입자와 SiC 입자를 주입한 경우에 대해 각각 실험을 진행하였음. 입자 크기는 1㎛와 20㎛를 사용하였으며 하중 등의 다른 조건들은 앞서 실험과 동일하게 진행하였음. 실험 결과, SiC를 주입한 경우 마찰 계수가 다소 높게 나타났음. 마모량을 측정해 본 결과 SiC 입자를 주입한 경우 마모량이 약간 더 크게 나타났음. 상대적으로 경도가 큰 SiC 입자를 주입한 경우 더욱 심한 마모를 유발하여 마찰계수와 마모량의 증가를 유발함



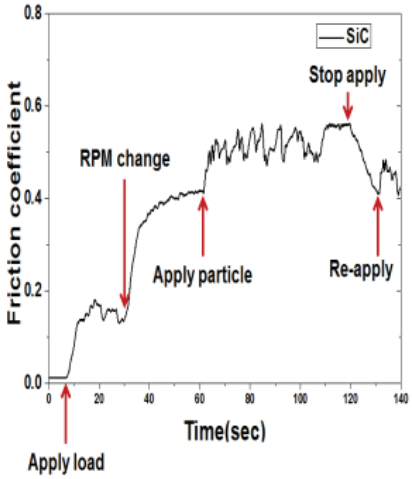
<입자 재질별 마찰계수 평균값>

③ 롤링 실험

○ 미끄럼 실험 방법과 롤링 실험 방법에 의한 마찰 및 마모 결과를 비교하기 위해 한국철도기술연구원의 롤링 시험기를 사용하여 입자에 의한 마찰 계수 변화를 측정하였음. 롤링 실험 조건은 20㎛ 크기의 SiC 입자를 사용하여 실험을 진행하였음. 아래 그림은 각각 입자를 주입하지 않은 경우와 주입한 경우 시간에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었음. 그래프 상에 Apply load는 실제 디스크 간에 하중을 가하기 시작한 지점이며 RPM change는 두 디스크 간 회전속도를 달리하여 접촉면에 슬립을 발생시키기 시작한 지점을 나타냄. Apply particle은 입자를 주입하기 시작한 지점이고, 입자를 주입한 지점 이후 마찰계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었음. Stop apply는 입자 주입을 중단한 시점이며 입자 주입을 중단한 지점 이후 마찰계수가 서서히 낮아져 주입 전의 마찰 계수 값을 나타내었음



<입자 주입 없는 경우 마찰계수>



<입자를 주입한 경우 마찰계수>

(2) 휠/레일 마찰특성 향상을 위한 기초기술 개발

(가) 상용 마찰재 조사

○ 철도의 고속 주행 시 공전 및 활주 현상을 제어하기 위해 다양한 조성의 마찰재가 개발되고 있음. 상용 마찰제품에는 윤활제, 마찰조절제, 결합제 등의 역할로 금속, 세라믹, 고분자 화합물들이 첨가됨. 일반적인 점착제의 조성 분석은 2012년 한국철도기술연구원에서 조사 되었지만, 70% 이상의 조성이 강열감량 물질로 조사 되어서 정확한 성분의 정성 분석에 대한 결과가 부족하며, 저점착 및 고점착 재료의 차이점에 대한 분석은 진행되지 않았음. 따라서 본 연구를 진행하기 앞서 XRF, ICP를 이용하여 상용 마찰재의 세라믹 성분을 분석 하였으며, 강열감량으로 분석이 되지 않은 고분자 물질을 진행하기 위해 FT-IR 분석을 하였음. 추가적으로 고점착 화합물과 저점착 화합물의 차이를 분석하기 위해 밀도 분석을 병행하였음

○ XRF 분석 결과, 저점착 재료와 고점착 재료의 조성 분석 결과는 아래 표에 표시하였음. 감열 감량 재료는 약 80%로 대다수를 차지하는 것으로 확인할 수 있으며, 차이점은 미비한 것으로 나타남. 윤활제와 마찰 조절제의 조성에서 차이가 발생하는데, 저점착 재료의 경우 윤활제인 MoS_2가 16%, 세라믹 계열의 마찰 조절제가 4%를 차지하고, 고점착 재료는 윤활제가 4%, 마찰 조절제가 14%를 차지하게 됨. 저점착 재료의 경우 마찰특성보다 윤활특성을 높이기 위해 상당량의 윤활제가 첨가된 반면, 고점착 재료는 마찰 특성을 높이기 위해 마찰 조절제가 다량 사용된 것으로 판단됨

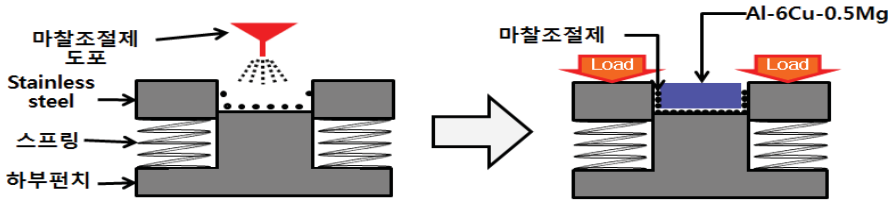
<상용 마찰재의 XRF 분석 결과>

성분	조성(wt%)	
	저점착 마찰재	고점착 마찰재
MgO	0	2.61
SiO_2	0.31	5.33
P_2O_5	0.15	0.16
Fe_2O_3	0.03	0.01
Co_2O_3	0.05	0.11
Br	2.49	0.06
MoS_2	16.04	4.41
감열 감량	80.94	4.31

(나) 분사형 분말 마찰재 개발

① 마찰력 측정 방법

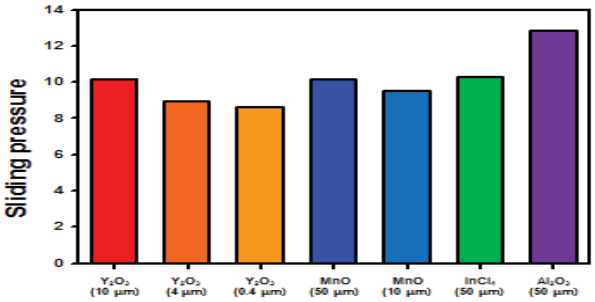
○ 고분자 및 세라믹 분말의 마찰력을 측정하기 위해 배출력 측정을 응용한 실험 방법을 설계 하였음. 분말 마찰재를 액상에 분산 시킨 후, 액상을 금형 주변에 골고루 도포함. 이후 분말 성형체를 금형에 삽입, 하중을 가하여 분말 성형체와 금형 사이에 있는 분말 마찰재의 마찰력을 측정하였음. 아래 그림은 배출력 측정 실험 모식도를 나타냄. 금형 소재는 Stainless steel로 하였으며, 금형 내부로 삽입하는 분말은 Al-6Cu-0.5Mg를 이용하였음. 또한 압축압력은 1차년도와 동일하게 150MPa로 성형 한 후 배출에 따른 마찰력을 측정하였음



<배출력 측정 시험 모식도>

② 세라믹 분말 마찰력 측정

○ 세라믹 분말의 종류 및 크기에 따른 마찰 특성을 비교하기 위해 6가지 분말과 1차년도에 사용한 Al_2O_3 분말을 이용하여 마찰력 측정을 실시하였음. 분말 성형체와 금형 벽면 및 하부펀치에 가해지는 striping pressure 이후 구간부터 마찰력이 떨어지는 구간까지의 평균 마찰력을 측정하였음. 분말의 크기가 작아질수록 자체적인 유동성이 증가하여 마찰이 감소하였으며, 전체적인 결과는 아래 그림에 비교하여 표시하였음



<배출 시험을 이용한 세라믹 분말의 마찰력 측정 결과>

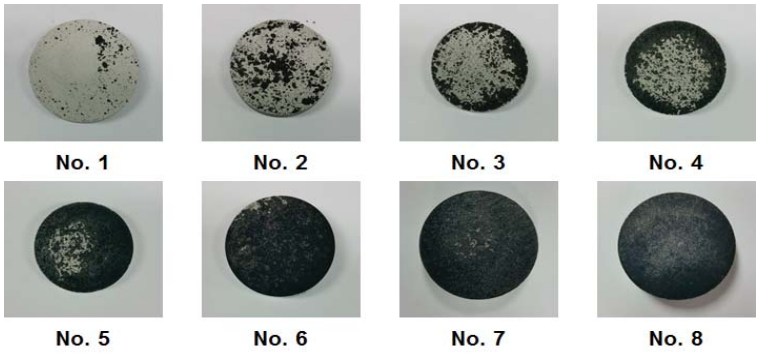
(다) 접촉형 벌크 마찰재 개발

① 복합 벌크 마찰재 개발

○ 1차년도 및 2차년도 결과를 바탕으로 새로운 복합 벌크 마찰재를 개발하기 위해 마찰특성이 우수한 금속 분말과 세라믹 분말과 소결 특성이 우수한 고분자 분말을 혼합한 후 Hot press 공법을 이용하여 시제품을 제작하였음. 고분자 분말은 낮은 온도 및 압력에서도 유동성이 증가하여 소결 과정 중 분말간의 치밀화를 향상시키기 때문에 상대적으로 낮은 온도인 150℃에서 소결을 하였으며, 성형 하중은 150bar로 제어하였음. 복합 벌크 마찰재는 총 8가지 조성을 선정하였으며, 정확한 조성은 다음 표에, 제작된 시편의 형상은 다음 그림에 표시하였음

<복합 벌크 마찰재 조성>

No	Al_2O_3	Al-6Cu-0.5Mg	고분자바인더
1	45 wt%	45 wt%	10 wt%
2	40 wt%	40 wt%	20wt%
3	35 wt%	35 wt%	30 wt%
4	30 wt%	30 wt%	40 wt%
5	25 wt%	25 wt%	50 wt%
6	20 wt%	20 wt%	60 wt%
7	15 wt%	15 wt%	70 wt%
8	10 wt%	10 wt%	80 wt%



<복합 벌크 마찰재 시편>

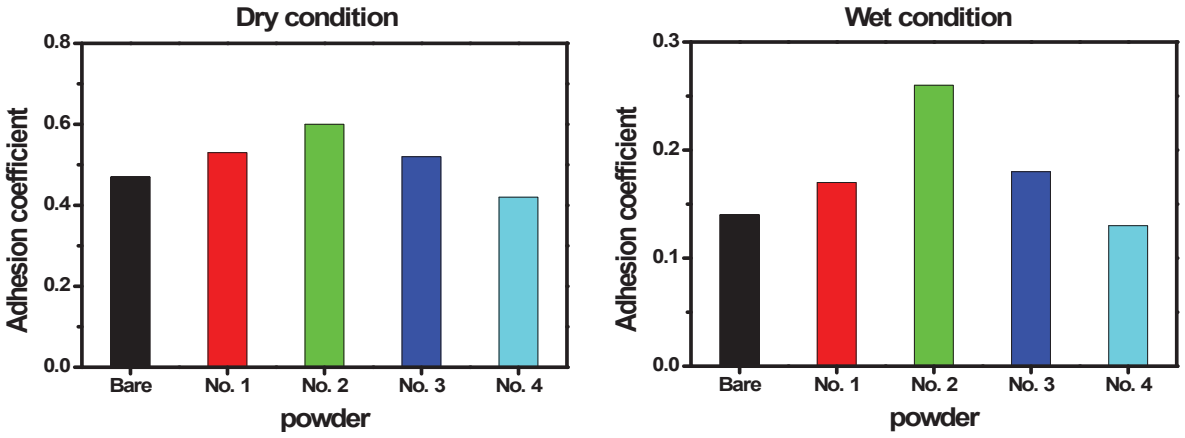
② 복합 벌크 마찰재의 점착 계수 측정

○ 본 연구에서는 2차년도에 개발한 접촉형 벌크 복합 마찰재가 실제 철도차량에 적용 가능한지 확인하기 위해 한국철도기술연구원에서 보유하고 있는 고속 차륜-레일 마찰 시험기를 이용하여 실제 점착력 평가를 진행 하였음. 실험 조건은 크게 두가지로 분류하였는데, 첫째는 물이 없는 Dry(건식)상태, 다른 하나는 물을 분사하는 Wet(습식)상태를 선정하였으며 아래 표에 나와 있는 조성을 가진 복합 벌크 마찰재를 개발하여 분석을 실시하였음

<복합 벌크 마찰재 조성>

시편 번호	Al-6Cu-0.5Mg	Al_2O_3	고분자 바인더
1	45 wt%	45 wt%	10 wt%
2	40 wt%	40 wt%	20 wt%
3	30 wt%	30 wt%	40 wt%
4	20 wt%	20 wt%	60 wt%

○ 점착 계수 측정 결과는 아래 그림에 표시하였으며, 물을 뿌리지 않는 Dry 조건에서는 마찰재를 도포한 후가 전의 0.46에 비해 점착계수가 최대 35% 정도 증가하였으며, 물을 뿌리는 Wet 조건에서는 최대 110% 정도 증가하였음. wet조건에서의 도포 후 마찰계수의 절대 수치는 상대적으로 낮은 값을 가지는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 마찰 조절제가 물에 의해 씻겨 나갔거나, 차륜 및 레일 사이에 형성된 수막에 의한 슬립 현상이 증가하여 Dry 조건에 비해 Wet 조건에서 마찰계수가 적은 것으로 판단됨. 마찰재 조성에 따른 결과를 분석한 결과, 1번 조성과 2번 조성을 비교 하였을 때, 고분자 바인더가 많은 2번 조성에서 훨씬 높은 마찰계수를 보이는 것을 확인하였음. 이는 마찰조절제 개발에 사용된 고분자 바인더가 차륜 및 레일의 접촉 과정 중 유동성 및 접착성을 확보하여, 전체적인 점착 특성을 향상시킨 것으로 판단됨. 고분자 바인더의 양이 다량 첨가된 4번 조성에서는 마찰계수가 눈에 띄게 감소함. 고분자 바인더는 분말간의 결합력을 향상시키는 역할을 하지만, 실질적인 마찰 조절제로 사용되는 세라믹 분말 및 금속 분말이 없어서 전체적인 점착 계수가 감소한 것으로 보임



<복합 벌크 마찰재의 종류 및 시험 조건에 따른 점착 계수 측정 결과>

3. 주행안정성 시험평가 기준 개발

가. 주행안정성 시험평가 기준 수립

(1) 국내외 주행안정성 평가기준 분석

○ 철도차량의 기술기준에서 필수적으로 요구되고 있는 주행안전은 고속철도차량을 비롯하여 일반철도 및 도시철도차량에 모두 동일한 기준을 적용함. 이것은 차량의 종류에 따라 최고속도조건만 달라질 뿐이며, 탈선하지 않고 주행할 수 있는 핵심 안전조건은 동일하기 때문임. 철도차량의 주행안정성을 평가하는 중요한 항목은 차륜과 레일 사이에서 작용하는 수평방향하중과 수직방향하중의 비율인 탈선계수라고 할 수 있는데, 이는 탈선이 철도차량의 주행안정성을 저해하는 중요한 요인으로서 대형사고로 직결되기 때문임. 특히 새롭게 개발하여 영업운행에 투입되는 차량에 있어서 주행안정성의 측정과 평가는 안전을 위한 필수적인 과정이며 주행안정성의 확보 측면에서 탈선계수의 측정은 다른 어떤 항목보다 중요하다고 할 수 있음. 또한 주행할 때 열차하중(윤중, 횡압)의 증가로 궤도를 구성하는 레일과 침목 등의 궤도 부품이 손상되거나 파괴되기도 하고 궤도틀림이 급격히 성장할 가능성이 높아지므로 주행안정성과 더불어 궤도의 유지보수 측면에서도 차륜과 레일 사이의 작용력을 반드시 확인하여야 함. 해외사례 평가기준은 아래 표와 같음

<해외사례 평가기준>

기술기준 항목	유럽 TSI	미국 기술기준	일본 기술기준
차량-선로 작용력	EN 14363 UIC 518	US Code Title 49 Transportation (Subtitle V-Rail Programs)	Technical Standard for Japanese Railway Chapter 8, 10
윤중 감소량	〃	〃	〃
횡압	〃	〃	〃
탈선계수	〃	〃	〃
전복방지	EN 14067-1 EN 14067-6	〃	〃

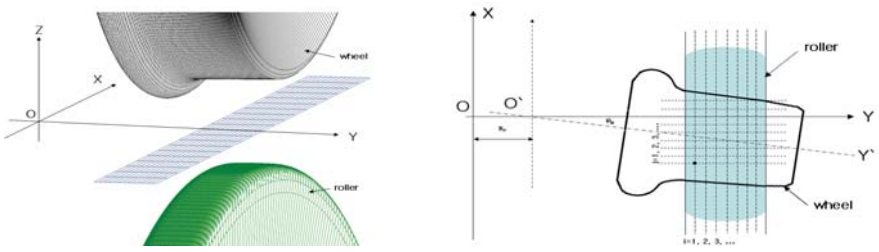
나. Roller Rig 주행안정성 평가방법 수립

(1) 실궤도 대비 Roller Rig 실험결과의 오차 분석 및 보정방안 수립

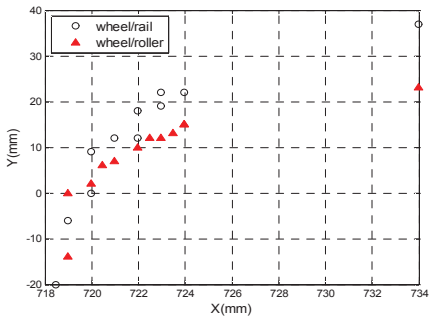
(가) 실궤도와 Roller Rig의 구조적 차이에 의한 오차 분석

① 차륜/궤조륜(Roller)과 차륜/레일간의 접촉특성 분석

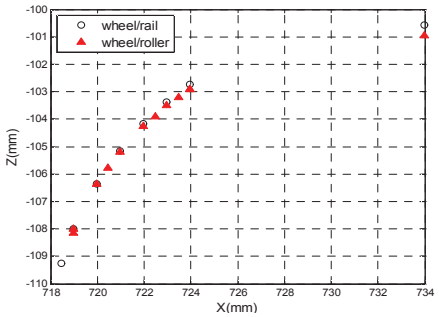
○ 국내 Roller Rig에 사용되는 궤조륜의 기하학적 특성을 고려한 차륜/궤조륜간 접촉특성 분석 결과, 공격각 발생시 차륜/궤조륜 크리프력 저하에 의한 특성 변화 가능성을 확인



<차륜/궤조륜 접촉특성 해석 모델>



(a) XY 평면상에서의 접촉점 위치



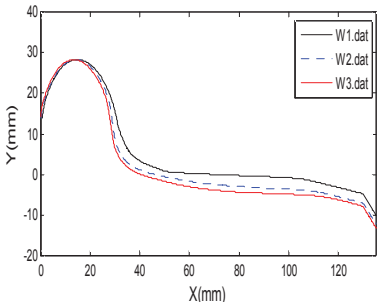
(b) XZ 평면상에서의 접촉점 위치

<공격각이 발생하였을 경우 차륜/레일, 차륜/궤조륜 접촉점의 차이 분석>

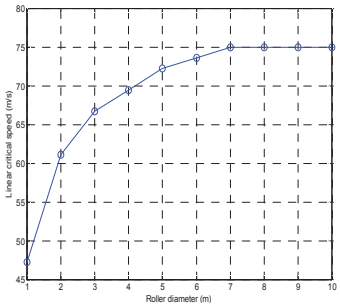
② 차륜/궤조륜(Roller) 기하학적 특성에 의한 오차 분석

○ 유한 반경을 가진 궤조륜 주행에 따른 임계속도 특성 분석

- 마모에 따른 차륜답면 변화와 궤조륜 주행에서의 임계속도 특성을 검토하였음
- 검토결과 궤조륜 상에서 임계속도는 저하, 사행동 주파수는 상승, 등가답면구배는 증가함



<분석에 사용한 마모 차륜 답면 형상>



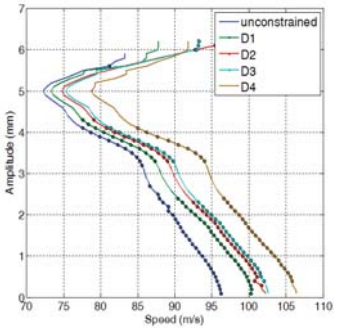
<궤조륜 직경과 임계속도 관계>

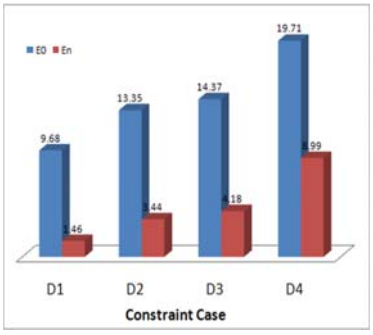
○ 실선 주행과 다른 Roller Rig 구속조건의 영향도 분석 결과, 구속이 증가할수록 임계속도 상승, 비선형 임계속도 오차 10% 이내, 선형임계속도 오차 20% 이내임. 국내 Roller Rig 구속조건은 다음 표의 D2 또는 D3, 열차 주행에 실제 영향을 주는 비선형 임계속도 오차 5% 이내로 분석됨

<각 항에 대한 구속조건>

구분	구속조건
unconstrained	실선 주행조건
D1	실선 주행조건이나 차체 Yaw 회전중심 차체 끝으로 이동
D2	차체 횡방향 거동 구속, 차체 Yaw 회전중심 차체 끝으로 이동
D3	차체 횡방향 거동 구속, 차체 Yaw 회전중심 구속장치 끝으로 이동
D4	차체 횡방향, 요방향 거도 구속 (롤 방향만 존재)

※ 구속조건과 임계속도의 관계 분석을 위해 접촉특성은 차륜/레일조건으로 일치





<구속조건에 따른 선형/비선형 임계속도 오차 분석>

(나) 해외 Roller Rig와 국내 Roller Rig의 차이 분석

① 중국 서남교통대 Roller Rig
- 6축의 Roller Rig를 구성하여 3축 대차 2대로 구성된 차량 1량 시험 가능
- 곡선모사를 위한 차동 구동, Roller 정렬 가능 (원심력 모사는 불가)
- 실궤도틀림 모사 가능
- 1995년 최초 구축 후 2002년, 2011년 2회 장비 업그레이드
- 고속차량 임계속도 관측을 위해 최고시험속도 향상(600km/h 이상, 2011년)

② 일본 RTRI Roller Rig
- 4축의 Roller Rig를 구성하여 2축 대차 2대로 구성된 차량 시험 가능
- Flywheel 설비로 차량 관성 모사가 가능하여 제동 등 속도 변동 시험 가능
- 실궤도틀림 모사 가능
- 최고 시험속도 500km/h
- 1957년 최초 구축 후 1989년, 2009년 2회 장비 업그레이드
- 편성차량 주행모사를 위한 HILS 구축 (2009년 장비 업그레이드)

③ 한국 철도연 Roller Rig
- 2축의 Roller Rig를 구성하여 2축 대차 1대와 차체의 semi-full car 방식
- 실궤도틀림 모사 가능
- 최고 시험속도 430km/h (정격 최고 시험속도 420km/h)
- 2007년 구축



<각 국의 Roller Rig(왼쪽부터 중국, 일본, 한국)>

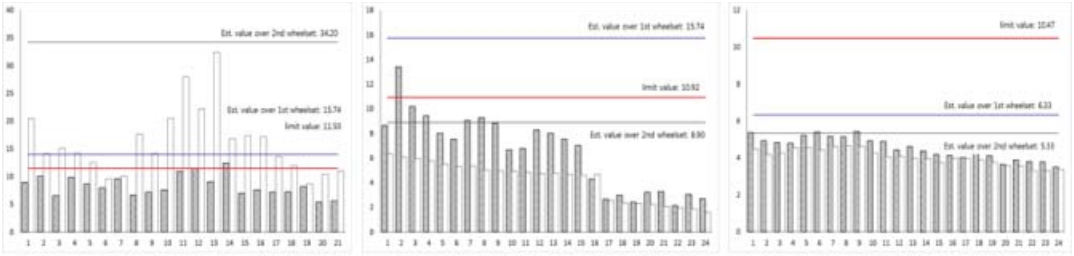
(2) 고속차량의 Roller Rig 시험을 이용한 주행안정성 평가 방안 수립

(가) UIC 518 안전평가 기법의 Roller Rig 적용 가능성 검토

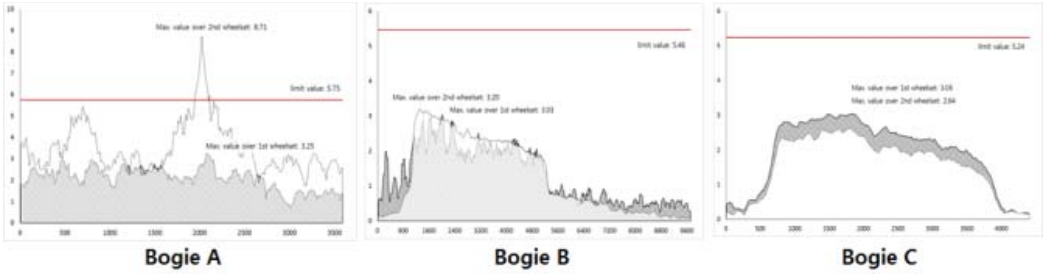
○ Roller Rig의 시험 최고속도 내에 임계속도가 존재 하지 않는 경우 존재 여부의 확인은 가능하나 임계속도를 구할 수는 없으므로 임계속도 도달시 나타나는 헌팅의 발생 위험도 평가가 UIC 518 안전평가 기법으로 가능한지 검토함

○ 철도연 Roller Rig에서 임계속도 관측이 가능한 대차 3종에 대하여 Roller Rig 시험을 수행하여 임계속도에서의 헌팅발생 구간에서 UIC 518분석

- UIC 518 Safety using simplified method with bogie acceleration
- UIC 518 Instability criteria using bogie acceleration



<대차 3종에 대한 헌팅현상 발생시의 UIC 518 Safety 평가>



<대차 3종에 대한 헌팅현상 발생시의 UIC 518 Instability criteria 평가>

○ UIC 518의 대차 가속도를 이용한 Safety 판별법 검토 결과 대차 특성, 전후 윤축에 따라 평가결과가 상이하게 나타나므로 헌팅현상 파악 불가

○ UIC 518의 대차 가속도를 이용한 Instability criteria 평가 검토 결과도 마찬가지로 대차 특성, 전후 윤축에 따라 평가결과 상이

○ UIC 518에서 규정하고 있는 한계 값을 이용한 safety, instability 판별법으로는 헌팅현상의 발생 유무를 파악할 수 없음. 속도 증가율에 따른 safety, instability criteria 등의 UIC 518 estimation 변화율, 속도 증가에 따른 윤축 감쇠계수 변화 등을 종합 비교분석 및 평가가 필요. 철도연 Roller Rig에서는 KTX-산천의 주행안정성에 대한 절대평가가 불가능 하므로 기존 KTX-산천 대차, 성능 향상된 KTX-산천대차의 주행거동 비교 평가 필요

(나) 고속철도 차량의 Roller Rig 주행안정성 평가 방안 수립

○ KTX-산천 동력대차의 Roller Rig 주행안정성 시험을 위한 시험절차서 초안 작성. 기존 KTX-산천 동력대차, 본 과제에서 개발된 KTX-산천 성능향상 시제대차의 개별 Roller Rig 시험을 아래 항목에 대하여 수행, 비교 평가를 통해 성능 향상 확인

- 최고시험속도내 임계속도 존재 여부 시험
- Anti-yaw 댐퍼 성능저하 가정시의 주행안정성 시험
- 마모 차륜 적용시의 주행안정성 시험
- 실궤도 틀림 적용시의 진동특성 및 UIC 518 Estimation 변화 등

○ 상기 항목의 시험방법과 최종 목표의 성능 기준과의 상관관계 분석을 통해 각 항목에 대한 최종 시험평가 기준 수립

○ KTX-산천 Roller Rig 시험절차서 초안 작성

다. 주행장치 Roller Rig 주행안정성 시험평가

(1) Roller Rig 시험방법과 최종 목표 성능 기준과의 상관관계 분석

(가) 실험적 고찰을 통한 Roller Rig 시험방법과 목표 성능 기준 상관관계 분석

○ 목표 성능 검증을 위한 Roller Rig 시험방법으로서 기준 대차와 개발 대차와의 시험결과 비교를 제시하였고, 실궤도와 Roller Rig 시험 오차발생 원인 규명 및 해외사례 검토를 통해 Roller Rig 최고 시험속도 내에서 임계속도가 관측되지 않으면 오차 보정 및 실선 임계속도 추정이 불가능함을 확인하였음. 이에 대한 대안으로 기준 대차와 개발 대차의 UIC 518 평가지수, 윤축 감쇠계수 변화 등의 비교분석을 통해 목표 성능을 평가하는 방안을 제시하였음

○ UIC 518 평가지수, 윤축 감쇠계수 변화 등으로 목표 성능 평가가 가능한지 실제 Roller Rig 시험을 통해 상관관계를 분석하였음. 국내 Roller Rig 최고 시험속도 내에서 임계속도 관측이 가능한 전동차용 대차를 대상으로 Roller Rig 시험을 수행, 목표 성능 기준인 임계속도와 간접 평가지수인 UIC 518, 윤축 감쇠계수와의 상관관계를 분석하였음. 고속열차인 G7(HSR-350X) 열차의 동력객차 대차를 대상으로 Roller Rig 시험을 수행하여 국내 Roller Rig 시험장비 사양 내에서 임계속도 관측 가능여부, 최종 시험절차 도출을 위한 시험방법 검증을 수행하였음. 임계속도 관측을 위한 비가진 주행시험, 임계속도 관측 및 등가감쇠비 변화를 분석하기 위한 가진 주행시험, UIC 518 평가를 위한 궤도틀림모사 주행시험을 진행함

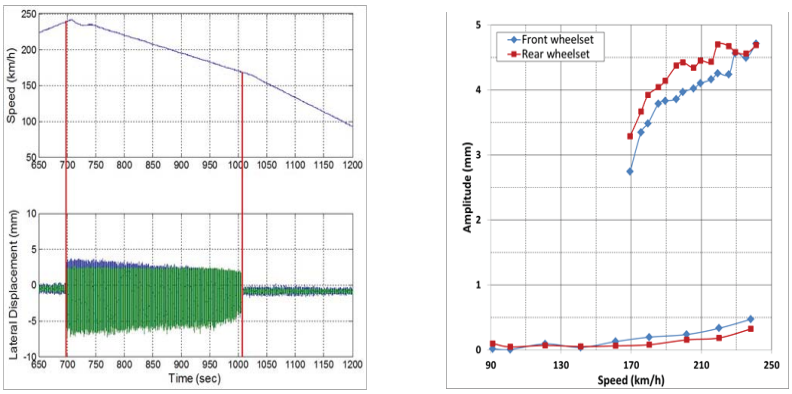
○ 기존 성능시험 기준은 설계 최고속도 내에 임계속도의 존재여부만 확인하도록 되어있음. 예를 들어 KTX-산천의 경우 발주사양에 운행속도 300km/h, 최고속도 330km/h로 명시되어 있었으며 대차의 임계속도는 400km/h가 넘을 것으로 예상되었음. KTX-산천의 Roller Rig 시험에서는 최고속도인 330km/h까지 가진시험을 통하여 이상이 없음을 확인한 후 시험을 종료하였고, 실제 임계속도는 시험을 통해 예측하지 못하였음. 또한 철도연 Roller Rig 시험장비의 최고속도는 430km/h 정도로 이보다 높은 속도의 임계속도는 시험으로 확인 불가능함

○ 본 연구의 기준 수립은 장비 최고 사양 속도까지의 시험결과를 이용하여 그 이상의 임계속도를 예측할 수 있는 새로운 기준을 개발하는 연구임. 즉 낮은 속도에서의 시험결과를 통하여 높은 속도의 임계속도를 예측함. 이를 위해 속도에 따른 UIC 518 평가지수(Safety, Instability)와 윤축의 등가감쇠비 변화를 고찰하고, 이를 이용하여 높은 속도의 값을 예측하는 기술을 개발함

(나) 국내 전동차 대차의 Roller Rig 시험 및 결과 분석

① 비가진 주행안정성 시험 결과

○ 시험 조건(하중, 접촉특성 등)에서 헌팅시작 속도 240km/h, 헌팅멈춤 속도 169km/h로 관측되어 임계속도 169km/h로 평가됨. 임계속도에서 전륜축 진폭 2.7mm, 후륜축 진폭 3.3mm, 헌팅주파수 3.5Hz임



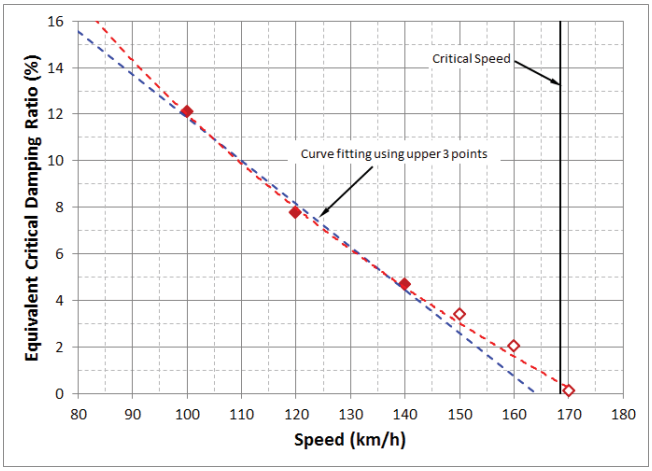
<비가진 주행안정성 시험결과 (좌: 시간데이터, 우: 속도-진폭 곡선)>

② 가진 주행안정성 시험결과

○ 비가진 주행안정성 시험 결과를 고려하여 가진 주파수 3Hz 고정, 가진 변위는 4mm부터 시작하여 주행속도에 따라 2mm로 감소시킴. 주행속도는 100km/h부터 140km/h까지 20km/h씩 증속하고, 140km/h부터 170km/h까지 10km/h씩 증속함. 시험속도 170km/h에서 가진에 의한 헌팅발생을 확인함. 비가진 주행안정성 시험시 관측한 임계속도와 일치한 결과를 보임으로써 비가진 시험과 가진시험의 유효성 확인

③ 주행속도에 따른 등가감쇠비 변화와 임계속도 상관 관계

○ 가진 주행안정성 시험결과 중 윤축의 횡변위 데이터를 활용, 주행속도에 따른 등가감쇠비를 실험적으로 추정함. 속도 140km/h부터 등가감쇠비가 5% 이내로 감소하여 임계속도에서 0%. 시험장비 사양으로 임계속도를 관측할 수 없는 상황을 가정하여, 상위 3개의 등가감쇠비를 사용하여 추세곡선을 계산, 이를 이용한 임계속도 예측값과 실제 임계속도를 비교함. 등가감쇠비 변화가 1차 함수라고 가정한 경우 예측 임계속도 164km/h로 실제 임계속도 169km/h와 약 3% 오차. 등가감쇠비 변화가 로그 함수라고 가정한 경우 예측 임계속도 172km/h로 실제 임계속도와 약 2% 오차를 보임

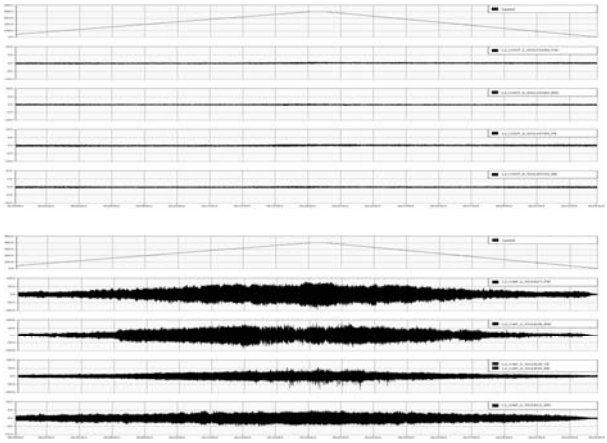


<주행속도에 따른 등가감쇠비의 변화>

(다) G7 동력객차 대차의 Roller Rig 시험 및 결과 분석

① 비가진 주행안정성 시험결과

○ 시험속도 400km/h 이내에서 헌팅현상 없이 안정적으로 주행



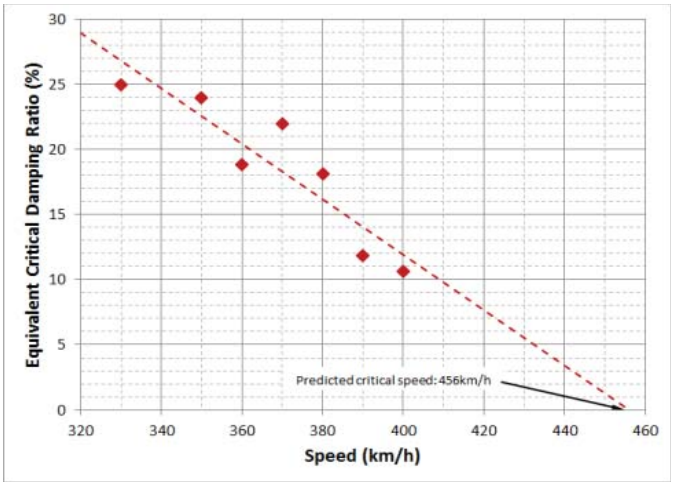
<G7 동력객차대차 비가진 주행안정성 시험 결과>

② 가진 주행안정성 시험 결과

○ 가진조건은 주파수 3Hz, 진폭 3mm, 주행속도 250km/h부터 350km/h까지는 20km/h씩 증속, 350km/h부터 400km/h까지는 10km/h씩 증속. 동일 가진 진폭 및 주파수에서 윤축의 응답 진폭 주행속도에 따라 미세하게 증가. 270km/h 까지는 전륜축과 후륜축의 진폭이 유사하나 290km/h부터 후륜축의 진폭이 증가하여 400km/h에서는 전륜축 대비 30%이상 커짐. 속도 400km/h 까지 헌팅현상 발생 없이 안정적으로 주행함. 시험에 사용된 G7 동력객차 단부대차는 당일 시험조건에서 임계속도가 400km/h이상으로 주행안정성이 확보되어 있다고 평가됨

③ 주행속도에 따른 등가감쇠비 변화와 임계속도 상관 관계

○ 가진시험 결과를 활용, 주행속도에 따른 등가감쇠비 변화를 분석함. 전동차 시험결과 대비 편차가 증가하였는데 이는 대차와 차체사이의 Anti-yaw 댐퍼 등, 비선형적 감쇠기구에 의한 것으로 판단됨. 350km/h 이하의 속도에서 등가감쇠비를 20% 이상 확보하고 있는 것으로 분석됨. 등가감쇠비 변화를 선형함수로 가정시 임계속도 456km/h로 예측되었으며 오차를 감안하면 Roller Rig 상에서는 430~480km/h에 존재할 것으로 분석됨



<주행속도에 따른 등가감쇠비의 변화>

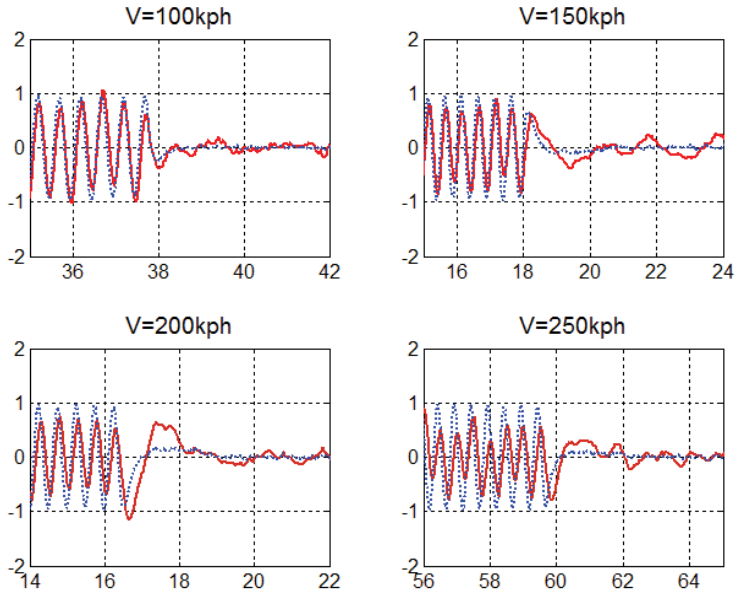
(라) G7 동력대차 Roller Rig 주행안정성 시험

① G7 동력대차 Roller Rig 시험

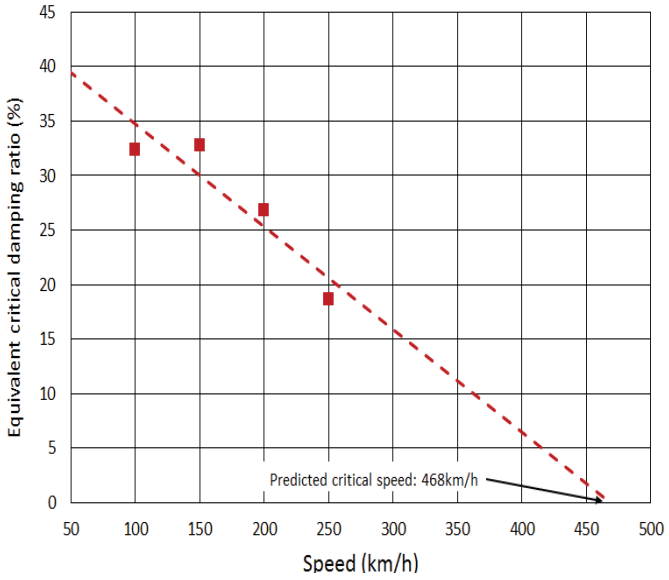
○ 2차년도에 개발된 기술인 등가감쇠비 변화율을 이용한 임계속도 예측 기법에 대한 검증 시험 수행

○ 저속에서의 차륜/궤조륜 접촉력에 의한 등가 감쇠비 변화율로 고속 임계속도를 예측하기 위한 정현파 가진시험을 250km/h까지 수행하였음. 예상 임계속도 대역보다 낮은 중·저속에서의 정현파 가진시험으로도 등가 감쇠비 변화율에 따른 임계속도 예측에 성공하였으며 현재 상태 및 Roller Rig 시험장비에서의 G7 동력차용 대차의 임계속도는 468km/h 수준으로 예측되었음. 따라서, 500~600km/h대 임계속도 수준의 대차도 420km/h까지 정현파 가진시험으로도 임계속도 예측이 가능할 것으로 예상됨

○ 1차년도 시험을 수행한 G7 동력객차용 단부대차를 400km/h까지 정현파 가진시험하여 예측한 임계속도 454km/h와 약 3% 오차 수준으로 예측기법의 효용성을 검증하였음



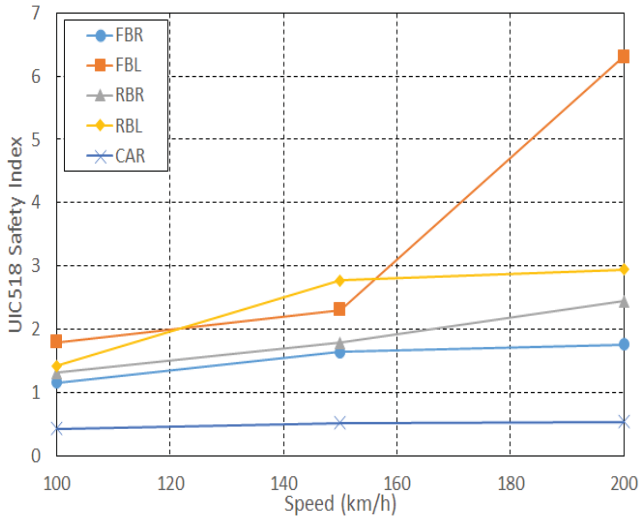
<G7 동력대차 정현파 가진에 따른 전위 윤축 횡변위>



<등가 감쇠비 변화에 따른 G7 동력대차 임계속도 예측>

② G7 동력대차 실궤도 Roller Rig 주행안정성 시험

○ 실궤도 모사 시험은 100, 150, 200km/h 속도에서 시행하여 각종 센서로부터 수집된 동특성 데이터를 통해 중정비된 G7 대차의 상태 점검을 수행하였음. 축상 대차프레임 가속도, 차체 가속도 데이터를 이용하여 UIC 518의 Safety, Instability 평가를 준용하여 분석하였음. 속도에 따라 각 대차프레임 측정위치의 UIC 518 Safety 지수는 증가하는 것으로 분석되었으나 UIC 518 Instability 지수는 측정위치에 따라 변동이 있었음. 따라서, 2차년도 연구 결과와 같이 UIC 518의 평가 지수는 상대비교로서만 활용이 가능할 것으로 판단되며, 명확한 경향 분석을 위해서는 고속에서의 실궤도 모사 시험이 필요할 것으로 예상됨. UIC 518 평가 방법의 활용은 등가감쇠비 변화율을 이용한 임계속도 예측기법 보다 더 많은 속도별 데이터가 필요하고, 특히 고속주행 데이터 확보가 중요할 것으로 예상되었음



<속도에 따른 대차프레임 UIC 518 Safety 지수 변화>

(마) 상관관계 분석결과 및 목표 성능 검증을 위한 시험방안 제시

① 전동차 및 G7 대차 Roller Rig 시험을 통한 시험방법과 목표성능 기준과의 상관 관계 분석 결과

○ 시험가능 속도내에 임계속도가 존재하는 경우 비가진 시험을 통해 임계속도 관측 가능함을 재확인

○ 가진 시험시 적절한 가진조건에 의해 임계속도 관측이 가능함을 확인

○ 가진 시험결과를 활용 등가감쇠비의 변화를 이용하여 임계속도 예측 가능

○ UIC 518의 Safety 평가지수와 임계속도의 상관 관계는 상대적으로 적음

○ UIC 518의 Instability 평가지수는 임계속도는 예측할 수 없으나 두 대차간의 성능향상 비교 가능

② 목표 성능 검증을 위한 시험방안 제시

○ 피시험대차 조건: 신조대차 상태, Anti-yaw 댐퍼 성능저하 100% 상태, 차륜마모 상태의 조합으로 4가지 경우 조건

○ 비가진시험: 시험속도내에 임계속도 존재여부 관측 시험

○ 가진시험: 임계속도 확인 및 등가감쇠비 변화 시험

○ 궤도틀림모사시험: UIC 518 Instability 평가

(바) 동력대차 동적특성시험 시험평가기준서 작성

○ 전동차 대차 및 G7 대차의 Roller Rig 시험 방법과 목표성능 기준의 상관관계 분석을 통하여 Roller Rig 시험 및 평가 절차서 최종(안)을 작성하였고, 시험 및 평가 절차서 최종(안)에는 다음의 항목이 포함됨

- Roller Rig 시험세팅 조건
- 피시험대차 상태 조건
- 시험 방법(비가진, 가진, 궤도틀림모사)
- 시험결과 분석 방법(비가진, 가진, 궤도틀림모사)
- 목표성능 평가 방법 및 기준

○ 대차동특성시험장비를 이용한 피시험대차의 시험을 위하여 윤축 및 대차 부위에 변위센서 및 가속도 센서를 설치하여 각 센서로부터 측정된 신호는 증폭기와 신호변환기(A/D Converter)를 거쳐 데이터 저장장치에 저장되며, 이를 분석하여 평가함. 시험대차의 상태를 모니터링하고 시험항목에 대한 측정과 평가를 수행하기 위하여 윤축 및 대차 부위에서 측정하는 측정항목은 다음 표와 같음

<동력대차 동특성시험 측정항목>

연번	측정 항목	측정 위치	측정 개수
1	전륜축 좌우변위	전륜축 액슬박스	1
2	후륜축 좌우변위	후륜축 액슬박스	1
3	전륜축 좌우 가속도	전륜축 액슬박스	1
4	후륜축 좌우 가속도	후륜축 액슬박스	1
5	전륜축상 대차프레임 좌우 변위	전륜축상 대차프레임	1
6	후륜축상 대차프레임 좌우 변위	후륜축상 대차프레임	1
7	전륜축상 대차프레임 좌우 가속도	전륜축상 대차프레임	1
8	전륜축상 대차프레임 상하 가속도	전륜축상 대차프레임	1
9	후륜축상 대차프레임 좌우 가속도	후륜축상 대차프레임	1
10	후륜축상 대차프레임 상하 가속도	후륜축상 대차프레임	1
11	차체 좌우 가속도	대차중앙 차체프레임	1
12	차체 상하 가속도	대차중앙 차체프레임	1

○ 시험절차서 최종안이 작성되었고, 신규개발 동력대차 시험 시에 사용됨

(사) 신규개발 동력대차 Roller Rig 시험 평가

① 신규개발 동력대차 Roller Rig 시험

○ 신규 개발된 동력대차의 성능 평가를 위한 Roller Rig 시험을 수행함

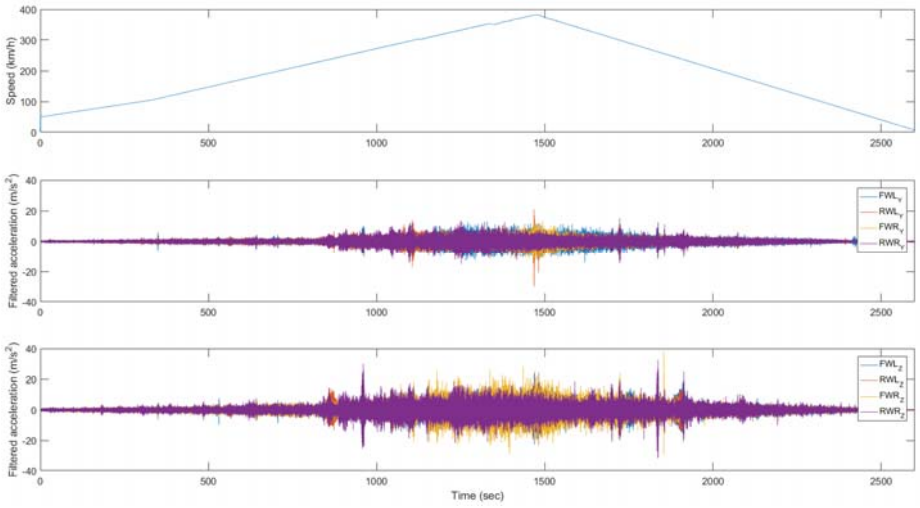


<신규개발 동력대차>

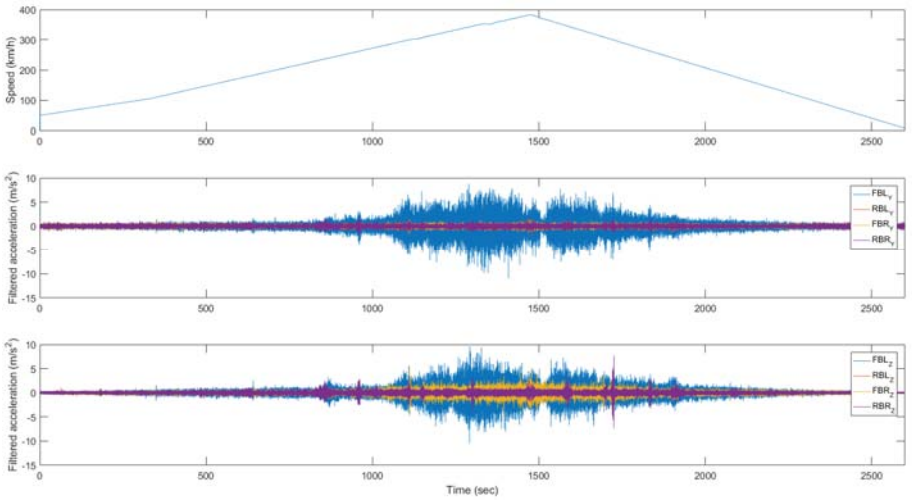


<신규개발 동력대차 롤러리그시험>

○ 신규 개발된 동력대차의 비가진 주행안정성시험 결과 385km/h까지 임계속도는 없음

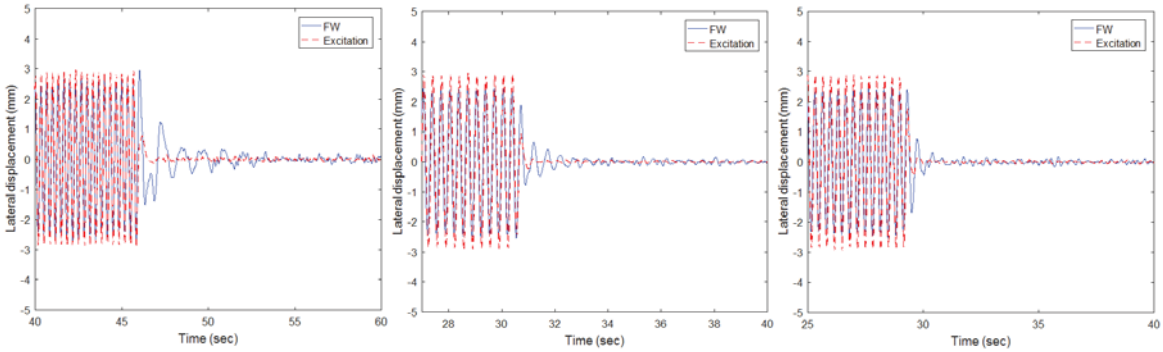


<비가진 주행안정성 시험 결과 (윤축 가속도)>



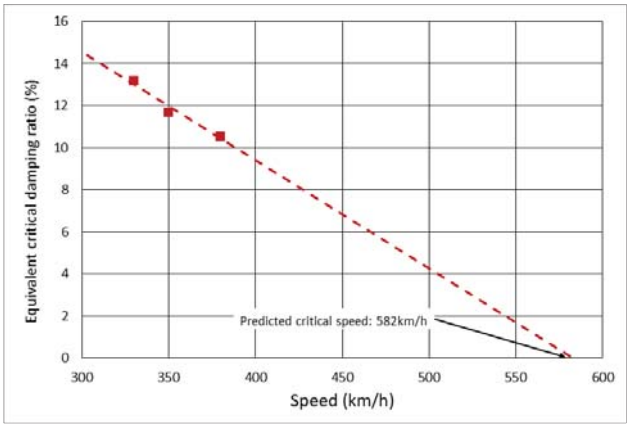
<신규개발 동력대차 비가진 주행안정성 시험(대차프레임 가속도)>

○ 차륜/궤조륜 접촉력에 의한 등가 감쇠비 변화율로 고속 임계속도를 예측하기 위한 정현파 가진시험을 380km/h까지 수행하였음. 예상 임계속도 대역보다 낮은 중·저속에서의 정현파 가진시험으로도 등가 감쇠비 변화율에 따른 임계속도 예측에 성공하였으며 현재 상태 및 Roller Rig 시험장비에서의 신규개발 동력대차의 임계속도는 582km/h 수준으로 예측되었고, 이는 기존 동력대차의 임계속도 468km/h 대비 24.3% 향상되었음



(a) V=330km/h (b) V=350km/h (c) V=380km/h

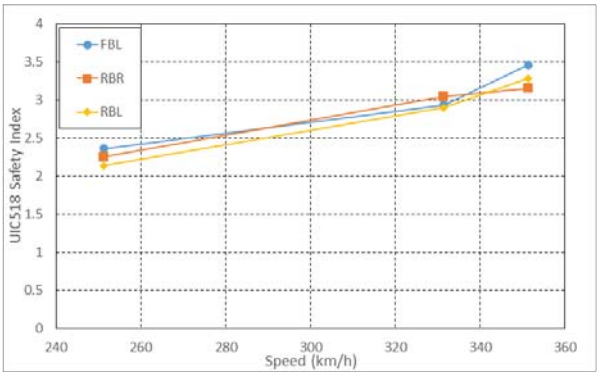
<신규개발 동력대차 정현파 가진에 따른 전위 윤축 횡변위>



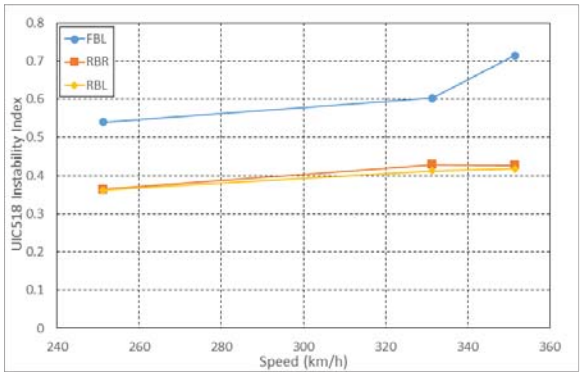
<신규개발 동력대차 임계속도 예측>

② 신규개발 동력대차 실궤도 Roller Rig 주행안정성 시험

○ 실궤도 모사 시험은 250, 330, 350km/h 속도에서 시행하여 각종 센서로부터 수집된 동특성 데이터를 통해 신규개발된 대차의 성능을 평가하기 위하여 수행하였음. 대차프레임 가속도 데이터를 이용하여 UIC 518의 Safety, Instability 평가를 준용하여 분석하였음. 속도에 따라 각 대차프레임 측정위치의 UIC 518 Safety, Instability 지수는 증가하는 것으로 분석되었음



<대차프레임 UIC 518 Safety 지수 변화>



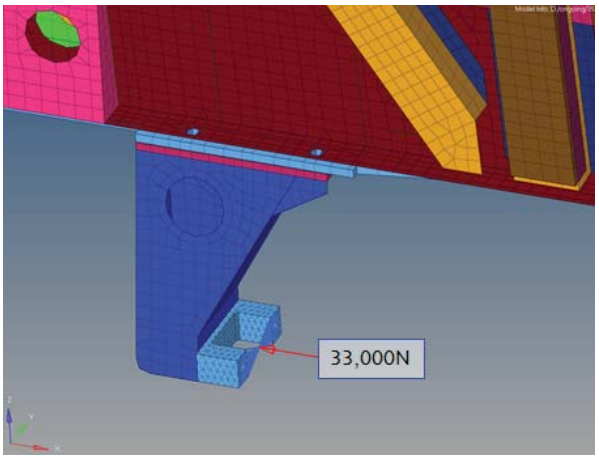
<대차프레임 UIC 518 Instability 지수 변화>

(아) 요댐퍼 댐핑력 증가에 따른 취부대 강도 검토

요댐퍼 댐핑력 증가에 따른 취부대 강성의 적절성에 대하여 2세부과제의 협조를 받아 검토를 수행함

① 하중 조건

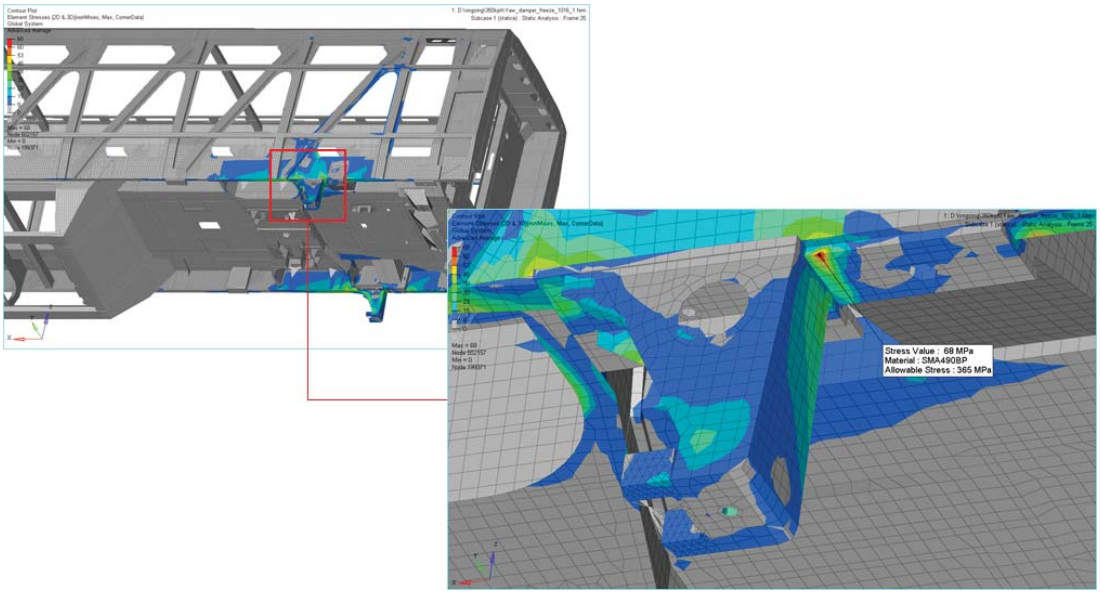
○ 규격 “EN13749 - Railway applications-Methods of specifying structural requirements of bogie frames.- D.2.3 Load resulting from viscous dampers”에 따라 요댐퍼의 정격하중(16,500N @ 0.0026m/s)의 2배인 33,000N 값을 적용함



<요댐퍼 취부대 해석 모델>

② 구조해석

○ 아래와 같이 요댐퍼 하중을 적용한 해석용 모델링을 수행 및 전/후 방향 각각으로 33,000N의 하중을 부가하였을 때 취부대 및 차체의 최대 응력은 허용한도 이내로 안전한 것으로 검토되었음

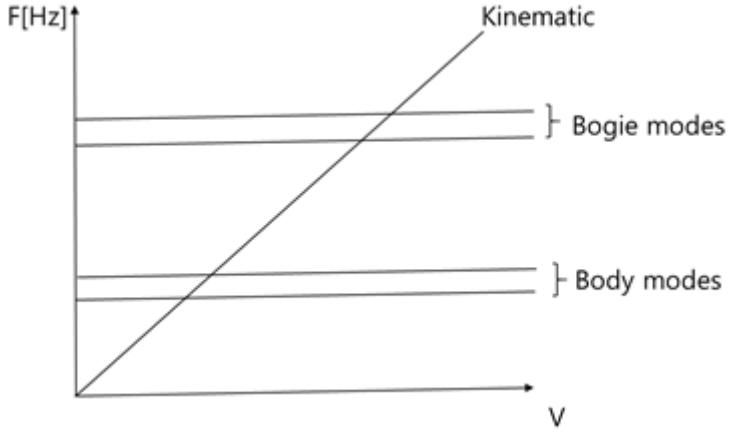


<요댐퍼 취부대 해석 결과>

(자) 임계속도 예측방법의 예측력 제고 및 활용 방안

본 연구를 통하여 개발된 임계속도 예측방법의 예측력 제고 방안을 검토하고, 예측모델이 보다 폭넓게 활용되는 방안에 대해 검토함

○ 철도차량의 차체와 대차를 강체라고 가정하면 고유진동수를 가짐. 또한 윤축은 주행속도에 따라 운동학적인 주파수(Kinematic frequency)가 증가하고 그 관계는 다음 그림과 같음. 주행속도가 증가할수록 윤축의 주파수는 선형적으로 증가하게 되는데 이 때 차체의 고유진동수와 1차적으로 만남. 또한 속도가 계속 증가하게 되면 대차의 고유진동수와 만나는 지점이 생기게 됨. 차체와 대차의 고유진동수와 윤축의 주파수가 만날 때 차체, 대차, 윤축 사이에서는 공진이 발생하고 이를 사행동이라고 함. 또한 이때의 속도를 임계속도(Critical speed)라고 함. 임계속도는 윤축의 운동학적 주파수와 차체 및 대차의 고유진동수 사이의 공진에 의해 발생하므로 시스템 고유의 특성임. 철도차량의 설계 시 이 임계속도는 주행속도보다 높아야만 운행 중에 사행동이 발생하지 않음



<철도차량의 공진 주파수>

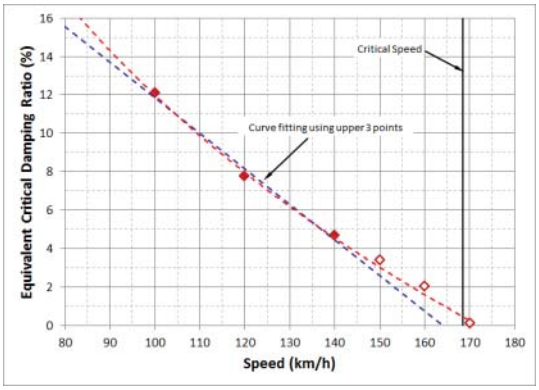
○ 임계속도를 확인하는 방법은 해석적 방법과 실험적 방법이 있음. 해석적 방법은 동역학 해석을 이용하는 방법인데 설계 초기 철도차량의 임계속도가 주행속도보다 높게 있는지 확인하는데 이용됨. 실험적 방법은 대차 동특성 시험기를 이용하여 대차의 임계속도를 확인하는 방법과 실제 차량에서 주행 시 사행동이 일어나는 속도까지 주행시키는 방법인데 후자의 방법은 시험에 따른 위험성이 크기 때문에 주로 대차 동특성 시험기를 이용하여 임계속도를 확인하는 방법이 사용됨. 현재 국내 대차 동특성 시험기의 최고 운영속도는 430km/h 임. 임계속도가 대차 동특성 시험기의 최고 운영속도 내에 있는 전동차용 대차나 일반열차용 대차는 임계속도를 직접 확인할 수 있으나, 이 범위를 벗어나는 고속차량용 대차의 임계속도는 현재 확인이 불가능함

○ 철도차량의 차체와 대차는 스프링, 댐퍼 등의 현가장치로 연결되어 있음. 외부에서 진동이 가해졌을 때 이 현가장치들과 차륜과 레일 사이의 접촉력이 진동을 감쇠시킴. 주행속도가 낮을 때는 외부 진동은 현가장치의 복원력과 차륜/레일 사이의 접촉력에 의해 빨리 감쇠되나(등가 감쇠비가 높음), 주행속도가 높아지면 감쇠되는 속도가 느려짐(등가 감쇠비가 낮음). 주행속도가 임계속도에 도달하였을 때 충분한 외란이 주어지면 열차는 사행동을 일으키고 진동은 감쇠되지 않음(등가 감쇠비는 0이 됨). 현가장치들 또한 시스템의 고유한 특성이기 때문에 속도에 따른 등가 감쇠비의 변화를 이용하여, 등가감쇠비가 0이 되는 임계속도를 예측할 수 있음

○ 본 연구에서는 먼저 임계속도를 알 수 있는 전동차용 대차를 대상으로 등가감쇠비 변화율을 이용하여 임계속도를 예측하는 방법을 개발하였음. 전동차 대차의 롤러리그 시험에서 확인한 실제 임계속도는 169km/h이었음. 아래 그림과 같이 100, 120, 140, 150, 160, 170km/h의 속도에서 정현파 가진시험을 실시하여 등가감쇠비를 구하였는데 이는 시스템의 고유한 특성이기 때문에 속도가 증가함에 따라 등가감쇠비가 감소하게 됨. 등가감쇠비의 속도에 따른 변화를 1차 함수로 가정하여 등가감쇠비가 0인 임계속도는 164km/h로 실제 값과의 차이가 3%이내임을 확인함. 임계속도는 현가장치 등 대차 시스템의 고유한 특성이기 때문에 일정하고, 위의 두 가지 방법으로 구한 임계속도가 유사하기 때문에 개발된 등가감쇠비 변화율을 이용한 임계속도 예측방법은 타당성이 있다고 판단할 수 있음



<전동차 대차 롤러리그 시험>



<전동차 대차 임계속도 예측 결과>

○ 개발된 등가감쇠비 변화를 이용한 임계속도 예측방법을 고속열차 대차에 적용하기 위하여 한국철도기술연구원에서 보유중인 G7 고속열차의 동력대차와 단부대차 등 두 가지 종류의 대차에 대해 아래 그림과 같이 롤러리그 시험을 수행하였음. G7 동력대차에 대한 시험결과 임계속도는 468km/h이었고, 단부대차는 454km/h이었음. 두 대차의 임계속도 차이는 3% 이내로 비슷한데 이는 두 대차의 현가장치 등 시스템 특성이 유사하기 때문임. 따라서, 시스템의 고유한 특성을 이용하는 등가감쇠비 변화율에 따른 임계속도 예측방법은 유용성이 있음을 확인함. 앞에서 동특성 해석을 이용하여 구한 편성 열차의 임계속도는 450km/h 정도였고, 이는 등가감쇠비 변화를 이용하여 구한 단부대차의 임계속도 454km/h와 유사함에 따라, 본 연구에서 개발한 임계속도 예측방법에 대해 해석적 방법으로 검증함



<G7 동력대차 롤러리그 시험>



<G7 단부대차 롤러리그 시험>

○ 개발된 방법을 신규개발 동력대차에 적용하여 롤러리그 시험을 수행하였는데, 신규개발 동력대차의 임계속도는 582km/h로 기존 동력대차 468km/h보다 24.3% 향상되었음. 이는 임계속도를 향상시키기 위하여 실시한 대차 현가장치 시스템에 대한 개선이 효과가

있었음을 검증함. 또한 개선된 현가장치 특성에 의해 임계속도가 높아지는 결과를 보임에 따라, 본 연구에서 개발한 시스템 고유 특성을 이용한 임계속도 예측방법이 유용하다고 판단될 수 있음

○ 본 연구에서는 중량, 축 사이의 거리, 현가장치 구성 및 특성 등이 서로 다른 4가지 대차의 시스템 고유특성인 등가감쇠비 변화율을 이용한 임계속도 예측 방법을 개발하고 유용성을 확인하였으며, 해석적 방법을 통하여 개발된 방법의 정확성을 검증하였음. 등가감쇠비 변화율을 이용한 임계속도 예측방법은 대차 시스템의 고유한 특성을 이용하는 것이기 때문에 정확도가 높고, 타 대차에도 쉽게 적용할 수 있음. 본 연구에서 개발한 임계속도 예측 방법은 4가지 대차에 대해 실험적 검증이 완료되었고, 또한 해석적 방법을 통해서도 검증이 되었음. 임계속도 예측방법의 예측력을 추가로 제고하기 위해서는 임계속도를 알 수 있는 또 다른 종류의 대차(일반차량용 대차)에 대해 실험을 추가적으로 수행하는 방법이 있으며, 향후 동특성 시험기를 이용한 대차의 시험이 진행될 때 본 연구에서 개발한 방법을 적용할 예정임. 이 방법 또한 대차 시스템의 고유한 특성을 이용하는 것이기 때문에 본 연구에서 개발 및 검증한 방법을 그대로 적용하여 임계속도를 예측할 수 있음

○ 본 연구에서 개발된 임계속도 예측방법은 향후 철도연 대차 동특성 시험기에서 진행되는 전동차 대차, 준고속 대차(ITX-새마을 대차 등), 고속차량용 대차(EMU-250 및 EMU-320용 대차 등) 등의 시험 시 폭넓게 활용하여 임계속도 예측방법의 유용성을 확인할 예정임. 현재 철도차량의 형식승인 등의 설계적합성 검사에서는 동특성 해석을 이용하여 임계속도를 예측하고 있는데, 이에 대한 실험적 검증은 없음. 본 연구에서 개발된 임계속도 예측방법을 이용하면 간단한 시험만으로 실험적으로 정확한 임계속도를 예측할 수 있기 때문에 해석적 방법과 상호 보완하여 사용할 수 있으며, 이는 국내 다양한 철도 차량의 임계속도 예측을 통하여 차륜마모 및 차량의 노후화에 대비하는데 활용될 수 있음

4. 소결론

○ KTX-산천의 운영속도를 350km/h까지 상승시키는데 필요한 신규 동력대차를 개발하기 위하여, 설계 파라미터를 해석적 방법으로 검토하고, 현가장치 최적화를 통해 신규 동력대차의 임계속도를 향상시키기 위하여 본 연구를 진행함. 또한, 현재 영업 운행 중인 동력집중식 고속열차에 대해 승차감 개선 요구가 있었으나, 국내 대차 동특성 시험장비의 최고속도는 428km/h이므로 그 이상의 임계속도를 갖는 대차에 대한 임계속도 예측방법 개발이 필요하였음. 연구개발 목표는 KTX-산천 동력대차 대비 임계속도 20% 향상한 신규 동력대차의 개발, 진동가속도 저감을 위한 현가장치 최적화 기술 개발, 시험 비용을 저감하기 위한 임계속도 예측기술을 개발하는 것임

○ 고속차량 주행안정성 수준 분석 및 향상 방안

- 고속차량 주행안정성 수준 분석을 위하여 영업운행 중인 KTX 및 KTX-산천 차량의 객실 및 운전실의 차체가속도 수준을 분석하였음. 객실보다 운전실의 가속도가 더 크게 측정되었음. 이는 객실의 경우 공기스프링을, 운전실의 경우 코일스프링을 2차 현가장치로 사용한 것에 기인한 것으로 사료되었음. 누적주행거리에 따른 주행안정성 특성을 고찰하기 위하여 KTX 및 KTX-산천 차량의 차륜 마모 형상을 측정하였고, 누적주행거리 증가에 따라 등가답면구배가 증가하고, 임계속도는 감소함
- KTX-산천의 주행안정성 향상 방안을 도출하기 위하여 해석모델을 작성하였고, 수치해석을 수행하였음. 임계속도에 영향을 미치는 인자들의 영향을 고찰하였고, KTX-산천 편성 모델에 대한 최적화를 시행한 결과 전체적인 임계속도는 9.4% 정도 개선되는 결과를 보였음

○ 신규 개발 동력대차 설계 검토

- 신규 개발 동력대차 1차 설계안에 대해 해석적으로 검토하고, 개선되어야 할 사항을 정리하여 2세부와 함께 2차 설계안에 반영하는 연구를 수행하였음. 수정 제안된 현가장치 파라미터 및 신규 안티롤바를 추가한 2차 설계안의 해석적 검토 결과 기존 KTX-산천 동력대차보다 임계속도가 21.2% 향상될 것으로 예측되었음. 기존 KTX-산천의 실궤도 주행성능 향상 방안 도출을 위해 최적화를 수행하였고, 그 결과 승차감, 탈선계수, 윤중감소율, 안정성과 관련되는 윤축의 횡방향 변위 등이 포함된 성능지수가 4.4% 향상될 것으로 예측되었음

○ 휠/레일 마찰 마모 성능 향상

- 휠/레일 소재간의 마찰 특성을 고찰하기 위해 왕복 미끄럼 운동방식의 시험기를 이용한 시험을 수행하였음. 미끄럼 실험과 롤링 실험에서 20μm 입자를 주입한 경우 마찰 계수가 약 25 % 가량 증가하였음
- 휠/레일 점착 특성 개선을 위한 새로운 마찰재를 개발하기 위해 상용 마찰재 조성 및 특성을 분석하고, 기존 특허를 회피하기 위하여 금속 분말을 활용한 마찰재 제조 및 성능 평가를 실시하였음. 복합 벌크 마찰재 개발을 위해 금속 분말, 세라믹 분말 및 소결 특성이 우수한 고분자 분말을 혼합하는 비율에 따라 마찰 특성이 다르게 나타났으며, 점착계수를 35% 증가시킬 수 있는 조합을 제시하였음

○ Roller Rig 주행안정성 시험평가

- 신규 개발되는 동력대차의 임계속도는 430km/h 이상으로 예상되며, 한국철도기술연구원에서 보유중인 Roller Rig 시험기(최고속도 428km/h)로는 임계속도를 확인할 수 없을 것으로 사료되었음. 이 문제를 해결하기 위하여 간접적인 방법으로 임계속도를 예측할 수 있는 방안에 대한 연구를 수행하였음. 임계속도를 알 수 있는 전동차 대차에 대해 Roller Rig 시험을

실시하였고, 윤축의 등가 감쇠비 변화율로 임계속도를 예측할 수 있는 방법을 개발하였음. 등가감쇠비 변화로 예측한 임계속도가 164km/h로 실제시험에서 확인한 임계속도 169km/h와 약 3% 오차로 개발된 방법의 정확도를 검증하였음

- 신규 개발되는 동력대차와 비교되는 시험데이터를 확보하기 위하여 기존 동력대차에 대해 Roller Rig 시험을 수행하였고, 등가 감쇠비 변화율을 이용한 임계속도는 468km/h 수준으로 예측되었음. 또한 동력객차용 단부대차의 임계속도 예측치 454km/h와 약 3% 오차 수준으로 임계속도 예측 방법의 효용성을 확인하였음
- 신규 개발된 동력대차에 대한 Roller Rig 시험을 수행하였고, 등가 감쇠비 변화율을 이용한 임계속도는 582km/h 수준으로 예측되었음. 이는 기존 동력대차의 임계속도 예측치 468km/h 대비 24.3% 향상된 결과임

○ 기술개발의 의의

- 본 연구를 통하여 KTX-산천 운행속도를 350km/h로 상승시켜도 주행안정성 및 승차감을 유지할 수 있는 동력대차가 개발되었음. 동력대차 개발과정의 설계 검토 과정에서 대차 현가장치 파라미터에 대한 최적화 기술이 개발되었고, 이는 고속열차 승차감 개선 연구에 이용되고 있음
- 등가 감쇠비 변화율을 이용한 임계속도 예측방법은 최초로 개발된 방법이며, 낮은 속도 영역에서의 시험으로 높은 임계속도를 예측할 수 있어 시험비용을 획기적으로 저감할 수 있을 것으로 기대됨
- 휠/레일 마찰 마모 성능 향상 연구를 통하여 점착계수를 35% 증가시킬 수 있는 새로운 마찰재를 개발하였음. 본 개발품은 향후 마찰재 시장에서 경쟁력이 있을 것으로 사료됨

제3절 고속열차 추진시스템 효율향상 기술개발

1. 효율향상 추진시스템 주전력변환장치 개발

가. 주전력변환장치 기술개발 연구 개요

(1) 주전력변환장치 개발 목표

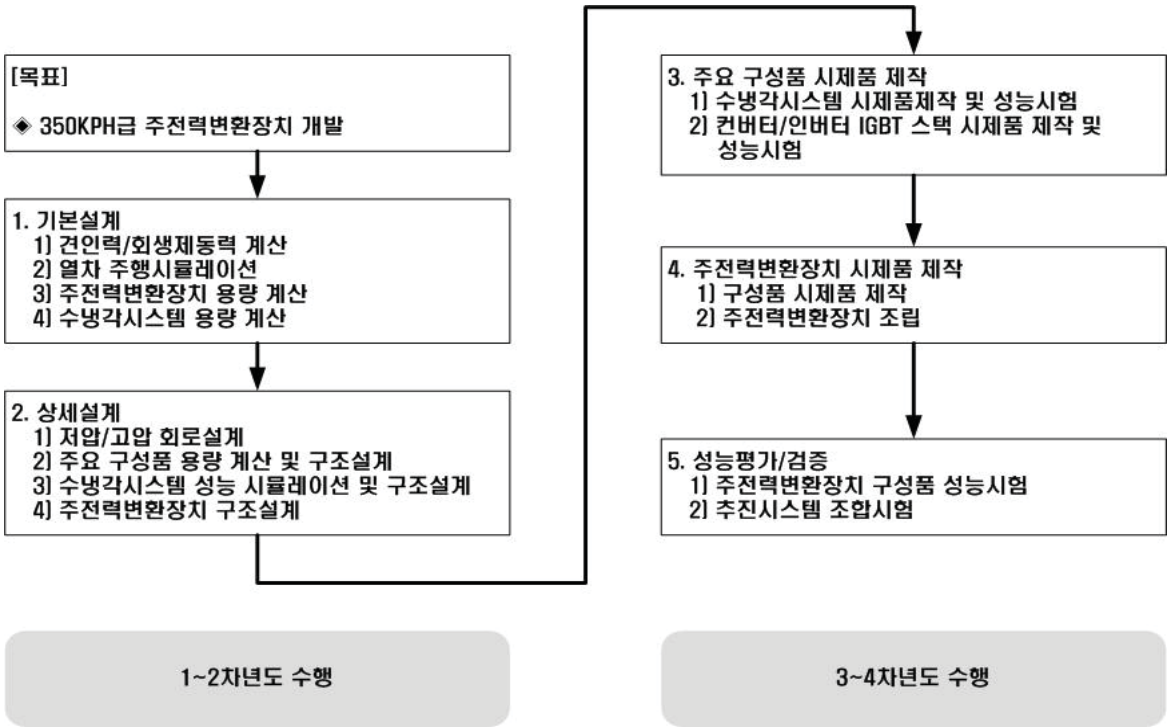
○ 운영 최고속도 향상(300km/h → 350km/h)을 위해, KTX-산천 대비 주전력변환장치 출력 10% 향상
- KTX-산천 주전력변환장치 대비 출력밀도(동일 체적 및 중량 조건) 10% 향상
- KTX-산천 주전력변환장치 용량(2,500kW) → 효율향상 개발 주전력변환장치 용량(2,750kW)

○ 수냉각 시스템 및 1C1M 제어 방식 적용 주전력변환장치 개발
- KTX-산천 강제 공냉 방식 대비 냉각 성능 25% 향상된 수냉각 시스템 개발
- KTX-산천의 1C2M 제어방식 대비, 1C1M 제어방식 적용을 통해 차량 운용 및 유지보수 효율성 증대

(2) 주전력변환장치 연차별 연구 내용



구분 (연도)	연구 내용	연구 수행 내용
1차년도 (2014)	■ 주전력변환장치 기본설계	■ 주전력변환장치 용량 계산 - IGBT, 주요 구성품 사양 선정 ■ 견인력/회생제동력 계산 ■ 열차 주행 시뮬레이션 및 소비전력 계산 ■ 냉각용량 계산 및 냉각시스템 기본 설계 - IGBT 발열 계산 및 수냉각판 해석 ■ 주회로 설계
2차년도 (2015)	■ 주전력변환장치 기본설계 ■ 주전력변환장치 상세설계	■ 수냉각시스템 해석 및 상세설계 - IGBT 스택 설계 - 수냉각판 상세설계 및 시제품 제작 - 방열기, 냉각팬, 냉각수 펌프 사양검토 및 시제품 제작 ■ 인터페이스 사양 및 제어회로 설계 ■ 주요 구성품 용량계산 및 상세설계
3차년도 (2016)	■ 주전력변환장치 상세설계 ■ 주요 구성품 제작 및 시험	■ 주전력변환장치 2D/3D 모델링 ■ 컨버터/인버터 IGBT 스택 시제품 제작/성능시험 ■ 수냉각시스템 시제품 제작/성능시험 ■ 주요 구성품(VTI, DC/DC, 제동저항 등) 시제품 제작
4차년도 (2017)	■ 주전력변환장치 제작 ■ 주전력변환장치 구성품시험 ■ 추진시스템 조합시험	■ 주전력변환장치 Box 조립 ■ 주전력변환장치 구성품시험 ■ 추진시스템 조합시험



<기술개발 설계 프로세스>

(3) 주전력변환장치 특장점 및 설계 개선사항

○ KTX-산천 주전력변환장치 대비 본 과제에서 개발하는 주전력변환장치의 주요 특장점은 다음과 같음

구분	KTX-산천 주전력변환장치 (기존품)	효율향상 주전력변환장치 (개발품)	개발품 특징(장점)
용량	용량: 2,500kW (1,250kW x 2)	용량: 2,750kW (1,375kW x 2)	용량 10% 향상
냉각방식	강제 공랭식(64kW)	강제 공랭식(80kW)	냉각 용량 25% 향상
제어방식	1C2M 제어방식	1C1M 제어방식	- 공전활주 제어 성능 및 운용 안정성 향상 - 유지보수성 향상(차륜경 관리 비용↓)
IGBT 스택 체적	IGBT 스택 체적: 458 x 500 x 400mm	IGBT 스택 체적: 270 x 360 x 465mm	IGBT 스택 체적 감소 : 약 50% 수냉각방식 및 스너버 커패시터 미적용
Box 치수	2800 x 1500 x 2340mm	좌동	
중량	3800 kg	4010 kg	
외형			
KTX 산천		효율향상과제 개발품	
			

○ 개발한 주전력변환장치는 기존 주전력변환장치와 기구적, 전기적으로 호환이 가능하고, 기존 2500kW의 출력용량을 2750kW로 10% 증대해 차량의 운용속도를 높일 수 있으며, 수냉각 방식을 적용해 약 25% 향상된 냉각 성능을 발휘하도록 개발됨

○ 신규 개발품의 출력용량이 10% 증대하였으며, 기존 차량에 설치할 경우 주변 부품·장치(케이블 등)은 변경 없이 사용 가능함

구분	케이블 사양(전압/허용전류)	KTX-산천	효율향상과제
컨버터 입력 단	185sq(3600V/722A) × 2	893A	982A
인버터 출력 단	185sq(3600V/722A) × 1	360A	391A

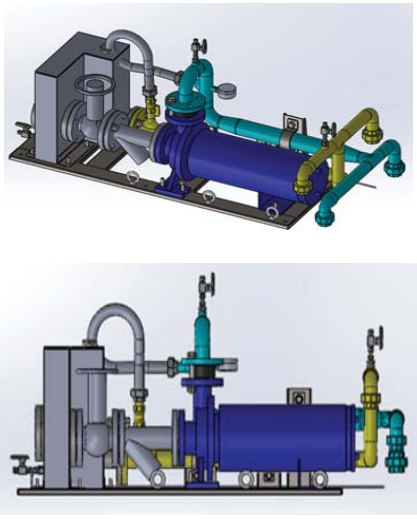
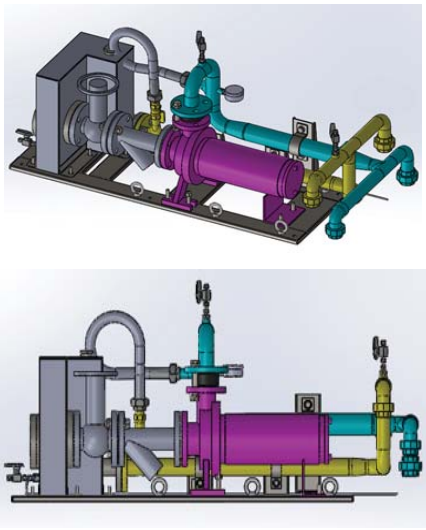
- 컨버터 입력 단 케이블 사양 : 185SQ(허용전류 : 722A x 2 = 1,444A)
  = 1,444A(케이블 허용전류) - 982A(효율향상 과제 개발품 정격용량) = 462A(여유분)
- 인버터 출력 단 케이블 사양 : 185SQ(허용전류 : 722A)
  = 722A(케이블 허용전류) - 391A(효율향상 과제 개발품 정격용량) = 331A(여유분)
- 기존 차량에 설치되어 있는 케이블 허용전류 대비 효율향상 과제의 개발품의 정 격용량 비교 결과 기존 케이블을 사용하는 것은 문제가 없음을 확인하였음

○ 본 과제에서 개발한 주전력변환장치에 수냉각 시스템이 적용되면서 냉각수가 80ℓ(약 80kg) 추가되었으며, 송풍팬 인버터 및 송풍기 불량을 개선하기 위한 DC/DC 컨버터 장치(48kg) 2개조가 추가로 설치되었기 때문에 KTX-산천의 주전력변환장치 대비 약 5% 정도의 중량이 증가된 것으로 판단됨

○ 본 과제의 개발품의 중량이 KTX-산천 주전력변환장치 대비 증가된 사항을 개선 하기 위해 다음의 설계 개선을 수행함

○ 냉각수 펌프 용량 최적화

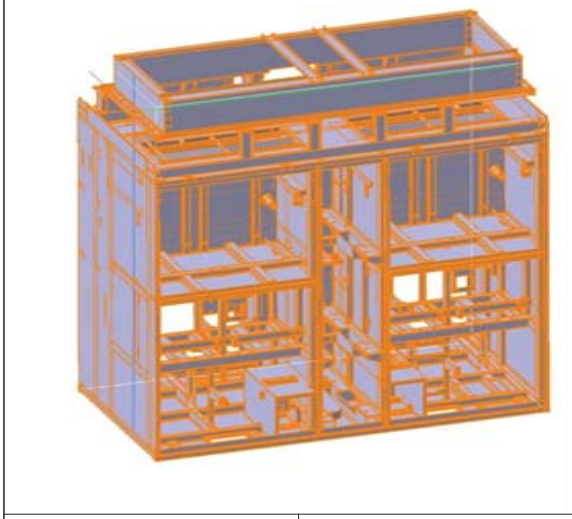
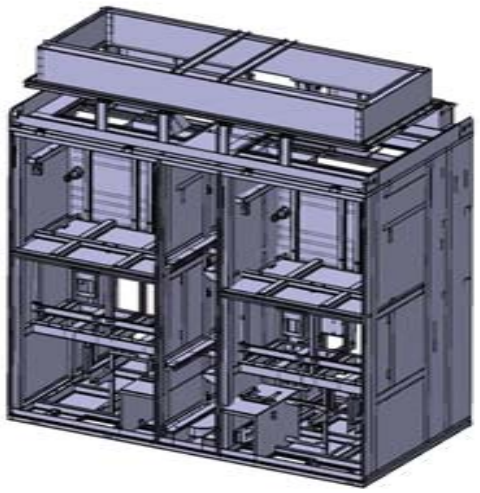
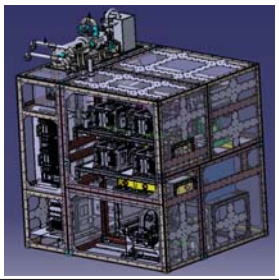
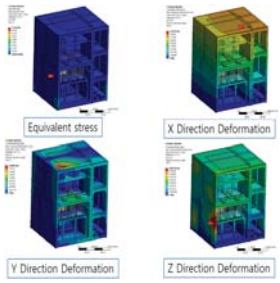
주전력변환장치 구성품 시험(냉각시스템 성능시험, 온도상승시험) 결과, 최초 선정된 냉각수 펌프의 용량에 약 25%의 여유가 있는 것으로 판단되며, 냉각수 펌프의 용량을 8.1kW에서 6.5kW로 변경하여 냉각수 펌프 유니트를 재 설계 할 경우, 약 30kg의 중량 감소가 기대됨

냉각수 펌프 변경 전(8.1kW, 101kg)	냉각수 펌프 변경 후(6.5kW, 70kg)
	
냉각수 펌프의 용량 최적화를 통해 약 30kg의 중량 절감	

○ 알루미늄 재질의 주전력변환장치 외함 개발

외함 구조설계 프로그램을 이용하여 기존 외함 제작에 적용된 SPHC 철재를 용접하는 방식과 알루미늄(AL, 판재 :5051 압출재 :6061 적용) 재질을 이용하여 리벳 조립 구조에 대한 중량을 비교・검토한 결과 알루미늄 재질로 외함을 제작 시 약 25%의 중량 절감이 기대됨. 최근 해외 철도 차량용 전장품의 트랜드는 전장품의 중량을 저감하기 위해 소형 전장품을 위주로 외함의 재질에 알루미늄(AL)을 적용하는 사례가 증가하고 있음. 본 과제를 통해 중장기적 관점에서 Cubicle 형태의 주전력변환 장치 외함에 알루미늄 재질의 적용 가능성 및 제작 상 문제점 등을 선행 연구하기 위해 주전력변환장치 외함의 구조를 알루미늄 재질에 적합하도록 재설계하고 구조해석을 수행함

구조해석 결과를 검증하기 위해 1/2 크기의 알루미늄 외함 시제품을 제작하고 진동 및 충격시험을 실시함

<table>
<tr><td colspan="2">기존 SPHC 재질(용접구조, 1300kg)</td><td colspan="2">알루미늄 재질(리벳구조, 약 980kg)</td></tr>
<tr><td colspan="4">알루미늄 재질 적용 시 Box 프레임의 중량을 약 25% 절감 효과가 기대됨</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>AL 외함 모델링</td><td>AL 외함 구조해석</td><td>AL 외함 제작</td><td>AL 외함 진동시험</td></tr>
<tr><td>  </td><td> 
</td><td>  </td><td>  </td></tr>
</table>

○ 본 과제에서 개발하는 주전력변환장치는 기본설계 단계에서부터 KTX-산천 영업운행 중 발생한 불량사항을 확인 및 검토하여 설계 개선사항을 아래와 같이 반영함

KTX-산천 주전력변환장치 (기존품)	효율향상 주전력변환장치 (개발품)	개발품 특징(장점)
- 송풍팬 인버터 및 송풍기 불량	- DC/DC 컨버터 신규 적용송풍팬 방식 변경 (Radial → Axial 방식)	- DC/DC 컨버터 신규 적용을 통해 송풍팬용 전원 안정화 및 송풍기 내구성 개선 기대
- 스너버 적용 IGBT 스택 구조	- 스너버 미적용 IGBT 스택 구조	- IGBT 스택 컴팩트화 및 먼지 등에 의한 고장률 감소
- 강제 공랭식 구조 (내부 먼지 유입 多)	- 강제 수냉식 구조 (내부 먼지 유입 無)	- 수냉각 방식 적용에 따라, 방열기 및 송풍팬 설치 공간 외, 주요 구성품 설치 공간에 외부 먼지 유입 차단 → 유지보수성 향상 및 고장률 감소 기대

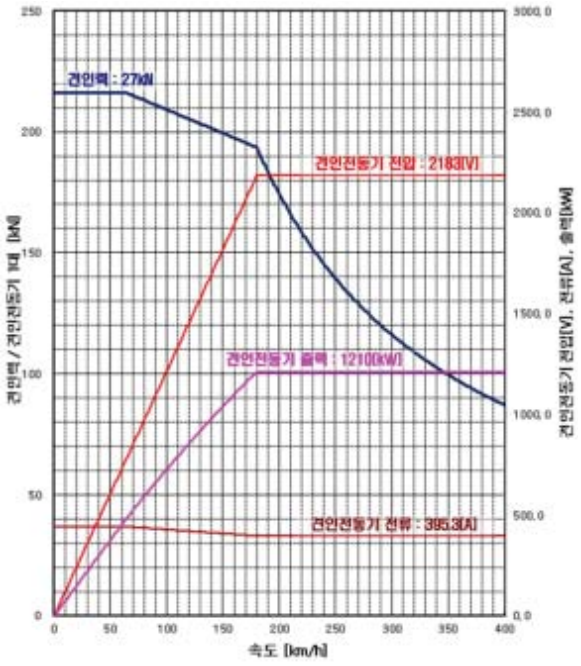
나. 주전력변환장치 기본설계 및 상세설계

○ 기본설계를 수행하는 과정에서 고속차량의 운영 최고속도를 향상하기 위해 견인전동기에 요구되는 견인력 및 회생제동력과 추진시스템의 용량에 대해서 검토 및 계산을 수행함

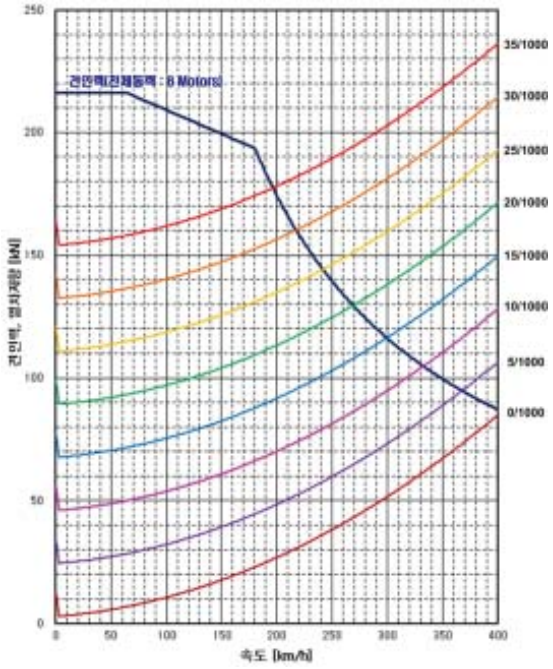
○ 본 연구에서 개발하는 추진시스템의 성능 및 용량은 KTX-산천의 견인력 및 회생제동력 요구사양과 동일한 조건에서 차량이 설계 최고속도 385km/h까지 운행이 가능하고, 전체동력의 75% 만으로도 국내 고속철도 및 기존철도 선형의 어느 위치에서 정지 상태에서부터 출발이 가능한 견인력 계산 및 검토결과를 근거하여 선정됨

○ 상기 조건을 만족하는 최대 견인력은 216[kN]이며, 견인전동기당 요구되는 최대 출력은 1,210[kW]로 본 과제에서 목표하는 성능을 만족하기 위해서는 KTX-산천의 견인전동기 용량(1,100[kW]) 대비 10% 출력용량 증대가 필요함

○ 아래 그림에 견인전동기 1대에 해당하는 견인전동기 특성 곡선 및 전체 편성 동력에서 견인력 곡선과 구배에 따른 열차 저항 계산 결과를 나타냄



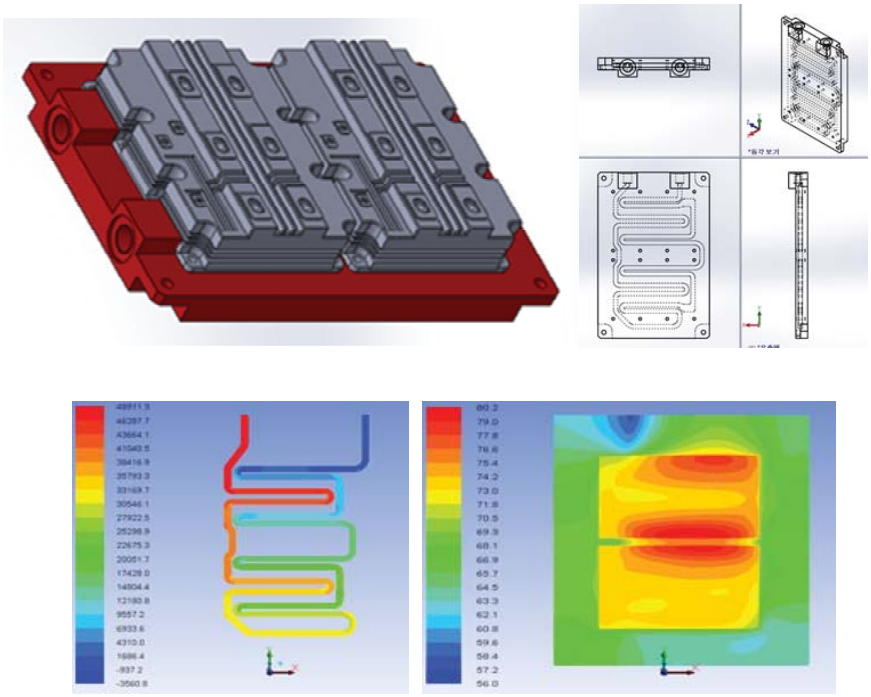
<견인전동기 특성 곡선(견인 시)>



<견인력 및 구배별 열차저항 곡선>

○ KTX-산천 대비 주전력변환장치의 출력 용량이 10% 증가하였으므로, 주전력변환장치의 냉각시스템을 강제수냉각 방식으로 적용하고 냉각용량을 향상시키기 위한 설계를 수행함

○ 수냉각판의 기본설계와 유동해석 프로그램을 이용한 성능해석을 수행함



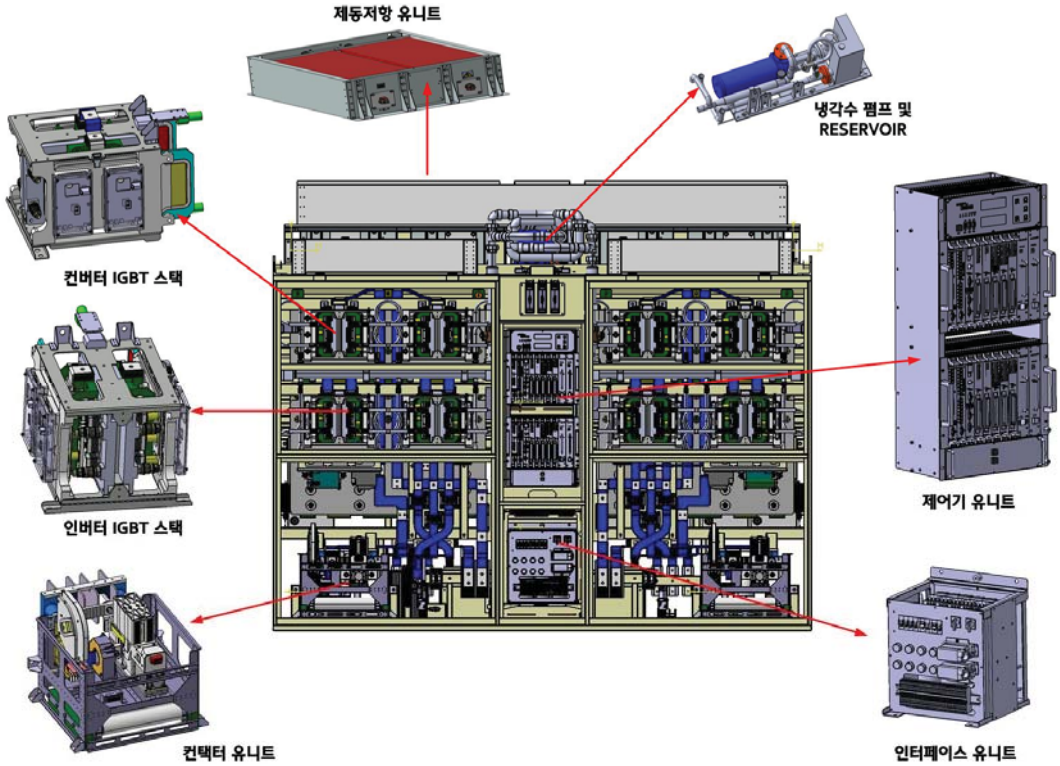
<수냉각판 모델링 및 해석 결과>

○ 추진시스템 용량 목표 달성을 위한 냉각시스템 설계

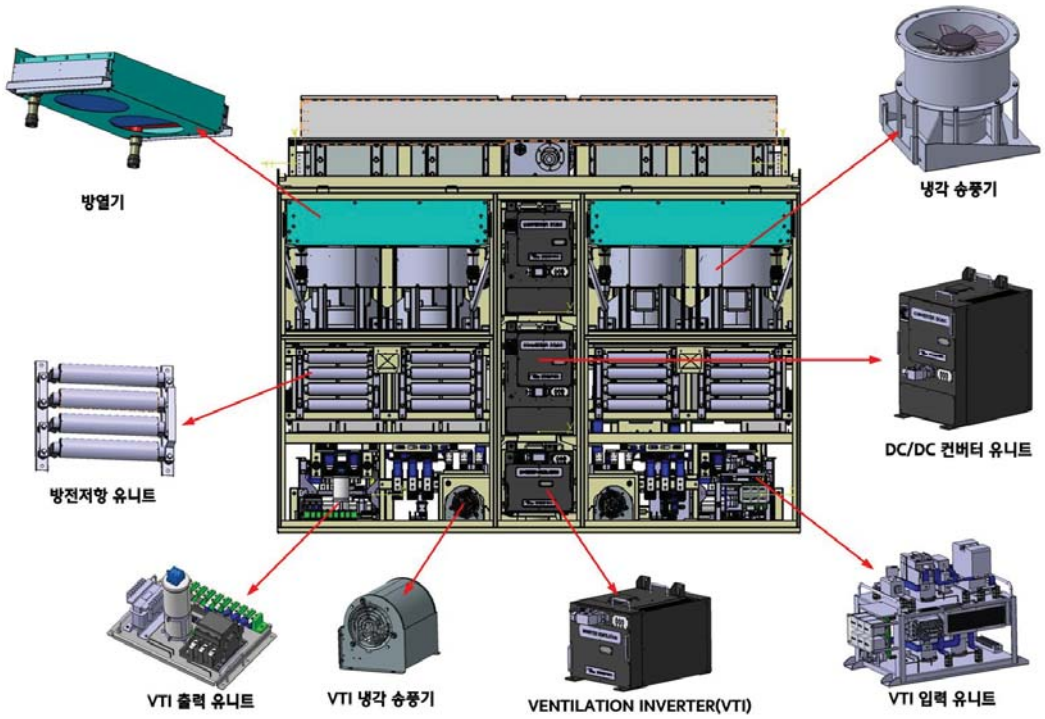
- 추진시스템 용량 향상을 위해서는 주전력변환장치 IGBT에 흐르는 전류량 증가로 IGBT 스위칭 동작 시 발생하는 발열량이 증가함에 따라 냉각시스템 용량 및 냉각방식에 대한 검토를 수행함
- 기본설계 수행 중 해외 기술사례 및 선행기술 조사 결과, TGV POS의 경우 냉각 효율을 향상시키고, IGBT 스택의 소형화를 구현하기 위해 주전력변환장치에 강제수냉식을 적용한 사례를 확인함
- KTX-산천 주전력변환장치 대비 IGBT의 발열량이 약 33% 증가하였기 때문에 냉각시스템의 냉각 용량 증대가 필요하였으며, KTX-산천의 주전력변환장치와 동일한 체적 내 냉각시스템의 용량을 25% 증대시키고 이를 구현하기 위해 냉각방식을 강제 공랭식에서 강제 수냉식으로 변경하여 개발함
- IGBT 소자 발열량 및 냉각시스템 비교

항목	KTX-산천 주전력변환장치(기존품)	효율향상 주전력변환장치(개발품)	비고
IGBT당 발열량	1,591 [W]	2,128 [W]	
냉각용량	64kW (2.0kW x 32 IGBT)	80kW (2.5kW x 32 IGBT)	
설계 여유율	약 25%	약 17%	
냉각방식	강제 공랭식	강제 수냉식	

○ 1~2차년도에서 수행한 기본설계 및 상세설계 결과를 바탕으로 주전력변환장치 주요 구성품의 사양 확정 및 상세설계 도면을 작성하였음



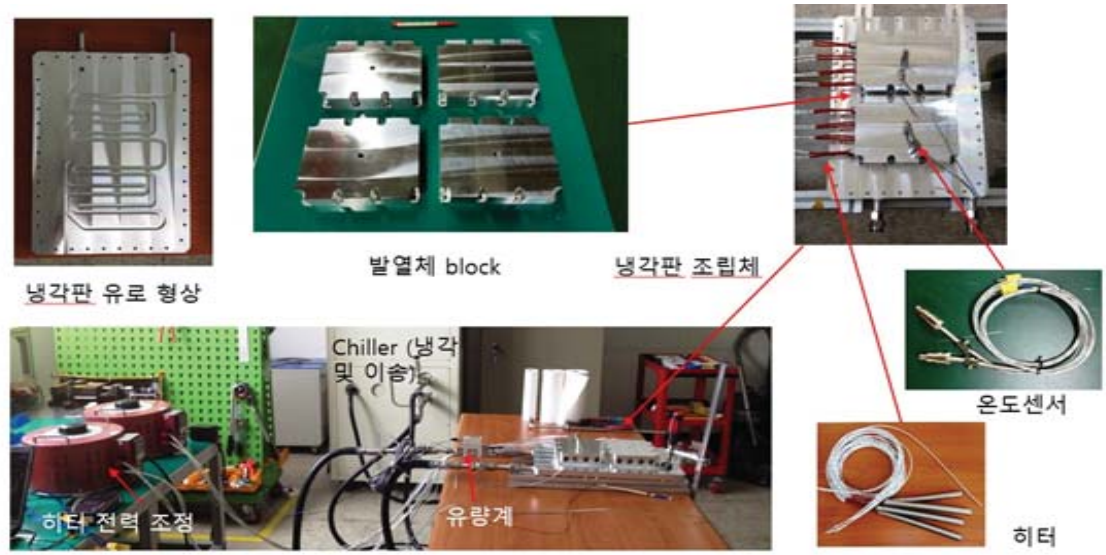
<주전력변환장치 Box 전면 기기 배치 및 주요 구성품 모델링>



<주전력변환장치 Box 후면 기기 배치 및 주요 구성품 모델링>

다. 주전력변환장치 구성품 제작 및 시험

○ 1차년도에서 수행한 수냉각판 기본설계 및 해석결과를 바탕으로 수냉각판의 시제품을 제작하고 성능시험을 통해 유동해석 결과와 비교 및 냉각성능을 확인함

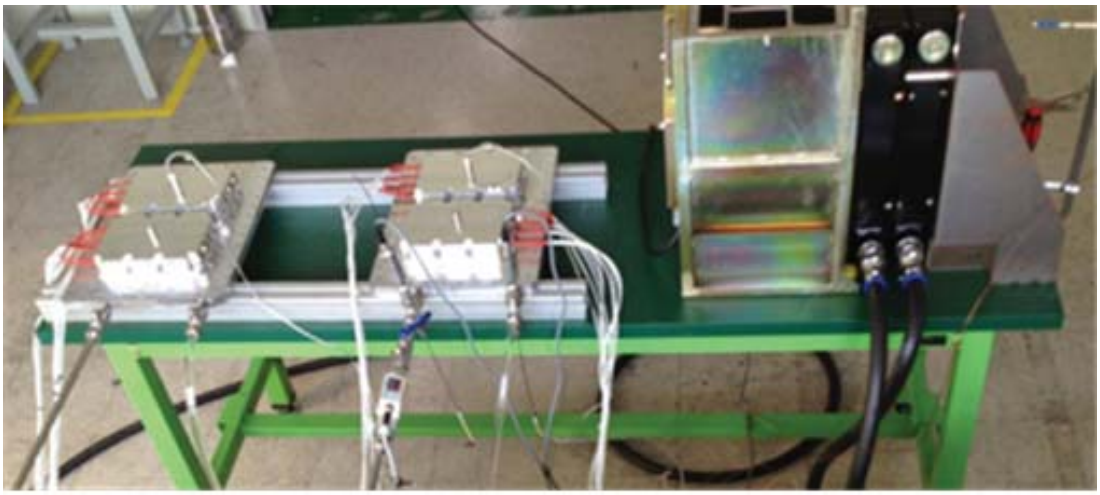


<수냉각판 성능시험 구성>

○ 또한 수냉각시스템을 구성하는 방열기, 펌프, 송풍기의 사양을 검토하고 시제품을 제작하여 단품의 성능시험을 수행함

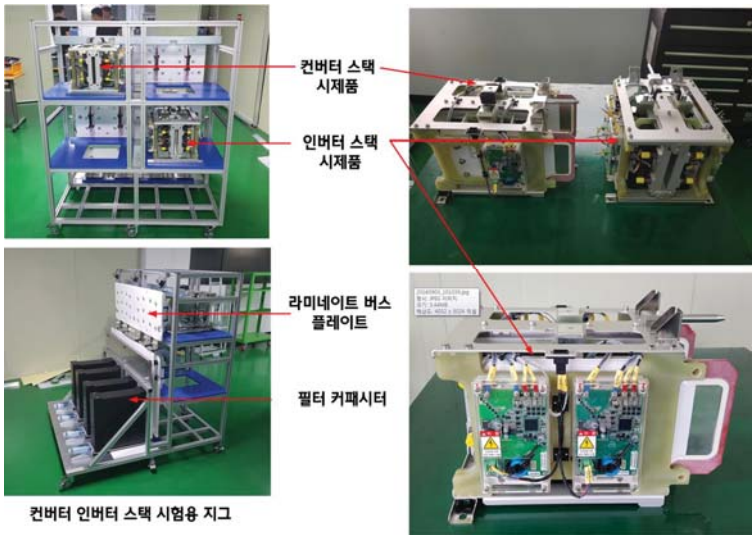
○ 수냉각 시스템 성능 예측을 위한 시스템 모델링 및 해석을 수행함

○ 제작된 시제품을 조합하여 성능시험을 실시하고 해석결과와 시험결과를 검증함

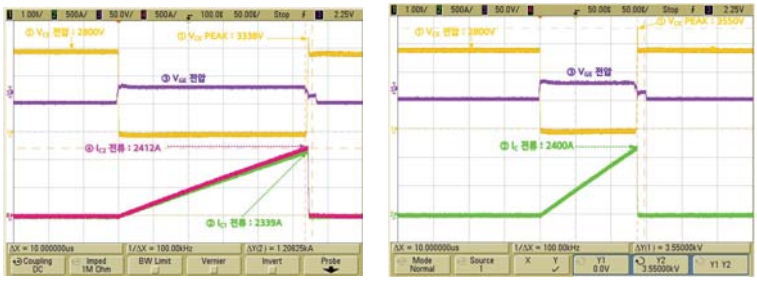


<수냉각시스템 구성품 조합시험>

○ 컨버터/인버터 IGBT 스택 시제품을 제작하고 성능시험을 실시하였으며, 시제품의 성능이 설계 사양을 만족함을 확인함

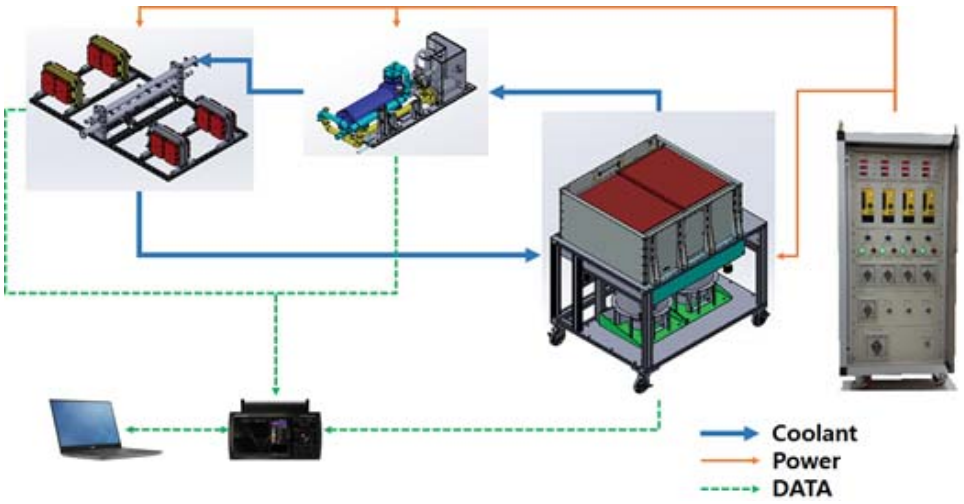


<컨버터 및 인버터 IGBT 스택 시제품 및 구성품 시험용 지그 제작 사진>



<컨버터 및 인버터 IGBT 스택 시제품 시험결과>

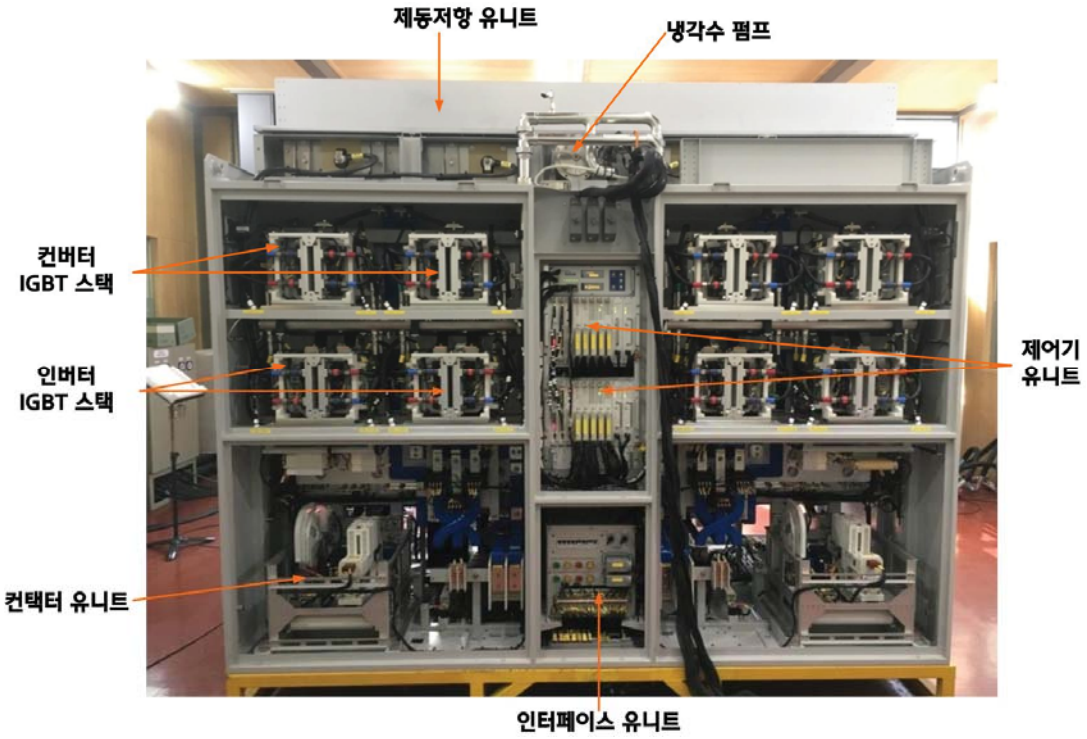
○ 2차년도에 제작한 수냉각 시스템 시제품의 구조 최적화 및 성능을 보완하여 2차 시제품을 제작하였으며, 수냉각 시스템을 조합하여 성능시험을 실시하여 설계 사양을 만족함을 확인함



<수냉각 시스템 조합시험 구성도>

라. 주전력변환장치 시제품 제작 및 형식시험

○ 1차년도 ~ 3차년도까지 수행된 상세설계 및 시제품제작 결과를 바탕으로 주전력변환장치 Box를 제작 완료함



<주전력변환장치 Box 시제품 전면>

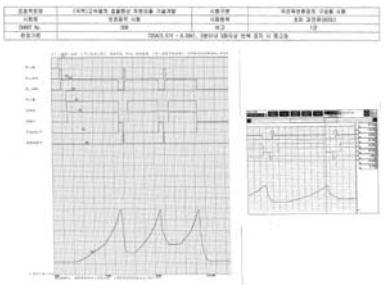


<주전력변환장치 Box 시제품 후면>

○ 공인기관에 제3자 검증을 의뢰하여 제작된 주전력변환장치의 구성품 시험을 실시하였으며 철도안전법에 규정된 성능시험 기준을 입증함

[표] 시험•검사 항목 및 결과

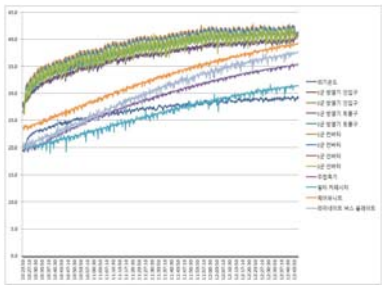
순번	검사•시험 항목	시험규격	결과
1	외관 검사	IEC 61287-1, 4.5.3.1	합격
2	중량 측정 시험	IEC 61287-1, 4.5.3.3	합격
3	치수 측정 시험	IEC 61287-1, 4.5.3.2	합격
4	절연저항 측정시험	KSR 9197	합격
5	내전압 시험	KSR9197	합격
6	냉각시스템 성능시험	IEC 61287-1, 4.5.3.5	합격
7	냉각수 누설 시험	IEC 61287-1, 4.5.3.5	합격
8	제어전원(DC 72V)특성시험	-	합격
9	IGBT 게이트 구동 회로 시험	-	합격
10	전류(Commutation) 시험	IEC 61287-1, 4.5.3.11	합격
11	초퍼회로 가압시험	-	합격
12	보호동작 시험	IEC 61287-1, 4.5.3.9	합격
13	시퀀스 시험	-	합격
14	경부하 시험	IEC 61287-1, 4.5.3.10	합격
15	안전요구 시험	IEC 61287-1, 4.5.3.17	합격
16	온도상승 시험	IEC 61287-1, 4.5.3.13	합격
17	환경 시험(저온,고온)	KS C IEC 60068-2-1,2	합격
18	전자파 시험	EN50121-3-2	합격
19	진동 및 충격시험	IEC 61373	합격



[보호동작 시험 결과]



[내전압 시험]



[온도상승시험 결과]



[진동/충격 시험]



[전자파 시험]

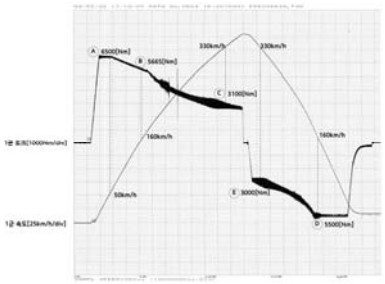


[환경시험]

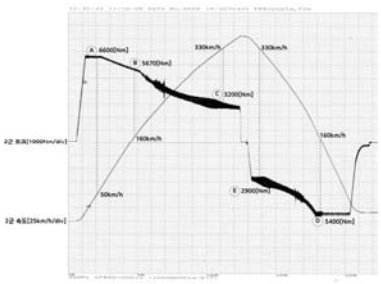
○ 공인기관에 제3자 검증을 의뢰하여 제작된 추진시스템 조합 시험을 실시하였으며, 제작된 주전력변환장치와 견인전동기의 성능을 입증함

<조합시험 항목 및 결과>

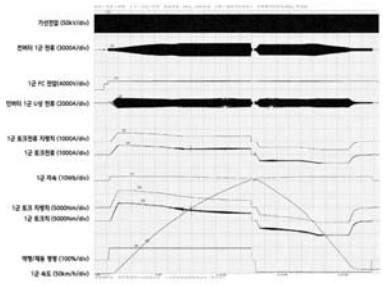
순번	검사•시험 항목		시험규격	결과
1	토크 특성 시험	전동기 냉각상태	IEC 61377 5.4.1	합격
2		전동기 발열상태		합격
3	보호시스템 시험	제어전원 변동	IEC 61377 5.5.1	합격
4		제어전원 차단		합격
5		가선전압 변동		합격
6		가전전압 차단(정전)		합격
7	효율 측정 시험		IEC 61377 5.4.2	합격
8	역률 측정 시험		-	합격



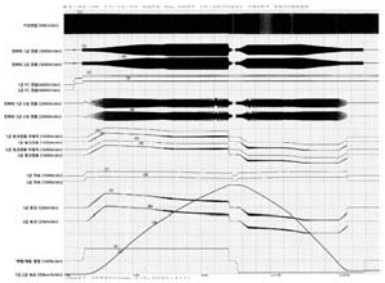
[1군 토크 특성 시험 결과]



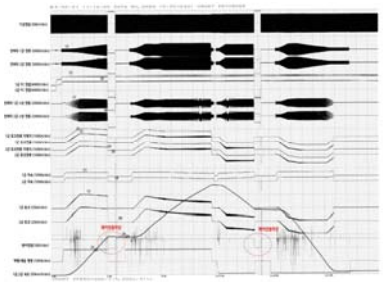
[2군 토크 특성 시험 결과]



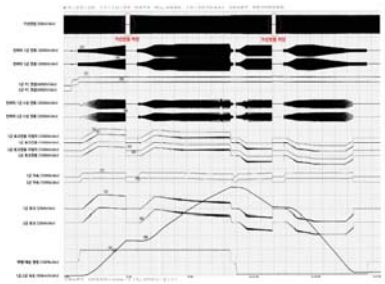
[토크 특성 시험 결과]



[제어전원 변동 시험 결과]



[제어전원 차단 시험 결과]



[가선전원 차단 시험 결과]



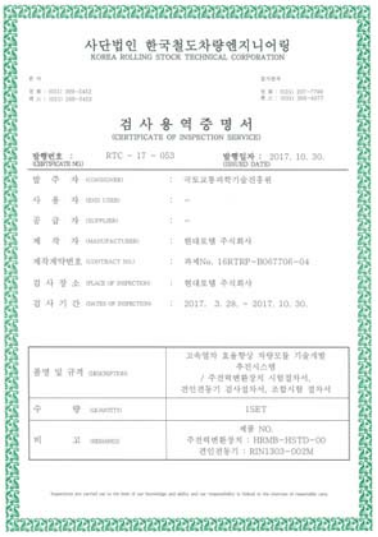
[조합 시험]



[조합 시험]



[효율 및 역률 측정시험 결과]



사단법인 한국철도차량엔지니어링
KOREA ROLLING STOCK TECHNICAL CORPORATION

검 사 용 역 증 명 서
(CERTIFICATE OF INSPECTION SERVICE)

발행번호 : RTC - 17 - 053 발행일자 : 2017. 10. 30.

발 주 자	국토교통과학기술진흥원
사 용 자	-
공 급 자	-
제 작 자	현대로템 주식회사
계약계약번호	과제No. 16KTRP-B067706-04
검 사 장 소	현대로템 주식회사
검 사 기 간	2017. 3. 28. ~ 2017. 10. 30.

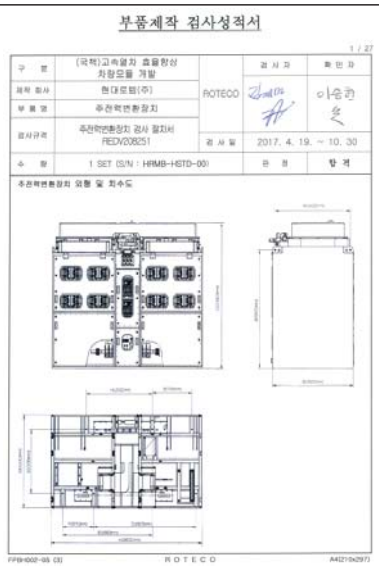
품명 및 규격	고속열차 효율향상 차량모듈 기술개발 주전식스템 / 주전력변환장치 시험검사서, 견인전동기 검사성적서, 조립시험 결과서
수 량	1SET
비 고	제품 NO: 주전력변환장치 : HRMB-HSTD-00 견인전동기 : RIN1303-002M



검 사 사 항 (Inspections)

1. 공정및지수검사 : 양 호 (검사기록서와 같음)
2. 외관및구조검사 : 양 호 (검사기록서와 같음)
3. 성능및작동검사 : 양 호 (검사기록서와 같음)
4. 품 질 검 사
5. 조 립 검 사 : 양 호 (검사기록서와 같음)
6. 도 장 검 사 : -
7. 표 기 검 사 : -
8. 중량및주요치수 : 자중 - 양호(검사기록서와 같음)
9. 시 운 전 검 사 : -
10. 포 장 검 사 : -
11. 초 유 자 격 상 검 사 : -

검토 한국철도차량엔지니어링 이사장



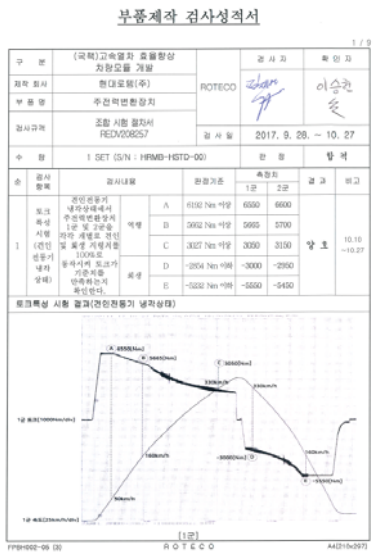
부품제작 검사성적서

1 / 27

구 분	(국책)고속열차 효율향상 차량모듈 개발		검사자	확인자
제작 회사	현대로템(주)	ROTECO		이승관
부 품 명	주전력변환장치			
검사규격	주전력변환장치 검사 절차서 RECV208251	검 사 일	2017. 4. 19. ~ 10. 30	
수 량	1 SET (S/N : HRMB-HSTD-001)	판 정	합 격	

주전력변환장치 외형 및 치수도

FPBH002-05 (3) ROTECO A4(210x297)



부품제작 검사성적서

1 / 9

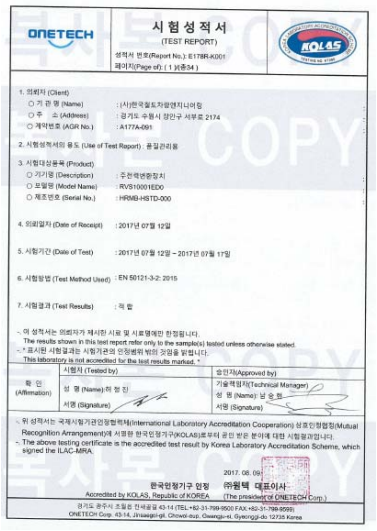
구 분	(국책)고속열차 효율향상 차량모듈 개발		검사자	확인자
제작 회사	현대로템(주)	ROTECO		이승관
부 품 명	주전력변환장치			
검사규격	조립 시험 절차서 RECV208257	검 사 일	2017. 9. 28. ~ 10. 27	
수 량	1 SET (S/N : HRMB-HSTD-00)	판 정	합 격	

순	검사항목	검사내용		판정기준	측정치 1군	측정치 2군	결과	비고
1	토크 특성 시험 (견인 전동기 냉각 상태)	견인전동기 냉각장치에서 주전력변환장치 1군 및 2군을 각각 개별로 견인 및 회생 거행커로 100%로 동작시켜 도크가 기준치를 만족하는지 확인한다.	역행 A	6192 Nm 이상	6550	6600	양 호	10.10 ~10.27
			B	5992 Nm 이상	5965	5700		
			C	3027 Nm 이상	3050	3150		
			회생 D	-2804 Nm 이하	-3000	-2950		
			E	-5332 Nm 이하	-5550	-5450		

토크특성 시험 결과(견인전동기 냉각상태)

(1군)

FPBH002-05 (3) ROTECO A4(210x297)



ONETECH

시험성적서
(TEST REPORT)

성적서 번호(Report No.): E178R-K001
페이지(Page of): (1)/(총54)

1. 의뢰자 (Client)
○ 기 관 명 (Name) : (사)한국철도차량엔지니어링
○ 주 소 (Address) : 경기도 수원시 장안구 서부로 2174
○ 계약번호 (AGR No.) : A177A-001

2. 시험성적서의 용도 (Use of Test Report) : 품질관리용

3. 시험대상품목 (Product)
○ 기기명 (Description) : 주전력변환장치
○ 모델명 (Model Name) : RVS1000 1ED0
○ 제조번호 (Serial No.) : HRMB-HSTD-000

4. 의뢰일자 (Date of Receipt) : 2017년 07월 12일

5. 시험기간 (Date of Test) : 2017년 07월 12일 ~ 2017년 07월 17일

6. 시험방법 (Test Method Used) : EN 50121-3-2: 2015

7. 시험결과 (Test Results) : 적 합

- 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
The results shown in this test report refer only to the sample(s) tested unless otherwise stated.
- * 표시된 시험결과는 시험기관의 인정범위 밖의 것입니다.
This laboratory is not accredited for the test results marked, *

	시험자 (Tested by)	승인자(Approved by)
확 인 (Affirmation)	성 명 (Name):허 정 진	기술책임자(Technical Manager) 성 명 (Name): 남 승 호
	서명 (Signature)	서명 (Signature)

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인 받은 분야에 대한 시험결과입니다.
- The above testing certificate is the accredited test result by Korea Laboratory Accreditation Scheme, which signed the ILAC-MRA.

2017. 08. 09.
한국인정기구 인정 (주)ONETECH 대표이사
Accredited by KOLAS, Republic of KOREA (The president of ONETECH Corp.)

경기도 광주시 초월읍 인세윤길 43-11 (TEL+82-31-799-9500 FAX:+82-31-799-9599)
ONETECH Corp. 43-11, Inseyun-gil, Chowol-eup, Gwangju-si, Gyeonggi-do 12735 Korea



시 험 성 적 서

Dt&C

(주)디티앤씨
17042 경기도 용인시 처인구 모현로 154 번길 42(유방동)
Tel : 031-321-2664, Fax : 031-321-2220

1. 성적서 번호 : DRCKREL1708-0255
2. 신 청 인
- 성 명 : (사) 한국철도차량엔지니어링
- 주 소 : 경기도 수원시 장안구 서부로 2174
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리용
4. 제품명 / 모델명 : 주전력변환장치 / RVS10001ED0
5. 시험방법 : IEC 61373 : 2010 Railway applications - Rolling stock equipment - Shock and vibration tests (Category 1 Class B)
6. 시험기간 : 2017 년 07 월 06 일 ~ 2017 년 07 월 07 일
7. 시험환경 : 온 도 (25 ± 2) ℃, 습 도 (48 ± 5) % R.H.
8. 시험결과 : 본문 참조

이 성적서는 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하며, 광도 이외의 사용을 금합니다.

확인	시험자	기술책임자
	성 명 : 김 현 승	성 명 : 정 재 원

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협력(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인 받은 분야에 대한 시험결과입니다.

2017 년 08 월 09 일

한국인정기구 인정 (주)디티앤씨 대표이사

* 표시된 시험결과는 시험기관의 인정범위 밖의 것입니다.

시험성적서의 위변조여부에 대한 확인이 필요하신 경우에는 report@dtnc.net 으로 문의 부탁 드립니다.

TRF-RD-05(00)181118 본 시험성적서는 (주)디티앤씨의 승인 없이는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 1 / 49



SGS 시 험 성 적 서

발행번호 : SGS-R17-1783-KR00
Page : 1 / 20

발행번호	SGS-R17-1783-KR00
접수번호	TON-R17-2054
의뢰기관	(사)한국철도차량엔지니어링
회사주소	경기도 수원시 장안구 서부로 2174
제품명	주전력변환장치
모델명	HRMB-HSTD-000
시험일자	2017년 10월 11일 ~ 2017년 10월 13일
시험규격/방법	KS C IEC 60068-2-1: 2010 환경 시험-제2-1부:시험-시험 A: 냉한성 시험 KS C IEC 60068-2-2: 2014 환경 시험-제2-2부:시험-시험 B: 내열성 시험
시험결과	Page 13 참조
용도	국책과제 성능시험 증빙

이 성적서 위의 내용은 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하며, 광도 이외의 사용을 금합니다.

확인	작성자	기술책임자
	성 명 : 고 경	성 명 : 구

* 본 성적서는 국제시험기관인정협력체 (International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정 (Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구 (KOLAS) 로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

2017. 10. 30.

한국인정기구 인정 한국에스지에스(주) 동탄시험소장



SGS 시 험 성 적 서

발행번호 : SGS-R17-1782-KR00
Page : 1 / 21

발행번호	SGS-R17-1782-KR00
접수번호	TON-R17-2053
의뢰기관	현대로템
회사주소	경기도 의왕시 철도박물관로 37
제품명	주전력변환장치 AL Box
모델명	N/A
시험일자	2017년 10월 13일 ~ 2017년 10월 17일
시험규격/방법	IEC 61373: 2010 철도 차량 설비의 충격 및 진동 시험 방법 (1등 A종)
시험결과	Page 7, Page 13, Page 19 참조
용도	국책과제 성능시험 증빙

이 성적서 위의 내용은 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하며, 광도 이외의 사용을 금합니다.

확인	작성자	기술책임자
	성 명 : 서 덕 우 2017.10.30.	성 명 : 김 승 현 2017.10.30.

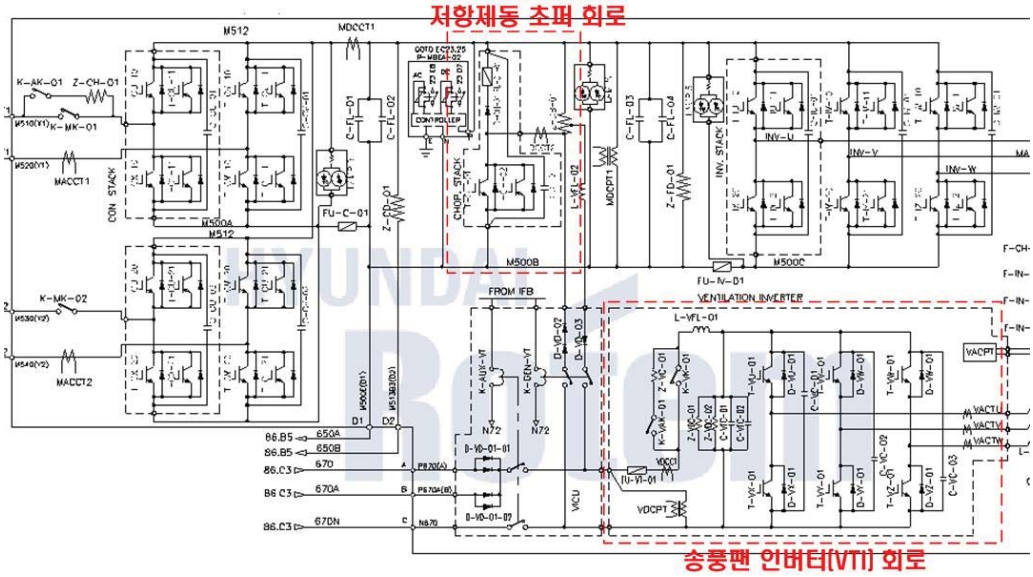
* 본 성적서는 국제시험기관인정협력체 (International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정 (Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구 (KOLAS) 로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

2017. 10. 30.

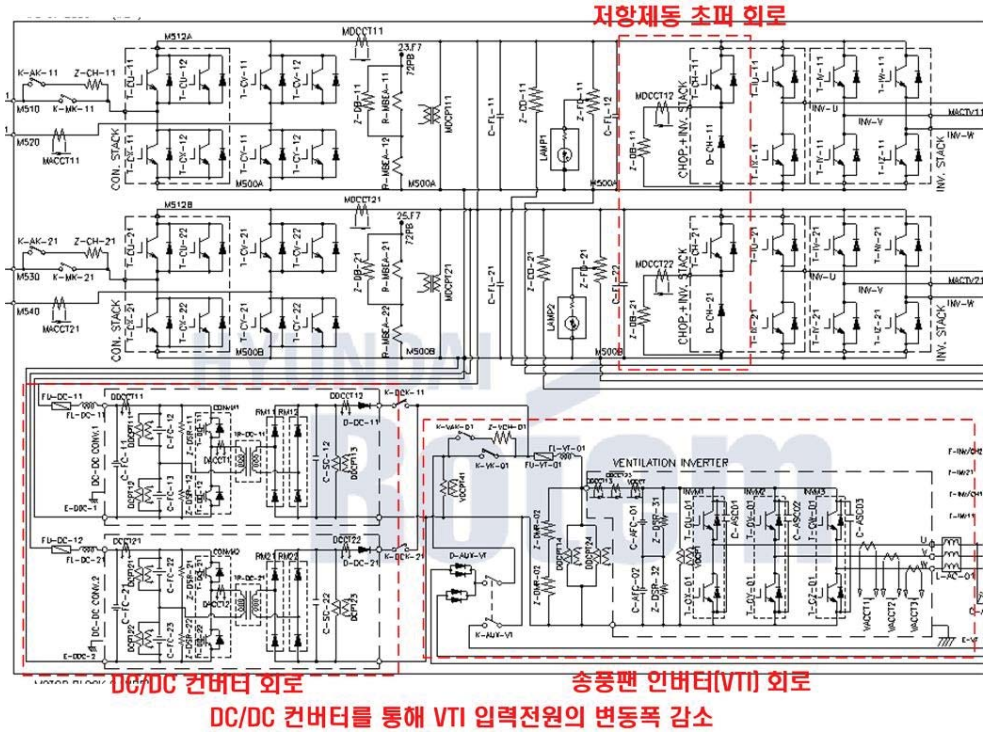
한국인정기구 인정 한국에스지에스(주) 동탄시험소장

마. 주전력변환장치 개선사항

○ KTX-산천 주전력변환장치의 경우, 송풍팬용 인버터(VTI: Ventilation Inverter)의 불량이 다수 발생하였으며, 그 원인은 저항제동 모드에서 초퍼 동작 시, VTI 입력단에 과도한 전압 변동 및 VTI 3상 출력단과 차체간 과도한 전압이 인가되어 VTI 동작불량 또는 송풍팬 불량이 발행하였음. 상기의 불량을 개선하기 위해 본 과제에서 개발되는 주전력변환장치에는 제동저항 모드에서 VTI에 안정적인 전원을 공급하기 위해 주전력변환장치 초퍼회로와 VTI 사이에 DC/DC 컨버터를 신규 적용하였음



<기존 KTX-산천 주회로도>



<효율향상 개발 주전력변환장치 개선 주회로도>

○ 스너버 커패시터는 IGBT와 같은 전력용 반도체 스위칭 시 발생하는 스파이크 전압을 억제하여 IGBT를 과전압으로부터 보호하는 기능을 함. 하지만 스너버 커패시터를 적용하게 될 경우 IGBT 스택의 사이즈를 증가시키고, 스너버 커패시터의 내구 수명에 따라 유지보수 비용이 증가하게 되며, 주전력변환장치 내부로 외부 먼지 등이 유입될 경우, 스너버 커패시터 양단의 절연이 파괴되어 IGBT의 소손을 발생시키는 등의 문제를 일으킬 수 있음

KTX-산천의 경우, 주전력변환장치의 IGBT 양단에 스너버 커패시터를 적용하였으며, 차량 영업운행 중 주전력변환장치 내부로 유입된 먼지에 의해 스너버 커패시터 양단 절연이 파괴되어 IGBT 소손을 발생 시키는 사례 및 스너버 커패시터 교체에 대한 유지보수 비용 발생에 대한 문제를 개선할 필요가 있음



<KTX-산천 주전력변환장치 IGBT 스택 구조 및 스너버 커패시터>

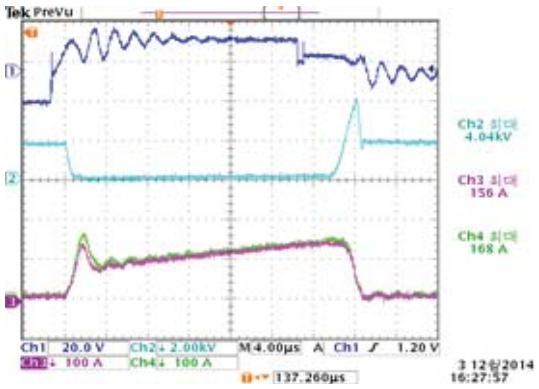
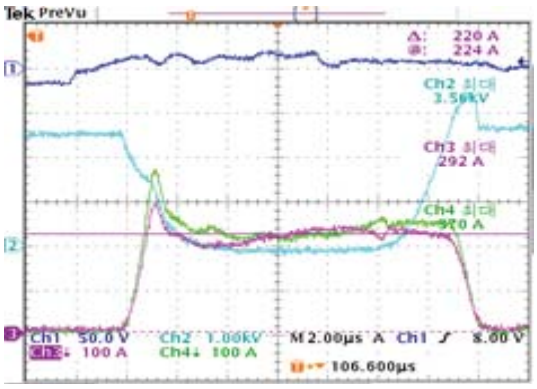
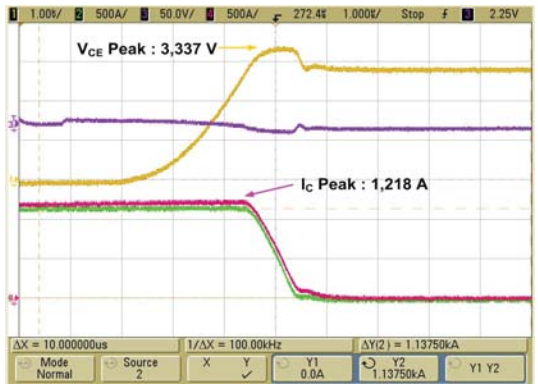
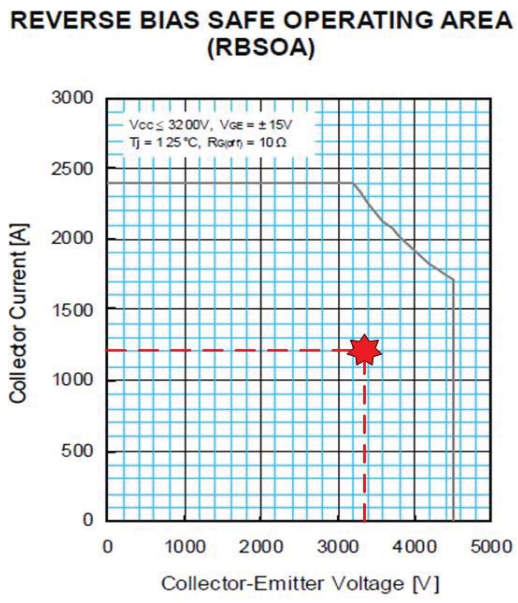
○ 이를 개선하기 위해, 본 과제에서 개발하는 주전력변환장치는 구조설계 단계에서부터 주회로의 기생 인덕턴스(Stray Inductance) 값이 작도록 설계하여 스너버 커패시터를 적용하지 않더라도 IGBT 스위칭 시, 스파이크 전압이 기준치 이내가 되도록 설계를 개선하였음

다음 그림은 타 프로젝트에서 개발된 IGBT 스택의 스위칭 시험 결과이다. 스너버 커패시터 미적용 조건에서는 입력 전압 DC 2,000V에서 스위치 off시 발생하는 스파이크 전압의 피크 값이 4,040V로 입력전압의 2배 이상이 되는 것을 확인하였으며, 스너버 커패시터 적용 후 입력 전압 DC 2,800V에서 스위치 off시 발생하는 스파이크의 피크 값이 3,560V로 감소함을 확인됨

본 과제에서 개발된 IGBT 스택은 입력 전압 DC 2,800V 및 스너버 커패시터 미적용 조건에서 스위치 off시 발생하는 스파이크 전압의 피크 값이 3,340V로 상기 스너버 커패시터를 적용한 제품보다 양호한 특성 및 결과를 얻음

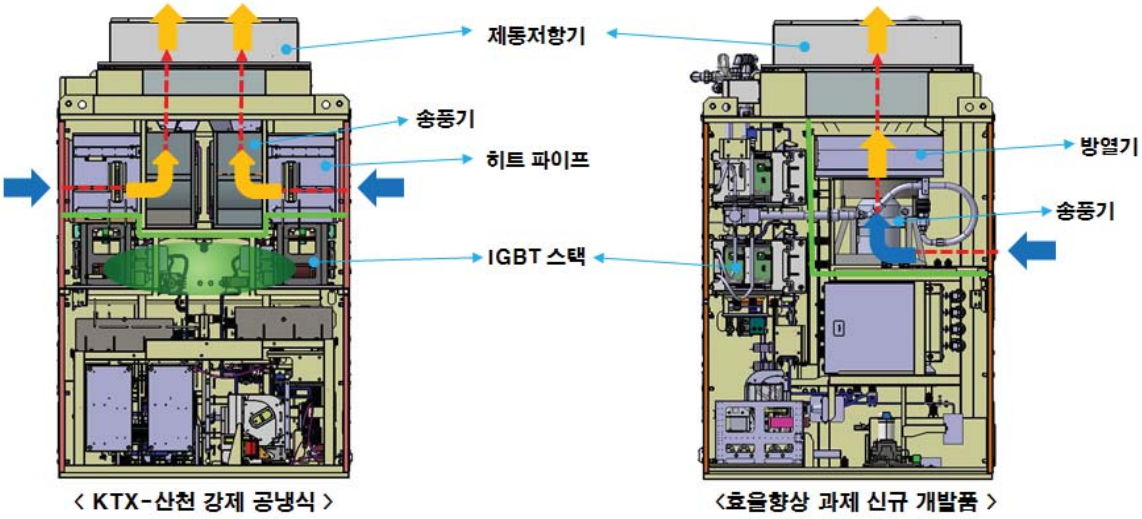
일반적으로 IGBT 소자의 제조사들은 소자의 전기적인 동작환경(V_{CE} 전압, I_C 전류)이 IGBT의 Data sheet에 명기되어 있는 RBSOA(Reverse Bias Safe Operation Area) 영역에서 동작을 하면 소자의 신뢰성 및 수명을 약 16년 정도로 예측함

따라서, 본 과제에서 개발된 IGBT 스택의 시험결과 소자의 전기적 동작 특성이 소자의 정격전류인 1,200A 통전 조건에서 3,300V~3,400V(V_{CE}) 범위로 측정되어 RBSOA 영역의 약 75% 범위에서 동작하고 있으므로 스너버 커패시터를 적용하지 않더라도 소자의 신뢰성 및 수명은 문제가 없을 것으로 사료됨

<table>
<tr><td colspan="2">타 프로젝트 IGBT 스택의 스위칭 시험 결과</td></tr>
<tr><td>스너버 커패시터 적용 전</td><td>스너버 커패시터 적용 후</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">효율향상 과제 개발품 IGBT 스택의 스위칭 시험 결과</td></tr>
<tr><td>IGBT 스택 시험 결과</td><td>IGBT 소자 RBSOA</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>

○ KTX-산천 주전력변환장치는 강제공냉방식을 적용하여 동력실 외벽을 통해 외부 공기를 주전력변환장치 내부로 흡입하고 이를 IGBT 스택 상단의 히트파이프를 통해 동력실 상부로 토출하는 구조를 가지고 있다. 이런 구조로 인해 외부 먼지가 주전력변환장치 내부로 유입되게 되고, 유입된 먼지는 주전력변환장치 내부 주요 구성품의 절연파괴 및 고장과 같은 문제를 발생 시키고, 차량 운용사의 유지보수 빈도 및 시간을 증대 시키게 됨

○ 본 과제에서 개발되는 주전력변환장치에는 수냉각 방식을 적용하여 송풍기 및 방열기가 설치되어 있는 공간을 격벽으로 처리하여 타 구성품들이 설치되어 있는 공간에는 외부 먼지의 유입을 최소화하도록 설계를 개선함

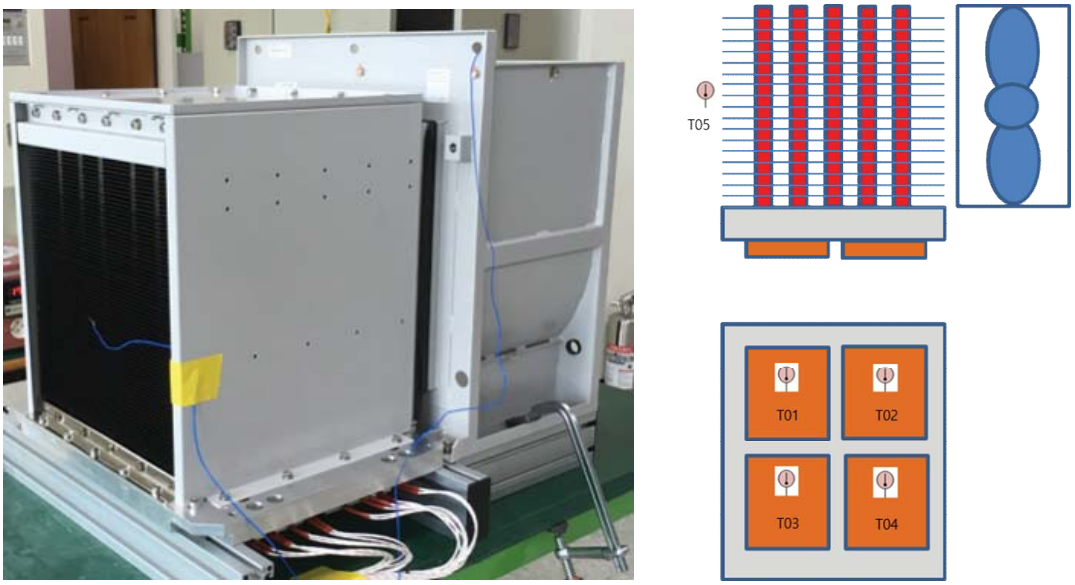


<냉각시스템 구조 비교 및 개선사항>

○ 냉각시스템 열성능 비교

효율향상과제를 통해 개발된 수냉각 시스템과 KTX-산천 주전력변환장치에 적용된 히트파이프식 냉각시스템과의 성능 비교를 성능향상 검증 측면에서 연구를 수행함.

두 냉각 시스템은 근본적으로 설계 및 운용 개념이 다르나 두 시스템 모두 동일한 사이즈의 주전력변환장치 안에 설치되었고, 동일 풍량을 제동저항 측에 공급하는 것을 고려할 때, 모사 발열 소자의 최대 발열량 및 시스템의 방열량, 냉각판 표면의 온도 등을 비교하여 제한적이나마 정량적 평가를 수행할 수 있다고 사료됨



<히트파이프 냉각 시험장치 및 구성>

<냉각시스템 시험 조건 비교>

시험장치	수냉각시스템	히트파이프 냉각기
수량	2set/1block	8stack / 1block
설계 냉각량	40kW/set	8kW/set
적용대상	본 과제	KTX-산천
시험항목	• 단순 시스템을 구성하여 열성능 비교 수행 • IGBT 소자 최고온도 시험 • 풍량에 따른 열특성 검증 • 유량에 따른 열특성 검증 • 외기 온도에 따른 열특성 검증	• IGBT 소자 최고온도 시험 • 풍속에 따른 열특성 검증 • 외기 온도에 따른 열특성 검증

○ 시험결과 및 고찰

수냉각 시스템 시험 결과와 히트파이프식 냉각기의 시험 결과를 비교하면, 동일 발열량(10kW/Stack)과 외부 최고 공기온도(hot day, 45℃) 기준 IGBT 부착면 최고온도차는 각각 25.1K와 36.5K로 측정됨

이는 동일 발열량 (10kW/Stack)에서 수냉각시스템의 냉각 온도가 히트파이프 냉각장치 대비 약 31% 개선된 것을 의미하며, 설계 발열량 기준 수냉각 시스템은 KTX-산천의 히트파이프 냉각장치 대비 8kW에서 10kW로 25% 개선을 확인함

수냉각 시스템과 히트파이프 냉각시스템의 시험결과를 다음에 나타냄

<시험결과 비교>

수냉각시스템		
No.	Position	Q_stack 10kW
T01	Air Fan in	45.0
T02	Cold Plate in	58.1
T03	Cold Plate out	64.5
T04	Radiator out	58.0
T28	Heater T_s,max	70.1
dT_max		25.1

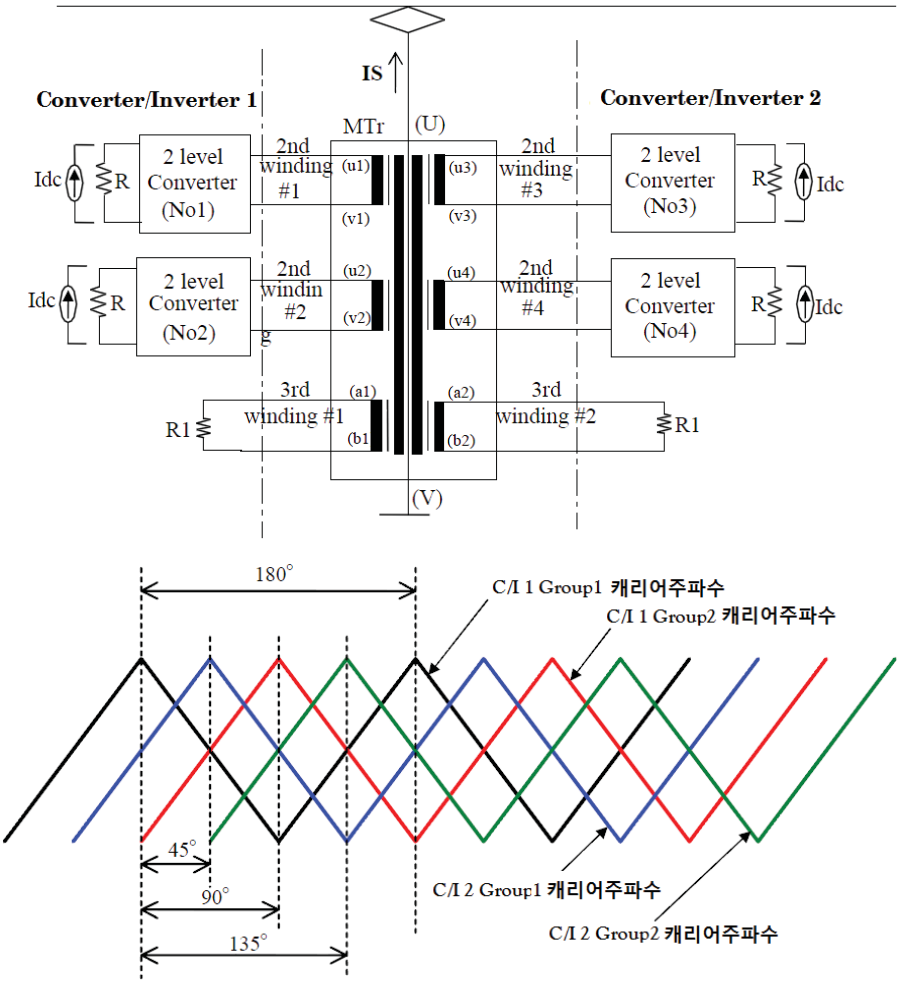
히트파이프 냉각기 ⊿T_sink (D)		
Q_total (kW)/stack	8	10
Q/IGBT	2	2.5
28.5Hz (5.0m/s)	86.3	94.1
35Hz (6.3m/s)	80.4	86.8
45Hz (8.0m/s)	78.1	83
55Hz (9.7m/s)	76.2	81.5
dT_max		36.5

바. 주전력변환장치 고조파 측정 및 저감 대책

○ 컨버터 스위칭 동작 시 발생하는 고조파를 저감하기 위해 주변압기의 1차측 전류의 리플이 상쇄되도록 각 컨버터의 스위칭 위상차를 제어하고 컨버터의 스위칭 주파수를 420Hz ~ 780Hz 범위에서 궤도회로 간섭이 최소화 되는 스위칭 주파수를 선정함

○ 컨버터 스위칭 위상차 제어기법은 컨버터 n대를 주변압기 1차측을 기준으로 병렬 회로로 구성하고 각 컨버터를 스위칭 주기 내에서 위상차를 두어 제어함

○ 아래 그림은 동력차에 4대의 컨버터가 있을 경우 45° 위상차를 두어 제어를 수행 하는 개념을 보임

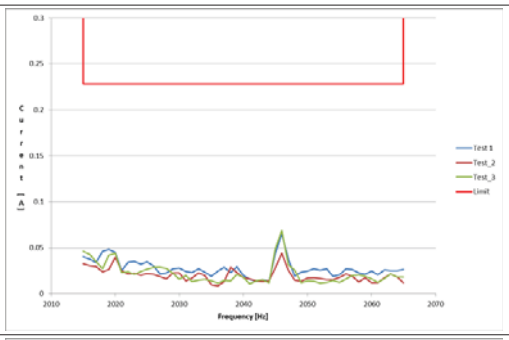
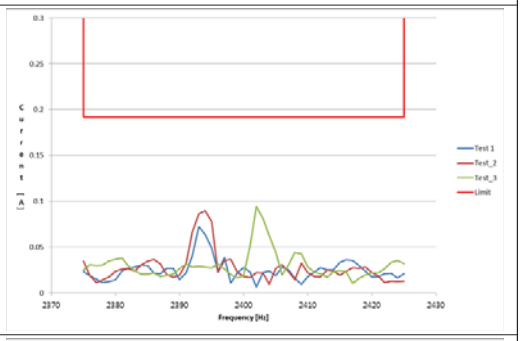
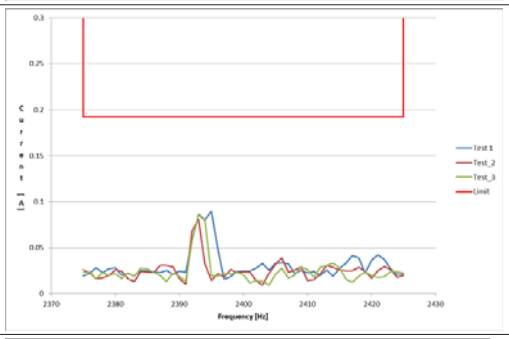
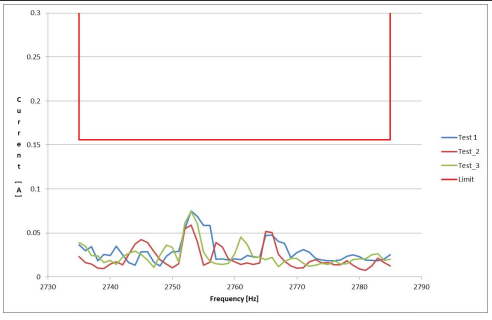
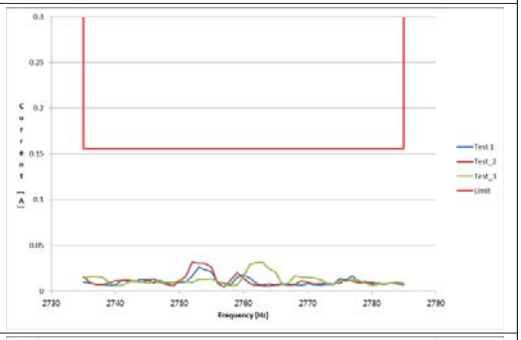
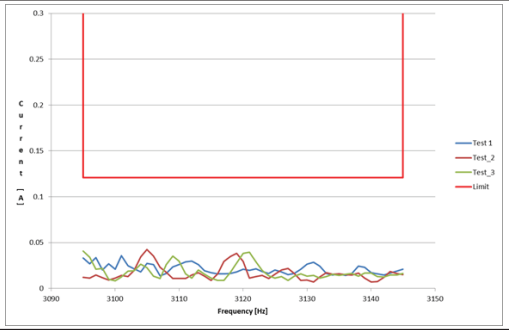
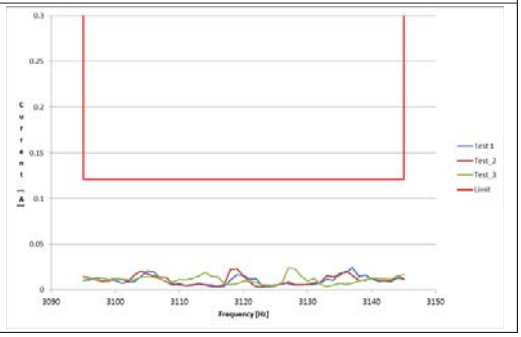


<개별 컨버터가 4대인 경우 위상차 제어 방법>

○ 국내 고속열차가 운행되는 고속선로와 일반선로에서 사용하는 UM71 및 TI-21 궤도 회로와의 전자기 적합성을 확인하기 위하여 UM71 및 TI-21 궤도회로의 모든 주파수와 간섭여부를 조합시험을 통해 국내에서 일반적으로 사용하는 컨버터 스위칭 주파수 540Hz와 고조파 저감을 위해 스위칭 주파수를 증가시킨 780Hz에 대해서 측정 및 비교검토를 수행함

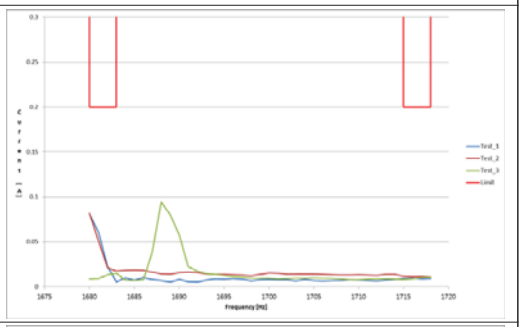
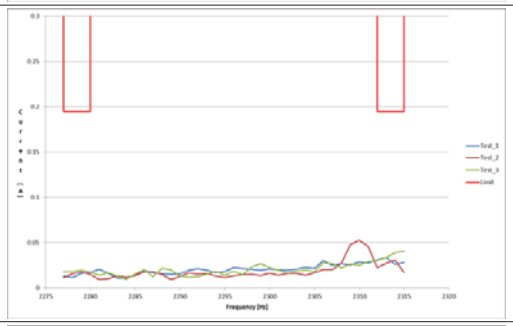
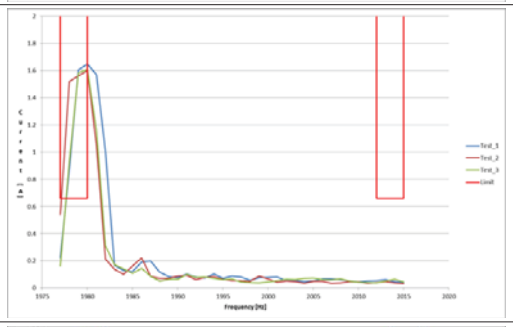
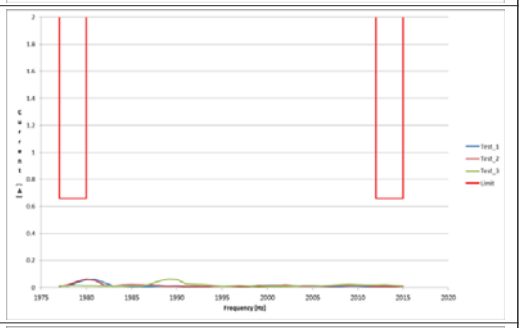
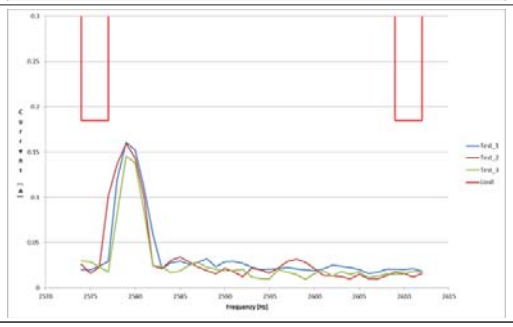
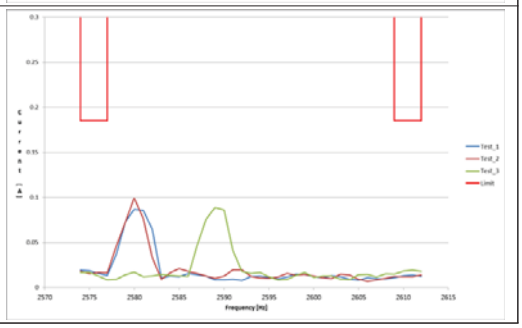
○ UM71 궤도회로(고속선) 주파수 대역 및 컨버터 스위칭 주파수에 따른 측정값 비교

UN71 주파수 대역	시험 기준	측정값 (540Hz)	측정값 (780Hz)
2040 Hz (2015-2065 Hz)	228 mA	68.39 mA	51.48 mA
2400 Hz (2375-2425 Hz)	192 mA	89.49 mA	94.13 mA
2760 Hz (2735-2785 Hz)	156 mA	74.85 mA	31.44 mA
3120 Hz (3095-3145 Hz)	121 mA	42.28 mA	24.9 mA

UM71	컨버터 스위칭 주파수 540Hz	컨버터 스위칭 주파수 780Hz
2040 Hz		
2400 Hz		
2760 Hz		
3120 Hz		

○ TI-21 궤도회로(일반선) 주파수 대역 및 컨버터 스위칭 주파수에 따른 측정값 비교

TI-21 주파수 대역		시험 기준	측정값 (540Hz)	측정값 (780Hz)
A-type (1699Hz)	Low: 1680～1683Hz High: 1715～1718Hz	200 mA	Low: 40.88 mA High: 73.24 mA	Low: 81.9 mA High: 11.62 mA
B-Type (2296Hz)	Low: 2277～2280Hz High: 2312～2315Hz	195 mA	Low: 19.68 mA High: 40.83 mA	Low: 38.37 mA High: 28.19 mA
C-Type (1996Hz)	Low: 1977～1980Hz High: 2012～2015Hz	660 mA	Low: 1.60 A High: 63.43 mA	Low: 43.11 mA High: 19.23 mA
D-Type (2593Hz)	Low: 2574～2577Hz High: 2609～2612Hz	185 mA	Low: 29.6 mA High: 21.6 mA	Low: 19.08 mA High: 19.31 mA

TI-21	컨버터 스위칭 주파수 540Hz	컨버터 스위칭 주파수 780Hz
A-type (1699Hz)		
B-Type (2296Hz)		
C-Type (1996Hz)		
D-Type (2593Hz)		

○ 상기 측정 결과는 주전력변환장치를 동작시킨 후 정출력 영역에서 역행 및 회생 제동에 대해서 각각 측정한 결과를 나타내며, 각 그래프의 빨간색 선은 각 궤도회로 에서 주파수 대역별로 제한하는 고조파 전류 값을 나타냄

○ 고조파 측정결과 국내 고속선에 적용된 UM71 궤도회로는 컨버터 스위칭 주파수에 상관없이 모두 간섭현상이 없으나, 일반선에 적용된 TI-21 궤도회로의 경우, 컨버터 스위칭 주파수 540Hz 조건에서 C type에서 고조파 전류의 측정값이 제한 값을 초과 하여 간섭이 발생될 수 있으며, 컨버터 스위칭 주파수를 780Hz로 증가 시킨 경우에는 TI-21 궤도회로와 간섭이 없음이 확인됨

○ 따라서 컨버터의 스위칭 주파수를 780Hz로 적용하면 국내 고속선에 적용된 TI-21 궤도회로와 일반선에 적용된 TI-21 궤도회로 모두 간섭이 없을 것으로 판단됨

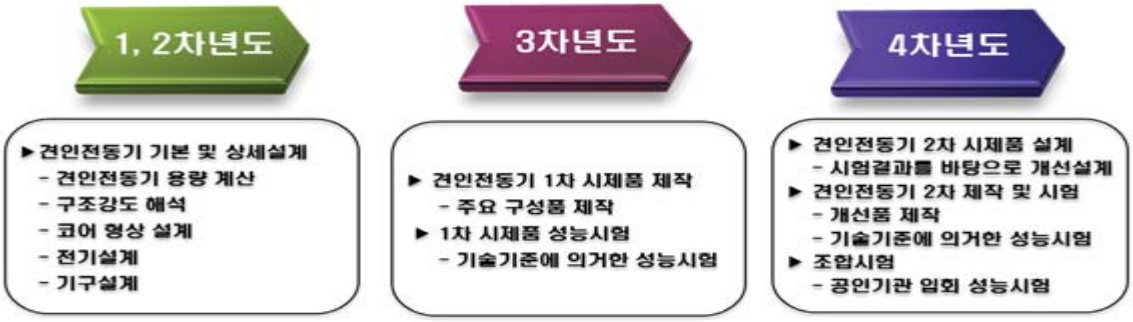
2. 효율향상 추진시스템 견인전동기 개발

가. 견인전동기 기술개발 연구 개요

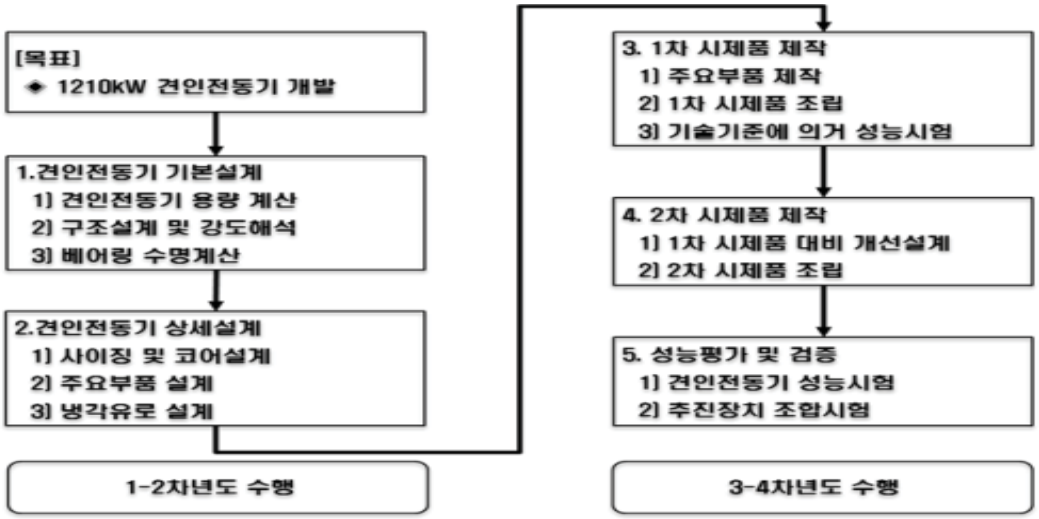
(1) 견인전동기 개발 목표

○ 운영 속도 향상을 위해, KTX-산천 대비 견인전동기 출력 10% 향상
- KTX-산천 견인전동기 용량(1,100kW) → 효율향상 개발 견인전동기 용량(1,210kW)

(2) 견인전동기 연차별 연구 내용



	연구 내용	연구 수행 내용
1차년도 (2014)	■ 견인전동기 기본설계	■ 견인전동기 용량 계산 ■ 베어링 수명계산
2차년도 (2015)	■ 견인전동기 기본설계	■ 용량계산 ■ 부품설계
3차년도 (2016)	■ 견인전동기 상세설계 ■ 주요 구성품 제작 및 시험	■ 견인전동기 2D/3D 모델링 ■ 프레임 강도해석 ■ 1차 시제품 제작/성능시험
4차년도 (2017)	■ 견인전동기 2차 시제품제작 ■ 견인전동기 구성품시험 ■ 조합시험	■ 견인전동기 조립 ■ 견인전동기 구성품시험 ■ 조합시험



<설계 프로세스>

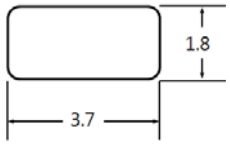
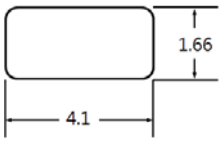
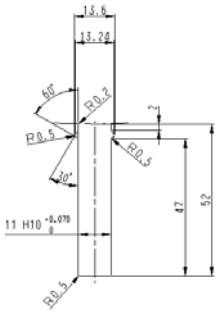
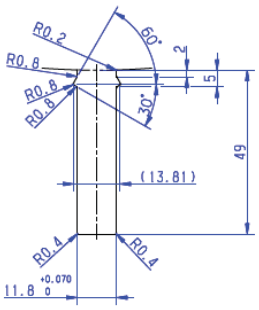
(3) 견인전동기 특장점 및 설계 개선사항

○ 견인전동기 개발 사양 비교

항 목		KTX-산천	견인전동기 개발사양
TYPE		유도전동기	유도전동기
정격		3상, 4극, 1100kW	3상, 4극, 1210kW
전 압(V)		2,183	2,183
전 류(A)		360	391
역률(%)		88 이상	88 이상
효율(%)		92 이상	93 이상
주파수(Hz)		138.5	136.5
슬립(%)		1.2 ± 0.2	1.2 ± 0.2
최대회전수		4100 rpm	4035 rpm
중량(kg)		1500 ± 5%	1500 ± 5%
사이즈(W-H-L)(mm)		775.6×736×960	775.6×736×960
고정자	외경(mm)	670	670
	내경(mm)	400	430
회전자	외경(mm)	395.6	425.6
공극(mm)		2.2	2.2
최대속도		300 km/h	350 km/h

- 본 연구과제를 통하여 개발중인 견인전동기는 상기 표에서 보는 것과 같이 동일 면적 및 동일 인터페이스 대비 용량이 10% 증대되는 사양을 목표로 설계 진행함

○ 견인전동기 설계 개선사항

<table>
<tr><th colspan="2">항목</th><th>KTX-산천 견인전동기
(기존품)</th><th>효율향상 견인전동기
(개발품)</th><th>비고</th></tr>
<tr><td colspan="2">제어
효율성</td><td>속도센서 미설치
(MRU에 속도센서 설치)</td><td>속도센서 설치
(반구동측에 속도센서 설치)</td><td>견인전동기 속도를 직접 계측하여 제어에 활용하므로 보다 정확한 제어가 가능</td></tr>
<tr><td rowspan="4">동손
저감</td><td rowspan="2">1차</td><td>코일 단면적
6.66㎟</td><td>코일 단면적
7.14㎟(8%) 증가</td><td rowspan="4">시뮬레이션 결과 1, 2차 동손은 30.3kW로 계산됨</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차</td><td>회전자 바 단면적
158㎟</td><td>회전자 바 단면적
208㎟(32%) 증가</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">철손저감</td><td>최대 운행속도에서
7.42kW</td><td>최대 운행속도에서
6.87kW(7.5%) 감소</td><td rowspan="2">시뮬레이션 결과 철손은 6.9kW로 계산됨</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>

- 시뮬레이션 결과 1, 2차 동손과 철손 등을 고려하여 계산된 전체 손실은 51.5kW로 이를 근거로 효율을 계산하면 95%임
- 이와 같이 기존 KTX-산천 대비 전체 손실을 줄이는 방향으로 견인전동기 설계 및 제작을 진행하였으며 설계용량 1,210kW와 효율 93% 이상을 만족하는 시험 결과(출력 : 1330kW, 효율 : 94.8%)를 도출함

나. 견인전동기 기본설계 및 상세설계

(1) 견인전동기 형식

○ 형 식 : 3상 농형 유도전동기
○ 극 수 : 4극
○ 냉 각 방 식 : 강제 공랭식
○ 절 연 종 별 : 200Class
○ 속 도 검 출 : 반 부하측에 전원타입 속도센서 적용
○ 최 대 회 전 수 : 4,035RPM(at 350km/h)
○ 과속시험 회전수 : 4,842RPM
○ 중 량 : 1,500kg±5%

(2) 견인전동기 정격

○ 출력 : 1,210 kW
○ 전압 : 2,183 V
○ 전류 : 391 A
○ 주파수 : 136.5 Hz
○ 효율 : 93% 이상
○ 역율 : 88% 이상
○ 회전수 : 4,035 RPM

(3) 견인토크 증가에 따른 축 강도 검토

○ 회전자 축 재질은 SCM 440으로 항복강도는 785N/㎟ 이상으로 축경 100mm를 고려하였을 때 308,268Nm가 되므로 요구 토크 6,515Nm 대비 약 47배의 강도를 확보하고 있으므로 문제 없음

(4) 견인전동기 용량 계산

(가) 모의 운전결과

○ 모의 운전은 만차 조건의 열차를 100% 동력(정상운전)과 75% 동력 조건을 고려하여 실시하였음. 전속운행 시 견인전동기 실효전류는 아래표와 같으며 상세 계산 결과는 모의주행 상세 결과 표를 참조

항목		실효전류(A)	
		상행선	하행선
경부선 4개역 (서울 ~ 부산)	100% 동력	294.9	296.9
	75% 동력	327.9	329.5
경부선 10개역 (서울 ~ 부산)	100% 동력	316.2	317.4
	75% 동력	341.1	344.4
호남선 (오송 ~ 광주)	100% 동력	359.6	358.3
	75% 동력	379.3	377.1

(나) 견인전동기 용량 계산

각 조건별 모의 운전 결과를 바탕으로 견인전동기 용량 산정을 위해 요구되는 견인전동기의 실효 전류치를 비교하여 견인전동기 용량을 검토함.
위 표와 같이 견인전동기의 최대 실효전류는 호남선 75% 동력으로 상행선 전속운전 시의 379.3 A 이다. 견인전동기 실효 전류379.3 A, 견인전동기 입력전압 2183 V를 적용하여 견인전동기 용량을 계산하면 다음과 같음.

입력 전력 = $\sqrt{3}$ ×V×A×역률 (kW)
출 력 = $\sqrt{3}$ ×V×A×역률×효율 (kW)

입력 전력 = $\sqrt{3}$ ×2183×379.3×0.88/1000 = 1262.1 kW
출 력 = $\sqrt{3}$ ×2183×379.3×0.88×0.93/1000 = 1173.7 kW

※ 부하율에 따라 역률과 효율은 변동이 되는 데 상기 계산식에 사용된 역률(88%), 효율(93%)은 설계 시 달성하기 위한 최소 보증 치로 연속정격 2,183V, 391A, 136.5Hz에서 부하율 100%로 운전하였을 때 보증하는 최소치를 명기한 것임

따라서, 견인전동기의 연속 정격은 최소한 1173.7 kW를 필요로 하며, 본 과제에서 개발한 견인전동기의 연속정격이 2183 V, 391A, 1210kW 이므로 상기의 조건을 충분히 만족함.

(다) 전자장 해석 결과

각 운전 포인트별 요구되는 부하 조건을 만족하기 위해 고정자 및 회전자 코어 형상, 고정자 코일 사이즈, 회전자 바 사이즈 등을 검토함.
본 연구에서는 당사 내부 설계 프로그램을 이용하여 설계를 진행하였으며 각 운전 포인트별 견인전동기 특성은 아래 표에 나타내었음.

항목		정토크 종단	V/F 포인트	정격
전류밀도 [A/mm^2]	권선전류밀도	7.82	6.31	6.51
	바 전류밀도	8.80	7.20	7.20
	링 전류밀도	9.40	7.69	7.69
자속밀도 [T]	고정자 치	1.57	1.60	0.97
	고정자 요크	1.51	1.54	0.94
	회전자 치	1.45	1.48	0.90
	회전자 요크	0.90	0.92	0.56
	공극	0.81	0.82	0.5
파라미터 [Ω]	R1	0.0399	0.0399	0.0399
	R2	0.0362	0.0362	0.0365
	X1	0.3020	0.3674	0.5864
	X2	0.3054	0.3715	0.5926
	XM	13.8539	16.8430	26.8019
	RM	234.90	298.84	315.88

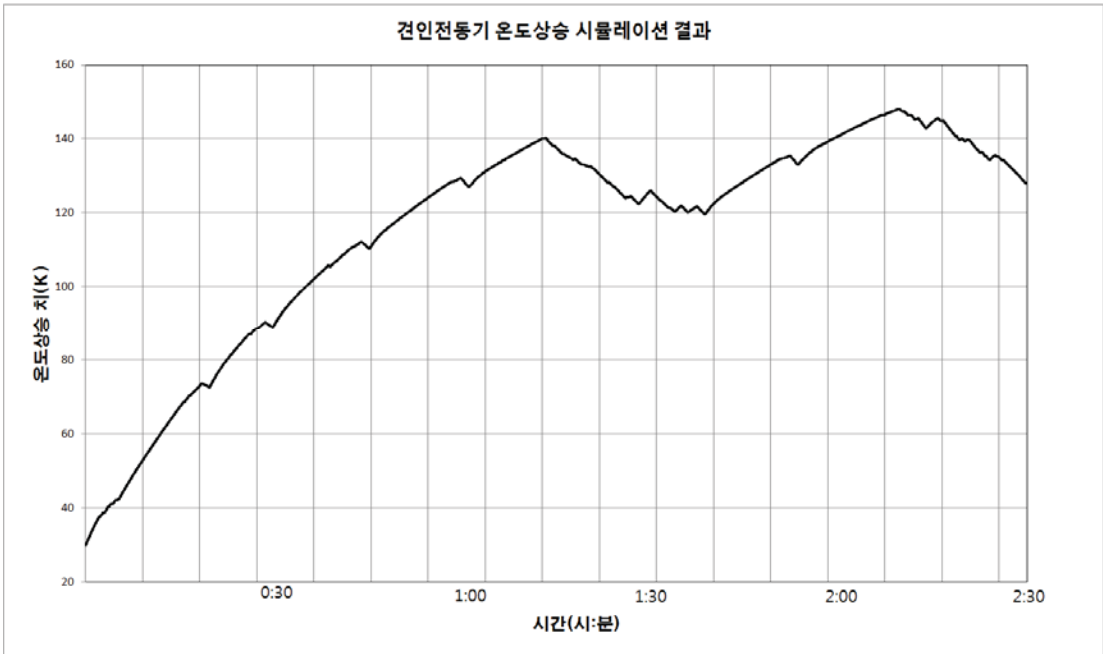
(라) 열 해석 결과

본 연구에서는 당사 내부 설계 프로그램을 이용하여 설계를 진행하였으며 각 운전 포인트별 견인전동기 손실 및 포화 온도는 아래 표에 나타내었음.

항목		정토크 종단	V/F 포인트	정격
손실 [W]	1차 동손	23924.1	15568.5	16532.6
	2차 동손	19882.2	12685.8	13885.6
	철손	5917.3	8436.8	6864.2
	기계손	1543.3	2309.8	5875.9
	표류부하손	6049.5	6048.8	6047.8
포화온도 (시뮬레이션 결과)[℃]		260.9	168.9	113.7

(마) 온도상승 해석 결과

견인전동기가 안정된 온도 범위에서 운행이 가능한지 확인을 위해 경부선 주행 시뮬레이션 결과를 바탕으로 견인전동기 온도상승 해석을 실시하였으며 온도상승 해석 결과는 아래 그래프와 같음.



<온도상승 해석 결과>

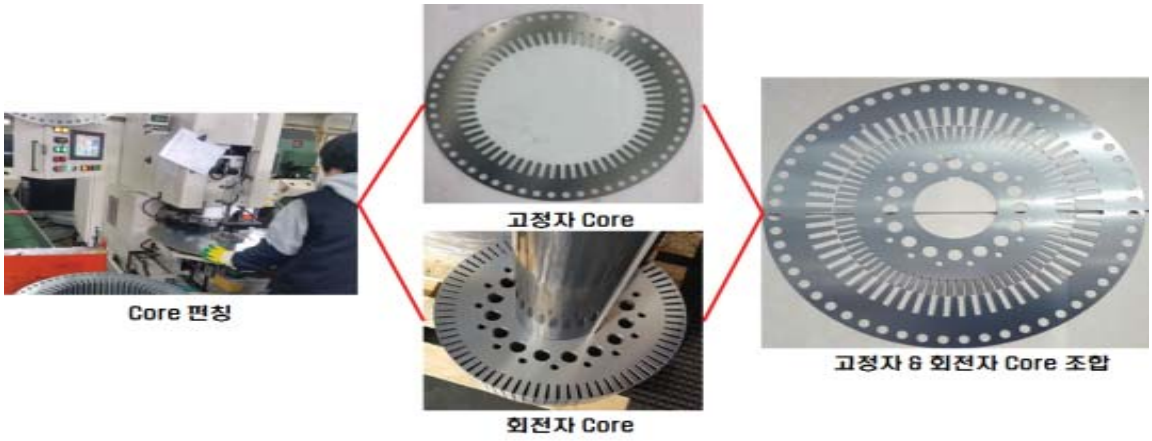
상기 그래프에서 보여지는 것과 같이 최대 온도상승치는 147.6K이며 실제 운행에서 무리없이 운전이 가능함을 확인함.

다. 견인전동기 1차시제품 제작 및 시험

(1) 1차시제품 제작

○ 고정자 및 회전자 제작

- 금형을 이용한 고정자 및 회전자 코어 타발



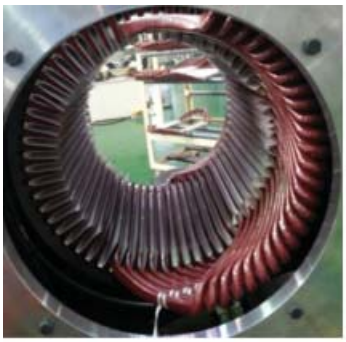
- 고정자 코어 적층 및 프레임 용접



- 용접 후 비파괴 검사



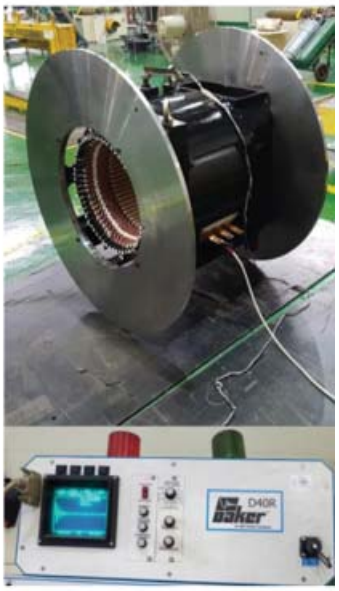
- 고정자 코일 삽입 & 결선



코일 삽입



코일 결선



내전압 시험

- 총 조립



회전자 Assy 제작



회전자 & 고정자 조립



고정자 Assy 제작



베어링부 조립

(2) 1차시제품 시험

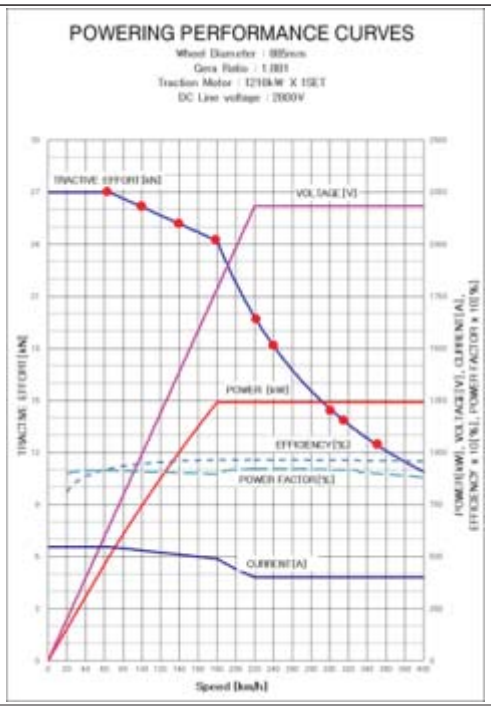
○ 철도안전법에 의거한 성능시험 실시

- 철도안전법 Part 31 고속철도차량 기술기준 5.2.5.2항 의거 견인전동기 성능시험을 실시함

구분	시험항목	회전형 전동기		결과
		형식승인	완성검사	
1	외관구조검사	○	○	양호
2	측정시험	○	○	양호
3	온도상승시험	○		미달
4	특성시험	○	○	양호
5	과속시험	○	○	양호
6	소음시험	○		양호
7	절연저항시험	○	○	양호
8	내전압시험	○	○	양호
9	진동시험	○	○	양호
10	저항측정	○	○	양호

소음측정시험	진동측정시험
	
내전압 시험	절연저항 측정 시험
	
온도상승시험 및 부하시험	중량측정 시험
	

○ 아래 그림에서 보는 것과 같이 견인전동기에 요구되는 견인력 만족 여부를 시험하였으며 결과에서 보는 것과 같이 기준치 보다 높게 계측되는 것을 확인할 수 있음



부하시험 포인트

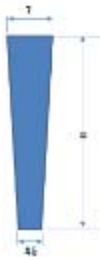
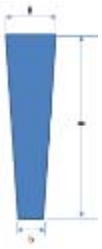
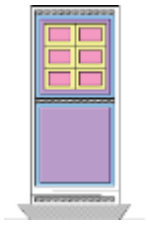
속도 (km/h)		선간전압 (V)	선전류 (A)	주파수 (Hz)	RPM	출력 (kW)	역률 (%)	효율 (%)	슬립 (%)	Torque (Nm)	기준 토크 (Nm)
67	실험치	672	551.4	26.66	755	509.96	0.9147	86.9	5.60%	6450.0	6178
	해석치	665	566.1	26.60	742	515.05	90.47	87.6	5.93%	6625.9	-
100	실험치	990.4	535.3	38.85	1128	767.33	0.917	91.1	3.17%	6496.0	5998
	해석치	992	517.3	38.80	1108	745.19	91.2	91.9	3.48%	6424.2	-
140	실험치	1376.5	524.4	53.75	1578	1070.97	0.9185	93.3	2.14%	6481.0	5770
	해석치	1389	486.8	52.90	1550	1004.26	91.55	94.3	2.27%	6187.8	-
180	실험치	1851.6	496.9	68.60	2031	1368.63	91.71	94.2	1.31%	6435.0	5547
	해석치	1850	428.8	67.40	1993	1210.35	92.03	95.7	1.47%	5799.6	-
220	실험치	2183.5	496.0	83.88	2484	1346.40	92.13	95.2	1.29%	5176.0	4538
	해석치	2183	360.6	82.10	2436	1210.66	92.1	96.4	1.03%	4745.3	-
240	실험치	2184.8	405.1	91.41	2705	1356.00	92.84	95.3	1.36%	4787.0	4160
	해석치	2183	360.5	89.50	2657	1210.06	92.08	96.4	1.04%	4548.6	-
300	실험치	2184.3	405.6	114.37	3384	1353.70	92.77	95.1	1.37%	3820.0	3328
	해석치	2183	364.0	111.90	3322	1210.74	91.35	96.3	1.07%	3480.6	-
315	실험치	2183.8	405.6	120.10	3555	1348.77	92.53	95.0	1.33%	3629.0	3170
	해석치	2183	365.3	117.50	3487	1210.48	91.04	96.3	1.08%	3314.4	-
350	실험치	2185.1	406.1	133.31	3946	1338.02	91.88	94.8	1.33%	3238.0	2859
	해석치	2183.0	369.3	130.6	3875.0	1210.2	90.1	96.2	1.11	2982.0	-

<부하시험 결과>

마. 견인전동기 2차시제품 제작 및 시험

○ 개선설계

- 시험결과 기준치를 만족하나 통풍 유로를 개선하여 소음 및 효율개선을 확인하고 조합 시험을 실시하기 위해 아래와 같이 회전자 바와 고정자 코어형상 일부를 변경함

1차 시제품 설계안	2차 시제품 설계안
	
회전자 바 형상	
	
고정자 슬롯형상	

○ 2차 시제품 제작

- 온도상승시험 결과 기준온도를 상회하는 결과를 얻어 개선이 필요한 상황이며 개선과 무관한 부품에 대해서 제작 진행



<부하측 베어링 하우징>



<반부하측 베어링 케이스>



<디플렉터>



<회전자 축>



<터미널 박스>



<엔드프레임>

○ 2차 시제품 시험

- 제작된 2차 시제품을 이용한 성능시험 실시



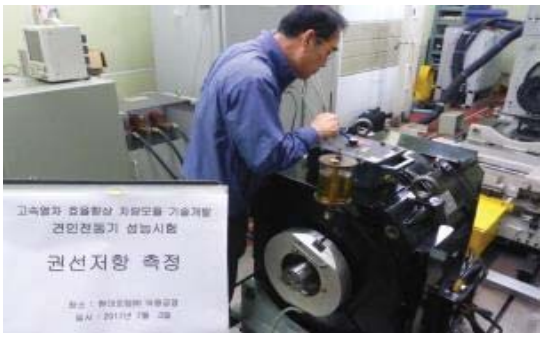
<치수측정>



<중량 측정>



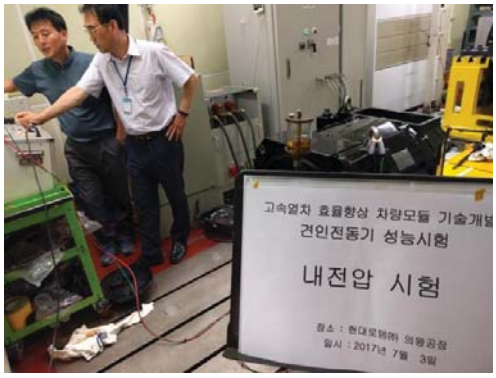
<외관 및 구조검사>



<권선저항 측정>



<특성시험>



<내전압 및 절연저항시험>



<소음 및 진동시험>



<온도상승시험>

- 제작된 2차 시제품 시험결과는 아래 표와 같음

<table>
<tr><th>순</th><th>검사 항목</th><th colspan="4">검사방법 및 판정기준</th><th>측정치</th><th>결 과</th><th>비고</th></tr>
<tr><td>1</td><td>완성품
외관검사</td><td colspan="4">육안으로 검사하여 사용상 해로운 흠, 녹, 오염 및 변형이 없어야 하며, 제품에 제품명, 제작사 약호, 제조년도, 일련번호 등이 표기되어 있는지 확인하여 이상이 없으면 양호로 한다.</td><td>이상 없음</td><td>양호</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">권선저항
측정시험</td><td>U-V</td><td colspan="3">0.0836 ± 10%</td><td>0.08342</td><td>양호</td><td></td></tr>
<tr><td>V-W</td><td colspan="3">0.0836 ± 10%</td><td>0.08342</td><td>양호</td><td></td></tr>
<tr><td>W-U</td><td colspan="3">0.0836 ± 10%</td><td>0.08327</td><td>양호</td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td>중량측정</td><td colspan="4">1500kg± 5% 일 것.</td><td>1514</td><td>양호</td><td></td></tr>
<tr><td>4</td><td>무부하
특성시험</td><td colspan="2">입력전압 : 2183V
주파수 : 136.5Hz</td><td colspan="2">1차 전류 측정 4대 평균치± 10%</td><td>44.4A</td><td>양호</td><td></td></tr>
<tr><td>5</td><td>구속
특성시험</td><td colspan="2">전류전류 : 391A
주파수 : 136.5Hz</td><td colspan="2">1차 전압 측정 4대 평균치± 5%</td><td>643.1V</td><td>양호</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="9">6</td><td rowspan="9">부하
특성시험</td><td rowspan="9" colspan="2">정해진
시험조건으로
시험을 실시하며, 각
속도에서 토크를
측정한다.</td><td>속도
(km/h)</td><td>판정기준
(Nm)</td><td></td><td rowspan="9">양호</td><td rowspan="9"></td></tr>
<tr><td>100</td><td>5993</td><td>6763</td></tr>
<tr><td>140</td><td>5770</td><td>6386</td></tr>
<tr><td>180</td><td>5547</td><td>6238</td></tr>
<tr><td>220</td><td>4538</td><td>5153</td></tr>
<tr><td>240</td><td>4160</td><td>4772</td></tr>
<tr><td>300</td><td>3328</td><td>3816</td></tr>
<tr><td>315</td><td>3170</td><td>3618</td></tr>
<tr><td>350</td><td>2853</td><td>3221</td></tr>
<tr><td>7</td><td>연속정격
온도상승</td><td colspan="3">전동기의 냉각 풍량을 1.25m^3/s 이상으로 하고 정격전압, 정격전류, 정격주파수를 인가하여 고정자 권선의 온도가 일정하게 될 때 까지 운전한다.</td><td>고정자 권선의 온도가 200K 이하 일 것</td><td>149.4K</td><td>양호</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">8</td><td rowspan="6">소음측정
시험</td><td colspan="3" rowspan="6">4100rpm에서 각 부위별 측정위치에서 측정한 데이터의 평균치가 113dB(A)이하 일 것.</td><td>1번 위치</td><td>97.5</td><td rowspan="6">양호</td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>2번 위치</td><td>93.3</td></tr>
<tr><td>3번 위치</td><td>96.3</td></tr>
<tr><td>4번 위치</td><td>99.2</td></tr>
<tr><td>5번 위치</td><td>94.2</td></tr>
<tr><td>평 균 치</td><td>96.1</td></tr>
<tr><td>9</td><td>과속도시험</td><td colspan="4">전동기를 4920rpm에서 2분간 운전하여 이상 진동 및 이상음 등이 없을 것.</td><td>이상
없음</td><td>양호</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">10</td><td rowspan="6">진동시험</td><td rowspan="6">형식</td><td rowspan="6">600rpm</td><td rowspan="6">3.5mm/s이하 일 것</td><td>①</td><td>0.2</td><td rowspan="6">양호</td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>②</td><td>0.2</td></tr>
<tr><td>③</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>④</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>⑤</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>⑥</td><td>0.3</td></tr>
</table>

순	검사 항목	검사방법 및 판정기준				측정치	결 과	비고
			1200rpm	3.5mm/s이하 일 것	①	0.5	양호	
					②	0.3		
					③	0.6		
					④	0.6		
					⑤	0.3		
					⑥	0.7		
			1800rpm	3.5mm/s이하 일 것	①	0.2	양호	
					②	0.2		
					③	0.3		
					④	0.4		
					⑤	0.5		
					⑥	0.4		
			2400rpm	3.5mm/s이하 일 것	①	1.3	양호	
					②	0.3		
					③	0.7		
					④	0.6		
					⑤	0.3		
					⑥	0.6		
	진동시험		3000rpm	3.5mm/s이하 일 것	①	1.1	양호	
					②	0.8		
					③	0.6		
					④	1.2		
					⑤	0.7		
					⑥	1.5		
			3600rpm	3.5mm/s이하 일 것	①	2.6	양호	
					②	0.6		
					③	2.3		
					④	3.4		
					⑤	1.4		
					⑥	2.0		
		형식/ 전수	4100rpm	5.25mm/s이하 일 것	①	3.1	양호	
					②	1.4		
					③	2.7		
					④	3.9		
					⑤	1.1		
					⑥	3.1		
11	절연저항 측정	전동기 고정자 권선과 프레임 사이를 1000V 메가로 절연자항을 측정하여 200㏁이상이면 양호로 한다.				9.05GΩ	양호	
11	내전압시험	고정자 권선과 프레임 사이에 AC 6600V를 1분간 인가하여 이상이 없을 것.				이상 없음	양호	
12	치수검사 (mm)	A		∅80	+0.046 0	80.007	양호	
		B		∅245	-0.050 -0.096	244.915		
		C		800	± 0.5	799.843		
		D		814	± 0.2	814.014		
13	속도센서 출력파형	30rpm		상한치(V_H)	7.5V 이상	9.4	양호	
				하한치(V_L)	1V 미만	0.5		
				위상차	90 ° ± 36 °	117.18		
		1800rpm		상한치(V_H)	7.5V 이상	9.4	양호	
				하한치(V_L)	1V 미만	0.5		

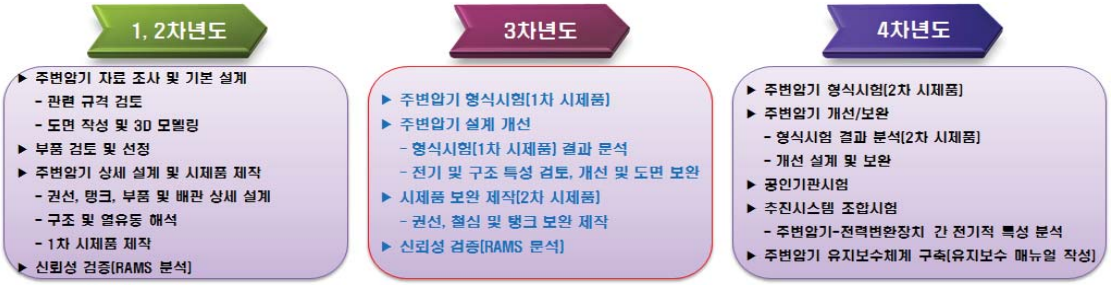
3. 효율향상 추진시스템 주변압기 개발

가. 주변압기 기술개발 연구 개요

(1) 견인전동기 개발 목표

○ 고속열차 추진시스템 출력성능 향상을 위한 주변압기 효율향상 기술개발
- 출력성능 향상을 위한 전기적, 구조적 주변압기 설계
- 기존 고속열차 주변압기 대비 인터페이스 호환 가능한 용량 향상된 주변압기 제작
- 형식시험 및 조합시험에 의한 주변압기 개발품 검증

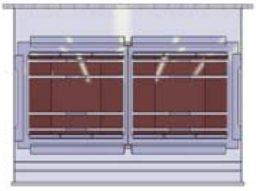
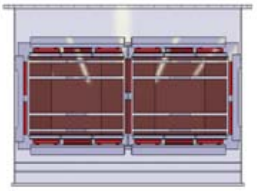
(2) 주변압기 연차별 연구 내용



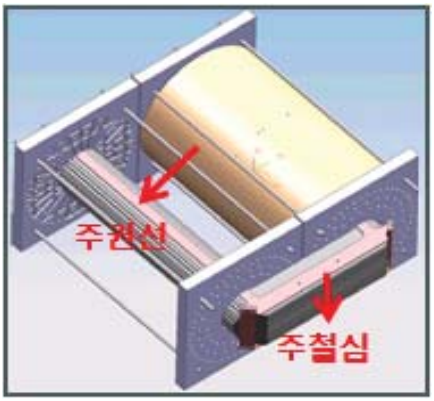
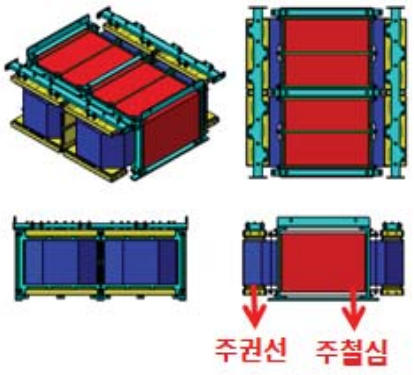
(3) 주변압기 특장점 및 설계 개선사항

○ 주변압기 특성비교 및 특장점
- 기술자료 수집을 통해 자체 보유하고 있는 기술력을 바탕으로 KTX-산천과 인터페이스 호환이 가능하며 효율이 향상된 주변압기 자체 설계

구분	KTX-산천 주변압기 (기존품)	효율향상 주변압기 (개발품)	개발품 특징(장점)
용량	6,200 kVA	7,080 kVA	- 용량 14% 향상
권선 및 적층구조	Core Type (내철형)	Shell Type (외철형)	- 기계적으로 강한 Shell Type 구조 - Shell Type 장점(코일 분할 적층)으로 인하여 기존 대비 냉각효과 우수 - Shell Type 특징(고조파 차폐 철판 설치)으로 인하여 노이즈 저감
냉각시스템 용량	200 kW × 2	200 kW × 2	- 주변압기 총손실은 줄었으나 냉각시스템 용량은 그대로 유지하여 냉각마진 향상
주변압기 치수	2755×1600×2706mm (가로×세로×높이)	2790×1500×2700mm (가로×세로×높이)	- 기존 고속열차(KTX-산천) 주변압기 대비 동일치수 및 인터페이스 호환 가능한 용량 향상된 주변압기 개발

구분	Without Shields - 기존품	With Shields - 개발품
고조파 차폐철판 적용		

<고조파 차폐철판 적용 전/후 비교>

구분	Core Type(내철형) - 기존품	Shell Type(외철형) - 개발품
적층 방식	 → 철심이 안쪽에 배치된 형태	 →철심이 바깥에서 둘러싼 형태

<적층 방식 비교>]

○ 주변압기 설계 개선 사항

KTX-산천 주변압기(기존품)	효율향상 주변압기(개발품)	개발품 특징(장점)
- 주변압기의 고장이 주로 고압권선에서 발생 - 고압권선의 절연지가 없는 곳에서 권선절연파괴 발생	- 1차와 2차 권선간 절연물의 두께를 11→14mm로 보강하여 BIL을 150→170kV로 보완함 - 층간 절연(Layer 절연) 보강 KTX-산천의 경우 고압측 권선의 후단부 절연이 되어있지 않음. 개발품의 경우 후단부 포함 전체 절연 보강	BIL 및 층간 절연(Layer 절연) 보강으로 절연 소손 방지
- 차량의 가선전압 운영환경이 30kV 이상으로 설정 - 과전압에 의한 포화현상 등으로 철심 포화 현상 발생	- 철심의 자속밀도는 25kV에서 1.56 테슬라, 27.5kV에서 1.71 테슬라, 30kV에서는 1.87 테슬라가 발생할 것으로 사료됨 - 개발품 철심의 Hysteresis loop의 경우 2.0 Tesla에서 포화 되므로 문제 없을 것으로 사료됨	철심 보완 제작으로 철심 포화현상 발생 감소
- KTX-산천 : 저압 부싱은 폴리머 재질, 고압 부싱은 포세린 재질 - 원강선 : 저압 부싱과 고압 부싱 모두 폴리머 재질	- 개발품의 경우 현재 저압 부싱은 폴리머 재질, 고압 부싱은 포세린 재질 - 고압 부싱도 폴리머 재질로 적용 필요(양산시 적용)	주변압기 애자 파손 방지
- 오일펌프 권선 소손시 권선 탄화물이 탱크 내부 권선으로 유입되어 주변압기 탈거 필요 - 오일 오염 발생시 전체 절연유 교체 필요	- 오일펌프 하부에 수집용 박스 및 차단 밸브를 설치해야함 - 소손시 오염물질이 박스로 모아 지도록 함으로써 탱크 내부로 유입되지 않게 하며, 하부 밸브 차단 후 수집된 부분만 탈거하여 오염 물질을 용이하게 제거 할 수 있도록 적용 필요	오일펌프 권선 소손 시 절연유 오염 방지되도록 개선
- 운행 중 주변압기 절연유 순환용 오일 펌프에 이상 소음 발생	- KTX-산천 주변압기의 오일펌프 사선 취부 구조에서 수직 구조로 개선	오일펌프 이상 소음 발생 방지

나. 주변압기 기본 설계

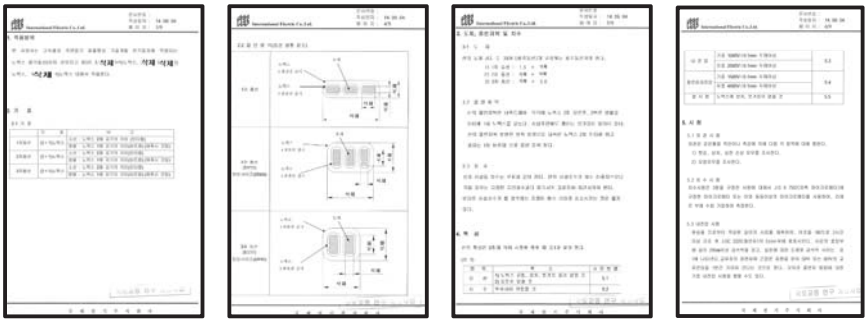
(1) 설계 특성 확인

○ 주변압기 특성

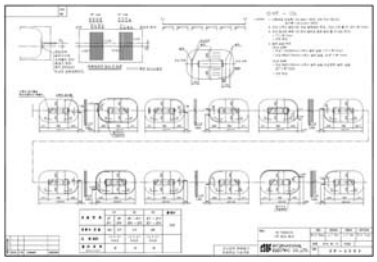
권선 / 정격	1차(고압)권선	2차(견인)권선	3차(보조)권선
	연속정격		
상수 [Ø]	1		
주파수 [Hz]	60		
용량 [KVA]	7,080	1,520×4권선	250×4권선
전압 [V]	25,000	1,400 × 4	383 × 4
전류 [A]	283.2	1,085.71 × 4	652.74 × 4
효율	0.95이상		
냉각방식	강제송유 풍냉식 (ODAF)		
냉각용량	340 kW 이상		
절연유	실리콘유		
철심구조	Shell Type (외철형)		

(2) 기본 설계 도면 작성

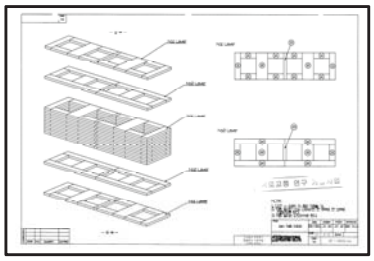
○ 전기 및 구조 설계 S/C 작업



○ 전기도면 작성

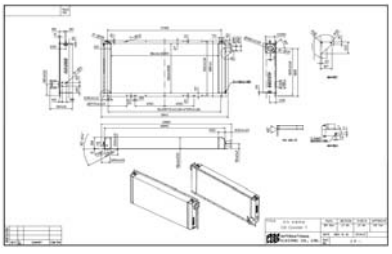


<1차 권선>

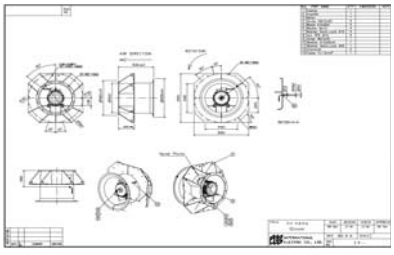


<코어 적층도>

○ 구조도면 작성

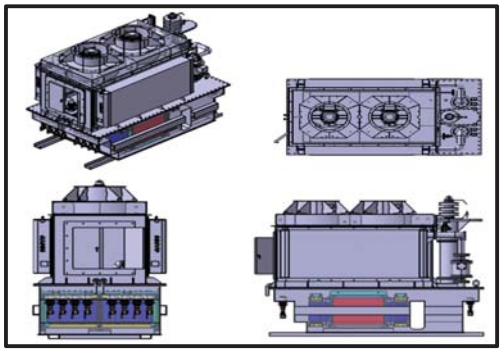


<오일 쿨러>

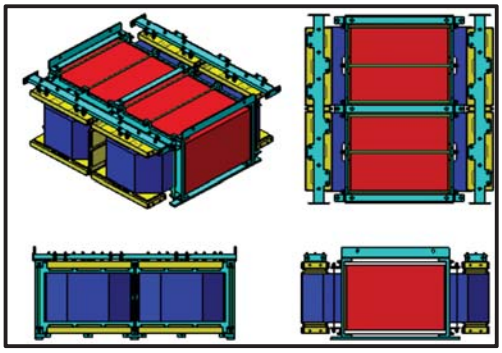


<송풍기>

(3) 3D 모델링 작업



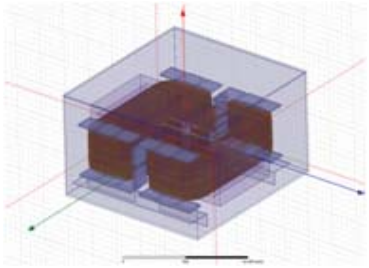
<주변압기 외형도>



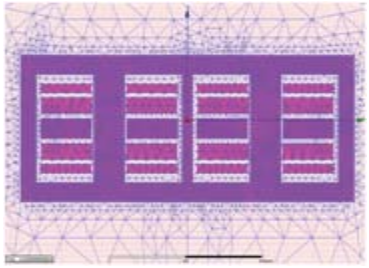
<중신>

(4) 해석 수행

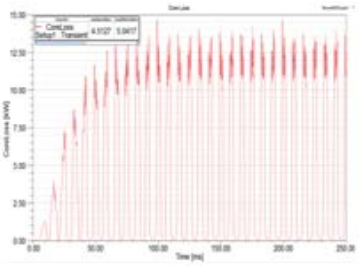
○ 전자계 해석



<주변압기 해석 모델>

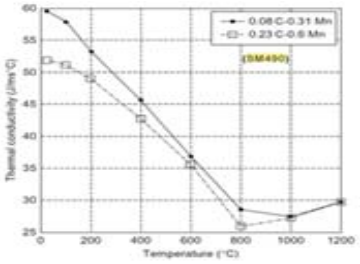


<해석 모델 요소망 분포>

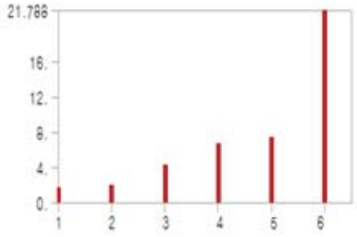


<해석 결과 산출>

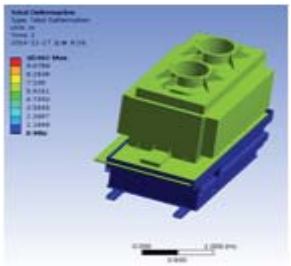
○ 구조 해석



<물성치 정보 입력>

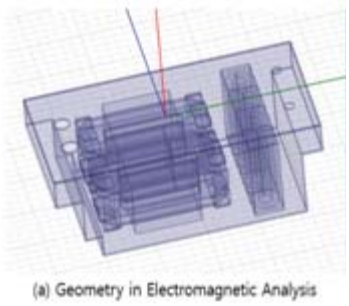


<Natural Frequenciees 입력>

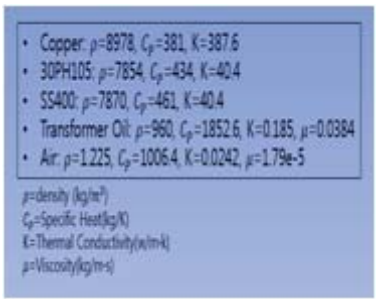


<해석 결과>

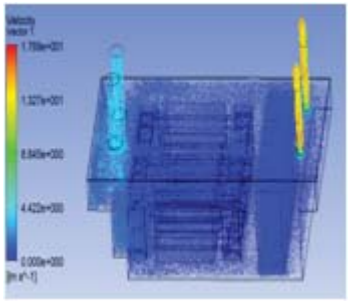
○ 열유동 해석



<주변압기 해석 모델>



<물성치 정의>

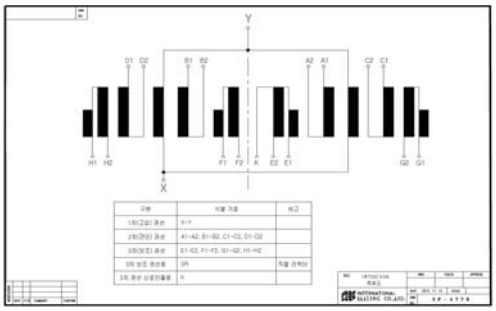


<해석 결과 산출>

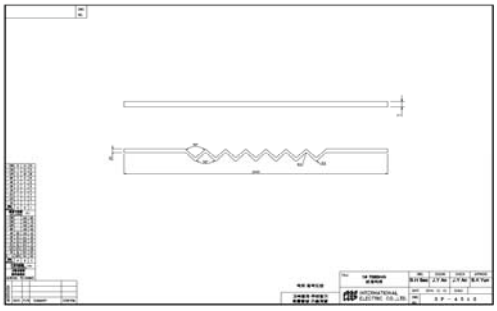
다. 주변압기 상세 설계

(1) 권선 상세 설계

○ 권선간에는 절연물 및 냉각 덕트를 배치한 구조하에 규정의 치수로 적층함. 내열성, 방염성 물질인 노맥스를 적용하여 강도 및 내구성이 강하며, 각 권선간 절연 보강을 하여 적층한 구조임



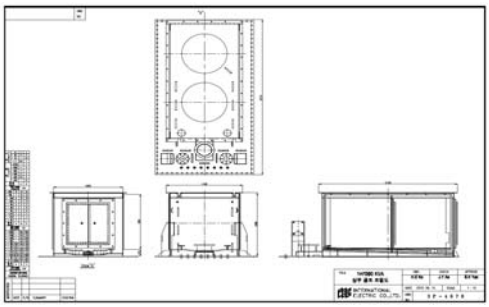
<주변압기 결선도>



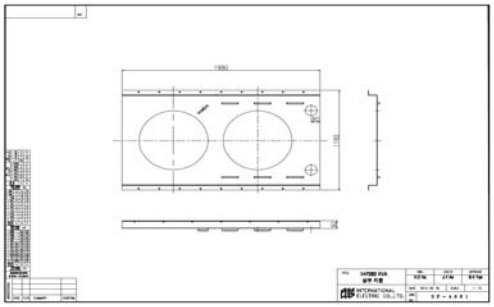
<층간 절연물 - 번개 덕트>

(2) 탱크 상세 설계

○ 주변압기 탱크는 용접구조로 견고하게 제작하여 운반, 취급시의 충격 및 진동에 충분히 견딜 수 있도록 설계되어 있음.
주변압기 함 내부의 조립품은 단락 사고시 기계력에 충분히 견디고 차량 주행시 충격이나 진동에 견딜 수 있도록 견고하게 지지하고 고정됨.

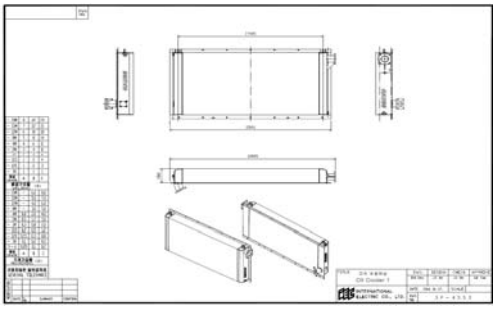


<상부 골조 조립도>

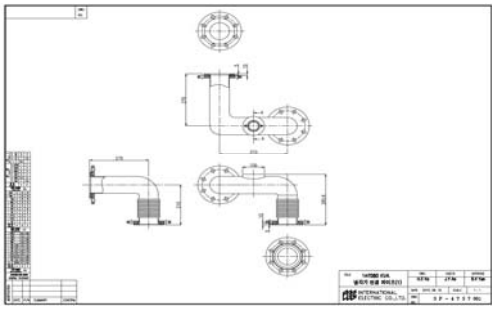


<상부 지붕>

(3) 부품 및 배관 상세 설계



<오일 쿨러>



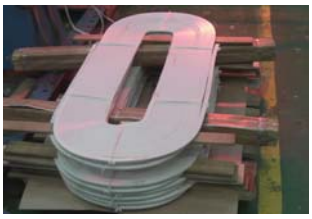
<오일 쿨러 연결 파이프>

라. 주변압기 1차시제품 제작

(1) 권선 제작

○ 권선은 판상권선형으로 제작하며 권선 사이에 스페이서(Spacer)가 설치됨. 스페이서는 냉각 및 기계력을 고려한 위치에 균등하게 배치하고 권선은 디스크(Disc) 권선 방법을 채택했으며, 대전류에 의해 발생되는 온도상승 및 기계력에도 충분히 견딜 수 있는 구조로 제작함


<1차 권선>


<2차 권선>


<3차 권선>

(2) 적층 및 중신조립

○ 주변압기 철심은 투자율이 높고 히스테리시스 손실이 적은 Non-Aging 방향성 규소강판을 사용하고, 철손이나 여자전류를 최소화하기 위해 폐사의 특수한 설계 및 절단방법으로 정밀절단 가공하여 운전시 진동, 소음을 최소한으로 줄이며 권선을 지지하기에 충분한 기계적 강도를 갖도록 견고하고 정밀하게 설계, 제작함

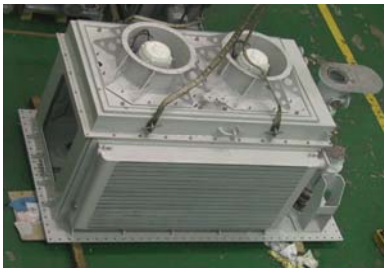

<주권선 중신 조립>


<리액터 중신 조립>

(3) 상부 및 하부 Base Tank 제작

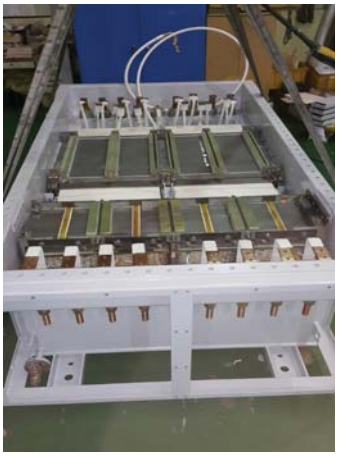
○ 변압기 본체의 탱크는 주행 중에 선로로부터 발생되어 변압기로 전달되는 충격이나 진동 등에 충분히 견딜 수 있는 구조로 제작되며, 중신군이 들어 있는 하부탱크 및 통풍구의 역할을 하는 상부탱크의 두 부분으로 분리된 구조로 제작함. 탱크에는 필요한 부속장치를 구비하고 있으며, 완전히 조립된 변압기는 적합한 개스킷을 사용하여 절연유가 누유 되지 않는 구조로 설계, 제작함.


<하부 탱크>


<상부 탱크>

(4) 중신 인입 및 결선 작업

○ 변압기의 주권선 중신 및 리액터 중신은 하부 탱크에 삽입됨. 주변압기 하부 탱크 내부에 삽입되어야 하므로 중신은 컴팩트하게 제작됨.



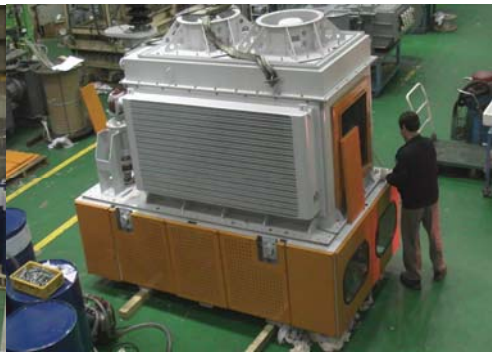
<주권선 중신 및 리액터 중신 삽입>

(5) 완성조립

○ 주권선 중신과 리액터 중신 삽입 후 결선작업을 진행하며, 결선작업 완료 후 상하부탱크 조립을 수행함. 상부탱크와 하부탱크는 볼트를 사용하여 체결되며, 부싱 및 변압기를 보호하기 위하여 변압기 커버를 취부함.



<상부 및 하부 탱크 조립>



<커버 및 악세서리 조립>



<1차 시제품 조립 완료>

마. 주변압기 1차시제품 시험 및 개선설계

(1) 1차 시제품 시험

(가) 1차 시제품 시험 결과 요약

No.	시험항목	시험결과	비고
1	권선저항 측정	양호	
2	변압비 측정	양호	
3	무부하손 및 무부하 전류 측정	양호	
4	임피던스 전압 측정	미흡	2차 시제품 개선
5	부하손 측정	양호	
6	인덕터 측정	양호	
7	유도 내전압 시험	양호	
8	상용주파 내전압 시험	양호	
9	충격 내전압 시험	양호	
10	온도 상승 시험	양호	

<1차 시제품 형식시험 결과(요약)>

(나) 임피던스 전압 측정시험 결과

① 형식시험 결과 2차 권선의 기준치는 42 ± 15% (35.7 ~ 48.3)이나 측정 결과 모두 50 이상 측정되어 기준치를 만족하지 못함

② 3차 권선의 기준치는 50 ± 15% (42.5 ~ 57.5)이나 측정 결과 모두 61 이상 측정되어 기준치를 만족하지 못함

MEASUREMENT OF IMPEDANCE VOLTAGE				
권선조합	용량 [kVA]	임피던스 [%] (at 150℃)		비고
		기준	측정	
P/A (X-Y/A1-A2)	1,520	42±15% (35.7~48.3)	50.90	2차 권선
P/B (X-Y/B1-B2)	1,520		50.98	
P/C (X-Y/C1-C2)	1,520		53.06	
P/D (X-Y/D1-D2)	1,520		53.07	
P/E (X-Y/E1-E2)	250	50±15% (42.5~57.5)	61.81	3차 권선
P/F (X-Y/F1-F2)	250		61.81	
P/G (X-Y/G1-G2)	250		62.19	
P/H (X-Y/H1-H2)	250		62.10	

<임피던스 전압 측정 결과>

(2) 1차 시제품 개선설계

(가) 전기 및 구조 특성 검토, 개선

① 형식시험 기준을 충족하지 못하는 임피던스 전압을 개선하기 위하여 권선 및 철심 단면적 사이즈를 변경함

구분	1차 시제품	2차 시제품	비고
1차 권선 단면적(mm^2)	30.1	29.35	
2차 권선 단면적(mm^2)	121.96	121.37	
3차 권선 단면적(mm^2)	87.22	76.96	
철심 단면적(mm^2)	748.0	840.96	

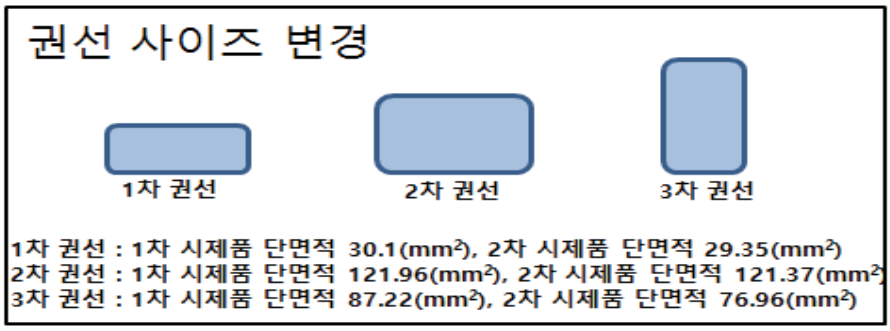
<2차 시제품 권선 및 철심 보완사항>

(나) 전기 및 구조도면 보완

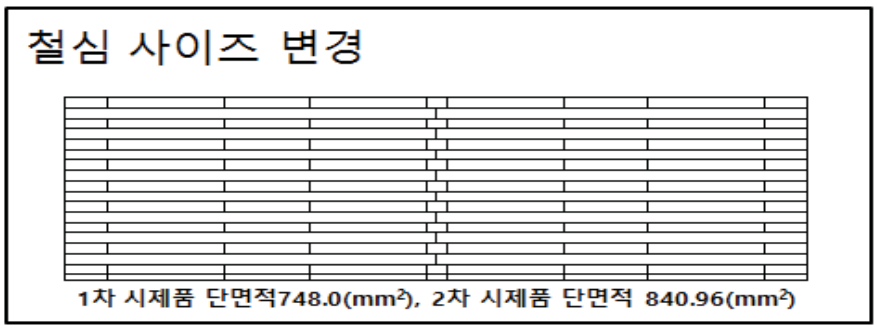
① 1차시제품의 임피던스전압을 감소시키기 위하여 1차, 2차, 3차 코일의 턴 수를 줄임으로써 권선의 단면적을 감소시켜 제작하였으며, 철심의 적층 두께를 증가시킴으로써 철심의 단면적을 증가시켜 제작하였음

② 2차 시제품의 1차, 2차, 3차 권선의 권선 단면적은 1차 시제품과 비교하여 약 2%, 3.2%, 11.1% 감소함

③ 2차 시제품의 철심 적층 두께는 1차 시제품과 비교하여 약 12.3% 증가함



<권선 사이즈 변경>

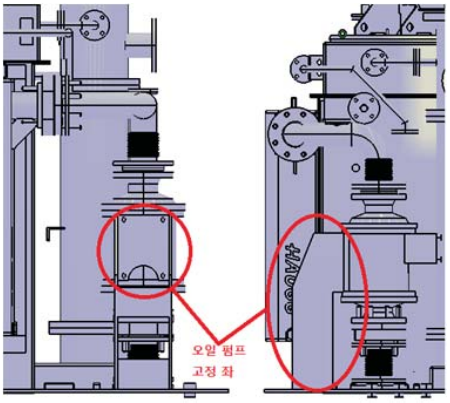


<철심 사이즈 변경>

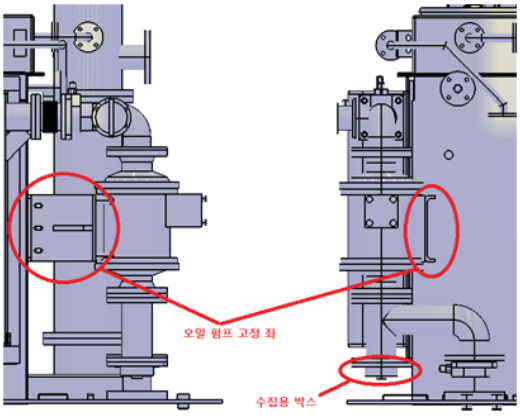
(다) 주변압기 냉각 효과 개선 설계

① 2차시제품 제작 중 온도 상승 시험 결과 냉각 효과에 대한 개선이 요구됨에 따라 개선 대책 마련

② 전기 및 구조 특성 검토, 개선
- 2차 시제품의 경우 오일펌프 권선 소손시 권선 탄화물이 탱크 내부 권선으로 유입되어 주변압기 탈거가 필요하며, 오일 오염 발생 시 전체 절연유 교체 필요.
- 오일 하부에 수집용 박스 및 차단 밸브를 설치하여 권선 소손시 오염물질이 박스로 모아지도록 함으로써 탱크 내부로 흡입되지 않게 하며, 하부 밸브 차단 후 수집된 부분만 탈거하여 오염 물질을 용이하게 제거할 수 있도록 적용함



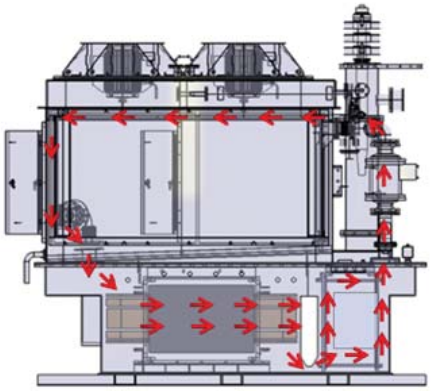
<수집용 박스 취부 전>

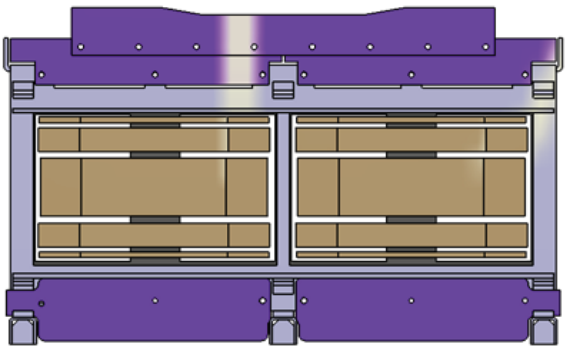


<수집용 박스 취부 후>

③ 냉각 흐름에 있어 절연유는 오일펌프를 통해 강제 순환되고 오일 쿨러를 걸쳐 냉각이 진행됨. 냉각된 절연유는 중신이 삽입되어 있는 하부탱크로 유입되어 권선(1차, 2차, 3차) 사이의 유로를 통과하며 권선을 냉각시켜야 함. 그러나 절연유가 탱크에 유입 시 중신과 탱크 사이의 공간으로 흘러 권선의 냉각효과가 떨어진 것으로 판단함.

④ 중신과 탱크 사이의 공간을 차단하여 절연유가 오직 권선 사이로만 순환하도록 개선 설계.

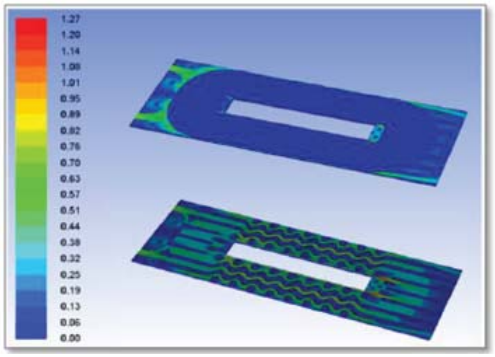

<주변압기의 냉각 흐름>


<주변압기 중신 상세>

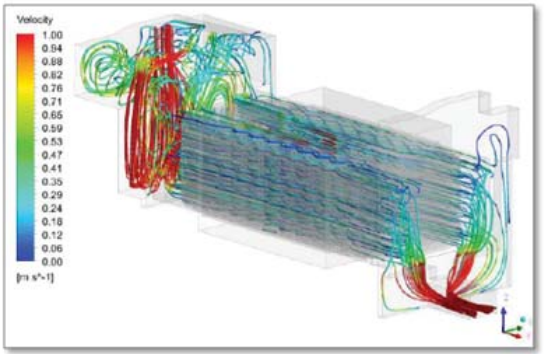
⑤ 주변압기 냉각유로 열유동 해석 및 냉각 특성 개선을 위한 오일 분배판 설계

- 1단계 : 단일 권선 열유동 특성 해석

- 2단계 : 전체 권선 유동 특성 해석

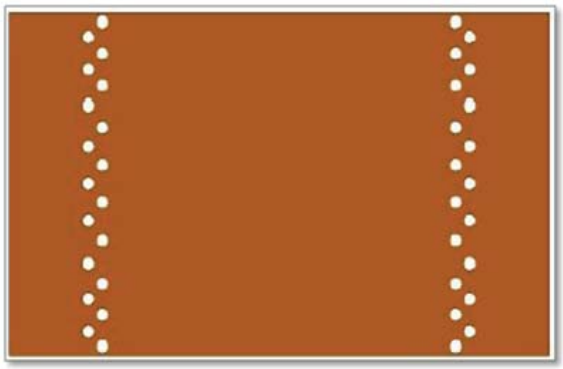


<단일 권선 열유동 특성>

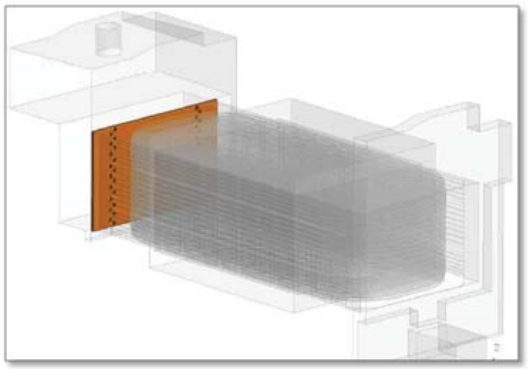


<전체 권선 유동 특성>

- 3단계 : 오일 분배판 설계

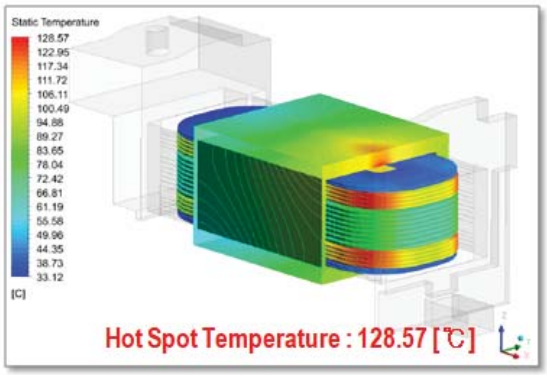


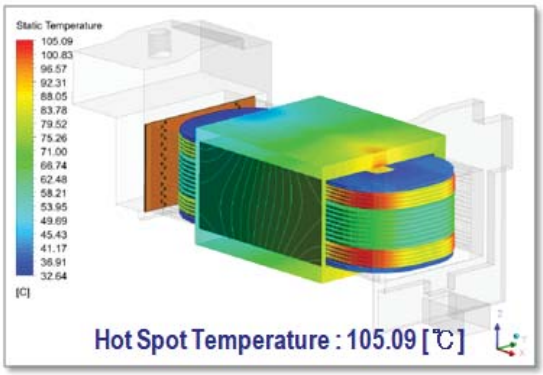
<오일 분배판 외형>



<오일 분배판 취부 구조>

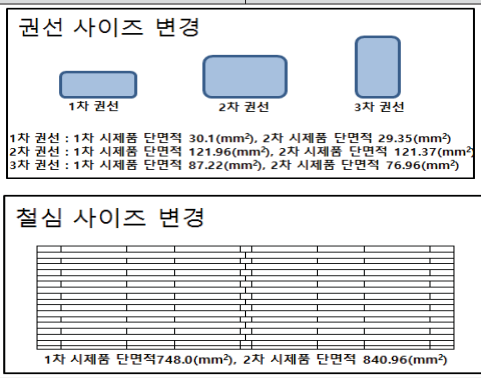
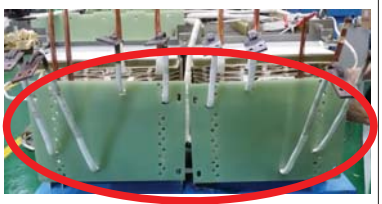
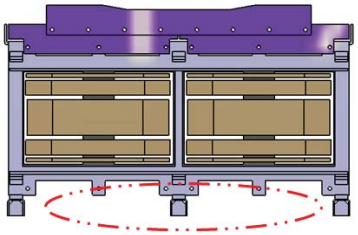
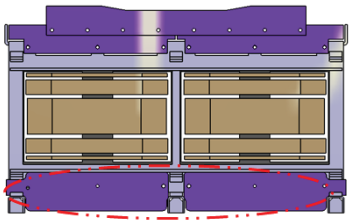
- 4단계 : 오일 분배판에 따른 전체 권선 유동 및 냉각특성 모사





- 해석 결과 오일 분배판 취부 시 Hot Spot Temerature 온도가 128.57℃에서 105.09℃로 23.48℃ 낮아짐

(라) 주변압기 1차 시제품 및 2차 시제품 비교

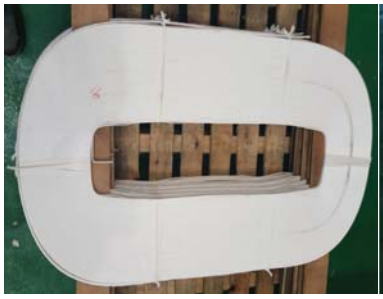
구분	1차 시제품	2차 시제품	비고
권선 및 철심 사이즈 변경			임피던스 전압 감소
오일펌프 구조	  → 수집용 박스 미 적용	  → 수집용 박스 적용	유지보수성 고려
오일분배판 취부	 →오일 분배판 미 적용	 →오일 분배판 적용	오일이 원활하게 적용
유로 개선	 →중신 하단 공간 차단 미 적용	 →중신 하단 공간 차단 적용	유로의 흐름 개선

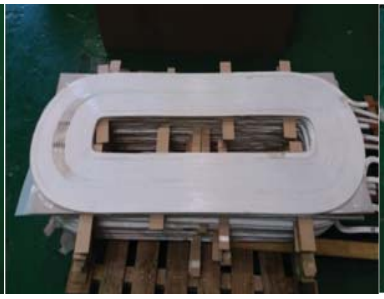
바. 주변압기 2차시제품 제작

(1) 권선 및 철심 보완 제작

(가) 권선 제작

- 권선 단면적 및 턴수를 보완하여 권선을 제작함.


<1차 권선>

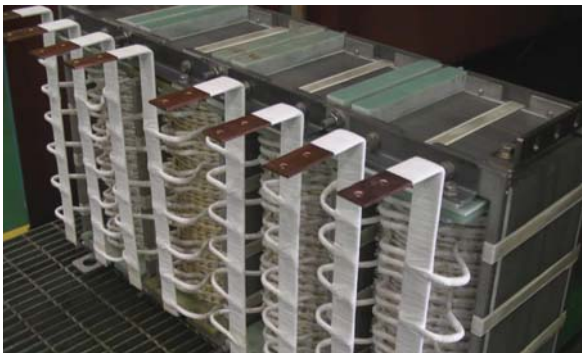

<2차 권선>


<3차 권선>

(나) 적층 및 중신 조립

- 철심의 적층 두께를 증가시킴으로써 철심의 단면적을 증가시켜 제작하였음


<메인 중신 조립>


<리액터 중신 조립>

(다) 탱크 보완 제작

① 권선 및 철심 보완 제작에 따라서 상부 탱크, 하부 탱크 보완제작


<하부 탱크 제작>


<상부 탱크 제작>

② 상부탱크 개선 제작

- 권선 소손시 오염물질일 박스로 모아지도록 함으로써 탱크 내부로 흡입되지 않게 하며, 하부 밸브 차단 후 수집된 부분만 탈거하여 오염물질을 용이하게 제거할 수 있도록 개선함.
- 수집용 박스 취부 전에는 상부탱크 하단으로부터 오일펌프를 고정하였으나, 수집용 박스 취부 후에는 오일펌프의 방향 및 고정좌의 위치를 보완함.

㉠ 오일펌프 고정 좌 및 파이프 제작

- 오일펌프 취부방식 변경으로 인하여 오일펌프 고정 좌 및 파이프를 개선 제작함.



〈오일펌프 고정 좌〉



〈오일펌프 파이프〉

㉡ 오일펌프 고정 좌 취부 및 파이프 가조립

- 오일펌프 고정좌를 용접 취부하기 위하여 오일펌프 및 파이프를 가조립 후 용접작업 실시



〈오일펌프 및 파이프 가조립〉



〈오일펌프 고정좌 용접작업〉

㉢ 오일펌프 고정좌 도장 및 파이프 조립

- 용접된 오일펌프 고정좌에 도장을 실시하고, 오일펌프 및 파이프를 조립함.



〈오일펌프 및 파이프 조립〉

(라) 2차 시제품 조립

- 하부 탱크 결선 작업 완료 후 상부, 하부 탱크 조립



<하부 탱크 결선 작업>



<상부, 하부 탱크 조립>

- 변압기 커버 조립 및 2차 시제품 제작 완료





<2차 시제품 제작 완료>

사. 주변압기 2차시제품 시험

(1) 2차 시제품 시험

(가) 2차 시제품 시험 결과 요약

No.	시험항목	시험결과	비고
1	권선저항 측정	양호	
2	변압비 측정	양호	
3	무부하손 및 무부하 전류 측정	양호	
4	임피던스 전압 측정	양호	
5	부하손 측정	양호	
6	총손실 산정	양호	
7	유도 내전압 시험	양호	
8	상용주파 내전압 시험	양호	
9	충격 내전압 시험	양호	
10	온도 상승 시험	진행중	

<2차 시제품 형식시험 결과(요약)>

(나) 임피던스 전압 측정시험 결과

① 형식시험 결과 2차 권선의 기준치는 42 ± 15% (35.7 ~ 48.3)이며, 측정 결과 모두 기준치를 만족함

② 3차 권선의 기준치는 50 ± 15% (42.5 ~ 57.5)이며, 측정 결과 모두 기준치를 만족함

MEASUREMENT OF IMPEDANCE VOLTAGE					
권선조합	용량 [kVA]	임피던스 [%] (at 150℃)			비고
		기준	1차 시제품 측정	2차 시제품 측정	
P/A (X-Y/A1-A2)	1,520	42± 15% (35.7~48.3)	50.90	45.42	2차 권선
P/B (X-Y/B1-B2)	1,520		50.98	45.21	
P/C (X-Y/C1-C2)	1,520		53.06	45.94	
P/D (X-Y/D1-D2)	1,520		53.07	47.04	
P/E (X-Y/E1-E2)	250	50± 15% (42.5~57.5)	61.81	49.98	3차 권선
P/F (X-Y/F1-F2)	250		61.81	49.99	
P/G (X-Y/G1-G2)	250		62.19	51.57	
P/H (X-Y/H1-H2)	250		62.10	52.10	

<임피던스 전압 측정 결과>

제4절 운영효율향상 고속열차 주행장치 기술개발

1. 운영효율향상 주행장치 개발

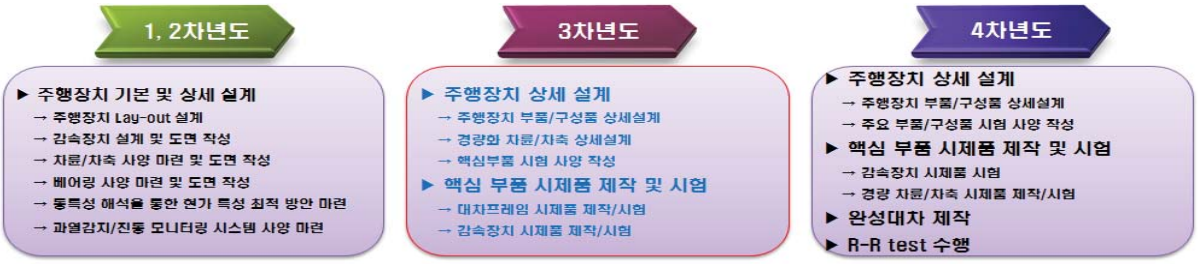
가. 운영효율향상 주행장치 기술개발 연구 개요

(1) 주전력변환장치 개발 목표

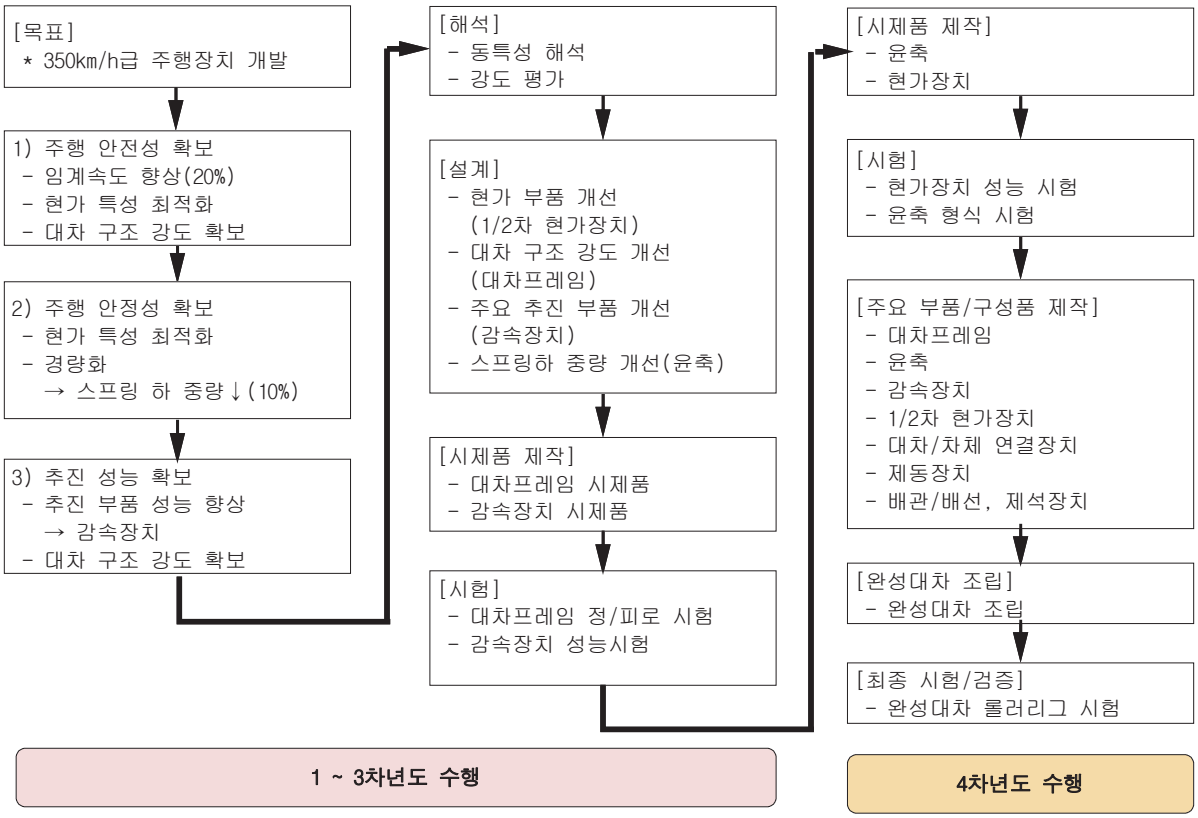
○ 주행장치 임계속도 20% 향상
- KTX-산천 주행장치 대비 임계속도 20% 향상

○ 운영 효율 향상을 위한 350km/h용 핵심 부품 제작 및 경량화, 현가장치 최적화
- 350km/h급 감속장치 개발/제작 및 윤축 경량화 설계(KTX-산천 대비 10% 경량화)
- 현가장치 최적화 설계 및 제작을 통한 임계속도 20% 향상

(2) 연차별 연구내용



(3) 설계 프로세스



(4) 운영효율향상 주행장치 특장점 및 설계 개선사항

○ 주행장치 비교사항 및 특장점

KTX-산천 주행장치 (기존품)	효율향상 주행장치 (개발품)	개발품 특징(장점)
운영 속도 300km/h	운영 속도 350km/h	운영 효율 향상 (운영 속도 17% 향상) - 열차간 운영 시간 단축 가능 - 동일 구간 내 운영 시격 단축 가능
2단 감속장치 - 기어비: 2.19	2단 감속장치 - 기어비: 1.88	1250kW 용 추진장치에 적합한 감속장치 - 추진 용량 10% 증대에 최적기어비 적용
차륜/차축 - 중량 : 1,141 kg	차륜/차축 - 중량 : 1,027 kg	경량화 차륜/차축 - 기존 대비 10% 경량
※ 기존 고속열차(KTX, KTX-산천, KTX-호남, 수서, 원강선) 주행장치와 100% 호환 가능한 interface 구현 (기존 고속차량의 Upgrade 시 실용화 가능) ※ 기존 고속열차(KTX, KTX-산천, KTX-호남, 수서, 원강선) 주행장치와 동일 유지보수성을 같도록 interface 구현 (기존 고속차량의 유지보수 설비/지그/툴 공용 사용 및 검수 주기 동일 적용)		

○ 주행장치 설계 개선사항

KTX-산천 주행장치	효율향상 주행장치 개선사항	개발품 특징(장점)
감속장치 혼수 - 개방형 실링 구조 적용	2중 실링 구조 적용 - 개방형 실링 구조 + V-ring 타입 밀폐형실링	동절기 강설에 의한 혼수 예방 효과
대차프레임 횡버퍼브라켓 - 용접식 구조 복잡 : 용접 불량 발생 우려	횡버퍼브라켓 구조 단순화 - 용접 작업 최소화로 불량 우려 사항 방지	형상 최적화 및 단순화 - 용접 작업 용이 - 용접 불량 발생 우려 방지 - 동등 이상 강도 확보



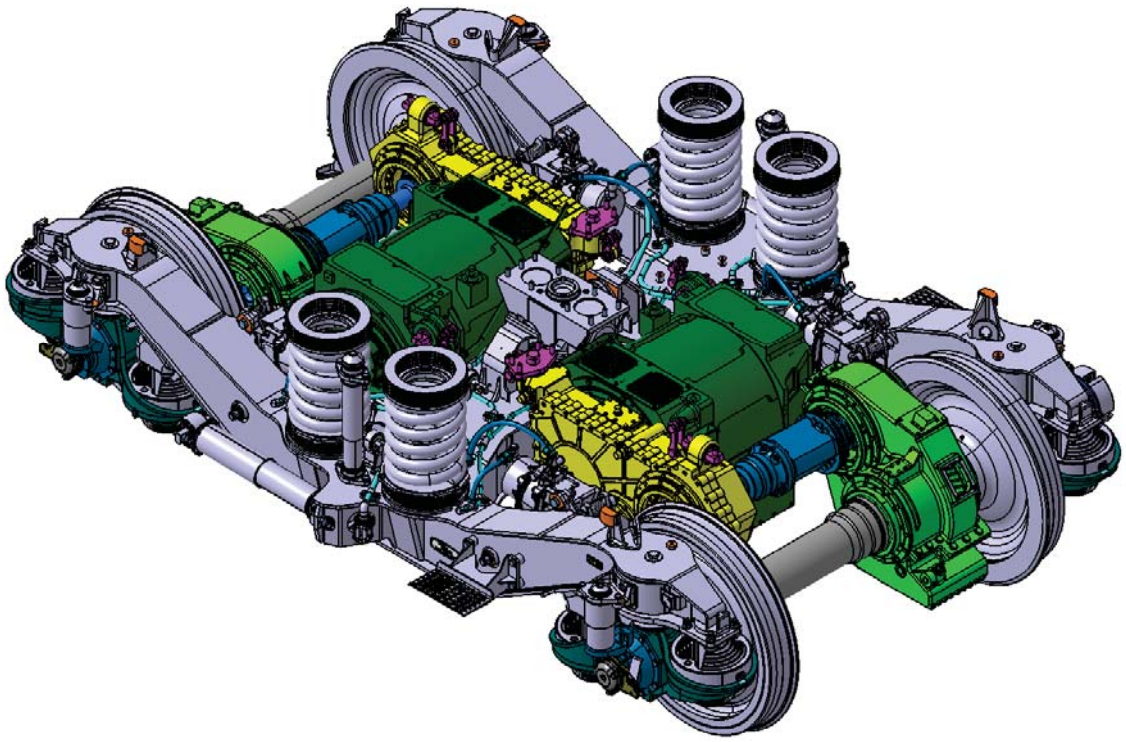
나. 주행장치 기본설계 및 상세설계

(1) 개발 사양

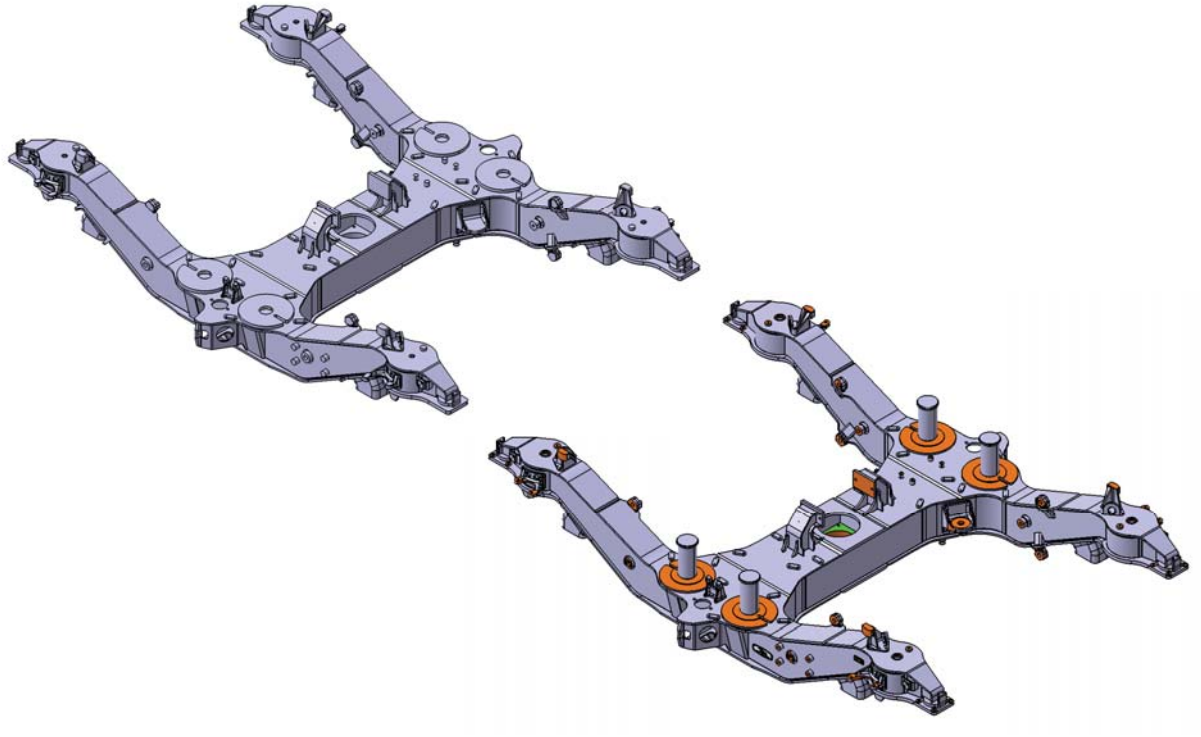
구분	KTX-산천	개발 사항	비고
운영 속도	300 kph	350 kph	속도 증대로 운영 시격 단축 개선
감속장치	기어비2.19	기어비1.88	속도 증대에 적합한 감속비 개선 (350kph용 최적화 감속장치)
윤축	EA1N/ER7	10% 경량 윤축	기존 대비 재질/형상 개선으로 경량화
대차프레임		제작성 향상 강도 향상	대차프레임 형상 보완/개선
액슬박스	GE280N	A7050-T74	기존 액슬박스와 동일 I/F 적용 경량 액슬박스 (약 48% 경량화)
안티롤바	51CrMoV4	SUP 11A	동력대차 적용 가능한 안티롤바
기타		축상 발열 검지 모니터링 장치	기존 동력대차와 설치 Interface 100% 호환 가능

(2) 핵심부품 및 대차 LAY-OUT 설계

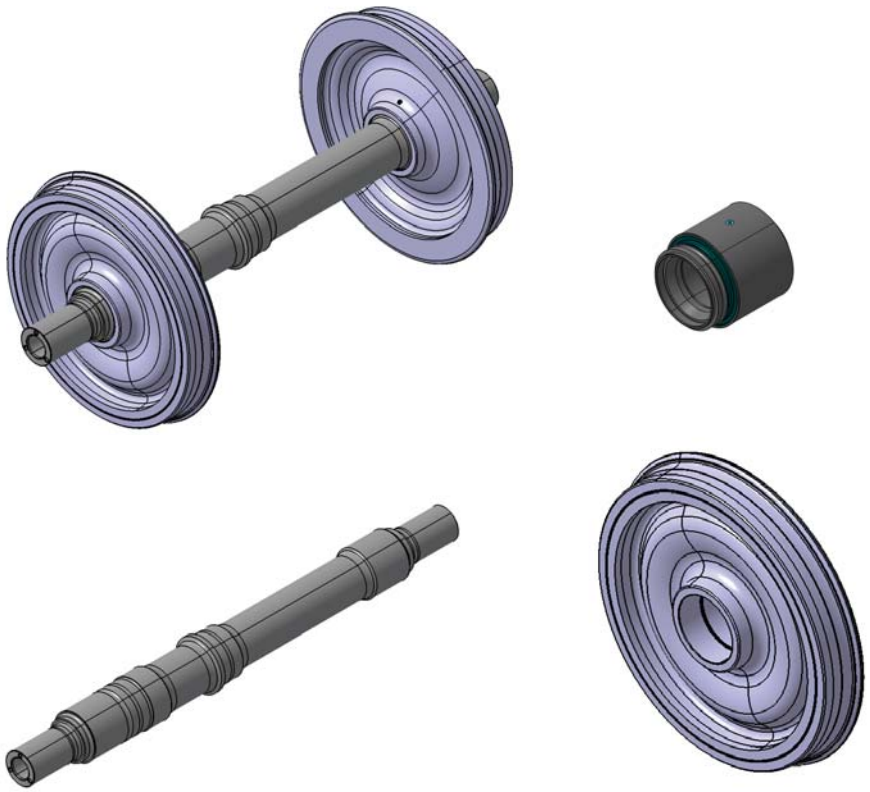
(가) 완성대차 모델링



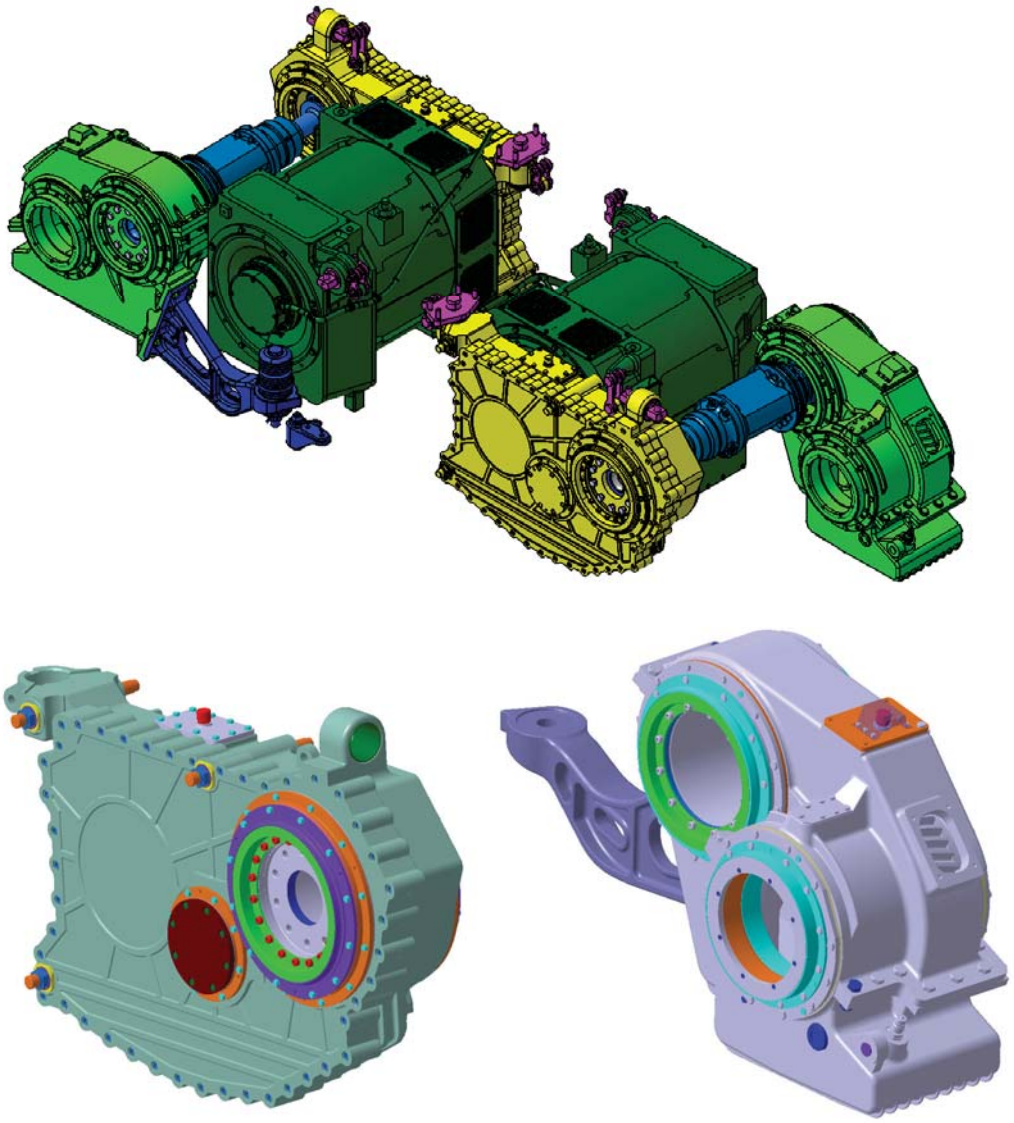
(나) 대차프레임 모델링



(다) 윤축 모델링



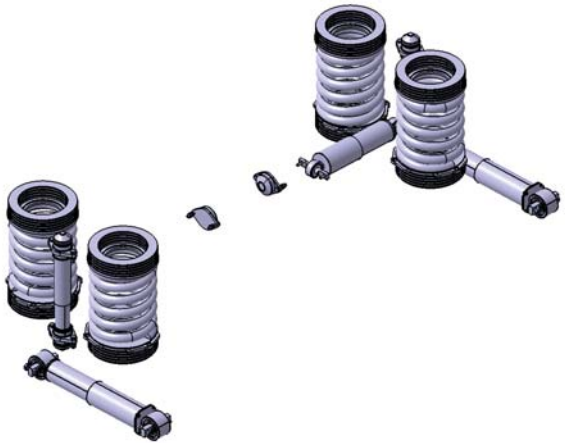
(라) 감속장치 모델링



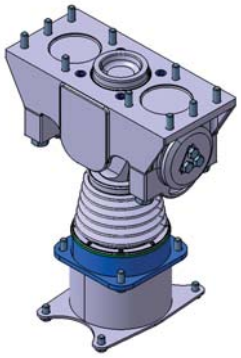
(마) 1차 현가장치 모델링



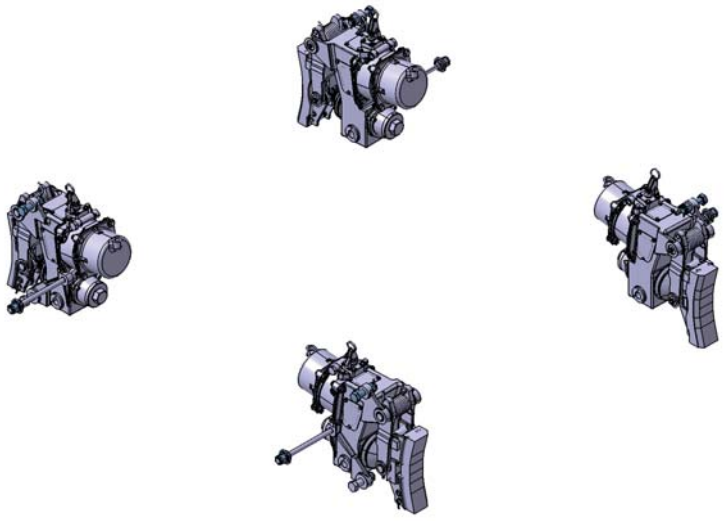
(바) 2차 현가장치 모델링



(사) 대차/차체 연결장치 모델링



(아) 제동장치 모델링



(3) 동특성 해석

○ 효율 향상을 위한 동력대차의 임계속도 향상을 위해 대차의 성능이 정상인 조건과 비정상적인 조건, 즉, 요댐퍼의 성능 저하, 답면구배 저하 등을 고려하여 검토함

(가) 차륜 답면 구배 검토

○ 대차가 직선을 주행할 때 한 차축에 조립된 두 차륜이 레일과 접촉되는 위치에서 직경차가 발생하면 이로 인하여 윤축이 회전하게 되어 직선주행이 어려운 불안정한 상태가 되므로 레일과 접촉위치의 직경차를 나타내는 등가답면 구배를 검토함.

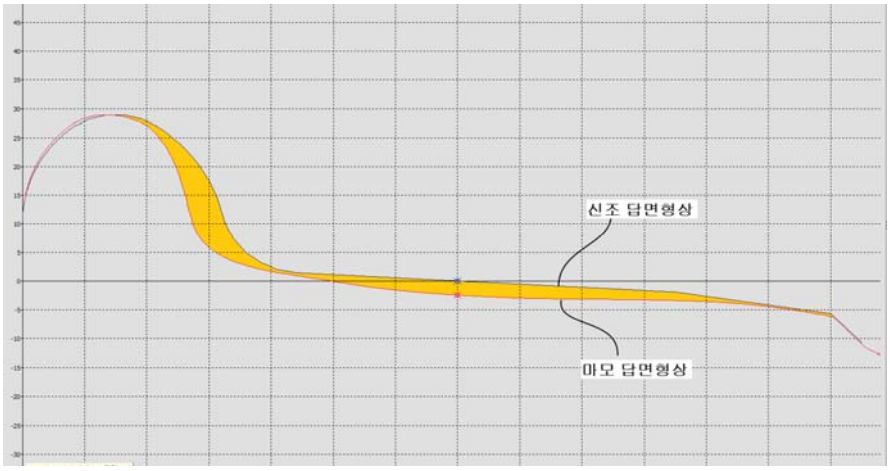
▶ 등가답면구배

주행안정을 위해 삭정이 요구되는 마모차륜 형상 8 타입 중 차륜내면간 거리 변화와 레일 내면간 거리 변화에 대하여 등가답면구배가 가장 나쁜 타입 3을 선정함.

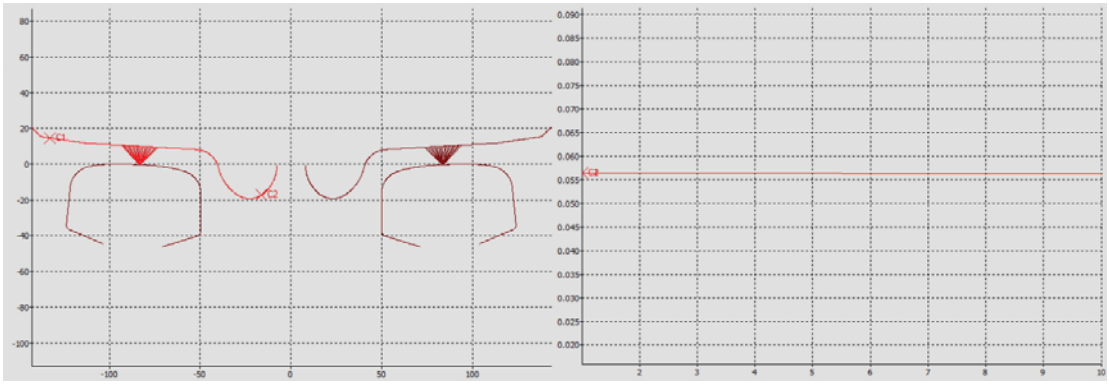
- 차륜 : XP55(1/20경사)
- 레일 : UIC60(1/20경좌)

		등가 답면 구배						
차륜 내면간 거리 (1356 0/-2 mm)		1354 mm		1356 mm		1356 mm		삭정 기준[1]
레일 내면간 거리		1435 mm		1435 mm		1438 mm		
접촉 위치		3 mm	5 mm	3 mm	5 mm	3 mm	5 mm	
신조 차륜		0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	
마모 차륜	타입 1	0.190	0.175	0.256	0.210	0.163	0.160	
	타입 2	0.102	0.142	0.205	0.168	0.044	0.138	
	타입 3	**0.205**	**0.190**	**0.293**	**0.235**	**0.134**	**0.170**	
	타입 4	0.135	0.175	0.250	0.225	0.019	0.140	0.15
	타입 5	0.112	0.118	0.107	0.118	0.106	0.118	
	타입 6	0.110	0.105	0.113	0.114	0.101	0.098	
	타입 7	0.085	0.126	0.101	0.102	0.099	0.128	
	타입 8	0.076	0.090	0.060	0.085	0.086	0.090	

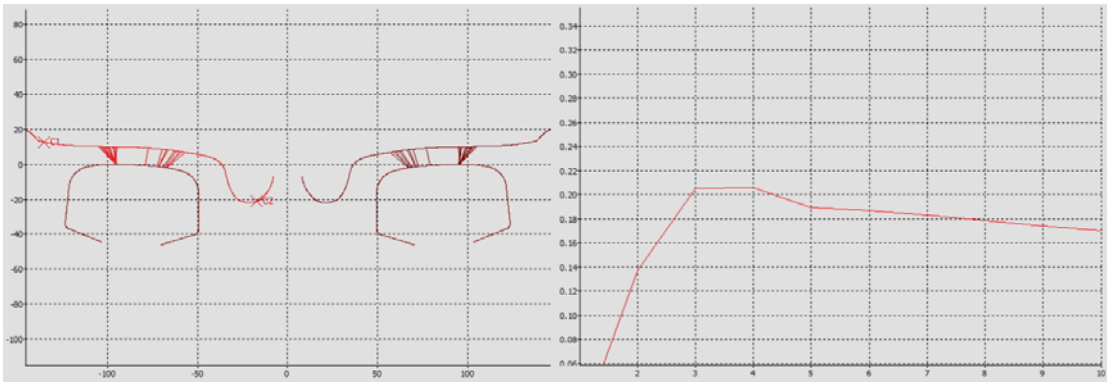
주기 1) EN14363, UIC518에 근거한 300KPH이상 고속차량의 등가답면구배 최대 기준임.



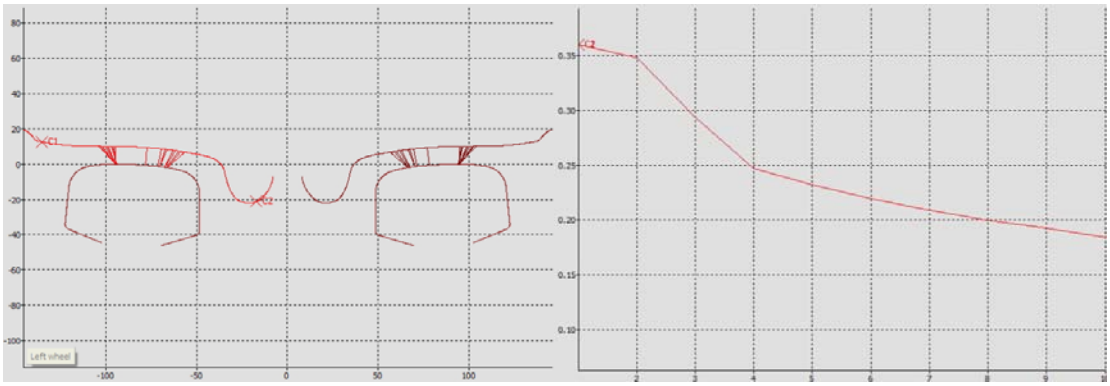
<타입 3의 답면 형상>



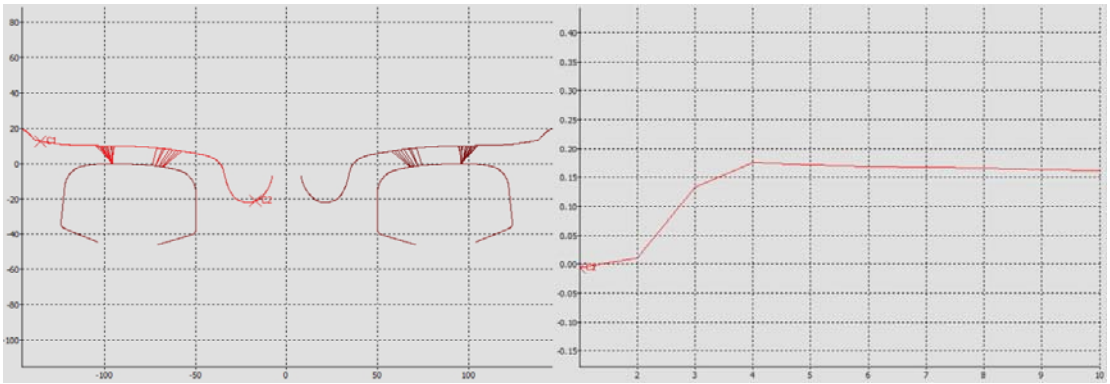
<신조차륜 : 차륜 내면 1356mm, 레일 내면 1435mm>



<마모차륜 타입 3 : 차륜 내면 1354mm, 레일 내면 1435mm>



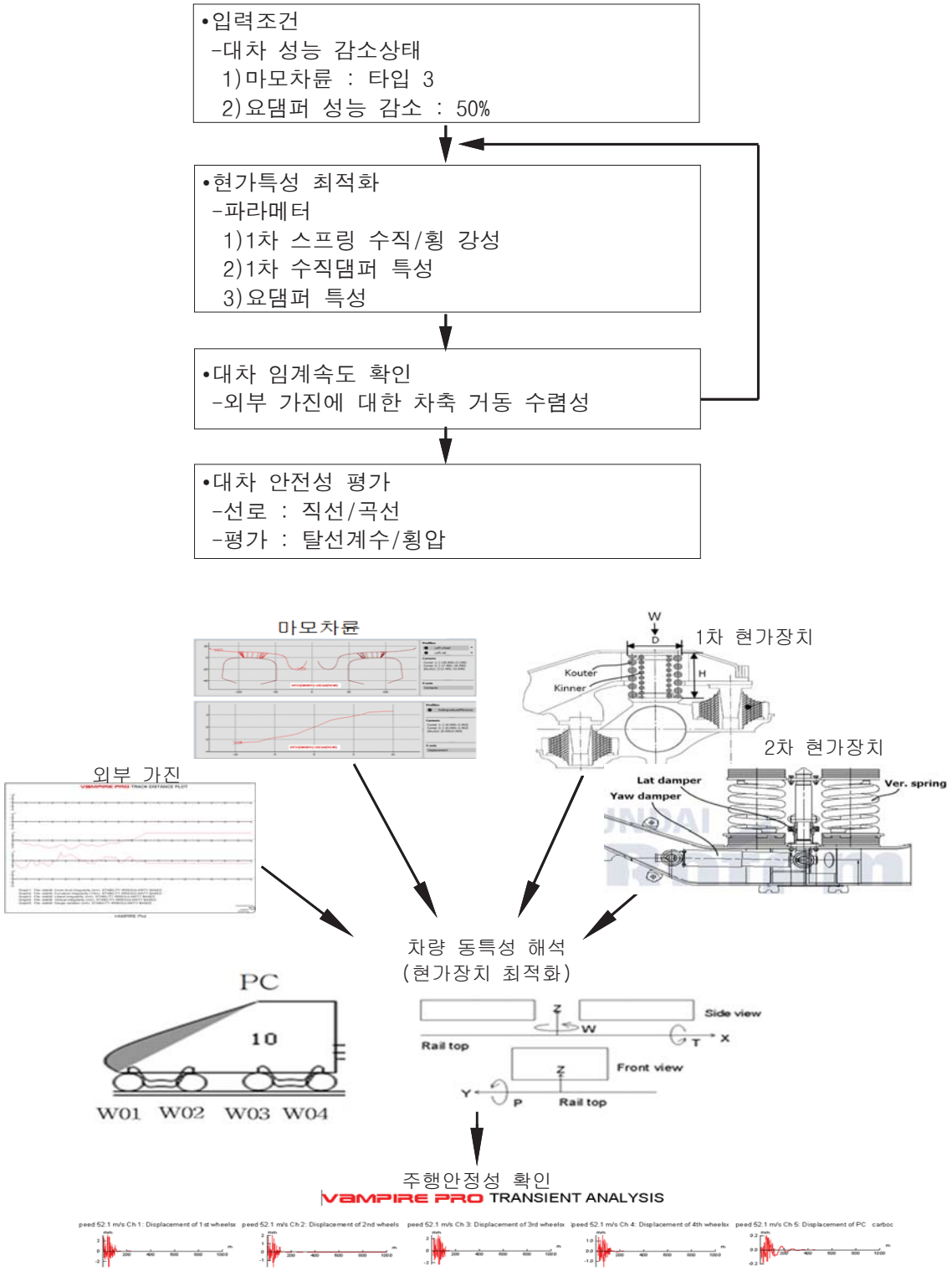
<마모차륜 타입 3 : 차륜 내면 1356mm, 레일 내면 1435mm>



<마모차륜 타입 3 : 차륜 내면 1356mm, 레일 내면 1438mm>

(나) 차량 동특성 해석

○ 차륜 등가답면구배 검토를 통하여 선정된 차륜 타입 3에 대하여 대차의 임계속도를 확인하고 대차성능 감소상태에서 기존 대비 대차임계속도 20% 향상을 만족하는 대차 현가특성을 최적화 함.

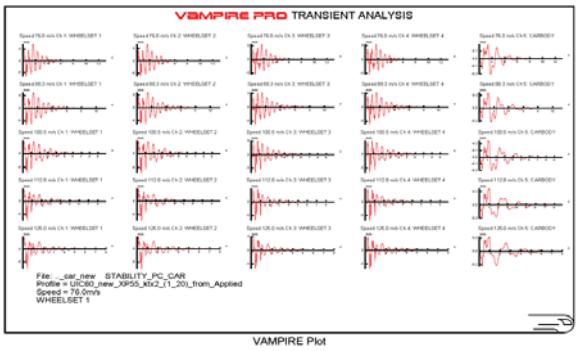


<대차 주행안정성 평가 절차>

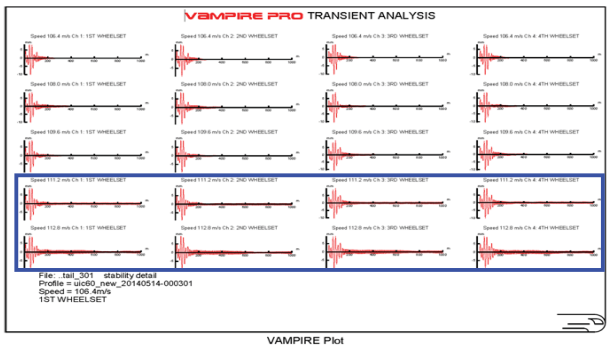
▶ 대차 임계속도

대차의 성능이 감소된 상태(마모차륜, 요댐퍼 성능 감소 50%)에서 대차의 불안정속도인 임계속도를 확인한 결과 현가특성 최적화 전 318km/h인 임계속도가 최적화 후 396km/h로 약 20% 향상됨.

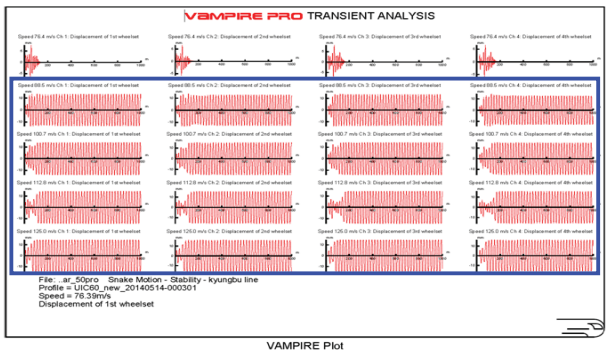
대차 상태	조건		불안정속도(임계속도)		비 고
	차륜	요댐퍼	현가특성 최적화 전	현가특성 최적화 후	
정상 상태	신조차륜	정상(100%)	450km/h 이상	450km/h 이상	
마모/감소 상태	마모차륜 (TYPE3)	정상(100%)	400km/h	450km/h 이상	
	마모차륜 (TYPE3)	감소(50%)	318km/h	396km/h	임계속도 20% 증가



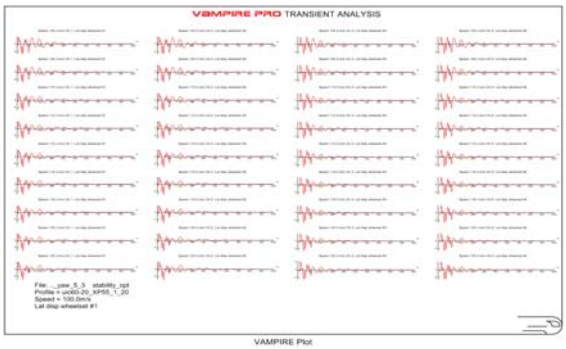
<최적화 전: 신조차륜/요댐퍼 정상, 임계속도 450km/h 이상>



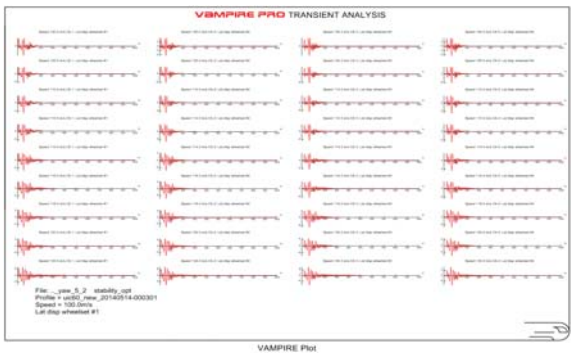
<최적화 전: 마모차륜/요댐퍼 정상, 임계속도 400km/h>



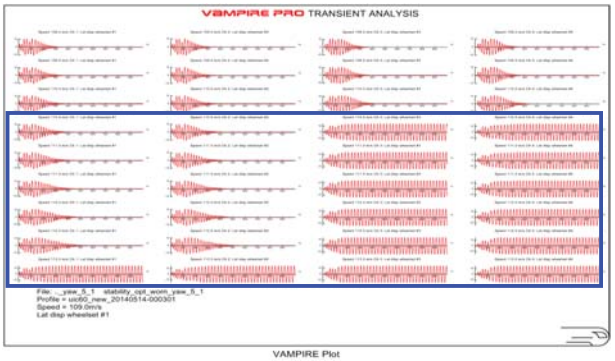
<최적화 전: 마모차륜/요댐퍼 50%감소, 임계속도 318km/h>



<최적화 후: 신조차륜/요댐퍼 정상, 임계속도 450km/h이상>



<최적화 후: 마모차륜/요댐퍼 정상, 임계속도 450km/h이상>



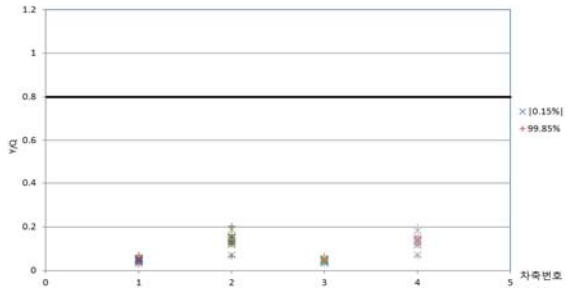
<최적화 후: 마모차륜/요댐퍼 50% 감소, 임계속도 396km/h>

▶ 대차 안전성 평가

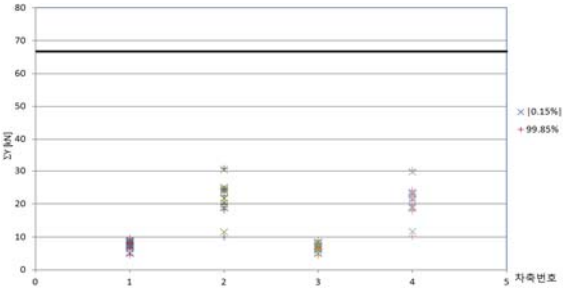
최적화된 현가특성에 대해 주행안전성(Safety)인 탈선계수(Y/Q)와 횡압(ΣY)를 평가한 결과 기준이내임.

- 선로 : 직선선로(경부선)/곡선 7000R(경부선)
- 항목 : 탈선 계수(Y/Q), 횡압(ΣY)
- 차륜 : 마모차륜 타입 3
- 속도 : 곡선 7000R : 337.5km/h(최대 통과 속도)
  직선 : 432km/h(요댐퍼 정상), 396km/h(요댐퍼 50% 감소)

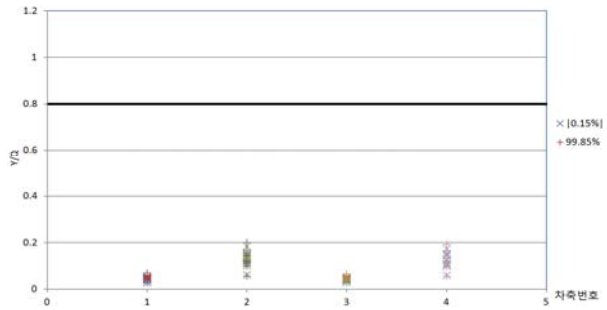
선로		속도 (km/h)	차축 번호	Y/Q		ΣY		평가
				최대값	기준	최대값 (kN)	기준(kN)	
직선	요댐퍼 정상	432	1	0.077	0.8	11.49	66.7	기준 이내
			2	0.236		37.34		
			3	0.081		10.69		
			4	0.237		35.83		
	요댐퍼 50%감소	396	1	0.082	0.8	11.239	66.7	기준 이내
			2	0.250		37.62		
			3	0.078		10.62		
			4	0.247		37.23		
곡선 (7000R)	요댐퍼 정상	337.5	1	0.088	0.8	11.05	66.7	기준 이내
			2	0.231		32.72		
			3	0.079		10.22		
			4	0.236		33.87		
	요댐퍼 50%감소	337.5	1	0.094	0.8	11.61	66.7	기준 이내
			2	0.257		36.97		
			3	0.088		11.34		
			4	0.257		37.05		



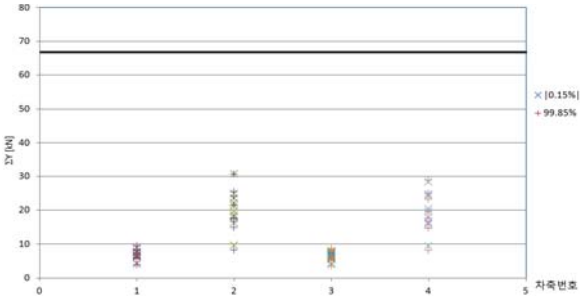
<탈선계수(Y/Q) : 직선, 요댐퍼 정상, 432km/h>



<횡압(ΣY) : 직선, 요댐퍼 정상, 432km/h>



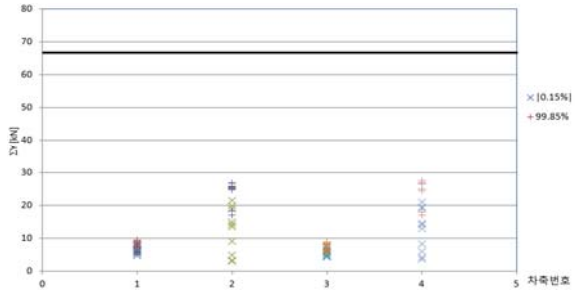
<탈선계수(Y/Q) : 직선, 요댐퍼 50%감소, 396km/h>



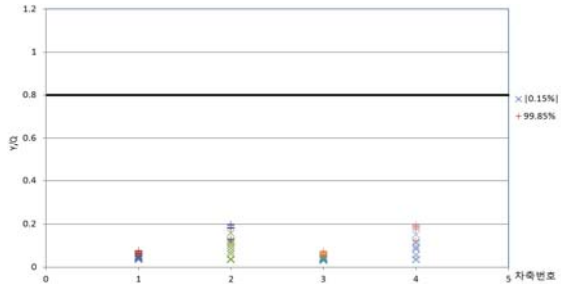
<횡압(ΣY) : 직선, 요댐퍼 50%감소, 396km/h>



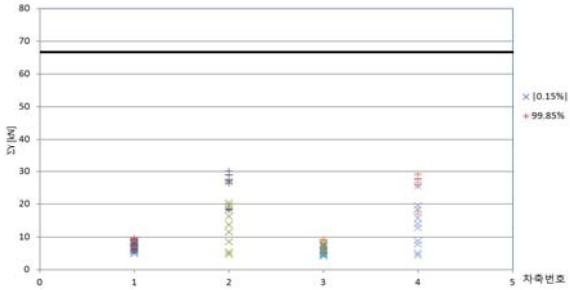
<탈선계수(Y/Q) : 곡선, 요댐퍼 정상, 337.5km/h>



<횡압(ΣY) : 곡선, 요댐퍼 정상, 337.5km/h>



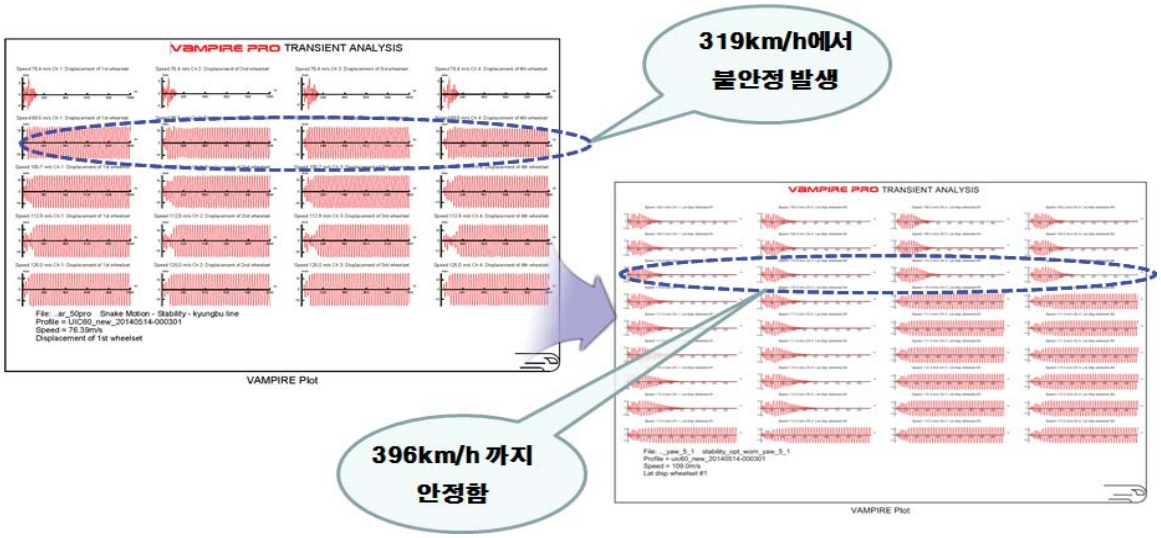
<탈선계수(Y/Q) : 곡선, 요댐퍼 50%감소, 337.5km/h>



<횡압(ΣY) : 곡선, 요댐퍼 50%감소, 337.5km/h>

(다) 차량 동특성 해석 요약

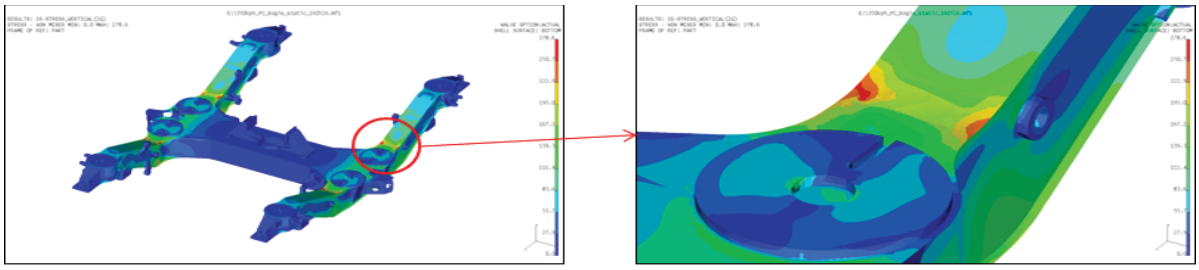
○ 해석 결과를 요약하면 대차성능 감소상태에서도 현가장치 최적화를 통해 기존 대비 대차 임계속도 20% 향상을 만족함.



(3) 대차프레임 해석

(가) 정하중 해석 결과

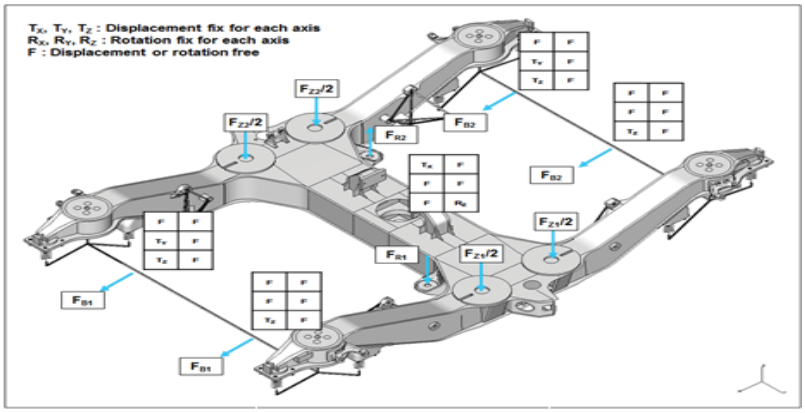
○ 발생하는 최대응력은 수직 하중 조건 시 Side frame 상부에서 278.6 MPa로 항복강도 이내에 있으며 또한 다른 모든 하중 조건에 대하여 발생하는 최대응력도 재질의 허용강도 이내에 있음



수직 하중 조건 해석 결과

순번	하중 조건	최대응력(MPa)	항복강도(MPa)	재질	위치
1	수직 하중	278.6	325	SM490A	Side frame 상부
2	비틀림 하중	196.6	325	SM490A	Side frame 상부
3	전후 하중	182.1	325	SM490A	Side frame 하부
4	좌우 하중	238.7	325	SM490A	Side frame 상부
5	모터하중	165	325	SM490A	Side frame 상부
6	Electric braking 하중	161.1	325	SM490A	Side frame 상부
7	제동 하중	165	325	SM490A	Side frame 하부

(나) 피로하중 조건 및 경계 조건

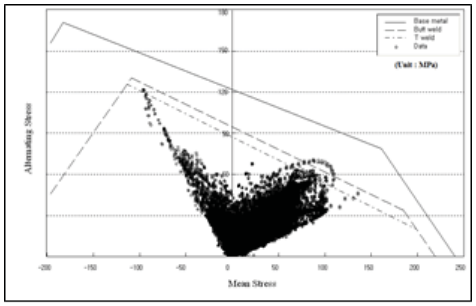


피로 하중 조건

순번	하중 조건	하중기호	하중 크기
1	모터하중	FZ1, FZ2	139.5 kN
		FR1, FR2	12.2 kN
		FB1, FB2	14.9 kN
2	Electric braking 하중	FZ1, FZ2	139.5 kN
		FR1, FR2	10.3 kN
		FB1, FB2	12.6 kN
3	제동 하중	FZ1, FZ2	139.5 kN
		FR1, FR2	16.3 kN
		FX1, FX2	20 kN
		FV1, FV2	5 kN
4	안티롤바 하중	FZ1, FZ2	139.5 kN
		FA	23 kN
5	요댐퍼 하중	FZ1, FZ2	139.5 kN
		FAY	16.5 kN
6	좌우댐퍼 하중	FZ1, FZ2	139.5 kN
		FLD	15 kN
7	1차 수직 댐퍼 하중	FZ1, FZ2	139.5 kN
		FPVD	4.5 kN
8	2차 수직 댐퍼 하중	FZ1, FZ2	139.5 kN
		FSVD	4.5 kN

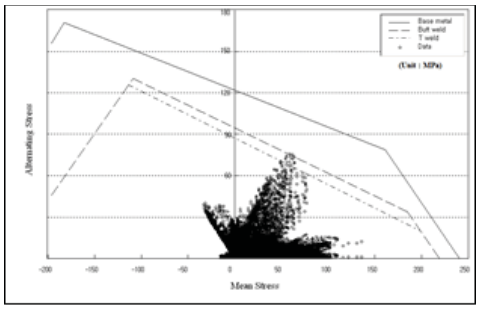
(다) 피로하중 해석 결과

○ 피로강도 평가 결과, 모든 하중 조건에 대하여 대차프레임의 모든 절점에 발생하는 피로 응력은 재질의 피로내구선도의 안전영역에 위치함



트랙 비틀림이 있는 주요 서비스 하중 결과

순번	하중 조건	최대응력 발생 부위
1	트랙 비틀림이 없는 주요 서비스 하중 조건	Transom과 Side frame 상판이 만나는 코너부
2	트랙 비틀림이 있는 주요 서비스 하중 조건	Transom과 Side frame 상판이 만나는 코너부



취부기기 피로 하중 결과

순번	하중 조건	최대응력 발생 부위
1	모터 피로하중	Side frame 하판 1차 Suspension 시트부
2	Electric braking 피로 하중	Side frame 하판 1차 Suspension 시트부
3	제동 피로하중	Brake hanger bracket의 모재부
4	Anti roll bar 피로하중	Anti roll bar bracket의 용접부
5	Anti yawforce 피로하중	Anti yaw bracket의 모재부
6	Lateral damper 피로하중	Lateral damper bracket의 용접부
7	1차 Vertical damper 피로하중	1차 Vertical damper의 모재부
8	2차 Vertical damper 피로하중	2차 Vertical damper의 모재부

(4) 감속장치 강도 계산 및 해석

○ 감속장치 설계 검토 시 적용한 기어의 기본 제원은 다음과 같음.

항 목	MRU		
	피니언 기어	아이들 기어	휠 기어
재질	SCM820PRH		
잇수(Z)	29	39	49
Ratio	1.34	1.26	
압력각	20 °		
비틀림각	15 °		
치폭(b)	95 mm	95 mm	95 mm
모듈(m)	7.3		
중심거리(a)	265 mm	342.4 mm	

항 목	ARU	
	피니언 기어	휠 기어
재질	SCM820PRH	
잇수(Z)	44	49
Ratio	1.11	
압력각	20 °	
비틀림각	15 °	
치폭(b)	78 mm	
모듈(m)	8.1	
중심거리(a)	383 mm	

(가) 감속장치 기어 강도 및 내구 수명 검토

○ 350kph 급 감속장치의 모터감속기(MRU)와 차축감속기(ARU) 의 치차를 ISO 6339 와 DIN 3990규격을 토대로 강도 및 내구수명을 검토함.

- Slip 토크에서의 기어 내구 강도 검토
  - MRU 기어 강도 검토 @ Slip Torque
    [FLANK LOAD-BEARING CAPACITY]

	Symbol	Unit	pinion	idle	gear
Service factor	KA H		1.00		1.00
Zone factor	ZH		95.00		95.00
Single contact factor	ZB		1.00		1.00
Elasticity factor	ZE		192		192
Contact ratio factor flank	Z eps.		0.882		0.863
Helix angle factor flank	Z beta		0.983		0.983
Oil viscosity at 50 C	nue50	mm2/s	100		100
Lubrication factor	ZL		1.00		1.00
Velocity factor	Zv		0.958		0.958
Roughness factor	ZR		0.948		0.955
Work hardening factor	ZW		1.00		1.00
Size factor, flank	ZX		1.00	1.00	1.00
Perm.flankcontact press. (dyn.)	Sigma-HG	Mpa	1226	1226	1234
Flankcont.press.at pitch pt	Sigma-HC	Mpa	1212		1044
Safety fact. against pitting	**SH**		**1.62**	**1.62**	**1.89**

[TOOTH ROOT LOAD-BEARING CAPACITY]

	Symbol	Unit	pinion	idle	gear
Service factor	KA F		1.00		1.00
Form factor	YF		1.201	1.399	1.119
Stress correction factor	YS		2.749	2.387	2.923
Helix angle factor root	Y beta		0.875		0.875
Relative support index?	YdrelT		0.998	0.993	0.999
Relat.surface-cond.factor	YRrelT		1.015	1.015	1.015
Size factor, root	YX		0.977	0.977	0.977
Bearing alternating/period	Np		0	0	0
Tooth contacts per/rotation	e		1	2	1
Alternating factor	YA		1.00	1.00	1.00
Perm.tooth root stress(dyn.)	Sigma-FG	Mpa	613	610	614
Tooth root stress	Sigma-F	Mpa	550	557	547
Safety fact. Root fatig.fract.	**SF**		**2.01**	**1.97**	**2.02**

- ARU 기어 강도 검토 @ Slip Torque

[FLANK LOAD-BEARING CAPACITY]

	Symbol	Unit	pinion	gear
Service factor	**KA H**		**1.00**	
Zone factor	**ZH**		**78.00**	
Single contact factor	**ZB**		**1.00**	
Elasticity factor	**ZE**		**192**	
Contact ratio factor flank	**Z eps.**		**0.774**	
Helix angle factor flank	**Z beta**		**0.983**	
Oil viscosity at 50 C	**nue50**	**mm2/s**	**100**	
Lubrication factor	**ZL**		**1.00**	
Velocity factor	**Zv**		**0.958**	
Roughness factor	**ZR**		**0.958**	
Material mating factor	**ZW**		**1.00**	
Size factor, flank	**ZX**		**1.00**	**1.00**
Perm.flankcontact press. (dyn.)	**Sigma-HG**	**Mpa**	**1238**	**1238**
Flankcont.press.at pitch pt	**Sigma-HC**	**Mpa**	**1134**	
Flankcont.pr.int.sing.cntpt..	**Sigma-HB**	**Mpa**	**1134**	**1134**
Safety fact. against pitting	**SH**		**1.75**	**1.75**

[TOOTH ROOT LOAD-BEARING CAPACITY]

	Symbol	Unit	pinion	gear
Service factor	**KA F**		**1.00**	
Form factor	**YF**		**1.327**	**1.452**
Stress correction factor	**YS**		**1.809**	**1.703**
Helix angle factor root	**Y beta**		**0.901**	
Relative support index?	**YdrelT**		**0.98**	**0.98**
Relat.surface-cond.factor	**YRrelT**		**1.01**	**1.01**
Size factor, root	**YX**		**0.97**	**0.97**
Bearing alternating/period	**Np**		**0**	**0**
Tooth contacts per/rotation	**e**		**1**	**1**
Alternating factor	**YA**		**1.00**	**1.00**
Perm.tooth root stress(dyn.)	**Sigma-FG**	**Mpa**	**598**	**597**
Tooth root stress	**Sigma-F**	**Mpa**	**449**	**462**
Safety fact. Root fatig.fract.	**SF**		**2.40**	**2.33**

- Fuse 토크에서의 기어 내구 강도 검토
  - MRU 기어 강도 검토 @ Fuse Torque

[FLANK LOAD-BEARING CAPACITY]

	Symbol	Unit	pinion	idle	gear
Service factor	KA H		1.00		1.00
Zone factor	ZH		95.00		95.00
Single contact factor	ZB		1.00		1.00
Elasticity factor	ZE		192		192
Contact ratio factor flank	Z eps.		0.882		0.863
Helix angle factor flank	Z beta		0.983		0.983
Oil viscosity at 50 C	nue50	mm2/s	100		100
Lubrication factor	ZL		1.00	1.00	1.00
Velocity factor	Zv		1.019	1.019	1.019
Roughness factor	ZR		0.948	0.948	0.955
Material mating factor	ZW		1.00	1.00	1.00
Size factor, flank	ZX		1.00	1.00	1.00
Perm.flankcontact press. (dyn.)	Sigma-HG	Mpa	1305	1305	1314
Flankcont.press.at pitch pt	Sigma-HC	Mpa	1614		1395
Safety fact. against pitting	**SH**		**1.29**	**1.29**	**1.51**

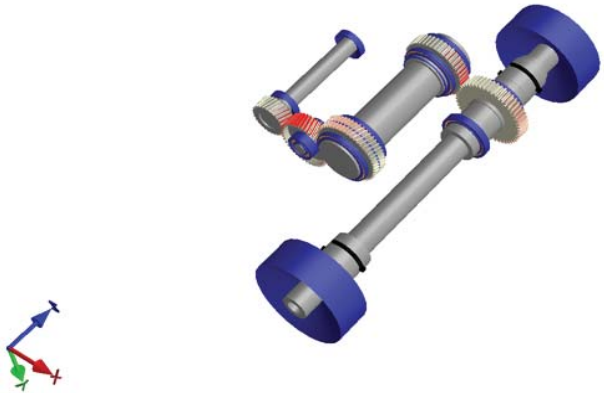
[TOOTH ROOT LOAD-BEARING CAPACITY]

	Symbol	Unit	pinion	idle	gear
Service factor	KA F		1.00		1.00
Form factor	YF		1.201	1.399	1.119
Stress correction factor	YS		2.749	2.387	2.923
Helix angle factor root	Y beta		0.875		0.875
Relative support index?	YdrelT		0.998	0.993	0.999
Relat.surface-cond.factor	YRrelT		1.015	1.015	1.015
Size factor, root	YX		0.977	0.977	0.977
Bearing alternating/period	Np		0	0	0
Tooth contacts per/rotation	e		1	2	1
Alternating factor	YA		1.00	1.00	1.00
Perm.tooth root stress(dyn.)	Sigma-FG	Mpa	613	610	614
Tooth root stress	Sigma-F	Mpa	979	990	979
Safety fact. Root fatig.fract.	**SF**		**1.13**	**1.11**	**1.13**

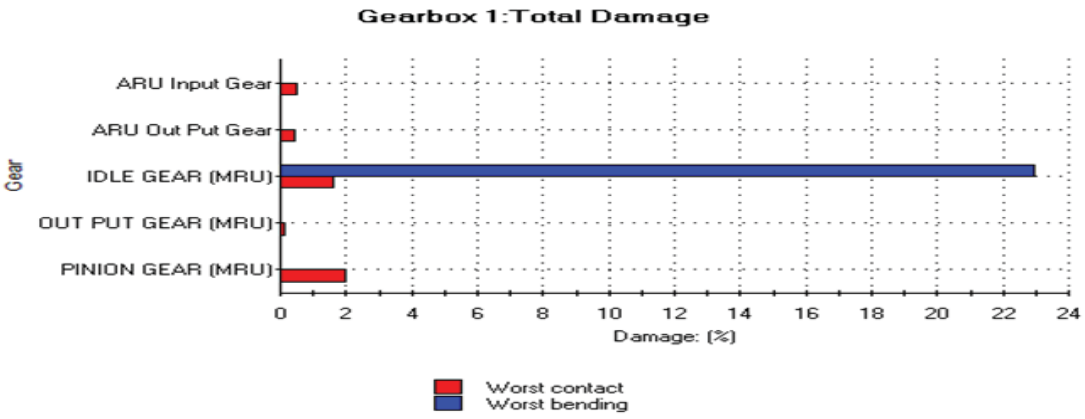
- 기어 내구 수명 검토
  - 목표 내구 수명 : 18,000,000 km, 92,352 hours (차량 예상 수명 의거)
  - 차량 주행 Duty Cycle

운행속도 (km/h)	운행거리 (운행비율)	운행시간	비 고
0 ~ 30	90,000 km (0.5 %)	6,000 시간 (6.64 %)	
30 ~ 60	90,000 km (0.5 %)	2,000 시간 (2.21 %)	
60 ~ 100	540,000 km (3.00 %)	6,750 시간 (7.47 %)	
100 ~ 150	900,000 km (5.00 %)	7,200 시간 (7.97 %)	
150 ~ 200	2,880,000 km (16.0 %)	16,457 시간 (18.21 %)	
200 ~ 250	5,400,000 km (30.0 %)	24,000 시간 (26.56 %)	
250 ~ 300	5,400,000 km (30.0 %)	19,636 시간 (21.73 %)	
300 ~ 350	2,700,000km (15.0 %)	8,308 시간 (9.19 %)	
Wheel slip @ 10 km/h	10,000 km	1,000 시간	
Fuse circuit @ 150 km/h	75 km	0.5 시간	

- 기어 내구 수명 검토 모델링



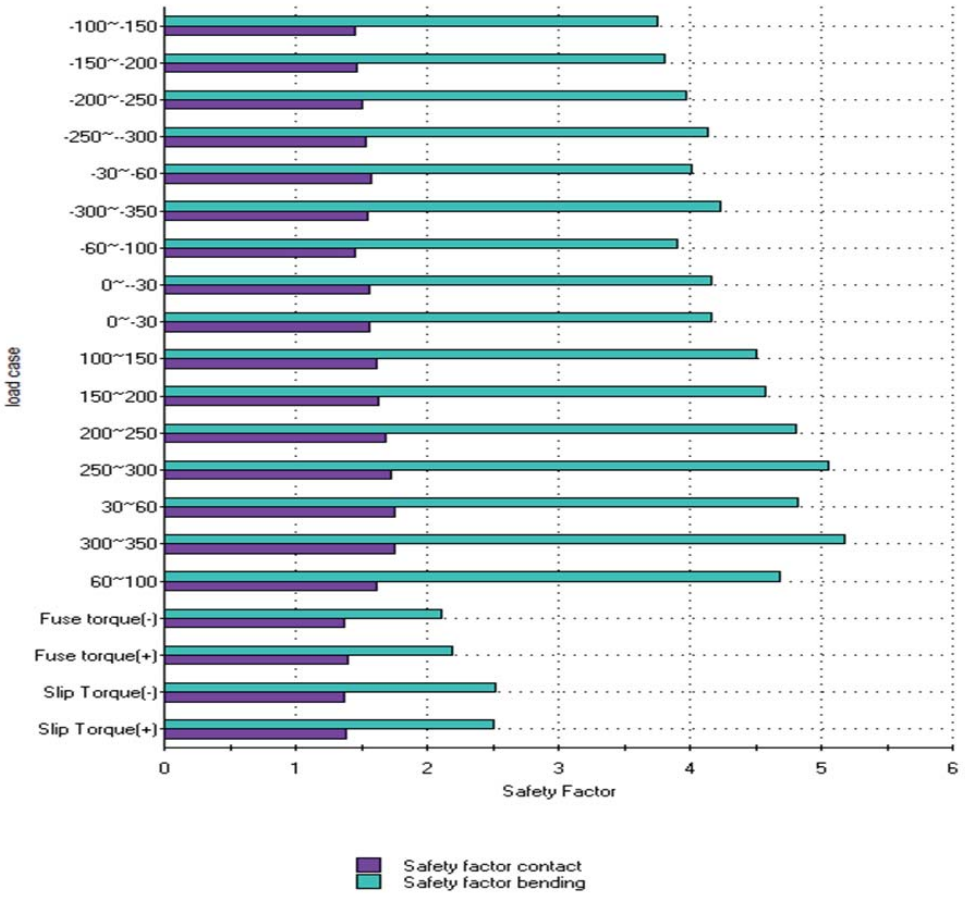
- 기어 손상율을 통한 기어 내구 수명 검토
  ☞ Max. 기어 손상율 : 약 23% (MRU 중간기어(idle Gear))
  * 18,000,000 km 운행 시를 손상율 100% 기준으로 함.



☞ Min. 기어 수명 시간 : 401,950 hours (중간기어에서 최소 수명)
* 92,352 hours 운행 시를 기어 목표 수명으로 함.

Gear	Contact Life		Bending Life		Combined Life	Pass/fail?
	Left	Right	Left	Right		
	(hrs)					
PINION GEAR (MRU)	7.7051e6	4.7279e6	1.9135e9	1.9135e9	4.7279e6	Pass
OUT PUT GEAR (MRU)	7.7499e7	7.9794e7	4.324e9	4.324e9	7.7499e7	Pass
IDLE GEAR (MRU)	8.8717e6	5.7796e6	4.0195e5	4.0195e5	4.0195e5	Pass
ARU Out Put Gear	2.2188e7	3.0428e7	N/A	N/A	2.2188e7	Pass
ARU Input Gear	1.9869e7	2.7248e7	N/A	N/A	1.9869e7	Pass

- 기어 내구 수명 검토 결과에 대한 주행모드별 안전율 검토
  ☞ 주행모드별 발생 Min. 안전율 : 1.3

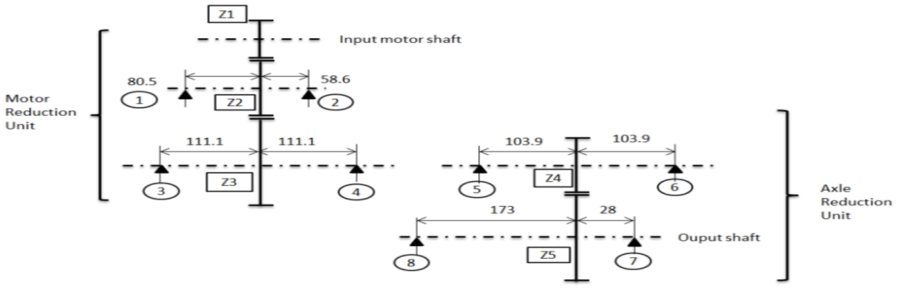


- 검토 결과
  - 기어 강도 검토 결과 최소 안전율 1.11 이상으로 충분한 강도 확보
  - 기어 내구수명 검토 결과 목표 수명인 18,000,000 km 또는 92,352 시간 동안 운행이 가능함.

(나) 감속장치 베어링 정적 강도 및 내구수명 검토

○ 350km/h 급 감속장치의 모터감속기(MRU)와 차축감속기(ARU) 에 적용되는 베어링에 대해 규격 ISO 281, ISO/TS-16281를 토대로 하여 강도 및 내구수명을 검토함.

- 베어링 위치 및 구동 조건



모터 평균속도	2,493 rpm
모터 토크	4,449 Nm
휠 지름(new and worn)	920mm / 850mm
윤활유	Mobil Delvac Synthetic 75w-90
온도범위	-35℃ / 45℃
감속기 작동온도	120℃
최대모터속도(half worn wheel)	3,906 rpm (at 350km/h)
최대 운행속도	350km/h
베어링 요구수명	2,000,000 km ※ 감속장치 Overhaul 기준 180 만 km 에 안전율 1.11 적용

- 베어링 제원

<table>
<tr><th>베어링</th><th colspan="4">규격</th><th>비고</th></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="4">70×150×51
간극 0.110/0.130mm
케이지 재질:STEEL
C_{iso}=295,000N C_0=350,000N
a_2=1.75</td><td>NUP2314ES03
Cylindrical roller bearing

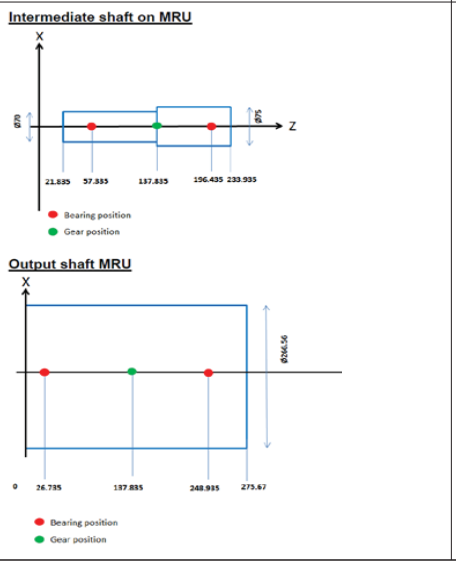
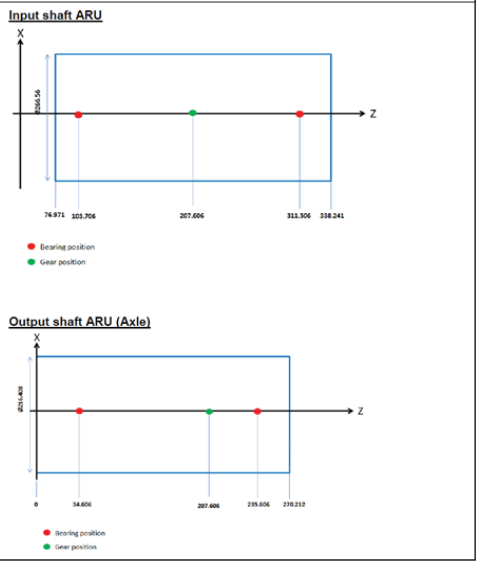
Drawing NTN-SNR
C18654ind.C</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="4">75×160×55
간극 0.110/0.130mm
케이지 재질:STEEL
C_{iso}=340,000N C_0=395,000N
a_2=1.75</td><td>NU2315ES03
Cylindrical roller bearing

Drawing NTN-SNR
C18656ind.C</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3,4,5,6</td><td colspan="4">216.408×285.75×46.138
케이지 재질:STEEL
C_{iso}=209,000N C_0=480,000N
a_2=1.75
e=0.37</td><td rowspan="3">EC12514S01
Single row
Tapered roller bearing

Drawing NTN-SNR
C18657ind.B</td></tr>
<tr><td colspan="2">Fa / Fr ≤ e</td><td colspan="2">Fa / Fr ≥ e</td></tr>
<tr><td>X</td><td>Y</td><td>X</td><td>Y</td></tr>
<tr><td rowspan="4">7,8</td><td colspan="4">216.408×285.75×46.138
케이지:STEEL
C_{iso}=370,000N C_0=790,000N
a_2=1.75
e=0.49</td><td rowspan="4">LM742747/710
Single row
Tapered roller bearing

Drawing NTN-SNR
DC1690ind.A</td></tr>
<tr><td colspan="2">Fa / Fr ≤ e</td><td colspan="2">Fa / Fr ≥ e</td></tr>
<tr><td>X</td><td>Y</td><td>X</td><td>Y</td></tr>
<tr><td>1</td><td>0</td><td>0.4</td><td>1.23</td></tr>
</table>

- 베어링 위치도 모델링
  - 검토 조건
    - ☞ 정방향 및 역방향 각 50% 가동 기준 검토
    - ☞ 계산수명은 베어링 제작사 제시 제원 및 구동 조건에 정의된 모터 토크로 계산
    - ☞ 휠 지름 885mm 기준
  - 모델링

MRU	ARU
	

- 베어링 정적하중 검토
  - 정방향 구동 (Slip토크 기준)

베어링 번호	품 번	정적하중	C0	안전율
1	NUP 2314E S03	1.46E+05	350,000	2.403
2	NU 2315E S03	1.38E+05	395,000	2.860
3	EC 12514 S01	6.96E+04	480,000	6.893
4	EC 12514 S01	5.58E+04	480,000	8.602
5	EC 12514 S01	5.63E+04	480,000	8.524
6	EC 12514 S01	6.74E+04	480,000	7.120
7	LM 742747 / 710	5.85E+04	790,000	13.503
8	LM 742747 / 710	6.35E+04	790,000	12.441

  - 역방향 구동(Slip토크 기준)

베어링 번호	품 번	정적하중	C0	안전율
1	NUP 2314E S03	1.09E+05	350,000	3.221
2	NU 2315E S03	1.15E+05	395,000	3.440
3	EC 12514 S01	5.97E+04	480,000	8.034
4	EC 12514 S01	5.52E+04	480,000	8.692
5	EC 12514 S01	5.57E+04	480,000	8.624
6	EC 12514 S01	6.22E+04	480,000	7.713
7	LM 742747 / 710	3.09E+04	790,000	25.542
8	LM 742747 / 710	9.02E+04	790,000	8.763

  - 정방향 구동 (Fuse토크 기준)

베어링 번호	품 번	정적하중	C0	안전율
1	NUP 2314E S03	2.70E+05	350,000	1.297
2	NU 2315E S03	2.54E+05	395,000	1.553
3	EC 12514 S01	1.29E+05	480,000	3.708
4	EC 12514 S01	1.04E+05	480,000	4.632
5	EC 12514 S01	1.05E+05	480,000	4.582
6	EC 12514 S01	1.25E+05	480,000	3.845
7	LM 742747 / 710	1.05E+05	790,000	7.534
8	LM 742747 / 710	1.20E+05	790,000	6.611

• 역방향 구동 (Fuse토크 기준)

베어링 번호	품 번	정적하중	C0	안전율
1	NUP 2314E S03	2.04E+05	350,000	1.716
2	NU 2315E S03	2.15E+05	395,000	1.838
3	EC 12514 S01	1.10E+05	480,000	4.366
4	EC 12514 S01	1.03E+05	480,000	4.682
5	EC 12514 S01	1.03E+05	480,000	4.655
6	EC 12514 S01	1.14E+05	480,000	4.207
7	LM 742747 / 710	5.70E+04	790,000	13.861
8	LM 742747 / 710	1.70E+05	790,000	4.653

- 내구수명 검토

목표 내구 수명 : 2,000,000 km

• 차량 주행 (내구 모드)

운행속도 (km/h)	운행거리 (운행비율)	운행시간	비 고
0 ~ 30	90,000km (0.5 %)	6,000 시간 (6.64 %)	
30 ~ 60	90,000km (0.5 %)	2,000 시간 (2.21 %)	
60 ~ 100	540,000 km (3.0 %)	6,750 시간 (7.47 %)	
100 ~ 150	900,000 km (5.0 %)	7,200 시간 (7.97 %)	
150 ~ 200	2,880,000 km (16.0 %)	16,457 시간 (18.21 %)	
200 ~ 250	5,400,000 km (30.0 %)	24,000 시간 (26.56 %)	
250 ~ 300	5,400,000 km (30.0 %)	19,636 시간 (21.73 %)	
300 ~ 350	2,700,000km (15.0 %)	8,308 시간 (9.19 %)	총 운행시간 : 90,351 시간

• 베어링 수명 검토 결과

베어링 번호	품번	정방향	역방향	ISO-281-L10	L10 TARGET
1	NUP 2314E S03	5,184,564	> 10. 10^6	> 10.10^6	2.0 10^6
2	NU 2315E S03	>10. 10^6	3,723,820	10,024,283	2.0 10^6
3	EC 12514 S01	5,915,257	2,580,832	6,289,011	2.0 10^6
4	EC 12514 S01	2,810,584	716,305	2,011,925	2.0 10^6
5	EC 12514 S01	2,801,554	4,914,987	6,245,493	2.0 10^6
6	EC 12514 S01	759,862	2,504,757	2,040,497	2.0 10^6
7	LM 742747 / 710	1,815,445	4,207,171	4,438,704	2.0 10^6
8	LM 742747 / 710	> 10. 10^6	6,713,233	>10. 10^6	2.0 10^6

- 검토 결과

• ISO-281을 따라 베어링수명을 검토 결과 모든 베어링의 수명이 200만 Km 이상 운행 가능함을 확인

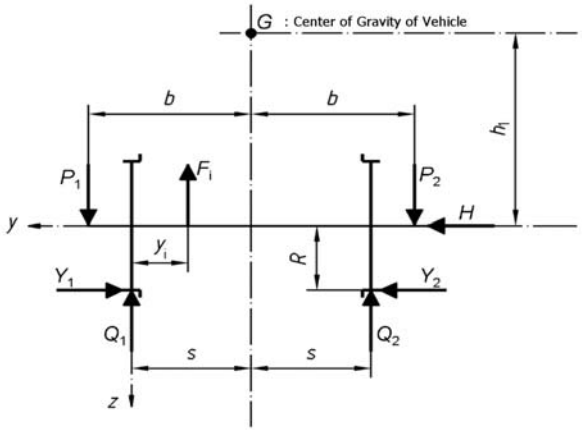
• 4번, 6번 베어링이 가장 낮은 기대수명을 갖고 있으나 설계조건인 200만Km 이상 만족함

* 본 계산 결과는 이론적인 것을 기준으로 일반적인 상태, 적정 윤활조건 하에서 계산된 값임

(5) 경량 차축 강도 계산/해석 결과 (3차년도 연구개발 내용)

(가) 입력 파라메터

일반	차축 타입		감속기어가 압입된 동력 차축
			중공축 (내경 85 mm)
	차축 재질		30NiCrMoV12 (acc. to UNI 6787)
형상 특성	차륜 구름면간 간격	2s	1,496 mm
	차축 총 길이	2l	2,244 mm
	차축 저널간 간격	2b	2,000 mm
	차륜 구름면 직경	2R	920 mm
	차체 질량 중심 높이	h1	965 mm
하중	축중	mtot	17,700 kg
	윤축당 저널 적용 하중	m1	16,233 kg
	윤축 중량	m2	1,467 kg
	축당 최대 제동력	Ff	25,000 N
	평균마찰계수	Γ	0.25



P1,P2 :
차축 저널에 작용하는 힘

Q1,Q2 :
P1,P2로 인해 발생되는 수직 반력

Y1,Y2 :
차체 롤링으로 인해 발생되는 차륜의 횡방향 힘

H :
횡력 (Y1과 Y2간 차이)

(나) 차축 적용하중

상기 그림에 표현된 각 하중에 대한 계산은 아래의 식에 의해 산출되고, 계산된 결과는 다음 표와 같음

$$P_1 = (0.625 + 0.0875h_1/b)m_1 g$$
$$P_2 = (0.625 - 0.0875h_1/b)m_1 g$$
$$Y_1 = 0.35m_1 g$$
$$Y_2 = 0.175m_1 g$$
$$H = Y_1 - Y_2 = 0.175m_1 g$$
$$Q_1 = \frac{1}{2s}[P_1(b+s) - P_2(b-s) + (Y_1 - Y_2)R - \Sigma_i F_i(2s - y_i)]$$
$$Q_2 = \frac{1}{2s}[P_2(b+s) - P_1(b-s) - (Y_1 - Y_2)R - \Sigma_i F_i y_i)]$$

항 목	계 산 결 과
P1	112,975 N
P2	86,082 N
Y1	55,736 N
Y2	27,868 N
H	27,726 N
Q1	108,379 N
Q2	69,223 N

(다) 강도 계산 결과

강도 계산 결과 최소 1.08 이상의 안전율을 확보함을 확인

구 분	계산 최대값		기준	평가
	단면위치	결과		
신조차축	1605 mm	61.66 Mpa	72 Mpa	기준만족
가공차축	1605 mm	66.54 Mpa	72 Mpa	기준만족

* 신조차축: 차륜 압입부 직경이 사용가능한 최대 치수인 차축

* 가공차축: 차륜 압입부 직경이 사용가능한 최소 치수인 차축

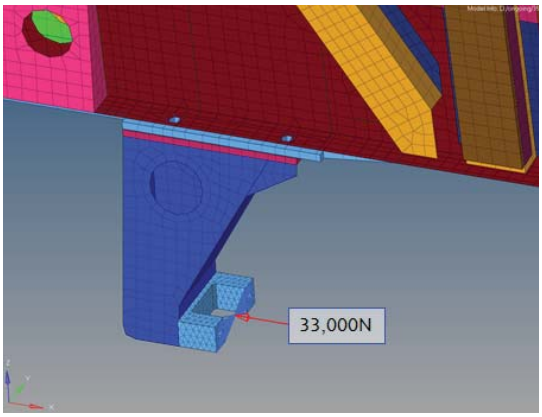
																			HOLE			
Pos.	y	d	D	r	r/d	D/d	k	W	Mx	M'x	M''x	M'z	M''z	M'y	M''y	MR	σ	σ*	η	W	σ	σ*	η
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]				[mm³]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[N/mm²]	[N/mm²]		[mm³]	[N/mmq]	[N/mmq]	
A	84.5	150	150	∞	0	1	1	297175	7256735	526875	0	2634375	0	0	0	8217331	27.65	72	**2.60**	524426	15.67	72	4.60
B	111	148	185	40	0.270	1.250	1.029	283635	9555132	693750	0	3468750	0	0	0	10819973	39.27	186	**4.74**	493859	21.91	72	3.29
C	159	182	271.6	10	0.055	1.492	1.810	563695	13644040	990625	0	4953125	0	0	0	15450141	49.61	186	**3.75**	1206971	12.80	72	5.62
D	252	215	215	∞	0	1	1	951861	34512013	1575000	0	7875000	0	11980953	0	38830805	40.79	105	**2.57**	2407650	16.13	72	4.46
E	343	215	215	∞	0	1	1	951861	36046187	1575000	0	7875000	0	11980953	0	40260558	42.30	105	**2.48**	2407650	16.72	72	4.31
F	356.6	200	300	16	0.080	1.501	1.618	758762	36273784	1575000	0	7875000	0	11980953	0	40473316	86.31	186	**2.16**	1784565	22.68	72	3.17
G	371	216.13	216.13	∞	0	1	1	967451	36509811	1575000	0	7875000	0	11980953	0	40694123	42.06	105	**2.50**	2459944	16.54	72	4.35
H	406	216.13	216.13	∞	0	1	1	967451	37099877	1575000	0	7875000	0	11980953	0	41246879	42.63	105	**2.45**	2459944	16.77	72	4.29
I	412	211.96	300	16	0.075	1.415	1.590	910701	37209461	1575000	0	7875000	0	11980953	0	41349647	72.21	186	**2.58**	2270956	18.21	72	3.95
J	418	216.4	216.4	∞	0	1	1	971311	37310616	1575000	0	7875000	0	11980953	0	41444541	42.67	105	**2.46**	2472936	16.76	72	4.30
K	459	216.4	216.4	∞	0	1	1	971311	37919558	1575000	0	7875000	0	11980953	0	42016413	43.26	105	**2.43**	2472936	16.99	72	4.24
L	461.8	214.6	300	16	0.075	1.398	1.584	946190	37959086	1575000	0	7875000	0	11980953	0	42053570	70.38	186	**2.64**	2388696	17.61	72	4.09
M	470	225	225	∞	0	1	1	1095495	38064492	1575000	0	7875000	0	11980953	0	42152677	38.48	105	**2.73**	2899840	14.54	72	4.95
N	565	225	225	∞	0	1	1	1095495	39281342	1575000	0	7875000	0	11980953	0	43298955	39.52	105	**2.66**	2899840	14.93	72	4.82
O	620	170	300	75	0.441	1.765	1.027	452187	39965545	1575000	0	7875000	0	11980953	0	43945145	99.77	186	**1.85**	904374	48.59	72	1.48
P	626	170	240	75	0.441	1.412	1.013	452187	40040185	1575000	0	7875000	0	11980953	0	44015708	98.58	186	**1.89**	904374	48.67	72	1.48
Q	688	240	240	∞	0	1	1	1335815	40811469	1575000	0	7875000	0	11980953	0	44745632	33.50	105	**3.13**	3771712	11.86	72	6.07
R	708	240	240	∞	0	1	1	1335815	41060270	1575000	0	7875000	0	11980953	0	44981387	33.67	105	**3.12**	3771712	11.93	72	6.04
S	711	215.4	240	4	0.019	1.114	1.349	957472	41103811	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45022658	63.41	186	**2.93**	2426436	18.56	72	3.88
T	712.1	215.4	300	4	0.019	1.393	1.857	957472	41116251	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45034451	87.33	186	**2.13**	2426436	18.56	72	3.88
U	715	216.4	216.4	∞	0	1	1	971311	41147351	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45063934	46.39	105	**2.26**	2472936	18.22	72	3.95
V	752	216.4	216.4	∞	0	1	1	971311	41615756	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45508244	46.85	105	**2.24**	2472936	18.40	72	3.91
W	760.0	213	300	16	0.075	1.411	1.589	918905	41716097	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45603486	78.85	186	**2.36**	2298042	19.84	72	3.63
X	767	216.13	216.13	∞	0	1	1	967451	41803896	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45686841	47.22	105	**2.22**	2459944	18.57	72	3.88
Y	816	216.13	216.13	∞	0	1	1	967451	42412214	1575000	0	7875000	0	11980953	0	46264823	47.82	105	**2.20**	2459944	18.81	72	3.83
Z	868	170	300	75	0.441	1.765	1.027	452187	43064432	1575000	0	7875000	0	11980953	0	46885368	106.44	186	**1.75**	904374	51.84	72	1.39
AA	1605	170	270	75	0.441	1.588	1.019	452187	52314637	1575000	0	7875000	0	11980953	0	55764252	125.71	186	**1.48**	904374	61.66	72	1.17

																			HOLE			
Pos.	y	d	D	r	r/d	D/d	k	W	Mx	M'x	M''x	M'z	M''z	M'y	M''y	MR	σ	σ*	η	W(h)	σ	σ*	η
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]				[mm³]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[N/mm²]	[N/mm²]		[mm³]	[N/mmq]	[N/mmq]	
A	84.5	150	150	∞	0	1	1	297175	7256735	526875	0	2634375	0	0	0	8217331	27.65	72	**2.60**	524426	15.67	72	4.60
B	111	148	185	40	0.270	1.250	1.029	283635	9555132	693750	0	3468750	0	0	0	10819973	39.27	186	**4.74**	493859	21.91	72	3.29
C	159	182	271.6	10	0.055	1.492	1.810	563695	13644040	990625	0	4953125	0	0	0	15450141	49.61	186	**3.75**	1206971	12.80	72	5.62
D	252	210	210	∞	0	1	1	884793	34512013	1575000	0	7875000	0	11980953	0	38830805	43.89	105	**2.39**	2185959	17.76	72	4.05
E	343	210	210	∞	0	1	1	884793	36046187	1575000	0	7875000	0	11980953	0	40260558	45.50	105	**2.31**	2185959	18.42	72	3.91
F	356.6	200	300	16	0.080	1.501	1.618	758762	36273784	1575000	0	7875000	0	11980953	0	40473316	86.31	186	**2.16**	1784565	22.68	72	3.17
G	371	216.13	216.13	∞	0	1	1	967451	36509811	1575000	0	7875000	0	11980953	0	40694123	42.06	105	**2.50**	2459944	16.54	72	4.35
H	406	216.13	216.13	∞	0	1	1	967451	37099877	1575000	0	7875000	0	11980953	0	41246879	42.63	105	**2.45**	2459944	16.77	72	4.29
I	412	211.96	300	16	0.075	1.415	1.590	910701	37209461	1575000	0	7875000	0	11980953	0	41349647	72.21	186	**2.58**	2270956	18.21	72	3.95
J	418	216.4	216.4	∞	0	1	1	971311	37310616	1575000	0	7875000	0	11980953	0	41444541	42.67	105	**2.46**	2472936	16.76	72	4.30
K	459	216.4	216.4	∞	0	1	1	971311	37919558	1575000	0	7875000	0	11980953	0	42016413	43.26	105	**2.43**	2472936	16.99	72	4.24
L	461.8	214.6	300	16	0.075	1.398	1.584	946190	37959086	1575000	0	7875000	0	11980953	0	42053570	70.38	186	**2.64**	2388696	17.61	72	4.09
M	470	225	225	∞	0	1	1	1095495	38064492	1575000	0	7875000	0	11980953	0	42152677	38.48	105	**2.73**	2899840	14.54	72	4.95
N	565	225	225	∞	0	1	1	1095495	39281342	1575000	0	7875000	0	11980953	0	43298955	39.52	105	**2.66**	2899840	14.93	72	4.82
O	620	170	300	75	0.441	1.765	1.027	452187	39965545	1575000	0	7875000	0	11980953	0	43945145	99.77	186	**1.85**	904374	48.59	72	1.48
P	626	170	240	75	0.441	1.412	1.013	452187	40040185	1575000	0	7875000	0	11980953	0	44015708	98.58	186	**1.89**	904374	48.67	72	1.48
Q	688	240	240	∞	0	1	1.00	1335815	40811469	1575000	0	7875000	0	11980953	0	44745632	33.50	105	**3.13**	3771712	11.86	72	6.07
R	708	240	240	∞	0	1	1.00	1335815	41060270	1575000	0	7875000	0	11980953	0	44981387	33.67	105	**3.12**	3771712	11.93	72	6.04
S	711	215.4	240	4	0.019	1.114	1.349	957472	41103811	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45022658	63.41	186	**2.93**	2426436	18.56	72	3.88
T	712.1	215.4	300	4	0.019	1.393	1.857	957472	41116251	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45034451	87.33	186	**2.13**	2426436	18.56	72	3.88
U	715	216.4	216.4	∞	0	1	1.00	971311	41147351	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45063934	46.39	105	**2.26**	2472936	18.22	72	3.95
V	752	216.4	216.4	∞	0	1	1.00	971311	41615756	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45508244	46.85	105	**2.24**	2472936	18.40	72	3.91
W	760	213	300	16	0.075	1.411	1.589	918905	41716097	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45603486	78.85	186	**2.36**	2298042	19.84	72	3.63
X	767	216.13	216.13	∞	0	1	1.00	967451	41803896	1575000	0	7875000	0	11980953	0	45686841	47.22	105	**2.22**	2459944	18.57	72	3.88
Y	816	216.13	216.13	∞	0	1	1.00	967451	42412214	1575000	0	7875000	0	11980953	0	46264823	47.82	105	**2.20**	2459944	18.81	72	3.83
Z	868	167	300	75	0.449	1.796	1.026	426558	43064432	1575000	0	7875000	0	11980953	0	46885368	112.81	186	**1.65**	838061	55.95	72	1.29
AA	1605	167	270	75	0.449	1.617	1.019	426558	52314637	1575000	0	7875000	0	11980953	0	55764252	133.25	186	**1.40**	838061	66.54	72	1.08

(6) 요 댐퍼 댐피력 증가에 따른 취부대 강도 검토 결과

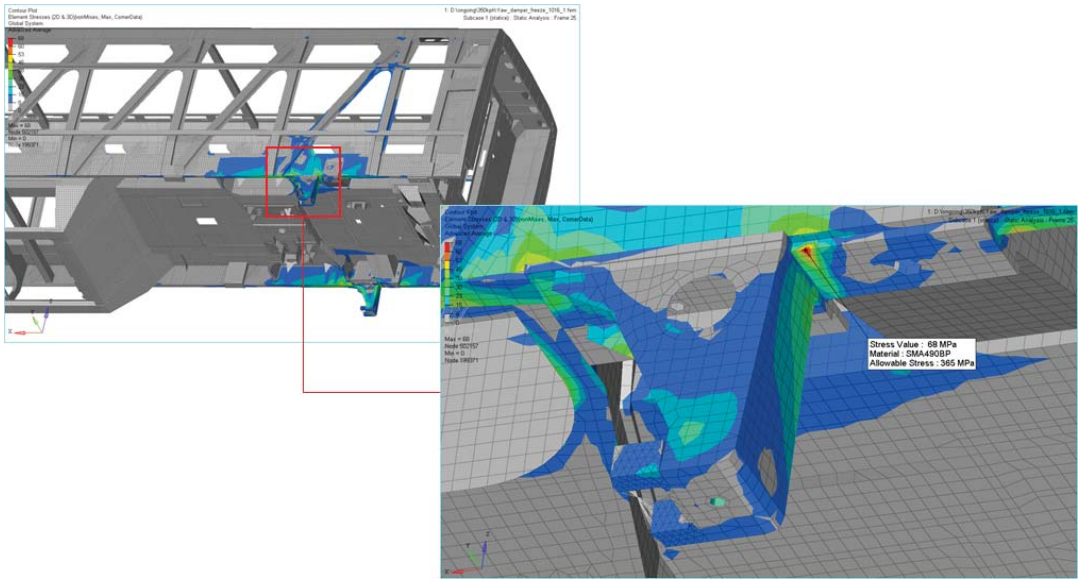
(가) 하중 조건

규격 “EN13749 - Railway applications-Methods of specifying structural requirements of bogie frames.- D.2.3 Load resulting from viscous dampers” 에 따라 요댐퍼의 정격 하중(16,500N @ 0.0026m/s)의 2배인 33,000N 값을 적용



(나) 구조해석 모델

아래와 같이 요댐퍼 하중을 적용한 해석용 모델링을 수행 및 전/후 방향 각각으로 33,000N 의 하중을 부가함.

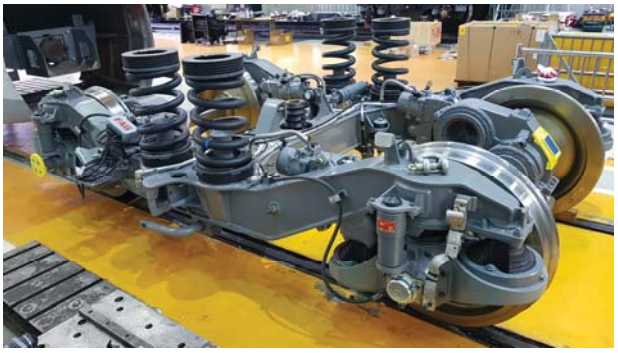


규격 “EN13749 - Railway applications-Methods of specifying structural requirements of bogie frames.- D.2.3 Load resulting from viscous dampers” 에 따라 요댐퍼의 정격 하중(16,500N @ 0.0026m/s)의 2배인 33,000N 값을 적용

(7) 완성 대차 제작

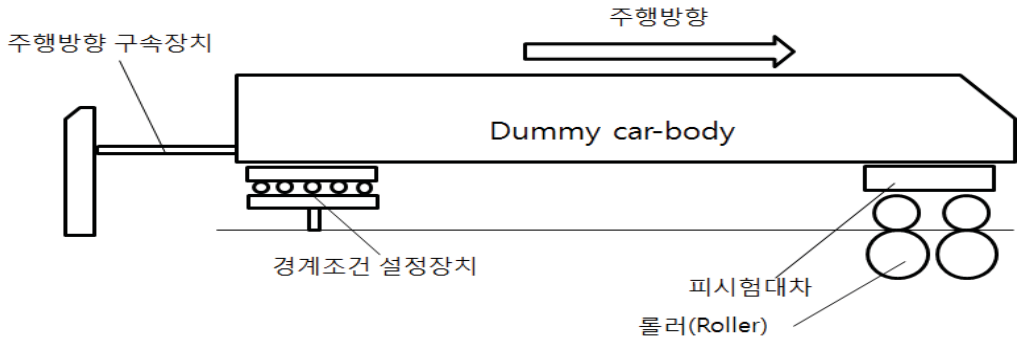
- 결과물
  > 도면 : 240 매
  > 문서 : 30 종
  > 구성품 사진

구분	사진
대차프레임	
윤축 (차륜/차축)	
감속장치	
1차현가장치	

구분	사진
2차현가장치	
제동장치	
살사장치	
완성대차 조립	

(8) 롤러 리그 시험 결과

- 롤러리그 시험 개략도



<대차 롤러 리그 시험기에서의 설치 개략도>



<대차 롤러리그 시험기>

- 시험 항목 및 조건

Case	시험항목	시험속도(km/h)[2]	최대시험속도(km/h)[3]
1	비가진 주행안정성	0→380	Vcl[4] 또는 380
2	가진 주행안정성[1]	215, 330, 350, 370, 380	Vcn[5] 또는 380

- 측정 항목

연번	측정 항목	측정 위치	측정 개수
1	전륜축 좌우변위	전륜축 액슬박스	1
2	후륜축 좌우변위	후륜축 액슬박스	1
3	전륜축 좌우 가속도	전륜축 액슬박스	2
4	전륜축 상하 가속도	전륜축 액슬박스	2
5	후륜축 좌우 가속도	후륜축 액슬박스	2
6	후륜축 상하 가속도	후륜축 액슬박스	2
7	전륜축상 대차프레임 좌우 변위	전륜축상 대차프레임	1
8	후륜축상 대차프레임 좌우 변위	후륜축상 대차프레임	1
9	전륜축상 대차프레임 좌우 가속도	전륜축상 대차프레임	2
10	전륜축상 대차프레임 상하 가속도	전륜축상 대차프레임	2
11	후륜축상 대차프레임 좌우 가속도	후륜축상 대차프레임	2
12	후륜축상 대차프레임 상하 가속도	후륜축상 대차프레임	2

- 시험 결과

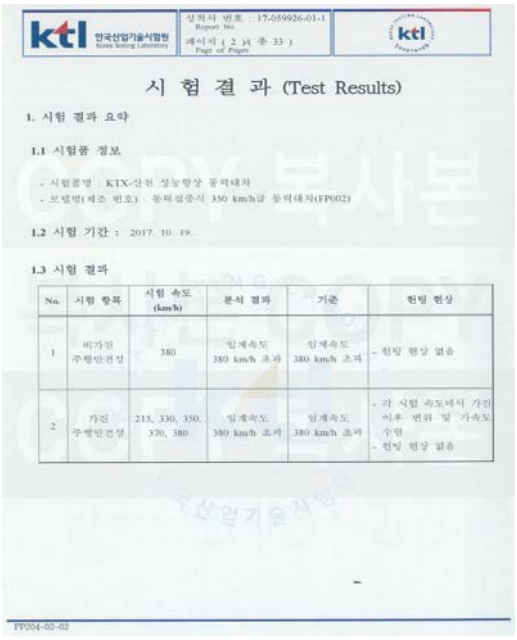
No.	시험항목	시험속도 (km/h)	분석결과	기준	판정	관련규격
1	비가진 주행안정성	380	> 380km/h	> 380km/h	합격	철도차량기술 기준 Part 31 5.2.3
2	가진 주행안정성	380	> 380km/h	> 380km/h	합격	철도차량기술 기준 Part 31 5.2.3

- 공인기관 입회 성적서


시 험 성 적 서
(TEST REPORT)

ktl 한국산업기술시험원

한국산업기술시험원장


ktl 한국산업기술시험원

시 험 결 과 (Test Results)

1. 시험 결과 요약

1.1 시험품 정보

1.2 시험 기간 : 2017. 10. 19.

1.3 시험 결과

No.	시험 항목	시험 속도 (km/h)	분석 결과	기준	현장 현상
1	비가진 주행안전성	380	임계속도 380 km/h 초과	임계속도 380 km/h 초과	- 현장 현상 없음
2	가진 주행안전성	215, 330, 350, 370, 380	임계속도 380 km/h 초과	임계속도 380 km/h 초과	- 각 시험 속도에서 가진 이후 변위 및 가속도 수렴 - 현장 현상 없음

2. 안티롤바 및 경량 액슬박스 개발

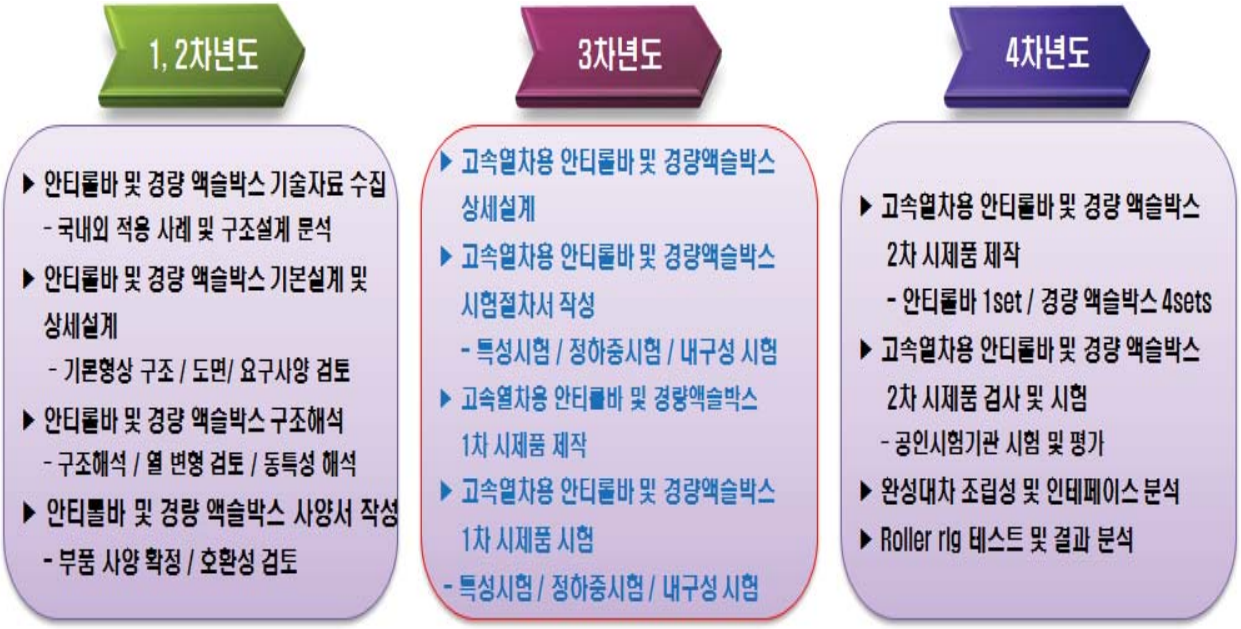
가. 안티롤바 및 경량 액슬박스 기술개발 연구 개요

(1) 안티롤바 및 경량 액슬박스 개발 목표

○ 고속 주행안정성 향상을 위한 안티롤바 강성정도 30% 이상 향상
(롤 강성 정도±15%→±10%)

○ 주행장치 속도향상을 위한 액슬박스 중량 30% 경량화, 주행장치 임계속도 20% 향상

(2) 안티롤바 및 경량 액슬박스 연차별 연구 내용



<연차별 연구내용>

(3) 안티롤바 및 경량 액슬박스 특장점 및 설계 개선사항

○ 안티롤바 비교사항 및 특장점

KTX-산천 안틸롤바(기존품)	효율향상 안티롤바(개발품)	개발품 특징(장점)
동력대차 안티롤바 미 설치	동력대차 안티롤바 설치	승차감 및 주행 안정성 향상
부수대차 안티롤바설치 Type : 토션바와레버암의열간압입	동략대차안티롤바설치 Type : 토션바벤딩Type	동력대차와 같이 내부 설치 장비가 많을 경우 토션바벤딩 Type 설치 작업성이 우수함
적용 재질 : 51CrMoV4 (DIN 17221)	적용 재질 : SUP 11A (JIS G 4801)	적용재질 특성은 거의 동일함
롤 강성 정도 : 요구강성±15%	롤 강성 정도 : 요구강성 ±10%	롤강성 정도가 향상으로 차량의 동역학적 수치해석에 정확성 향상
기존 동력대차에 미설치된 안티롤바를 설치하여, 승차감과 주행안정성이 향상되고 롤강성 정도를 향상시킴으로써 차량의 동역학적 수치해석에 등에 정확성 향상됨		

○ 경량 액슬박스 비교사항 및 특장점

KTX-산천 액슬박스(기존품)	효율향상 액슬박스(개발품)	개발품 특징(장점)
적용재질 : GE280N(Cast steel)	적용재질 : A7050-T74 : 알루미늄 단조	중량 절감률(단순비교): 40~50%
인장강도/항복 강도(Mpa): 480/280	인장강도/항복 강도(Mpa): 524/469	기계적 성질 우수(인장강도 및 항복강도 등)
액슬박스 중량 : 약 80kg	경량 액슬박스 중량 : 약 40.78kg	중량 절감율: 48%
현재 국내에는 액슬박스에 주철 외의 경량제품 적용 사례 없음 충분한 강성을 갖춘 경량 소재 제품 개발로 차량의 운행 속도 향상과 차량 운용비용 절감 기대		

○ 안티롤바 및 경량 액슬박스 설계 개선사항

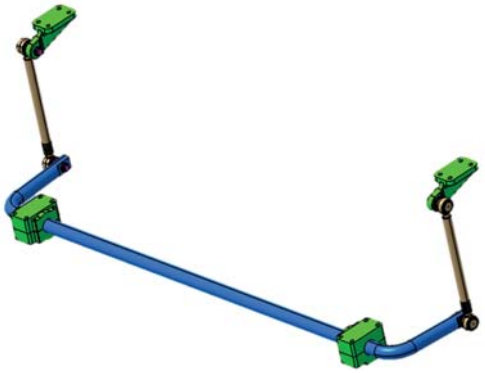
KTX-산천	효율향상 개선사항	개발품 특징(장점)
동력대차 안티롤바 미 설치	동력대차 안티롤바 설치	동력차의 승차감 및 주행안정성 향상
안티롤바롤 강성 정도 : ±15%	안티롤바롤 강성 정도 : ±10%	롤강성 정도 향상
경량 액슬박스 제작 공법 : 주물 또는 주철	경량 액슬박스 제작 공법 : 알루미늄 단조	중량 절감율과 기계적 강도 향상됨

나. 고속열차용 안티롤바 기술개발

(1) 안티롤바의 기능

○ 고속열차용 안티롤바는 2차 현가장치의 일부로 차체와 대차 간에 연결되어 차량의 동적특성을 안정감 있게 유지시켜주는 장치로서, 운행 시 차체의 롤링운동을 제한하여 차체의 롤링각을 제한하여 차량의 주행안정성에 영향을 미치는 롤링각을 감소시켜, 차량 주행을 안정화하고 곡선통과성능을 향상시키는 역할을 수행함

○ 기존 고속열차용 안티롤바의 형태는 토션바(Torsion Bar)와 레버암(Lever Arm)이 분리된 열간압입(Shrinkage Fitting)타입 제품이며 고속열차 동력차 대차에는 안티롤바가 설치되어 있지 않음

구분	기존 제품	개발제품
형상		
Type	토션바와 레버암의 열간 압입	토션바 벤딩 타입
동력대차 설치여부	설치 불가 (내부설치 공간 부족)	설치 가능

(2) 안티롤바 기본설계 및 상세설계

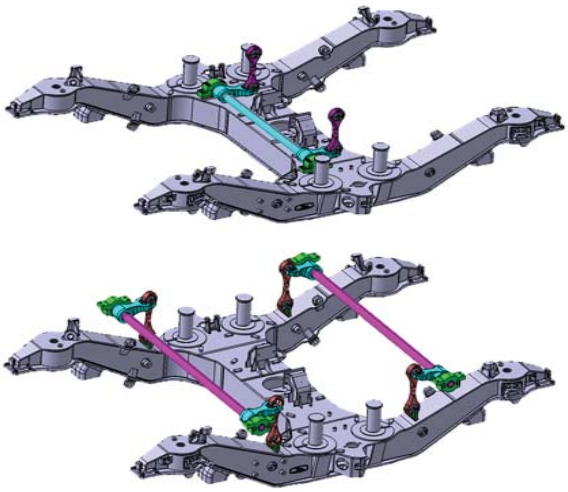
(가) 형상 검토

○ 안티롤바 설치 대상차량 : KTX 산천

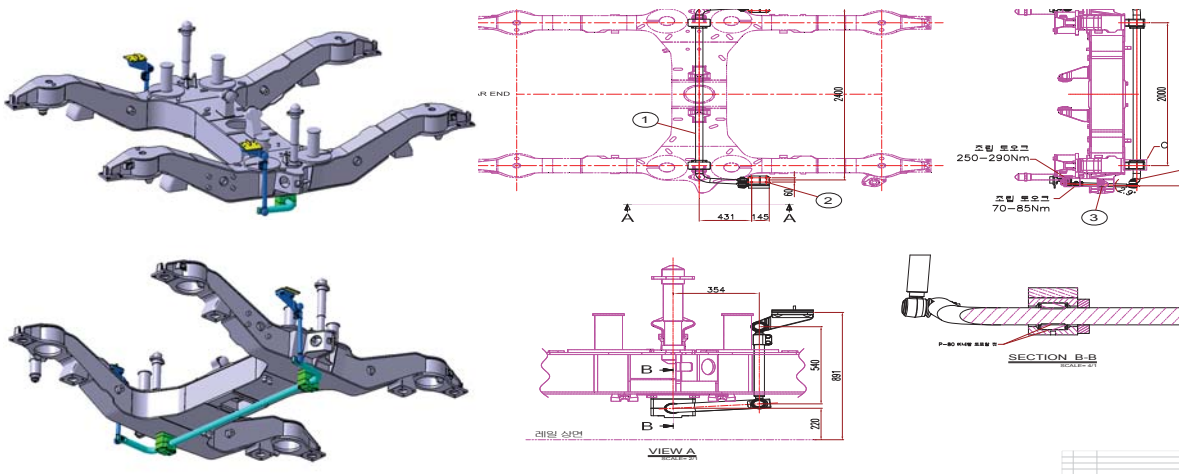


< KTX-산천 >

○ 안티롤바 형태별 설치 위치검토

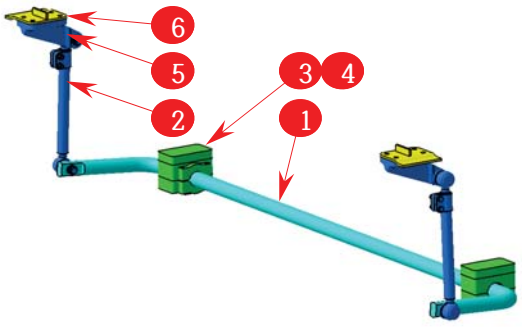


○ 최종확정안



< 최종 모델링 및 도면 >

○ 안티롤바 구성요소



No	품명	재질	비고
1	Torsion bar	SUP11A	
2	Rod set	Ass'y	
3	Half shell bush	Rubber	
4	Half shell bush backet	S45C	
5	Rod bracket	SC450	
6	Bracket	SS400	

(나) 토션바의 재질 특성

○ 재질

- 안티롤바 제품에 적용하는 재질은 고속열차용으로 사용되고 있는 기존 재질과 동일한 재질인 SUP 11A 재질을 사용하였음

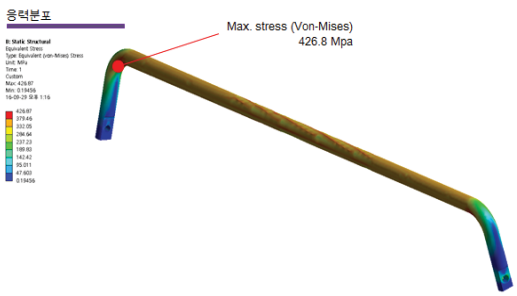
항 목	재 질	비 고
Torsion Bar	SUP 11A (JIS G 4801)	Hot-Rolled Steel for Quenched and Tempered springs

○ 재질의 기계적 성질

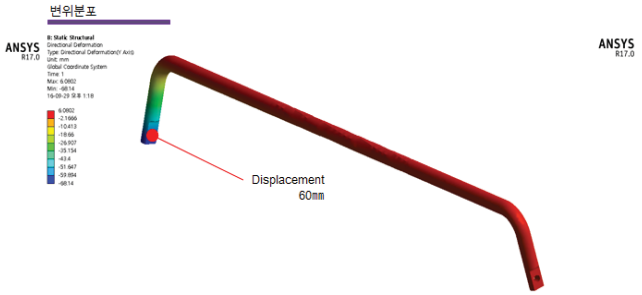
재질 (해당 규격)	밀도 (kg/m^3)	탄성계수 (GPa)	포아송비	항복강도 (MPa)
SUP 11A (JIS G 4801)	7780	210	0.3	1200

(다) 구조강도 계산

○ 구조해석



< 응력분포 >



< 변위분포 >

○ 해석 결과

- 해석 결과 최대응력은 약 427MPa로서, 토션바의 곡선부에서 발생되었으며, 이는 재질의 항복강도(1200MPa) 이내이므로 정적 구조강도를 만족함

(3) 안티롤바 시제품 제작

(가) 제작공정

1 차 시제품	2차 시제품
제작공법 : 열간벤딩(화염 & 전기로)	제작공법 : 냉간 벤딩(벤딩M/C 이용)
원자재 구입(SUP11A) ↓ 원자재 절단 및 가공 ↓ 화염 또는 전기로 부분 가열 ↓ 열간 벤딩(수동 벤딩 : 인력) ↓ 전처리 & Shot Peening ↓ Painting	원자재 구입(SUP11A) ↓ 소둔처리(풀림 열처리) ↓ 냉간 벤딩(자동 : 벤딩 M/C) ↓ 열처리 ↓ 기계가공 ↓ 전처리 & Shot Peening ↓ Painting

(나) 주요 제작공정

○ 원자재 및 기계가공



○ 냉간벤딩



○ 열처리




< 열처리 변형 방지 jig 설치 >




< 열처리된 안티롤바 >

○ 열처리후 기계가공




○ SHOT PEENING & 도장




(4) 안티롤바 특성시험

(가) 수직 정하중시험

○ 판정기준 : 측정된 강성(Sroll)이 기준치(3.11MN· m/rad ±10%) 이내 여부 확인




< 정하중시험 장비 설치 >

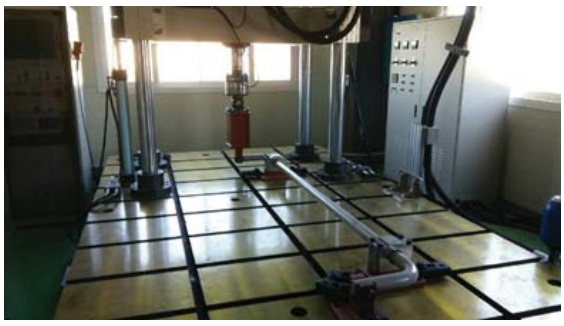
○ 수직 정하중 시험 결과

안티롤바 길이(L)	레버암 변위(d)	시험 측정치		
		하중 측정치 (Pmax)		강성(MN.m/rad)
2,445mm	0.0331	압축	1771	3.13
			1774	3.14
		인장	1760	3.12
			1766	3.13

- 측정된 하중 측정치를 이용하여 강성(Sroll) 기준치를 계산한 결과 시험 기준(3.11MN· m/rad ±10%) 이내 임

(나) 내구성시험

○ 판정기준: 시험종료 후 비파괴 검사를 실시하여 균열 발생 여부를 확인




< 내구성시험 장비 설치 >

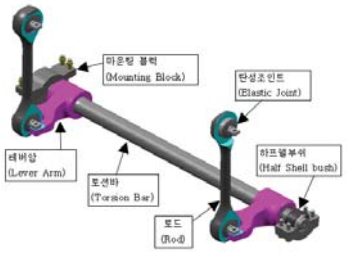
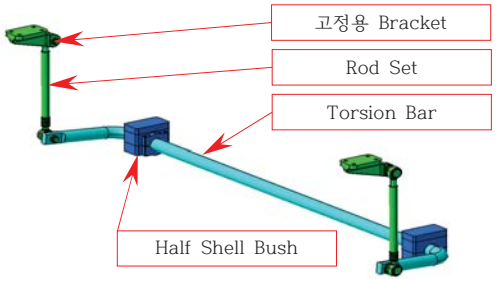
< 조립체 특성 시험: 롤 강성>

○ 시험결과 분석

강도조건	평가기준	결과
피로강도	균열이 발생하지 않아야 한다	이상없음

(5) 안티롤 바 개발 제품 특성 비교

- 개발 목표 : 고속 주행안정성 향상을 위한 안티롤바 강성정도 30% 이상향상(롤 강성 정도 ±15%→±10%)

<table>
<tr><th>항목</th><th>KTX 산천 기준
(초기 개발 모델)</th><th>1차 개발 시제품</th><th>2차 개발 시제품</th></tr>
<tr><td>형상</td><td> 
</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td>재질</td><td><table><tr><td>Bar</td><td>52CrMoV4 (DIN 17221) or SUP 11A (JIS G 4801)</td></tr><tr><td>Arm</td><td>SCM440H(JIS G 4052)</td></tr></table></td><td colspan="2"><table><tr><th>항 목</th><th>재 질</th></tr><tr><td>Torsion Bar</td><td>SUP 11A (JIS G 4801)</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>기준</td><td>Roll 강성(MN • m/rad) : 3.827</td><td colspan="2">기준치: (3.11MN· m/rad ±10%)</td></tr>
<tr><td>기본설계및제작안</td><td>1. 산천 KTX의 동력차 동력대차에는 안티롤바가 없음.
2. 1차 신규 개발 모델로 일반적으로 적용되고 있는 TYPE임.
3. 공차에 의한 Roll 강성 오차 : ± 1 % 이내 설계
4. 구조강도 안전율 : 1.52</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td>개발특성</td><td>1.기본 모델의 해석결과
<table><tr><th>해석 모델</th><th>롤 강성</th><th>비고</th></tr><tr><td>안티롤바</td><td>4.930</td><td>기준치</td></tr><tr><td>안티롤바 시스템</td><td>3.921</td><td>기준치 대비 20.5% 감소</td></tr></table>안티롤바의 롤 강성이 탄성조인트와 로드가 추가되어 시스템으로 적용될 경우, 기준치보다 약 20% 적은 강성을 나타냄을 알 수 있어, 이러한 차이는 안티롤 바가 사양에 제시된 롤 강성을 가지도록 제작되더라도 실제 차량에 사용되면 예상된 롤링 각 보다 더 큰 롤링이 발생될 수 있음을 의미하므로 안티롤바의 강성 설계 시 이를 고려하여야 됨.</td><td>시험 측정치
<table><tr><th colspan="2">하중 측정치 (Pmax)</th><th>강성 (MN.m/rad)</th></tr><tr><td rowspan="2">압축</td><td>1771</td><td>3.13</td></tr><tr><td>1774</td><td>3.14</td></tr><tr><td rowspan="2">인장</td><td>1760</td><td>3.12</td></tr><tr><td>1766</td><td>3.13</td></tr></table>정하중 시험 : 측정된 하중 측정치를 이용하여 강성(Sroll) 기준치를 계산한 결과 시험 기준(3.11MN· m/rad ±10%) 이내 임

- 개별 수동 작업으로 인한 작업성이 좋지 않음.</td><td>시험 측정치
<table><tr><th colspan="2">하중 측정치 (Pmax)</th><th>강성 (MN.m/rad)</th></tr><tr><td rowspan="2">압축</td><td>1770</td><td>3.13</td></tr><tr><td>1773</td><td>3.14</td></tr><tr><td rowspan="2">인장</td><td>1761</td><td>3.12</td></tr><tr><td>1765</td><td>3.13</td></tr></table>정하중 시험 : 측정된 하중 측정치를 이용하여 강성(Sroll) 기준치를 계산한 결과 시험 기준(3.11MN· m/rad ±10%) 이내 임

- 제작 공법에 있어 1차 시제품 보다 정교하고 제작이 용이함</td></tr>
</table>

다. 경량 액슬박스 기술개발

(1) 액슬박스 기본설계 및 상세설계

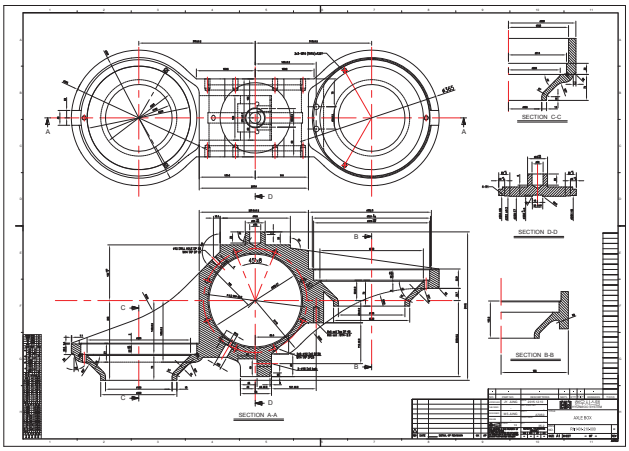
(가) 액슬박스의 기능

○ 고속열차용 경량 액슬박스의 형태는 윙(Wing)타입 제품이며, 1차현가장치(Primary suspension)의 코일스프링 및 고무스프링이 조립되어 차량의 하중부담 및 운행 시 차량 주행안정성을 유지하는 역할을 하고, 현재 국내에는 주철 외의 경량제품의 실용화 적용은 없음. 스프링 하 질량 감소가 특히 요구되는 고속차량의 스프링하 질량을 감소시키기 위해 주강제품인 액슬박스를 경량화하여 주행 안정성 향상 및 유지보수 비용을 절감하고자 함.

<기존제품과 비교>

구분	기존 제품	개발제품
형상		
재질	GE280N 또는 SC450 (Cast steel)	A7050-T74 : 알루미늄 단조
중량	약 80kg	약 40.78kg
인장/항복강도 (MPa)	480/280	524/469

(나) 최종도면 및 형상





< 최종도면 및 형상 >

(다) 적용재질의 기계적 성질

① 재질 : 알루미늄 합금 단조(7050T7452)

② 소재 크기 : 385 x 1015 x H420

③ 기계적 성질

재 질	밀도 (kg/m^3)	탄성계수 (GPa)	포아송비	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	피로한도 (MPa)
알루미늄합금 단조(7050T7452)	2838	71.7	0.33	469	524	201

(라) 구조강도 계산

① 하중조건

- 수직하중과 좌우하중 적용

② 판정기준 : 액슬박스의 구조강도 및 피로강도 판정기준은 아래 참조

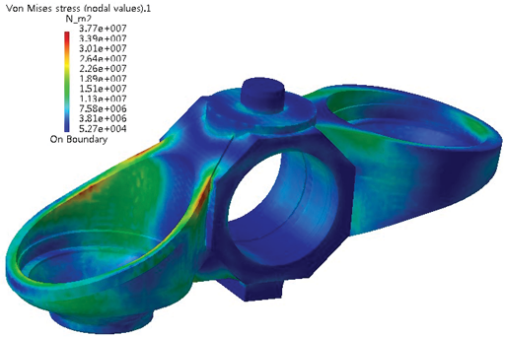
강도조건	평가기준	비 고
정적강도	발생응력 및 중첩응력이 항복응력 이내일 것	

③ 해석 결과

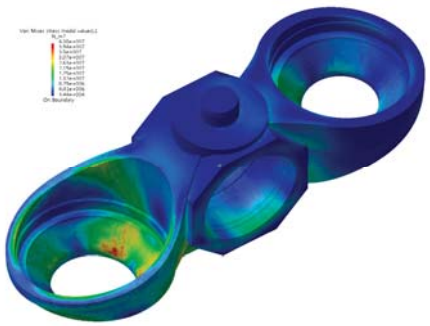
- 알루미늄 단조형상을 적용한 액슬박스의 구조해석 결과, 발생응력은 모두 해당 재질의 항복응력 이내에 있음을 확인할 수 있었음. 해석결과 및 응력분포 결과는 아래와 같음.

적용재질	최대응력(MPa)		판정기준 (MPa)	비고
	수직하중	좌우하중		
알루미늄합금 단조	53.7	41.4	469	

○ 수직 하중 조건의 응력분포



<수직하중 조건의 응력분포>



<좌우 하중 조건의 응력분포>

<수직 및 좌우하중 조건에서의 최대응력(Von Mises stress)>

적용재질	최대응력(MPa)		판정기준 (MPa)	비고
	수직하중	좌우하중		
알루미늄합금 단조	53.7	41.4	469	

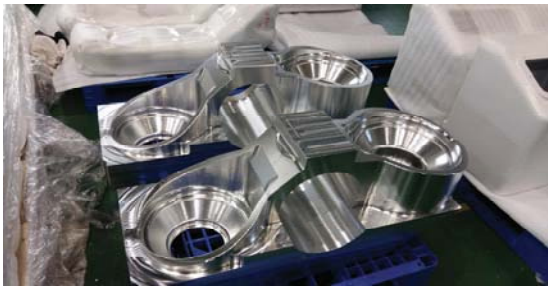
(2) 시제품 제작

① 원자재 입고




② 시제품 가공

- 황삭가공

- 정삭가공




- 표면처리


< 아노다이징 >


< 파이널 도장 >

③ 2차 시제품 중량 측정 : 40kg

- 기존제품 대비 중량 절감률 : 50%

(3) 액슬박스 특성시험

① 정하중시험

- 수직하중시험
- 좌우하중시험
- 전후하중시험




< 하중 시험 JIG 설치 >

○ 평가 기준

강도조건	평가기준	비 고
정적강도	발생응력 및 중첩응력이 항복응력 이내일 것	

○ 시험 결과

- 시험 실시 횟수 : 2회 실시 후 결과 기록
- 정하중시험 결과

Gage No.		1		2		3		4		Load [kg]
Result(MPa)		Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis	Test	
수직	1st	53.7	35.7	53.6	41.7	12.6	8.5	12.7	10.2	10730.5
	2nd		36.5		41.5		9.4		11.1	10790.4
좌우	1st	-11.3	-12.9	-0.5	-5.2	41.4	40.3	41.4	41.5	3378.8
	2nd		-12.7		-4.6		40.1		41.6	3379.0
전후	1st	0.04	0.2	0.02	1.5	3.1	5.1	3.3	15.6	214.8
	2nd		0.8		2.0		6.1		7.9	213.4

○ 결과분석

- 구조해석과 시험 결과가 모두 판정기준 이내임

② 내구성 시험

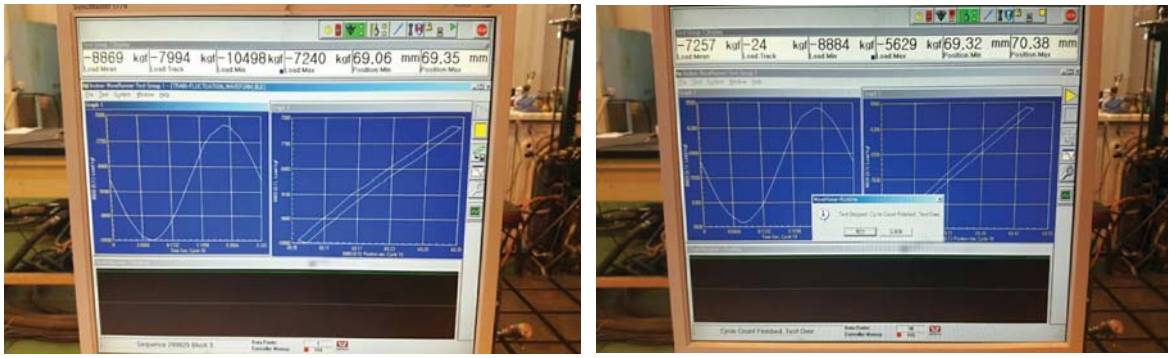
○ 시험 장비 설치



< 시험 장비 설치 >

○ 내구성 시험 제어

- 시험 속도 : 3Hz
- 사용 프로그램 : INSTRON MAVEMAKER



< Cycle Counter 제어 >

○ 시험 결과 분석

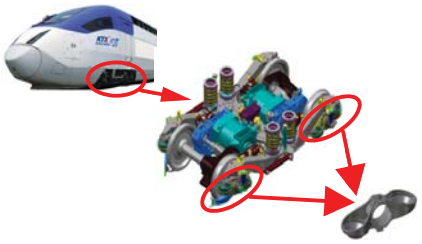
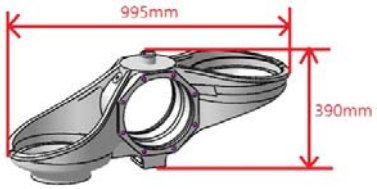
강도조건	평가기준	결과
피로강도	균열이 발생하지 않아야 한다.	이상없음

○ 시제품 비파괴 검사

액상침투탐상검사 (PT : Liquid Penetrant Testing)

(4) 경량 액슬박스 개발 제품 특성 비교

- 개발 목표 : 주행장치 속도 향상을 위한 액슬 박스 중량 30% 경량화

<table>
<tr><td>항목</td><td>KTX 산천 기준
(개발 모델)</td><td>1차 개발 시제품</td><td>2차 개발 시제품</td></tr>
<tr><td>형상</td><td> 
KTX산천 동력차 동력대차
액슬박스</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>재질</td><td>GE280N
(Cast Steel)</td><td colspan="2">알루미늄합금 단조
(7050)</td></tr>
<tr><td>재질특성</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>재 질</th><th>밀도
(kg/m^3)</th><th>탄성계수
(GPa)</th><th>포아송비</th><th>항복강도
(MPa)</th><th>인장강도
(MPa)</th><th>피로한도
(MPa)</th></tr>
<tr><td>GE 280 N
(주강)</td><td>7850</td><td>200</td><td>0.266</td><td>280</td><td>480</td><td>120</td></tr>
<tr><td>알루미늄합금
단조(7050)</td><td>2838</td><td>71.7</td><td>0.33</td><td>469</td><td>524</td><td>201</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>기본설계및제작안</td><td>  </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>개발특성</td><td>KTX 산천
<table>
<tr><td>중량</td><td>80kg</td></tr>
<tr><td>인장/항복강도
(MPa)</td><td>480/280</td></tr>
</table>
</td><td>1차 : 중량 절감율 49%
<table>
<tr><td>중량</td><td>41kg</td></tr>
<tr><td>인장/항복강도
(MPa)</td><td>524/469</td></tr>
</table>
</td><td>2차 : 중량 절감율 51.5%
<table>
<tr><td>중량</td><td>39kg</td></tr>
<tr><td>인장/항복강도
(MPa)</td><td>524/469</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td></td><td>  </td><td colspan="2">  </td></tr>
</table>

제5절 종합시스템 엔지니어링 및 사업총괄

1. 과제간 인터페이스 조정을 통한 시스템 타당성 검토 및 검증연구

가. 고속열차 효율향상 핵심장치 요구사항 정의

(1) 고속열차 주행안정성 향상 기술개발의 기술요구사항 정의

○ 대차의 형식은 동력차량용 볼스터리스 대차(Bolsterless Bogie)를 사용하여 최고주행속도, 주행안정성 등을 향상시키는 것을 목적으로 함

○ 300km/h KTX-산천 고속열차의 시스템 성능 및 효율향상을 위한 최고운행속도는 350km/h, 설계속도는 385km/h 및 임계속도는 KTX-산천 대차보다 20% 향상을 목표로 함

○ 고속열차의 승차감 향상을 위한 적용 승차감기준은 유럽 EN규격 prEN 12299-2009 안락레벨 1.5～2.5 NMV를 적용함

○ 고속열차의 안전율을 향상하기 위하여 탈선계수기준은 정상운행조건의 경우 차륜의 수직하중에 대한 횡방향 힘에 대한 비율은 100% 누적빈도확률은 0.8 이하, 0.1% 누적빈도확률은 1.1 이하로 하고, 비틀린 궤도운행조건의 경우 최대값은 1.2 이하로 정의함

○ 고속열차의 안전율을 향상하기 위하여 윤중감소기준은 0.1%, 누적빈도확률은 0.8 이하, 정상은 0.6 이하 및 100%, 누적빈도확률은 0.5 이하로 정의함

○ 고속열차의 안락함을 향상하기 위하여 차체 수직 및 횡가속도 기준은 최대값은 2.5 m/s^2, RMS 값은 상하 0.75 m/s^2, 횡 0.5 m/s^2 및 정상은 1.5 m/s^2 이하로 UIC 518 규격 또는 EN14363 규격을 적용하여 정의함

○ 고속열차 대차의 안전성을 향상하기 위하여 대차 횡가속도 기준은 12-(Mb/5)m/s^2 (Mb: 대차중량)로 UIC 518 규격을 적용하여 정의함

○ 고속열차 안전성 향상을 위하여 횡압기준은 탈선계수 0.9 이하 시 2+0.3P (P: 정적수직력 kN)로 정의함

<고속주행 안정성능 기술 효율향상 목표>

항목	KTX-산천	성능 및 효율향상 목표
설계속도	330(km/h)	385(km/h)
최고운행속도	300(km/h)	350(km/h)
임계속도	467(km/h)	560(km/h)
대차형식	독립대차	독립대차
승차감	- 산천: ISO 2631, 2H 감소안락레벨 이하	- prEN 12299-2009 안락레벨 또는 103dB(A) 이하(350km/h에서)
주행거동기준: 차체 횡/수직 가속도	- 최대값: 2.5 m/s^2 - RMS: 상하 0.75 m/s^2, 횡 0.5 m/s^2(UIC 518) - 정상: 1.5 m/s^2	좌동
안전성기준	- 대차횡가속도: 12-(M_b/5) m/s^2, M_b: 대차중량 (UIC 518) - 차체 횡/수직 : 3.0 m/s^2(UIC 518)	좌동
윤중감소	- 0.1% 누적빈도확률 : 0.8 - 정상 : 0.6, - 100% 누적빈도확률 : 0.5	좌동
횡압	- HSR-350X : 68kN - 탈선계수 0.9이하 시 : 2+0.3P P: 정적수직력	좌동
탈선계수	- 100% 누적빈도 확률 : 0.8 - 0.1% 누적빈도 확률 : 1.1 - 평균값 : 0.8 - 최대값 : 1.2	좌동

(2) 고속열차 공력성능 향상 기술개발의 기술요구사항 정의

○ KTX-산천 공기저항계수 8% 저감을 목표로 함

○ 다목적 공력최적설계 기술을 적용하여 전두부 및 차체형상을 최적화함

○ 동력차와 동력객차의 단면형상을 일치시켜 차량미려도와 공기역학적 성능을 개선시킴

○ KTX-산천 C_D = 0.964(350km/h, 10량 편성) 대비 8%를 저감하여 0.887를 목표로 함. 세부 공기저항 저감 내용은 괄호 안과 같음(전두부 최적설계 2%, 선두차 단차 축소 2%, 대차커버 적용 3%, 기타 1%)

○ 동력차 전두부 형상에 대한 다목적 공력최적설계를 수행하여 공기저항, 미기압파, 강풍안정성을 향상시킴

○ 대차측면에 커버를 설치하여 대차유입 유동을 제어함으로써 차체 공기저항을 저감시키고, 고속주행 안전성과 유지보수성을 동시에 확보하고자 함

○ 동력차 열환경 분석 후, 동력차 통풍구(Ventilation Grille)의 구조를 변경하여 동력차차체 공기저항을 저감시킴

<공기저항 방법 및 저감 목표>

공기저항 발생 부위별	공기저항 저감 방법	저감목표 (%)
1. 전두부/후미부	형상개선(압력저항)	2
2. 선두차 단차 축소(객차와 상부 및 측면부)	동력차와 객차 차체의 형상 일치	2
3. 대차 측면	대차 측면 페어링	3
4. 차체 표면 마찰저항	차체 표면 개선 등	1
합계		8

<공력성능기술 효율향상 목표>

항목	KTX-산천	효율향상 목표	비고
설계속도	330 km/h	385 km/h	
안정성 확보	300 km/h	350 km/h	
공기저항계수	C_D = 0.964(10량 편성)※	C_D = 0.887(10량 편성)	8% 저감 (10량 편성기준)
주행저항	Fx(kN) = 2.769 + 0.03586V + $0.000456V^2$	Fx(kN) = 2.769 + 0.03586V + $0.000419V^2$	

(10량 편성)※: 전산해석결과 기준

(3) 고속열차 운영효율향상 주행장치 기술개발의 기술요구사항 정의

○ 대차의 형식은 동력차량용 볼스터리스 대차(Bolsterless Bogie)를 사용하여 최고주행속도, 주행안정성 등을 향상시키는 것을 목표로 함

○ 300km/h KTX-산천 고속열차 시스템의 성능 및 효율향상을 위한 최고운행속도는 350km/h, 설계속도는 385km/h임. 임계속도는 KTX-산천 대차보다 20% 향상을 목표로 함

○ 경량 액슬박스, 경량 윤축 등 기존 대비 10% 이상 경량화를 목표로 함

○ 감속장치 이상 진동 및 차축 베어링 과열 상태 실시간 감시장치를 설비하여 주행안정성을 향상 시키는 것을 목표로 함

○ 완성된 주행장치는 주행성능시험(Roller Rig Test을 실시하여 기존 대차 대비 임계속도 20% 향상을 목표로 함

<고속열차 주행장치 개발 특성 비교 검토>

구분	KTX-산천	효율향상 목표	비고
최고속도(km/h)	330	385	
최고운행속도(km/h)	300	350	
시험속도(km/h)	330	385	
임계속도(km/h)	467	560	20% 향상
안전성(km/h)	300	350	
대차형식	독립대차	독립대차	
대차방식	볼스터리스	볼스터리스	
축중(톤)	≤17	≤17	
축거리 (mm)	3,000	3,000	
차륜경 (mm)	920	920	
현가장치 : 1차	고무스프링	고무스프링	
2차	공기스프링	공기스프링	
강도기준	UIC515/615-4	UIC515/615-4	
액슬박스	80kg	56kg	30% 경량화
윤축	1,141kg	1,027kg	10% 경량화
구동장치	트리포드	트리포드	
제동장치	회생/답면/디스크제동	회생/답면/디스크제동	

(4) 고속열차 추진시스템 효율향상 기술개발의 기술요구사항 정의

(가) 주전력변환장치

○ 추진제어방식는 1C1M 방식을 채용하여 제어효율을 향상함
○ 주전력변환장치의 출력용량은 KTX-산천(2,717kVA) 대비 12% 성능 향상(3,060kVA)을 목표로 함
○ 주전력변환장치의 냉각방식은 강제수냉각방식을 채용하여 냉각효율을 높임
○ 개발되는 주전력변환장치는 KTX-산천의 주전력변환장치와 교체가 가능하도록 호환성을 유지하여 설계·제작함
○ 주전력변환장치의 중량당 출력은 KTX-산천(20.27kW/ton) 대비 6.7% 성능 향상된 19kW/ton 수준을 목표로 함
○ 구성품시험과 시스템 조합시험(주변압기+주전력변환장치+견인전동기+추진조합시험설비)을 통해 시스템 입증시험을 수행함

(나) 견인전동기

○ 견인전동기 형식은 회전형 유도기기로 함
○ 견인전동기의 출력은 1,210 kW로 하여 KTX-산천(1,100kW) 대비 10% 성능 향상을 목표로 함
○ 견인전동기에 속도센서를 설비하여 제어효율 성능 향상을 목표로 함
○ 냉각유로 구조를 개선하여 소음수준의 향상을 목표로 함
○ 완성된 제품의 구성품시험과 대용량부하시험을 통해 성능검증을 수행하고, 관성부하 시스템 조합시험을 통해 시스템 입증시험을 수행함

(다) 주변압기

○ 주변압기 출력용량은 KTX-산천(6200KVA) 대비 14%(7,080KVA) 성능향상을 목표로 함
○ 주변압기 2차 출력용량은 KTX-산천(1,300KVA) 대비 16.9%(1,520KVA) 성능향상을 목표로 함
○ 냉각유니트를 컴펙트(Compact)화하여 냉각효율의 성능을 향상함
○ 주변압기에 절연성능을 KTX-산천(150kV) 대비 13.3%(170kV) 향상을 목표로 함
○ 주변압기는 기존의 KTX산천 차량의 주변압기와 Interface 측면에서 취부 호환성이 있도록 목표로 함
○ 완성된 제품의 구성품 부하시험과 시스템 조합시험을 통해 시스템 입증시험을 수행함

<주전력변환장치의 효율향상 목표>

구분		KTX-산천	효율향상 목표	비고
컨버터	제어방식	전압형 PWM	전압형 PWM	
	입력전압/전류	AC1,400V/928A	AC1,400V/964A	
	출력전압/전류	DC2,800V/893A	DC2,800V/1,071A	
	용량	1,250kWx2개	1,388kW x 2개	10% 향상
	냉각방식	강제냉각+Heat Pipe식	강제수냉각방식	냉각효율향상
	제어소자	IGBT	IGBT	
	주회로방식	1C2M	1C1M	제어효율향상
	제어전원	DC72V	DC72V	
	효율(PF)	0.97	0.95	
	효율(%)	-	0.97	
인버터	제어방식	전압형 VVVF PWM	전압형 VVVF PWM	
	DC링크전압	DC2,800V/857	DC2,800V/857	
	연속용량	2,717kVA	3,060kVA	12% 향상
	최대정격용량	-	-	
	출력정격전압	AC 0~2,183V/718A	AC 0~2,183V/718A	
	냉각방식	강제냉각+Heat Pipe식)	강제 수냉각	냉각효율향상
	제어소자	IGBT Press Type	IGBT Press Type	
	주회로방식	1C2M	1C1M	제어효율향상
	제어전원	DC72V	DC72V	
	효율(PF)	0.975	-	
	효율(%)	-	0.975	

<견인전동기의 효율향상 목표>

구분	KTX-산천	효율향상 목표	비고
형식	3상 농형 유도전동기	3상 농형 유도전동기	
견인전동기출력(kW)	1,100	1,210	10% 향상
효율(%)	-	92	
효율(PF)	-	0.88	
최대중량(kg)	1,500(0.73kW/kg)		
냉각방식	강제공냉	강제공냉	
절연종별	200급	200급	
최대 회전수	4,100rpm	-	
속도센서	없음	전원 및 무전원 속도센서 설치	속도제어 효율향상
프레임	프레임레스	프레임레스	
코아재질	S23	S23	
설치방법	차체설치	차체설치	

나. 추진장치 성능시험설비 개량 및 추진시스템 성능 검증

(1) 추진장치 성능시험설비 개량

(가) 기존 추진장치 성능시험설비 현황

○ 본 연구를 통하여 개발되는 고속열차 효율향상 추진시스템에 대한 성능시험을 위하여 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 기존 추진장치 성능시험설비에 대하여 용량 등의 기술적 특성을 검토함

○ 추진장치성능 시험설비 구성
- 추진장치성능 시험설비는 도시철도용 추진시스템을 시험하기 위한 DC 1,500V 전원설비와 일반철도와 고속철도의 추진시스템 시험을 위한 AC 25,000V 전원설비, 부하시험을 위한 인버터, 전동기로 구성됨
- 1C-4M 추진장치에 대한 성능평가를 상정·구축되었기 때문에 4대의 660kW 유도전동기를 부하로 구비

○ 기존 추진성능 시험장비의 한계
- 현 시험설비는 도시철도용으로 300km/h 이상의 고속철도용 추진시스템에 대응하기에는 한계가 있음
- 전원설비 측도 최대 시험 용량을 1,320kW로 상정하고 구축된 시스템이기 때문에 그 이상의 용량에 대한 전원설비의 출력용량 검토가 필요하였음
- 본 연구 과제에서 시험하고자 하는 1,388kW급(컨버터기준) 전력변환장치를 이용한 유도전동기 구동을 통한 특성 시험을 위해서는 현재 시험설비의 진동, 축휨, 소음 등 기계적 위험부담이 늘어나고 있어 이에 대한 개선이 필요하였음

(나) 추진장치성능 시험설비 개량

① 추진장치 전원입력설비 신규 추가

○ 전원전압 변동시험 관련 검토
- 시험시료와 시험설비의 구성은 IEC 61377에 따라 시험을 수행함
- 시험기준 및 시험절차는 IEC 61133에 따라 시험을 수행함
- 상기 규격 중 인버터의 full-load 및 최고속도에서의 견인과 회생시험 수행 필요

○ 전원전압 변동시험을 위한 추진장치 성능시험설비의 전원설비 용량 검토
- 개발된 추진시스템의 전력변환장치 용량은 최대 1,388kW급으로 설계 및 제작됨
- 기존 설비의 전원 용량은 1,500kW급으로 견인전동기 동작 시험시 효율(0.93)과 역률(0.88)을 고려할 경우 최대 1,230kW 출력까지 활용 가능함에 따라, full-load 및 최고속도에서 시험을 수행하기 위한 추진시험장치의 전원설비 용량을 검토·개선하였음

② 부하용 전동기의 커플러 설계

○ 전력변환장치와 견인전동기 시험을 위해 필요한 부하 전동기의 용량은 1,210 kW급임. 기존 설비에 사용된 부하용 전동기는 660 kW급 4대로 구성되어 있어, 2대의 부하용 전동기의 축을 직렬로 연결하여 총 1,320 kW급의 출력을 구성함으로써 개발품의 성능평가가 가능하도록 개선함

○ 부하용 전동기 연결을 위한 커플러 설계 사양은 다음과 같음
- 고속 고토크를 위한 double disc 형태의 커플링을 제작
- 손실을 최소화 할수 있는 구조로 설계 제작
- 최대 10,000 Nm 이상의 동력 및 최대 7,000 rpm 이상의 속도를 전달할 수 있는 구조
- 발전기측 및 부하측의 데이터를 측정할 수 있는 구조

(2) 추진시스템 성능 검증

(가) 추진시스템 조합시험 검토

○ 철도차량 추진시스템의 조합시험 관련 국제규격은 IEC 61377-3 (Railway applications-Rolling stock-Part 3: Combined testing of alternationg current motors, fed by an indirect convertor, and their control system)에 따라 수행함

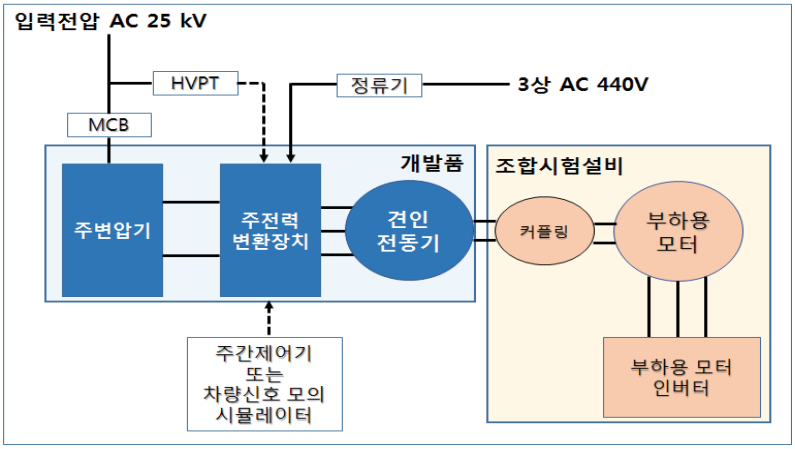
○ 본 과제를 통한 개발품의 조합시험 항목은 국제규격에 따른 추진시스템 조합시험을 위한 주요 시험항목과 고속철도차량의 성능시험 항목 중 추진장치 조합시험에서 수행되고 있는 시험 항목을 참고하여 조합시험 항목을 도출함

<조합시험 항목 도출>

순번	시험 항목	비고
1	토크 특성 시험(역행 및 회생 시험)	
2	가선 입력전압 변동 시험	
3	제어장치 전원시험	
4	효율 및 역률측정시험	
5	온도상승시험	조합시험에서 수행

(나) 추진시스템 조합시험 설비 구성

○ 다음 그림은 추진조합시험 국제기준에 따라 개발품의 추진조합시험을 위한 조합시험설비의 구성도를 나타냄



<추진시스템 조합시험 구성도>

○ 주전력변환장치의 제어는 주간제어기와 모니터링 장치를 통하여 수행하고 견인전동기의 견인력을 측정하기 위하여 부하용 견인전동기와 부하 구동을 위한 독립적인 인버터를 구비함

○ 개발되는 전력변환장치는 1C1M의 제어형태를 가지고 있지만 기존 KTX-산천과 호환성 유지를 위하여 하나의 랙에 2개의 견인전동기를 동작시킬 수 있도록 구성함

○ 수냉각시스템은 효율적인 구성을 위하여 2개의 컨버터와 인버터를 하나의 냉각시스템으로 냉각하는 구조로 설계됨

○ 주전력변환장치의 온도상승 시험 결과를 얻기 위해서 2대의 모터를 동시 구동시켜 시험을 수행하며, 조합시험에서 함께 진행함



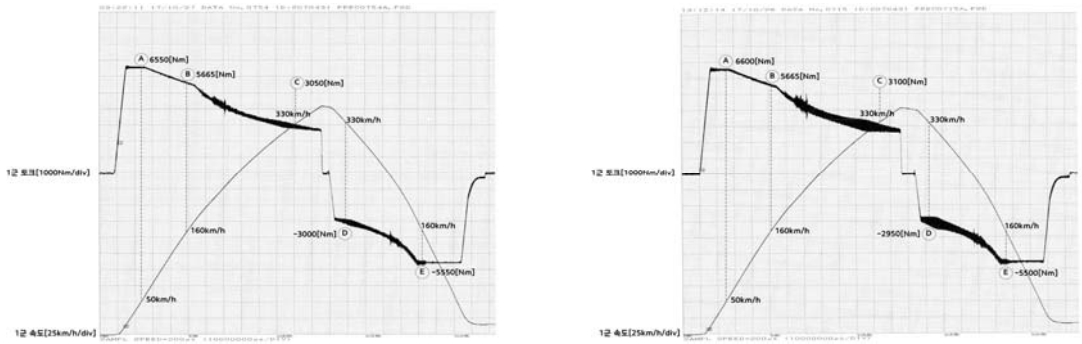
<추진시스템 조합시험 구성품 설치사진>

(다) 추진시스템 조합시험 결과

○ 토크 특성시험

- 토크 특성 시험은 추진시스템의 모터 Dynamic 특성에 따라 정해진 속도에서 견인전동기의 출력 토크의 크기가 요구하는 기준값을 만족하는지 확인하는 시험임
- 역행 및 회생 100%를 동작 상태에서 냉간시와 열간시 각각 측정하며 개발품의 판정기준은 다음 표와 같음. 토크 특성시험 결과 그래프에서 보듯이 기준치를 모두 만족함

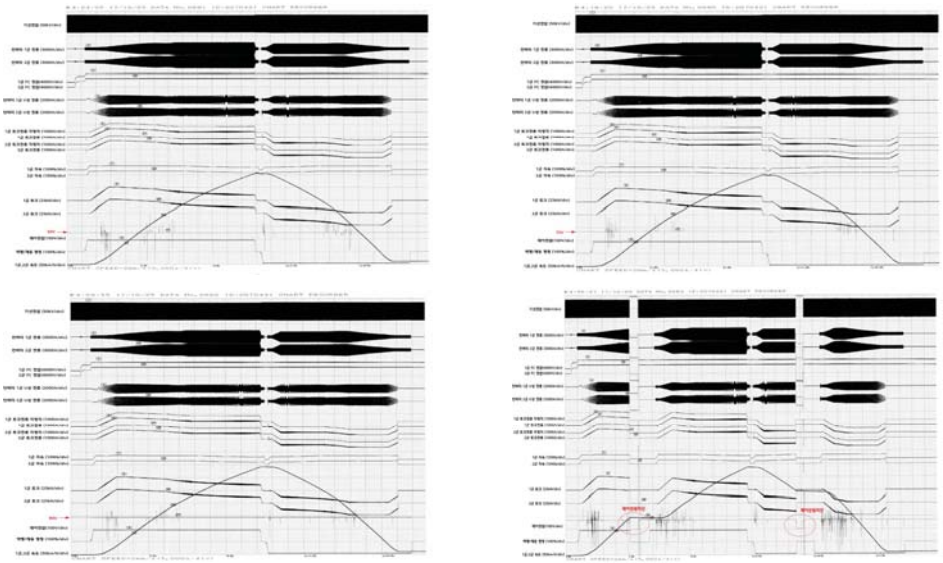
역행/제동	시험 조건	측정점	기준치	비고
역행	역행 100%	A	6192 Nm 이상	
		B	5662 Nm 이상	
		C	3027 Nm 이상	
회생	회생 100%	D	2854 Nm 이상	
		E	5232 Nm 이상	



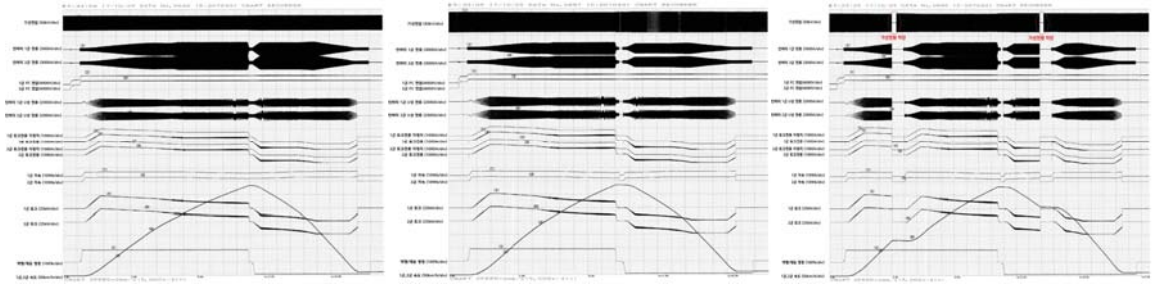
<토크 특성시험 결과(좌(냉간), 우(열간))>

○ 보호시스템 시험 (제어전원변동 및 가선전압변동 시험)

- 보호시스템 시험은 제어전원의 변동과 차단, 가선 입력전압의 변동 및 정전의 발생에 따라 추진시스템이 정해진 시퀀스 등에 따라 정상동작 하는지의 여부를 확인하는 시험임
- 제어전원 변동(50V, 72V, 90V 및 제어전원차단) 및 가선전압변동(19kV, 29kV 및 가선전압 차단)에 따른 시험에서 모두 기준을 만족하였으며, 결과 파형은 다음 그림과 같음



<제어전원변동 시험결과(50V, 72V, 90V 및 제어전원차단)>



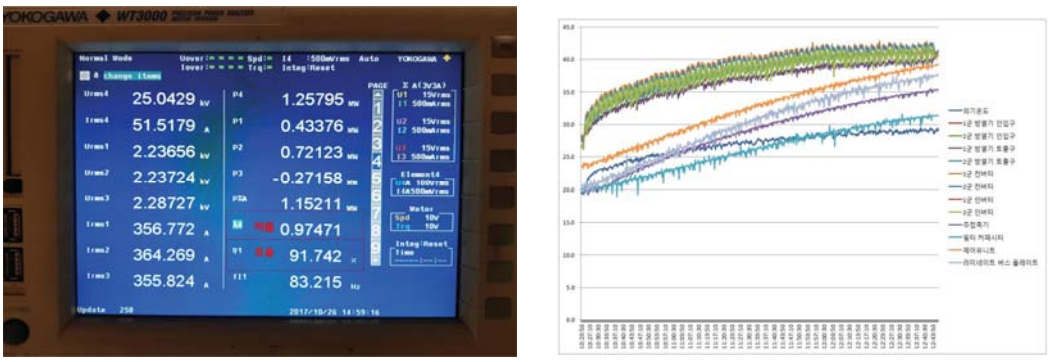
<가선전압변동 시험결과(19kV, 29kV 및 가선전압차단)>

○ 효율 및 역률 측정시험

- 효율측정시험은 주변압기의 1차측 입력전력과 견인전동기 입력전력을 측정하여 입력 대 출력의 비율을 통해 주전력변환장치의 효율을 측정함
- 측정결과는 주변압기를 포함한 전체 효율이므로 주전력변환장치만의 효율을 산정하기 위해 주변압기의 효율 97.5%(기준값 95%이상)을 고려하면 주전력변환장치의 효율은 94.1% 수준임
- 주전력변환장치의 역률은 효율측정시험과 동일한 조건에서 측정되며 결과값은 97.5%임

○ 온도상승시험

- 온도상승시험은 정격출력 상태에서 주요 발열부품 온도상승값이 포화된 상태에서의 온도상승 값을 측정
- 측정 결과 주요 발열부품의 온도상승 값이 기준치 이내의 값을 만족함

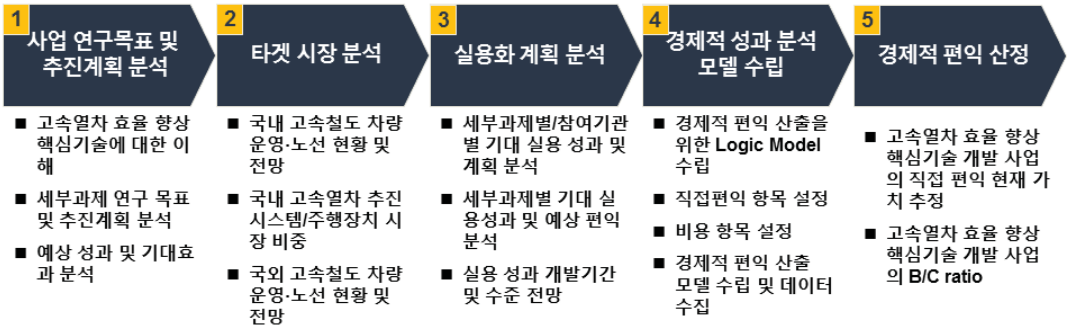


<효율 측정, 역률 측정 및 온도상승시험 그래프>

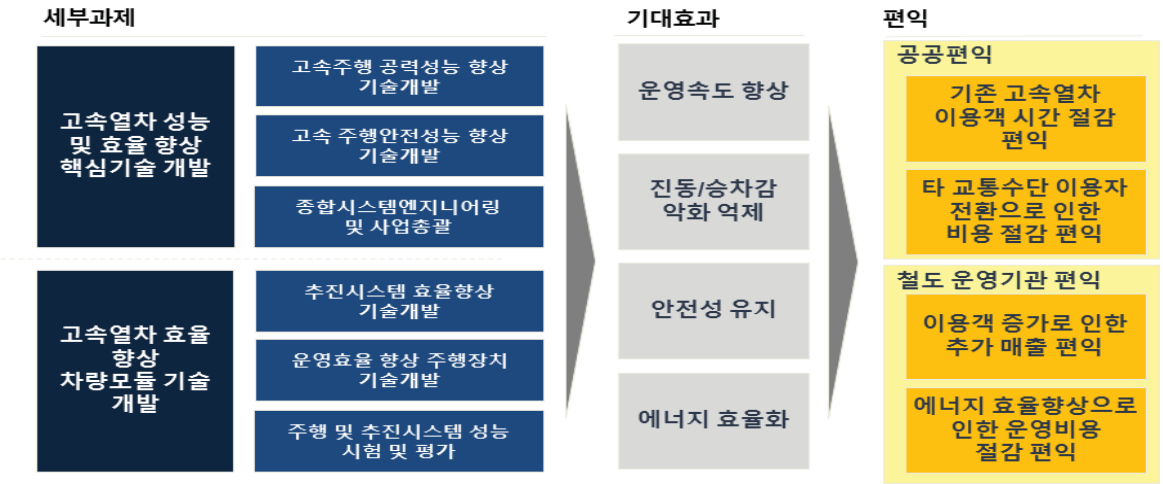
다. 고속열차 효율향상 핵심기술 개발 경제성 분석

(1) 경제성 분석 Framework

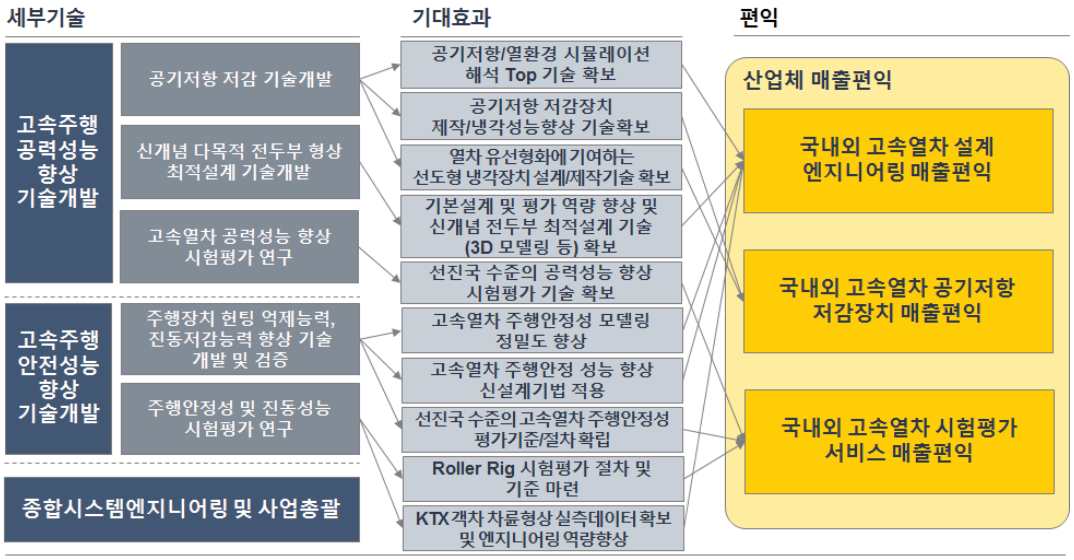
○ 연구개발의 경제적 타당성 확보를 위하여 5단계 세부 과업 수행을 통해 경제성 분석 추진



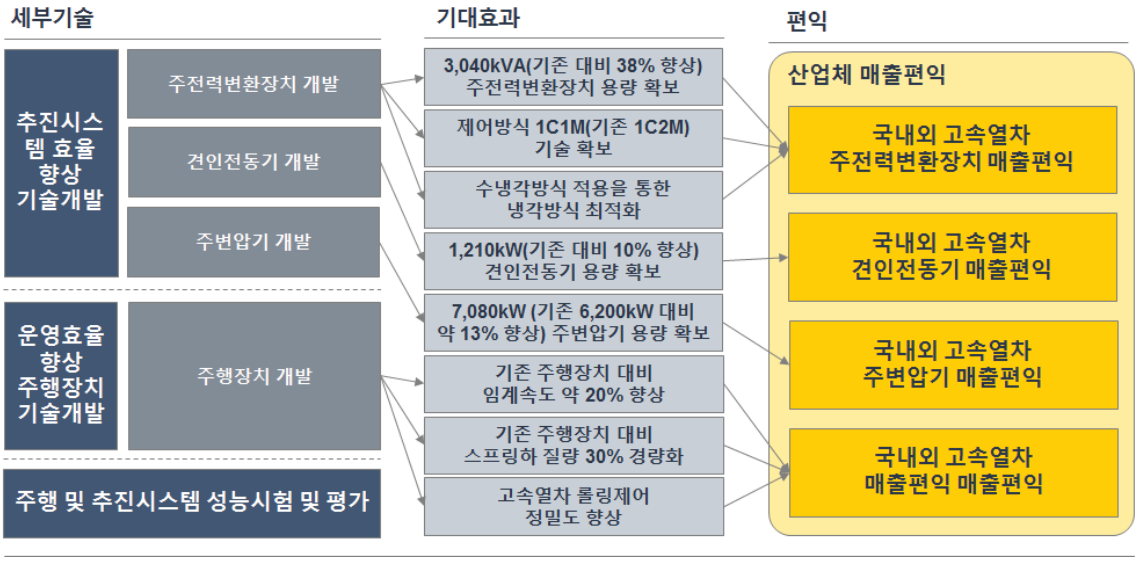
(2) 연구개발 산출물 및 효과/편익



<연구개발 총괄 산출물 효과/편익 도출 과정>



<1세부과제 연구개발 산출물 및 효과/편익 도출 과정>



<2세부과제 연구개발 산출물 및 효과/편익 도출 과정>

(3) B/C ratio 분석

(가) 기술개발 편익의 현재가치

○ 기술개발 편익의 현재가치는 공공편익, 철도 운영기관 편익, 산업체 매출편익으로 구성되며 현재가치 총합은 328.4억원임
- 공공편익의 현재가치는 241.6억원임
- 철도 운영기관 편익의 현재가치는 24.6억원임
- 산업체 매출편익의 현재가치는 62.2억원임

(나) 기술개발 투입 비용의 현재가치

○ 기술개발 투입 비용은 투입 예산으로 설정하며, 2013년~2017년간 총 181.6억원이 투입됨
○ 투입 예산을 연도별로 구분하여 현재가치로 환산하면 174.2억원

(다) 기술개발 B/C ratio분석

○ 기술개발 편익의 현재가치 총계를 기술개발 비용의 현재가치 총계로 나누어 B/C ratio를 산정한 결과, 1.89로 1을 상회하여 경제성이 있는 것으로 분석됨

기술개발 편익 현재가치 총합		기술개발 비용 현재가치 총합		B/C Ratio
328.4억원	/	*174.2억원*	=	*1.89*

라. 고속열차 효율향상 특허 전략 수립

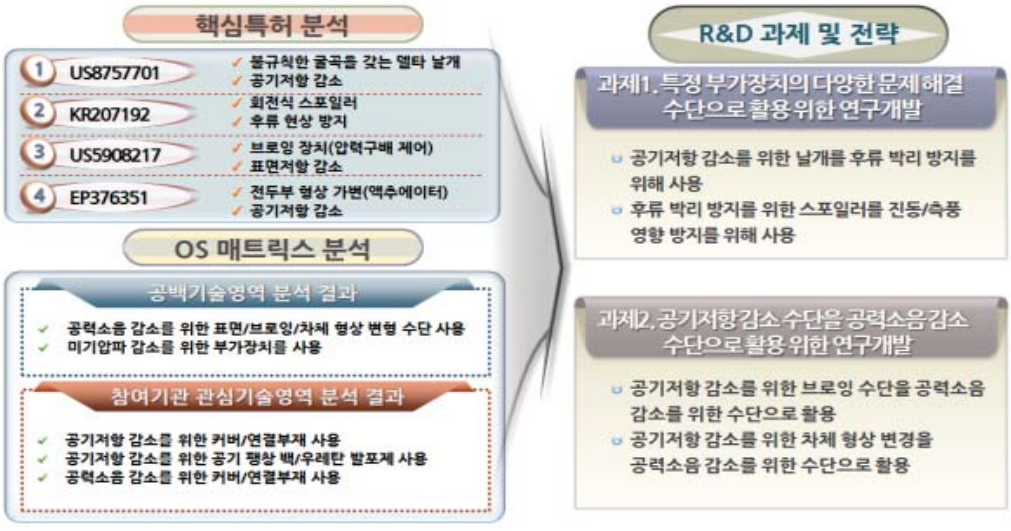
○ 『고속열차 효율 향상 핵심기술 개발』과 관련한 특허데이터를 조사 및 분석함으로써, 우리 기술수준 및 국외의 연구개발 동향 및 핵심특허 등을 파악하고 과제수행에 객관적인 특허정보와 이에 기반한 기술획득전략을 수립함



<특허전략수립 추진전략 개요>



<신규 IP 창출 통한 IP 포트폴리오 구축 결과>



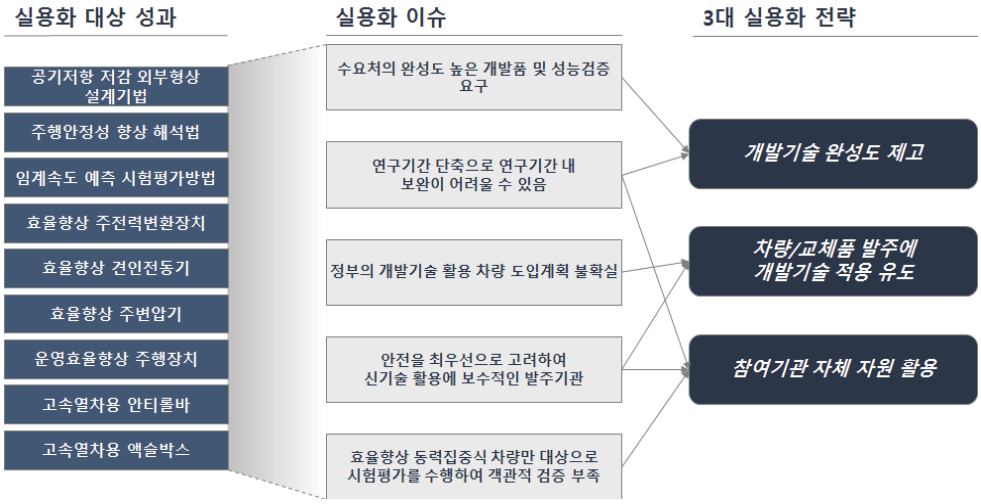
<R&D 과제 및 전략 도출 결과>

마. 고속열차 효율향상 핵심기술 실용화 전략 수립

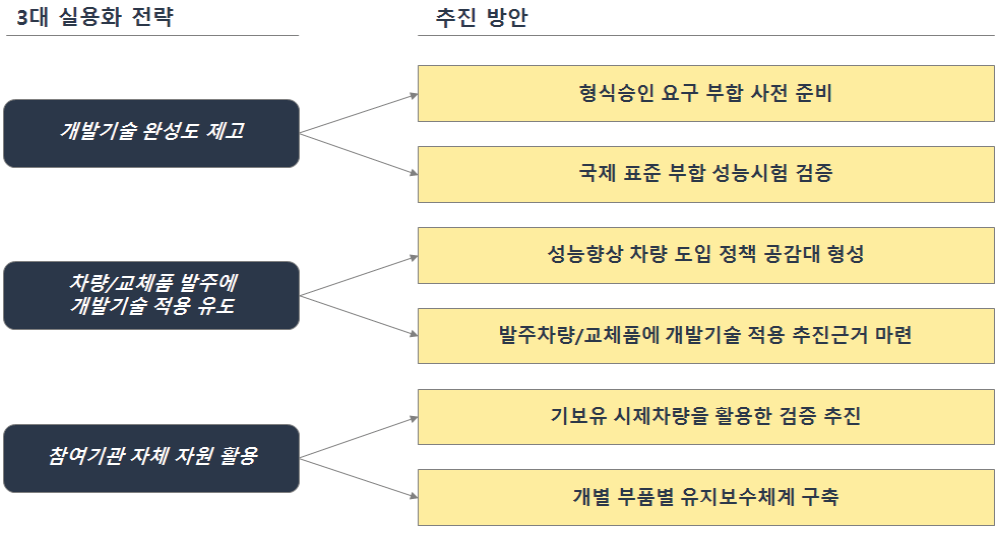
○ 국내 고속열차의 운영 효율 향상을 위하여 개발되고 있는 고속열차 효율 향상 핵심기술의 실용화를 위하여 요구되는 요건들을 조사, 분석하고, 이를 기반으로 실용화 추진전략 수립



<실용화 대상 성과 도출>



<3대 실용화 전략 도출>



<실용화 전략별 추진방안>

2. 사업의 총괄적 조정 및 일정관리

고속열차 효율 향상 핵심기술 개발 과제의 성공적인 연구성과 달성을 위하여 연구 수행 중 발생한 주요 이슈사항들과 인터페이스 사항들에 대한 내용 조정을 위한 착수회의 및 정기적 공정회의를 개최하고 중간보고회 및 현장점검 등을 수행함

가. 착수회의 개최

○ 각 차년도 연구 착수 후 각 기관별 당해연도 및 연차별 연구계획을 확인·조정하여 사업의 효율적인 추진이 되도록 착수회의 개최

연차	일시	장소
1차년도	2014.01.07(화) 15:00~18:00	한국철도기술연구원 중회의실
2차년도	2015.01.12(월) 15:00~18:00	한국철도기술연구원 5동 중회의실
3차년도	2015.10.30(금) 15:00~18:00	한국철도기술연구원 2동 1층 첨단교육장
4차년도	2016.10.28(금) 14:00~18:00	한국철도기술연구원 2동 1층 첨단교육장

나. 공정회의 개최

○ 기관별 당해연도 연구 진행현황 점검 및 향후계획을 협의하고 과제간 인터페이스 등 현안 사항을 논의하기 위하여 격월로 연구단 공정회의 개최

연차	회차	일시	장소
1차년도	1차공정회의	2014.3.18.	부산고속철도차량기지 LCP동 회의실
	2차공정회의	2015.5.30	철도연 5동 중회의실
	3차공정회의	2014.8.26	롯데부여리조트 은솔룸
	4차공정회의	2014.10.28	철도연 5동 중회의실
	5차공정회의	2014.11.27	철도연 5동 중회의실
2차년도	1차공정회의	2015.3.19.	철도연 5동 중회의실
	2차공정회의	2015.5.28.	현대로템 창원공장 세미나실
	3차공정회의	2015.8.20.	국제전기 회의실
	4차공정회의	2015.10.5.	철도연 2동 첨단교육장
3차년도	1차공정회의	2016.1.20.	현대로템 연구동 1층 세미나실
	2차공정회의	2016.4.1.	덕산리솜스파캐슬 2층 자스민홀
	3차공정회의	2016.6.9.	철도연 5동 중회의실
	4차공정회의	2016.8.19.	철도연 5동 중회의실
	5차공정회의	2016.9.30.	철도연 5동 중회의실
4차년도	1차공정회의	2017.1.13	철도연 5동 중회의실
	2차공정회의	2017.3.24	철도연 5동 중회의실
	3차공정회의	2017.5.18	부산역 2층 회의실
	4차공정회의	2017.8.16	철도연 5동 중회의실
	5차공정회의	2017.10.23	철도연 5동 중회의실


<2차년도 착수회의>


<4차년도 착수회의>


<연구단 공정회의>

다. 연구 성과보고회 개최

○ 성과별 연구 진행현황 및 추진계획에 대하여 철도운영기관을 포함한 외부전문가 자문 및 검토를 통해 과제 진행현황 자체점검 및 향후 추진방향을 설정하고자 1, 3차년도 중간보고회 개최

○ 철도운영기관, 학계 등 고속철도 관련 전문가를 대상으로 본 연구과제를 통하여 개발된 연구성과의 우수성을 홍보하고 관련 기관의 의견을 수렴하여 향후 실용화에 대비하고자 한국철도학회 춘계학술대회 특별세션을 활용하여 연구성과보고회 개최

연차	일시	장소
1차년도 중간보고회	2014.8.25	롯데부여리조트 은솔룸
3차년도 중간보고회	2016.3.31.	덕산리솜스파캐슬 2층 자스민홀
성과보고회	2017.5.19(금)	부산항국제여객터미널 컨벤션센터 한국철도학회 창립 20주년 춘계학술대회



<1차년도 중간보고회>



<3차년도 중간보고회>

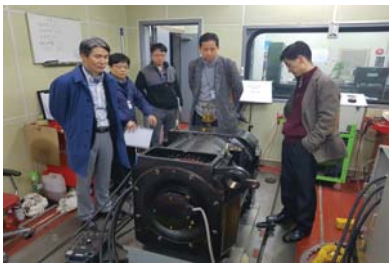


<연구성과보고회>

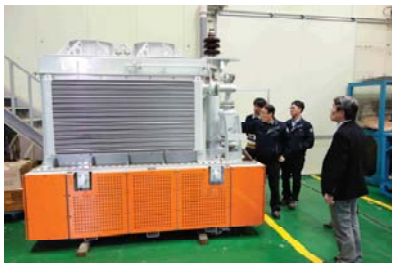
라. 현장점검

○ 고속열차 효율 향상 핵심기술 개발 과제의 효과적인 성과 달성을 위하여 세부과제별 핵심성과의 시제품 제작 현장을 방문하여 진행현황을 점검함

연차	날짜	장소	점검사항
2차년도	2015.8.21.	국제전기	주변압기 1차시제품 제작현황 점검
4차년도	2016.12.20.	현대로템㈜ 의왕연구소	견인전동기 1차시제품(개선) 온도상승시험
	2016.12.20.	태광기업㈜	주전력변환장치 Box 제작
	2016.12.20.	국제전기㈜	주변압기 2차시제품 제작완료 후 개선작업
	2016.12.20.	현우시스템 화성공장	액슬박스 및 안티롤바 1차시제품 제작 완료 현황
	2016.12.21.	현대로템㈜ 창원공장	대차프레임 ass'y 용접 및 교정작업







<핵심장치 시제품 제작현장 점검>

3. 과제간 상호역할 및 업무분담 조정・관리

과제 참여기관별 당해연도 공정보고회를 통하여 도출된 주요 기술적 이슈 사항들을 각 관계기관의 분야별 기술 담당자간 인터페이스 기술회의를 통하여 세부사항들을 상세히 조정・관리하는 활동 수행

가. 1차년도 과제간 상호역할 및 업무분담 조정・관리

○ 추진시스템 분야 총 4회 및 주행시스템 분야 총 3회의 인터페이스 기술회의 수행

○ 추진시스템 분야
- 목표속도 350 km/h를 위한 추진시스템 목표사양 정의
- 견인전동기: 1,250kW, 컨버터: 1,401kW, 인버터: 1,544kVA, 주변압기(2차권선용량): 7,080kVA, 치차비: 1.87
- 추진시스템 각 구성품별 개발사양에 대하여 정리 및 계산서 작성
- 기본설계 단계에서의 주요 구성부품 배치 및 해석 등 설계 수행 (TPS 시뮬레이션 등)

○ 주행시스템 분야
- 주행속도: 현행 300km/h에서 350km/h 이상
- 안정성: 동력차량 헌팅 임계속도 대비 20% 이상 향상(effective conicity 등 평가기준/절차는 연구과정에서 수립)
- 안전도: 350km/h 주행 시 철도안전법 및 유럽기준 만족
- 연구범위: 안정성(stability), 안전성(safety), 진동성능(vibration)
- 주행안정성 영향인자 분석 및 차륜/레일 마찰계수에 따른 임계속도 영향 분석

나. 2차년도 과제간 상호역할 및 업무분담 조정・관리

○ 추진시스템 분야 총 6회 및 주행시스템 분야 총 2회의 인터페이스 기술회의 수행

○ 추진시스템 분야
- 주전력변환장치 제동저항의 용량 선정 검토 및 기기배치 가능여부 검토
- 견인전동기 냉각용량 계산 검토 및 전기분야 해석 수행을 위한 파라미터 산정
- 주변압기 shell type의 장점 검토
- 실용화 방안 관련 개발품의 실차 설치시험 계획(대상 차량 등) 정립 필요
- 추진장치(주변압기, 주전력변환장치, 견인전동기)의 2층 고속열차 적용방안 검토
- 출력 1,210 kW (또는 1,250 kW)급의 2층 고속열차 적용 가능성 우선 검토

○ 주행시스템 분야
- 전동차 및 고속열차의 실선로 주행과 Roller Rig 주행 비교시험 수행
- 서울도시철도공사 8호선 열차 영업노선 주행데이터와 동종 대차인 표준전동차형 대차 Roller Rig 주행데이터 비교 (7월 Roller Rig 시험 예정)
- 서울 8호선 열차 영업선 주행시험 및 필요 데이터 확보 완료 (2015년 4월)
- KTX-산천과 유사한 G7 고속열차 경부고속선 시험데이터와 동종 대차인 G7 고속열차 동력객차용 단부대차 Roller Rig 주행데이터 비교 (8월 Roller Rig 시험 예정)
- 1차년도 측정된 자료 1, 2세부 공유(KTX-산천 진동측정 데이터, 주행거리에 따른 고속열차 차륜 답면 형상)
- 1세부 1차년도 KTX-산천 동력차 주행안정성 해석 보고서 2세부 송부
- 신규개발 대차 1, 2세부 주행안정성 해석 자료 상호 비교 및 개선 방안 협의

다. 3차년도 과제간 상호역할 및 업무분담 조정・관리

○ 추진시스템 분야 총 5회 및 주행시스템 분야 총 2회의 인터페이스 기술회의 수행

○ 추진시스템 분야
- 주요 구성품별 제작 진행 (수냉각스택, 제동저항기, 제어기 등)
- 파워 스택 제작시 IGBT의 내부 온도측정을 위한 센서 내장 타입으로 제작요청
- 주전력변환장치의 기구배치(안) 작성
- 수냉각시스템 적용에 따라 Fan type 및 제동저항의 구조 변경이 필요
- Core type에서 Shell type으로 변경하여 모든 권선의 절연 설계(추가 보완 검토)
- 차량의 가선전압 운영환경(30kV)를 고려하여 뇌임펄스 시험기준을 150 kV에서 170 kV으로 상향
- 가선전압이 30kV를 초과할 경우 견딜 수 있도록 절연설계 상향
- 과전압에 의한 포화현상 개선(철심설계 개선 및 돌입전류 최소화 설계)

○ 주행시스템 분야
- 안티롤바 취부위치 검토
- 초기 설정하였던 안티롤바 취부 위치는 해석상 피로 파괴 예상되어 취부 위치 변경 필요
- 안티롤바 강성 재계산 및 취부위치 변경에 따른 설계 검토
- 철도연 동특성 재해석 시 안티롤바 강성 변경값 적용
- 액슬박스 취부위치 검토
- 인터페이스 확인용 액슬박스 도면 제공(현우 → 로템)
- 피로 강도 검토(현우) : 살사브라켓 하중 고려
- 살사브라켓 모델 제공 → 해석조건 포함, 검토서 송부

라. 4차년도 과제간 상호역할 및 업무분담 조정・관리

○ 추진시스템 분야 총 6회 및 주행시스템 분야 총 2회의 인터페이스 기술회의 수행

○ 추진시스템 분야
- 주전력변환장치 및 견인전동기에 대한 구성품 시험과 조합시험에 대한 방법검토
- 공인시험은 구성품의 경우 4월 말, 조합시험은 8월 중순 예상
- 추진장치 조합시험 설비 사전확인 진행
- 비용 산정을 위한 각 구성품 시험절차서와 조합시험 절차서 작성
- 스위칭소자 IGBT 특성확인 시험 수행
- 견인전동기 조합시험을 위한 테스트 베드제작방안 협의
- 견인전동기와 부하모터간 커플링(연결기) 제작
- 구성품 공인시험 및 조합시험 상세일정 협의
- 주변압기 권선부의 유속을 증가시키기 위한 주요 방안 검토
- 분배판 추가에 따른 유동해석결과 확인

○ 주행시스템 분야
- 안티롤바 취부위치 검토
- 초기 설정하였던 안티롤바 취부 위치는 해석상 피로 파괴 예상되어 취부 위치 변경

제 4 장 목표 달성도 및 관련분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 연구개발성과 및 평가 방법

(1) 1차년도

	세세부과제 (공동과제)명 (연구목표, 분야)		성과목표	최종 성능 목표	1차년도 성과검증 기준					가중치	달성 평점 (평점 1~5)
					성과지표	목표수준		측정방법	검증 방법		
						목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1 고속열차 성능 및 효율 향상 핵심기술 개발	1-1	고속 주행안정성 향상 기술방안 수립	고속 주행안정성 향상 기술방안 수립	① 고속 주행안정성 향상 방안	1건	1건	해석보고서	문서	4	
					② 고속 주행안정성 시험평가 기준	1건	1건	시험평가기준서	문서	2	
		1-2	신개념 전두부 기본설계 및 공기저항 저감 기술 검토	신개념 전두부 기본설계 및 공기저항 저감 기술 검토	① 신개념 전두부 기본형상	1건	1건	기본전두부형상 3차원 렌더링	문서	5	
					② 기본형상 공력특성 해석 및 시험	해석 및 시험건수 2건	2건	보고서 / 시험사진 등	문서	5	
					③ 고속열차 열환경 분석	분석건수 1건	1건	보고서 / 분석결과	문서	4	
	종합점수(100점) = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)									20	20점 만점

	사업연계지표	목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율 (%)	가중치	달성 평점
양적 지표 점검		특허출원	2	5			100	35	
		논문 게재 및 발표	3	15			100	35	
		연구장비 개량 및 구축건수	2	2			100	30	
	종합점수(100점) = ∑ (성과별달성율×가중치)							100	100점 만점

	세세부과제 (공동과제)명 (연구목표, 분야)		성과목표	최종 성능 목표	1차년도 성과검증 기준					가중치	달성 평점 (평점 1~5)
					성과지표	목표수준		측정방법	검증 방법		
						목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	2 고속열차 효율향상 차량모듈 기술개발	2-1	해외사례조사	해외사례조사	① 주행장치 해외사례조사	1식	1식	기술 자료 수집 결과	문서	1	
					② 주변압기 해외사례 및 기술자료 수집	1식	1식	기술 자료 수집 결과	문서	1	
		2-2	부품 사양 검토	부품 사양 검토	① 주행장치 사양 검토	1식	1식	주행장치 사양서	문서	1	
					② 모터블럭 주요사양 검토	1식	1식	사양 검토 결과	문서	1	
					③ 견인전동기 주요사양 검토	1식	1식	사양 검토 결과	문서	1	
					④ 주변압기 주요사양 검토	1식	1식	사양 검토 결과	문서	1	
					⑤ 액슬박스/안티롤바 사양 검토	1식	1식	사양 검토 결과	문서	1	
		2-3	기본설계	기본설계	① 주행장치 기본설계	1식	1식	기본설계 도면	문서	2	
					② 모터블럭 IGBT 스택 기본설계	1식	1식	기본설계 도면	문서	2	
					③ 견인전동기 기본설계	1식	1식	기본설계 도면	문서	1	
					④ 주변압기 전기/구조 도면 설계	1식	1식	전기/구조 도면	문서	2	
					⑤ 액슬박스/안티롤바 기본설계	1식	1식	기본설계 도면	문서	1	
		2-4	해석 수행	해석 수행	① 주행장치 동특성 해석	1식	1식	해석결과 보고	문서	2	
					② 주변압기 3D 모델링 및 해석	1식	1식	모델링 및 해석결과	문서	2	
					③ 액슬박스/안티롤바기본설계 결과해석수행	1식	1식	해석결과 보고	문서	1	
	종합점수(100점) = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)									20	20점 만점

	사업연계지표	목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율 (%)	가중치	달성 평점
양적 지표 점검		논문 발표	1	4			100	100	
	종합점수(100점) = ∑ (성과별달성율×가중치)							100	100점 만점

(2) 2차년도

성과질적목표점검	세세부과제(공동과제)명(연구목표, 분야)		성과목표	최종성능목표	2차년도 성과검증 기준					가중치	달성평점(평점 1~5)
					성과지표	목표수준		측정방법	검증방법		
						목표치	달성치				
	1 고속열차 성능 및 효율 향상 핵심기술 개발	1-1	고속 주행 안정성 향상기술 설계적용 및 평가 기준 수립	고속 주행 안정성 향상기술 설계적용 및 평가 기준 수립	① 실용적 주행안정성 향상 방법	1식	1식	해석보고서	문서	4	
					② Roller Rig 주행안정성 시험평가 기준	1식	1식	시험평가기준서	문서	2	
		1-2	신개념 전두부 최적설계 및 공기저항 저감 기술 개발	신개념 전두부 최적설계 및 공기저항 저감 기술 개발	① 신개념 전두부 형상의 축방향 면적변화 최적설계 시험	1식	1식	시험결과 보고서	문서	3	
					② 신개념 최적전두부 형상	1식	1식	최적전두부 3차원 렌더링	문서	3	
					③						
	Σ										
	Σ										

	Σ										
	Σ										

(3) 3차년도

	세세부과제 (공동과제)명 (연구목표, 분야)		성과목표		최종 성능 목표	3차년도 성과검증 기준						가중치	달성평점 (평점 1~5)
						성과지표		목표수준		측정방법	검증방법		
								목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1 고속열차 성능 및 효율 향상 핵심기술 개발	1-1	고속 주행 안정성 향상 기술 해석적 검증	고속 주행 안정성 향상 기술 해석적 검증	①	주행장치 최적안 이론적 임계속도 해석	기존 열차 대비 20% 향상	KTX-산천 동력대차 대비 21.2% 향상	해석보고서	문서	4		
					②	기존 주행장치 Roller Rig 주행 안정성 시험평가	1식	1식	시험보고서	문서	4		
		1-2	공 력 성 능 향 상 기 술 설계 보완 및 시험 검증	공 력 성 능 향 상 기 술 설계 보완 및 시험 검증	①	신개념 최적설계 편성열차 형상	1식	1식	3차원 모델링	문서	4		
					②	편성열차 공력성능 해석 및 시험	1식	1식	보고서 / 시험사진 등	문서	4		
					③	편성열차 공력성능 평가	공기저항계수 CD=0.83 이하	공기저항계수 CD=0.63	풍동시험결과/ 공기저항계수 (6량 1편성)	문서	4		
	종합점수(100점) = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)											20	20점 만점

	사업연계지표	목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율 (%)	가중치	달성 평점
양적 지표 점검		특허출원	2	4			100	30	
		특허등록	1	5			100	20	
		논문 게재	1	4			100	25	
		논문 발표	4	9			100	25	
	종합점수(100점) = ∑ (성과별달성율×가중치)							100	100점 만점

	세세부과제 (공동과제)명 (연구목표, 분야)		성과목표 최종 성능 목표	3차년도 성과검증 기준						가중치	달성 평점 (평점 1~5)
				성과지표		목표수준		측정방법	검증방법		
						목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	2 고속열차 효율향상 차량모듈 기술개발	2-1	주행장치 상세설계 및 핵심단위 부품 제작	①	주행장치 상세설계	1식	1식	상세설계	문서	2	
				②	주행장치 핵심부품/구성품 제작	1식	1식	구성품	실물	1	
				③	주행장치 핵심부품/구성품 시험	1식	1식	시험보고서	문서	1	
		2-2	주전력 변환장치 상세설계 및 구성품 제작	①	주전력변환장치 상세설계	1식	1식	상세설계	문서	1	
				②	주전력변환장치 구성품 제작	1식	1식	보고서	문서	1	
				③	컨버터/인버터 IGBT 스택 설계/제작	1식	1식	시제품	실물	1	
				④	컨버터/인버터 IGBT 스택 성능시험	1식	1식	시험보고서	문서	1	
		2-3	견인전동기 시제품 제작	①	견인전동기 상세설계	1식	1식	상세설계	문서	1	
				②	견인전동기 1차시제품 제작	1SET	1SET	시제품	실물	1	
				③	견인전동기 1차시제품 성능시험	1식	1식	시험보고서	문서	1	
				④	견인전동기 2차시제품 제작	1식	1식	시제품	실물	1	
		2-4	주변압기 형식시험 및 2차시제품 제작	①	주변압기 1차시제품 형식시험	1식	1식	시험보고서	문서	1	
				②	주변압기 2차시제품 제작	1SET	1SET	시제품	실물	2	
				③	주변압기 RAMS 분석	1식	1식	보고서	문서	1	
		2-5	안티롤바 및 액슬박스 1차시제품 제작 및 시험	①	안티롤바/액슬박스 상세설계	1식	1식	상세설계	문서	1	
				②	안티롤바 1차시제품 제작	1SET	1SET	시제품	실물	1	
				③	경량 액슬박스 1차시제품 제작	1SET	1SET	시제품	실물	1	
				④	안티롤바/액슬박스 1차시제품 시험	1식	1식	시험보고서	문서	1	
	종합점수(100점) = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)									20	20점 만점

	사업연계지표	목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율 (%)	가중치	달성 평점
양적 지표 점검		특허 출원	3	4			100	30	
		시제품 제작	4	4			100	50	
		논문 발표	4	4			100	20	
	종합점수(100점) = ∑ (성과별달성율×가중치)							100	100점 만점

(4) 4차년도

	세세부과제 (공동과제)명 (연구목표, 분야)		성과목표		최종 성능 목표	4차년도 성과검증 기준						가중치	달성평점 (평점 1~5)
						성과지표		목표수준		측정방법	검증방법		
								목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1 고속열차 성능 및 효율 향상 핵심기술 개발	1-1	고속 주행 안정성 성능시험 및 평가	1-1	고속 주행 안정성 성능시험 및 평가	①	주행장치 최적안 해석결과 실험적 보완 및 검증	1식	1식	해석보고서	문서	7	
						②	Roller Rig 주행안정성 성능실험	1식	1식	대차동특성 주행시험기를 통한 시험 및 분석보고서	문서	10	
		1-2	종합시스템 엔지니어링 및 사업총괄	1-2	종합시스템 엔지니어링 및 사업총괄	①	추진성능 시험 및 분석	1식	1식	추진시스템 성능시험 보고서	문서	3	
	종합점수(100점) = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)											20	20점 만점

	사업연계지표	목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율 (%)	가중치	달성 평점
양적 지표 점검		특허등록	1	3			100	50	
		논문 게재	2	2			100	50	
	종합점수(100점) = ∑ (성과별달성율×가중치)							100	100점 만점

	세세부과제 (공동과제)명 (연구목표, 분야)	성과목표 최종 성능 목표		4차년도 성과검증 기준						가중치	달성 평점 (평점 1~5)
				성과지표		목표수준		측정방법	검증방법		
						목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	2 고속열차 효율향상 차량모듈 기술개발	2-1	주행장치 시제품 제작 및 Roller Rig 시험	①	주행장치 상세설계 및 핵심부품/구성품 제작	1식	1식	보고서	문서	2	
				②	주행장치 시제품 제작	1SET	1SET	시제품	실물	3	
				③	완성대차 Roller Rig 시험	385km/h까지 시험	385km/h까지 시험	시험성적서	문서	3	
		2-2	주전력변환장치 시제품 제작 및 시험	①	주전력변환장치 시제품 제작	1SET	1SET	시제품	실물	2	
				②	주전력변환장치 형식시험	1식	1식	시험보고서	문서	1	
		2-3	견인전동기 2차시제품 제작 및 시험	①	견인전동기 2차시제품 제작	1SET	1SET	시제품	실물	2	
				②	견인전동기 2차시제품 형식시험	1식	1식	시험보고서	문서	1	
		2-4	추진시스템 조합시험	①	추진시스템 조합시험	350km/h까지 시험	350km/h까지 시험	시험성적서	문서	2	
		2-5	주변압기 2차시제품 시험	①	주변압기 2차시제품 형식시험	1식	1식	시험보고서	문서	1	
		2-6	안티롤바 및 액슬박스 2차시제품 제작 및 시험	①	안티롤바 2차시제품 제작	1SET	1SET	시제품	실물	1	
				②	경량 액슬박스 2차시제품 제작	1SET	1SET	시제품	실물	1	
				③	안티롤바/액슬박스 2차시제품 형식시험	1식	1식	시험보고서	문서	1	
	종합점수(100점) = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)									20	20점 만점

	사업연계지표	목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율 (%)	가중치	달성 평점
양적 지표 점검		특허 출원	4	4			100	25	
		특허 등록	1	6			100	15	
		시제품 제작	5	5			100	60	
	종합점수(100점) = ∑ (성과별달성율×가중치)							100	100점 만점

나. 정량적 연구성과 목표 및 달성도

구분			목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI		-	2 (초과 달성)	
	비SCI		-	-	
	계		-	2 (초과 달성)	
국내 논문 게재	SCI		-	-	
	비SCI		5	9 (180%)	
	계		5	9 (180%)	
학술회의 발표	국내		21	44 (210%)	
	국외		-	6 (초과 달성)	
	계		21	50 (238%)	
특허 출원	국내		17	23 (135%)	
	국외		-	2 (초과 달성)	
	계		17	25 (147%)	
특허 등록	국내		4	17 (425%)	
	국외		-	-	
	계		4	17 (425%)	
인력 양성	석사		-	1 (초과 달성)	
	박사		-	1 (초과 달성)	
	계		-	2 (초과 달성)	
기술 이전	계약 건수		-	-	
	계약액		-	-	
	징수액		-	-	
국제 표준화	기고서 제출		-	-	
	기고서 채택		-	-	
	표준안 채택		-	-	
국내 표준화	기고서 제출		-	-	
	기고서 채택		-	-	
	표준안 채택		-	-	
등록 · 기탁 대상 성과물	보고서 원문		-	-	
	연구시설 · 장비		-	-	
	기술요약정보		-	-	
	생명자원	생명정보	-	-	
		생물자원	-	-	
		신품종	-	-	
	소프트웨어		-	-	
	화학물		-	-	
기타	시제품		11	11 (100%)	
	성과 홍보		-	-	
	일자리 창출		-	-	

다. 성과 목표에 대한 자체 평가

성과 목표	자체 평가
■ 고속열차 공력성능 향상 기술개발	■ 본 과제에서 개발된 최적설계 프로세스를 통해 전두부 다목적 최적설계를 수행하고, 다양한 공기저항 저감기술을 적용하여 최적설계 편성열차 형상을 개발함 ■ 전산해석 및 풍동시험을 통해 최적설계 편성열차의 공기저항 저감 효과를 시험검증하여 최적설계 기법 및 공기저항 저감 기술의 유용성을 확인하였음. 도출된 최적형상의 KTX-산천 대비 공기저항 저감율은 약 16~18%로 당초 계획된 공기저항 8% 저감 목표를 초과 달성하였음 ■ 적용된 각 기법에 대하여 차량제작 및 적용방법 등에 따른 공기저항 저감효과를 제시함으로써 향후 고속열차 차량설계 가이드로 활용되어 고속주행시 에너지 효율의 극대화를 통하여 소비전력 절감 및 운영속도 향상을 이룰 수 있을 것임
■ 고속열차 주행안정성 향상 기술개발	■ KTX-산천 차량의 현재 상태를 정확히 파악하기 위하여 운영기관인 한국철도공사와 유기적인 협조하에 차륜마모상태 및 차량 진동가속도 수준을 계측하는 등 연구개발의 성공을 위해 관계기관과 꾸준히 협력하여 연구를 진행하였음. 이는 실제 상황에서 애로 사항과 문제점을 해결하여 연구개발 성과를 실용화시키는 시기를 앞당기고자 하는 노력의 일환임 ■ 2세부 과제에서 제안한 신규개발 1차 설계안에 대해 1세부 과제에서 해석적 검토를 통해 수정사항을 도출하고, 2세부 과제와 협업을 통해 2차 설계안을 작성하는 등 연구단 내 유기적인 관계를 통해 우수한 연구결과 도출 노력을 경주하였음 ■ 신규개발 동력대차 2차 설계안에 대한 임계속도 해석 결과 기존 KTX-산천 동력대차 대비 21.2% 정도 향상되는 예측 결과를 보여 임계속도 20%라는 목표를 달성하였음 ■ 임계속도가 대차동특성 시험기 최고 속도를 초과할 경우 적용할 수 있는 등가감쇠비를 이용한 임계속도 예측 방법(2차년도 개발)에 대하여 동력대차 Roller Rig 시험을 통해 개발된 방법의 타당성을 입증함

성과 목표	자체 평가
■ 고속열차 효율향상 추진시스템 기술개발	■ 주변압기, 주전력변환장치, 견인전동기로 구성되는 효율 향상 추진 시스템은 기존 KTX-산천 차량의 가속성능 향상 및 최대속도 도달 시간 단축을 위해 KTX-산천과 동일 치수 및 중량 대비 추진 시스템 출력의 약 10% 이상 향상을 목표로 하고 있으며, 기존 제품의 치수 및 중량 내에서 성능향상을 달성함으로써 에너지 절감 및 운영 효율성을 도모하고 있음 ■ 주전력변환장치는 기존 고속열차 모터블럭의 1C2M 제어방식에서 1C1M 개별제어방식을 적용하여 유지보수성 개선 및 시스템 운영 효율 향상을 도모하고 있음. 또한 히트파이프를 이용한 강제 송풍 냉각방식을 이용한 기존 고속열차의 냉각방식에서 냉각 성능 향상을 위하여 수냉각시스템을 적용함 ■ 주변압기는 권선 및 적층 구조를 기존 고속열차의 Core Type에서 Shell Type으로 변경하고 기존 대비 냉각효과가 우수한 코일 분할 적층으로 기존 KTX-산천 고속열차 주변압기와 호환성(차량 인터페이스 및 동일 치수)을 유지하면서도 주변압기 용량을 14% 증가시킬 수 있었음. 또한 고조파 차폐철판을 적용하여 노이즈를 저감하였으며 냉각시스템 용량 또한 13% 향상시킴으로써 안정적인 추진시스템 전원 공급을 도모하였음
■ 운영효율향상 고속열차 주행장치 기술개발	■ 주행장치는 현가장치 최적화 기술을 적용하여 운영효율이 향상된 주행장치 개발을 목표로 하고 있으며 개발되는 주행장치는 KTX-산천 주행장치와 호환가능하면서 주행장치 주행 속도 증가가 가능하여 열차 운행시간/수송시격 단축을 도모할 수 있음. 또한 차축 베어링 과열 방지 모니터링에 의한 실시간 안전 진단이 가능하고 차량 주행안정성 향상 및 진동 저감으로 승차감 및 승객만족도가 향상되며, 곡선추종성 향상으로 차량유지보수비를 절감할 수 있음. 액슬박스 등 주행장치 부품의 경량화를 통하여 기존 주행장치의 형상 내에서의 부품 경량화를 통한 에너지 절감을 도모하고 있음

2. 관련분야 기여도

○ 사회·기술적 기대효과

- 세계 고속철도 시장(연간 61조 예상)을 선점할 수 있는 고속철도 기술보유국으로 국가브랜드 가치 확보 및 고속철도의 국제 경쟁력 대폭적 향상으로 고속철도 기술의 세계진출에 활용

- 동력집중식 고속열차의 성능을 개선하는 유일의 R&D 과제로 경부선 KTX-산천 및 '15년 개통된 호남선 KTX-호남 등 기존 동력집중식 고속열차 대체수요 및 신규수요 대응을 통한 국내 고속열차 서비스 향상에 기여

- 국내 고속열차 개통 후 반수명 검사주기 등을 고려하여 성능 업그레이드를 위한 핵심기술 확보

○ 경제적 기대효과

- 고속철도 속도향상에 따른 전국 주요거점의 신속한 연결로 이동시간 단축 등 국민편익 증진
  · 운영속도 향상, 진동/승차감 악화 억제, 안전성 유지, 에너지 효율화로 공공편익 발생
  · 국내 고속철도 운영속도 향상에 따른 이용객 시간 절감, 타 교통수단 이용자 전환으로 인한 241.6억원의 비용절감편익 발생

- 철도 운영기관 편익 : 24.6억원
  · 운영속도 향상에 따른 철도이용객수 증가로 인한 추가 매출
  · 에너지 효율향상으로 인한 운영비용 절감 등

- 산업체 매출 편익 : 62.2억원
  · 운영속도 350km/h 운행을 위한 핵심기술의 선진국 수준 역량 확보로 국내외 350km/h급 고속철도 시장 진출이 가능하며, 해당 부품/기술 매출 편익 발생

제 5 장 연구개발성과의 활용계획

○ 고속열차의 성능 및 효율향상 핵심기술 개발은 격화되고 있는 고속철도 시장의 기술 경쟁력을 향상시키고, 철도강국으로의 이미지 강화를 위해 추진되는 것임. 국내 고유브랜드인 KTX-산천 및 HEMU-430X에 핵심기술 접목과 고도화로 단기간에 적은 예산으로 타 선진국보다 한 걸음 앞서간다는 전략임. 본 과제의 연구성과에 대한 활용방안을 정리하면 다음과 같음

- 세계 고속철도 시장(연간 61조 예상)을 선점할 수 있는 고속철도 기술보유국으로의 국가브랜드 가치 확보 및 고속철도의 국제 경쟁력 대폭적 향상으로 고속철도 기술의 세계진출에 활용
- 고유가 및 저탄소 교통 체계 전환 대비 교통 체계의 적응력이 강화되고 차세대 친환경 에너지를 이용한 저비용 고효율의 초고속 교통 체계가 구축되어 온실가스 배출 규제 및 원유자원의 고갈에 따른 국가적 교통 대응 능력 확보에 활용
- 고속열차의 성능을 한 단계 격상하는 핵심기술을 계기로 고속철도의 설계, 시공 및 성능평가 기술 등 철도시스템의 기술력을 확보하여 향후 차량-건설인프라의 패키지 사업화시 유리한 국외진출환경을 조성함

○ 국내·외 시장규모 및 전망

- 국내 고속열차(KTX) 개통 13년을 고려하여 향후 성능 업그레이드를 위한 핵심기술의 개발 필요
- 세계 고속철도 시장의 확대 대응
  · 환경, 에너지 문제 해소를 위한 철도중심 Modal Shift
  · 철도시장은 연간 4.5% 성장, 2015년 250조 거대시장 형성 예상
  · 세계 고속열차 신규 차량조달 '11년 약 8조원(연간 4.9% 성장 전망) 판매후 시장 '11년 약 4조원(연간 9.7% 성장 전망)
- 고속철도 기술보유국간 운영효율성 향상을 위한 기술개발 노력 경주중
  · 고속철도 최고 운영속도: 일본 320 km/h, 프랑스 320 km/h, 중국 350 km/h, 대한민국 300 km/h

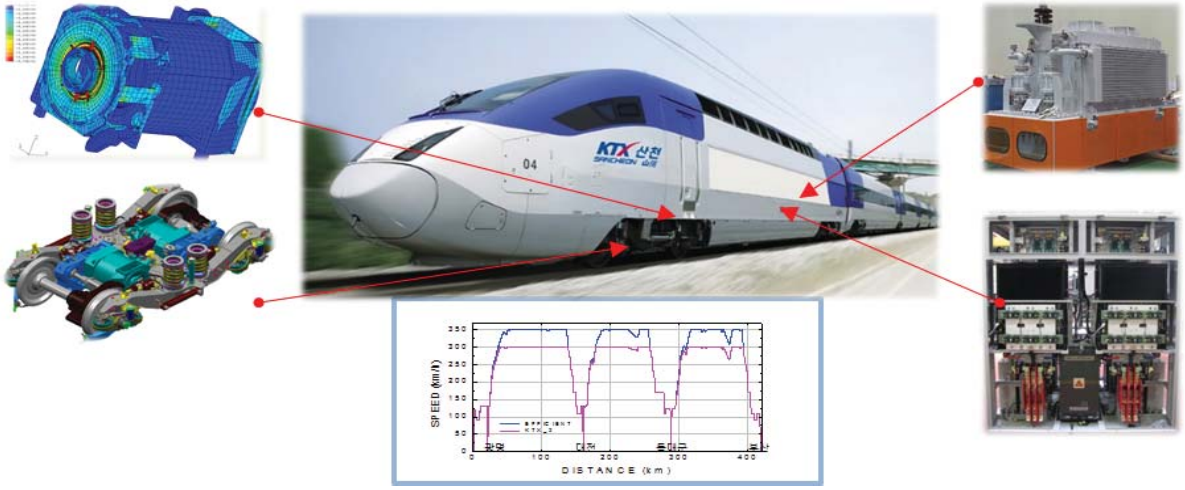
○ 예상수요처

- 한국철도공사 등 국내 고속철도 운영기관의 신규 및 추가 물량 발생시 개발 기술 적용
  · 고속철도 신규 노선 동력집중식 차량(KTX-산천) 신규 물량
  · 고속철도 기존 노선 동력집중식 차량(KTX-산천) 추가 물량
- KTX 시리즈에 개발 기술을 적용하여 300km/h 이상의 동력집중식 고속열차 시장의 해외 수주 대응



[신규 효율향상 동력집중식 고속열차]

- 경부고속선 및 호남고속선의 운행속도 증가 필요시 KTX-산천 Upgrade를 통한 개발기술 실용화
- 기존 적용품과 호환성 유지하에 성능 향상으로 KTX-산천 노후화에 따른 핵심장치의 유지보수품 또는 대체 수요 발생시 성능 향상 제품 적용 가능



[개발 기술 적용 KTX-산천 Upgrade]

- 개발 기술(공력성능 향상기술, 주행안정성 향상 기술)은 동력분산식 고속열차(HEMU-430X, EMU-250 등)의 성능 개선 적용 가능



[EMU-250]



[HEMU-430X]

○ 개발 기술의 성과 홍보 및 실용화 추진 계획

- 고속철도 운영기관 및 관련 유관기관의 개발 기술 성과 홍보
  · 한국철도공사 등 고속철도 운영기관에 공력성능 향상 기술 및 주행안정성 향상기술 등 개발 기술의 성과 홍보를 위하여 연구과제 수행 기간 중 연구성과보고회(201.4.8.25, 2016.3.31., 2017.5.19.)를 개최하여 연구성과를 홍보하고 관련 기관의 의견을 수렴하여 연구에 반영하였음
  · 고속열차 대차페어링 기술 중소기업 이전이 요청되었고(2016.04.12., ㈜ 카템), 창원과학기술진흥원 주관 미래철도기술 사업화진행사업이 추진 완료됨(2016.12)
  · 한국철도공사 직원을 대상으로 고속열차 대차페어링 기술 실용화를 위한 기술설명회를 개최하였음(2017.04.27., 철도공사)
  · 향후 정부, 철도운영기관, 학계 등 관련 기관에 대하여 개발 기술이 실용화 될 수 있도록 지속적으로 기술설명회 등을 개최하여 개발 기술의 우수성을 홍보하고 실용화 추진을 위한 최선의 노력을 하겠음

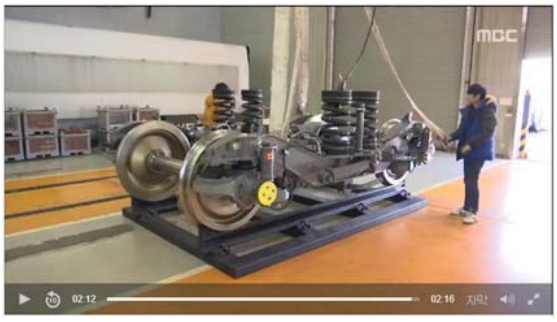


<연구성과 중간보고회>



<연구성과보고회(철도학회 특별세션)>

- 언론 홍보
  · 효율향상 핵심장치 시제품(주행장치, 추진시스템 등) 및 관련 기술의 연구성과에 대하여 TV 및 신문 등 언론매체를 통한 홍보를 하였으며, 향후 성과의 실용화 구체화시 언론 보도를 통하여 개발 기술의 성과가 홍보될 수 있도록 하겠음



<MBC 뉴스(2017.12.3.)>



<중앙일보 등 주요일간지 보도(2017.11.23)>

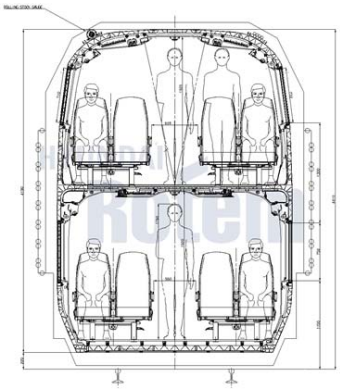
- 2층고속열차 개발 기술 적용 추진
  · 국내 2층 고속열차 도입 계획
    한국철도공사에서는 서울-오송 구간의 통근형 고속열차로 2018년 이후 2층 고속열차 발주를 계획하고 있음. 이에 대응할 수 있도록 현대로템에서는 자체적으로 2층 고속열차 2량을 개발 중이며, 개발된 2층 객차 2량은 HEMU-430X와 편성조합하여 본선시운전을 포함한 성능 검증을 추진 중에 있음

· 개발 기술 2층 고속열차 적용 가능성 검토

2층 고속열차의 편성구성은 8량/편성(PC1 + 2층객차 6량 + PC2 구성)으로 동력집중식임. 승객수 증가로 기존 KTX-산천 대비 차량의 편성 중량이 증가하여 300km/h로 주행하기 위해서는 추진시스템의 용량 증대 및 주행장치 개발이 필요함. 필요한 견인전동기 용량은 최대 약 1,250kW로 예상되며, 본 과제에서 개발하는 견인전동기 1,210kW 대비 1,250kW로 용량을 다소 향상시키면 2층 고속열차에 추진시스템 및 주행장치 개발품, 공력성능 향상기술을 적용 가능함

· 2층 고속열차 개발 기술 적용 추진

한국철도공사에서 2층 고속열차 도입이 결정되는 경우, 관련기관과의 협의를 통하여 설계에 개발 기술이 반영될 수 있도록 추진 예정임



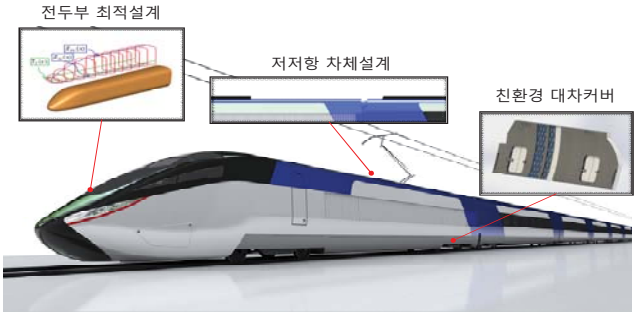
<2층 고속열차 차량 단면도>



<이층고속열차 개념도>

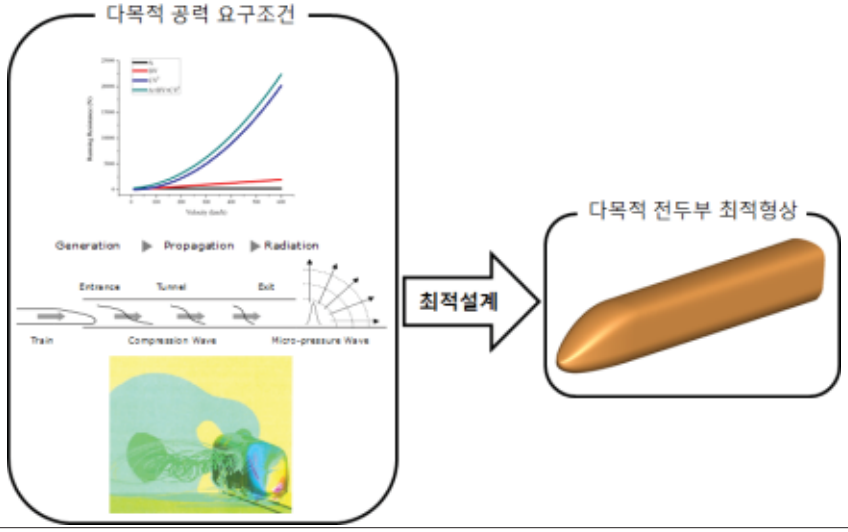
제 6 장 연구개발과제의 대표적 연구 실적

1. 공기저항 저감기술 (공법 · 기법)

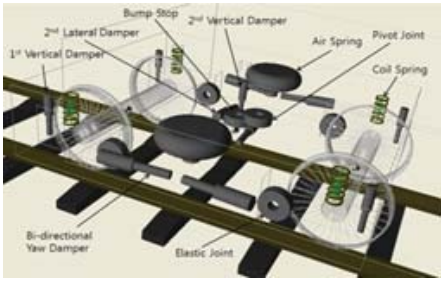
<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6"> 

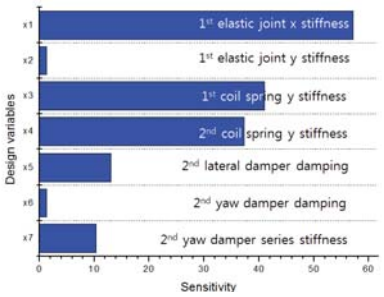
공기저항 저감형 고속열차</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="6">공기역학기반의 고속열차 전두부 공력최적설계 프로세스를 개발하고 해당 프로세스를 이용하여 KTX-산천 전두부에 대한 신개념 전두부 형상을 도출함. 또한 KTX-산천 열환경 및 유지보수성을 고려한 동력차 차체 및 친환경 대차커버와 페어링 개발을 통해 공기저항 저감형 고속열차 신모델을 제시함</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">고속열차의 공기저항은 전체 주행저항의 약 80% 이상을 차지함. 따라서, 고속주행 성능을 효과적으로 향상하기 위해서는 공기저항 저감기술이 필수적임. 특히, 고속열차의 전두부는 고속열차의 고유성과 공력설계 기술수준을 대변하는 중요한 형상요소임. 차체구조 역시 공기저항 및 공력소음 등에 매우 큰 영향을 미침. 따라서, 고속열차의 공기저항 저감기술은 고속열차의 고속성 및 친환경성을 동시에 실현할 수 있는 핵심기술임</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 적</td><td colspan="6">신개념 전두부 공력최적설계 프로세스를 통해 우리나라의 고속열차 공력설계기술을 한단계 업그레이드 하고, 차체의 공기저항을 최소화함으로써 고속주행 에너지효율을 극대화함. 이를 통해, 우리나라의 고속열차 설계 수준을 세계 최고수준으로 끌어올리고자 함</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준) KTX-산천 공기저항계수 0.96(10량 1편성 기준)
(개발기술 수준) KTX-산천 공기저항 8% 저감
(개발기술 수준 설정근거) 기 수행된 전산해석 연구결과를 근거로 설정하였음</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">박춘수 (한국철도기술연구원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'13.12. ~'16.10.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">핵심성과</td><td>양적성과</td><td>차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>출원 6건
등록 3건</td><td></td><td>4건</td><td>1건</td><td></td></tr>
<tr><td>질적성과</td><td>차년도</td><td colspan="5">- 신개념 최적설계 편성열차 형상
- 편성열차 공력성능 해석 및 시험
- 편성열차 공력성능평가(풍동시험)
・공기저항계수 CD=0.83 이하(6량 1편성 기준)</td></tr>
<tr><td>달성 확인방법</td><td>차년도</td><td colspan="5">풍동시험결과 및 전산해석 결과를 상호보완하여 달성 여부 확인</td></tr>
</table>

2. 다목적 전두부 형상 최적설계 프로세스 (공법 · 기법)

관련 그림 / 사진	
정의(설명)	다목적 공력 요구조건을 만족시키는 전두부 형상 최적설계 프로세스
설정사유	고속열차의 전두부는 고속열차의 고유성과 공력설계 기술수준을 대변하는 중요한 형상요소이고 운영효율 향상을 위해 효과적인 고속주행 공력성능 향상 방법임
목 적	다양한 공력 요구조건을 만족시켜 운영 효율을 향상시키는 전두부 형상의 최적설계가 필요하고 전두부 다목적 공력최적설계 프로세스를 통해 우리나라의 고속열차 공력설계 기술을 업그레이드할 수 있음
성능목표	(기존기술 수준) 국내에는 다목적의 공력기반 전두부 형상 설계기술이 없음 (개발기술 수준) 공기역학 기반의 전두부 다목적 최적설계 프로세스 개발 및 최적형상 도출 (개발기술 수준 설정근거) 항공분야의 최신기술을 접목하여 고속열차 공력설계 분야를 선도하고자 함
성과달성 책임자 (소속기관)	

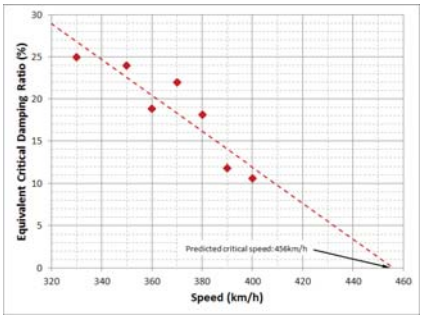
3. 주행안정성 향상 해석기술 (공법 · 기법)

<table>
<tr><td>관련 그림 / 사진</td><td colspan="6"> 

[주행안정성 해석용 대차 모델]


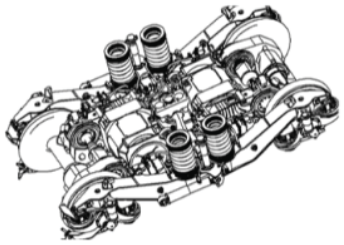
[현가장치 민감도 분석 결과]</td></tr>
<tr><td>정의(설명)</td><td colspan="6">· 고속열차 주행안정성을 향상시킬 수 있는 동특성 해석 기술
· 해석 모델의 생성, 현가장치 특성치 민감도 분석 및 최적화를 통한 주행안정성 향상 방안 확보를 위한 핵심기술임</td></tr>
<tr><td>설정사유</td><td colspan="6">· KTX-산천의 주행안정성의 현재 상태를 분석하고, 이를 개선할 수 있는 방안을 제시하고자 함
· KTX-산천의 운영속도를 350km/h까지 상승시키는데 필요한 신규 개발 주행장치의 설계 파라미터의 방향을 해석을 통해 설정하고, 현가장치 최적화를 통한 속도 향상</td></tr>
<tr><td>목 적</td><td colspan="6">· (기술적) 주행속도 350km/h를 달성하기 위한 대차의 주행안정성 확보를 위한 해석 기술 확보, 설계 파라미터 및 현가장치 특성치에 대한 최적화 기술 확보 목적
· (경제적) KTX-산천 운영속도 상승을 통한 수송력 증대</td></tr>
<tr><td>성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
· KTX-산천은 주행속도 300km/h까지 영업운전 중으로 300km/h까지 주행안정성 확보된 상태임
(개발기술 수준)
· KTX-산천 주행속도 350km/h 운행시 주행안정성 확보
· 임계속도를 기존 대차 대비 20% 향상시키기 위한 방안 제시
(개발기술 수준 설정근거)
· 기존 KTX-산천 운영최고속도는 300km/h임. 운영최고속도를 350km/h까지 높일 때 주행안정성을 확보하고자 함</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="5">박춘수 (한국철도기술연구원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="5">’13.12. ~’17.10.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">핵심성과</td><td>양적성과</td><td>차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>출원 3건
등록 3건</td><td>1건</td><td>2건</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>질적성과</td><td>차년도</td><td colspan="5">· KTX-산천 대차 대비 신규 주행장치 임계속도 20% 향상 해석 및 설계</td></tr>
<tr><td></td><td>달성 확인방법</td><td>차년도</td><td colspan="5">· 신규개발 주행장치 주행동특성 해석보고서를 통한 해석결과 확인</td></tr>
</table>

4. 주행안정성 평가 기술 (공법 · 기법)

<table>
<tr><td>관련 그림 / 사진</td><td colspan="6"> 
[대차동특성 시험 장비]
 

[속도에 따른 등가감쇠비 변화]</td></tr>
<tr><td>정의(설명)</td><td colspan="6">· 고속열차용 주행장치의 주행안정성을 평가할 수 있는 핵심 시험기술 개발</td></tr>
<tr><td>설정사유</td><td colspan="6">· 임계속도가 장비 최고속도를 초과할 때 임계속도를 예측할 수 있는 시험방법 개발 필요함
· 신규개발 동력 대차용 주행장치의 주행안정성을 확보 위한 시험절차 및 방법 제정 필요함</td></tr>
<tr><td>목 적</td><td colspan="6">· (기술적) 신규개발 동력대차의 임계속도가 현재 대차시험기의 한계속도인 428km/h를 초과할 경우를 대비한 비교 시험방법 및 절차 확보
· (경제적) 낮은 속도에서의 시험 결과를 이용한 높은 속도의 임계속도 예측 방법 개발을 통한 시험장비 개량 비용 절감</td></tr>
<tr><td>성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
· 기존 타 대차 동특성시험을 통해 428km/h까지 주행안정성 확인 시험 실시한 경험 있음
(개발기술 수준)
· 임계속도가 대차시험기의 한계속도인 428km/h를 초과할 경우 등가감쇠비 변화를 이용한 임계속도 예측 기술 개발
· 신규개발 동력 대차를 이용한 임계속도 예측 기술의 타당성 검증
(개발기술 수준 설정근거)
· 임계속도가 대차시험기의 한계속도를 초과할 경우를 대비한 다양한 시험평가기술의 확보가 필요함</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="5">박춘수 (한국철도기술연구원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="5">’13.12. ~’17.10.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">핵심성과</td><td>양적성과</td><td>차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>1건</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>질적성과</td><td>차년도</td><td colspan="5">· 등가감쇠비 변화를 이용한 대차의 임계속도 예측 기술 개발 완료
· 기존 G7 동력 대차를 이용한 임계속도 예측 기술의 타당성 검증</td></tr>
<tr><td>달성 확인방법</td><td>차년도</td><td colspan="5">· G7 동력 대차 시험결과 통한 개발기술의 타당성 검증 시험보고서
· 시험기준 평가서를 통한 시험 방법과 절차 확인</td></tr>
</table>

5. 운영효율 향상 주행장치 (장비 · 장치)

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6">   </td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="6">운영문제 개선과 운영효율 향상을 위해 기존 KTX-산천용 주행장치(동력대차)의 임계속도 향상 및 운행속도 증가</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">운행 중 차륜마모로 주행장치의 임계속도가 감소됨에 따라 차량 운행속도를 낮추어야 하는 운영 문제를 개선하고 주행장치 운행속도 증가(300km/h ⇒350km/h)로 수송시간을 단축하여 운영 효율을 향상하고자 함.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 적</td><td colspan="6">(기술적)기존 동력대차의 운행속도 증가와 임계속도 향상 기술
(경제적)운행속도 유지와 운행속도 증가에 따른 운영효율 증대와 임계속도 향상으로 차륜마모에 대한 유지보수 안정화</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
• 차륜마모로 인한 주행장치 불안정 시 운행속도를 300km/h에서 270km/h로 감소함
(개발기술 수준)
• 차륜마모(삭정 수준) 상태에서 주행장치 임계속도 향상
1) 차륜 상태 : 등가답면구배 0.15
2) 임계속도 : 차륜마모 상태에서 기존 주행장치 대비 20% 향상
• 주행장치 운행속도 증가 : 300km/h(기존) ⇒ 350km/h(개발)
(개발기술 수준 설정근거)
• 감속 30km/h(300km/h⇒270km/h)는 정상운행속도의 약 10%수준으로, 임계속도를 20% 향상할 경우 차륜마모시에도 운행속도 300km/h 유지 가능함
• 운행속도 증가는 고속선로가 허용하는 최대 범위를 고려함</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">민평오 (현대로템㈜)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'13.12. ~'17.10.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">핵심성과</td><td>양적성과</td><td>차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>출원 1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>질적성과</td><td>차년도</td><td colspan="5">• 임계속도 향상된 주행장치 시제품 제작
• 시제품 성능
-임계속도 : 기존 대비 20% 향상
-운행속도 : 350km/h</td></tr>
<tr><td></td><td>달성 확인방법</td><td>차년도</td><td colspan="5">• 주행장치 시제품 실물
• 주행성능시험을 통한 주행장치의 임계속도 및 운행속도 검증
-시험절차서, 시험보고서
• 주행장치 설계 문서 및 도면</td></tr>
</table>

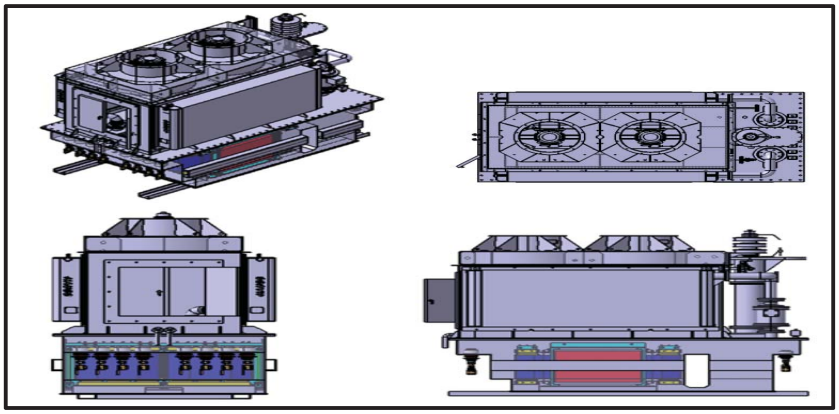
6. 효율향상 주전력변환장치 (장비 · 장치)

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="6">동력집중식 고속열차 운영속도 향상을 위한 KTX-산천 대비 출력을 10% 향상시키고, 수냉각방식 및 1C1M 제어방식을 적용한 주전력변환장치 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">KTX-산천 대비 운영속도 증가(300km/h ⇒ >350km/h)를 통해 수송시간 단축 및 운용효율을 향상 시키고, 기존과 동일한 체적 내에 출력 밀도를 10% 증대 및 1C1M 제어방식을 적용하여 주전력변환장치의 성능을 향상하기 위함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 적</td><td colspan="6">(기술적)출력밀도 10% 향상을 위한 수냉각방식 및 1C1M 제어기법 설계 기술 확보
(경제적)운영속도 증가에 따른 운영효율 증대와 1C1M 제어방식 적용에 따른 차륜경 유지보수 비용 절감</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
• 1C2M 제어방식 적용으로 차륜경 유지보수 비용이 높으며, 주전력변환장치 고장 시, 1대차 차단으로 추진시스템 가용성 감소
• 냉각방식 : 강제공냉식
(개발기술 수준)
• 1C1M 제어방식 적용으로 차륜경 유지보수 비용이 감소하며, 주전력변환장치 고장 시, 1축 차단으로 가용성 증대
• 수냉각 방식 적용으로 냉각성능 및 출력 향상
(개발기술 수준 설정근거)
• KTX-산천의 운행속도 및 주전력변환장치 출력 및 성능을 기반으로 기술개발 수준 정의</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">민평오 (현대로템㈜)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'13.12. ~'17.10.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">핵심성과</td><td rowspan="2">양적성과</td><td rowspan="2">차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>국내학술발표: 1</td></tr>
<tr><td>질적성과</td><td>차년도</td><td colspan="5">• 출력 10% 향상 및 1C1M 제어 주전력변환장치 시제품 제작
• 시제품 성능
-출력 : 기존 대비 10% 향상
-운행속도 : 350km/h</td></tr>
<tr><td>달성 확인방법</td><td>차년도</td><td colspan="5">• 주전력변환장치 시제품 실물
• 조합시험을 통한 주전력변환장치 성능 및 운행속도 검증
-시험절차서, 시험보고서
• 설계 문서 및 도면</td></tr>
</table>

7. 효율 향상 견인전동기 (장비 · 장치)

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="6">동력집중식 고속열차 운영속도 향상을 위한 KTX-산천 대비 출력을 10% 향상시키고, 효율 93% 1C1M 제어를 적용한 견인전동기 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">KTX-산천 대비 운행속도 증가(300km/h ->350km/h)를 통해 수송시간 단축 및 운용 효율을 향상 시키고, 기존과 동일한 체적 내에 출력 밀도를 10% 증대 및 효율 향상을 통한 에너지 소비효율을 향상시키기 위함.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 적</td><td colspan="6">(기술적)출력밀도 10%향상을 위한 견인전동기 설계기술 확보
(경제적)운영속도 증가에 따른 운영효율 증대와 1C1M 제어방식 적용에 따른 차륜경 유지보수 비용 절감</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
• 1C2M 제어방식 적용으로 차륜경 유지보수 비용이 높으며, 견인전동기 효율은 92% 이상
(개발기술 수준)
• 1C1M 제어방식 적용으로 차륜경 유지보수 비용 감소
• 기 견인전동기 대비 10% 출력 향상
• 효율 93%로 에너지 소비효율 향상
(개발기술 수준 설정근거)
• KTX-산천의 운행속도 및 견인전동기 출력 및 성능을 기반으로 기술개발 수준 정의</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">민평오 (현대로템㈜)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">’13.12. ~’17.10.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심성과</td><td rowspan="2">양적성과</td><td rowspan="2">차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td colspan="2">기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2">국내학술발표: 1
시제품: 1</td></tr>
<tr><td>질적성과</td><td>차년도</td><td colspan="6">• 출력 10% 향상 및 1C1M 제어 견인전동기 시제품 제작
• 시제품 성능
-출력 : 기존 대비 10% 향상
-효율 : 93%이상</td></tr>
<tr><td>달성 확인방법</td><td>차년도</td><td colspan="6">• 견인전동기 2차 시제품
• 조합시험을 통한 견인전동기 성능 및 운행속도 검증
-시험절차서, 시험보고서
• 설계 문서 및 도면</td></tr>
</table>

8. 효율향상 주변압기 (장비 · 장치)

관련 그림 / 사진	
정의(설명)	기존 고속열차(KTX-산천) 대비 추진출력효율(치수 대비 출력)을 10% 향상한 동력집중식 고속열차 주변압기 개발
설정사유	기존 고속열차(KTX-산천) 주변압기와 호환 가능하도록 동일 치수를 유지하고 인터페이스 호환 가능하면서 동력집중식 고속열차의 출력성능 향상을 위한 주변압기 기술개발 필요
목 적	(기술적) 고속열차 추진시스템 출력성능 향상을 위한 주변압기 개발 (경제적) 기존의 고속열차(KTX-산천) 주변압기의 문제점 개선 및 성능 향상으로 수입 대체 및 유지보수 비용 절감
성능목표	(기존기술 수준) KTX 산천 주변압기 용량 6,200kVA (개발기술 수준) 주변압기 용량 7,080kVA (기존 주변압기 동일 치수 및 인터페이스 호환 가능) · 권선 및 적층구조 변경(Core Type → Shell Type) · 코일 분할 적층으로 기존대비 냉각효과 우수 · 고조파 차폐철판 → 노이즈 저감 · 주변압기 용량 14% 향상(6,200 kVA → 7,080 kVA) · 냉각 시스템 용량 13% 향상(150kW X 2 → 170kW X 2) (개발기술 수준 설정근거) - 추진시스템 출력 10% 향상을 위한 필요 용량에 따른 주변압기의 용량을 확보하기 위한 목표 기술 수준 설정
성과달성 책임자 (소속기관)	

			•				
			•				
			•				
			•				
			•				

9. 고속열차용 안티롤바 (장비 · 장치)

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="6">고속열차용 안티롤바의 형태는 상기 그림과 같이 바(Bar)와 암(Arm)이 분리된 열간압입(Shrinkage Fitting)타입 제품이며, 2차 현가장치(Secondary Suspension)의 일부로 차체와 대차 간에 연결되어 운행 시 차체의 롤링운동을 제한하여 차체의 롤링각을 줄임으로써 차량의 주행안정성을 향상시키는 역할을 함.</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">안티롤바 시스템은 차량의 동적특성을 안정감 있게 유지시켜주는 장치로서, 운행 시 발생되는 차체의 롤링각을 제한하여 차량의 주행안정성에 영향을 미치는 롤링각을 감소시켜, 차량 주행을 안정화하고 곡선통과성능을 향상시키고자 함.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 적</td><td colspan="6">차량의 주행안정성 요구에 적합한 안티롤바 요구특성인자 관리시스템을 개발하여,
1. 차량의 특성에 맞는 안티롤바 시스템 적용
2. 차량의 주행안정성 향상으로 승차감 및 승객만족도 향상
3. 곡선추종성 향상으로 차량유지보수비용 절감</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
· 기존 KTX-산천 동력대차는 안티롤바 미적용
· KTX 산천 객차대차 기준 안티롤바 롤 강성 요구 허용공차는 ±15% 임
(개발기술 수준)
· 동력대차 안티롤바 신규 적용
· 동력대차 안티롤바 요구강성에 적합한 설계 및 롤 강성 정도 30% 향상(허용공차 ±10% 이하)
(개발기술 수준 설정근거)
· 차륜마모 상태에서 기존 주행장치 대비 임계속도 20% 향상에 적합한 안티롤바 설계 및 강성정도 30% 향상</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">남학기 (현우시스템)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'13.12. ~'17.10.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">핵심성과</td><td>양적성과</td><td>차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>국내학술발표: 1
시제품: 1</td></tr>
<tr><td>질적성과</td><td>차년도</td><td colspan="5">• 안티롤바 기본 및 상세설계, 시제품 제작 및 시험
• 시제품 성능
- 시제품 안티롤바 롤 강성 정도(공차 ±10% 이하) 30% 향상
- BS EN 15049 규격에 의거 안티롤바 특성 및 내구성 검증</td></tr>
<tr><td></td><td>달성 확인방법</td><td>차년도</td><td colspan="5">• 강성정도 및 내구성 확인 결과 보고서
- 강성정도 : 시험 JIG 제작 및 강성 정도 측정
- 내구성 검증 : BS EN 15049 규격 시험에 의거 검증</td></tr>
</table>

10. 고속열차용 경량 액슬박스 (장비 · 장치)

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="6">고속열차용 경량 액슬박스의 형태는 상기 그림에서와 같이 윙(Wing)타입 제품이며, 1차 현가장치(Primary suspension)의 코일스프링 및 고무스프링이 조립되어 차량의 하중부담 및 운행 시 차량주행안정성을 유지하는 역할을 함.</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">스프링하 질량(Unsprung mass)이 감소될수록 차량의 속도 향상에는 유리함.
이에 기존의 주강제품 액슬박스를 경량화하여 주행장치의 속도를 향상시키고자함.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 적</td><td colspan="6">현재 국내에는 액슬박스에 주철 외의 경량제품의 적용은 없음으로 국내 독자적인 기술을 통해 경량화된 제품을 개발하여,
1. 강성을 갖춘 경량 소재 개발(액슬박스 외 스프링하 질량 관련 제품에 공동 적용)
2. 차량의 속도향상으로 차량운용비용 절감(이용자 시간 감축에 따른 기회비용 증가)</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
· KTX , KTX산천, TTX, HSR-350X 등의 고속열차의 액슬박스는 주강제품으로 약 80kg 임
(개발기술 수준)
· 경량제품 액슬박스(알루미늄 합금 단조) 개발 : 중량 30% 이상(56kg 이하) 경량화
(개발기술 수준 설정근거)
· 기존 고속차량의 스프링하 질량을 감소시키기 위해 주강제품인 엑슬박스를 경량화하여 주행 안정성 향상 및 유지보수 비용을 절감 함</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">남학기(현우시스템)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">’13.12. ~’17.10.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">핵심성과</td><td>양적성과</td><td>차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td colspan="2">기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>출원 : 1</td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2">시제품: 1</td></tr>
<tr><td>질적성과</td><td>차년도</td><td colspan="6">• 액슬박스 상세설계, 1차 시제품 제작 및 시험
• 시제품 성능
- 1차 시제품 경량화 : 기존대비 25% 이상 경량화(중량 60kg 이하)
- BS EN 13749 규격에 의거 경량 엑슬박스 내구성 검증</td></tr>
<tr><td>달성 확인방법</td><td>차년도</td><td colspan="6">• 경량화 및 내구성 확인 결과 보고서
1) 경량화 : 시제품 중량 측정
2) 내구성 검증 : BS EN 13749 규격에 의거 시험 검증</td></tr>
</table>

참고문헌

[1] ETR : Eisenbahntechnische Rundschau, Vol.61 No. 1, pp. 28-33, 2012

[2] Internationales Verkehrswesen, Vol.64, No.2, pp.60-64, 2012

[3] www.hitachi-rail.com, 2013

[4] JR EAST Technical Review, No.16, 2010

[5] Japan Railway & Transport Review, No. 57, 2011

[6] 현대로템, 분산형 차량모듈 및 시제차량 기술개발 최종보고서, 2012.09

[7] 철도차량용 능동 현가장치 기술개발 보고서(산업자원부, 2010.3~2015.4)

[8] Y. Ku (2009) Two-step multi-objective nose shape optimization of a high-speed train using the vehicle modeling function, Ph. D. Thesis, Seoul National University.

[9] B. Kulfan (2007) A Universal Parametric geometry representation method - CST, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA.

[10] H.Kwon, T. Kim, D. Lee, M. Kim (2003) Numerical Simulation of Unsteady Compressuble Flows Induced by a High-Speed Train Passing through a Tunnel, Journal of Rail and Rapid Transit, 217(2), pp.111-124

[11] J.C. Kim, C.W. Lee, "A Study on Lateral Vibration at the Tail of Train for KTX," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp.17-22, 2005.

[12] C.W. Lee, J.C. Kim, K.H. Moon, "The Analysis on the Carbody Vibration of Wheel Profiles for KTX," Proceedings of the Korean Society for Railway Spring Conference, pp.730-733, 2003.

[13] S.I. Lee, Y.S. Choi, "Running Stability Analysis on the Tail car of KTX," Proceedings of the Korean Society for Railway Spring Conference, pp.19-24, 2005.

[14] J.K. Chang, S.I. Lee, Y.S. Choi, "Dynamic Characteristics of the KTX on Wheel Conicity," Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference (III), pp.22-27, 2003.

[15] B.B. Kang, "Dynamic Analysis of Unstable Vibration of KTX," Proceedings of the 2010 IEEE/ASME Joint Rail Conference, pp.1-9, 2010.

[16] H. Fujimoto, M. Miyamoto, "Lateral Vibration and its Decreasing Measure of a Shinkansen Train (Decrease of Train Vibration with Yaw Damper between Cars)," Vehicle System Dynamics Supplement, pp.188-199, 1996.

[17] C. Huang, J. Zeng, S. Liang, "Carbody Hunting Investigation of a high speed passenger car," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 27, No. 8, pp.2283-2292, 2013.

[18] H.M. Hur, W.H. You, "A Study on the Wear Characteristics of Wheel Profile for High Speed Rolling-Stock," Journal of the Korean Society for Railway, Vol.8, No.5, pp.477-482, 2005.

[19] H.M. Hur, J.H. Park, W.H. You et al., "An Analysis on the Influence of Wheel Flange Wear on the Vibration of EMU," Journal of the Korean Society for Railway, Vol.12, No.2, pp.230-235, 2009.

[20] R. Plackett, J. Burman, "The Design of Optimum Multifactorial Experiments", Biometrica, Vol.33, pp. 305-325, 1946.

[21] S. H. Park, Understanding of Design of Experiments, Minyoungsa, 2006.

[22] N. Vanderplaats, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications, McGraw-Hill, 1984.

[23] C. H. Tseng and J .S. Arora, Optimal Design for Dynamics and Control Using a Sequential Quadratic Programming Algorithm. Technical report No.ODL-87.10, Optimal Deign Laboratory, College of Engineering, The University of Iowa, Iowa City, 1987.

[24] 레일방식 500Km/h (HEMU-500X) 철도시스템 핵심기술 개발 기획보고서, 한국철도기술연구원, 2012.9.

[25] China’s rail revolution/ABBpower rail traffic in Germany, ABB’s annual report, 2010

[26] “고속철도차량용 주변압기 성능향상을 위한 Mold type기술사양 검토연구”, 2013 한국철도학회 추계학술대회

[27] 분산형 차량모듈 및 시제차량 기술개발 최종보고서, 현대로템㈜, 2012.09

[28] 도미나가 야스토시, 편영식, 김동일, 최도현, “고속철도용 안티롤바 어셈블리의 토션바 개발”, 대한기계학회논문집 A권, 제36권 제9호 pp.979～984, 2012.

[29] 도미나가 야스토시, 편영식, “고속철도용 Antiroll-bar ass’y 국산화 개발”, 2011.

[30] 한국철도공사 연구원, “고속열차 안티롤링바-커넥팅로드 소음 저감방안 연구”, 2012.

[31] 김필환, “철도차량 롤 특성에 대한 고찰”, 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 512~521, 1998.

[32] 강석봉, “고속철도 차량용 알루미늄 합금의 기술현황과 전망”, 기계와 재료 6권 3호, 1994.

[33] 김창주, 박수현, “고급 주물용 알루미늄 합금제조 기술현황”, 기계와 재료 2권 4호, 1990.

[34] 김경현, “알루미늄 다이캐스팅 기술 개발 현황”, 기계와 재료 3권 1호, 1991.

[35] 김경현, 이정무, 박수현, 김회곤, “항공기용 고강도 알루미늄 합금 주조 부품 개발”, 기계와 재료 15권 1호, 2003.

[36] 오지택, “세계 철도기술 시장의 현황과 한국철도의 해외진출추진”, 제58권 pp. 12～28, 2010.

[37] 이호인, 한요섭, 김도향, 김원태, “알루미늄 응용기술의 이해와 활용”, 한국철강신문, 2005.

[38] “비철금속 산업동향과 경량화 부품소재 공정기술”, 산업정책분석원, R1search센터, 2015.

[39] “소성가공기술 단조”, 일본소성가공학회, 2013

[40] “단조 시뮬레이션”, 진샘미디어, 전만수, 2013

[41] H.S Sakurai, “최근의 알루미늄 단조 동향”, 한국소성가공학회지, 제17권 제8호, 2008.

[42] 김재성, 김영인, “고강도 알루미늄 단조기술 개발”, 한국소성가공학회논문집 pp.99～107, 1999.

[43] 전광우, 신광복, 김진우, 정연일, “KTX 고속열차 안티롤바 너클부의 동특성 및 구조 안전성 평가”, 대한기계학논문집 A권, 제37권 제8호 pp.1035～1041, 2013

[44] 김성수, 정완희, 하경남, “실시간 차량 동역한 해석을 위한 안티 롤 바 힘 계산 알고리듬”, 대한기계학회논문집 A권, 제32권 제2호 pp.170～176, 2008.

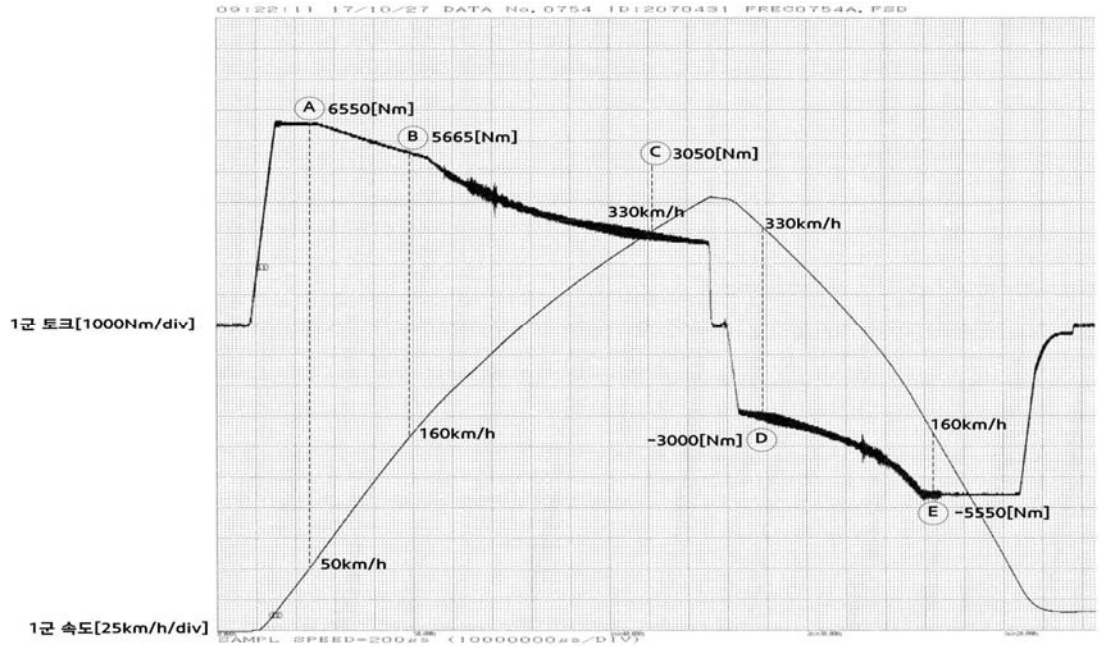
[부록] 검사성적서

부품제작 검사성적서

구 분	(국책)고속열차 효율향상 차량모듈 개발	ROTECO	검 사 자	확 인 자
제작 회사	현대로템(주)			
부 품 명	주전력변환장치			
검사규격	조합 시험 절차서 REDV208257	검 사 일	2017. 9. 28. ~ 10. 27	
수 량	1 SET (S/N : HRMB-HSTD-00)		판 정	합 격

순	검사 항목	검사내용			판정기준	측정치 1군	측정치 2군	결 과	비고
1	토크 특성 시험 (견인 전동기 냉각 상태)	견인전동기 냉각상태에서 주전력변환장치 1군 및 2군을 각각 개별로 견인 및 회생 지령치를 100%로 동작시켜 토크가 기준치를 만족하는지 확인한다.	역행	A	6192 Nm 이상	6550	6600	양 호	10.10 ~10.27
				B	5662 Nm 이상	5665	5700		
				C	3027 Nm 이상	3050	3150		
			회생	D	-2854 Nm 이하	-3000	-2950		
				E	-5232 Nm 이하	-5550	-5450		

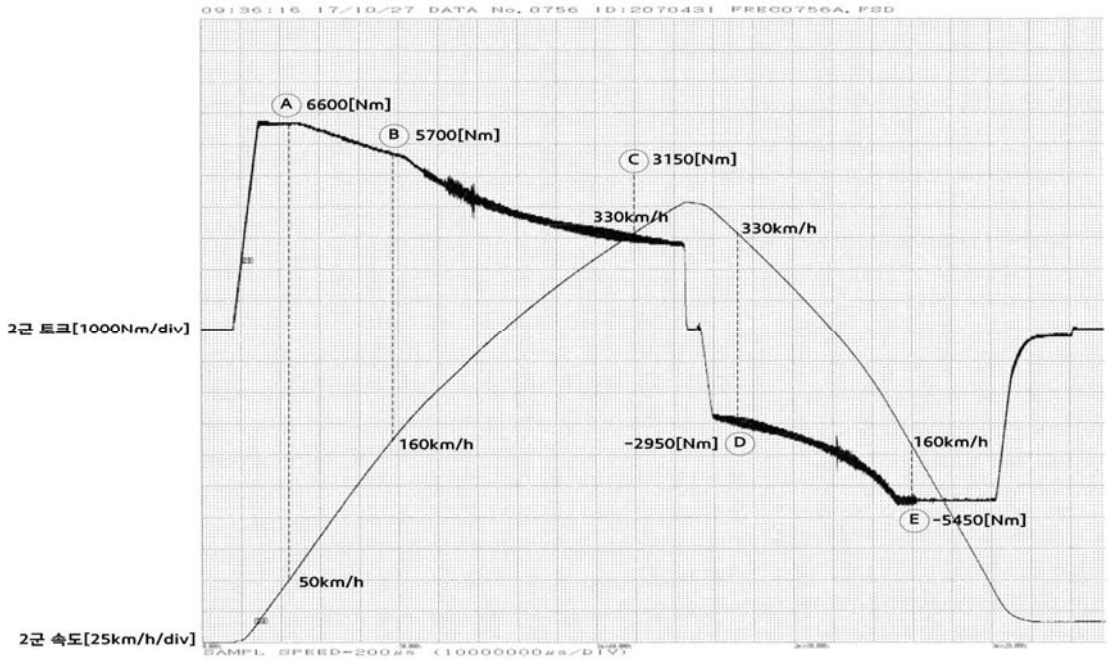
토크특성 시험 결과(견인전동기 냉각상태)



[1군]

부품제작 검사성적서

토크특성시험 결과(견인전동기 냉각상태)

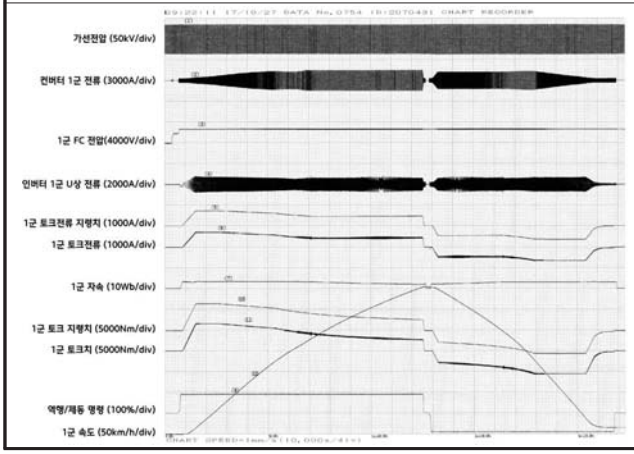


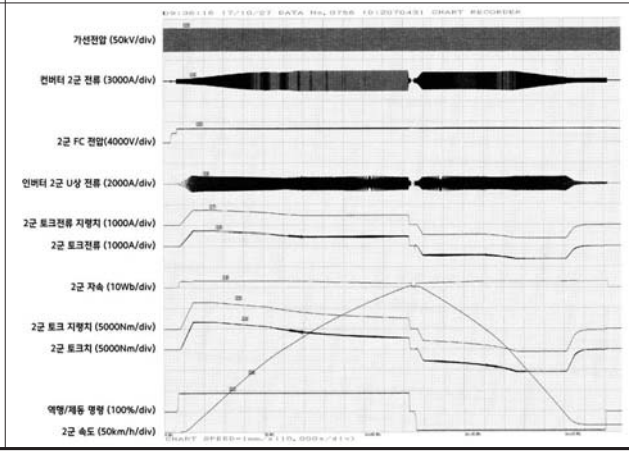
[2군]

토크특성 시험





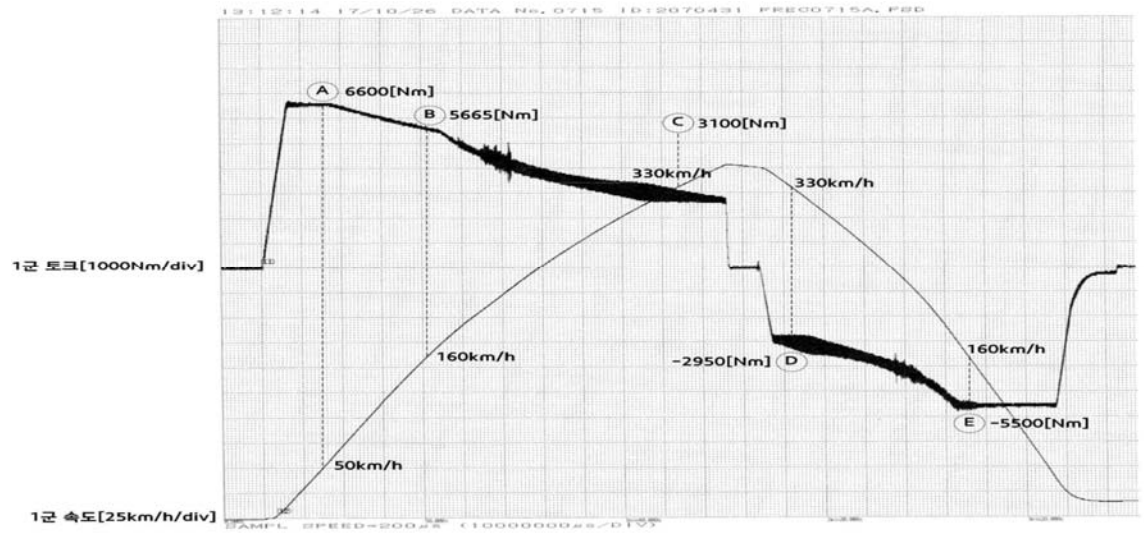




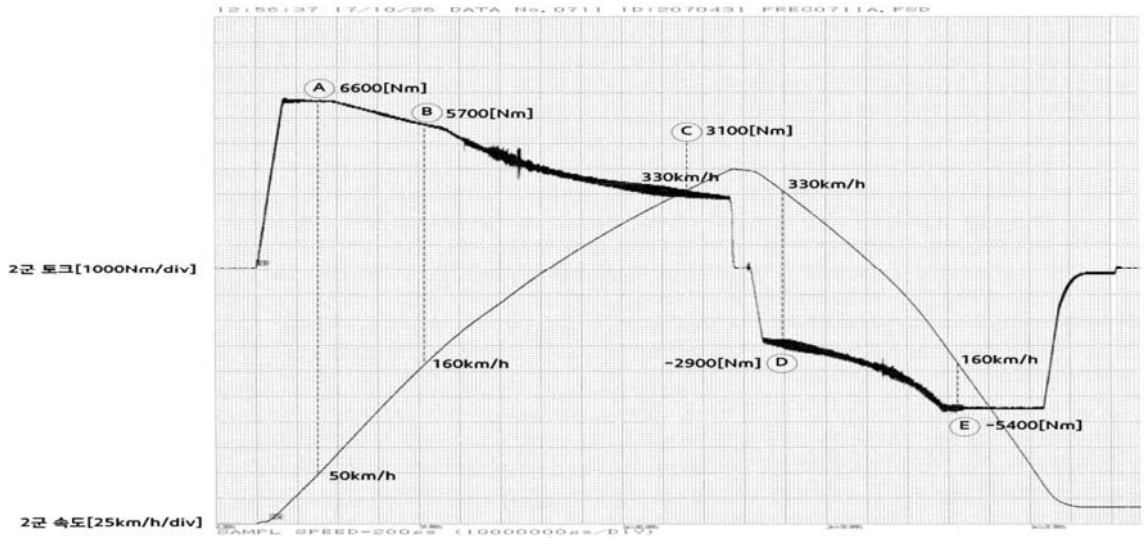
부품제작 검사성적서

순	검사 항목	검사내용			판정기준	측정치		결 과	비고
						1군	2군		
2	토크 특성 시험 (견인 전동기 발열 상태)	견인전동기 발열상태에서 주전력변환장치 1군 및 2군을 각각 개별로 견인 및 회생 지령치를 100%로 동작시켜 토크가 기준치를 만족하는지 확인한다.	역행	A	6192 Nm 이상	6600	6600	양 호	10.10 ~10.26
				B	5662 Nm 이상	5665	5700		
				C	3027 Nm 이상	3100	3100		
			회생	D	-2854 Nm 이하	-2950	-2900		
				E	-5232 Nm 이하	-5500	-5400		

토크특성 시험결과(견인전동기 발열상태)



[1군]



[2군]

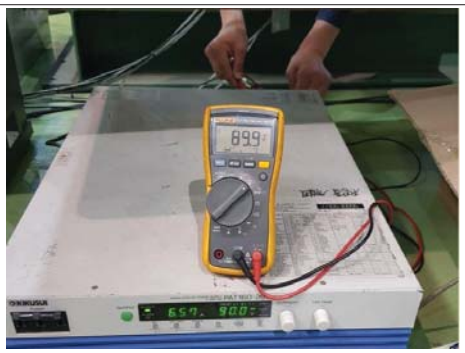
부품제작 검사성적서

순	검사 항목	검사내용		판정기준	측정치 1군	측정치 2군	결 과	비고
3	제어 전원 변동 시험	제어전원 DC 50V, 72V, 90V 조건에서 주전력변환장치를 0km/h~330km/h까지 동작시켰을 때 보호동작 없이 정상적으로 동작하는지 확인한다.	DC 50V	보호동작 발생 없이 정상동작하고 제어전원 변화에 따른 특성의 차이가 없을 것	**정상 동작 및 특성차이 없음**		**양 호**	10.10 ~10.25
			DC 72V		**정상 동작 및 특성차이 없음**			
			DC 90V		**정상 동작 및 특성차이 없음**			

제어전원변동 시험

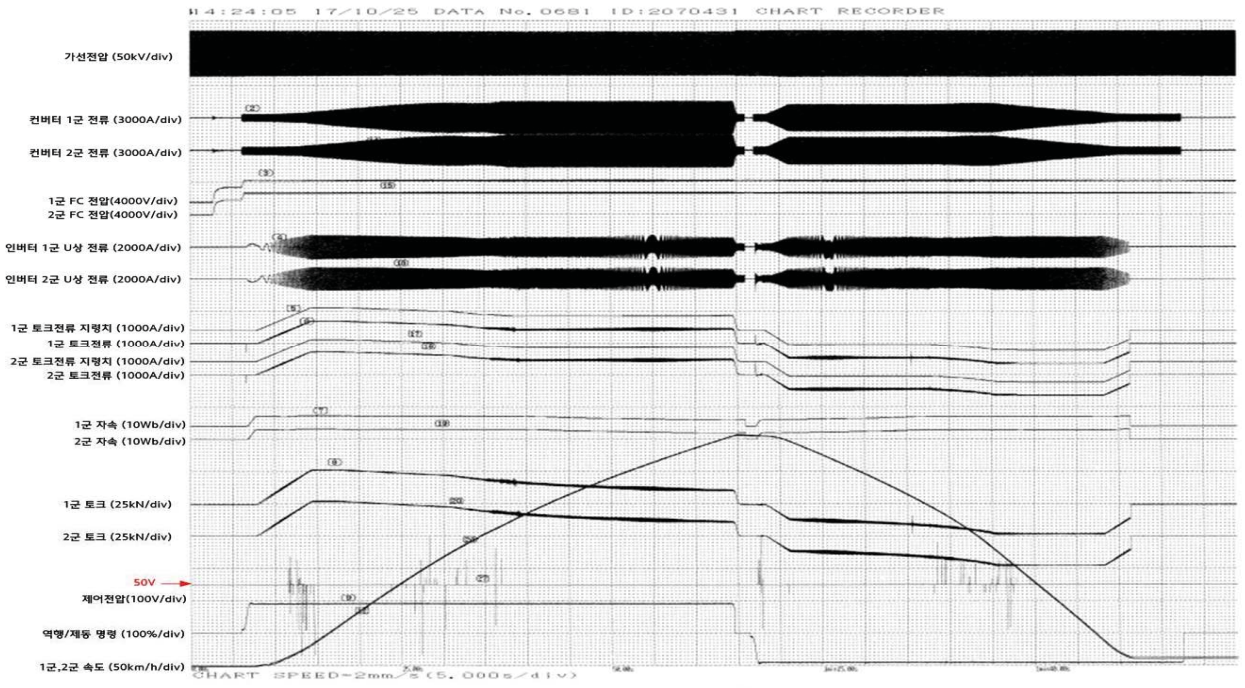


[DC 50V]



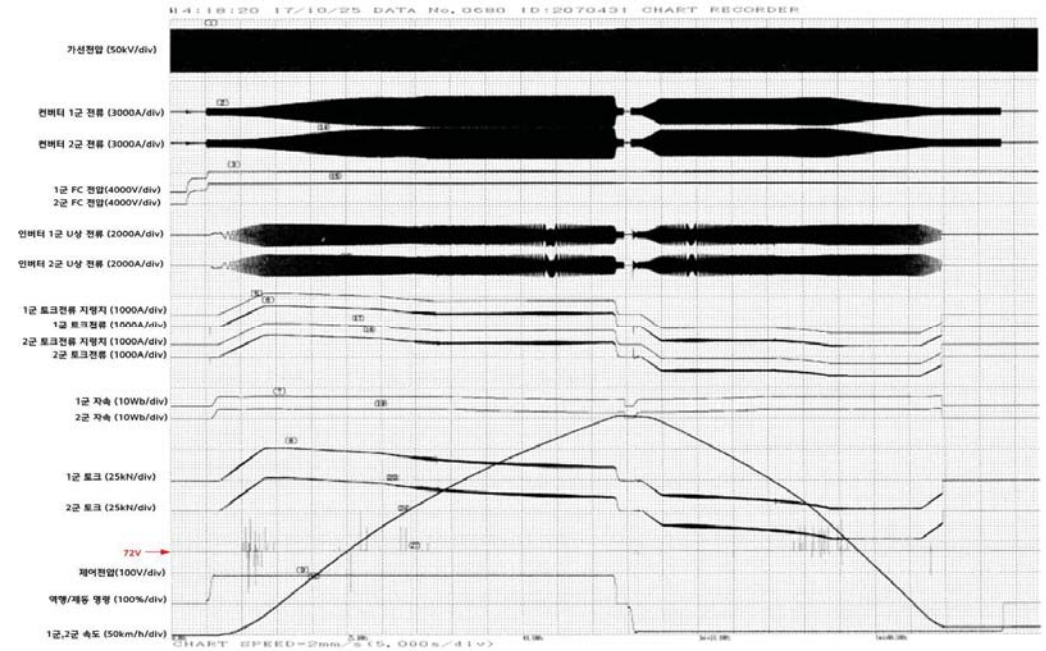
[DC 90V]

제어전원변동 시험결과[50V]

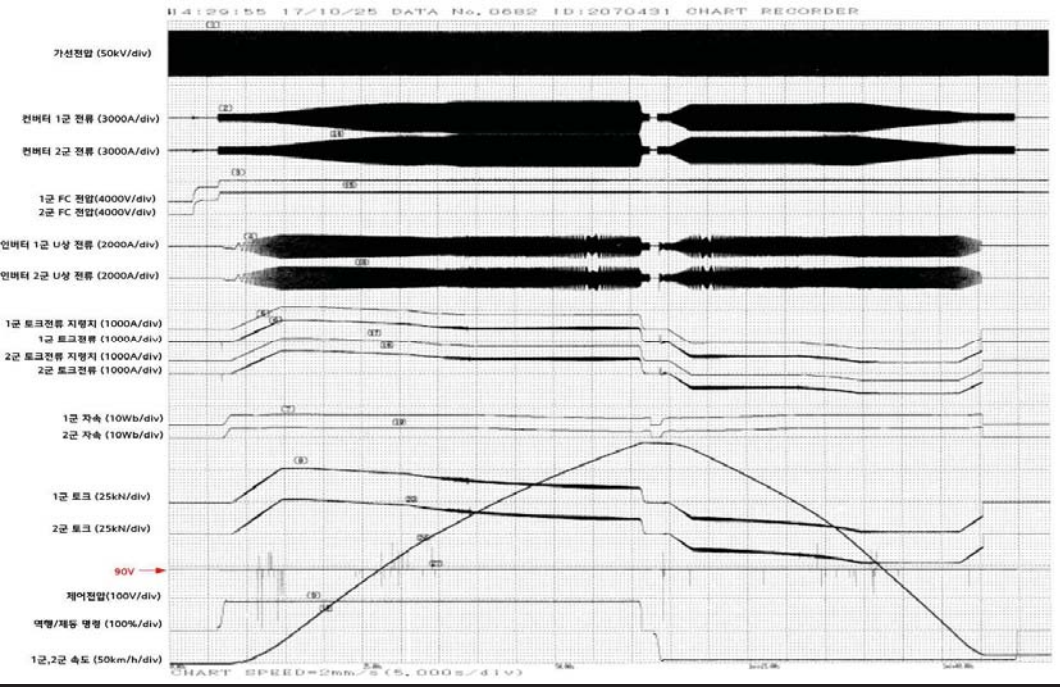


부품제작 검사성적서

제어전원변동 시험결과[72V]



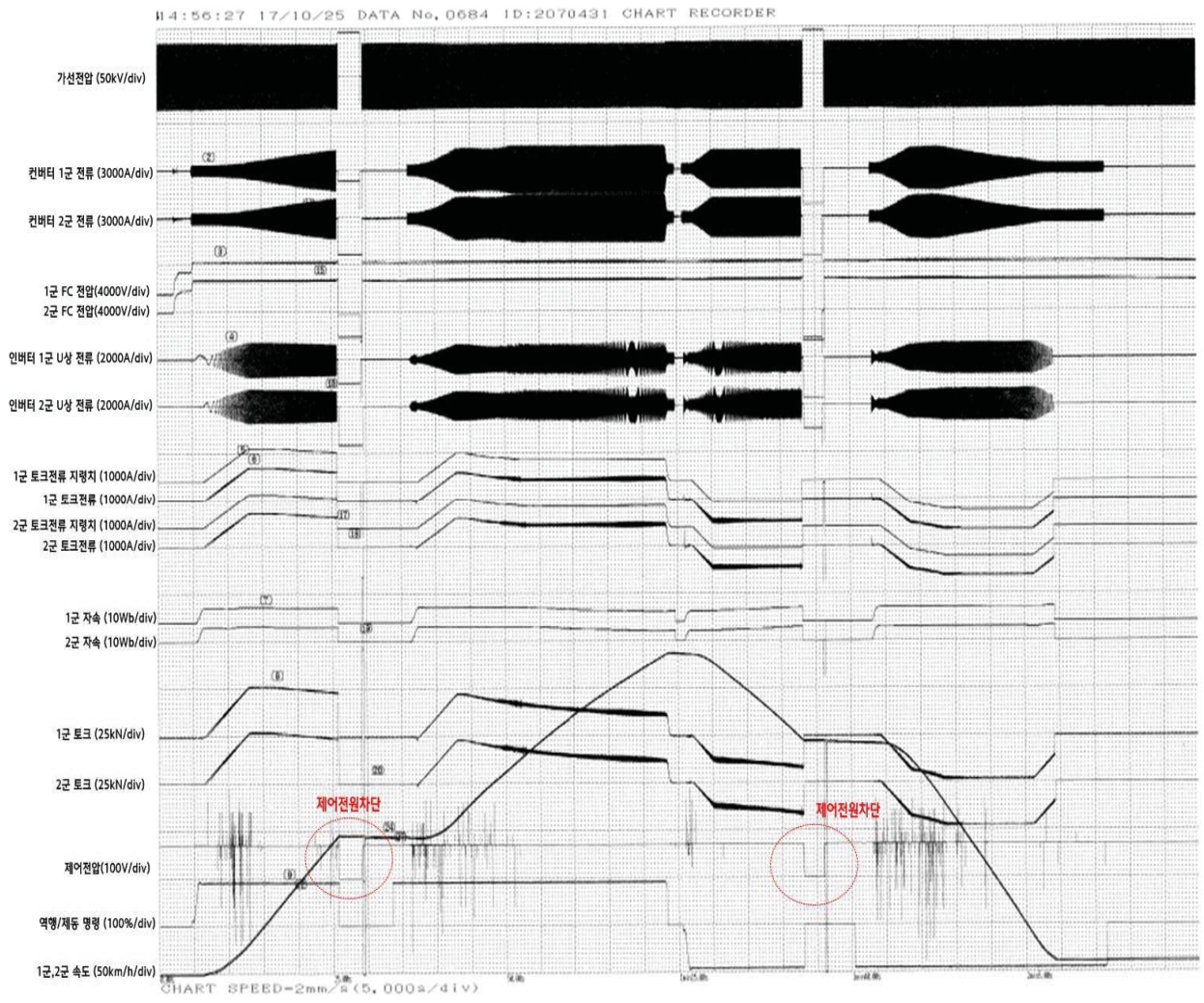
제어전원변동 시험결과[90V]



부품제작 검사성적서

순	검사 항목	검사내용	판정기준	측정치		결 과	비고
				1군	2군		
4	제어 전원 차단 시험	주전력변환장치를 동작시킨 후 0km/h~330km/h 속도에서 제어전원을 차단하고 재 투입 하였을 때, 기동시퀀스에 따라 정상적으로 재 기동하는지 확인한다.	제어전원 차단 및 재 투입 후 부품의 파손없이 기동 시퀀스에 따라 재 기동할 것	**재투입시 기동시퀀시에 따른 재기동 실행상태 양호함**		**양 호**	10.10 ~10.25

제어전원차단 시험결과

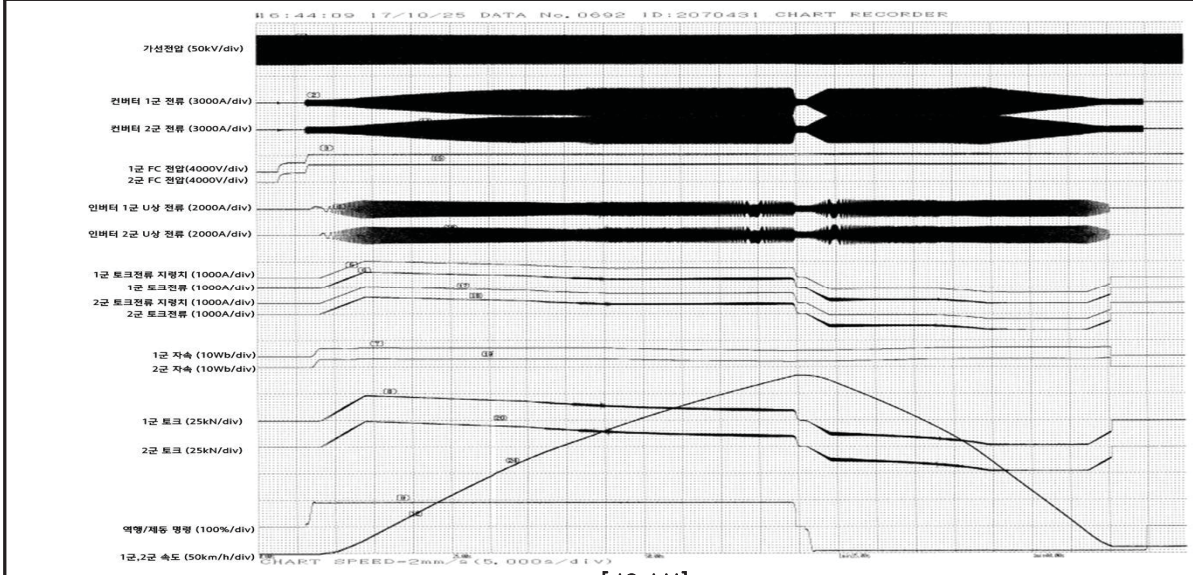


REMARK :

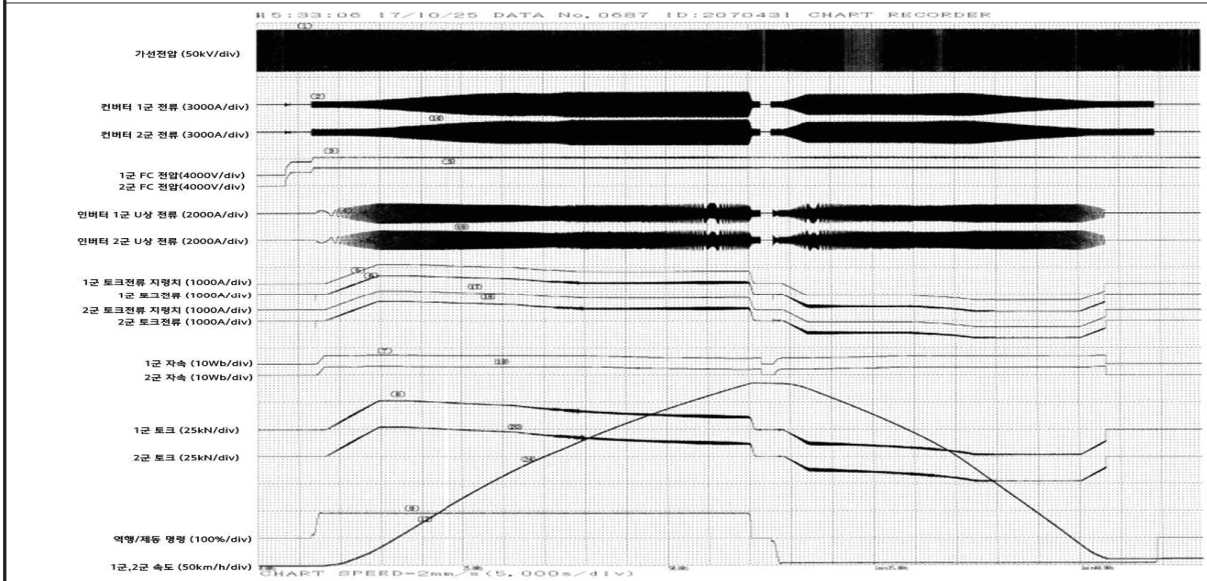
부품제작 검사성적서

순	검사 항목	검사내용		판정기준	측정치 1군	측정치 2군	결 과	비고
5	가선 입력 전압 변동 시험	가선전압을 19kV, 29kV로 조정하고 주전력변환장치를 0km/h~330km/h까지 동작시켰을 때 보호동작 없이 정상적으로 동작하는지 확인한다.	19kV	보호동작 발생 없이 정상동작 할 것	정상 동작함		양 호	10.10 ~10.25
			29kV		정상 동작함			

가선입력전압변동 시험결과



[19 kV]

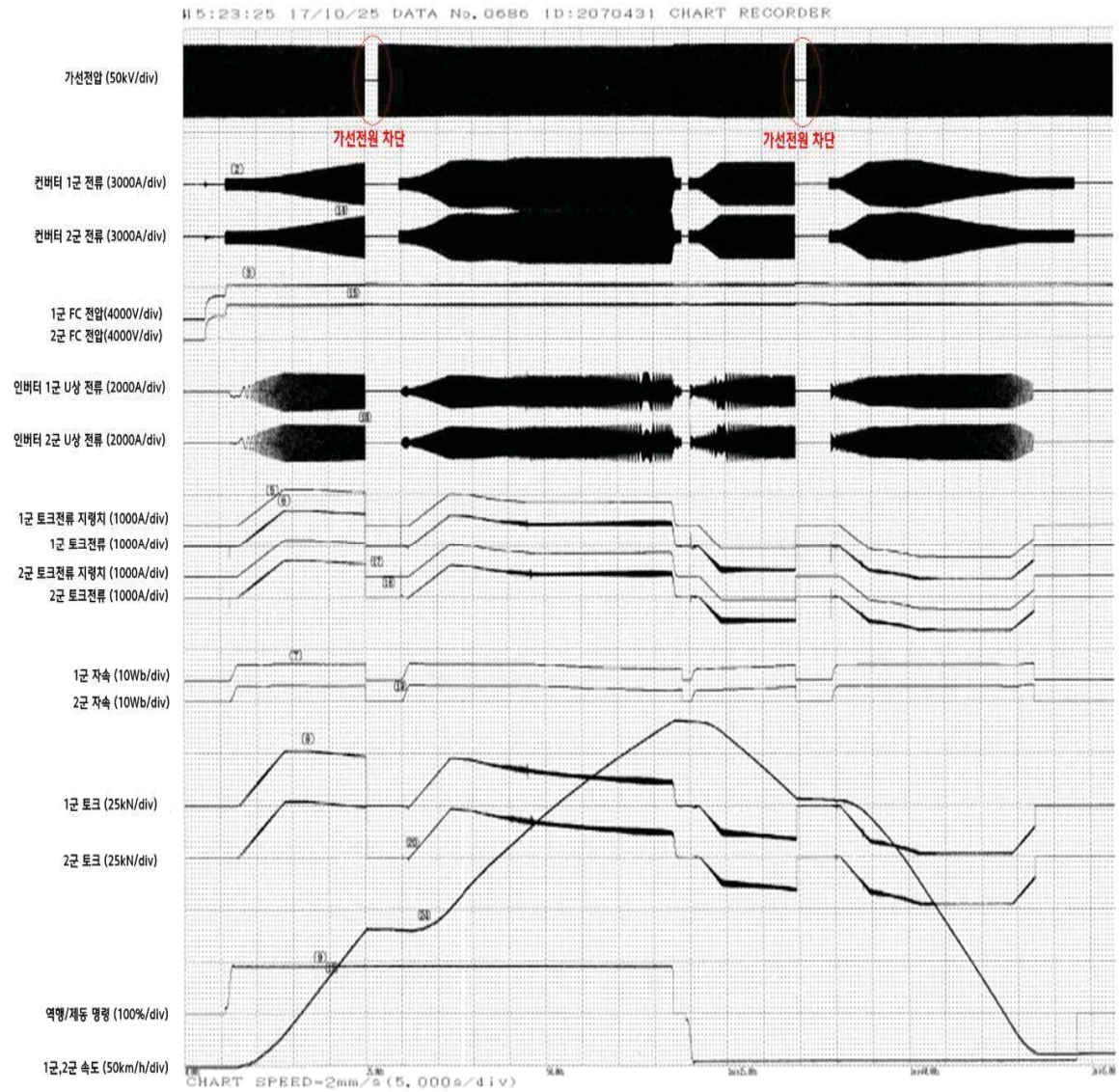


[29 kV]

부품제작 검사성적서

순	검사 항목	검사내용	판정기준	측정치		결 과	비고
				1군	2군		
6	정전 시험	주전력변환장치를 동작시킨 후 0km/h~330km/h 속도에서 가선전원을 차단하고 재 투입 하였을 때, 기동시퀀스에 따라 정상적으로 재 기동하는지 확인한다.	가선전원 차단 및 재 투입 후 부품의 파손없이 기동 시퀀스에 따라 재 기동할 것	**재투입시 기동시퀀시에 따른 재기동 실행상태 양호함**		**양 호**	10.10 ~10.25

정전시험 결과

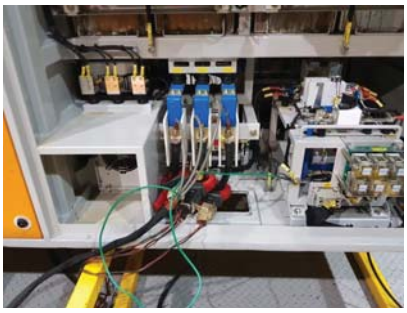


부품제작 검사성적서

순	검사 항목	검사내용	판정기준	측정치	결 과	비고
7	효율 측정 시험	주전력변환장치의 효율을 측정하여 기준치를 만족하는지 확인한다. 계산치는 측정된 효율 값에 주변압기 효율 97.5%을 나누어 계산한다.	측정치 : 88% 이상	91.74	양 호	10.10 ~10.26
			계산치: 90% 이상	94.1		
8	역률 측정 시험	주전력변환장치의 역률을 측정하여 기준치를 만족하는지 확인한다.	0.95 이상	0.97	양 호	

효율 및 역률 측정





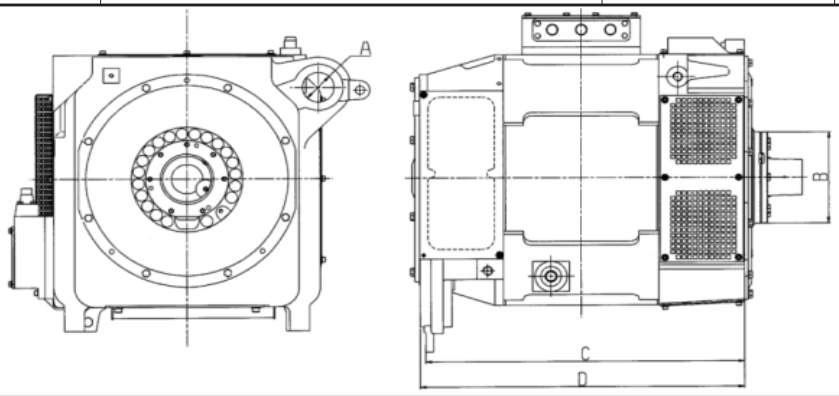
효율 및 역률 측정결과



부품제작 검사성적서

구 분	(국책)고속열차 효율향상 차량모듈 개발	ROTECO	검 사 자	확 인 자
제작 회사	현대로템(주)			
부 품 명	견인전동기			
검사규격	견인전동기 시험 절차서 REDV208252	검 사 일	2017. 7. 3. ~ 7. 6.	
수 량	1 SET (S/N : RIN1303-002M)		판 정	합 격

순	검사항목		검사방법 및 판정기준	측정치	결 과	비고
1	치수측정 (mm)	A	Φ80 +0.046/+0	80.007	양 호	7/6
		B	Φ245 -0.050/-0.096	244.915		
		C	800 ± 0.5	799.843		
		D	814 ± 0.2	814.014		

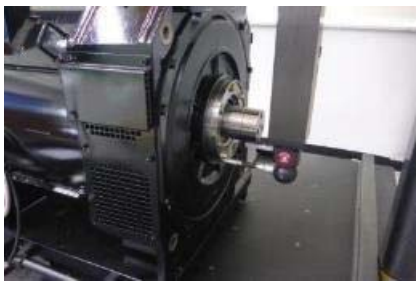














부품제작 검사성적서

순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치	결 과	비고
2	중량측정	1500 kg ± 5% (1425 kg ~ 1575 kg)	1514 kg	양 호	7/6







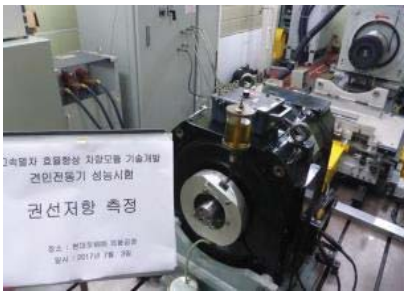

순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치(25℃)		결 과	비고
3	권선저항 측정	상온에서 저항측정 후 150 ℃로 환산한 값이 0.07524~0.09196Ω 일 것 150 ℃ 환산식 = (234.5+150)×측정저항 ---------- (234.5+측정온도)	U-V	0.0563	양 호	7/3
			V-W	0.0563		
			W-U	0.0562		
			150 ℃ 환산치			
			U-V	0.08342		
			V-W	0.08342		
			W-U	0.08327		











부품제작 검사성적서

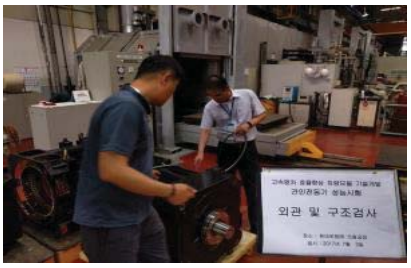
순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치	결 과	비고
4	외관 및 구조검사	육안으로 검사하여 해로운 흠, 녹, 오염이 없어야 한다.	이상없음	양 호	7/6
		외관상 심한 변형이 없어야 한다.	이상없음		
		제품에 표시된 제품명, 제작사 약호, 제조년도, 일련번호 등이 표기되어 있어야 한다.	이상없음		













순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치		결 과	비고
5	무부하 특성시험	전동기를 무부하 조건으로 2183V, 136.5Hz로 운전하여 입력이 일정하게 되었을 때 각 상에 흐르는 1차 전류 및 입력을 측정한다.	전류(A)	44.5 A	양 호	7/3
			입력(kW)	22 kW		

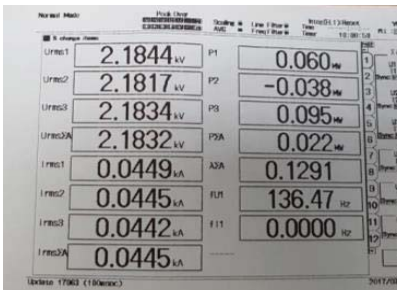












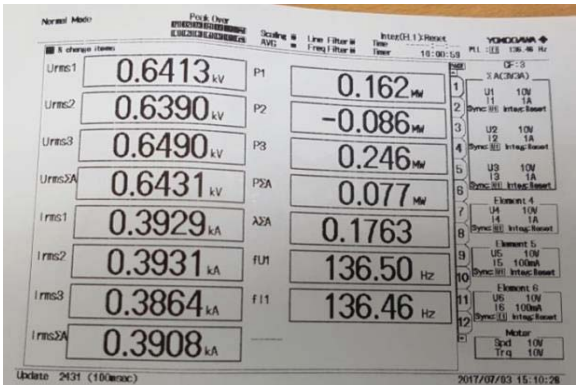
부품제작 검사성적서

순	검사항목	검사방법 및 판정기준		측정치	결 과	비고
6	구속 특성시험	회전자를 구속한 후 1차 단자간에 391A, 136.5Hz로 인가하여 전압, 전류 및 입력을 측정한다.	전압(V)	643.1 V	양 호	7/3
			전류(A)	390.8 A		
			입력(kW)	77 kW		

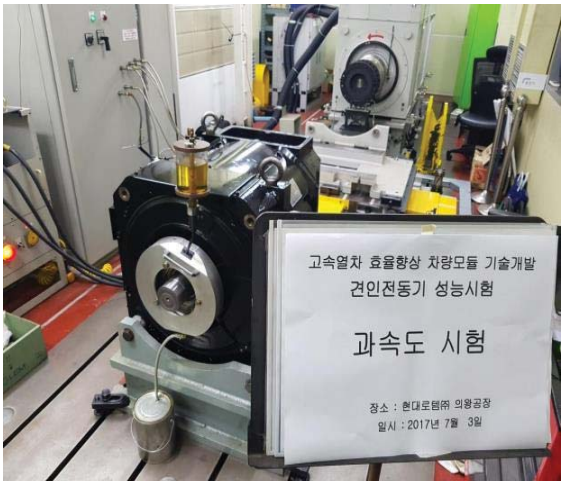








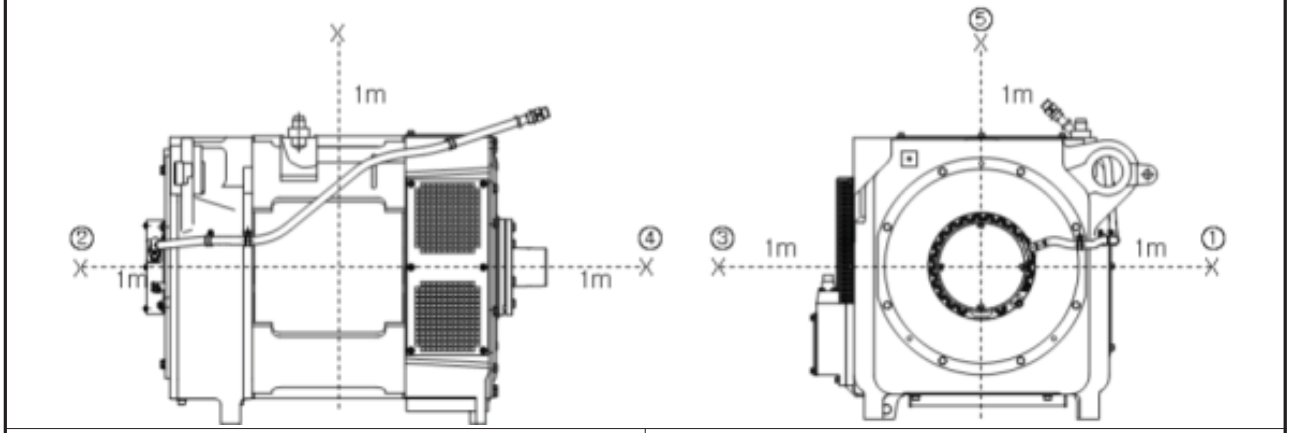
순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치	결 과	비고
7	과속도 시험	전동기를 4920rpm에서 2분간 운전하여 이상 진동 및 이상음 등이 없으면 양호로 한다.	이상 없음	양 호	7/3





부품제작 검사성적서

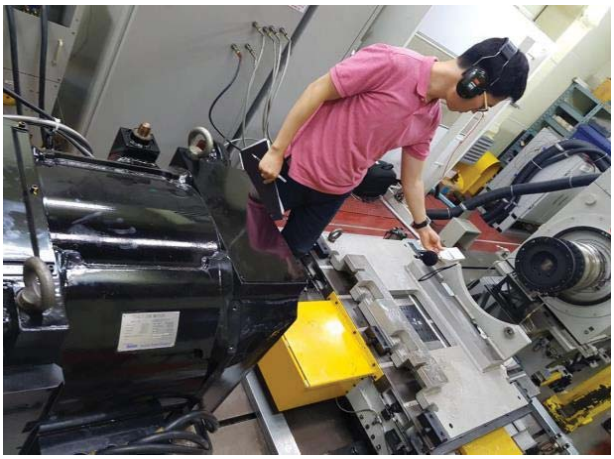
순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치		결 과	비고
8	소음시험	전동기를 시험베드에 장착한 후, 무부하로 최대 속도인 4100rpm에서 아래의 그림과 같은 측정 위치에서 소음을 측정하여 113dB(A) 이하이면 양호로 한다.	①	97.5	양 호	7/4
			②	93.3		
			③	96.3		
			④	99.2		
			⑤	94.2		
			평균	96.1		







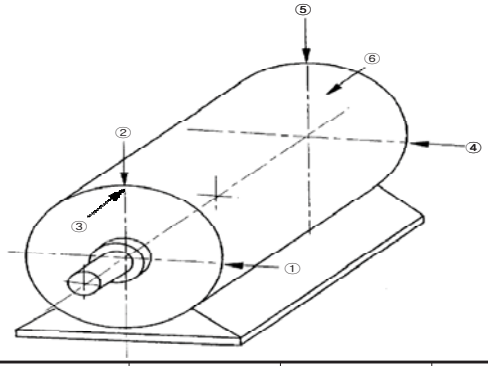




부품제작 검사성적서

순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치	결 과	비고
9	진동시험	가속계를 베어링(부하측, 반부하측) 부근에 부착 후 전동기를 회전시켜 수직, 수평, 축 방향의 속도레벨을 측정한다. 회전속도는 600rpm부터 구동하여 600rpm씩 4100rpm까지 측정하여 아래 기준치를 만족하여야 한다.	아래 표 참조	양 호	7/3

회전수(rpm)	속도레벨(mm/s)	비고
600 ~ 3600	3.5 이하	
4100	5.25 이하	



회전수(rpm)	기준	①	②	③	④	⑤	⑥
600	3.5mm/s 이하	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
1200		0.5	0.3	0.6	0.6	0.3	0.7
1800		0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4
2400		1.3	0.3	0.7	0.6	0.3	0.6
3000		1.1	0.8	0.6	1.2	0.7	1.5
3600		2.6	0.6	2.3	3.4	1.4	2.0
4100	5.25mm/s 이하	3.1	1.4	2.7	3.9	1.1	3.1





부품제작 검사성적서

순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치		결 과	비고
10	절연저항 측정	전동기 고정자 권선과 접지단자(프레임) 사이를 1000V 절연저항계로 절연저항을 측정하여 200㏁ 이상이면 양호로 한다. 측정은 내전압 전 후에 각각 실시한다.	내전압 전	20.6 GΩ	양 호	7/3
			내전압 후	9.05 GΩ		
		기후 조건	날씨: 맑음	온도:	습도:	

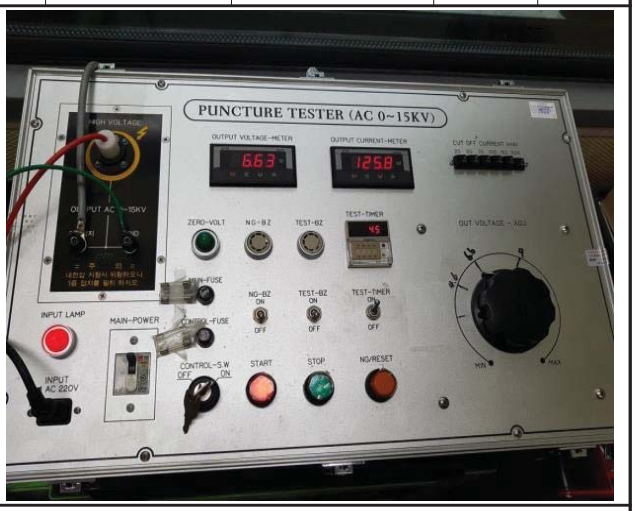






순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치		결 과	비고
11	내전압 시험	전동기 고정자 권선과 프레임 사이에 AC 6600V를 1분간 인가한 후 전동기를 확인하여 이상이 없으면 양호로 한다.	이상유무	이상없음	양 호	7/3
			누설전류	125.8 mA		

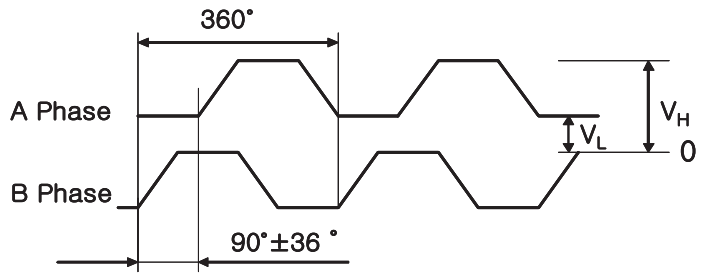






부품제작 검사성적서

순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치(회전수)			결 과	비고
12	속도센서 출력파형 측정시험	부하 상태에서 한 방향으로만 정현파 전원을 인가하여 30rpm에서 시험을 실시한다. DC 10V를 인가하여 아래와 같이 A, B상의 파형을 측정한다. A, B 속도센서에 대한 출력 파형의 위상차는 90°± 36°범위 이어야 하고 상한치 (V_H)는 7.5V 이상, 하한치(V_L)는 1V 미만이면 양호로 한다. 동일한 입력 조건으로 1800rpm에서 상한치와 하한치만 측정을 하고 기준은 30rpm과 동일하다.	30 rpm	상한치	9.4	양 호	7/3
				하한치	0.5		
				위상차	117.18		
			1800 rpm	상한치	9.4		
				하한치	0.5		
				위상차	0.0		

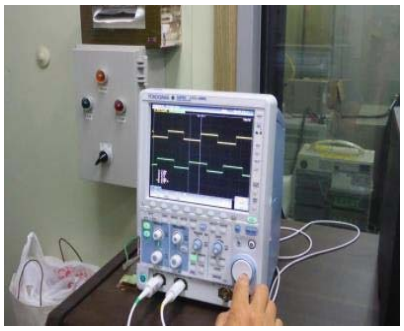


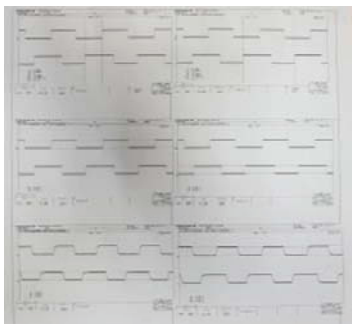










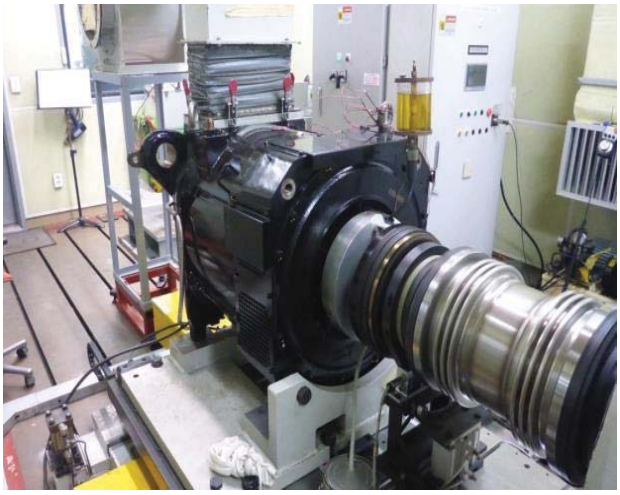


부품제작 검사성적서

순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치(속도별)		결 과	비고
13	부하시험	특성시험 조건으로 시험을 실시하며, 시험은 각각의 항목별 규정된 입력 조건에서 실시한다. 측정토크값은 역행 특성곡선의 견인력 따른 토크 규정 값의 95% 이상이어야 한다.	100km/h	6763	양 호	7/5
			140km/h	6386		
			180km/h	6238		
			220km/h	5153		
			240km/h	4772		
			300km/h	3816		
			310km/h	3618		
			350km/h	3221		

전압(V)	전류(A)	RPM	규정토크 (N-m)	토크 하한치 (N-m)	비 고
992	535	1128	6309	5993	속도 100km/h의 최대토크
1389	515	1579	6074	5770	속도 140km/h의 최대토크
1786	496	2030	5839	5547	속도 180km/h의 최대토크
2183	405	2481	4777	4538	속도 220km/h의 최대토크
2183	405	2706	4379	4160	속도 240km/h의 최대토크
2183	405	3383	3503	3328	속도 300km/h의 최대토크
2183	405	3552	3337	3170	속도 315km/h의 최대토크
2183	405	3947	3003	2853	속도 350km/h의 최대토크

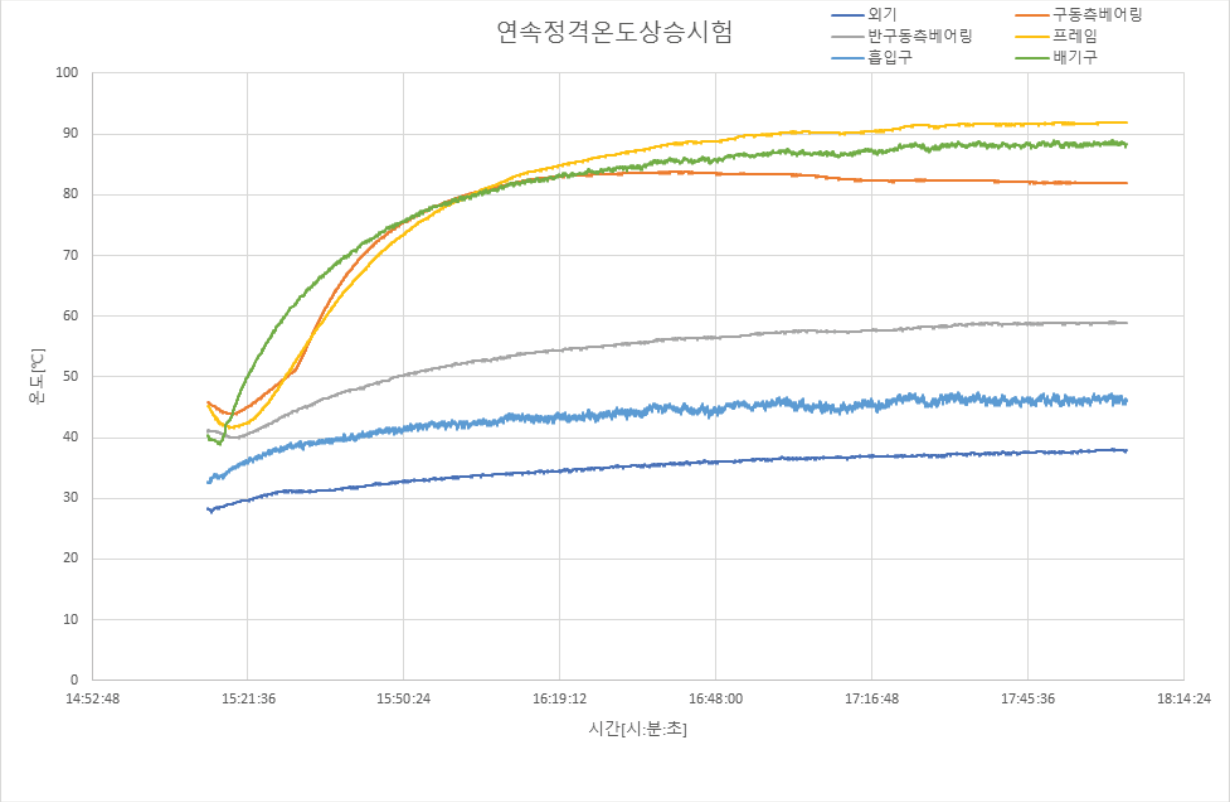




부품제작 검사성적서

순	검사항목	검사방법 및 판정기준	측정치(위치별)		결 과	비고
14	연속정격 온도상승 시험	전동기의 냉각 풍량을 1.25㎥/sec 이상으로 하고 정격전압 2183V, 정격전류 391A, 정격주파수 136.5Hz를 인가하여 권선의 온도가 일정하게 될 때 까지 연속으로 운전하여 고정자 권선의 온도가 아래 표의 기준을 만족하면 양호로 한다.	주위온도	41.9 ℃	양 호	7/5
			코일	149.4 K		
			프레임	91.8 ℃		
			부하측 베어링	82 ℃		
			반 부하측 베어링	59 ℃		
			흡입구	46.1 ℃		
			배기구	88.4 ℃		

측 정 위 치	온도 상승 한도	측 정 방 법	비 고
고정자 권선	200K 이하	저항법	
베어링	95K 이하	온도계법	반부하측 베어링 커버에서 계측

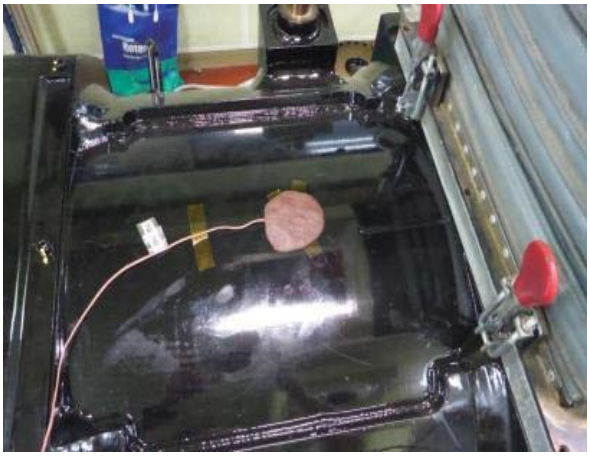


부품제작 검사성적서

연속정격 온도상승시험













REMARK :