

15CTA
P-C09
8410-
0

발 간 등 록 번 호

11-1613000-002015-01

철도 및 자가발전 시스템 개발 고분자 최종보고서
2017 국토교통과학기술진흥원

Land Infrastructure and Transport
R&D Report

철도 진동소음 저감형 고분자 압전소재 및 자기발전 시스템 개발 최종보고서

2017. 6. 23.

주관연구기관 / 배재대학교
공동연구기관 / 대한폴리텍

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

‘철도 진동소음 저감형 고분자 압전소재 및 자가발전 시스템 개발’(연구개발 기간 : 2015. 6. 24. ~ 2017. 6. 23.) 과제의 최종보고서 15부를 제출합니다.

2017. 6. 23.

주관연구기관명 : 배재대학교 산학협력단 최창원

참여기관명 : 대한폴리텍(주) 이우석, 이종관

주관연구기관책임자: 임유진

참여기관책임자: 황문선

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C0984 10-01	해당 단계 연구 기간	2015. 06. 24 ~ 2017. 06. 23	단계구분	총단계
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	철도 진동소음 저감형 고분자 압전소재 및 자가발전 시스템 개발			
연구책임자	임 유 진	해당단계 참여 연구원 수	총: 18 명 내부: 18 명 외부: 0 명	해당단계 연구개발비	정부:400,000천원 기업:140,000천원 정부 외: 0 천원 계: 540,000 천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 18 명 내부: 18 명 외부: 0 명	총 연구개발비	정부:400,000천원 기업:140,000천원 정부 외: 0 천원 계: 540,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	배재대학교 건설환경 · 철도공학과			참여기업명 대한폴리텍	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수 P	

- 철도궤도는 고속 주행하는 중량 차량을 안전하게 안내(유도)하고 지지하는 구조물로서 일반적으로 상당한 크기의 진동을 유발함.
- 철도진동에 대한 대책공법은 주로 1)궤도에 직접 적용하는 기술인 레일패드, 방진패드 및 방진슬래브 또는 방진매트 등의 자재나 공법을 이용하는 기술과 2) 궤도근접지에 방진구 및 방진재, 방진벽을 설치하기 위한 설계 및 공법개발이 주로 이루어져 현장에 적용되고 있음
- 특히, 궤도에 직접 적용하는 방진(진동저감)기술은 1)방진침목시스템, 2)플로팅시스템, 3) 매입형 레일 시스템 및 4) 방진체결 시스템 등으로 구분할 수 있음
- 그러나, 현재 일반적으로 사용되는 방진패드는 궤도강성 조정 및 진동저감 외에 별도의 기능을 발휘하지 못하고 있음. 궤도 각부를 구성하는 레일, 체결구, 침목, 패드 등은 중량의 철도차량에 의해 높은 하중을 반복적으로 받음. 이러한 각 궤도구성품을 압전소자가 매립된 패드, 매트 및 침목 등으로 개발함으로써 열차주행에 의한 진동을 저감시키는 기술과 압전소자 등 에너지 수확장치에 의한 발전을 동시에 이루는 복합기술은 고부가가치 신기술이 되어 새로운 산업수요를 창출할 수 있음.
- 특히, 대도시 주요 교통수단으로 채택되고 있는 도시철도(지하철)와 향후 국내에 본격 도입되는 노면전차(트램)는 주행차량에 의해 발생하는 진동과 소음이 도시 주거환경을 침해하는 빈도가 높아 이를 저감할 필요성이 높아지고 있으며 차량 주행횟수가 매우 높은 점을 이용하면 진동저감과 동시에 압전소자 등을 활용한 자가발전 시스템은 매우 효과적인 에너지수확 장치가 될 수 있음

1. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	- 철도궤도 진동에 기반한 압전소자 이용, 자가발전 시스템 개발 - 철도궤도 진동소음 저감형 고분자 재료 압전소재 개발 - 압전소재 활용 철도변 위치 파악 및 궤도 안전진단 모니터링 기술 개발 - 적층 또는 삽입구조 형태의 압전소재를 개발하여 방진 및 압전 성능이 뛰어난 철도레일용 고내구성 방진·압전 복합패드 개발 - 압전소자를 이용한 자가 발전시스템은 압전소자 고유 특성과 압전소자가 장착되는 환경에 의해 동작특성이 정해지므로 효율적인 자가발전을 위한 압전소자 이용 자가발전 동작 모델 및 자가발전시스템 개발 - 압전소자를 활용한 열차 속도, 무게, 압력(응력), 위치 등을 모니터링 할 수 있는 궤도 안전진단 및 검측 보조시스템 개발				
연구개발성과	- 고분자 압전소재 레일패드 개발 - 궤도 안전진단 모니터링을 위한 시스템 설계 및 기본 모듈 제작 - 압전소자 이용 자가발전 기본 시스템 개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 활용계획 - 진동소음 저감형 자가발전 시스템의 기존선 철도구간 적용 - 진동소음 저감형 자가발전 시스템의 신규선 철도구간 적용 - 압전소재 활용 궤도 진단모니터링 시스템의 기존선 및 신규선 철도구간 적용 - 진동소음 저감형 압전소재 및 자가발전 시스템의 상용화 및 해외수출 ○ 기대효과 - 철도궤도진동을 활용한 경제적 전기 에너지원 생산 - 신재생 에너지에 대한 수요가 큰 지역과 전력 인프라 상황이 열악한 동남아 등의 국외시장 진출 가능				
핵심어 (5개 이내)	자가발전	고분자 압전소재	철도궤도	진동	패드

< SUMMARY >

Purpose & Contents	- Development of rail pad composed of PZT films to generate electricity using rail structure vibration - Development of new rail pad based on PZT film and newly mixed PU materials for reducing railway track's noise and vibration - Development of monitoring technique to detect a position on railway track using PZT based railway pad - Development of durable rail pad that can reduce railway vibration and generate electricity efficiently - Design a efficient circuit composed of PZT based rail pad to generate electricity - Design for a subsidiary system based on new rail pad composed of PZT film in order to detect safety and to monitor rail car velocity, weight, pressure and position alongside track				
Results	- Newly developed rail pad composed of PU and PZT film - A basic deign and module construction for monitoring safety condition of track based on new rail pad with PZT film - A basic circuit design for generating electricity				
Expected Contribution	○ Application Plan - Application of new rail pad to existing railways - Application of new rail pad to newly railways to be built - Application of new monitoring system using rail pad with PZT to monitor existing and new railway track's condition - Export the newly developed system to other foreign countries under developing ○ Effectiveness - Energy harvesting using railway track vibration - Export the developed technology of energy harvesting to east asian countries under developing				
Keywords	energy harvesting	polymer piezoelectric material	railway track	vibration	pad

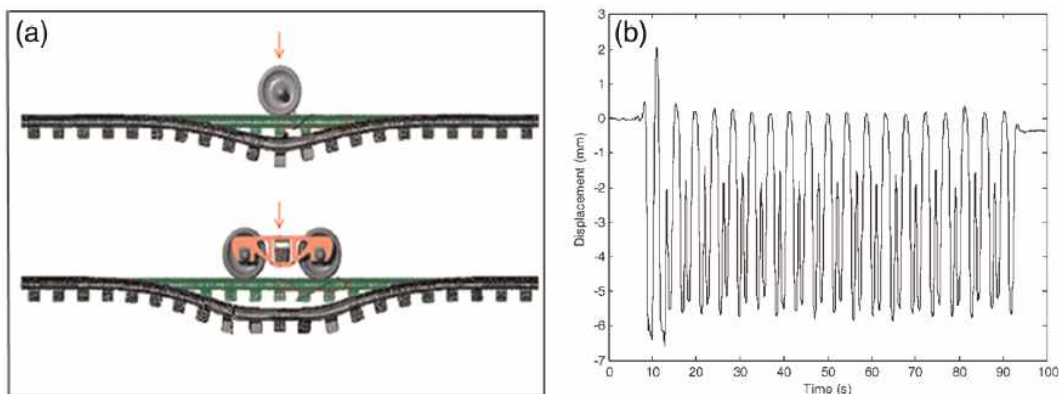
〈 목 차 〉

제 1 장 연구개발과제 개요	1
제 1 절 연구개발의 목적	1
제 2 절 연구의 필요성	2
제 2 장 국내외 기술개발 및 사례조사	7
제 1 절 압전소자 종류 및 에너지 하베스팅 관련기술 연구현황 조사	7
제 2 절 압전소자를 이용한 제품개발 및 적용사례 조사	19
제 3 절 철도시설물 궤도 진동 특성 및 운용기준	23
제 4 절 철도 궤도상태 모니터링 장비 및 기법조사	52
제 5 절 국내외 철도시설물 현황 및 기술기준	68
제 6 절 관련분야 유사특허 및 기술조사	91
제 3 장 연구수행 내용 및 성과	80
제 1 절 진동저감형 고분자 압전 소재 레일패드 개발 내용 및 성과	80
제 2 절 압전소자 이용 자가발전 시스템 개발 내용 및 성과	104
제 3 절 궤도 안전진단 모니터링 기술 개발 내용 및 성과	117
제 4 절 철도 압전소자 레일패드를 활용한 궤도안전진단 시스템 성능평가	171
제 4 장 목표 달성도 및 관련분야 기여도	225
제 1 절 질적성과 달성도	225
제 2 절 양적성과 달성도	226
제 5 장 연구개발성과의 활용계획	228
제 6 장 기타사항	230
제 1 절 연구과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	230
제 2 절 연구개발성과의 보안등급	230
제 3 절 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	230
제 4 절 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	230
제 7 장 참고문헌	232

제 1 장 연구개발과제 개요

제 1 절 연구개발의 목적

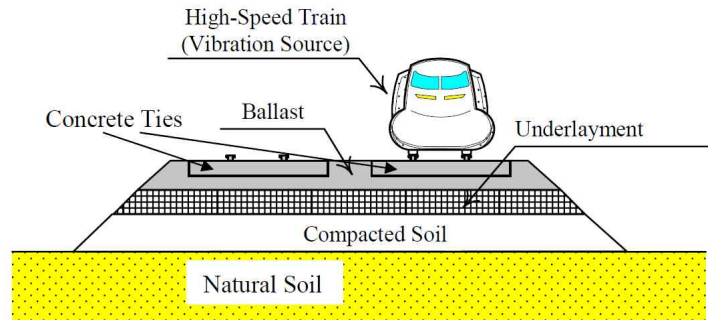
- ‘철도 궤도진동 저감형 고분자 압전소재 개발 및 이를 이용한 자가발전시스템’은 기 생산된 압전소자 가운데 철도궤도의 진동 메카니즘에 가장 적합한 압전소자를 발굴하고, 해당 압전소자에 고분자 폴리머 재료를 적용하여 진동소음을 줄이면서도 발전효율을 최적화시키는 기술을 개발하는 것임.
- 이와 같은 기술개발을 위해서는 레일패드에 가장 적합한 폴리머재료를 개발할 뿐만 아니라 개발된 폴리머재료를 기존 압전소자와 적층형으로 구성 또는 압전소자를 폴리머층 내에 삽입하는 압전소재 최적화 설계 및 제작기술이 요구됨.
- 이러한 철도 궤도진동 저감형 고분자 압전소재 개발 및 이를 이용한 자가발전시스템은 국내에서는 유사연구가 없는 실정이며 특히, 국외의 경우에도 진동 저감과 압전소자를 이용한 자가발전을 함께 이루는 기초원천 기술개발 사례가 없는 것으로 판단됨.
- 여기에 철도진동 기반 압전소자 발전시스템은 레일과 회로의 특성을 활용할 경우, 최근 문제가 되고 있는 철도사고를 미연에 방지할 수 있는 철도안전 진단(모니터링) 시스템으로 활용할 수 있음.
- 특히, 침목의 균열과 레일의 변위발생(궤도틀림)을 미연에 탐지하여 진단할 수 있는 시스템으로 기능하는 장점이 있음. 이는 궤도 검측차량을 이용한 진단시스템보다 사전에 궤도의 이상상태를 감지할 수 있다는 측면에서 보다 진전된 기술이라고 할 수 있음.
- 이러한 철도안전 진단 시스템은 노령화에 따른 현장 실 검측기술인력 부족을 보충할 뿐만 아니라 정밀한 궤도검측시스템의 보조수단으로서 활용할 수 있음.



<그림 1-1> 차량 주행시 궤도의 진동에 따른 변위발생 패턴(Bowness et al., 2007)

제 2 절 연구의 필요성

- 철도궤도는 고속 주행하는 중량의 차량을 안전하게 안내(유도)하고 지지하는 구조물로서 일반적으로 상당한 크기의 진동을 유발함.



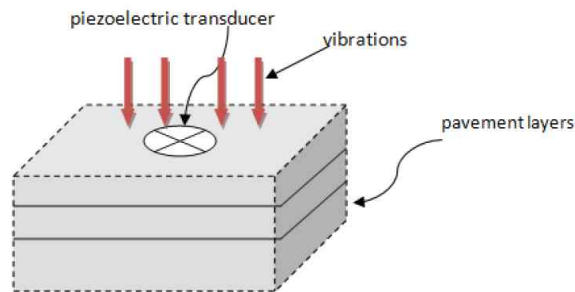
<그림 1-2> 철도차량 주행이 궤도에 발생시키는 진동과 궤도구성체 각부

- 철도진동에 대한 대책공법은 주로 1)궤도에 직접 적용하는 기술인 레일패드, 방진패드 및 방진슬래브 또는 방진매트 등의 자재나 공법을 이용하는 기술과 2)궤도근접지에 방진구 및 방진재, 방진벽을 설치하기 위한 설계 및 공법개발이 주로 이루어져 현장에 적용되고 있음.
- 특히, 궤도에 직접 적용하는 방진(진동저감)기술은 1)방진침목시스템, 2)플로팅 시스템, 3) 매립형 레일 시스템 및 4) 방진체결 시스템 등으로 구분할 수 있음 (그림 참조).



<그림 1-3> 궤도에 직접 적용하는 현행 방진기술

- 그러나, 현재 일반적으로 사용되는 방진패드는 진동저감 외에 별도의 기능을 발휘하지 못하고 있음. 궤도 각부를 구성하는 레일, 체결구, 침목, 패드 등은 중량의 철도차량에 의해 높은 하중을 반복적으로 받음. 이러한 각 궤도구성품 중, 압전소자가 매립된 패드, 매트 및 침목 등을 개발하고자 하며, 특히, 이러한 압전소재를 활용, 열차주행에 의한 진동을 저감시키는 기술과 압전소자 등 에너지수확장치에 의한 발전을 동시에 이루는 복합기술은 매우 고부가가치 신기술이 되어 새로운 산업수요를 창출할 수 있음.



<그림 1-4> 압전소자가 매립된 포장구조의 발전 메카니즘

- 특히, 대도시 주요 교통수단으로 채택되고 있는 도시철도(지하철)와 향후 국내에 본격 도입되는 노면전차(트램)는 주행차량에 의해 발생하는 진동과 소음이 도시 주거환경을 침해하는 빈도가 높아 이를 저감할 필요성이 높아지고 있으며 차량 주행횟수가 매우 높은 점을 이용하면 진동 저감과 동시에 압전소자 등을 활용한 자가발전 시스템은 매우 효과적인 에너지수확 장치가 될 수 있음.



<그림 1-5> 전차선과 궤도 설치 개요도

- 이러한 자가발전 시스템은 노면전차 및 도시철도 뿐 아니라 축중이 무거운 고속철도와 일반철도에도 적용분야를 확대할 수 있으며 상대적으로 노선이

길어 발전량의 규모를 더욱 키울 수 있음. 특히, 국토교통부에서는 2011년 국가 통합교통체계효율화법에 의거해 국가기간교통망계획(2001~2020) 제2차 수정 계획을 확정 고시하였으며 이에 따르면 철도분야에서는 X자형과 □자형의 국가 철도망을 구축할 계획으로 현재 건설·운영 중인 노선은 230km/h급으로 고속화, 계획·설계 중인 노선은 250km/h급으로 준고속화 하는 주요 내용으로 고시하여 고속화에 따른 궤도의 안전성문제와 진동발생은 피할 수 없는 당면 과제가 되고 있음.

(가) 경제적 측면

- 환경 등 삶의 질을 중요시 하는 현 추세를 고려하여 진동과 소음을 줄이면서 에너지수확에 의한 자가발전을 도모 하는 기술은 첨단기술로서 이를 활용하는 새로운 시장이 개척될 수 있음.
- 철도진동소음 저감과 압전기능을 활용하는 발전된 궤도시스템의 개발 및 이러한 시스템의 사업화와 국내 철도 에너지수확 관련 새로운 기계부품 및 모듈의 사업화를 도모할 수 있음.
- 또한, 해외 철도시장에서 관련산업을 선점할 수 있으며 신규 고부가가치 시장을 창출할 수 있음.

(나) 기술적 측면

- 철도 진동 저감과 압전기능을 갖는 새로운 궤도소재를 개발하여 소재부분의 발전을 유도할 수 있으며, 압전소재를 활용한 자가발전 시스템은, 압전소재의 고유 기능을 사용하면 침묵의 균열과 궤도의 틀림(변위) 등 궤도의 안전상태를 진단할 수 있는 모니터링 시스템으로도 기능할 수 있음.
- 이는 최근 문제가 되고 있는 철도의 안전성 확보를 위한 획기적인 기술적 발전을 이루 수 있고 관련 사업을 개척할 수 있으며, 태양광 에너지와는 달리 날씨의 영향을 받지 않으며 철도교통주행이 이루어지는 곳은 어디에나 적용할 수 있는 장점이 있음.

(다) 사회적 측면

- 공유지로서 부지확보가 용이한 철도는 진동에너지를 차용하여 에너지 수확 발전 시스템을 개발할 수 있으나 이에 대한 연구가 국내에서는 전무한 실정으로 철도 중심의 안전한 녹색 교통체계 구축을 위한 철도 경쟁력 향상 필요.

3. 연구개발 범위

가. 연구개발 최종목표

- 철도궤도는 고속 주행하는 중량의 차량을 안전하게 안내하고 지지하는 구조물로서 상당한 크기의 진동을 유발함에 따라 진동의 저감과 궤도 안정성 확보를 목적으로 레일패드, 방진패드 및 방진슬래브, 매트 등의 자재와 공법을 이용하는 기술이 적용되고 있음.
- 본 연구는 일반적인 방진패드 등을 대체할 목적으로 궤도구조에 압전소자가 매립된 고분자 압전소재(패드 등)를 개발하여 열차주행에 의한 진동저감과 압전소자 활용 자가발전장치에 의한 발전 및 궤도진단 모니터링 복합기술을 개발하는 것이며, 고부가가치 신기술이 되어 새로운 산업수요를 창출할 수 있을 것으로 판단함.
- 이를 위해, 개발된 압전소재형 방진패드로 제작된 궤도 모형 시험체를 구성하여 반복하중재하시험을 통한 실효성, 내구성 및 안정성 시험을 실시함.
- 세부 연구목표는 다음과 같이 크게 세 영역으로 구분함
 - ① 철도궤도 진동을 활용하는 압전소재 이용 궤도패드형 자가발전시스템 개발
 - ② 철도궤도 진동소음 저감을 위한 고분자재료 압전소재 개발
 - ③ 압전소재 활용 철도변 위치 파악 및 궤도 안전진단 모니터링 기술 개발

나. 연차별 연구목표 및 내용

연차	연구목표	세부추진내용
1차 년도	■ 진동저감형 고분자 압전 소재 개발	- 국내외 압전소자 적용 사례 조사 - 압전소자 종류 및 성능 조사 - 철도궤도 진동 발생저감을 위한 고분자 재료 방진패드 합성 완성 - 진동발생 저감형 압전소재(압전소자+고분자재료) 기본 모형 개발 - 압전소자와 결합한 압전소재형 방진패드 성형물 개발
	■ 압전소자 이용 자가 발전 시스템 모델링	- 진동저감형 자가발전 시스템 기본 모형 설계 - 압전소재 활용 자가발전형 패드의 궤도상 최적설계
	■ 궤도 안전진단 모니터링 기술 개발	- 기존 궤도 모니터링 기법 자료 조사 - 압전소자 회로망 구성 설계 - 압전소자 기반 궤도모니터링 기술 기본모형 개발 - 패드적용시 철도 차량하중에 의한 진동 발생 동적 거동 분석

연차	연구목표	세부추진내용
2차 년도	■ 진동저감형 고분자 압전 소재 개발	- 진동 발생저감을 위한 고분자 재료 시제품 개발 - 진동발생 저감형 압전소재 (압전소자+고분자재료) 시제품 개발 - 신 개발된 진동발생 저감형 패드를 적용한 동적 거동 분석
	■ 압전소자 이용 자가 발전 시스템 모델링	- 패드형 압전소자를 이용한 전하 펌프 테스트 - 압전소자 자가발전 시스템 제작 - 압전소자 자가발전 시스템 테스트 - 진동저감형 자가발전 시스템 mock-up 테스트
	■ 궤도 안전진단 모니터링 기술 개발	- 압전소재 활용 자가발전형 패드, 매트 및 침목의 궤도상 최적설치 위치 설계 완성 - 압전소자 기반 궤도모니터링 기술 모형 개발 - 궤도상 차량위치과악, 하중, 침하 모니터링 과악 회로망 모형구성

다. 추진전략

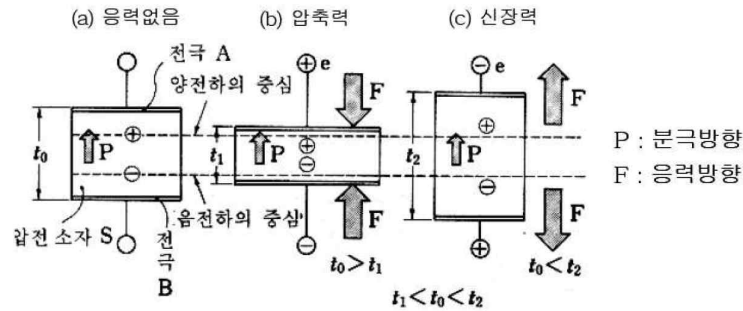
- 주관연구기관 내에 3개의 팀을 구성하고 핵심기술개발의 영역을 구분, 공동개발 연구영역은 별도로 설정함. 주관 개발팀은 (1)진동저감형 고분자 압전소재 개발, (2)압전소자이용 자가발전시스템 개발, (3)궤도모니터링 개발로 구성하여 수행함.
- 1차년도에는 자료의 수집과 분석, 기존 압전소자 개발현황 파악, 진동저감형 압전소재 개발 및 압전소재 활용 회로망 구성과 진단 모니터링 기초모듈개발에 집중하고 2차년도에 철도궤도 진동특성에 적합한 최적 압전소자를 활용하여 제작된 압전소재(압전소자+폴리머) 사용 패드를 구성품으로 하는 궤도모형체를 시험 제작하고 가력시험 등 각종 소요시험을 실시함.
- 압전소재 사용 모듈의 효율 증가를 위한 최적 배치위치를 분석하고 배치위치와 모듈의 특성(크기, 모양, 탄성계수, 댐핑계수 등)이 궤도의 안정성에 미치는 영향과 완성된 압전소재 활용 회로구성 및 궤도안전 진단 모니터링기술 모형설계 시안을 활용하여 mock-up체를 제작하고 실내 토조에 부설하여 소요시험을 실시함
- 본 기술개발의 추진에 있어 가장 큰 어려움은 각 전공교수의 타 전공분야 교수 담당부분에 대한 이해와 담당업무 부분의 상호연계성에 대한 것일 것이며 이를 극복하기 위하여 주별, 월별 미팅을 상례화 하고 이를 통해 상호 정보교환을 수시로 실시하며 정기적 의사교환과 각종 정보 교환을 수시로 실시함.

제 2 장 국내외 기술개발 및 사례조사

제 1 절 압전소자 종류 및 에너지 하베스팅 관련기술 연구현황 조사

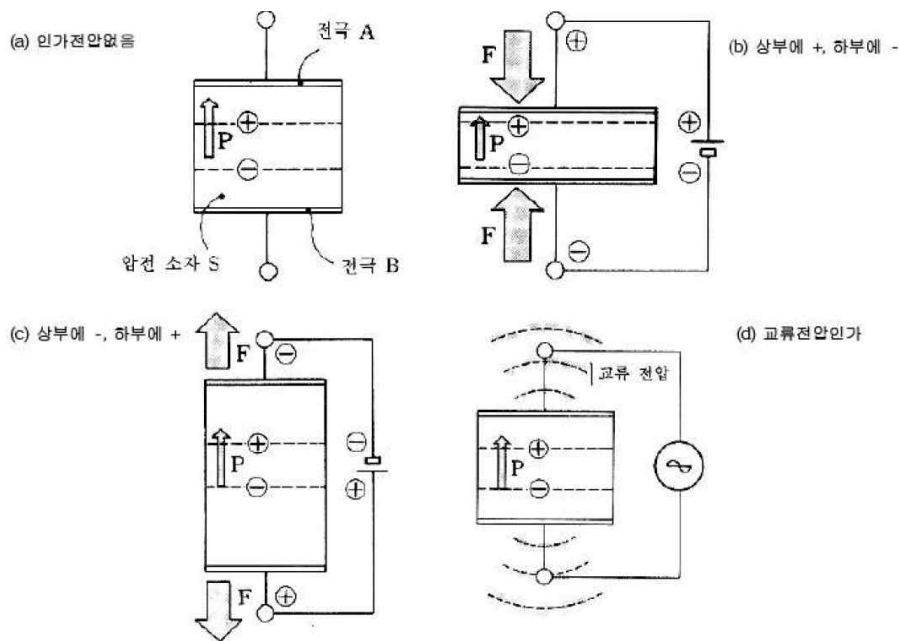
1. 압전소자의 개요

- 일반적으로 고체물질은 원자나 이온이 규칙적으로 배열되어 있으며, 이러한 배열이 3차원적으로 된 것을 결정이라 하고, 이러한 결정에 전계를 인가하면, +, -의 전하가 전계에 대하여 역 방향으로 변위되기 때문에 결정 중에 기계적인 변형이 수반됨.
- 이 현상을 전기왜곡(전왜, electro-striction)현상이라 하며 전계의 방향을 변화시켜도 전기왜곡은 변화되지 않으며, 역으로 결정에 기계적인 응력을 가하면 결정격자내의 전하의 위치를 변화 시킬 수가 있지만, 만약 격자가 대칭중심을 가지고 있으면 그 대칭성 때문에 분극이 나타나지 않음.
- 그러나 대칭 중심이 없는 결정족에서는, 물론 하나의 예외(점군 432)는 있지만, 기계적인 응력에 의해 분극이 발생하고 이것을 압전효과라 함.
- 압전이란 Piezo라는 이름의 기원은 그리스 Piezein이며, 짜다 또는 압축이라는 의미를 가지고 있음.
- 압전소자는 1980년 Pierre Curie, Jacques Curie 형제가 최초로 발견하였으며, 이를 계기로 현재까지 지속적인 압전소자 개발 및 소재 개발 연구가 진행 되고 있음.
- 압전소자란 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 압전 직접효과(piezoelectric direct effect)와 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 압전 역효과(piezoelectric converse effect)를 갖는 기능성 재료를 말함.
- 압전 직접효과라고 하는 것은 전압발생 기능으로 압전 소자에 외부응력, 진동변위 등을 주면 그 출력단에 전기 신호가 발생하는 현상을 말하며, 착화용 압전소자나 각종 센서에 응용됨.
- 또한, 역압전 효과는 변위 발생 기능으로 압전 소자에 외부로부터 전압을 걸어주면 소자가 기계적 변위를 일으키는 현상을 말하며, 액츄에이터 등에 응용됨.
- 아래 그림은 압전 직접효과를 나타낸 것으로 (a)와 같이 압전소자에 외부응력이 없는 상태에서는 출력 전압이 발생하지 않다가, (b)와 같이 F의 압축력을 가하면 상하의 전극에 각각 (+), (-)의 전압이 발생하고 소자 두께는 감소되며, 반대로 (c)와 같이 신장력 F를 가하면 상하의 전극에 각각 (-), (+)의 전압이 발생함.극에 각각(-), (+)의 전압이 발생함.



<그림 2-1> 압전 직접효과 모식도

- 아래 그림은 압전 역효과를 나타낸 것으로, 여기서는 직류와 교류전압을 인가한 경우의 기본 작동을 각각 나타내고 있다. (a)와 같이 압전 소자에 외부로부터 구동전압이 인가되어 있지 않은 상태에서는 전혀 변위를 나타내지 않으며 (b)와 같이 상부에 전원의 (+)극을, 또 하부에 전원의 (-)극을 각각 인가하면, 압전 소자의 내부 전하와 인가 전압이 반발을 일으켜 압전 소자는 압축현상을 나타냄.
- 이와 반대로 (c)는 상부에 전원의 (-)극을 또는 하부에 전원의 (+)극을 인가하면, 압전 소자의 내부 전하와 인가 전압의 인력으로 인해, (b)와는 달리 압전 소자가 팽창 현상이 나타남에 따라 (d)와 같이 교류 전압을 인가하면 그 주파수에 대응한 초음파 에너지가 방사되고, 이러한 현상을 활용한 것이 초음파 진동자임.



<그림 2-2> 압전 역효과 모식도

2. 압전소자의 특성

가. 압전소자의 소재에 따른 분류

- 압전소자는 여러 종류가 있고, 각각의 제품이 필요로 하는 재료 특성이 다른데, 예를 들면, 버저(buzzer) 소자에서는 전기기계결합계수만 높으면 다른 정수는 거의 문제가 안 되지만 음질을 요구하는 압전 스피커(speaker) 등과 같은 경우에는 고 유전율과 기계적인 강도도 필요함.
- 또한 강력 초음파 진동자 혹은 압전 변압기 소자 등에서는 같이 발열현상이 수반되는 고 전력 응용 소자에서는 기계적 품질계수가 높은 재료가 필수적이며, 필터(filter)나 공진기(resonator)에서는 공진 주파수의 온도변화가 ppm단위로 제어되지 않으면 아니 됨으로, 사용되는 용도에 따라 요구되는 적용 재료인자 선정이 중요함.
- 압전소자로 응용되고 있는 소재는 단결정 및 다결정 세라믹스, 고분자 재료, 박막재료, 다결정재료와 고분자 재료를 복합한 복합재료로 나눌 수 있으며, 구체적인 소재와 특징을 아래 표에 정리함.
- 압전 단결정은 인공적 또는 자연적으로 단결정으로 성장되어 압전특성을 나타내는 소재이며, 종류로는 α -AlPO₄(Berlinit), α -SiO₂(Quartz), LiTiO₃, LiNbO₃, SrxBayNb₂O₈, Pb₅-Ge₃O₁₁, Tb₂(MoO₄)₃, Li₂B₄O₇, CdS, ZnO, Bi₁₂Si₂O₂₀, Bi₁₂Ge₂O₂₀ 등이 사용됨.
- 이 중 가장 대표적으로 사용되는 수정은 공진주파수의 대역폭이 좁고 온도계수가 매우 작아 신호주파수를 발생시키는 오실레이터(oscillator)소자로 사용되며, 가격이 비싸고 전기기계결합계수가 작다는 단점을 가지고 있어 응용분야가 제한됨.
- LiNbO₃와 LiTaO₃ 단결정은 ZnO 박막소재 등과 같이 탄성표면파(SAW : Surface Acoustic Wave) 필터로 응용됨.
- 압전세라믹은 압전분말의 고온 소결로 제조되는 다결정 압전소재로 종류로는 PZT계, PT계, PZT-Complex Perovskite계, BaTiO₃ 등이 있으며, PZT계 세라믹스는 가공성이나 제반 압전특성이 우수하고 가격이 저렴하여 초음파 진동자, 필터, 레조네이터, 착화소자 및 센서 등에 가장 널리 응용됨.
- 또한, 압전 박막은 ZnO, CdS, AlN 등이 있는데 AlN, ZnO등의 소재는 새롭게 연구되고 있는 GHz 대역 FBAR(Film Bulk Acoustic wave Resonator) Band pass Filter 재료로 응용됨.
- 압전고분자는 응력에 따라 분극이 발생하는 압전소재로 종류로는 PVDF, P(VDF-TrFe), P(VDFTeFe), TGS 등이 있으며, 압전복합재료는 PZT-PVDF, PZT-Silicon Rubber, PZT-Epoxy, PZT-발포 Polymer, PZT-발포 우레탄 등이 있으며, 고분자재료와 PZT계의 복합재료는 재료의 특성상 시트형태로

가공이 쉽기 때문에 각종 키보드나 수중 음향부품, 의료용 탐촉자 등에 주로 응용되고 있음.

<표 2-1> 압전소자의 소재에 따른 분류와 특징

구분	소재	적용분야
압전 단결정	α -AlPO ₄ (Berlinit), α -SiO ₂ (Quartz), LiTiO ₃ , LiNbO ₃ , Sr _x Ba _{1-x} Nb ₂ O ₈ , Pb ₅ -Ge ₃ O ₁₁ , Tb ₂ (MoO ₄) ₃ , Li ₂ B ₄ O ₇ , CdS, ZnO, Bi ₁₂ SiO ₂₀ , Bi ₁₂ GeO ₂₀	· 좁은 공진주파수 대역 · 매우 작은 온도계수 · Oscillator 소자와 탄성표면 필터등으로 응용
압전 세라믹	PZT계, PT계, PZT-Complex Perovskite계, BaTiO ₃	· 우수한 압전특성 · 저렴한 가격 · 초음파 진동자, 필터, 레조네이터, 착화소자 및 센서 등 가장 폭넓게 응용
압전 박막	ZnO, Cds, AlN	· 탄성표면과 필터와 GHz 대역 FBAR Band pass Filter 재료 등의 응용
압전 고분자	PVDF, P(VDF-TrFe), P(VDFTeFe), TGS	· 키보드, 수중 음향부품, 의료용 탐촉자 등의 응용
압전 복합재료	PZT-PVDF, PZT-silicon Rubber, PZT-Epoxy, PZT-발포 Polymer, PZT-발포 우레탄	

나. 압전고분자의 특징

- 압전고분자의 대표적인 종류로는 PVDF(Poly(vinylidene fluorid), PVDF-TrFe(Poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene)가 있음.
- PVDF(Poly(vinylidene fluorid)는 Vinylidene fluoride 단량체를 반복 단위로 하는 선형 고분자로 분자 내에 강한 쌍극자기에 의해 가장 큰유전율을 나타내는 물질.
- 유연한 특성과 열적 안정성, 화학적 저항성 등 뛰어난 재료적 우수성을 가지며, 분자 내의 쌍극자 배향에 따라 4가지 형태의 구조(α , β , γ , δ phase)를 갖음.
- 비교적 가공이 쉽고 가격이 저렴한 장점이 있으며, 큐리전이온도 이상에서 압전성이 사라지는 단점이 있음.
- PVDF-TrFe(Poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene)는 Vinylidene fluoride 와 Trifluoroethylene의 단량체를 이용한 합성된 고분자로 α , β phase의 결합 구조를 가짐.
- 낮은 유전율을 가지고 있어 다른 소재보다 우수한 압전 재료이며, 큐리전이온도 이상에서 압전성이 사라지는 단점이 있음.

○ 압전 고분자 PVDF, PVDF-TrFe의 결합 구조를 아래 표와 같이 나타낼 수 있음.

<표 2-2> PVDF,PVDF-TrFe의 결합 구조

구분	PVDF	PVDF-TrFe
α phase	· 비극성 타입의 구조이며 자발 분극을 갖지 않음.	· PVDF의 α phase 결정과 유사한 구조. · 큐리 온도(60 ~ 135℃)이상에서 형성.
β phase	· 극성 타입의 구조이며 자발 분극을 가지면서 압전성과 초전성을 지님.	· PVDF의 β phase 결정과 유사한 구조. · 자발 분극을 지님.
γ phase	· α phase에서 고온으로 열처리 공정을 하거나 화학적인 방법에 의해 형성. · 자발 분극을 지님.	
δ phase	· α phase에서 고전계(Polling) 공정을 통해 형성. · 극성을 띠면서 자발 분극을 갖음.	
PVDF Monomer $\begin{array}{c} \text{F} & & \text{H} \\ & \diagdown & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \diagdown \\ \text{F} & & \text{H} \end{array}$ Vinylidene fluoride Polymerization $\longrightarrow$ Polymer $\left[\begin{array}{cc} \text{F} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{F} & \text{H} \end{array} \right]_n$ Poly(vinylidene fluoride) PVDF-TrFe Monomer $\begin{array}{c} \text{F} & & \text{H} \\ & \diagdown & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \diagdown \\ \text{F} & & \text{H} \end{array}$ Vinylidene fluoride + Monomer $\begin{array}{c} \text{F} & & \text{F} \\ & \diagdown & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \diagdown \\ \text{H} & & \text{F} \end{array}$ Trifluoroethylene Polymerization $\longrightarrow$ Copolymer $\left[\begin{array}{cc} \text{F} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{F} & \text{H} \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{F} \end{array} \right]_y$ Poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene)		

○ 압전소자의 경우 대표적으로 높은 압전특성을 갖는 압전 세라믹을 많이 활용하여 많은 응용분야에 사용하지만, 세라믹의 특성상 반복적인 수축과 신장에 의해 크랙이 발생하기 쉬움.

○ 이러한 단점을 보완하기 위하여 압전 세라믹과 단결정 소재와 비교하여 압전 특성은 낮지만 고분자 특유의 특성인 탄성과 연성에 의해 응력에 대한 내구성이 우수하여 본 연구에서 압전 고분자를 활용하여 진동 저감형 압전소재 레일패드를 연구 개발 및 제작을 하려함.

3. 압전결정소자를 이용한 에너지하베스팅 기술 현황

- 압전에너지 하베스팅 기술은 2009년 MIT가 선정한 10대 유망기술, 2010년 미국의 과학 잡지 Popular Science가 선정한 세계를 뒤흔든 45가지 혁신 기술에 포함될 정도로 주목받는 기술로서 주위에서 버려지는 에너지를 획득하여 전기에너지를 생산할 수 있어서 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술로 불림.
- 압전에너지 하베스팅은 자동차 엔진의 진동, 사람이 걸으면서 바닥을 누르는 힘, 고속열차가 철로를 지날 때 생기는 진동, 자동차 바퀴가 도로를 누르는 힘, 떨어지는 빗 방울, 이 모두가 전력을 수확할 수 있는 자원이 되며, 원천 소재로부터 에너지 하베스터 구조물, 설계기술, 응용 별로 다양한 분야에 연구가 진행됨.
- 에너지 하베스팅 기술을 주도하고 있는 미국, 유럽, 일본등과 한국과의 관련 기술 특허 분포를 비교해 보면 “압전 발전 기술” 관련 특허 점유율의 경우, 일본은 대기업 주도의 다양한 특허를 확보하고 있어 현재 세계적으로 1위를 기록함.
- 미국의 경우, 1990년대까지 특허활동이 조금씩 이루어지다가, 2000년대 이후 활발한 특허활동 추이를 보이고 있으며, 최근 특허 활동이 급증함.
- 유럽의 경우는 전체적으로 출원 건수는 적으나, 1990년대 후반부터 특허 활동이 조금씩 활발하게 이루어지다가, 2000년대 들어서 미국과 유사한 활동이 이어짐.
- 국내의 압전 발전에 관한 기술 분야별 연도별 특허 출원 동향을 보면, 압전 소자 구조 기술은 27%, 차량 적용을 위한 모듈은 24%, 압전소자 재료, 물성에 관련한 기술은 23% 순으로 기술 분야별 고른 점유율을 보임.
- 압전소자 재료, 물성에 관한 기술 분야는 1990년대 중반에 집중적으로 출원이 이루어 졌지만, 소재의 개발이 상당한 성과를 거둔 이후 새로운 재료 또는 물성에 관한 연구보다는 디바이스 구현을 위한 제조 기술 쪽으로 연구의 방향이 상당히 전환되면서 소재, 물성에 관한 출원이 점차 줄어들고 있는 추세임.
- 에너지 하베스팅이나 변환 기술 분야에 관련된 특허 활동은 대체로 저조한 상태이며 현재 한국 내에서 타 기술에 비해 상대적인 공백 기술임.

4. 압전 하베스팅 기술의 최신 연구동향

가. 에너지 하베스팅 기술의 장점 및 한계

- 에너지 하베스팅 기술의 기술 성숙도, 효율, 청정도, 출력 값, 응용 분야를 비교해 보면 아래 표와 같이 나타낼 수 있음.

<표 2-3> 다양한 에너지 하베스팅 기술 비교

구 분	태양열	압전재료	마찰전기	열전재료
기술성숙도	○	×	×	×
효율	10~24%	25~50%	30~60%	5~10%
청정도	○	○	○	○
출력 값	100~300W	1 μ W~20mW	~1W	0.5mW~10Mw
응용분야				

- 이미 상용화가 진행된 태양 전지를 제외하면 나머지 기술들의 산업화 및 상용화는 아직 미미한 상황이며, 각각의 에너지 하베스팅 기술은 효율과 출력값에서 차이를 보이기 때문에 사용되는 분야에서도 상이하게 나타남.
- 출력 값이 높은 태양 전지의 경우 주로 배터리를 충전시키는 용도로 활용되며, 압전 재료의 경우 변환 효율이 높고 출력 값이 몇 mW 정도이기 때문에 체내 삽입형 의료기기 또는 무선 센서 노드 등에 적합할 것으로 보임.
- 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅은 출력 값이 높아 높은 전력이 요구되는 자가발전 센서에 주로 사용되며, 열전 재료를 이용한 에너지 하베스팅은 웨어러블 소자 및 인공피부, 센서 등에 사용되기 적합함.
- 페로플루이드를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 경우, 고형 자석이 아닌 나노수준의 영구 자기 쌍극자로 구성된 액체 구조를 사용하므로, 액체가 담긴 컨테이너에 따라 소자 형태가 바뀔 수 있으며, 체내 또는 기계 부품 내부 등 접근 불가능한 영역에 주입될 수 있다는 이점이 있음.
- 그러나, 앞서 설명했듯이 태양열을 이용한 에너지 하베스팅 기술은 날씨 및 장소에 제약을 받고, 오직 낮 동안에만 작동될 수 있으며 일몰 후 소자가 사용되기 위해서는 캐패시터나 배터리 등 추가적인 장치가 필요함.
- 마찰 전기를 이용한 경우 유기물 기반의 폴리머를 사용하기 때문에 습한 환경에서 구동성이 떨어지고 마모 저항이 낮은 단점이 있다. 따라서 마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 생명 공학 및 웨어러블 분야에 적용시키기 어려움.
- 열전재료를 이용한 에너지 하베스팅 분야에서는 $\Delta T=50K$ 에서 출력밀도가 28mW/g인 웨어러블 소자를 만들었다는 연구 성과가 있지만, 주변 온도와 인체의 온도 차가 50K보다 훨씬 낮기 때문에 발생하는 전류가 적어 에너지 변환 효율이 매우 낮음에 따라, 열전 재료를 웨어러블 기술에 적용하여 모바일 전기 소자를 충전하거나 구동하기 위해서는 현재보다 높은 변환 효율을 갖는 소자가 제작되어야 함.

- 페로플루이드(Ferrofluid)를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 출력 값이 매우 낮고 아직 개발 및 연구활동이 적어 특정 분야로의 응용보다는 효율 및 출력 값의 개선이 먼저 이루어져야 하는 상황임.

나. 압전재료를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 최신 연구 동향

- 유연 압전 에너지 하베스팅 소자가 처음 개발되었을 때 사용되었던 나노선 구조의 산화아연은 출력 값이 작기 때문에 현재는 주로 페로브스카이트(perovskite)형 재료를 사용함.
- 페로브스카이트(perovskite)형 재료인 BTO, PZT(lead zirconate titanate), PMN-PT는 산화 아연보다 압전 결합 상수(piezoelectric coupling constant, d_{33})가 각각 3, 25, 90배 크기 때문에 이 구조를 가진 물질을 기반으로 한 연구가 활발히 진행되었음.
- 2010년 이후에는 결정화된 BTO, PZT, PMN-PT의 페로브스카이트형 박막을 벌크형 기판에서 플라스틱 기판으로 압전 성질의 손실 없이 이동시켜 유연하게 만드는 연구가 보고됨.
- 플라스틱 기판으로 전사하는 방법 중 대표적인 방법인 Laser Lift Off(LLO) 공법, 니켈박리(Ni exfoliation)공법을 이용하면서, 유연 압전 에너지 하베스터의 출력 전압 및 전류는 급격히 향상되었음. 압전 재료를 형태에 따라 나노 합성물(Nanocomposite), 박막(Thin film)으로 구분하여 유연 에너지 하베스팅 소자에 대해서 설명할 것임.

(1) 나노 합성물을 이용한 유연 압전 에너지 하베스팅 소자

- 나노 합성물 발전기(Nanocomposite Generator, NCG)는 압전 물질인 BTO 나노입자와 MW-CNTs, SW-CNTs (Multi-walled and Single-walled Carbon nanotubes), RGO (Reduced Graphene Oxide)와 같은 흑연질 탄소를 PDMS (Polydimethylsiloxane)에 섞어 제조함.
- 이때 흑연질 탄소는 압전나노입자를 분산시키는 분산제 역할과, 압전 층을 단단하게 만드는 강화제 역할을 하여 출력전압과 전류를 증가시키고, 내부 저항을 낮추는 전도로(conduction path)를 제공하여 전압을 증가시키고 출력을 높임으로 제조된 NCG는 가격이 저렴하고 대면적이 가능하다는 장점이 있음.
- 후속연구에서는 BTO를 압전 성질이 우수한 PZT나 alkalineniobate (KLN) 입자로 바꾸는 동시에, 뭉치는 성질이 있는 흑연질 탄소를 반데르발스 결합이 약해 덜 뭉치는 금속 나노로드필러로 대체하여 효율을 증가시킴.
- 최근 연구에서는 실리콘 고무 폴리머에 PMN-PT를 압전 나노입자로, MWCNTs를 분산제 및 강화제로 섞어 사용하여 나노 합성물 압전소자를 만들었으며, 고무를

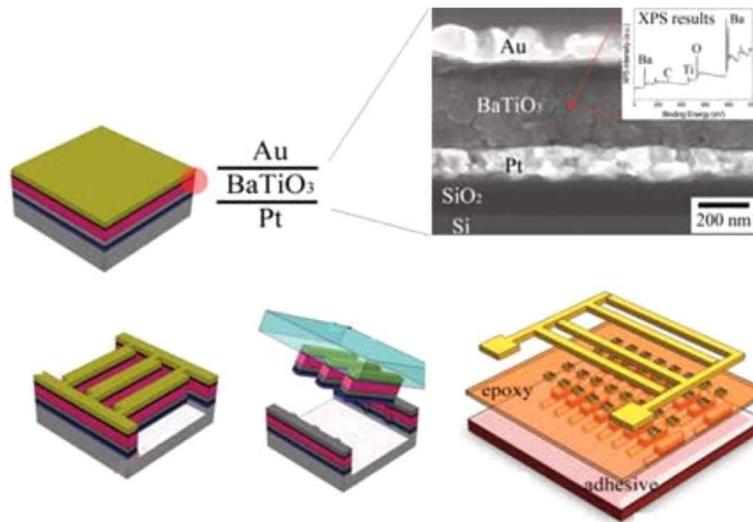
사용하여 제작되었기 때문에 200% 정도의 뛰어난 신축성(hyper-stretchable)을 나타냄.

- 해당 소자는 이전에 보고된 신축성이 높은 소자중에서 가장 우수한 전압, 전류값을 나타내었으며, 스타킹에 적용되어 전기 에너지를 생산할 수 있는 것으로 확인되어 유연에너지 하베스팅 기술이 웨어러블 분야로 응용될 수 있는 가능성을 제시함.

(2) 박막을 이용한 유연 압전 에너지 하베스팅 소자

(가) Soft Lithographic 기술을 이용한 BaTiO₃ 유연 박막 압전 에너지 하베스팅 소자

- 아래 그림은 금속-절연체-금속(metal-insulator-metal, MIM) 구조를 가진 BTO 박막 압전에너지 하베스팅 소자의 제작과정을 나타냄. 먼저, Pt/Si 반도체 기판에 증착된 BTO를 700℃에서 결정화시킨 후 금속 전극을 증착하고, 생성된 MIM 구조를 사다리 모양의 패턴으로 건식 식각(etching)한 후, 아래에 놓인 Si를 이방성의 습식 식각으로 제거하여 MIM 구조를 벌크형 기판과 분리시킴.
- 마지막으로 PDMS를 MIM 구조 위에 코팅한 후 플라스틱 기판에 붙이면 최종적인 소자가 완성되며, 이 소자는 플라스틱 기판의 취약한 열 특성과 무관하게, 딱딱한 실리콘 기판에서 열처리를 한 후 분리시키는 방식을 이용하여 제작됨.
- 아래 그림은 MIM 구조를 갖는 BTO 에너지 하베스팅 소자의 단면 SEM 사진으로 BTO는 납을 포함하고 있지 않기 때문에 인체에 무해한 재료로 주목받고 있으나, PZT나 PMN-PT와 같은 박막 압전 물질에 비해 압전 결합상수가 낮아 적은 전력을 소모하는 전기 소자에만 사용될 수 있다는 한계가 존재함.



<그림 2-3> MIM 구조를 가지는 BTO 에너지 하베스팅 소자의 제조방식

(나) Laser Lift Off기술을 이용한 PZT유연 박막 압전 에너지 하베스팅 소자

- 최근 연구에서 BTO의 단점이 보완된 효율이 높은 유연 박막 에너지 하베스팅 소자가 개발되었는데, 해당 제품의 경우는 압전 결합 상수 d_{33} 이 높은 PZT를 재료로 사용했고 소자 크기를 키워 출력 전압을 높였음.
- 여기서 주목해야 할 점은 엑시머(excimer) 레이저를 사용하여 PZT를 플라스틱 기판에 옮기는 건식 유형의 Inorganic-Laser Lift Off(ILLO)공법을 사용했으며, 이로 인해 생산 공정이 단순화되고 소자의 상업화 가능해졌음.
- 아래 그림은 ILLO를 사용한 PZT 박막 에너지 하베스팅 소자의 공정 과정을 나타낸 것으로 먼저 졸-겔(Sol-Gel)공정으로 사파이어 기판에 PZT를 스프인코팅하고 RTA(Rapid Thermal Anneal)로 열처리 후 플라스틱 기판 위에 접착 에폭시를 발라 PZT면에 부착하고 사파이어를 ILLO 공법을 이용하여 떼어내는 방식임.
- ILLO 공법은 PZT 아래에 있는 사파이어 기판 뒤에서 엑시머 레이저를 주사시켜 PZT와 사파이어 기판사이를 부분적으로 녹인 후 이 사이를 떼어내어 플라스틱 기판으로 옮기는 공법으로 엑시머레이저는 4.03eV 의 에너지를 가지고 있는데, 이는 사파이어 기판의 밴드갭 에너지인 10eV 보다 작고 PZT의 밴드갭 에너지인 3.4eV 보다 크기 때문에 사파이어 기판을 통과하여 PZT에 흡수될 수 있음.
- 이 공법은 매우 단순하고 안정적이며, 떼어낼 수 있는 면적이 크다는 장점이 있으며, 그 후 IDEs (Interdigitated Electrodes)와 패시베이션(passivation) 에폭시(epoxy)를 형성하고 폴링 과정을 거치면 소자가 완성됨.

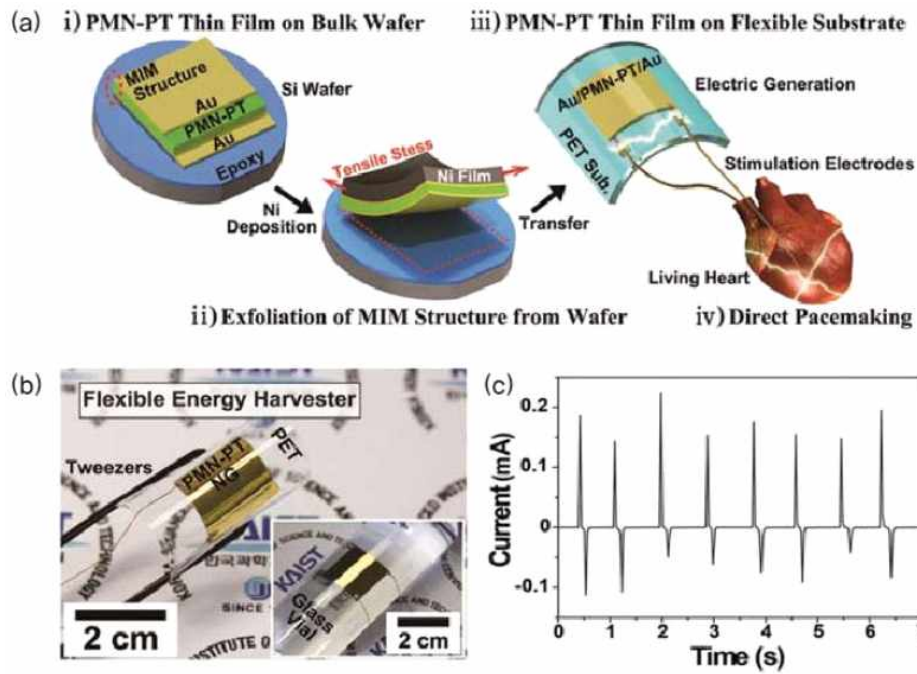
- 아래 그림에서 (b)는 LLO공정으로 깨끗하게 떼어낸 사파이어 기판을 나타내며, (c)는 ILLO 및 패시베이션 에폭시로 코팅된 PZT의 유연성과 안정성을 보여주며, 이 소자는 기존까지 보고된 유연 에너지 하베스팅 소자에 비해 매우 높은 출력을 나타내었음에도 불구하고, 높은 전압에 비해 낮은 전류 특성을 가져 생명공학에서 실제 이용되는 장비를 구동시키기에는 전류 값이 부족하다는 한계가 있음.



<그림 2-4> (a) PZT 압전 에너지 하베스팅 소자의 Laser Lift Off공정. (b) LLO공정으로 떼어낸 사파이어 기판. (c) 완성형 소자

다. Ni Exfoliation 기술을 이용한 PMN-PT 유연 박막 압전 에너지 하베스팅 소자

- 앞서 언급한 바와 같이, PZT를 사용한 압전 에너지 하베스팅 소자는 $10\mu\text{A}$ 정도의 전류를 만들어내지만, 실제 이용 되는 장비를 구동시키기에는 부족함.
- 예를 들어, 인공심장박동기는 3V , $100\mu\text{A}$ 정도의 구동 전압과 전류가 필요하고, 압전 결합 상수가 높은 물질인 단결정 PMN-PT를 사용한 에너지 하베스팅 연구가 진행됨. PMN-PT를 사용한 유연 압전 에너지 하베스팅 소자는 0.22mA 의 전류를 만들어 냈으며, 이는 이전의 유연 압전 에너지 하베스팅 소자보다 수십 배 높은 수치임.



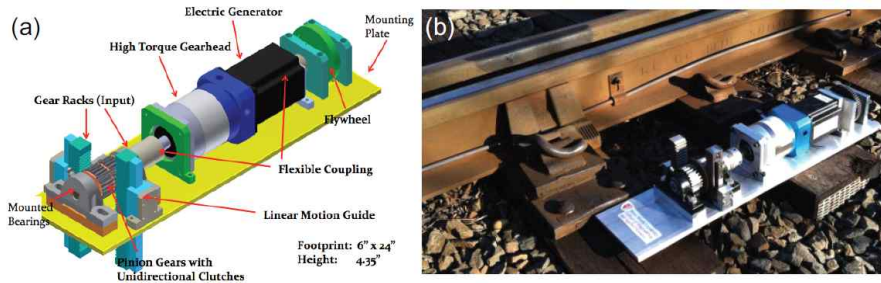
<그림 2-5> (a) PMN-PT 압전 에너지 하베스팅 소자의 제조 공정.(b) 완성형 소자. (c) 소자의 출력 전류 값

제 2 절 압전소자를 이용한 제품개발 및 적용사례 조사

1. 압전결정소자의 응용분야

- 압전 결정소자 기술의 응용은 1917년 A. Langevin이 수정을 수중 초음파 탐지기에 적용한 것이 시초가 되어 통신기, 의료기, 센서, 정밀계측기기, 디스플레이, 군수 산업 등 매우 광범위한 산업분야에서 응용되고 있음. 예를 들면 통신기기 분야에서는 레조네이터, 필터, 디스크리미네이터, 압전 스피커, delay line, 압전 트랜스포머, 광가변 필터용 미세변위기 등에 사용되고 있음.
- 의료기기 분야에서는 초음파진단용 탐촉자, 초음파혈류계, 초음파 세척기 등에 사용되며, 센서기기 분야에서는 가속도센서, 충격센서, 압력센서, knock 센서, 자동차용 거리 측정센서 등에 활용됨.
- 가정용전자기기 분야에서는 오디오용 필터, 초음파 가습기, 안정기(ballast), 버저(buzzer) 등과 정밀계측기기 분야에서는 압전 마이크로미터, strainingage, positioner 등에 사용되고 디스플레이 분야에서는 LCD backlight용 트랜스포머, 비디오 자동 초점용 압전모터, 비디오-카메라용 떨림방지용 actuator(vibration suppressor) 등에 사용됨
- 군용 분야에서는 military vehicle, space structure 등의 각종 actuator 분야에서의 공간접 AC dilatometer, 가변형 mirror, 가변 광회절격자, 현미경용 stage, 절삭오차 보정용 device, 유공압제어용 servo valve, VTR head, printer head, ultrasonic knife, 압전 pump 등에 사용됨.
- 최근에는 BaTiO₃로 대표되는 넓은 의미의 유전재료로서 압전 결정소자가 각광을 받고 있어 기초의 응용성에 따라 지속적으로 경박 단소화 및 다기능화 될 것으로 판단됨.
- 압전소자를 도로, 교량 등의 사회인프라 구조물에 적용하고자 하는 연구로는 관동대학교(조시범, 2012) 및 건국대학교(김대현, 2012)와 명지대학교(최선아, 2011)가 있으며 이들의 연구는 파력발전을 위한 파랑에너지 회수 기술 및 교량에 대한 적용 가능성을 기초적인 시험과 원리 등을 통해 검토한 것임.
- 이외 “압전소자를 이용한 도로 결빙 방지장치” (2012), “압전소자를 이용한 교통표시기의 전원공급장치” (1999) 및 “자가발전형 도로관리시스템” (2007) 등에 대한 특허가 출원되어 있음.
- 압전소자와는 다르나 철도차량 주행 시 궤도의 진동에 의한 수직 상하운동을 기계적으로 에너지로 직접 변환하는 장치가 개발된 바 있음(Wang et al, 2013). 이는 아래 그림과 같이 궤도를 구성하는 침목 사이의 상하운동을 기어 랙(gear rack) 과 피니언 기어(pinion gear), 리니어 모션 가이드(linear motion guide)를 이용해 기계적으로 발전기를 돌리는 독특한 방식으로써 효율측면에서는

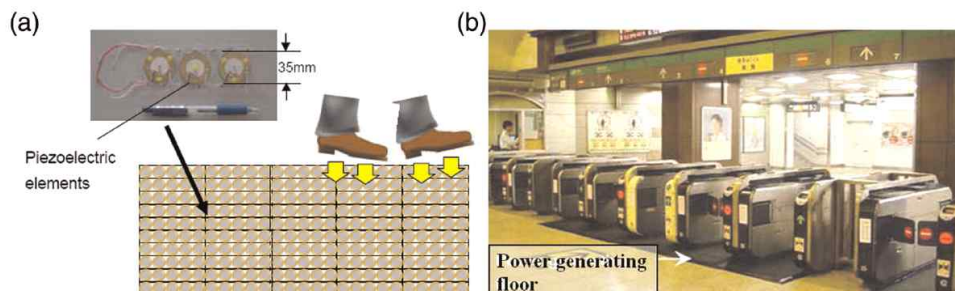
유리하나 기계장치의 마모에 의한 수명저하와 기계장치의 구성에 소요되는 비용이 막대한 단점이 있음.



<그림 2-6> 궤도진동의 기계적 전기변환장치(Wang et al, 2013)

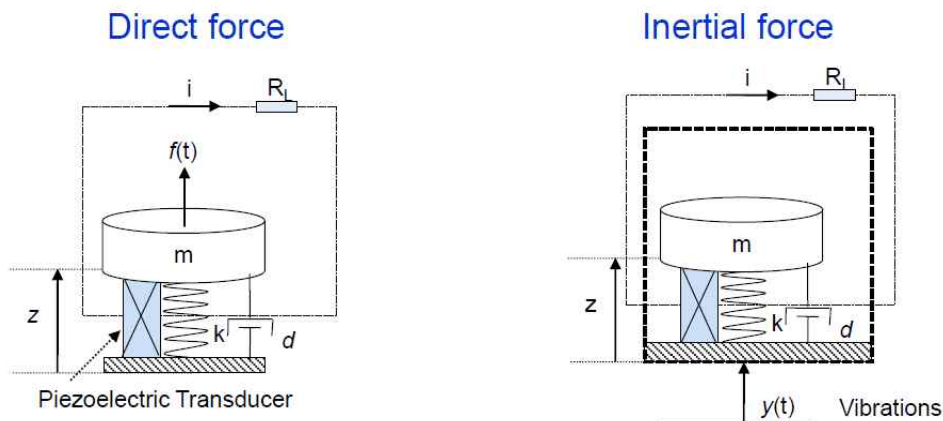
2. 압전소재 에너지 변환 기술 개발 현황

- 압전소자를 사회간접시설(인프라)에 활용하여 자가발전하는 기술은 최근 도로포장 등 다양한 개소에 적용되고 있으며(POWERleap, Innowattech, KCF Technologies, Virginia Tech, Genziko 등), 도로나 지하철역 개찰구 등 사람의 이동이 잦은 곳에 압전소자를 이용한 자가발전 시스템이 일부 실용화 되고 있으나 인력에 의한 압력(하중)의 한계로 인해 발전되는 전력량이 크지 않은 단점이 있음.
- 미소단위 자가발전 시스템(milimetric generators) 또한 최근 활발한 개발이 이루어지고 있음(Holst-IMEC, Mide' Volture, ESIEE, Imperial College 및 KAIST, Harvard 대학 등).
- 그러나, 미소단위 자가발전 시스템류는 바람이나 작은 흔들림 등 미세한 움직임에 의해 최소한의 구동전력을 발전시키는 것으로서 대용량의 전력발생 장치로서는 적당하지 않으며 전력이 공급되지 않는 낙도나 고산지 등 원거리에서 무선통신용 전력공급장치 등으로 사용될 수 있으나, 대용량 전력공급장치로서는 발전용량이 크게 미치지 못함.



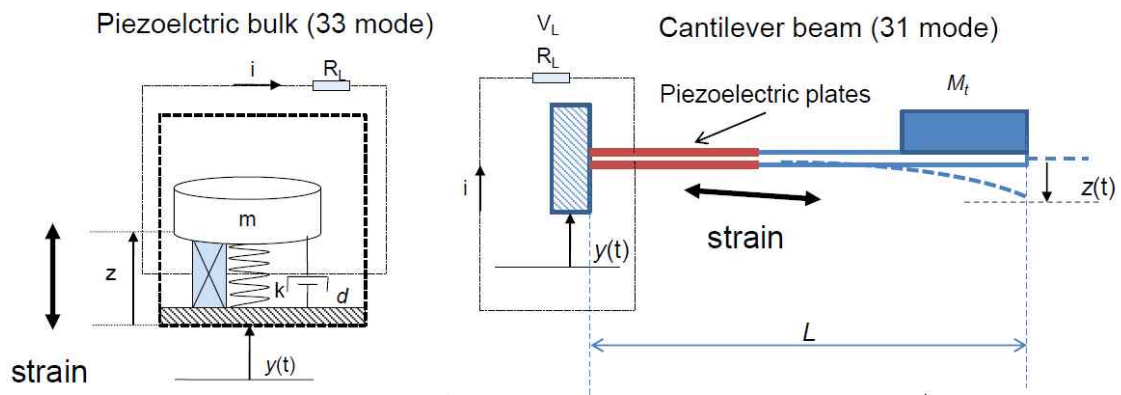
<그림 2-7> 지하철 개찰구에 적용한 압전소자 활용 자가발전 시스템: (a) 압전소자 스택, (b) 일본 도쿄 마루노우치 역 구내적용 개찰구 현황(동일본 철도 주식회사, 2009)

- 진동에 의한 자가발전(Vibrating Energy Harvesters; VEHs) 구동원리는 직접구동 방식(Direct force)과 관성구동 방식(Inertial force)으로 크게 구분되며 관성구동방식이 직접구동 방식에 비하여 진동에 의한 발전방식에서 보다 유리한 것으로 알려져 있음.
- 이중 압전소자(piezoelectric transducer)는 이방성의 성질을 가지므로 가해지는 힘의 방향에 따라 전하의 발생방향이 다른 특성을 갖게 됨에 따라, 현재까지 압전소자에 의한 자가발전은 여러 개의 압전소자를 겹쳐 발생전력량을 늘리는 방식으로 발전되어 왔음.
- 특히, 최근 개발이 집중 되고 있는 캔틸레버형 압전소자(<그림 2-8>)는 고유주파수가 존재하므로 이를 이용, 탄성진동과 전기진동을 일치시켜 더 큰 전기를 생산할 수 있는 장점이 있음.
- 따라서, 자가발전장치는 이와 같은 압전소자의 특성을 활용하여 경계조건, 치수, 모양 및 가해지는 압력의 주파수 등에 따라 여러 형태의 변환소자와 공진자 등을 만들 수 있음.
- 최근에는 진동에너지 변환효율을 극대화 하려는 연구가 다수 시도되고 있음 (메릴랜드 대학, 이태리 Universita di Roma Sapienza, 프랑스 University Paris Est/ESIEE 등).



<그림 2-8> 진동에 의한 자가발전 방식 비교

- 빔 (beam) 타입 (캔틸레버 운동방식) 압전소자는 최근 개발이 활성화 되고 있으며(Roundy et al, 2004; AdaptivEnergy, 2009 등) 레일 및 침목의 부재 거동패턴을 고려하여 이에 대응하는 압전소재로 개발할 수 있음.
- 이는 단순한 수직 상하운동 방식에 의한 직접구동 방식 압전소자보다 궤도 구조체의 휨 및 압축거동을 다양하게 고려하는 방식(<그림 2-9>)이 되어야 하는 것을 의미함(Eichhorn et al, 2010).



<그림 2-9> 기계적 에너지의 전기에너지 변환모델을 채용한 빔 타입 압전소자

제 3 절 철도 궤도 진동 특성 및 소음 운용기준

1. 진동의 개요

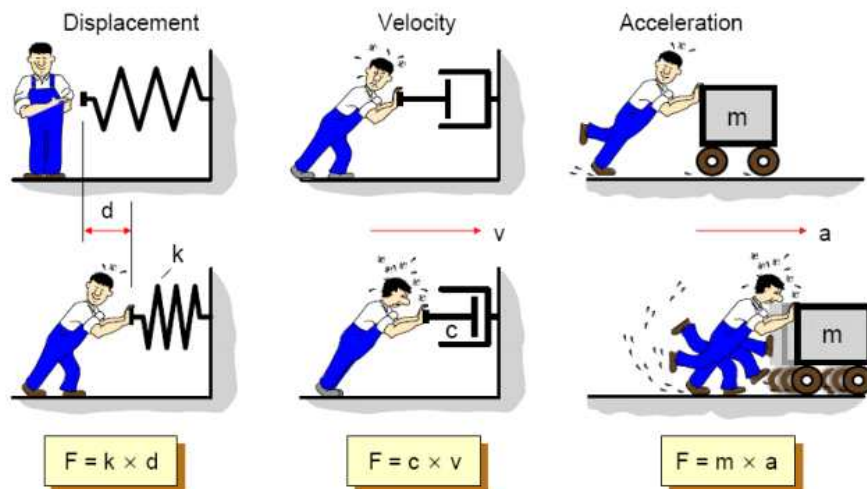
가. 진동의 정의

- 진동이란 질점 또는 물체가 외력을 받아 평형위치에서 반복 운동하는 현상을 말하는 것으로, 일정시간을 반복하는 주기운동과 불규칙으로 운동하는 비주기 운동으로 구분됨.
- 일반적으로 기계나 구조물은 질량과 강성과 감쇠가 분포된 시스템으로서, 질량과 강성은 물체가 정적인 평형위치를 중심으로 진동하는 원인이 되며, 감쇠는 시간이 경과함에 따라 진동이 소멸되는 원인이 됨.
- 진동의 대표적인 수학적 모델은 질량-용수철-감쇠계로 병진 운동하는 경우와 단진자나 비틀림 진자와 같은 회전운동의 경우가 있고, 또한 이 두 가지의 운동이 병행하여 진동하는 경우도 다수 있음.

나. 진동의 기본사항

(1) 변위, 속도, 가속도

- 일반적으로 인간이 거주하는 거주공간에서 진동이 발생하는 경우는 자연적인 진동의 경우(예: 지진)를 제외하고는 대부분 공장 등에서의 기계운동, 철도 주행 및 도로 주행 등 인간의 생활환경에서 발생시키는 진동원으로 인함.
- 진동의 물리적인 크기는 변위계, 속도계, 가속도계 등으로 측정이 가능하며 일반적으로 복합적으로 적용하여 측정함.



<그림 2-10> 변위, 속도, 가속도

- 여기서, 진동현상으로서 변위 u , 속도 v , 가속도 a 에 대하여 변위진폭 U , 주파수 f 인 정현파는 아래 식으로 표현할 수 있음.

$$u = U \sin \omega t = U \sin 2\pi f t$$

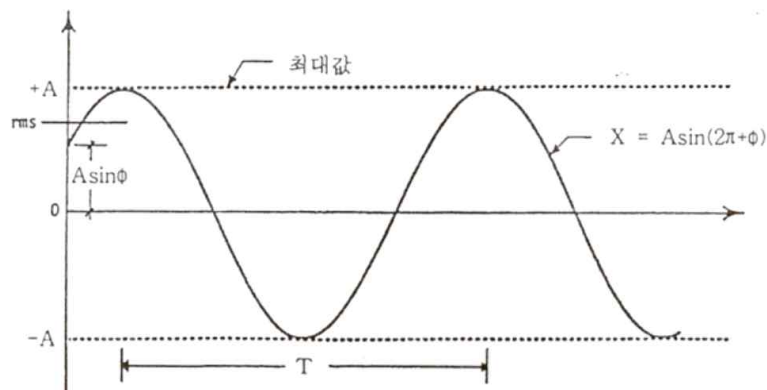
$$v = \omega U \cos \omega t = 2\pi f U \cos 2\pi f t$$

$$a = -\omega^2 U \sin \omega t = -(2\pi f)^2 U \sin 2\pi f t$$

- 또한, u , v , a 사이의 위상은 $\pi/2(90^\circ)$ 씩 차이가 남으로, 변위의 최대/최소점에서 속도는 0이고, 속도의 최대/최소점에서는 가속도가 0이 됨.
- 진동을 물리량으로 표현하기 위한 기본단위로서 일반적으로 변위는 m, 속도는 m/sec, 가속도는 m/sec²을 사용하며, 가속도에 대해서는 이외에 Gal(1Gal = 1cm/sec²)과 중력가속도 G 가 자주 사용함. $1G = 9.8\text{m/sec}^2$ 로서 약 10m/sec^2 으로 나타낼 수 있음.

(2) 파 형

- 소음과 진동현상은 일반적으로 진폭, 진동수(주파수), 위상으로 표현되며, 아래 그림은 하나의 주파수로 이루어진 운동파인 간단한 정현파(sinusoidal wave)에 대하여 진폭을 시간의 함수로 나타낸 것임.



<그림 2-11> 정현파의 운동

여기서, A 는 진폭, f 는 주파수(Hz), T 는 주기, X_{rms} : 진폭의 평균제곱근 ($X_{rms} = A/\sqrt{2}$)

(가) 1자유도계 진동

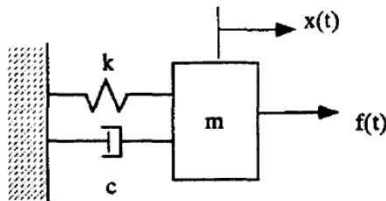
- ‘자유도’란 대상계의 거동을 완전하게 표현하기 위해 최소로 필요한 독립적인 좌표계의 총 수를 의미하고, 1자유도계의 진동 중에서 가장 일반적인 진동은 저항이 있을 때 일방향으로 외부에서 강제로 가진하는 감쇠진동이나 랜덤 가진에 따른 불규칙진동 임.
- 그러나, 해석적으로 분석하는 이론적인 접근방법은 상당수의 강제 가진을 조화진동을 조합해서 나타낼 수 있고 이는 조화진동을 통해 시스템의 고유성질을 알아낼 수 있기 때문임.
- 1자유도계의 진동은 다음과 같이 분류할 수 있음.



<그림 2-12> 1자유도계 진동의 분류

- 1자유도 진동계는 아래 그림과 같이 질량, 스프링, 감쇠 요소로 구성되고, 운동하는 질량요소는 정지중이거나 운동중일 때 현재 상태를 계속 유지하려는 관성을 가지며, 스프링 요소는 힘이 가해질 경우 변형하면서 공급된 일을 위치 에너지로 저장하며, 감쇠요소는 공급된 에너지의 일부를 운동에 의해 소산시키는 역할을 함.
- 질량 m , 강성계수 k 인 스프링, 감쇠계수 c 인 감쇠기로 구성되는 1자유도계에서 질량 m 의 거동은 아래 식과 같이 시간에 대한 상미분방정식으로 표현됨.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx(t) = f(t)$$



<그림 2-13> 1자유도 진동계

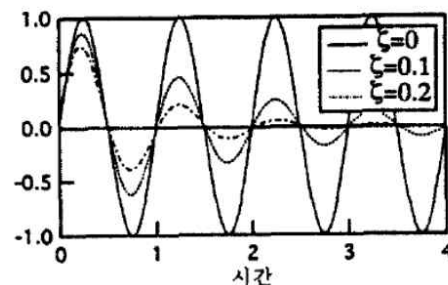
- 위의 1자유도계가 갖는 동특성을 쉽게 이해하고 표현하기 위하여 다음과 같은 추가 매개변수를 도입함.

- 비감쇠 고유주파수 : $w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$
- 임계감쇠계수 : $c_0 = 2\sqrt{mk}$
- 감쇠비 : $\zeta = c/c_0$
- 감쇠 고유주파수 : $w_d = w_n \sqrt{1-\zeta^2}$

- 비감쇠 고유주파수(진동수)와 감쇠비는 진동계의 고유한 동특성을 나타내는 대표적인 매개변수로서 이들을 이용하여 1자유도계의 자유진동을 수식으로 표현하면 다음과 같음.

$$x(t) = X_e^{-\zeta w_n t} \sin(w_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \varnothing)$$

- 여기서 진폭 X 와 위상각 $\varnothing$ 는 진동계의 초기조건에 의해 결정되는 상수이며, 진동계의 응답은 감쇠가 없는 경우($\zeta=0$)에는 비감쇠 고유진동수 w_n 에서 일정한 진폭으로 진동하고, 감쇠가 존재하는 경우에는 감쇠 고유진동수(주파수) w_d 에서 진폭이 지수함수적($e^{-\zeta w_n t}$)으로 감소하는 단순조화진동을 하게 됨.
- 아래 그림에서는 1자유도계에 충격이 가해졌을 때 나타나는 자유진동의 전형적인 형태를 서로 다른 감쇠비에 대해 도시한 것임. 감쇠비 ζ 가 0인 경우 조화함수의 진폭이 일정하게 유지되고 있고, $\zeta=0.1$ 및 $\zeta=0.2$ 인 경우 진폭이 시간의 흐름에 따라 줄어드는 전형적인 감쇠 자유진동 모습을 확인할 수 있음.
- 감쇠 고유진동수 w_d 는 감쇠비가 증가할수록 비감쇠 고유진동수 w_n 보다 작게 되어 진동주기는 커지게 됨.



<그림 2-14> 충격에 의한 1자유도 진동의 응답특성

다. 지반 진동의 영향

- 최근 철도의 고속화와 신설노선의 개설 및 교통량 증가에 따른 철도 인접구간에서의 소음, 진동관련 민원이 증가하고 있으며, 기존 화물노선 옆에 배치된 신설노선은 화물선에 비해 진동 수준이 10배 크게 측정됨(Holm, Andreasson, Bengtsson, Bodare, & Eriksson, 2002).
- 이러한 고속 열차의 높은 진동수준은 안전성 문제를 고려하여 열차 속도 제한 및 여러 대책을 마련하지만, 이와 같은 과정에서 비용 문제와 열차운행 문제 등 여러 문제가 발생할 수 있음.
- 국외의 고속선의 경우 고가교량에서 발생하는 선로진동은 안정성 문제 뿐 만 아니라 심각한 사회적, 환경적, 경제적 영향의 우려가 있어, 부정적인 진동영향이 미치는 지역을 추가 검토를 실시하여 대책 마련을 위한 데이터 베이스를 구축함(Asmussens, 2012).

(1) 사회적 영향

- 진동의 영향이 커지면서 선로 인접지역 구조물의 진동, 손상, 소음으로 인하여 사용자업무 및 수면 방해의 원인이 되고 있으며, 지반 진동 또한 선로 주변 건물 사용자의 업무 능력을 저하함
- 공장, 병원, 학교 주변은 진동에 민감한 지역으로 분류하여 신설노선 설계 시 피해야 하며, 고속 열차의 진동으로 열차 내 승객들의 수면 및 편의 등에 영향을 미치기도 함.

(2) 환경적 영향

- 과도한 진동이 궤도 구조 내에서 발생하는 경우, 열차의 속도를 유지하기 위해서 정지마찰력의 증가가 필요하다. 이러한 현상은 작업 효율 감소, 높은 연료 소비와 매연 배출 증가를 초래함
- 또한 높은 진동 수준은 차량의 유지 관리 및 수리비용 증가와 궤도 및 도상의 교체 빈도를 증가 시켜 불필요한 환경적 요인을 증가시키는 원인이 됨.

(3) 경제적 영향

- 진동 수준이 큰 경우 신설노선 주변의 건물에 많은 영향을 주게 된다. 이러한 경우에는 적절한 노선변경이 이루어져야 하며, 만약 주변 건물 사용자가 받으면 보상에 대한 문제가 발생함.

- 진동 완화 조치로서 궤도 구조(레일패드, 탄성패드)를 이용한 완화 조치가 있지만, 진동 수준을 감소시키는데 매우 한정적이다. 진동 감소를 위해 구조물 및 지반 구조의 조정이 필요하며 이러한 경우에 많은 경제적 비용이 발생함.

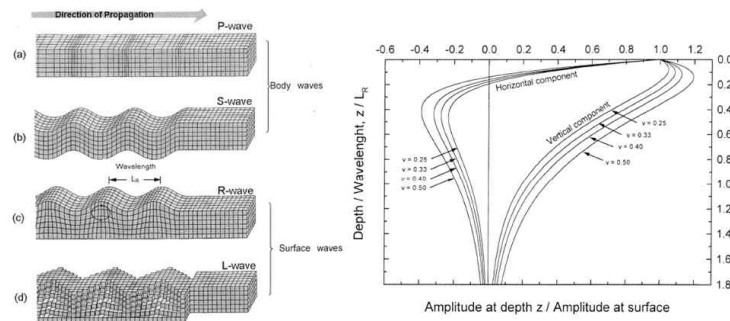
2. 진동의 전파특성

가. 지반 진동의 전파 특성

- 지반을 반무한 탄성체 및 균질한 등방의 매질로 가정 한 경우 충격에 의하여 발생된 에너지는 매질을 따라 탄성파의 형태로 전파되고, 체적파(Body wave)와 표면파(Surface wave)로 분류됨.
- 체적파는 주로 지반 내부를 따라 전파되는 탄성파로서 압축파(Compressional wave)와 전단파(Shear wave)가 있으며 표면파는 지표면을 따라 전파되는 탄성파임
- 표면파의 경우, 지표면으로부터 깊어질수록(수직방향), 진동원으로부터 거리가 멀어질수록(수평방향) 진폭이 감소하며, 일정깊이 이상의 심도에서는 영향을 미치지 못함.
- 표면파로써 R파(Rayleigh wave)와 L파(Love wave)가 있으며, 이중 대표적인 표면파인 R파는 지반 진동에 많은 영향을 미치며, 균질한 탄성체에서 R파의 속도는 파장에 관계없이 일정하며 파장과 파속과의 관계식은 아래과 같이 표현할 수 있음.

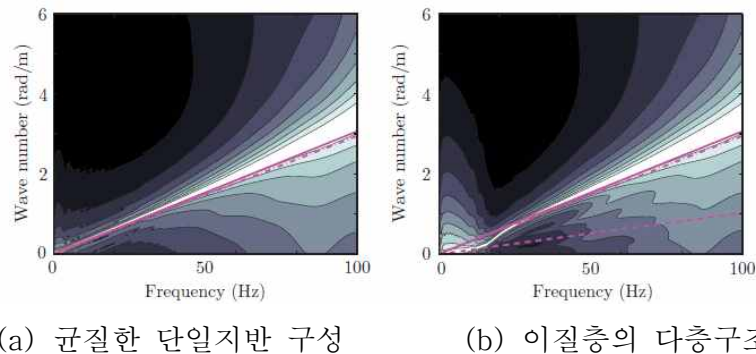
$$v_R = f_r \lambda_R$$

- 여기서, v_R 는 표면파 속도, f_r 는 주파수, λ_R 는 파장임.
- R파의 에너지는 전체 탄성파 에너지의 2/3에 해당하며, 체적파인 P파와 S파에 비해 진동전파에 대두되고 있음.
- R파의 전파 방향은 아래 그림과 같이 타원형 패턴으로 이동하는 것을 확인할 수 있어서 수직, 수평 성분을 모두 포함하는 특성이 있으며, 표면의 흙 입자를 통해 전파되는 특성으로 인하여 일정 심도지반의 입자는 거의 영향을 받지 않음.
- Athanasopoulos, Pelekis, & Anagnostopoulos (2000)은 전형적인 R파의 감쇠 프로파일은 매질의 다양한 포아송비(Poisson ratio)값에 따라서 아래 그림과 같은 전파 특성을 나타내며 깊이에 따라 급격히 감쇠하는 특성을 나타냄.
- R파는 대략적으로 한파장의 깊이와 표면 영역까지 전파됨.



<그림 2-15> 파의 특성 및 R파 감쇠 프로파일 (Athanasopoulos, Pelekis, & Anagnostopoulos, 2000)

- 지반에 전달되는 진동의 크기를 공학적으로 평가하기 위하여 사용되는 중요한 탄성파는 P파, S파 및 R파이고, 그 중 탄성파의 속도는 P파가 가장 빠르며, 다음으로 S파, R파 순서로 파의 에너지 크기는 R파, S파, P파 순으로 각각 67%, 26%, 7%의 크기를 가지고 있음 (Miller GF, Pursey H 1955).
- 각 탄성파는 서로 다른 속도로 전파된다. 특히 R파의 경우 균질한 지반에서는 전파속도가 일정하지만, 지반물성이 변하거나 서로 다른 이질층 및 다층구조로 되어 있는 비균질성 지반에서는 전파속도가 주파수(f_r) 또는 파장(λ)에 따라 달라지는 분산특성을 갖음.
- Triepachajionsak et al (2011)는 P파 및 S파에 충격이 가해졌을 경우 균질한 단일지반 층구성 및 서로 다른 이질층의 다층구조로 되어 있는 비균질성 지반에 대한 분산도를 아래 그림과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 각 파의 속도에 따라 발생하는 주파수 응답곡선은 주파수의 최대값을 이용하여 정규화 하고, 이에 대응하는 파의 수(Wave number)가 명확하게 인식되는 것을 확인할 수 있음.
- 또한 아래 그림을 통해 깊이가 깊어질수록 파속은 증가하는 반면 파형에너지는 감소하는 것을 확인할 수 있음.



<그림 2-16> FEM 시뮬레이션의 파속에 대한 분산도 (Triepachajionsak 2011)

- 표면파의 전파속도는 일정한 균질지반에서의 R파 속도를 참(True) R파 속도라 하며, 분산 특성을 나타내는 비균질 지반에서의 R파의 속도를 위상속도(Phase velocity) 또는 겉보기 R파 속도라 함.
- 탄성이론에 의한 균질지반에서의 P파, S파 및 R파 속도는 각각 아래의 식과 같이 정의됨.

$$v_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

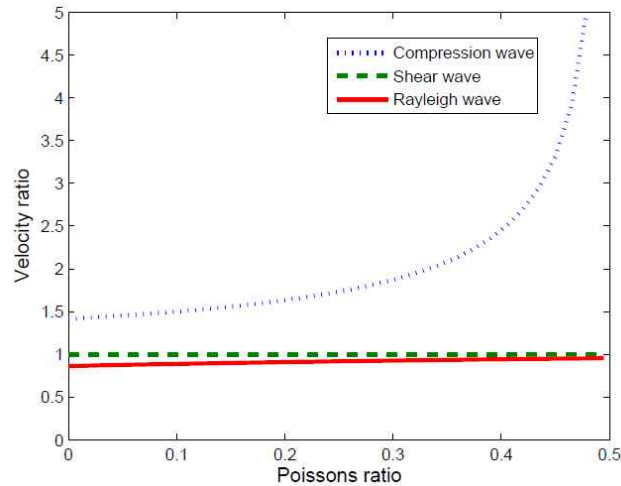
$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

$$K_R^6 - 8K_R^4 + (24 - 16K_P^2)K_P^2 + 16(K_P^2 - 1) = 0$$

- 여기서, v_p 는 P파 속도, v_s 는 S파 속도, E 는 탄성계수, G 는 전단탄성계수, ν 는 포아송비, ρ 는 매질의 밀도, K_R : 전단파속도 v_s 에 대한 레일리 파속도 v_R 의 $K_R = v_R/v_s$ 비율, K_P : 압축파속도 v_p 에 대한 전단파속도 v_s 의 $K_p = v_s/v_p$ 비율을 나타냄
- 위 식은 $E = 2G(1+2\nu)$ 임을 고려하면 K_P 는 포아송비와 아래 식과 같은 관계 특성을 갖는 것을 알 수 있음(viktorov 1967).

$$K_p^2 = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} = \frac{v_s^2}{v_p^2}$$

- 따라서, 위의 관계식을 적절히 활용할 경우 압축파속도, 전단파속도 및 참 레일리파속도 중 어느 하나의 탄성과 속도와 포아송비를 알면 나머지 두 탄성파속도를 결정 할 수 있음.
- 포아송비가 증가할수록 압축파속도(v_p)와 전단파속도(v_s) 차가 급격히 증가하지만 전단파와 참 레일리파속도 차는 오히려 다소 감소하며 큰 변화를 겪지 않게 됨
- 아래 그림은 포아송비에 따른 압축파, 전단파, 레일리파속에 대한 영향을 나타냄.



<그림 2-17> 매질의 포아송비(Poisson's ratio)에 따른 탄성파속도 영향(Connolly 2013)

- 0.25이상일 경우 참 레일리파속도는 전단파속도의 약 92%가 되어 대부분의 흙지반에서 참 레일리파속도는 전단파속도의 약 94%정도로 추정하여도 큰 오차가 발생하지 않음(Connolly 2013).
- 일반적으로 레일리파와 같은 표면파의 위상속도(겉보기 속도)는 파동이론으로부터 아래의 식과 같이 주파수와 파장 또는 기타 파동해석과 관련한 매개변수들의 함수로 표현할 수 있음.

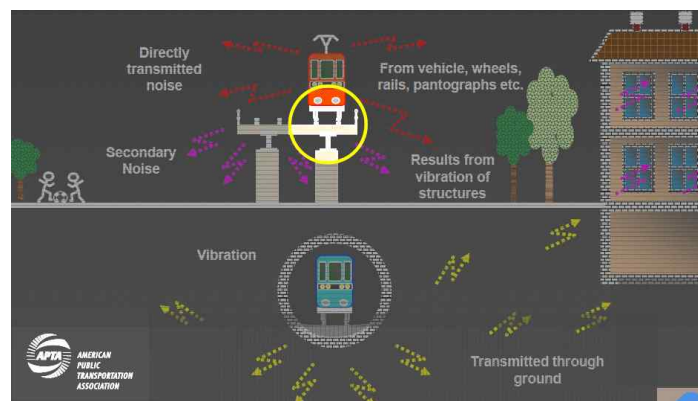
$$c_p = f_r \cdot \lambda = \lambda / T = w / n$$

- 여기서, c_p 는 위상속도, f_r 는 주파수, λ 는 파장, T 는 주기, w 는 각 주파수($w = 2\pi f_r$) (Angular frequency), n 는 파수(Wave number), $2\pi/\lambda$ 를 나타냄.
- 비균질 지반에서는 일정한 주파수로 지반을 진동시켜도 파장과 위상속도가 각기 다른 일련의 레일리파가 생성되어 각기 다른 진동모드(Mode)를 가지므로 비균질지반에서 레일리파는 모드특성을 갖게 됨.
- 주파수(f_r) 또는 파장(λ)과 위상속도(c_p)를 좌표축으로 하는 좌표면에 레일리파의 위상속도를 표현하면 각기 다른 진동모드에 해당하는 일련의 분산곡선을 얻게 됨.
- 이동하는 철도차량과 같은 동적하중이 지표면에 충격 시 대부분의 진동에너지는 레일리파의 형태로 전파된다. 또한 레일리파의 대부분의 에너지는 한파장내에 집중되는 것으로 알려져 있음.

- 지표면에 대한 충격 시 지반내로 전달되는 진동에너지의 대부분은 레일리파로 전달되고, 아래 그림과 같이 체적파인 압축파(P)와 전단파(S)는 반구형의 파동면을 형성하면서 전파되며, 레일리파는 원통형 파동면을 형성하며 전파됨.
- 따라서 체적파 에너지는 레일리파보다 더 큰 부피를 매질로 하여 전파되는 특징을 보임

나. 철도에서의 근접지반 진동발생 특성

- 주행하는 철도차량과 궤도 및 교량 등 철도시스템으로부터 유발하는 소음 및 진동은 기본적으로 다른 진동시스템으로 유발하는 소음 및 진동특성과 유사한 특징을 갖는데, 특히 소음은 기본적으로 매질이 되는 공기의 흔들림(Oscillation)에 의해 발생하며 진동(Vibration)은 구조물 또는 지반의 흔들림에 의해 발생함.
- 소음 및 진동은 모두 파(Wave)의 전파(Propagation)현상이어서 소음은 공기 중 소리의 전파현상이고 진동은 몸의 떨림으로 감지된다. 이와 같은 파의 전달이라는 유사성에도 불구하고 소음과 진동은 별개의 해석 방법이 필요함,
- 특히 철도에서 유발되는 진동은 궤도, 교량 및 지반(토사 및 암반) 등 다양한 매질을 통해 전달되어서 이의 측정과 분석이 소음에 비하여 매우 복잡한 양상을 보이며 진동 발생원이 아래 그림과 같이 고속의 중량으로 정해진 궤도상을 주행하는 차량에 의해 유발되는 특징을 가짐.
- 이때 레일 상을 압전 및 회전 주행하는 철도 차량이 진동의 직접적인 발생원이 되며 이때 발생하는 진동에너지가 궤도시스템을 통과하며 궤도하부 지반으로 진동이 전달됨에 따라 진동에너지의 전달수준은 차량과 레일 답면의 매끄러운 정도(또는 거친정도)와 요철의 크기에 따라 크게 영향 받게 되며 아울러 철도차량의지지 스프링시스템(Suspension) 및 궤도지지 시스템의 공진주파수에도 영향을 받게 됨.



<그림 2-18> 철도에 의한 소음 및 진동 전파 개념도 (APTA)

- 주행 중인 철도차량에 의해 궤도시스템에 유발한 진동에너지는 궤도하부구조를 거쳐 주변 지반으로 전파되며 선로로부터 일정 거리 떨어진 구조물의 하부 기초를 거쳐 건축물 및 주택 등의 구조물을 진동시킴
- 선로로부터 일정 이격거리의 개방된 개활지에서는 지반진동 크기 자체가 큰 문제가 되지 않음으로 철도로부터 발생하는 지반 진동문제가 되는 경우는 대부분이 궤도로부터 유발된 지반진동이 주변 건조물의 벽이나 마루, 바닥, 창문 등을 흔들려 2차 진동을 유발시키고 이와 같은 2차진동이 건조물의 균열, 손상, 흔들림 및 건조물을 사용하는 사람의 심리적 불안감과 작업능률 저하시킴.
- 국내 경우 철도교량에서의 진동발생에 따른 근접 건조물 손상 및 피해 사례는 도로에 비하여 그 수가 많지는 않았지만 일반 국철 및 도시철도 인접구간에서 최근 진동 및 소음발생에 따른 민원이 증가하고 있다. 따라서 열차에 의한 진동의 메커니즘을 이해해야 함.
- 열차에 의한 진동의 기본 메커니즘은 준정적(Quasi-static)과 동적(Dynamic) 가진을 통해 생성된다. 준정적 가진은 바퀴 주변에 국한되어 열차의 정적하중에 의해 생성됨으로 이에 의한 변위는 바퀴가 궤도 위를 통과할 때 발생하는 힘과 궤도 특성을 동반하여 침묵간격과 같은 요소에 기인하는 고유 주파수를 나타냄.
- 준정적 가진의 지배 주파수는 일반적으로 저주파(0-20Hz)이다. 기존 열차 속도에 따른 준정적 가진은 궤도로 인해 한파장의 1/4까지 지배적임으로 긴 파장(즉 대차간격에 의한 주파수 5Hz이하)는 저주파의 결과로서 가진원으로부터 먼 거리까지 지반 진동전파가 이루어진다. 열차에 의한 준정적 진동의 증가는 궤도에서 먼 거리에서부터 전파되기 시작됨.(Thompson, 2009)
- 국내 철도에 사용되는 궤도형식은 주로 슬래브궤도 또는 자갈궤도로 구성되며 이들은 2중보모델로 표현할 수 있는 반면, 철도교와 같이 고가교상의 궤도는 3중보 모델로도 표현이 가능함으로 이동 축하중을 받는 궤도를 2중보로 모형화할 경우 궤도부분만의 운동방정식은 아래 식과 같이 표현할 수 있음.

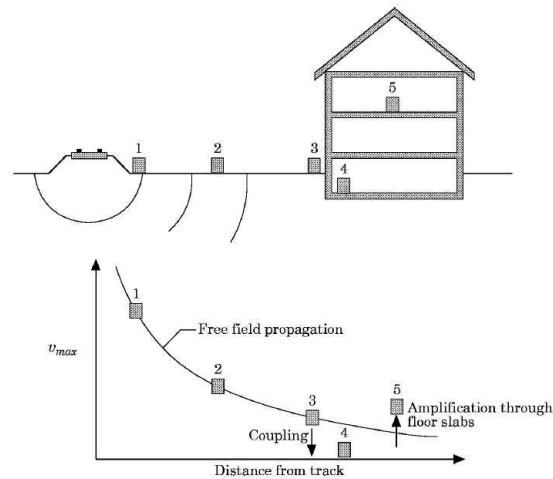
$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 y_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial}{\partial t} (y_1 - y_2) + k_1 (y_1 - y_2) = F_a \delta(x - vt)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial}{\partial t} (y_1 - y_2) + k_1 (y_1 - y_2) + c_2 \frac{\partial y_2}{\partial t} + k_2 y_2 = 0$$

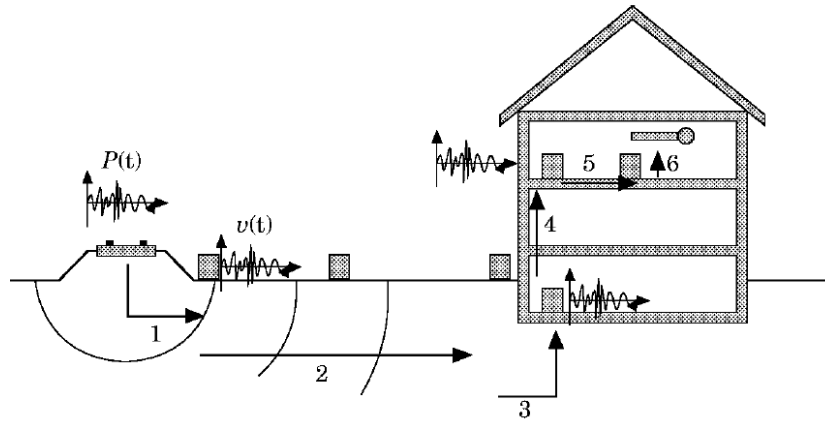
- 여기서, y_1 는 (x,t)에서의 레일의 처짐, y_2 는 (x,t)에서의 침목의 처짐, $E_1 I_1$ 는 레일의 휨 강성, $E_2 I_2$ 는 슬래브 또는 침목의 휨강성, m_1 는 단위길이당 레일의 질량, m_2 는 단위길이당 침목 또는 슬래브의 질량, c_1 는 단위길이당 레일패드와 침목패드 간의 감쇠계수(감쇠비), c_2 는 단위길이당 침목패드 또는 자갈도상의 감쇠계수(감쇠비).

감쇠계수(감쇠비), k_1 는 단위길이당 레일패드의 스프링계수, k_2 는 단위길이당 침목패드 또는 자갈도상의 스프링계수, v 는 열차속도, δ 는 Dirac delta function, F_a 는 열차의 축중임.

- 일반적으로 철도궤도를 주행하는 차량에 의해 발생하는 지반진동의 크기는 아래 그림과 같이 궤도로부터의 이격거리가 증가함에 따라 급격히 감소하는 특성을 보임.
- 철도선로 근접지에 위치한 주택 등 건조물의 경우 철도차량에 의해 발생된 진동은 지반을 통해 전파되고 건조물의 기초와 벽 등을 통해 사람이 체감하게 됨.
- 먼저, 궤도에서 발생된 진동의 크기는 기하감쇠(Geometrical damping)와 지반 구성재료인 흙 또는 암반의 감쇠특성(재료감쇠)에 의해 점차 감소하게 된다. 따라서 가진원은 시간에 따라 변하는 차량하중이 됨.
- 진동전파는 아래 그림과 같이 (1)궤도-궤도하부구조, (2)궤도하부구조-지반자유장, (3)지반자유장-건조물기초, (4)건조물기초-외벽, (5)외벽-마루(슬래브), (6)마루-반사 총 6개 발생모드를 예상할 수 있음.



<그림 2-19> 궤도로부터의 이격 거리별 진동특성 및 진동크기 비교



<그림 2-20> 철도근접지 진동의 전파모드

- 철도 등 교통수단에 의한 진동은 지진과는 달리 광범위한 지역에서 진동에 의한 피해를 일으키기 보다는 선로 및 차량 통과지역 근접지에서 피해를 입히게 되며 피해의 정도 또한 지진과는 달리 선로 근접지 건물 사용자의 불쾌감이나 건물 내 정밀장비 등에 대한 손상 및 건조물의 미세 균열 등에 국한되어있음.

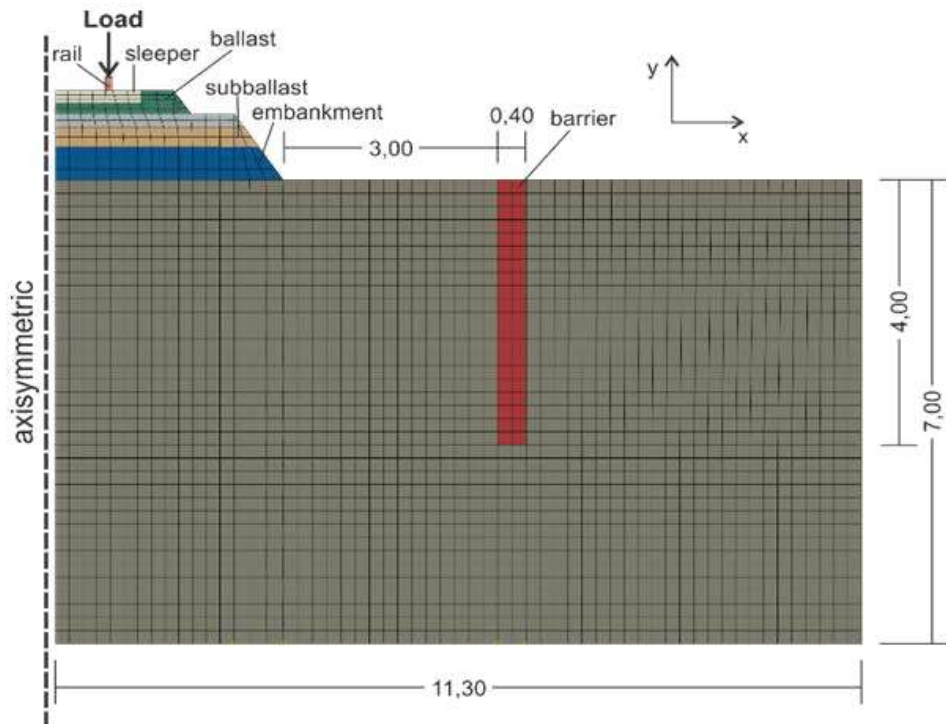
3. 지반 진동 전파 모델 구성

- 현재 많은 연구자들은 지반에 전파되는 진동 특성 분석을 이용하여 진동을 저감시킬 수 있는 방안에 대한 연구를 진행하고 있으며, 대부분 현장 시험이나 유한요소해석을 이용해 지반 진동 전파 특성을 파악하고 있음.
- 진동 전파 메커니즘은 다양하고 복잡하여 관련된 모든 요소를 반영한 모델 구성은 현실적으로 매우 어려움으로 진동에 민감하게 반응하는 요소를 고려한 모델 구성에 대하여 조사하였음.

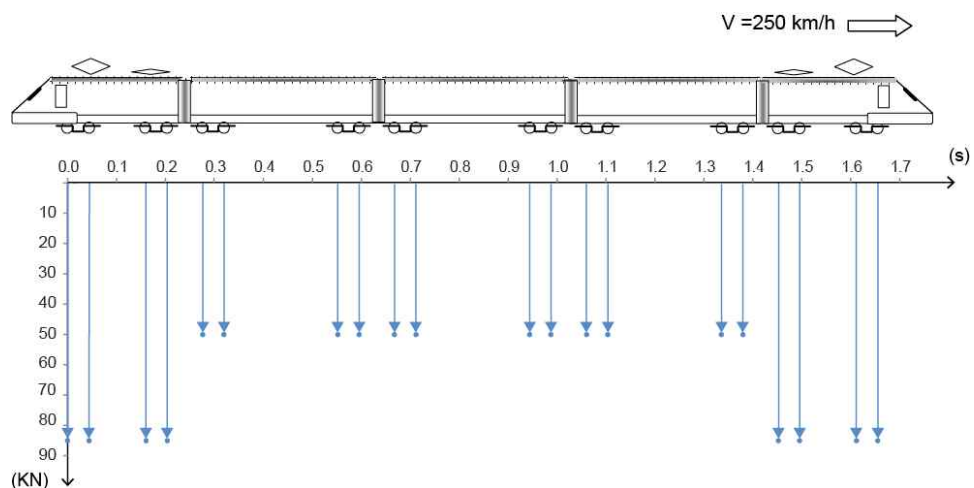
(1) G. Leonardi & M. Buonsanti(2014)

- 열차에 의한 근접 지반 진동 방진 대책을 마련하기 위해 유한요소해석모델(FEM)을 사용하였으며, 방진벽 종류와 강성에 따른 지반의 진동 완화효과를 분석하였음.
- 고속선 선로 제안 모델은 현실적으로 시뮬레이션하기 위해 아래 <그림 2-21>과 같이 축 대칭(Axisymmetric) 모델을 사용하였다. 최대 요소의 크기는 고주파와 낮은 파속의 레일리파를 고려하여 0.2m로 결정하였고, 선형 축대칭(CAX4R)의 2D 모델로 구성하였음.

- 하중은 그림<2-22>와 같이 노드(Node)에 발생하는 힘을 시간 이력으로 나타내는 시간 함수를 사용하였고, 열차 형상과 구성(객차, 대차, 바퀴, 차축)에 따라 주어진 수직하중과 일정 속도(V)로 단순화 하였음.
- 이탈리아 고속열차 ETR (500)을 모델로 하여 2개의 객차, 3개의 대차로 단순화 하였고 진동 전파 감쇠 특성 파악을 위해 입력 물성 재료에는 레일리 감쇠비의 계수를 적용 하였음.



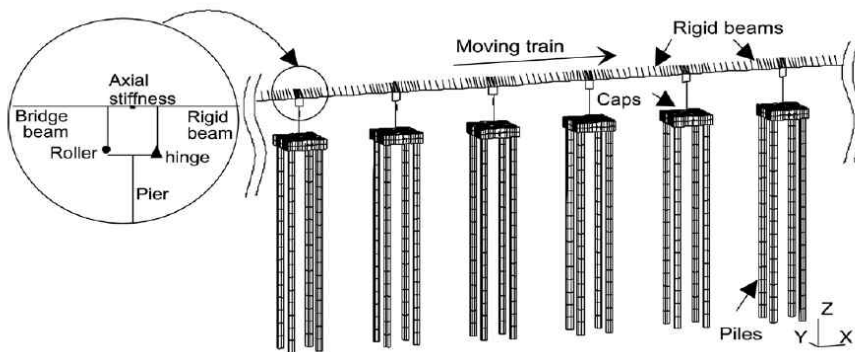
<그림 2-21> 궤도-레일 시스템 고려한 모델(Giovanni Leonardi & Michele Buonsanti 2014)



<그림 2-22> ETR 500 열차 속도 259km/h의 시간이력 하중 (Giovanni Leonardi & Michele Buonsanti 2014)

(2) Shen-Haw Ju & Hung-Ta Lin(2007)

- 유한요소해석에서의 매쉬(Mesh) 구성은 현장시험의 동적 응답 스펙트럼을 비교 분석하기 위해 교량상부 구조, 교량 기초, 열차 주행, 지반을 포함하였고 매쉬의 경계를 따르는 유한요소해석 방식은 가상 표면과의 반사를 방지하기 위해 무한 경계요소를 사용하여 모델링에 사용된 치수는 길이 825m, 폭 521.25m, 깊이 117.5m, 최대 솔리드(Solid) 요소의 크기는 3.75m로 적용하였음.
- 지반과 교량 기초의 매쉬는 8절점 3D 솔리드 요소, 교량 상부는 2절점 3D 빔(Beam)으로 구성하였으며 이동하는 열차(SKS-700 고속열차)의 모델링은 이동 바퀴요소, 스프링-댐퍼요소를 각각 집중 질량과 강성으로 조합하여 모델링 하였으며 아래 그림은 교량과 교각 및 말뚝기초의 유한요소망을 나타낸 것으로 말뚝 기초는 3D 솔리드 요소를 사용하였고, 기초 상면에 폭 3.2m, 길이 2.8m, 두께 2.0m의 교각이 흙에 덮여있는 형태로 모델링하였음.



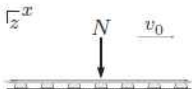
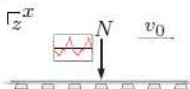
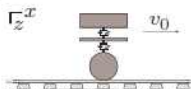
<그림 2-23> 교량과 기초의 유한요소망

4. 지반진동 평가법 및 예측기법 개발현황

- 열차로부터 지반에 전달되는 다수의 진동전이모델이 개발되어오고 있으며 이러한 모델들은 대부분 준정적(Quasi-static) 해석기법에 기초한 진동 전이

모델이었으며 불규칙 차륜/레일답면 및 궤광의 강성차 등에 의한 동적해석 모델개발의 필요성이 강조되고 있음.

- 준정적 및 동적해석 모델을 모두 실시할 수 있는 진동전이해석 프로그램으로는 TGV 및 TRAFFIC 등이 있으며 이들은 다층지반에 대한 고려가 가능하며 미국은 2005년 고속철 도입을 검토하는 단계에서 연방철도청의 주도로 "High-speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assesment" 연구를 진행하였음
- 해당연구에서 GIS를 이용한 소음평가 단순절차를 제시한 바 있으나 구체적으로 지반동특성과 지형 및 인구자료 등의 데이터 베이스를 적용한 GIS 기술개발은 이루어지지 않았으며 단순히 궤도 근접 카테고리별 지반진동기준 (Ground-Borne Vibration Criteria)과 소음충격기준(Noise Impact Criteria)를 제시함
- 앞서 지적한 바와 같이 2014년 현재까지 미국 내 고속철도 운행실적이 반영되지 않은 것이며 주로 미 연방교통성에서 1995년 발간한 " U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, Trabsit Noise and Vibration Impact Assessment, Report Numver DOT-T-95-16, April 1995" 보고서를 인용하여 제시한 것으로 도로교통 위주의 연구결과를 반영한 것으로서 제대로 된 연구결과로부터 도출된 것이 아닌 것으로 판단됨.
- 철도로부터 발생하는 지반진동 예측모델을 정리하면 아래 그림과 같고 이들 중 Connolly 등(2014)과 RIVAS 프로젝트를 수행한 Auersch(2006)의 수치 해석에 의한 해석법을 제시함

	Constant axle load	Random axle load	Detailed model
Vehicle modelling →			
Soil modelling ↓	Krylov [17,18] Kaynia et al. [19] Sheng et al. [5,20] Degrande and Lombaert [21] Karlström [22] Takemiya and Bian [23] Maldonado et al. [24]	Lu et al. [25] Sheng et al. [26] Lombaert et al. [27]	Datoussaïd et al. [28] Sheng et al. [29] Lai et al. [30] Auersch [31] Xia et al. [32] Lombaert et al. [33]
Analytical solution	Paolucci et al. [34] Wang et al. [35] Fujii et al. [36] Yang et al. [37] Vogiatzis [38] Çelebi and Kirtel [39]	Yang et al. [40] Pakbaz et al. [41]	
2D FEM	Hall [42] Powrie et al. [43] Anastasopoulos et al. [44] Stupazzini and Paolucci [45]		Gardien and Stuit [46] Ju [47] Zhai et al. [48] Banimahd et al. [49] Wang et al. [50] Kouroussis et al. [8,51] Connolly et al. [52,53] El Kacimi et al. [54] Galvín et al. [9] Costa et al. [7]
3D FEM	Sheng et al. [55] Yang et al. [40] François et al. [56] Costa et al. [57] Gao et al. [58]		
2.5D BEM and/or FEM	O'Brien and Rizos [59] Andersen and Jones [60] Auersch [61] Chebli et al. [62] Galvín and Domínguez [6]		Galvín et al. [63] Romero et al. [64]
3D BEM (surface)	Thornely-Taylor [65] Hussein and Hunt [66] Jones and Hunt [67]		
Alternative approaches			

<그림 2-24> 철도로부터 발생하는 지반진동 예측모델 구분(Kouroussis et al., 2014)

5. 철도 궤도 레일패드 노후화에 의한 영향 분석

가. 레일패드의 열화 현상

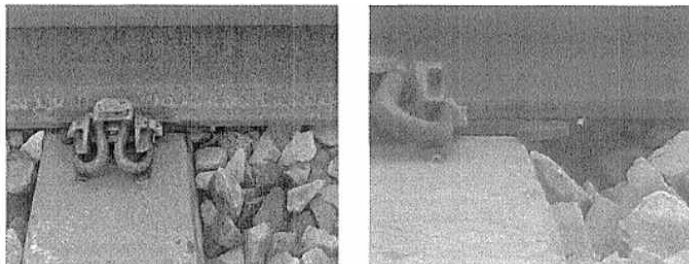
- 레일체결장치 구성품 중 하나인 레일패드는 궤도시스템에서 중요한 부분으로 레일로부터 전달되는 충격하중을 완화시켜 침목을 보호하고, 열차주행에 따라 레일에 발생하는 고주파 진동을 저감시켜 궤도파괴를 유발하는 침목 및 도상 가속도를 낮추어 주는 역할을 함.
- 이러한 레일패드는 열차의 통과톤수가 증가함에 따라 경화가 진행되고 이에 따라 탄성이 감소됨으로 인해 진동 발생촉진 등 궤도에 좋지 않은 영향을 미치게 되는데, 레일패드의 손상원인을 분석하고 패드의 손상이 궤도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 현재 국내 운행선에서 사용 중인 레일패드의 주요 손상원인인 레일패드의 밀림현상에 대해 조사하였으며, 패드의 경화와 두께 감소에 따른 강성의 변화를 분석하였음.

(1) 레일패드의 밀림

- 철도현장에서 레일패드의 밀림은 흔히 발생하는 현상 중 하나이며, 다음과 같은 원인으로 발생하는 것으로 추정됨.

- 열차주행 시 레일에 작용하는 종방향 하중 및 시제동 하중으로 인한 레일 패드의 밀림
- 온도변화에 의해서 발생하는 장대레일의 신축으로 인한 레일패드의 밀림
- 유지보수작업 시 침목의 위치이동으로 인한 레일패드의 밀림

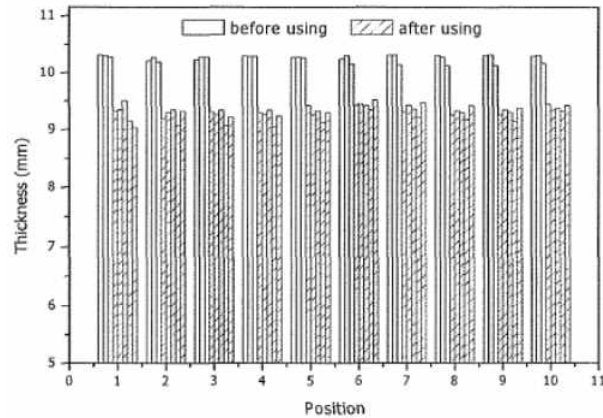
- 이와 같은 밀림현상이 발생하게 되면 패드의 특정부분에 대해서만 하중의 집중도가 증가하게 되어 패드의 손상이 정상적으로 레일을 지지하고 있는 패드보다 빠른 속도로 열화가 진전되어 침목과 도상에 악영향을 미치게 됨.



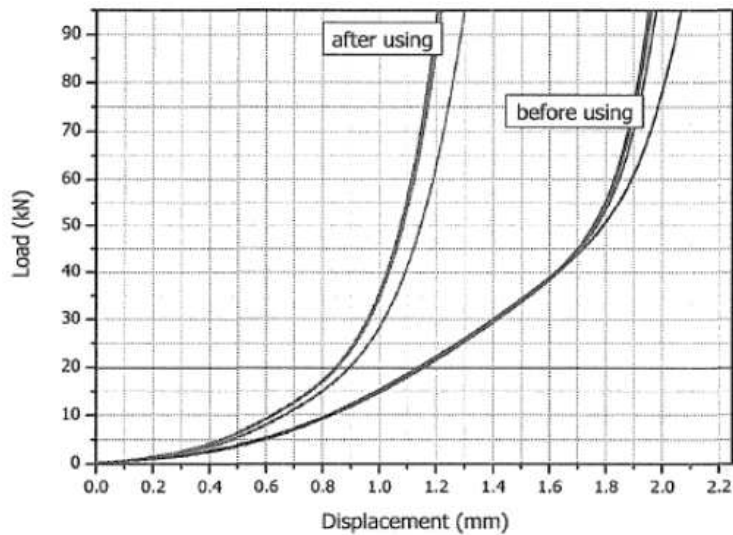
<그림 2-25> 레일패드의 밀림

(2) 레일패드 경화 및 두께감소

- 사용 전 패드와 고속철도 전용선 현장에서 채취한 패드로 패드두께 검사 및 정적 스프링계수 시험을 수행하여 사용전과 후의 패드의 상태변화를 검토함.



<그림 2-26> 레일패드의 두께감소



<그림 2-27> 레일패드의 경화

- 시험결과, 사용 전과 후의 패드 두께는 10%정도의 감소를 보였고, 패드의 강성은 대략 200%의 증가를 나타냈으며, 이러한 변화의 원인은 다음과 같은 것으로 추정됨

- 열차의 통과횟수에 의한 압축피로로 인한 레일패드 경화 및 두께감소
- 대기온도 변화 및 기상조건과 같은 환경적인 영향으로 인한 패드경화

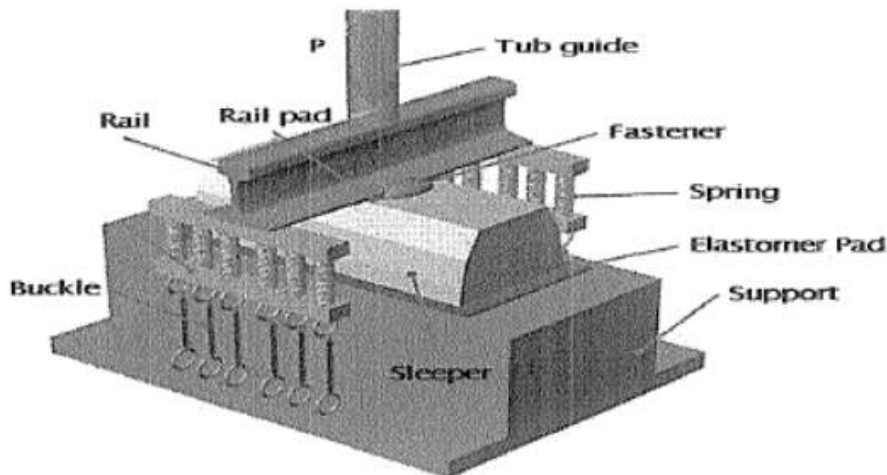
나. 레일패드의 열화가 궤도에 미치는 영향

(1) 레일패드의 밀림으로 인한 영향

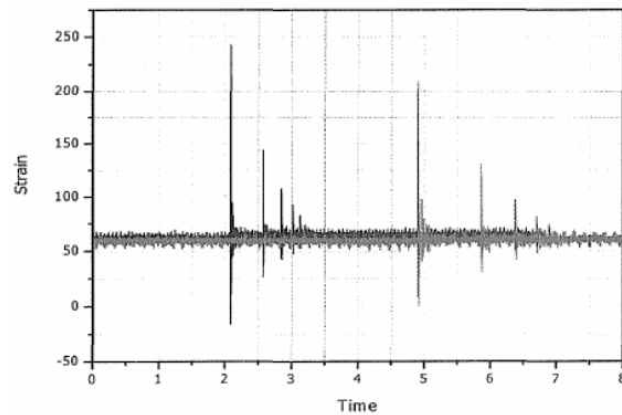
- 레일패드의 밀림을 방지하여 레일패드가 완전히 분리된 경우에 레일패드의 높이만큼 체결높이가 줄어들어 체결장치의 체결력이 낮아지고, 더 나아가서 체결클립이 분리되는 상황이 발생할 수 있음.
- 또한 레일패드는 궤도신호와 관련하여 레일체결장치 절연성능을 확보하기 위한 역할을 하는데 레일패드의 밀림으로 인해 레일패드가 완전히 분리되거나 손상이 있을 경우 레일체결장치의 전기절연성능에 영향을 미칠 수 있음.
- 이 뿐만 아니라 레일과 패드의 접촉면의 감소로 패드의 경화가 빨리 진전되며 레일의 지지탄성의 감소로 궤도에 전달되는 충격력이 증가하게 되며 따라서, 적절한 패드강성을 확보하는 것은 진동의 저감 뿐만 아니라 궤도의 안정성 확보라는 측면에서 매우 중요함.

(2) 레일패드 경화 및 두께감소로 인한 영향

- 레일패드의 두께 감소로 인해서 초기에 체결스프링의 체결력을 확보시켜주던 적정 빈틈이 오히려 증가함에 따라 체결스프링이 레일을 눌러주는 체결력이 감소하게 되고, 레일패드가 경화하게 되면 열차 운축의 충격하중이 직접적으로 침목에 가해져서 침목에 균열발생 가능성이 증가하게 됨.



<그림 2-28> 충격감쇠 시험장치



<그림 2-29> 충격감쇠시험 결과 예

5. 국내외 철도 시설물 소음진동 기술기준

가. 국내 철도연변 소음·진동 기준

- 철도에서 발생하는 소음, 진동으로 인한 피해를 방지하고 소음, 진동을 적정하게 관리, 규제함으로써 모든 국민이 정온한 환경에서 생활할 수 있게 함을 목적으로 1994년 11월 21일 총리령 제 473호로부터 철도소음한도가 공포되어 2000년 1월1일부터 시행되고 있으나, 공포일 이후 준공되는 철도는 2010년 1월 1일부터 한도를 적용하고 있음.

<표 2-4> 국내 소음·진동 기준

대상지역	구분	한도			
		2000년 1월 1일 ~ 2009년 12월 31일		2010년 1월 1일 부터	
		주간 06:00~22:00	야간 22:00~06:00	주간 06:00~22:00	야간 22:00~06:00
주거지역, 녹지지역, 준도시 지역 중 취락지구 및 운동, 휴양지구, 자연환경보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경 계선 으로부터 50미터이내 지역	소음 (Leq dB(A))	70	65	70	60
	진동 dB(V)	65	60	65	60
상업지역, 공업지역, 농림지역 및 준도시지역 중 취락지구 및 운동·휴양지구외의 지역, 미고시지역	소음 (Leq dB(A))	75	70	75	65
	진동 dB(V)	70	65	70	65

비고 : 1. 대상지역의 구분은 국토이용관리법에 의하며, 도시지역은 도시계획법에 의함.

2. 정거장은 적용하지 아니하며, 철교는 2010년 1월 1일부터 적용.
3. 이 규칙 공포일 이후 준공되는 철도는 이 규칙 시행일부터 2010년 1월 1일부터의 한도를 적용함.

나. 국외 철도연변 소음·진동 기준

- 외국에서의 소음 기준이나 규제는 특정음원으로 부터의 주민반응도 조사와 소음폭로의 상관관계 연구에 의해 제정되어 왔으며, 도로소음이나 항공기 소음에 비해, 철도소음의 경우 네덜란드, 일본, 프랑스 및 덴마크 등 몇몇 나라를 제외하고는 소음 폭로 허용한도에 대한 일관적이고 분명한 지침이 마련되어 있지 않음.
- 그러므로 철도소음에 대한 기준 마련을 위한 주민 반응 조사결과에 의하면, 불만도에 있어서는 첫째 대화 방해, 둘째 휴식방해, 셋째 수면 방해로서 수면 방해가 상대적으로 불만도가 낮은 것으로 나타나 야간의 경우에 주간과는 다른 기준을 설정할 수 있는 근거가 되고 있음.
- 대화 방해의 경우 철도소음이 상대적으로 불만도가 높은 것은 동일 등가소음 레벨에 대해 도로소음에 비해 적은 교통량에서 얻어진 것이고 각각의 열차가 보다 높은 peak 소음도를 발생시키기 때문인 것으로 생각할 수 있음.
- 외국의 소음기준을 살펴보면, 일본의 경우만 유일하게 최대 소음도를 이용하여 철도소음을 규제하며, 다른 대부분의 나라들에서는 등가소음도를 이용하여 철도소음을 규제하고 있음.

(1) 일본의 철도소음, 진동 기준

(가) 소음기준

- 소음의 규제, 대책 등의 기초가 되어야 할 목표치로서 일련의 환경기준이 1971년 이후 제정되어 소음 규제법과 별도로 시행되고 있다. 소음에 대한 환경기준은 소음원별(일반도로, 항공기소음, 신간선 철도소음) 환경기준, 측정방법, 측정장소 및 시각, 환경기준의 달성기간 등으로 구분된다. 항공기 및 신간선 철도소음(1975, 환경청 고시 46)에 관한 환경기준은 지역별로 기준치를 정했으며, 목표달성기간도 명시되어있다. 일반 소음에 관계되는 환경기준에서는 일반지역과 도로에 면한 지역으로 나누어 지역에 따라 각각 주간, 조석간, 야간에 대한 기준을 제시하고 있다.
- ① 신간선 철도소음에 관련된 환경기준(1975, 환경청 고시 46)
신간선 철도소음에 관련된 기준은 신간선 열차에 대해 상하행선 구별없이 연속적으로 20회의 통과열차 각각에 대해서 peak 소음도(slow 동특성, A특성 청감보정회로)를 측정, 평가하여 결정한 값으로서 평가치는 위에서 구한

peak 소음도 중 상위10회의 경우에 대한 산술평균치로 한다. <표2-5>는 신간선 철도소음에 관련된 환경기준을 나타낸다.

<표 2-5> 신간선 철도소음에 관련된 환경기준

지역의 유형	기준치dB(A)
I	70이하
II	75이하

I 지역 : 주거용으로 제공된 지역

II 지역 : 상·공업지역 등 I지역을 제외한 지역을 말하고 통상의 생활을 보전할 필요가 있는 지역

(나) 진동기준

① 신간선 철도의 진동기준

○ 일본 운수성의 철도에서 발생하는 진동의 지침은 <표2-6>과 같다.

<표 2-6> 신간선 철도소음에 관련된 환경기준

구분	진동 기준치dB(A)
제 1종 구역	65 이하
제 2종 구역	70 이하

1. 제 1종 구역은 양호한 주거환경을 보전하기 위해 특히 정온의 유지를 필요로 하는 지역 및 주거용으로 제공되기 위해 정온의 유지를 필요로 하는 지역.
2. 제2종 구역은 주거용을 포함한 상공업 등의 용도로 제공된 구역을 말하고 그 구역 주민의 생활환경을 보전할 필요가 있는 구역 및 주로 공업 등의 용도로 제공되어 있는 구역으로서 구역내 주민의 생활환경을 악화시키지 않기 위해 현저한 진동의 발생을 방지할 필요가 있는 구역
3. 신간선철도 진동의 보정가속도레벨이 70dB를 초과하는 지역에 대해서는 긴급히 진동원 및 장애방지대책등을 강구함.

(비고) 진동 레벨계의 지시가 불규칙적으로 대폭 변동하는 경우에는 80% 범위의 상단 즉, L10을 기준으로 함.

(2) 미국의 철도소음, 진동기준

(가) 소음기준

○ 미국 연방정부의 소음규제법은 소음규제에 대한 정책 및 방향만 제시하고 실제로 규제대상, 방법, 기준은 각 주나 시에서 실정에 맞게 조정 시행하고 있음. 아래 표는 미국에서의 환경 소음 규제치 및 권장치를 나타냄.

<표 2-7> 미국 주거지역 환경소음 규제치

제정기관	적용소음	규제기준		
		척도	규제치	규제내용 및 근거
EPA, 1972	모든 소음	Ldn	55	5% 안전오차를 고려한 건강유지를 위한 기준
HUD, 1979-80	항공기, 지상교통소음	Ldn	65이하	허용
			65이상	일반적으로 수용불가
Joint federal agencies, 1980	항공기, 지상교통소음	Ldn	55이하	수용가능
			55~65	부분적으로 수용가능
			65이상	수용불가
ANSI, 1980	항공기, 지상교통소음	Ldn	55이하	허용가능
			55~65	부분적으로 수용가능
			65이상	수용불가

EPA : the United States Environmental Protection Agency

DOT: the Department of Transportation

DOD: the Department of Defense

ANSI : the America National Standards Institute

(나) 진동기준

- 미국은 국가기준으로 제정된 것은 없고, 인체에 대한 진동기준으로 1979년 전신진동의 평가지침 ANSI S3.18과 1983년 건물내의 진동 평가 ANSI S3.29에서 ISO의 기준축방향에 따라 속도 방향별 가속도값을 고려한 벡터 합성치로 나타냄.
- 건물의 진동기준에 대하여는 특별히 발파진동과 관련하여 잘 알려진 미 광무국(USBM) 및 노천 광산국(OSM)의 기준을 토대로 이른바 “2 IPS(Inch per Second)” 안전치 기준이 통용되고 있음.

(3) 독일의 철도소음, 진동 기준

(가) 소음기준

- 독일은 연방정부의 법령에 철도소음과 도로소음을 총괄하는 [도로 및 철도에 의한 교통소음 방지법]이 제정되어 있으며, 허용 기준치를 초과할 경우, 적절한 소음 차단시설을 설치하도록 규정하고 있음.
- 또한 소음차단 시설을 설치할 경우 도로의 형태 및 해당지역 도시계획을 고려하여 미적인 면이 가미되도록 하고 있음.
- 독일의 철도소음 허용기준치는 아래 표와 같음.

<표 2-8> 독일의 철도소음 허용기준치

지역유형	환경기준 dB(A)	
	주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)
순수 혹은 일반주거지, 소규모 집단 주택지	60	50
도시 중심지역, 혼합지역, 특별주거지역	65	55
상업지역, 공업지역	70	60

(나) 진동 기준

- 건축지역별 실내에서 KB 허용치는 아래표와 같음.

<표 2-9> 건축지역별 실내에서 KB 허용치

건축지역분류	시간	KB허용치	
		지속진동	충격진동
보통의 주택가나 주말별장 혹은 도시 변두리	낮	0.2(0.15)	4
	밤	0.15(0.1)	0.15
대단위 마을, 혼합지역	낮	0.3(0.2)	8
	밤	0.2	0.02
상업지역	낮	0.4	12
	밤	0.3	0.3
산업지역	낮	0.6	12
	밤	0.4	0.4
용도 종류별 특수지역	낮	0.1~0.6	4~12
	밤	0.01~0.4	0.15~0.4

* 약 5Hz 이하의 주파수에서 건물의 수평진동에 대한 값

② 건물에 대한 진동기준

○ 일시진동 및 정상진동에 대한 건물의 등급별 허용 진동속도는 아래와 같음.

<표 2-10> 일시진동에 대한 건물의 허용진동속도 (DIN 4150-part3)

건물의 등급		I	II	III
건물의 형식		상업 혹은 산업용건물 : 사무실, 공장건물	주거용 건물 : 연립주택, 단독주택, 아파트	진동 예민 구조물: 취역건물이나, 문화재 등의 중요 구조물
주파수별 허용진동 속도 VR	10Hz 이하	20	5	3
	10~50Hz	20~40	5~15	3~8
	10~50Hz	40~50	15~20	8~10
	주파수 복합	40	15	8
* 측정 위치는 구조물 기초이며 10Hz 이하의 진동에 반응하는 허용진동속도임				

<표 2-11> 일시진동에 대한 건물의 허용진동속도 (DIN 4150-part3)

건물의 등급		I	II	III
건물의 형식		상업 혹은 산업용건물 : 사무실, 공장건물	주거용 건물 : 연립주택, 단독주택, 아파트	진동예민 구조물: 취역건물이나, 문화재 등의 중요 구조물
건물의 허용 진동속도 VR		≤5mm/sec (0.2 inch/s)	≤5mm/sec (0.2 inch/s)	—
* 측정 위치는 구조물 기초이며 10Hz 이하의 진동에 반응하는 허용진동속도임				

(4) 덴마크의 진동 기준

○ 덴마크에서는 진동레벨(KB-Weighted)은 75dB(V)를 초과할 수 없도록 규정하고 있음.

(5) 프랑스의 진동 기준

○ 프랑스의 인체에 대한 진동기준은 <표 2-12>과 같음.

<표 2-12> 프랑스의 진동 규제기준

장소	작업시간	가속도	진동속도
병원	야간	0.34mg	0.10mm/s
주택	주간	1.0 mg~2.0 mg	0.2mm/s~0.4mm/s
	야간	0.7 mg	0.14mm/s
사무실	-	2.0 mg	0.40mm/s
Workshops	-	4.0 mg	0.80mm/s

- 건물에 대한 위험도는 진동의 진폭과 진동수에 의존하는 것이 아니라 자연 상태에 의존하기 때문에 건물에 흡수되는 에너지는 진동속도에 비례하므로 기준안은 진동방향에 무관하게 최고속도에 밀접한 관련이 있음.
- 입자의 최고 속도가 2mm/s 이하일 때 비레가 성립되지 않을 가능성은 무시해도 좋으며, 입자 속도가 2~8mm/s 일 때 건물의 위험성은 주요 진동수 (건물의 바닥과 벽의 공진)에 달려있다고 보고되었음.

(6) 영국의 진동 기준

- 영국에서의 K값에 따른 인체의 진동가짐 정도는 아래와 같고, 여기서 K값은 변위와 진동수와의 함수이다. 그리고 건물의 종류와 진동노출시간에 따른 건물 내 K 허용치는 아래 표와 같음.

<표 2-13> K 값과 인체의 진동에 대한 지각정도

인체의 지각	K 값
느끼지 못함	<0.1
느끼기 시작함	0.1
거의 인식하지 못함	0.25
인식 가능	0.63
쉽게 인식	1.6
강하게 인식	4
매우 강하게 인식	10

<표 2-14> 건물 종류와 노출시간에 따른 허용 K값

건물 분류	시간	허용 K값		
		지속적인 진동	순간적인 진동	간헐적인 진동
병 원	낮	0.1	0.1	2.5
	밤			0.1
주거지역	낮	0.1	0.2(0.1)	4
	밤		0.1	0.1
도시주거지역 과 상업지역(사무 실 지역 포함)	낮	0.3(0.15)	0.63(0.3)	8
	밤	0.1	0.1	0.1
공업지역	낮	0.63(0.3)	0.8(0.4)	12
	밤	0.63(0.3)	0.8(0.4)	12

○ 팔호내의 값은 15Hz 이하의 진동수 영역에서 적용되어야 됨.

(7) 국제 표준화기구(ISO) 진동기준 권장치

○ ISO에서 제시한 건물에 대한 피해시점의 상한으로 6mm/s(충격에는 5~30mm/s)를 제시하였으며, 그 내용은 <표 2-15>과 같다. 여기서는 진동 기준치는 가속도(mm/s²)이고 이를 dB로 환산하여 나타내었음.

<표 2-15> 건물 종류에 따른 허용 진동기준

지역	시간	연속진동(dB)	충격진동(dB)
병원의 수술실 등 정숙을 요하는 지역	—	51	54
주거지	낮	57	60
	밤	54	
사무실	—	63	66
공장, 작업장	—	69	72

(8) 스위스의 진동 기준

○ 스위스의 건물 진동에 대한 허용기준은 아래와 같다.

<표 2-16> 건물의 진동에 대한 스위스 허용기준

종 별	구조물의 종류	발파진동		교통/기계진동	
		주파수 범위 (Hz)	입자 속도 (mm/s)	주파수 범위 (Hz)	입자 속도 (mm/s)
1종	강구조 및 철근 콘크리트 구조물 : 공장건물, 교량, 철탑, 지하터널 등	10-16 60-90	30 30-40	10-30 30-60	12 12-18
2종	기초 벽과 콘크리트 슬라브가 있는 건물 : 지하터널 및 지하공동 중석조재 라이닝 처리한 것	10-60 60-90	18 18-25	10-30 10-30	8 8-12
3종	석조재 벽체와 함께 목재 천장을 갖고 있는 건물	10-60 60-90	12 12-18	10-30 30-60	5 5-8
4종	역사적 가치가 있는 문화재 및 기타 진동 예민 구조물	10-60 60-90	8 8-12	10-30 30-60	3 3-5

제 4 절 철도 궤도상태 모니터링 장비 및 기법조사

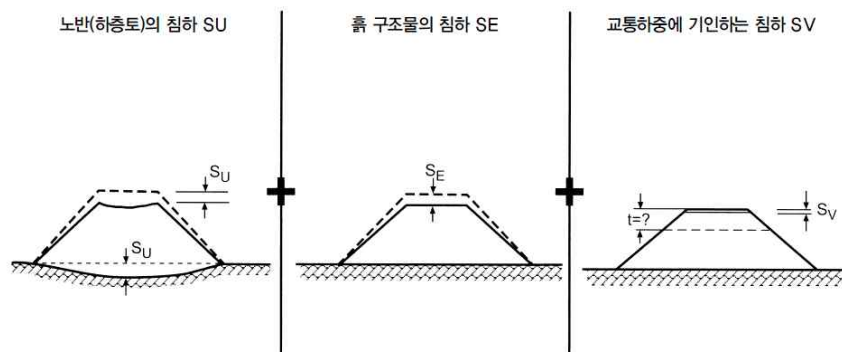
1. 콘크리트궤도 거동 검토

- 콘크리트궤도 구간에서 발생하는 흙노반의 침하는 콘크리트 궤도의 주행안정성에 영향을 미칠 수 있음. 주요 침하개소를 정리하면 아래와 같음.

<표 2-17> 구간별 주요침하개소

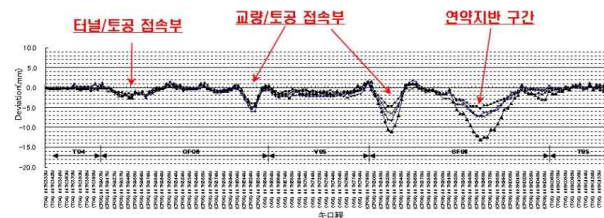
구간명	주요침하개소
접속부 구간	○ 교량-토공구간의 지지강성 변화가 가장 큼 ○ 부등침하 방지를 위해 drag plate를 설치 함
연약지반 구간	○ 설계단계에서 정밀 조사를 통한 적절한 처리공법 적용 필요 ○ 주요 연약지반 시중점부 등에서 침하 다수 발생
국부적 취약 구간	○ 계획노선 중 과거 소하천이었거나 주택이 있었던 개소 또는 복잡한 지형구간
구배 변경 구간	○ 궤도의 종방향 기울기가 변하는 구간 ○ 기울기변경에 따른 충격하중의 영향으로 인하여 다소 큰 침하 발생
배수불량 구간	○ 배수불량은 주로 땅깍기구간에서 발생 ○ 배수불량에 따른 이토화에 의해 지속적인 변형이 발생

- 콘크리트궤도는 이러한 조건들을 면밀히 검토하여 설계 및 시공됨에도 불구하고 여러 복합적인 원인에 의해 침하가 발생할 수 있으며 흙쌓기부에서 발생하는 침하는 아래 그림과 같이 원지반의 침하(S_u), 성토체의 압축으로 인한 침하(S_e), 열차운행하중에 의한 침하(S_v)로 분류 할 수 있음.

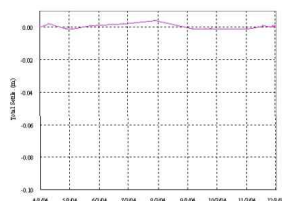


<그림 2-30> 침하의 종류

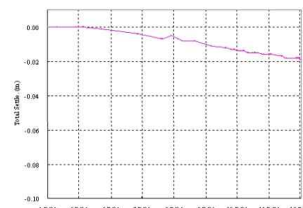
- 전체 침하에서 침하의 가장 큰 부분을 차지하는 것은 원지반 침하(Su)와 성토체 침하(Se)이며 특히, 성토체 침하(Se)는 성토 재료와 다짐 작업에 따라 좌우됨.
- 일반적으로 성토체의 침하(Se)는 전체 침하량에 비하여 작기 때문에 무시되어 왔으나, 고속철도에서는 고려되어야 하며 원지반 침하(Su)는 원지반의 압축성에 따라 수분 함량이 높거나 유기질 성분이 있는 지반에서 매우 큰 침하가 발생할 수 있음.
- 열차운행하중에 의한 침하(Sv)는 비교적 작게 발생하고 독일의 경우 정상적으로 시공되고 다지기 작업이 완료된 콘크리트궤도의 경우 열차운행하중에 의한 침하(Sv)는 경험적으로 약 5mm 정도로 보고되고 있음.
- 아래 그림은 콘크리트궤도 구간에서 획득된 대표적인 침하측정결과(4개월)로서 대만고속철도 구간 중 궤도공사 완료 후 발생한 노반침하 계측자료로써 주요 침하개소는 교량/토공접속부와 연약지반구간으로서 침하속도가 상당히 빠르며 국부적으로 침하가 발생하는 경향을 보이는 것을 알 수 있음.
- <그림 2-32(a)>는 추가침하가 발생하지 않은 경우이고, <그림 2-32(b)>는 침하가 지속적으로 진행되고 있는 경우로서 연약한 원지반에서 주로 발생한 사례임.



<그림 2-31> 대만고속철도의 침하 취약개소



(a) 침하가 완료된 경우

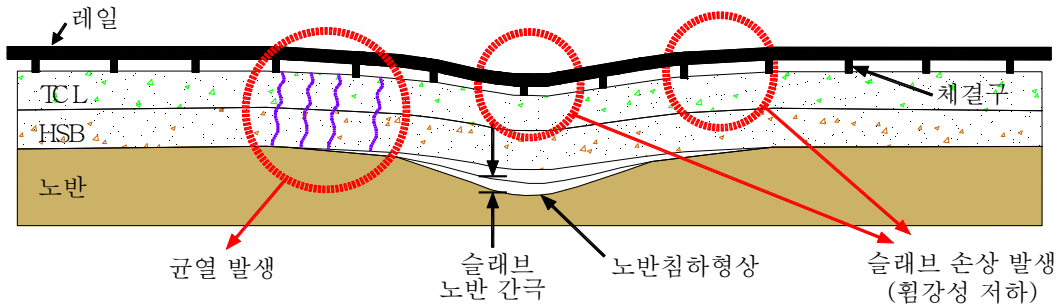


(b) 침하가 진행되는 경우

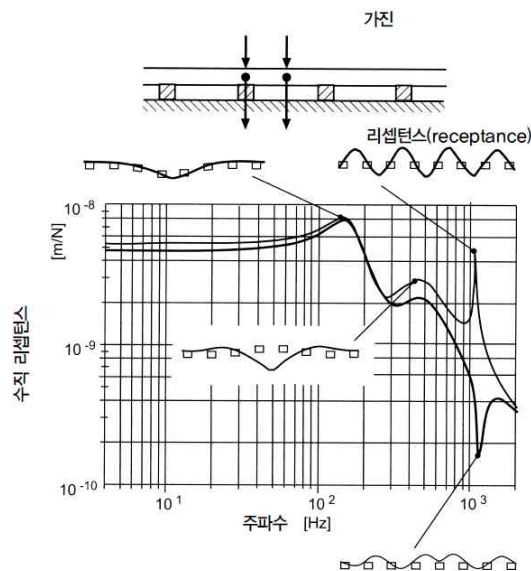
<그림 2-32> 대표적인 침하계측 사례

- 콘크리트궤도의 침하 안정화 단계 이후에도 열차 주행에 의한 탄성 및 소성 침하가 발생하고 있으며, 국내의 경우는 경부고속철도 2단계 구간과 호남고속철도 구간에서 토공구간, 편절편성구간, 통로박스구간 및 교량접속부구간에서 다수의 콘크리트궤도 침하 및 균열의심 사례가 보고되고 있음.

- 이러한 궤도노반에서의 침하 발생은 궤도틀림을 유발할 수 있으며 궤도틀림은 차량주행시 궤도상 진동을 발생시킴. 또한 일정간격으로 침목을 배치하여 레일을 지지하는 궤도구조상 차량주행시 진동의 발생은 피치 못하는 현상으로 간주 될 수 있으며 이러한 궤도구조상의 특징으로 인한 진동의 발생특성은 <그림 2-33(b)>와 같이 리셉턴스 발생을 분석해 봄으로서 이해할 수 있음.



<그림 2-33(a)> 철도 궤도의 노반 침하 및 균열발생 현상(콘크리트궤도)

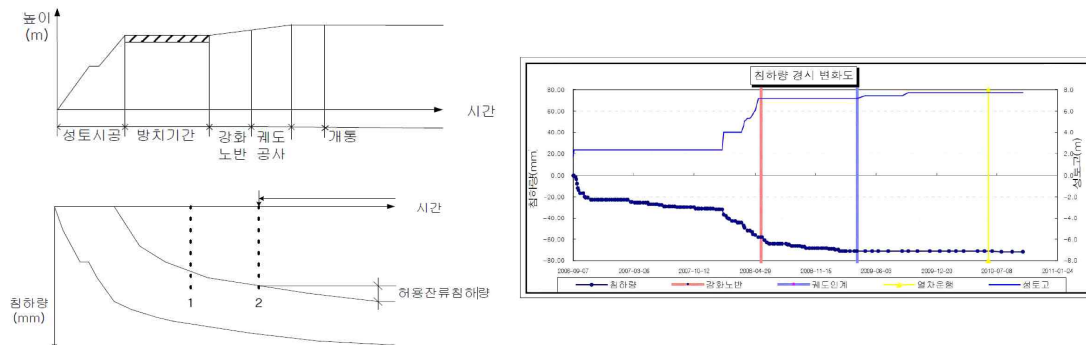


<그림 2-33(b)> 철도 궤도에서의 차륜하중 재하에 따른 수직 Receptance 발생특성

가. 콘크리트궤도 노반침하 계측

- 흙쌓기 구간에서는 성토 직후부터 침하가 발생하여 개통이후 5년 후에는 대부분의 침하가 안정화되는 것으로 알려져 있으며, 초기침하량에 비하여 유지보수 단계에서의 침하량은 미소하지만, 취약개소인 경우에는 침하량이 과다하게 발생 할 수 있음.

- 따라서, 침하에 대한 안정성을 확보하고 효율적인 유지보수를 위해서는 침하 계측자료를 지속적으로 확보하는 것이 매우 중요함으로 이러한 침하발생 특성을 모니터링하고 이를 분석함으로써 궤도의 틀림 발생과 이로 인해 차량주행에 따라 궤도상에 발생하는 진동의 발생특성을 파악할 수 있음.
- 또한, 향후 침하로 인한 문제발생의 원인 규명 및 보수보강을 위한 자료로써 매우 중요한 판단자료로 활용되기 때문에 개통이후 유지보수단계에서도 침하계측자료를 확보하는 것이 반드시 필요함.



<그림 2-34> 철도 궤도 조성공사 시점별 노반침하 추이 및 계측관리(예)

- 국내 선로운영 기관에서는 이러한 노반침하에 의한 궤도틀림 및 레일 결함 등의 계측을 위해 선로검측장비를 아래 <표 2-18>과 같이 운영 중에 있음.

<표 2-18> 선로검측차 현황(레일탐상차 제외)

장비명	도입년도	용 도	검측속도	사 진
종합검측차	2004	궤도틀림, 전차선, 신호, 통신 등	160km/h	
선로점검차	2006 ~ 2007	선로순회(동영상), 도상자갈, 체결구, 침목, 레일표면	100km/h	
궤도검측차	2013	궤도틀림, 전차선, 레일프로파일, 건축한계 등	140km/h	

- 현재 주요 측정결함으로 궤도틀림을 계측하고 있으며, 일정한 주기별로 측정되는 궤도검측데이터(trackgeometry data, Track induction data)를 이용하여 궤도 세그먼트의 이론상 길이에 대한 실측길이의 비로 궤도의 상태를 정량화하는 궤도품질지수(TQI : Track Quality Index)로 궤도선형을 관리함.
- 이러한 방법은 절대적인 값이 아닌 상대적인 값으로써 궤도품질 상태를 비교 하며, 세그먼트 길이의 단위를 528ft(1/10mile≒160.9m)로 정하고,

다음과 같은 간단한 삼각형 공식을 이용하여 각 측정 부분에서의 길이의 합으로 총 실측길이를 계산함.

<표 2-19> TQI 산정식

총 실측 길이	TQI 산정식
$L_s = \sum_{i=1}^n \sqrt{(y_{i+1} - y_1)^2 + (\chi_{i+1} - \chi_i)^2}$ - Δy : 두점사이의 이론치와 실측치 차 - Δy ; 측정간격	$TQI = \left(\frac{L_s}{L_o} - 1 \right) \times 10^6$ - L_s: 두점 사이의 이론치와 실측치 값

- 이러한 궤도품질지수는 지속적으로 측정 및 관리하여 매년 관리목표를 설정하여 이에 준하는 궤도관리를 진행하고 있음.
- 궤도검측차량을 활용하는 방법 외 콘크리트궤도의 침하와 같은 노반결함에 대한 측정시스템의 개발은 진행되고 있지 않으며, 고속철도 유지관리부서에서는 열차운행 동특성에 맞는 최적 선형 구축과 유지보수 최적화를 위해 트롤리 형태의 독일 “GEDO” 장비를 도입하여 유지보수에 활용하는 수준에 머물러 있음.



<그림 2-35> GEDO 궤도선형 측정장비

나. 콘크리트궤도 노반결함(침하/균열)에 대한 측정 및 유지보수 방법

- 콘크리트궤도 구간에서 발생하는 노반침하에 대한 측정과 분석은 아래와 같은 순서로 진행됨.

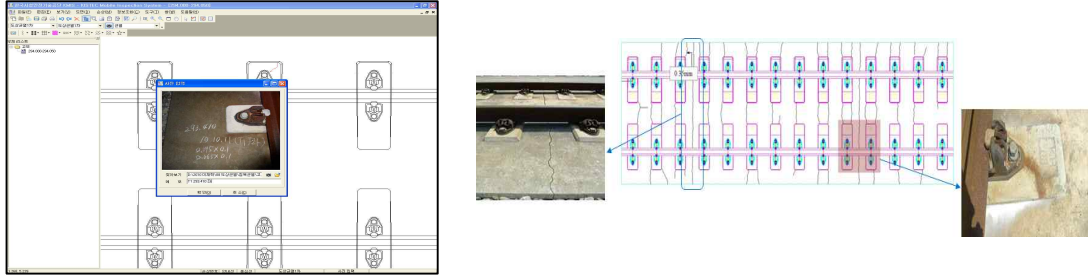
- 1) 침하계측자료 분석 : 노반에서 인수받은 지표 및 원지반침하계를 기본적으로 활용하고 개통이후 유지보수단계에서 별도로 정한 계측지점에서의 침하량값을 분석한다. 별도의 개소에서는 각 선로 중심에 침하핀을 설치하여 계측시 오차발생을 최소화하여야 한다. 측정위치는 궤도중심을 표준으로 하며, 상선과 하선을 별도로 계측하여야 한다.
- 2) 궤도틀림(고저)자료 분석 : 궤도틀림자료의 분석은 선로유지관리지침 제165조를 참조하여 침하에 민감한 장파장 고저틀림값과 차량의 수직진동가속도 측정값을 이용한다.

제165조(작업후의 궤도 안정화) 고속철도 궤도의 안정화에 영향을 주는 작업 후에는 안정화 될 때까지 열차속도를 제한하여야 하며 그 기준은 별표 18의 선로 작업 후 궤도안정화 기준과 같다.

- 3) 침하개소의 판별 : 침하계측자료와 궤도틀림자료를 바탕으로 침하가 진행중이거나 과도한 침하가 발생하였는지는 판단한다.
- 4) 정밀침하계측 시행 : 침하개소에 대한 정밀계측의 계측시기는 월 1회, 계측연장은 2m이내 단위로 계측을 시행하고 콘크리트 슬래브에 유해한 영향을 미치는지에 대한 지속적인 관찰을 수행하여야 한다. 계측의 정밀도는 $\pm 1\text{mm}$ 이내여야 한다.
- 5) 침하예측곡선 작성 : 운영기간별 계측결과와 예측결과를 바탕으로 침하예측곡선을 작성한다. 침하예측곡선은 허용잔류침하량의 초과여부를 판단하여 향후 유지보수 또는 하자보수요청에 필요하다. 기준 기간은 개통 후 60년을 기준으로 한다.
- 6) 궤도틀림기준의 만족여부 : 고저틀림을 기준으로 보수관리 기준치를 만족하는가를 확인한다. 기준치를 만족할 경우에는 별도의 보수조치를 시행하지 않는다.
- 7) 궤도공용성의 확보 여부 : 궤도틀림 유지보수기준을 초과하지만, 공용성이 확보되는 경우에는 고저정정패드를 이용하여 선형을 정정한다. 그러나 공용성이 저해되는 경우에는 노반보강 또는 복원공법을 적용하여 보수를 실시하여야 한다. 궤도공용성의 판단은 열차주행안정성, 승차감, 사용성 등의 해석적 방법을 적용하거나 유해한 응력이나 균열의 진행 유무 등에 대하여 경험적 방법으로 판단한다.

- 콘크리트궤도에서 발생하는 균열의 경우, 국내에서는 선로정비지침에서 균열폭 0.5mm 이상인 경우 보수를 시행하도록 규정하고 있으며 우수의 영향을 받는 구간은 0.3mm 이상이고 철근 피복 위치까지 균열이 발달된 경우에 보수를 시행하도록 하고 있어 다소 엄격한 규정을 적용함.
- Rheda2000 궤도를 설계한 독일에서는 모든 연속 철근보강 콘크리트궤도의 설계 시 균열 폭 목표치를 0.5mm 이하로 정하고 있고(AKFF, 4th ed), 이를 근거로 보수목표도 0.5mm를 초과하는 균열에 대해 시행하도록 하고 있음.
- 교량구간 콘크리트궤도의 경우에는 Eurocode(EC2)의 설계기준을 따라 균열폭 제어를 위한 철근량을 정하고 있는데 이 때 목표 균열폭은 0.3mm 이하임. (EN-1992-1)

- <그림 2-36>은 경부고속철도 2단계구간의 콘크리트도상의 효율적인 유지관리를 위하여 IT기술을 시설물유지관리기술에 접목한 관리시스템임.



<그림 2-36> 콘크리트케도 전산관리 현황

- 철도산업기본법에 따라 시설물의 유지보수 업무를 대행하고 있는 한국철도공사에서는 시설물의 취약요인을 18개로 구분한 중점관리대상개소를 선정하여 특별 관리하고 있음.
- 중점관리대상개소는 분기기 특성에 따른 요인(분기기 연속구간, 분기기간 직선거리 부족, 곡선분기기, 특수분기기 등), 장대레일 안정성 부족개소, 급구배 구간, 궤도재료 취약개소(37kg 레일부설, 레일마모, 베이스플레이트 미부설, 부패침목 다수구간, PC침목 손상구간), 노반취약개소(분니, 동상) 등 사고 및 장애발생이 우려되는 734개소(2012.12월 기준)를 선정하여 관리하고 있음.
- 중점관리대상개소로 지정된 개소는 주의(취약)내용 및 발생하기 쉬운 장애(사고)에 대한 분석과 관리방안 및 해소방안이 도출되어 있으며, 최종적으로 보수 조치 후 관리목록에서 제외시키는 프로세스를 취하고 있음.

2012.12.28 현재

연번	취약요인	관리번호	KOVIS			관리소속		구간	위치(Km) (구도출발)	주의(취약)내용	상행하행문자	운영방안	관리방안	해소방안	비고		
			기능위치	유지보수 계획	일정계획 지정일	본부	사업소 (사설과)										
351	E 장대레일 좌측부재	02-E-1	R-01-0105118-TR2	2000039505	2011-09-15	수도권 서부	수도권 (경원)	유선	경부선	영월-소산	53.000	장대레일 좌측부재가소 (수평교각)	레일좌측	폭발시 임시용 백지	레일교량 토성보통		
352	E 장대레일 좌측부재	03-E-3	R-13-120303A-TR2-M/M001	2000039508	2011-09-15	수도권 동부	경북	동부선	경원선	동두천 중앙구내	52.500	장대레일 좌측 부재가소	레일좌측	레일날아 및 상행시 운행정지	선형가함		
353	E 장대레일 좌측부재	08-E-1	R-08-380045B-TR2-M/M001	2000039514	2011-09-15	광주	광주	광주선	광주선	곡학강-광주	81.859 ~ 101.133	일종의 좌측연속부재로 통행통함	레일좌측	폭발시 임시용 백지	가동일시정지		
354	E 장대레일 좌측부재	10-E-1	R-02-023047B-TR1-M/M001	2000039515	2011-09-15	광북	수도	수도선	수도선	유보-한 분	308.780 ~ 309.454	-반향구선 통행통함	레일좌측	선형가함	2009년도 불하구간 일시정지	2011년 이후	중거
355	E 장대레일 좌측부재	11-E-1	R-75-751038B-TR2-M/M001	2000039516	2011-09-15	대구	경북	경북선	경북선	동원-경주	108.200	R-300구간으로 통행시 통행통함	레일좌측	폭발시 임시용 백지	선형가함		
356	E 장대레일 좌측부재	11-E-2	R-75-751174B-TR2-M/M001	2000039517	2011-09-15	대구	경북	나철	통행선	나철-나철	117.800	R-300구간으로 통행시 통행통함	레일좌측	폭발시 임시용 백지	선형가함		
357	곡선구간용 레일마모	01-H-1-1	R-01-0100004-SW0-P16A	2000039555	2011-09-15	서울	서울	서울	경부선	서울구내	P16A	황태일 마모량이 남하여 중점관리 필요함	차량정지	(25m/h)	승객정지 및가수시보수	분기 가함	60kg 12#
358	곡선구간용 레일마모	01-H-1-2	R-01-0100004-SW0-P16B	2000039556	2011-09-15	서울	서울	서울	경부선	서울구내	P16B	황태일 마모량이 남하여 중점관리 필요함	차량정지	(25m/h)	승객정지 및가수시보수	분기 가함	60kg 12#
359	곡선구간용 레일마모	01-H-2-1	R-01-010032A-SW0-P28A	2000039557	2011-09-15	서울	서울	유선	경부선	서울-유선	P28A	황태일 마모량이 남하여 중점관리 필요함	차량정지	(25m/h)	승객정지 및가수시보수	분기 가함	60kg 10#
360	곡선구간용 레일마모	01-H-2-2	R-01-010032A-SW0-P28B	2000039558	2011-09-15	서울	서울	유선	경부선	유선구내	P28B	황태일 마모량이 남하여 중점관리 필요함	차량정지	(25m/h)	승객정지 및가수시보수	분기 가함	60kg 10#
361	곡선구간용 레일마모	01-H-3-1	R-01-010032A-SW0-P37A	2000039559	2011-09-15	서울	서울	유선	경부선	유선구내	P37A	황태일 마모량이 남하여 중점관리 필요함	차량정지	(25m/h)	승객정지 및가수시보수	분기 가함	50kg 8#
362	곡선구간용 레일마모	01-H-3-2	R-01-010032A-SW0-P37B	2000039560	2011-09-15	서울	서울	유선	경부선	유선구내	P37B	황태일 마모량이 남하여 중점관리 필요함	차량정지	(25m/h)	승객정지 및가수시보수	분기 가함	50kg 8#

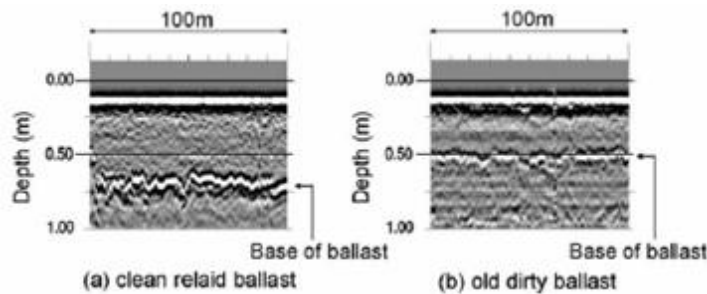
<그림 2-37> 중점대상개소 관리대장

2. 국내외 선로 상태평가 기술현황 조사

가. 도상 및 노반상태평가 기술

(1) GPR(Ground Penetrating Radar)를 활용한 하부구조 결함측정 기술

- GPR(Ground Penetrating Radar)은 상이한 유전체적 특성을 가진 재료의 접점으로부터 반사되는 전자기파를 활용하는 기술로 전송된 반사파는 높은 주파수(10 - 2000 MHz)를 가지며 최대 10ns 동안 유지가 됨.
- GPR을 활용하여 상이한 계층과 그 깊이에 관한 정보를 얻을 수 있으며 상부 구조(선로 및 콘크리트 침목)의 내부에 설치되는 강재로 인해 간섭이 다수 발생할 수 있으나 지난 수 년 동안 이 문제가 해결되어 지금은 이런 측정을 실시하는 사례가 다수 있으며, 철도용 GPR 에 대한 최근의 연구 중 일부는 전자기파 응답의 주파수 분석으로부터 일정하지 않은 도상자갈층 검출기술을 제시함.



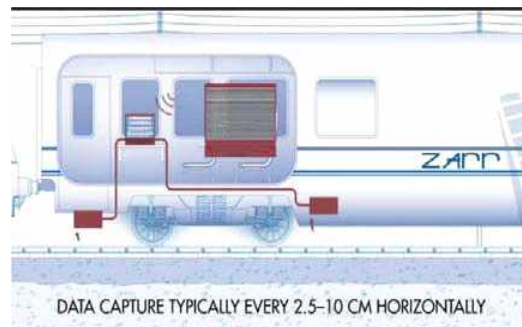
<그림 2-38> 신호처리를 통해 재구성된 자갈층 분포

- 국내 도로분야에서는 약 10년 전부터 비파괴검사를 이용한 도로포장 상태분석을 실시하여 왔으며, 한국도로공사 도로교통기술원의 경우, 60km/h 이상의 속도로 주행하며 아스팔트 콘크리트 포장의 두께를 평가함으로써, 개통 후 발생하는 잔류침하량을 측정하는데 GPR탐사법을 활용하고 있음.
- 또한, 구조물 안전진단 분야에서는 GPR을 활용하여 제방 배수통문의 철근부식 정도와 배면 틈새·균열 정도를 파악하였으며, 지질자원 분야에서는 지하의 유전을 해석을 위한 기초연구로서 주파수 영역에서의 1차원 GPR모델링 알고리즘을 완성하여 현장에 적용하고 있음.

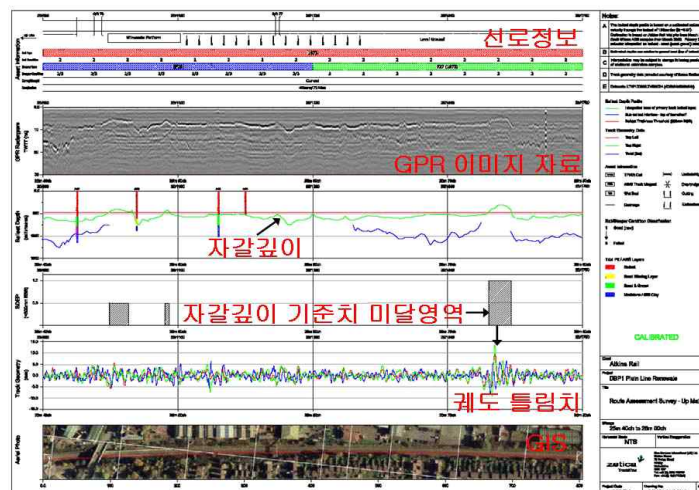


<그림 2-39> 한국도로공사 GPR탐상차

- 최근, 영국을 중심으로, 운행 중인 선로에서의 도상 상태평가를 위하여 GPR탐사법이 활용되고 있으며, 원래 GPR은 지표면에 매설되어 있는 지뢰나 배수구의 탐지 등을 위해 사용된 기법으로서 철도분야에서는 자갈의 깊이, 입도분포, 습윤층 탐지 등에 적용되고 있으며, 대표적인 시스템으로 영국의 Zarr, 독일 Saferail, 러시아 OKO 등이 있음.



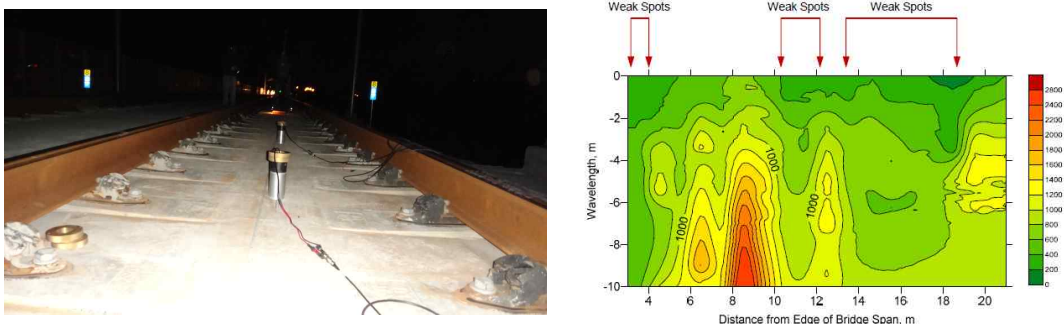
<그림 2-40> GPR 장착 차량(위) 및 시스템 개념도(아래)



<그림 2-41> GPR 결과를 분석한 도상깊이 및 상태 평가용 시스템

(2) Fractal 시험을 통한 하부구조 결함측정 기술

- FRACTAL(Flexural Rigidity Assessment of Concrete Tracks by Antisymmetric Lamb Waves) 기법은 콘크리트 슬래브의 상대강성 평가를 위해 활용되는 비파괴 Lamb파 기법으로, Lamb파의 전파특성을 이용하여 비파괴 방식으로 콘크리트궤도의 휨 강성을 평가하고 Lamb파 속도의 2차원 분포도를 통해 결함 가능성을 시각적으로 확인하는 기술임.
- 침하가 발생한 부위를 포함한 인근 콘크리트 슬래브의 Lamb파 속도를 연속적으로 측정하여 횡방향 변이성 또는 국부적 연약부 등을 찾아내어 노반의 횡방향 변이성 또는 국부적 연약부는 슬래브 처짐과의 관계로 평가하고 궁극적으로 가장 유력하게 대두되는 슬래브궤도 처짐 원인으로서의 지반강성을 평가하나, 적용구간이 매우 국지적이며 현장 조사에 시간이 많이 소요되는 단점이 있음.



<그림 2-42> 콘크리트궤도에서 수행한 Fractal 시험 장면 및 시험결과

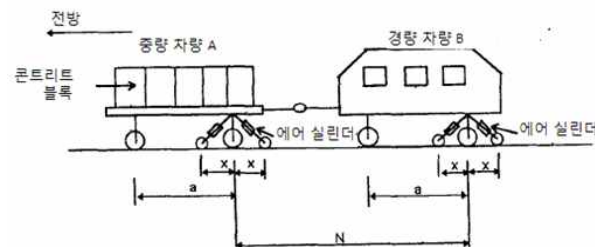
나. 궤도강성평가 기술

- 철도 궤도의 강성(수직 궤도 하중/궤도처짐)은 지지력, 통과하는 차량의 동적 행태, 특히 궤도 구성요소의 궤도 기하학적 특성과 그 수명에 영향을 끼치는 궤도 설계의 기본적인 매개변수이며 전 세계적으로 연구목적으로 정적인 상태에서의 궤도강성 측정은 오래전부터 수행되어 오고 있다. 특히, 1998년에서 2000년초까지 프로토타입의 트롤리에서 궤도강성을 측정하고자 하는 노력이 일부 성과를 거두고 있음.
- 궤도의 강성을 측정하기 위해서는 충격 해머, FWD, 궤도 하중 차량 등 간단한 장치를 사용할 수 있으며, 궤도의 강성을 측정하는 매우 간단한 방법으로 변위 변환기 또는 가속도계를 침목 그리고 선로에서 사용하여 열차가 통과하는 동안에 그 반응을 측정하는 방법이 있음.

- 이러한 시험에서 충격 해머는 손바닥 크기의 장치로 선로 또는 침목을 충격하기 위해서 사용하고 해머의 두부에는 항력 변환기가 장착되어 있어 충격을 측정(f)하고, 선로의 두부 또는 침목에는 가속도계가 장착되어 해머의 충격력과 선로의 가속도(v) 사이의 전달 함수를 계산하여 결과값을 분석함.
- FWD(Falling Weight Deflectometer)는 선로를 제외한 궤도 구조물의 강성을 측정하기 위해 가장 자주 사용되는 장치이다. 표준 FWD 장치는 발판에 장착된 고무 완충장치에 일정높이에서 떨어뜨린 추로 인한 충격을 해당 판의 중간에 위치한 로드 셀 (Load Cell) 을 이용해 측정하는 기술임.

(1) CARS (China Academy of Railway Sciences, 중국)

- CARS (China Academy of Railway Sciences) 는 연속적인 궤도 강성 측정을 위한 장치를 개발한 최초의 기관들 중 하나로 최대 60km/h 의 속도로 운행하는 측정 차속에 상이한 하중을 적용하는 2개의 궤도 기하학적 현 측정 장치를 사용하고 있음.
- 경량 차량의 무게는 40kN으로 중량 차량이 기록하는 강성 측정값에 대한 궤도 기하학적 구조 이상의 효과를 감소시키기 위해서 사용되고, 중량 차량의 축 하중은 80~250kN 까지 변경하여 서로 다른 하중으로 측정을 반복함으로써 궤도의 동일한 구간에 대하여 비선형적 특성을 조사할 수 있는 장점이 있음.

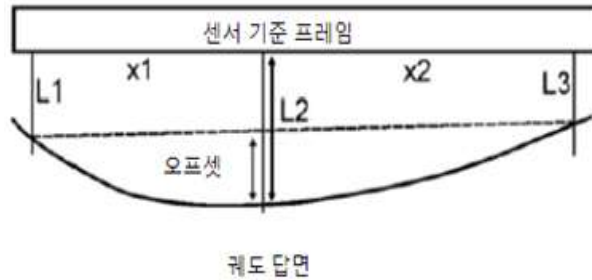


<그림 2-43> CARS의 강성 측정의 원리

(2) TTCI(Transportation Technology Center, Inc., 미국)

- TTCI의 TLV(Track Loading Vehicle)은 정지된 상태와 최대 16km/h의 속도로 운행할 때 측방 및 수직 방향의 강성을 측정하기 위해서 개발한 장비로 유압으로 4~267kN의 수직 하중을 (수직 및 측방향으로) 가할 수 있으므로 이를 통해 발생하는 궤도처짐은 레이저 센서를 활용하여 측정하여 선로 굽힘 처짐의 현 측정 결과를 도출하는 방식임
- 해당 장비는 9kN의 하중을 적용할 수 있는 공압 작동기로 중심부에 하중재하 장비가 장착된 빈 차량에서도 측정이 가능하여, 낮은 하중에서 측정한 처짐은

궤도의 이상을 나타내며, 높은 하중과 낮은 하중에서 측정된 처짐 사이의 차이를 취하면 궤도의 탄성을 측정할 수 있음.



$$offset = L2 - x2(L1 - L3)/(x1 + x2) + L3$$

<그림 2-44> 레이저를 이용한 선로 굽힘 처짐 측정으로 산출한 현 값

(3) 맨버켓(스웨덴)

- 스웨덴의 TLV와 함께 운행 중 강성 측정을 위해 사용할 수 있는 프로토타입의 트롤리가 1998~2000년에 Eurobalt2 프로젝트를 통해 개발되었고 이것은 다양한 철도 관리국 및 철도 기업과 프랑스, 독일, 영국, 스웨덴의 대학들이 공동으로 진행한 연구 프로젝트임
- 2003~2004년에 새로이 개발된 RSMV(Rolling Stiffness Measurement Vehicle)이라 불리는 이 차량은 재개발된 이중 차축 화차이며, 일반적인 차륜 축 중 하나 위에 위치한 2개의 추를 통해 동적으로 움직이며, 궤도의 강성은 측정된 항력과 가속도를 이용해 계산함.



<그림 2-45> RSMV의 측정 장치(철제 우리 안의 측정 차축 위에 위치한 수직으로 움직이는 추)

- 정적 축 하중은 180kN이며 최대 동적 축 하중 진폭은 60 kN이며 이 RSMV는 최대 50 Hz까지의 동적 궤도 강성을 측정할 수 있으며 동시적인

– 64 –

(5) SBB, 스위스

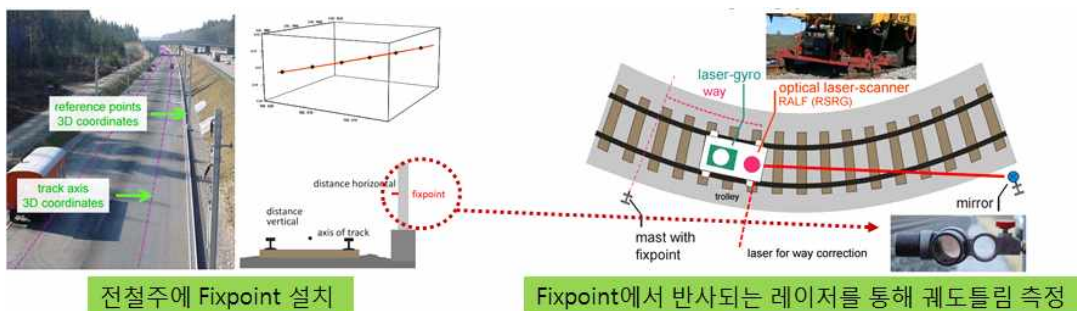
- 스위스 철도 SBB(Schweizerische Bundesbahnen)은 중국과 TTCI의 장치와 유사한 아래 그림과 같은 장치를 개발했으며, 2개의 기하학적 구조 측정 장치를 적용하여 측정하는 방식임.



<그림 2-49> 스위스의 궤도 강성 측정 차량

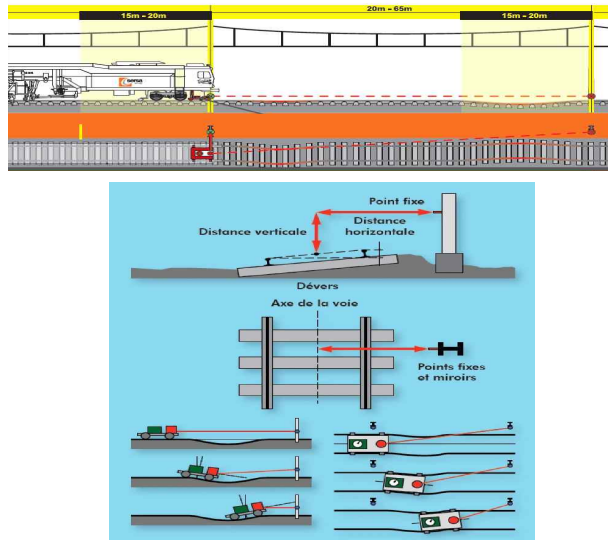
다. 궤도절대선형 평가기술

- 전세계적으로 활용되고 있는 궤도절대선형관리시스템에서 대형보수장비에 부착하여 활용되고 있는 시스템 중에서 가장 두각을 나타내고 있는 것은 스위스 SERSA 에서 개발된 PALAS 시스템이며 이 시스템의 경우, 유지보수 장비 전방에 레이저 부착(전철주), 기준점 레이저 반사 원리 이용하는 방식임.



<그림 2-50> 궤도절대선형 측정을 위한 SERSA PALAS 시스템

- PALAS는 절대좌표를 이용하여 궤도검측 시스템이며 SBB의 DB인 DFA 시스템에 연동되고, 도상다짐 장비(MTT)에 부착하여 절대좌표에 의한 장파장 궤도틀림 정정작업 및 곡선반경 40m 미만의 미터 궤간 급곡선부에서의 도상다짐에도 적용할 수 있음.



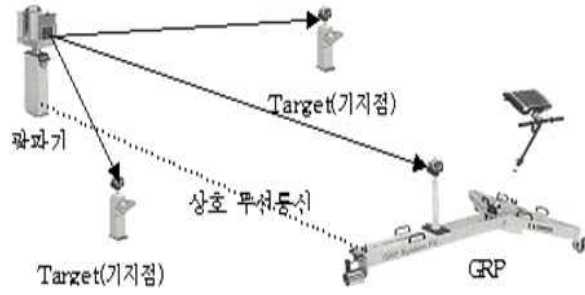
<그림 2-51> PALAS 시스템을 활용한 궤도관리 개념

- 그 외 오스트리아 BACARA는 PALAS와 동일한 원리이며, 장비에서 레이저 장치 분리하여 사용하는 방식이며, 스위스 GRP는 1대의 광파기와 2개 이상의 프리즘가 한 세트의 GPR장치로 구성되는 장비이다. 독일 Kinematic는 지점의 GPS와 궤도검측장비의 조합을 통해 궤도선형을 측정함.



<그림 2-52> 보수차량에 장착된 측정시스템

- 국내에서는 관련 기술개발이 진행되고 있지 않으며, 고속철도 유지관리 소속에서는 열차운행 동특성에 맞는 최적 선형 구축과 유지보수 최적화를 위해 트롤리 형태의 독일 “GEDO” 장비를 도입하여 유지보수에 활용 중에 있음.

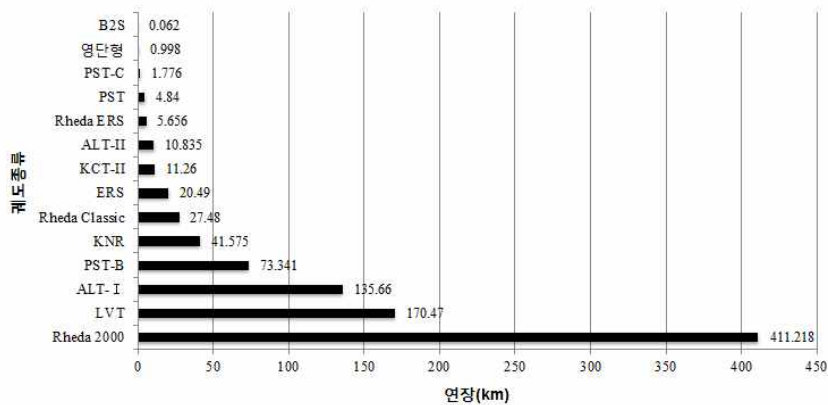


<그림 2-53> 레도절대선형 측정 장비

제 5 절 국내외 철도시설물 현황 및 기술기준

1. 철도 구조물 체결구의 종류 및 구조

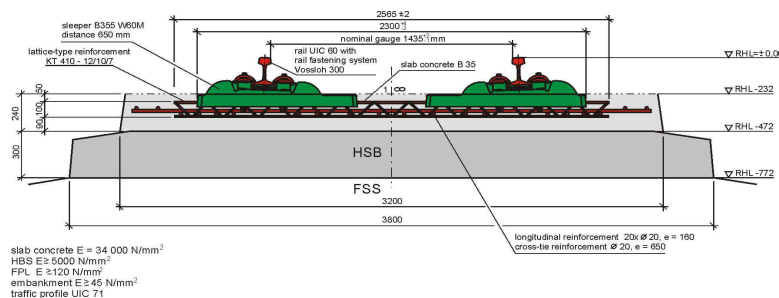
- 일반선 및 고속선에 부설된 국내 콘크리트궤도의 종류는 Rheda 2000, LVT, ALT 등 총 14가지이며, 이 중에서 Rheda 2000의 연장은 약 411km(약 45%), LVT의 연장은 약 170km(약 19%), ALT-I의 연장은 약 136km(약 15%) 순으로 많이 부설됨.
- 각 궤도 종류에 따라 적용되는 대표적인 체결구의 종류는 6가지임.

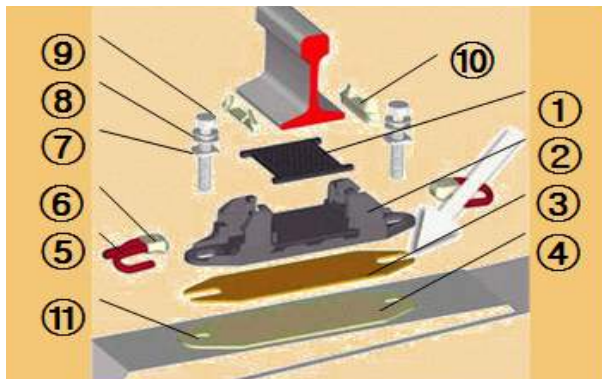


<그림 2-54> 콘크리트궤도 종류에 따른 연장

가. Rheda 2000(SFC 체결구)

- 래티스 철근으로 연결된 RCT Twin Block 침목을 콘크리트도상에 매립하고 레일과 침목사이에 탄성재를 삽입하여 열차의 충격을 감소시키며, 침목하부 철근과 종철근을 매입 후 콘크리트도상과 일체화하는 궤도구조임
- 시공단계가 2단계로 가장 단순화되어 있으며, 시공 중 레일온도 영향이 없다는 장점이 있으나 특수장비 및 조작기술의 확보가 필요하고, 침목 취급 시 침목연결 철근 변형을 주의 해야함.



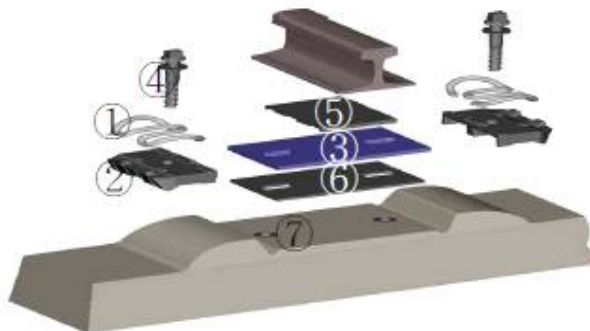
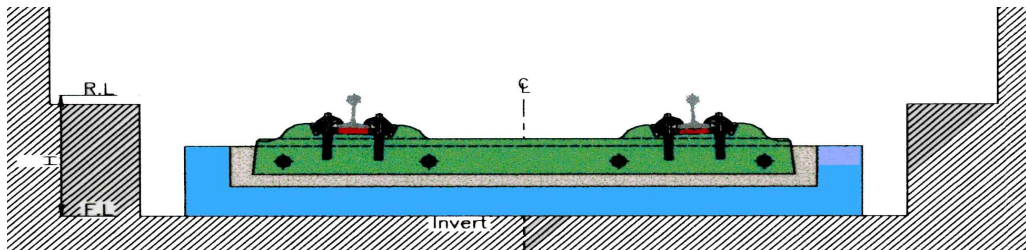


- ① 레일패드
- ② 베이스플레이트
- ③ 높이 조절판
- ④ 받침판(동형패드)
- ⑤ 패스트클립
- ⑥ Clip 절연체
- ⑦ 톱니 와샤
- ⑧ 스프링와샤
- ⑨ 고정볼트
- ⑩ Side Post 절연체
- ⑪ 매입솔더

<그림 2-55> Rheda 2000 레일 체결구 구성품

나. Rheda Classic

- 트러프를 시공 후 트러프 내부에 탄성식 베이스플레이트로 구성된 PCT Mono Block 침목과 침목관통 종방향 보강철근과 횡철근을 매입 후 도상콘크리트를 현장에서 타설하는 일체형 궤도구조임.
- Maintenance Free를 기하고 터널 내에서는 환기개선 효과를 위해 시공되며, 기술성, 시공성, 유지보수성, 열차운행 안전성을 확보가 가능함.
- 단일체에 따른 품질개선, 균등한 시스템의 구성에 이점이 있으나, 현장품질관리 중요, 시공방법이 복잡해지는 단점을 보유함.

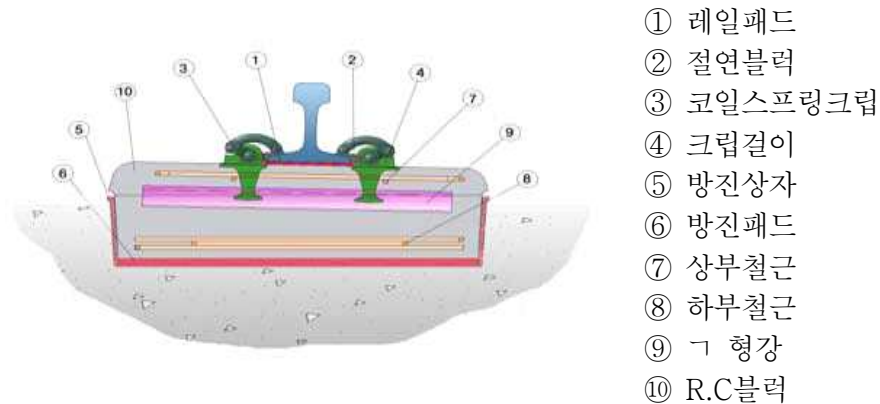
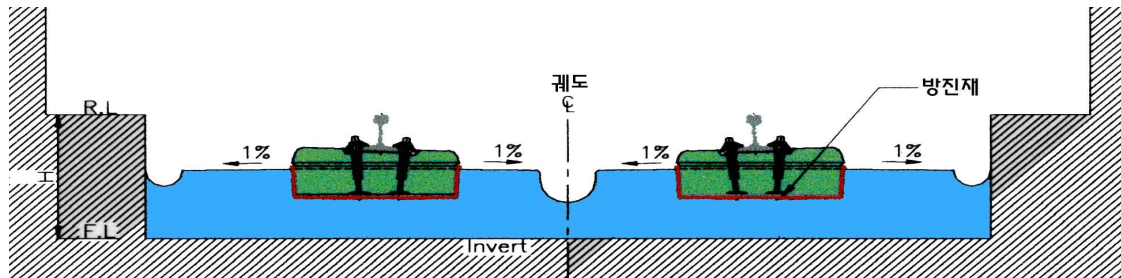


- ① 텐션클램프
- ② 가이드플레이트
- ③ 베이스플레이트
- ④ 나사스파이크
- ⑤ 레일패드
- ⑥ 탄성패드
- ⑦ 매립전

<그림 2-56> Rheda Classic 레일 체결구 구성품

다. LVT

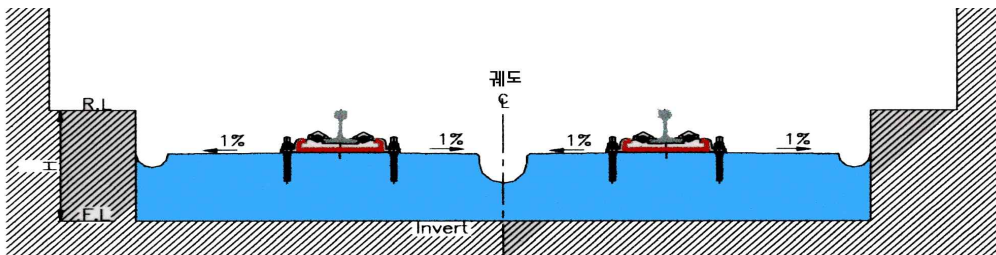
- 미국 Sonneville 社가 개발한 매립식 모노블럭 궤도시스템으로 RC블럭(LVT침목)을 방진패드와 상자로 감싸 콘크리트 도상과 분리 매립한 방진궤도구조임.
- 열차의 수직, 수평하중에 대한 안전성, 침목파손 시 침목 갱환이 용이, 절연효과가 우수한 장점이 있으며, 방진재의 점검, 교체 시 침목을 들고 확인 또는 교체하여야 하는 번거로움, 진도정감에는 효과적이나 고주파 소음에 대하여는 불리함.

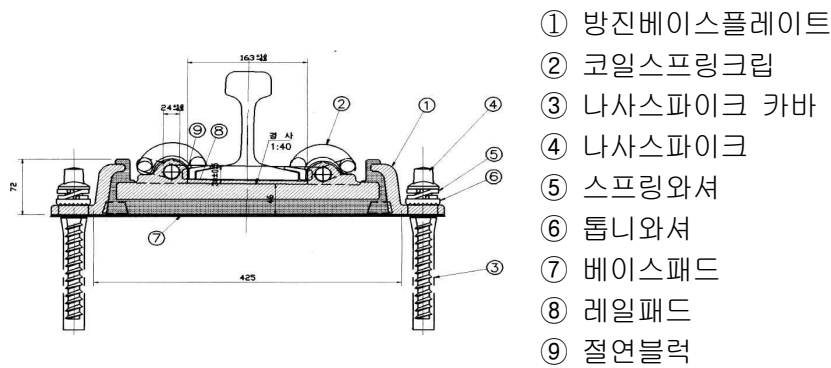


<그림 2-57> LVT 레일 체결구 구성품

라. ALT-1

- 방진체결장치를 콘크리트도상에 직결한 방진궤도구조로 단일체에 따른 품질개선, 균등한 시스템의 구성되는 장점이 있으나, 현장품질관리 중요, 시공방법성이 다소 떨어짐.

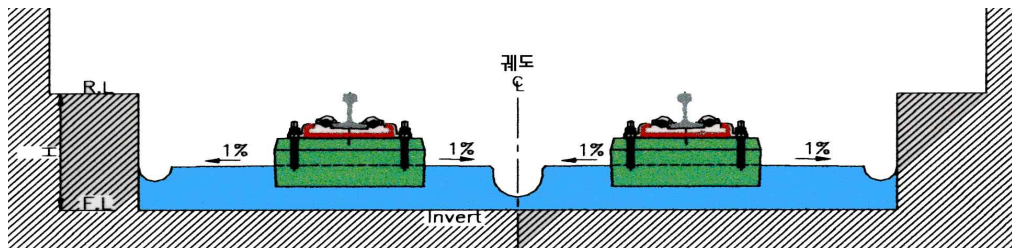




<그림 2-58> ALT-1 레일 체결구 구성품

마. ALT-II

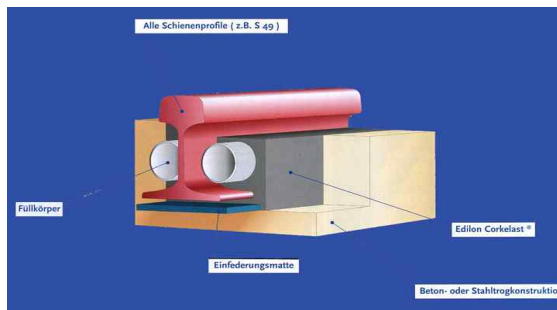
- 탄성체결장치 방진체결구와 앵커볼트 커버를 내장하여 공장에서 사전 제작하는 RC블럭을 콘크리트도상에 직결(개량형)체결하는 구조임.



<그림 2-59> ALT-II 레일 체결구 구성품

바. ERS

- 레일을 슬래브 속에 매립하여 연속적으로 지지하는 구조로단속지지 구조에서 발생하는 pinned-pinned 공진해소→레일압력 감소, 파상마모 방지, 진동 및 소음의 저감할 수 있는 장점 있음.



<그림 2-60> ERS궤도 구조 및 현장사진

2. 철도 구조물 레일체결장치 기술기준

가. KR형 레일체결장치(레일패드 자재시방서(중요부분 발취))

(1) 레일체결장치 분류

항목	품명	세분류
1.2.1.	체결스프링	UIC60 레일용
1.2.2.	가이드플레이트	UIC60 레일용
1.2.3.	레일패드	UIC60 레일용(6mm)
1.2.4.	베이스플레이트	UIC60 레일용(16mm)
1.2.5.	탄성패드	UIC60 레일용(12mm)
1.2.6.	언더플레이트	UIC60 레일용
1.2.7.	나사스파이크	UIC60 레일용
1.2.8.	고정용 패드	UIC60 레일용(4mm)
1.2.9.	높이조정용 패드	UIC60 레일용(2, 3, 5, 10, 30mm)

(2) 구조 및 형태

제작자는 감독자로부터 제작도면을 승인 받은 후 제품을 생산하여야 하며, 레일체결장치의 형상 치수, 허용오차는 제작도면에 의한다.

레일체결장치의 특성상 각 구성품이 제작도면의 허용치 이내라 하더라도 각 구성품을 레일에 조립·체결한 상태에서 제작도면에 명시한 허용한도 범위 이내이어야 한다.

(3) 재료 및 제작기준

(가) 재료

레일체결장치의 제작에 사용되는 모든 재료는 본 시방의 재료기준에 의하되, 규정된시험을 실시하여 품질의 적합여부를 확인한 후 적합할 경우에 사용하고, 관련 시험성적서 등을 기록으로 남겨두어야 한다.

(나) 체결스프링

재료는 KS D 3701 「스프링 강재」의 SPS 9 동등 이상의 제품 또는 아래표의 강종에 적합한 제품을 사용하여야 하며, 제품의 경도는 표면경도 HBD ϕ 2.9~3.1(HRC 42~47) 범위 이내이어야 한다.

항목		품명		시험규격
		SPS 9	SPS 9A	
성분	탄소(Carbon)	0.52~0.60	0.56~0.64	KS D 1652
	실리콘 (Silicon)	0.15~0.35	0.15~0.35	
	망간 (manganese)	0.65~0.95	0.70~1.00	
	인 (Phosphorus)	0.035이하	0.035이하	
	황 (Sulphur)	0.035이하	0.035이하	
	크롬 (Chromium)	0.65~0.65	0.70~1.00	
경도(HRC)		42~47		KS B 0806

(다) 레일패드

재료는 에틸렌 비닐 아세테이트(EVA : Ethylene Vinyl acetate copolymer) 동등 이상의 제품을 사용하여야 하며, 제품의 기계적 성질은 아래 표에 적합하여야 한다.

레일체결장치의 특성상 각 구성품이 제작도면의 허용치 이내라 하더라도 각 구성품을 레일에 조립·체결한 상태에서 제작도면에 명시한 허용한도 범위 이내이어야 한다.

항 목	단 위	기 준	시험규격
밀 도	g/cm^3	0.920 ~ 1.000	KS M ISO 1183
전기고유저항	$\Omega \cdot \text{cm}$	10^8 이상	KS C IEC 60093
경 도	D	37 ~ 47	KS M ISO 0868

(라) 고정용 패드, 높이 고정용 패드

재료는 HDPE 동등 이상의 제품을 사용하여야 하며, 제품의 기계적 성질은 다음 표에 적합하여야 한다.

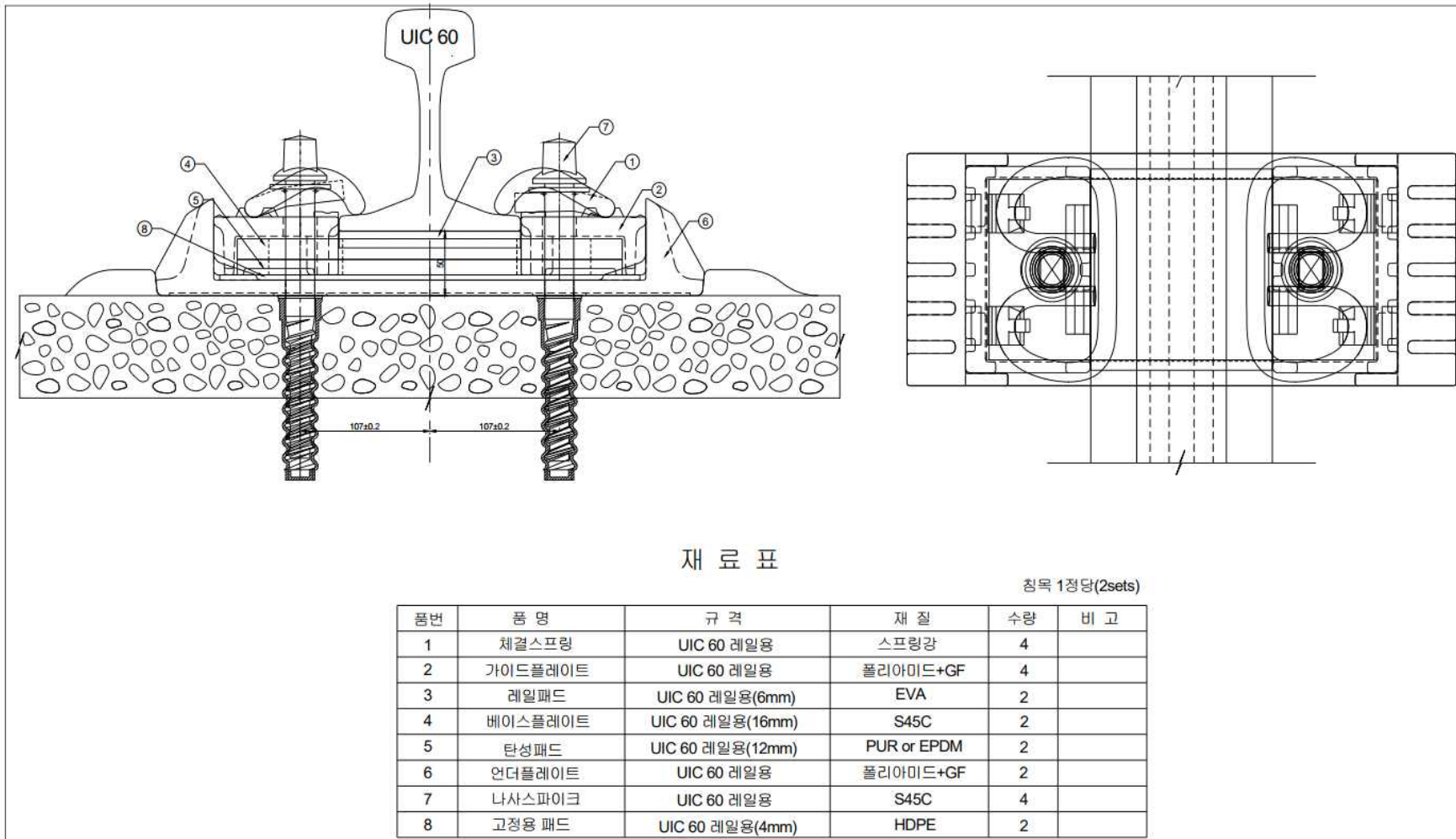
항 목	단 위	기 준	시험규격
밀 도	g/cm^3	0.945~0.970	KS M ISO 1183
인장강도	N/mm^2	20 이상	KS M ISO 527-2
연신율	%	250 이상	KS M ISO 527-2

(4) 제조 및 가공

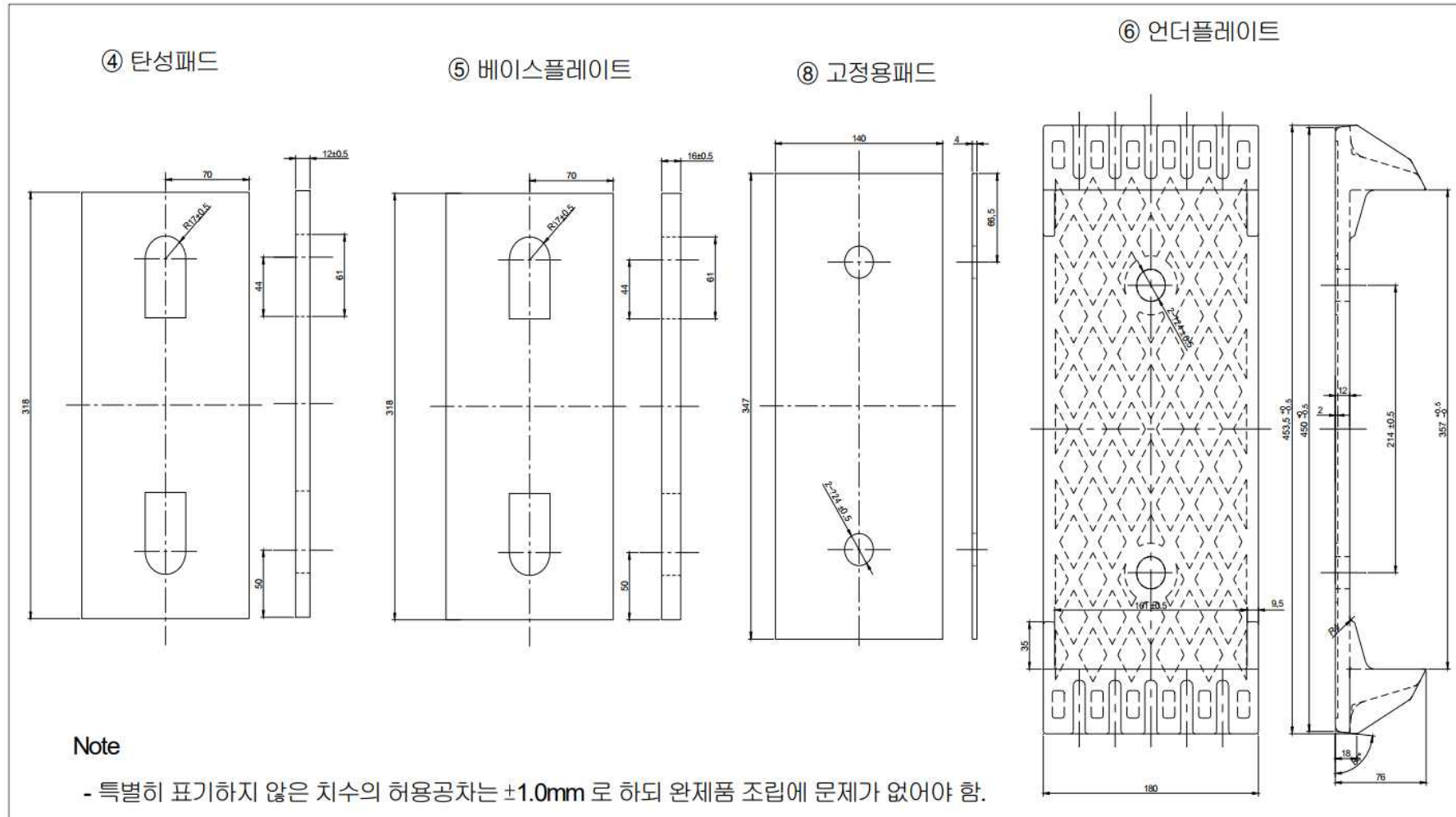
(가) 레일패드 및 탄성패드

- 1) 색상은 흑색 또는 수요자와 협의된 색상으로 하며, 재료는 성형 전에 잘 배합하여 소정의 금형으로 제조하여야 한다.
- 2) 제품의 내부에는 기포가 없고 재질이 균일하도록 제조하여야 한다.
- 3) 제품의 겉모양은 평활하여야 하고 유해한 흠, 균열, 공동 및 비틀림 등이 없어야 한다.

(5) KR형 레일 체결장치(UIC60 레일용) 상세도면(1/2)



(6) KR형 레일 체결장치(UIC60 레일용) 상세도면(2/2)



나. KCT-Ⅱ 용 레일체결장치(콘크리트궤도)

(1) 분류

분 류		세 분 류
절연 블록	패스트클립	UIC60, KR60 레일 공용
	토 인슐레이터	UIC60, KR60 레일 공용
	사이드 포스트 인슐레이터	UIC60, KR60 레일 공용
레일패드 (Rail Pad)		UIC60, KR60 레일용
고정용 패드		UIC60, KR60 레일 공용
높이 조정용 패드		UIC60, KR60 레일 공용
볼트, 너트, 평와셔		UIC60, KR60 레일 공용
베이스 플레이트 (Base Plate)		UIC60, KR60 레일용
톱니와셔, 디스크 스프링 와셔		UIC60, KR60 레일 공용

(2) 재료 물성치

(가) 레일패드

시 험 항 목		시 험 기 준	시 험 방 법
인장강도	노화 전	16.7 N/mm ² 이상	KS M 6518
	노화 후	13.2 N/mm ² 이상	
연 신 율	노화 전	300 % 이상	
	노화 후	200 % 이상	
압축영구율	노화 전	30 % 이하	
	노화 후	20 % 이하	
경 도		Shore “A” 65~75	ASTM D 257
정적 수직스프링계수		성능기준 : 20~50 kN/mm 관리시험 기준 : 공칭값 ± 10 %	
전기고유저항		1x10 ⁸ Ω·cm 이상	
오존시험		크랙이 없을 것	

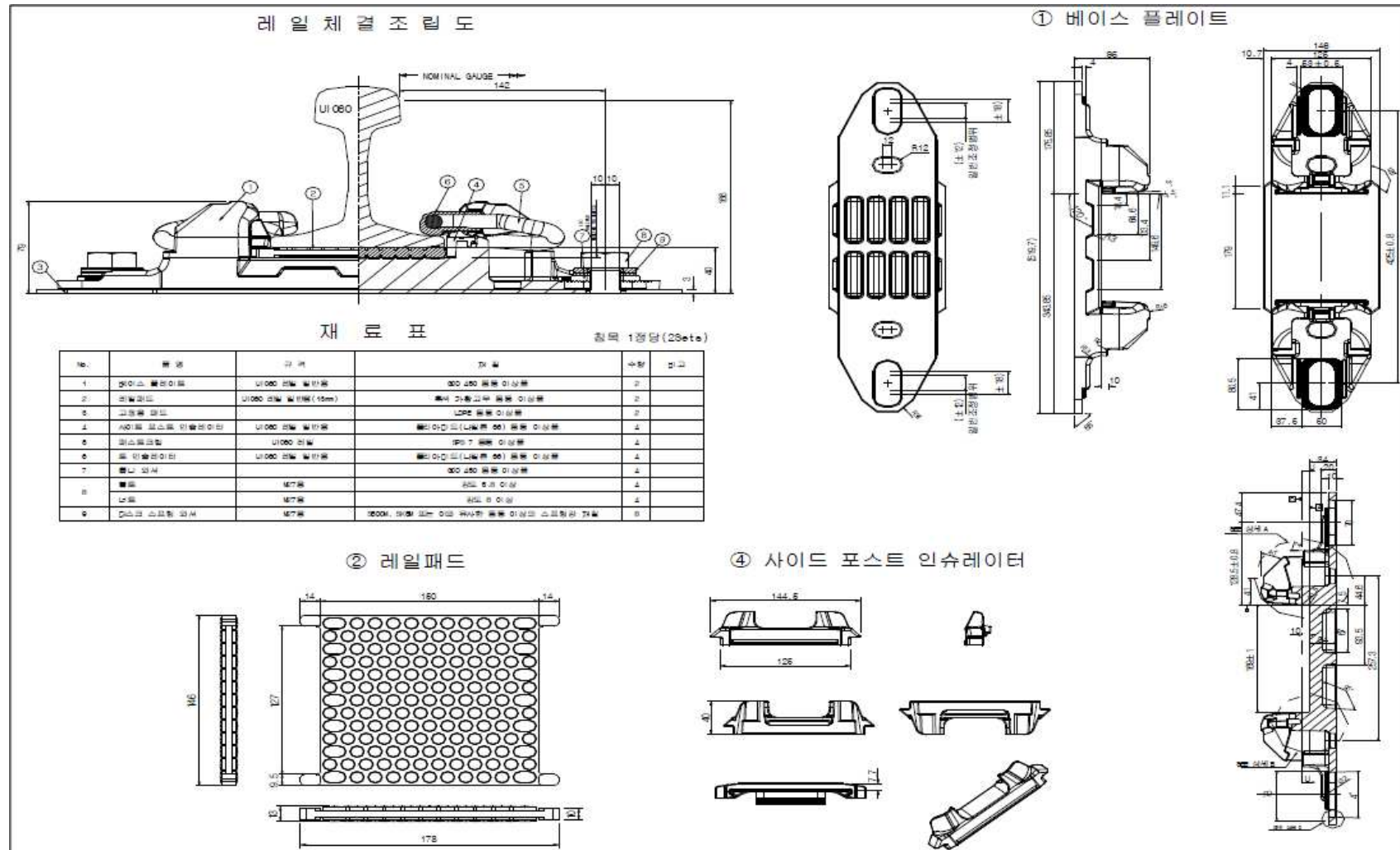
(나) 고정용 패드

밀도(g/m ³)	인장강도(N/mm ²)	연신율(%)	비고
0.9~0.95	7 이상	200 이상	LDPE 이상품

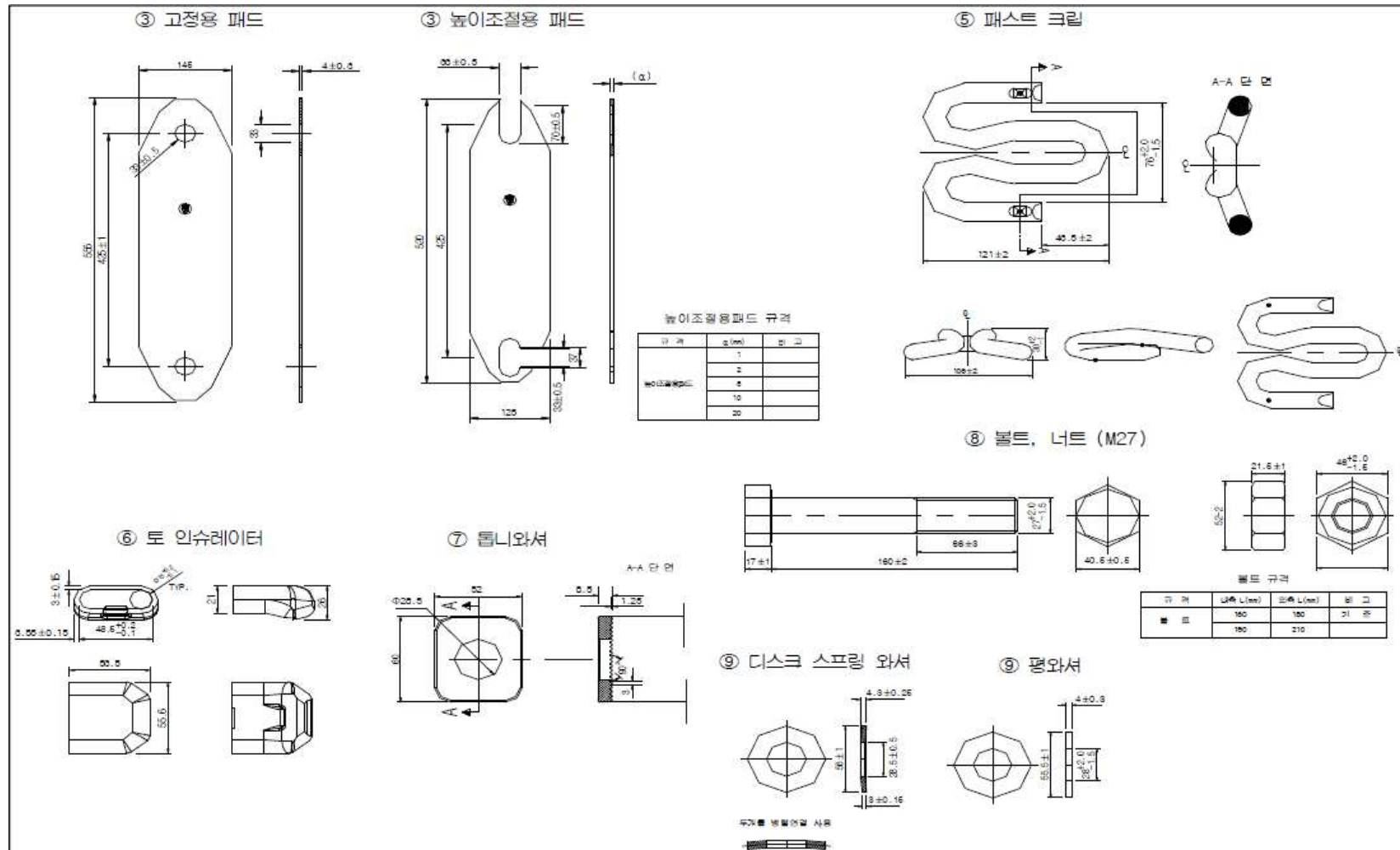
(다) 높이 조정용 패드

밀도(g/m ³)	인장강도(N/mm ²)	연신율(%)	비고
0.945~0.97	20 이상	250 이상	HDPE 이상품

(라) KCT-Ⅱ용 레일체결장치(UIC60 레일용) (1/2)



(마) KCT-Ⅱ 용 레일 체결장치(UIC60 레일용) (2/2)



다. Rheda-2000용 레일체결장치(콘크리트궤도)

(1) 분류

분 류	세 분 류
텐션클램프	UIC60, KR60 레일 공용
앵글드가이드플레이트	UIC60, KR60 레일 공용(U형, W형)
나사스파이크 및 와셔	UIC60, KR60 레일 공용
레일패드	UIC60, KR60 레일용
탄성패드	UIC60, KR60 레일용
베이스플레이트	UIC60, KR60 레일용
절연블록	UIC60, KR60 레일 공용

(2) 재료 물성치

(가) 레일패드

시험항목	시 험 강 도	시 험 방 법
쇼어경도	Shore D 37~47	DIN EN ISO 868
밀 도	0.92~0.962 g/cm ³	DIN EN ISO 1183-1
전기고유저항	1x10 ⁸ Ω·cm 이상	DIN IEC 60093

(나) 탄성패드(폴리우레탄(PU))

시 험 항 목	시 험 기 준	시 험 방 법
정적스프링계수	성능기준 : 20~50 kN/mm 관리시험 기준 : 공칭값 ± 10 %	
전기고유저항	1x10 ⁸ Ω·cm 이상	KS M 3015
인장강도	노화전	1.5N/mm ²
	노화후	노화전의 90 % 이상
연신율	노화전	300 % 이상
	노화후	노화전의 90 % 이상
영구압축율	15 % 미만	KSM ISO 1856
오존시험	크랙이 없을것	
흡수밀도시험	1 g/dm ³ 이하	

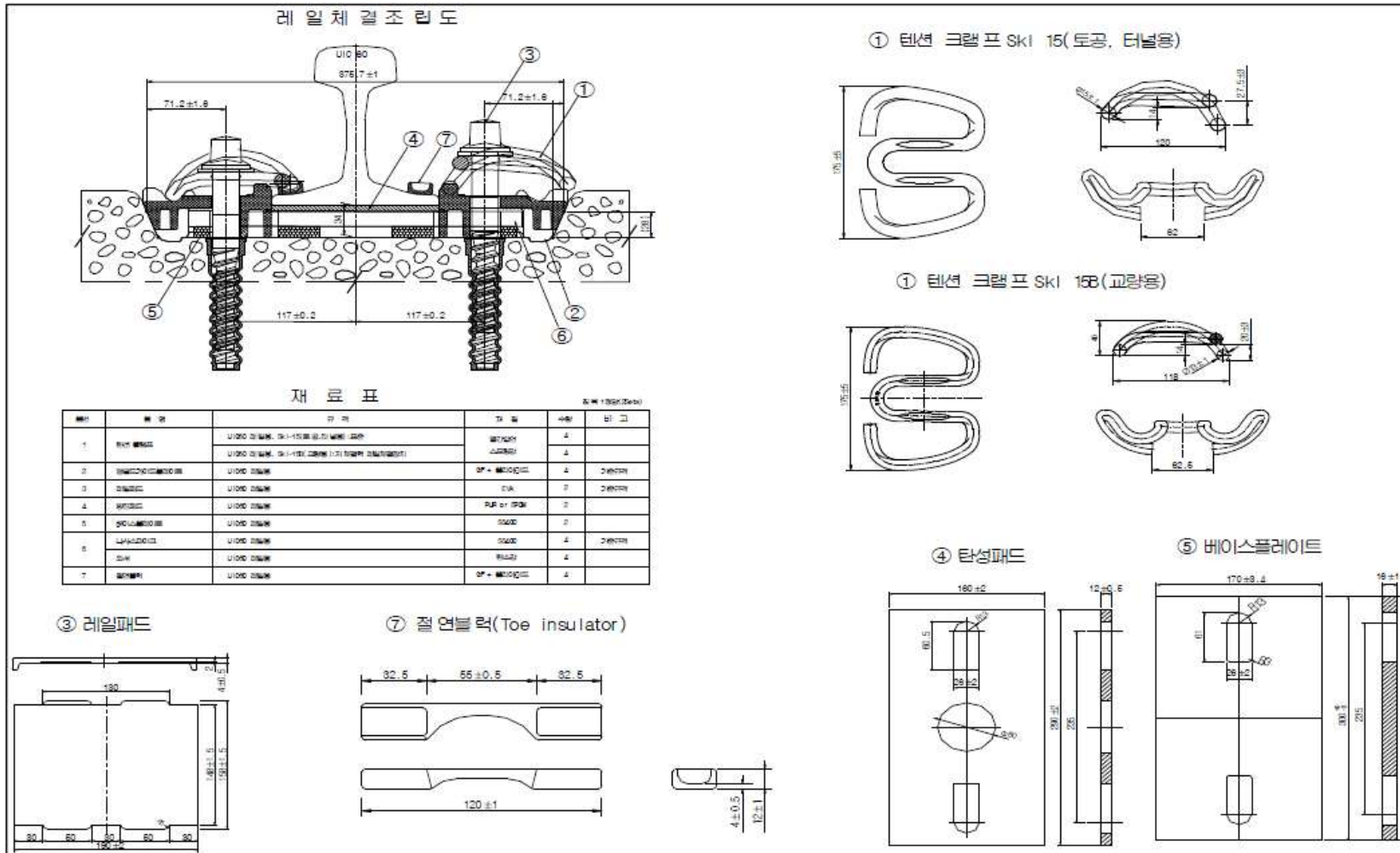
(다) 베이스플레이트

시 험 항 목	시 험 기 준	시 험 방 법
항 복 점	275 N/mm ² 이상	두께 16mm 이하 기준
인장강도	410 N/mm ² 이상	
연신율	최소 20 %	

(라) 절연블록

시 험 항 목	시 험 기 준	시 험 방 법
충격강도	40 KJ/m ² 이상	DIN EN ISO 179-1
밀 도	1.30~1.42 g/cm ³	DIN EN ISO 1183
전기고유저항	1x10 ⁸ Ω·cm 이상	DIN IEC 60093

(마) Rheda-2000용 레일체결장치(UIC60 레일용) (1/2)



3. 콘크리트케도 상태평가 관련 기술기준 검토

- 선로유지관리지침(2013, 한국철도시설공단)」에서는 콘크리트케도의 침목과 콘크리트케도 사이가 분리되어 틈새가 발생하거나 또는 재료분리가 발생되었거나, 균열 폭이 1mm 이상이고 결함이 발생하였을 때 보수할 것을 제시함.
- 또한, 노반의 경우에는 침하의 규모와 보수한계값을 고려하여 유지보수 의사를 결정하도록 하고 있음. 노반침하의 측정은 원지반/지표침하계를 기본으로 활용하도록 제시하고 있으며, 해당 기준에서는 층별침하계에 대한 별도의 기준은 제시되어 있지 않은 상태임.

제64조(콘크리트도상의 보수) 콘크리트도상은 다음 각 호에 해당하는 경우 상태에 따라 적절한 보수를 시행하고 내역을 기록 관리하여야 한다.

1. 침목과 콘크리트 도상이 분리되어 유동이 있을 때
2. 콘크리트 균열의 폭이 1.0mm 이상이고 균열이 철근 피복까지 발달되었을 때
3. 기타 콘크리트의 수명을 단축시킬 우려가 있는 결함 발생 시

제127조(노반의 침하 보수) 콘크리트케도에서 노반침하가 다음 각 호에 해당하는 경우 상태에 따라 적절한 노반침하 보수를 시행하고 내역을 기록 관리하여야 한다. 다만, 열차의 주행안전성이 확보되는 경우 이를 조정할 수 있다.

1. 노반침하 구간의 길이가 20m 이상인 경우의 침하량에 따른 침하보수 한계는 다음 각 목의 식을 이용하여 검토한다.

가. $\delta > L/1000$ 또는 δ_f : 노반침하 복원

나. $\delta \leq L/1000$ 또는 δ_f : 체결장치를 이용한 케도틀림 보수 (다만, 체결장치를 이용한 보수한계는 케도틀림보수의 제반 여건을 고려하여 한계값(δ_f)보다 낮게 조정 할 수 있다.)

여기서, δ : 노반침하량(mm)

δ_f : 체결장치의 보수한계값(mm)

L : 침하구간의 길이(mm)

다. 노반침하량이 보수한계 이내라도 케도 공용성에 유해한 영향을 미치는 경우

2. 노반침하 구간의 길이가 20m 미만인 경우에는 콘크리트슬래브 하부(콘크리트케도 저면)와 노반사이에 대한 틈(gap)의 유무를 다음 각 목의 방법 등을 활용하여 확인하여야 한다.

가. GPR(ground penetration radar) 탐상

나. 콘크리트슬래브 가속도 측정

다. 비파괴 포장 표면 처짐시험(FWD, falling weight deflectometer) 등

3. 노반침하가 수렴하지 않고 지속적으로 진행되는 구간에 대해서는 지반 보강을 검토한다.

제128조(노반침하 계측) 콘크리트궤도에서의 노반침하 계측은 다음 각 호의 사항을 기준으로 한다. 다만, 현장여건에 따라 조정할 수 있다.

1. 침하계측개소는 건설단계에서 사용한 원지반 및 지표침하계를 기본적으로 활용하며, 필요시 콘크리트궤도면에서 다음 각 목의 개소를 선정하여 계측을 실시한다.

가. 연약지반구간

나. 교량/토공 접속부 및 근접접속부

다. 절성토 접속부

라. 편절편성구간

마. 통로박스구간

바. 배수불량구간 등

2. 제1호의 콘크리트궤도면에서 측정위치는 궤도중심을 표준으로 하며, 상선과 하선을 별도로 계측하여야 한다.

3. 침하가 수렴하지 않고 궤도틀림 관리범위 이상으로 증가하는 개소에서는 2m 이내 간격으로 계측을 시행하여 콘크리트 슬래브에 유해한 영향을 미치는지에 대한 지속적인 관찰을 수행하여야 한다.

4. 계측의 정확도는 $\pm 1\text{mm}$ 이내여야 하며 측정은 0.1mm단위까지 기록한다.

5. 계측은 기준점별로 왕복측정하여 폐합하는 것을 원칙으로 하며 그 폐합오차는 $1.5\sqrt{S}$ mm이내이어야 한다. 여기서 S는 관측거리(km)이다.

제129조(노반침하계측 기간 및 빈도) 노반침하가 진행 또는 수렴중인 개소에서는 지속적인 침하계측이 이루어져야 한다. 다만, 침하가 수렴하였다고 판단될 경우에는 계측을 종료할 수 있다.

○ KR C-02050 계측(2014, 한국철도시설공단)」에서는 토사 비탈면 계측 결함을 측정하기 위한 다수의 계측장비의 적용기준을 제시하고 있다.

해석 1. 토사 비탈면 계측

(1) 기존의 흙쌓기 또는 땅깍기 철도 비탈면의 대부분 준공된 지 상당한 시일의 경과로 인해 노후화 되어 있는 실정이며, 물류 수송량의 증대로 철도는 점점 고속화, 고밀화, 대형화, 중량화되고 있는 추세이기 때문에 열차 운행상의 안전성 및 신뢰성의 확보가 그 어느 때보다도 중요하다.

(2) 근래 다발하는 경향을 보이고 있는 이상기후, 그리고 이로 인한 홍수, 지진 등으로 흠쌓기 또는 땅깍기 비탈면 재해를 미연에 예·검지하여 조처할 수 있는 비탈면 상시계측시스템 구축이 요구된다.

(3) 상시계측시스템의 계측센서 및 장비는 그 특성과 용도에 맞게 설치할 수 있는 기준이 제시되어야 하며 주요 계측장비의 설치기준은 아래와 같이 제시하였다.

구분	계측장비	계측기 설치기준
비탈면 및 토공시설물	지표침하계	연약지반 흠쌓기 시 흠쌓기 단면의 중앙에 설치
	층별침하계	- 지층별 부등침하가 예상되는 지점 - 장기적 관측이 가능한 노반 가장자리 - 높은 흠쌓기로 상재하중이 많이 작용하는 지점 - 하부 연약지반의 심도가 깊은 지점
	경사계	- 수평변위가 중요한 흠쌓기 선단부 - 수평변위가 클 것으로 예상되는 흠쌓기 가장자리
	지표변위계	- 인장균열, 단차의 변위를 측정 (지표면 신축계) - 암반비탈면의 붕괴형태에 따른 계측에 적합
	간극수압계	- 층별침하계와 인접한 위치 - 층별침하계와 측정대상층과 같은 표고에 설치
	지하수위계	- 지하수위의 변화에 대한 검토가 필요한 지점 - 간극수압계와 인접한 위치에 설치하여 과잉간극수압 검토
	측방변위 말뚝	- 흠쌓기 높이가 높아 측방변위 발생이 예상되는 지점 - 흠쌓기 끝에서 약 20~30m 범위

구분	계측장비	계측기 설치기준
낙석발생 예상지역	CCTV 시스템	- 낙석발생 유무를 화상으로 직접 인식 - 대상지역 전체를 관찰할 수 있는 대표지점에 설치 - 여러 개소의 동시계측 지원
	레이저거리 측정기	- 설치위치와 측정지점 간 장애물이 없는 지역에 설치 - 팬틸트의 지원을 통한 다양한 지점의 측정 가능 - 카메라의 측정위치와 동일한 각도로 설치
	적외선 센서	- 선로 방향과 평행하게 낙석발생 예상지점에 직접 설치 - 낙석 발생으로 인한 선로의 직접적 피해유무 판단
	와이어 센서	

(4) 계측관리의 기준을 설정할 때에는 지질조건, 비탈면의 크기 및 형상, 주변구조물의 환경조건 등에 따라 차별적으로 설정한다. 계측관리기준의 설정방법은 절대치 관리기준의 설정방법과 예측치 관리기준의 설정방법으로 나누어지며 절대치 관리기준의 설정은 시공 전 설정된 관리기준치와 실측치를

비교, 검토하는 것으로 시공시의 안정성 확보에 목적이 있으며, 예측치 관리 기준의 설정은 시공 후의 예측치와 관리기준치를 비교, 검토하여 비탈면 유지관리에 활용하는 것이 목적이다.

해설 3. 연약지반 계측관리

1. 현장계측

(1) 연약지반처리의 설계는 복잡한 자연현상(토층 및 토질특성)을 단순화시켜 시행되므로 설계 시 추정치의 불확실성과 설계단계에서의 지반조사 자료의 부족 및 불확실성을 시공 중의 현장관리를 통해 보충하고 이를 통한 새로운 정보에 의해 적절히 관리·검토되어야 함.

(2) 연약지반의 침하와 변형특성 파악 및 개량효과 분석 등을 제반 계측 관리를 통하여 연약지반 개량공법의 질적 향상 및 경제적이고 안전한 시공을 도모해야 하고, 나아가서 이러한 정보를 피드백(Feed-back)시켜 다음 단계에서 발생할 수 있는 지반거동을 사전에 파악하여 이를 토대로 당초 설계의 타당성 파악 및 대책이 강구되어야 함.

(3) 계측관리는 연약지반에 성토를 함에 있어 대상지반의 주요지점에 침하 및 안정관리 등에 필요한 경사계, 침하관, 지하수위계, 간극수압계 등의 계측기를 설치하고 지반의 거동을 정량적으로 확인하는데 필요하며, 다음과 같은 목적이 있음.

- ① 설계 시 지반조건의 정보부족으로 인한 설계시의 미비점을 시공 중에 발견하여 대책방안을 제시함.
- ② 설계 시 예측치 않았던 거동이 생기면 신속히 그 원인을 규명하고 그 대책을 수립함.
- ③ 계측한 자료를 정리, 분석하여 자료를 축적하고 이를 피드백시켜 앞으로의 성토구조물의 설계시공에 적용하여 경제성, 안정성을 도모함.
- ④ 설계이론 및 설계정수의 평가 계측목적별 관리사항을 정리하면 다음과 같음.

가. 긴급한 위험의 징후발견을 위한 계측 : 과대한 토압이나 수압이 작용하는 경우 히빙등의 징후를 사전 확인하여 안전관리를 수행하기 위한 계측

나. 시공 중에 중요한 정보를 얻기 위한 계측 : 재하성토에 의한 지반의 거동을 예견하는데 필요한 정보를 얻기 위한 계측

다. 시공법을 개선하기 위한 계측 : 선행단계의 계측 데이터는 다음단계의 설계정수로 사용되어 현장여건에 적합한 설계를 수행하기 위한 계측

라. 공사지역의 특수한 경향을 파악하기 위한 계측

마. 이론적 결과를 검증하기 위한 계측

상기에서 언급한 바와 같이 현장계측은 여러가지 목적을 위해 실시되는 경우가 많으므로 계측을 성공적으로 실시하기 위해서는 각 목적 항목마다의 충분한 사전검토를 실시하여야 함.

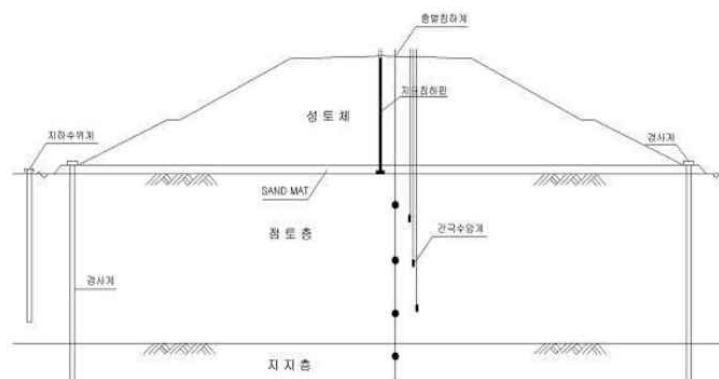
(4) 목적에 맞는 계측기를 선택한 후 그 계측기를 배치하는 것이 중요하며 계측위치의 선정이 측정대상물의 규모나 주변 구조물의 영향정도에 좌우된다는 것은 말할 나위도 없지만 측정 개소의 지형, 지질, 토질특성 등의 중요한 요소가 있다는 것도 간과할 수 없음으로 일반적으로 계측기의 매설위치 선정기준은 아래와 같음.

- ① 대상지역 전체를 대표하는 지점
- ② 취약지역
- ③ 지반개량 효과분석 및 안정관리 대상지역
- ④ 차량, 장비로부터 보호 및 관리가 용이한 지점
- ⑤ 계측기의 상호 연계를 파악할 수 있도록 통합
- ⑥ 사전자료 및 시추조사 등으로 지반조건이 충분히 파악된 지점

(5) 계측내용에 따라 필요한 계측기를 설치해야 하겠으나, 통상의 압밀시공과 관련하여 지표면침하, 층별침하, 측방변위(경사), 간극수압 등이 수행되어야 하며 이들 측정을 위한 계측기의 배치간격은 연약지층에 따라 달라질 것임.

(6) 지반이 복잡하고 주요 구조물이 축조된 경우에서 집중관리의 대상으로서 보다 철저하고 많은 계측기를 설치하며, 이때 연약지반의 흠뻑기 재하시 지반거동을 고려하여야 하며 각 계측기의 설치위치에 대해서는 지표침하판 및 층별 침하계는 철도노반의 중앙, 간극수압계는 흠뻑기단면 하부에 설치하며 고성토구간에서는 흠뻑기단면비탈끝에서 융기나 측방이동을 관측할 수 있도록 경사계나 변위말뚝을 설치해야함.

계측기의 종류 및 배치기준과 같으며 계측빈도 및 설치개소는 현장여건, 연약지반상태를 고려하여 조정하도록 함.



<계측기 배치 단면도>

계측기명	계측목적 및 검토사항	계측기 배치원칙
층별침하계	- 연약점토성의 심도별 압밀침하량 측정 및 지표면 침하량과의 비교 분석 - 측정된 침하량을 이용하여 지반의 층별 압밀정수 추정	- 연약심도가 깊거나 고성토지역에 간극수압계와 동일지점에 설치 - 공당소자는 3개씩
간극수압계 (piezometer)	- 흙쌓기 하중에 의한 지반내 간극수압의 변화측정 - 과잉간극수압의 소산정도 및 유효응력 증가량 유추 - 압밀의 효과 확인·압밀진행 및 강도증가상황 확인	- 연약심도가 깊거나 고성토지역에 간극수압계와 동일지점에 설치 - 공당소자는 3개씩
경사계 (inclinometer)	- 흙쌓기 비탈면부의 지반내 수평방향의 변형량과 변형속도 측정 - 흙쌓기 중앙부의 최대침하량과 함께분석하여 흙쌓기 비탈면의 안정관리 - 측방유동 토압에 의한 교대의 안정성 확인	- 전단파괴가 우려되는 고성토지역에좌, 우 비탈면에 설치 - 현장상황에 따라 교대전후면 또는 측면에 설치
지하수위계	- 흙쌓기에 의한 지하수위의 변화 파악 - 간극수압과 비교하여 과잉간극수압의 소산정도 및 유효응력 증가량 유추	간극수압계가 설치되는 지점에서 흙쌓기에 의해 자연 지하수위가 영향을 받지 않도록 흙쌓기 비탈면에 이격하여 설치
지표침하관	- 설치지점의 전침하량 측정 - 흙쌓기 속도 조절, 프리로딩 제거시기판정	연약지반 흙쌓기 시 100m간격으로 흙쌓기 단면 중앙에 설치

(7) 계측기 설치시기는 샌드매트와 연약지반처리공법(연직배수공법 등) 완료 후 연약지반상에 성토를 하기 전에 대상지반의 주요지점에 침하 및 안정관리 등에 필요한 경사계, 침하관, 지하수위계, 간극수압계 등의 계측기를 설치하여야 하며, 설치준비 및 설치 후 시공 중 망실에 대비하여 계측기기 유지관리는 다음과 같이 시행 하여야 함.

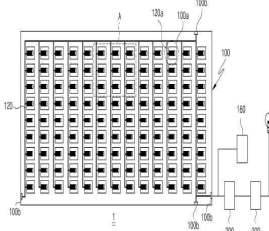
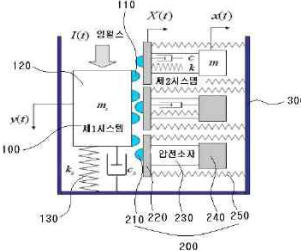
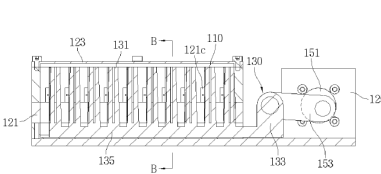
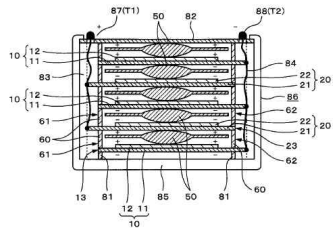
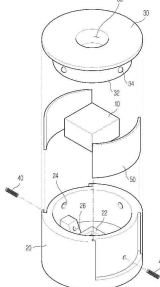
- ① 제조업자측이 제공하는 매뉴얼로 일상유지절차를 수립함
- ② 기기의 일상점검을 통해 기기오염 및 고장시 즉각적인 보수, 교체를 실시함
- ③ 섬세한 기기의 경우 운반 및 관리시 충격과 손상방지를 위해 패드와 같은 충격완화재를 설치함

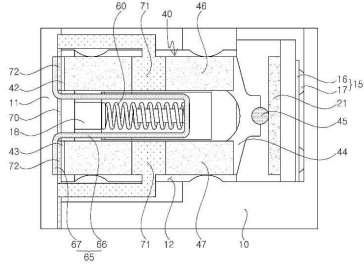
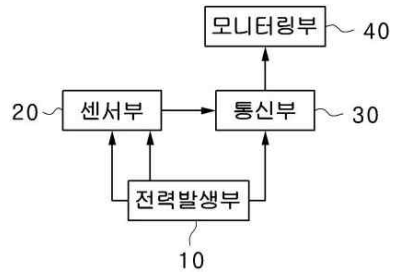
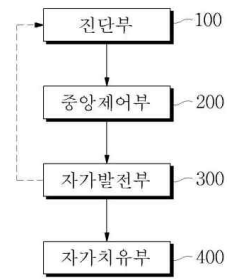
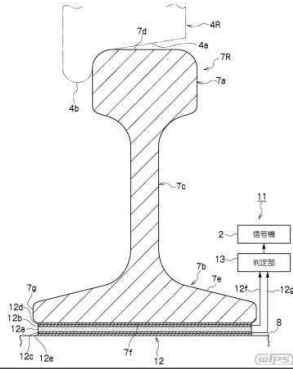
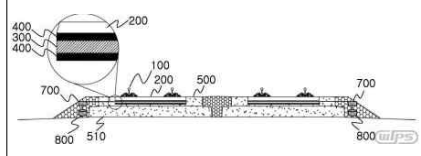
④ 계측기는 시공 중에 파손되는 경우가 많으므로 시공장비에 의해 파손되지 않도록 보호시설과 눈에 띄는 표지를 설치하여 파손을 예방하고 중요부위의 계측은 여분의 계측기를 매설하여 파손에 따른 자료손실에 대비해야함

제 6 절 관련분야 유사특허 및 기술조사

1. 국내외 압전소자 활용 특허조사

<표 2-20> 국내외 관련 기술 특허 동향

연번	특허명	개요도	특허 내용	보유자
1	압전소자를 이용한 발전장치 (등록번호: 1010410480000)		외력에 의해 발생하는 진동에너지를 압전셀판넬에서 전기에너지로 축전하는 장치	서울메트로
2	층상 구조를 이용한 압전소자 발전기 (등록번호: 1010419980000)		외부 충격에 의하여 탄성진동하는 위치에너지를 압전소자를 이용하여 방전하는 시스템	부산대 산학협력단
3	압전소자를 이용한 발전장치 (등록번호: 1011416970000)		본체의 왕복이동을 통하여 복수의 압전소자를 변형시켜 전기를 발생시키는 장치	(주)에너지팜테크놀로지
4	압전 발전장치 및 발전시스템 (등록번호: 05273701)		복수의 적층구조로 이루어진 압전소자를 이용하여 발전하는 시스템	(주)스미다코퍼레이션
5	전기에너지 발생용 압전소자 장착 케이스 (등록번호: 1009804600000)		기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 압전소자에 관한 내용	(주)삼전

연번	특허명	개요도	특허 내용	보유자
6	압전소자가 장착된 구동체 (등 록 번 호 : 1011041920000)		압전소자가 장착된 구동체에 관한 내용	(주) 하이소닉
7	압전소자를 포함한 전력발생기를 이용한 철도차량의 다기능 검지장치 (등 록 번 호 : 101288608)		철도차량 진동에 의해 발생하는 전압정보를 이용하여 열차 위치 및 운행정보를 표시	한국철도 기술연구 원
8	지능형 자기유지 선로 장치 (등 록 번 호 : 101215200)		압전센서를 이용하여 선로의 손상을 진단하고, 열차 하중을 이용하여 전력을 공급하는 자가발전 시스템	성균관대 학교 산학협력 단
9	이동체 검지 장치 및 발전 장치 (등 록 번 호 : 5039686)		철도 차량이 주행할 경우에 발생하는 진동에 의해 발전하는 발전 장치에 관한 기술	Railway Technica 1 Research Institute
10	자가 발전이 가능한 철도침목 (등 록 번 호 : 100898795)		철도침목 하단에 압전 필름부를 형성하여 진동 에너지를 전기 에너지로 변환, 필요 전원 대체 기술	한국유지 관리 주식회사

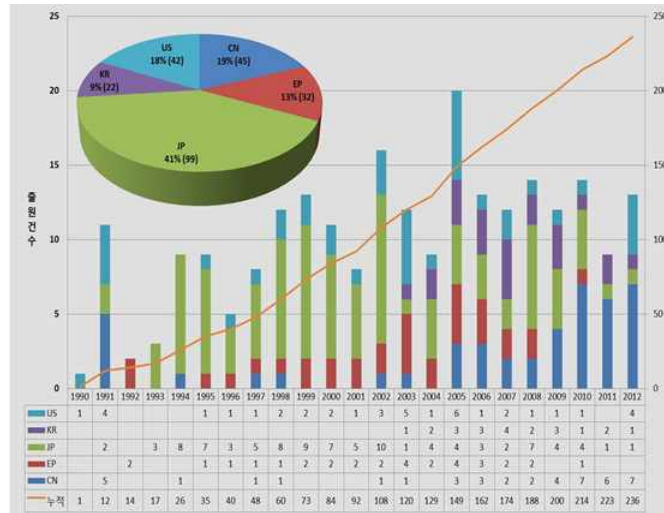
2. 국내외 궤도안전진단 관련 특허조사

- 미래형 철도기반기술 인프라 분야 기술개발 특허동향조사(2009년, 특허청)에 따르면 인프라 분야의 특허동향조사 결과, 전 세계적으로 인프라 관련 특허 점유율은 일본 특허가 1위(한국은 17.6%, 일본 48.6%, 미국 24.8%, 유럽 9.1%의 분포)를 차지하고 있는 것으로 나타남.
- 철도 인프라 분야 중 한국은 궤도, 노반, 고량, 터널분야를 포함하는 인프라 분야 관련 특허 706건 출원(2009년 기준)됨.

가. 궤도/노반평가 및 유지관리 분야 특허경향 분석

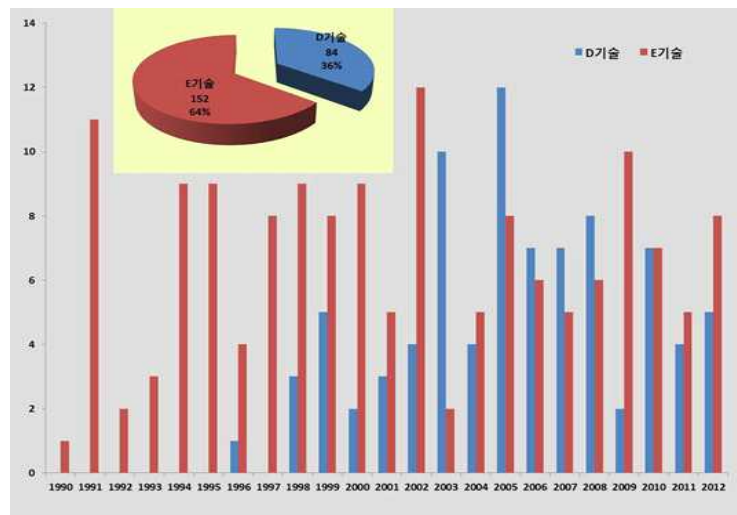
구 분	분석 기준				
특허검색 DB	Thomson Innovation				
검색국가	미국	유럽	일본	한국	중국
	출원, 등록	출원, 등록	출원, 등록	출원, 등록	출원, 등록
분석구간	1990.01.01.~2013.02.08				
검색범위	Title, Abstract, Claim				
검색식	CTB=((Subgrade or road*bed or roadbed or track or track*bed or trackbed) and (ballast* or (concrete adj slab)) and (resistan* or gap or subsurface or performance or Deteriorat* or deformat* or displace* or degrad* or irregular* or damage or stiffness or modulus or crack or settlement or geometry) and (test or Inspect* or monitor* or evaluat* or detect* or appraisal or assessment or estimat* or assess or apprais*));				

- 궤도/노반 평가 및 유지보수 관련 분야의 전체적인 특허동향의 경우 1990년부터 현재까지 검색한 5개 지역 및 국가에서 총 236건의 특허가 출원되었으며, 최근 23년 동안 매년 국가별 평균 2-3건의 특허가 지속적으로 출원되고 있음.
- 국가별 출원 추이를 보면 일본, 미국이 지난 23년 동안 지속적인 관련 특허를 보유하고 있는 반면, 유럽 지역에서는 1990년대 중반부터 특허기술을 보유하고 있음.
- 일본은 주요 관련기술의 우선권을 가장 많이 보유하고 있으며, 한국, 중국은 2005년부터 기술의 성장세가 높게 나타나고 있음.



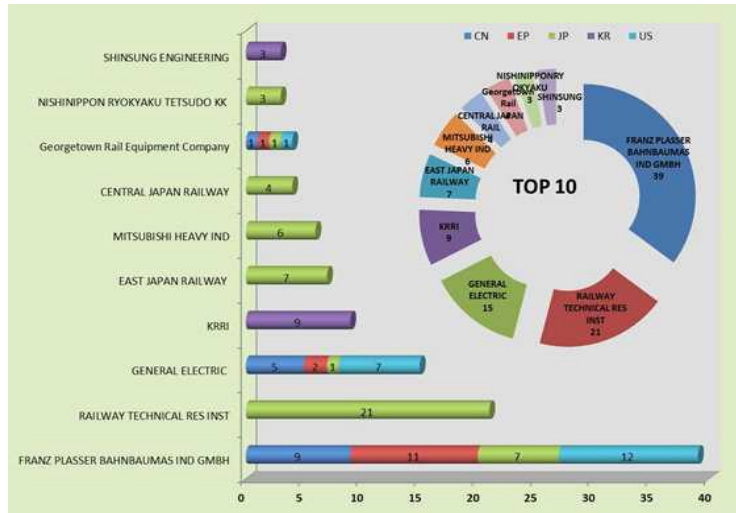
<그림 2-61> 궤도평가 유지 보수 분야 국가/연도별 특허 동향

- 궤도유지보수기술(E기술)은 1990년 이후 지속적으로 특허가 출원되고 있으며, 특허 건수도 궤도상태평가기술(D기술)에 비해 상대적으로 많은 것으로 조사되고 있음.



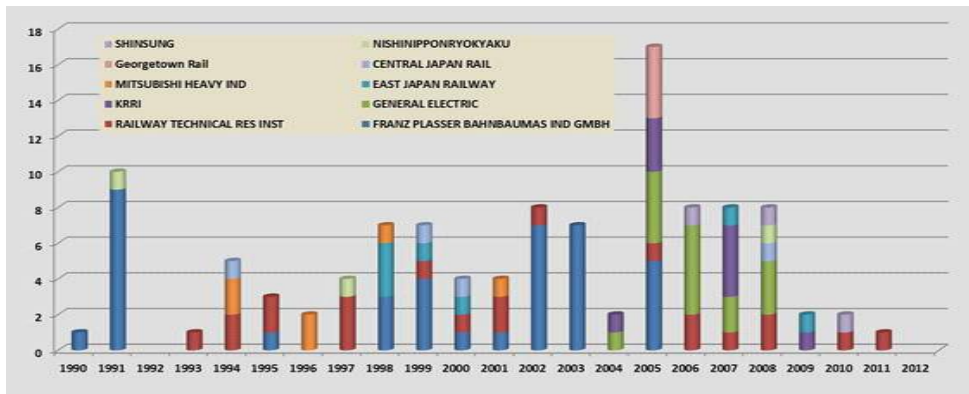
<그림 2-62> 궤도평가/유지보수분야 연도별 특허 출원 추이

- 궤도상태평가 및 유지보수기술의 분야에서 FRANZ PLASSER BAHNBAUMAS IND GMBH, RTRI, GE, KRRI, EAST JAPAN RAILWAY, MITSUBISHI HEAVY CO. 등이 특허출원 및 기술을 주도하고 있음.
- 다만 오스트리아 FRANZ PLASSER BAHNBAUMAS IND GMBH와 미국의 GE는 여러 국가에서 특허를 출원하고 있는 반면, 일본과 한국의 경우 자국에서만 특허를 출원하는 경향이 있음.



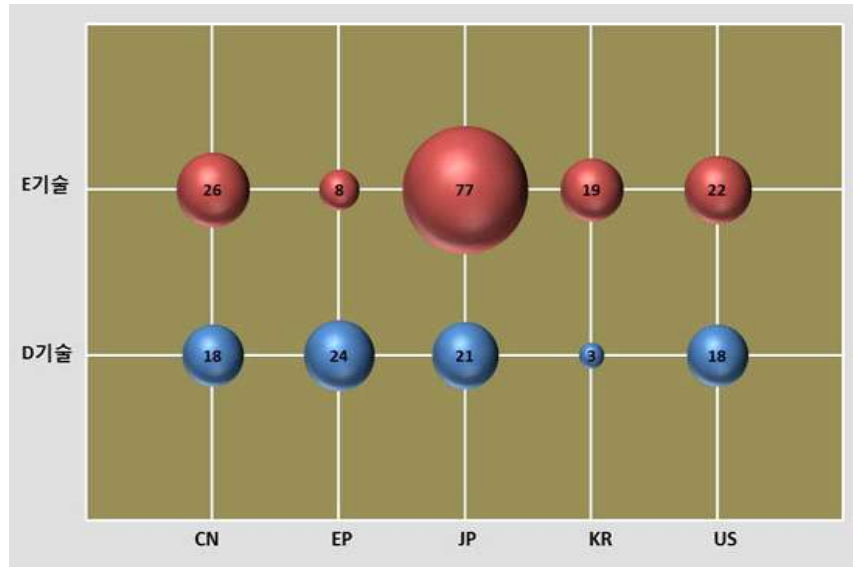
<그림 2-63> 궤도평가 유지 보수 분야 출원인 분석

- 특허 검색을 수행한 23년동안 이 분야에서 특허를 가장 많이 출원/보유하고 있는 오스트리아 FRANZ PLASSER BAHNBAUMAS IND GMBH는 2005년 이후 더 이상의 특허출원이 없는 반면, GE, KRRI, RTRI, SHINSUNG ENG 등이 지속적으로 특허 출원을 계속하고 있음.



<그림 2-64> 궤도평가 유지 보수 분야 출원인/연도별 특허출원 추이

- 기술분야별 특허확보 현황에서는 유럽은 궤도상태평가기술(D기술)에 보다 비중을 두고 기술개발이 이루어지고 있는 반면, 그 외 한국, 중국, 일본, 미국 등은 궤도유지보수기술(E기술) 분야에서 보다 활발한 기술개발이 이루어지고 있음을 확인할 수 있음.



<그림 2-65> 궤도평가/유지보수 분야 국가별 특허 출원 동향

나. 주요관련 특허현황

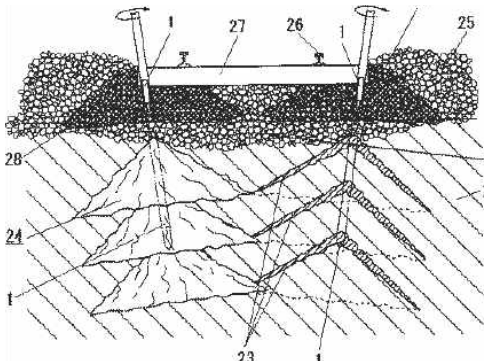
특허명	System and method for inspecting railroad track
출원인	Georgetown Rail Equipment Company
등록일	2005. 06. 30
핵심내용	이 시스템은 레이저, 카메라, 프로세서, GPS수신기나 위치정보 결정 장치를 포함하고 있으며, 침목간 거리, Tie 표면 결함, 체결 장치 부품 결함, 레일마모, 발라스트 높이 및 자갈 크기, 레일 파손 및 분리 등을 검사

특허명	Instant vibration detecting method for soundness of ballastless track
출원인	Chengdu Chengyun Science & Technology Co. Ltd.,CN
등록일	2010. 04. 16
핵심내용	무도상궤도에서 침목의 균열정도와 무도상궤도의 건전도를 평가하는 방법

특허명	Method and machinery of tracking a track geometry
출원인	PLASSER BAHNBAUMASCHINEN IND GMBH FRANZ
등록일	2005. 09. 22
핵심내용	발라스트 클리닝 장비에서 사용을 위한 궤도의 선형 tracing 방법

특허명	Maintaining device for ballastless slab track
출원인	Beijing Jiaotong University,CN
등록일	2011. 04. 29
핵심내용	무도상 슬래브 궤도를 위한 유지보수 장비로써 슬래브궤도의 균열 등을 보수하기에 적합한 방법

특허명	A kind of high-speed railway board type ballastless track filling layer repairing method
출원인	Southwest Jiaotong University,CN
등록일	2011. 11. 07
핵심내용	High-speed railway ballastless track calcium aluminate mortar filling layer repairing method, involves excavating hole filling layer, and inserting thin-wall grouting sleeve into grouting hole 고속철도 슬래브궤도의 보수방법으로 calcium aluminate 모르타르 충전재를 사용하는 방법이며 충전층에는 구멍을 포함하고 있으며 Thin-wall의 그라우팅 슬리브를 그라우팅 홀에 집어 넣어서 충전하는 방식

특허명	The conversion/repair construction method of an existing railway track orbit
출원인	TOGAWA Y,JP
등록일	2002. 11. 19
핵심내용	시멘트밀크를 압입해서 노반 상부의 발라스트에 umbrella 형식의 디스크 형태 구조물을 만들어 줌으로 해서 궤도를 보수하는 방법 

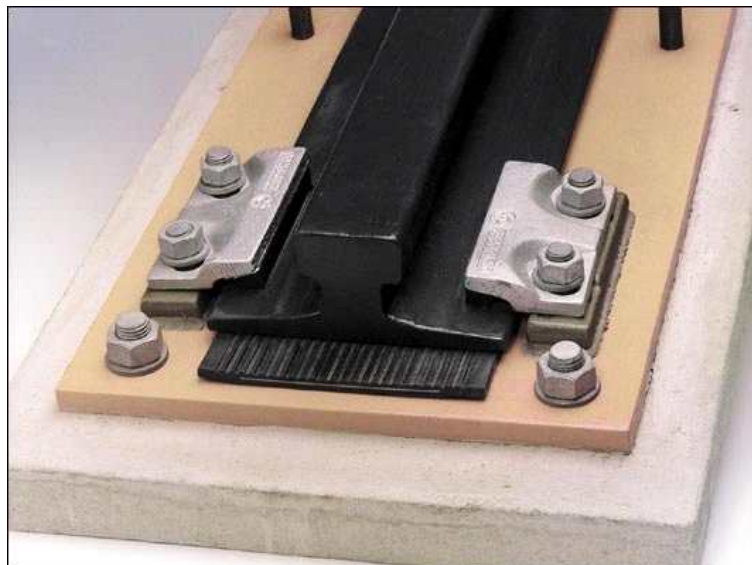
특허명	Method for maintaining geometry of ballasted railroad track
출원인	KLAUDER JR LOUIS T
등록일	2006. 10. 23
핵심내용	자갈도상궤도에서 선형을 유지보수하는 방법으로 아크와 접선에 따라 궤도를 조절하기 위해 궤도선형장치를 제어하는 계산 방법 등을 포함

제 3 장 연구수행 내용 및 성과

제 1 절 진동저감형 고분자 압전 소재 레일패드 개발 내용 및 성과

1. 진동저감형 고분자 압전소재 레일패드 개발 목표

- 레일패드는 철도 레일과 레일을 받쳐주는 콘크리트 침목 사이를 잇는 체결장치에 들어가는 부품의 하나로 고분자 성형 제품으로 제작함. 레일 패드의 본 기능은 열차가 지나갈 때 생기는 진동을 흡수해 침목을 보호하며 아울러 절연장치 역할을 하고 궤도강성을 조정하는 역할을 수행함.
- 고속철의 경우, 일반 철도보다 주행속도가 상당히 빠르기 때문에 하중부하가 더 크며 이에 따라 일반 철도보다 탄성이 더 큰 패드가 사용되고 있음.
- 레일 패드의 기능 중 하나는 열차 주행시 궤도에 작용하는 하중을 궤도 기초에 균등하게 확대 분포시키고, 궤도 기초에 국부적으로 가해지는 하중의 집중 현상 및 이로 인한 피로 응력을 제거하는 것임.
- 또한 궤도에 가해지는 하중의 강제 중심이동 현상을 완화함으로써 궤도 설비의 손상을 방지하고 레일과 침목 또는 슬래브 등 지지 기초간의 평평하지 않은 접촉 표면을 완화시켜 줌.
- 특히 열차가 지날 때 발생하는 소음과 진동을 흡수하여 최소화하고, 레일과 궤도 기초가 받는 충격을 감소시켜 손상과 마모를 최대한 억제하는 기능을 함.



<그림 3-1> 고무 소재 레일 패드

- 본 연구에서는 폴리우레탄 탄성체 구조 설계를 통해 진동에 강한 이론적인 PU 구조를 설계하고, 다양한 원료 검토 실험을 통해 물성 측정이 가능한 시편을 제작하여 밀도, 인장강도, 경도 등 기본 물성을 측정하고 성형 과정을 통해 제품의 성형성을 검증하고자 함.
- ISO side(NCO Prepolymer)의 설계는 Polymeric MDI와 Mimeric MDI을 일정한 비율에 의해 혼합하고 이에 대해 특별히 선정된 polypl 일정량을 부가 반응 시켜서 원하는 구조의 NCO prepolymer를 제조함.
- POL side의 설계는 Main Polyol의 분자량, 관능기수를 결정하고, 여기에 POP, Chain Extender 및 각종 첨가제를 처방하여 POL side의 조성물을 개발하고, 이 폴리올 배합과 MDI prepolymer 두 제품을 특수한 조건에서 발포 성형 가공하여 원하는 고분자 방진패드를 제작함.
- 전 소재인 PVDF를 결합시켜 복합 패드를 구성하고 하중 변화에 따른 압전 효율 분석을 실시하도록 함.
- 물성의 기본 특징은 압전소재를 방진패드에 복합화를 통하여 열차주행에 의해 진동을 저감시키면서 압전소재의 성능을 이용한 자가발전 시스템을 개발하기 위함이며, 이에 최적화된 고분자 소재를 개발하는데 있음.
- 따라서, 본 과제에서 개발 하고자 하는 방진 패드는 기존에 상용화된 일반적인 레일 패드가 아니라 PVDF 등 고분자 압전소재와 유기적으로 복합화가 이루어져야 하며 또한 철도용 레일 패드 기본 물성을 벗어날 수 있는 개연성을 고려하면 내구성 등이 문제될 소지가 있으므로 각각의 물성 목표를 특수하게 정의하고 개발을 진행함.
- 또한, 진동저감형 고분자 레일패드를 기반으로 물성 목표를 설정하고 이에 따라 기본 개발을 진행하였고, 이는 후단의 방진 패드에 압전소재를 복합화 하고 진동발생 저감형 압전소재(압전소자+고분자재료) 시제품 개발하여 압력에 의해 발생하는 전류의 수득율 등을 분석하는 개발을 진행하는 토대가 됨.

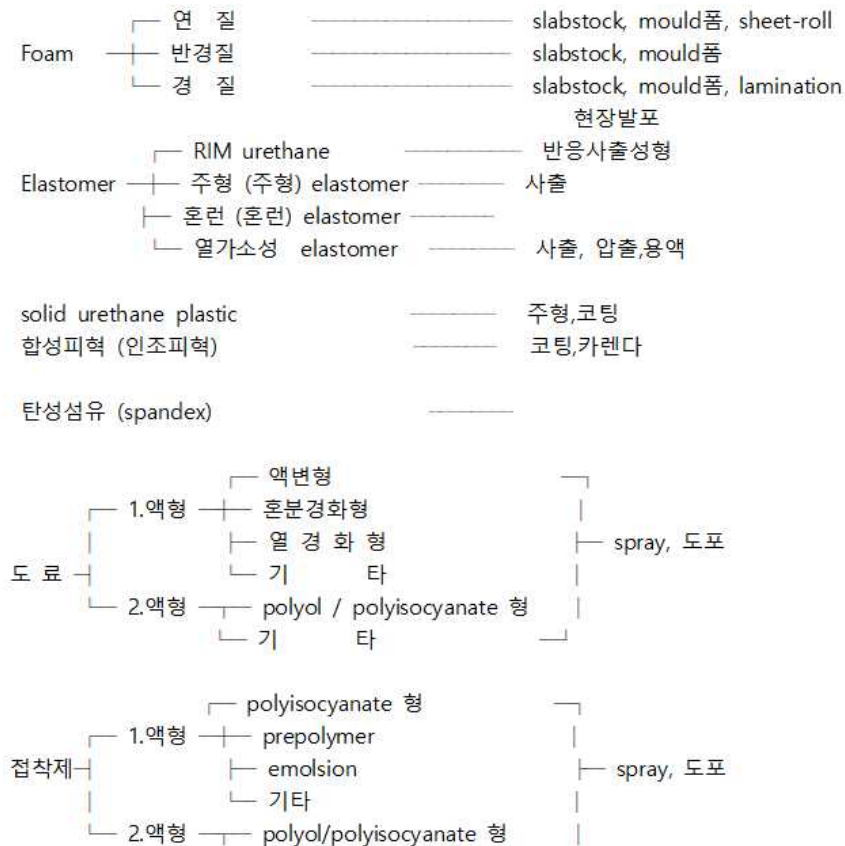
<표 3-1> 진동저감형 고분자 압전소재 레일패드 성능목표

시험항목	단위	Spec
밀 도	kg/m ³	400 이상
인장강도	MPa	5 이상
신장률	%	200 이상
경도	Shore A	70~75
정탄성 계수	N/mm ²	0.010~0.015
영구압축 줄음률	%	20 이하

2. 진동저감형 고분자 압전소재 레일패드 개발의 기본개념

- 우레탄은 1849년 독일의 Wurtz와 Hoffman이 최초로 Isocyanate와 Hydroxyi 화합물의 반응을 발표하면서 부터 알려지게 되어 1937년에 이르러서는 otto bayer에 의해 상업적인 용도가 알려졌고, nyion과 경쟁하기 위해서 Pol-yester계 우레탄이 공업적으로 생산되기 시작함.
- 2차 세계대전이 시작되면서 섬유, 도료, 발포체용 우레탄의 개발이 활성화 되었으며 2차 세계대전이 종식된 후에는 독일의 기술이 알려지면서 미국, 영국, 독일에서 광범위한 연구개발이 시작음
- PE, PS, PVC등 대부분의 다른 고분자와는 달리 우레탄은 반복된 unit를 가진 고분자가 아니므로 전체를 대표하는 실험식이 없으며 우레탄은 기본적으로 Polyether Polyol과 같은 hydroxyi 화합물과 Isocyanate의 중합반응 생성물로서, 대표적인 구조가 $-NH-C-O-$ 인 수지라고 볼 수 있으며 대부분의 우레탄은 발포체로서 그 종류가 아주 다양함.

가 . 폴리우레탄 제품 종류 및 가공법



<그림 3-2> 폴리우레탄 제품별 일반적 분류 및 가공법

나. 우레탄 성형 반응

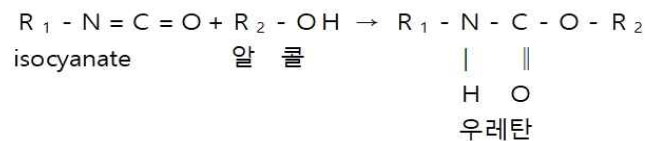
(1) 개요

- 기본적인 우레탄 폼 형성반응은 isocyanate와 활성수소를 갖는 화합물질과의 반응으로 수지의 반응과 발포 반응으로 이루어져 있으며 isocyanate은 cyanide기 ($-C \equiv N$), isomeric cyanate기 ($-O-C \equiv N$)와는 상이한 하나 또는 그 이상의 반응성 isocyanate기 ($-N \equiv C-O$)를 갖는 화합물임.
- 활성수소란 질소, 산소, 황, 염소등과 같은 전기적으로 음성을 띤 원자에 결합되어 있는 수소를 지칭하며 아래의 화합물들은 활성수소원자를 갖고 있고 R,R'는 alkyl, aryl기를 표시함.

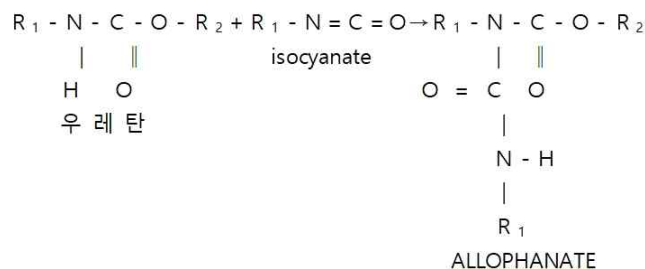
1 차 아민	$R - NH_2$
2 차 아민	$R_2 - NH$
1 차 알콜 / 물	$R - CH_2 - OH / H - OH$
2 차 알콜	$R_2 - CH - OH$
3 차 알콜	$R_3 - C - OH$
카르복실산	$R - COOH$
우 레 아	$R - NHCONH - R'$
아 미 드	$R - CONH_2$

(2) 수지화 (polymerization) 반응

- isocyanate와 hydroxyi 화합물과의 수지화 반응은 다음과 같이 표시할 수 있음.

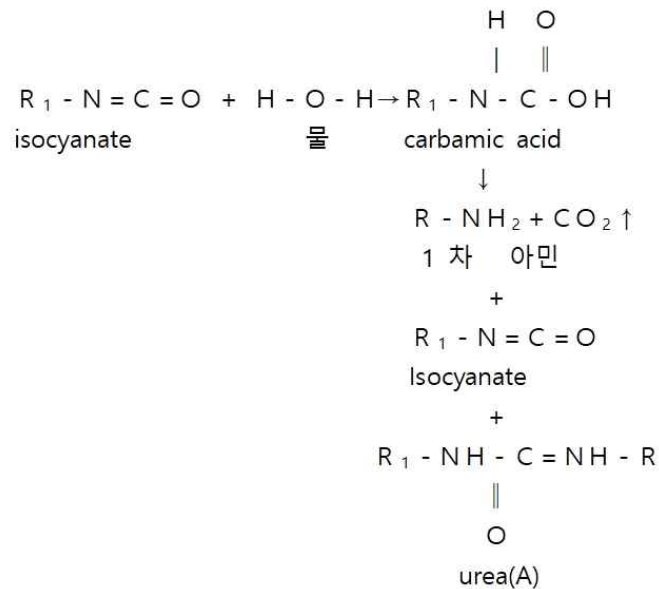


- 위와 같은 수지화반응에 의해서 우레탄이 생성되고 겔화되며 고온에서는 우레탄과 isocyanate사이에 반응이 계속 진행되어 다음과 같이 형성됨.



다. 발포 (foaming) 반응

- 폼을 제조하기 위해서는 겔상태의 혼합물내에 다음의 발포제들 중에서 한가지 또는 두가지의 발포제를 사용하여 기포를 발생시키는 것이 필요하며 물리적 발포제는 일반적으로 비점이 낮은 용매로서 반응열에 의해 증발될 수 있는 것을 말하고 화학적 발포제는 isocyanate와 반응하여 화학적인 반응을 하여 기체를 생성하는 것으로, 일반적으로 물이 사용됨.
- 물은 isocyanate와 반응하여 열적으로 불안정한 중간체인 carbamic acid를 형성한 후 다시 분해하여 1차 아민과 이산화탄소가 생성되며 1차 아민은 isocyanate와 반응하여 다음과 같이 우레아가 됨.



라. 연질 몰드폼

(1) 개요

- 연질 우레탄 폼을 성형하는 기술은 경제성 있는 polyether 폴리올과 one-shot 방식이 가능해지면서부터 개발되기 시작되었고 연질 mold폼의 기술을 사용하면 복잡한 모형의 성형품을 제작할 수 있으며 제작조건이 용이하고 노동비의 절감과 폼의 낭비를 줄일 수 있는 경제적인 장점을 이용할 수 있음.

(2) 성형기술(molding technique)

- 우레탄 산업에서의 대표적인 성형기술은 고온경화(hot cure)와 저온경화(cold cure) 기술이 있으며 hot cure 성형에서 생산되는 폼의 조성과 폼의 치방이 주래의 연질 slab폼의 것과 유사하나 전자가 e.o capped된 폴리올들과 약간

다른 촉매들을 사용한다는 점에서 후자의 폼과는 차이가 있고 cold cure 성형은 최근에 개발된 기술로서 반발 탄성율이 60%이상인 되어 이 기술로 생산된 폼을 일컬어 고탄성(h.r)폼이라고 있으므로 cold cure라는 용어와 고탄성 폼을 동의어로서 사용되고 있으므로 hot cure로 성형된 폼은 여러 측면에서 고밀도 연질 slab폼과 유사한 반면 cold cure로 성형된 폼은 고밀도 연질 slab폼과는 다르고 천연고무 latex 폼과 외관과 탄성율의 측면에서 유사함.

<표 3- > 고온처리 성형과 저온처리 성형의 차이점

구분	Hot cure 성형	종래의 cold Cure 성형	고탄성 (H.R) 성형	
			Polymer폴리올 기술	특수Isocyanate 기술
ISOCYANATE	TDI 80/20	crude mdi & tdi80 / 20	tdi 80/20 & crude - mdi	특수isocyanate t65
폴리올	분자량 : 2800 - 3500 EO-CAPPED토리올	분자량 : 4500 - 6500 EO-CAPPED 토리올	분자량 : 4500 - 6500 EO-CAPPED토리올 + 폴리머 폴리올	분자량 4500 - 6500 EO-CAPPED 토리올
경화조건	Hot-Oven(180 - 240℃)	Cold(상온)	Oven(75 - 120℃)	Oven(75 - 120℃)
후경화	없음	없음	있음	있음
금형온도(℃)	35 - 45	25 - 35	40 - 60	40 - 60

마. 경질 우레탄 폼의 특성 및 응용 분야

1. 경질 우레탄폼의 특성

- 경질 우레탄폼은 매우 좋은 단열재이며 다음 표에서 보는 바와 같이 일정한 두께에 대하여 상업적으로 이용되고 있는 다른 단열재보다 그 단열효과가 우수하며 샌드위치 구조물로 사용 되어 가벼운 무게로 높은 구조적 강도를 가지면서 우레탄이 혼합물 상태일 때 액체 상태이기 때문에 매우 복잡한 형태의 모양의 폼을 형성 할 수 있음.
- 까다로운 형상을 복제 할 수 있으며 발포 하는 동안 금속, 종이, 플라스틱, 돌등 다른 물질과 잘 접착이 되며 절단된 폼도 접착제로 잘 접착됨.
- 폐쇄 셀 구조이기 때문에 적량의 물을 흡수하며 40Kg/m 인 폼은 물에서 자체 무게의 약 25배를 지탱하며 액체 상태에서 시작한 폼의 제조공정은 한 단계로 완성됨으로 후 경화나 폼의 후 가공처리가 없음으로 매우 편리함으로써 냉장고의 단열재, 건축용 샌드위치 판넬 등에 쓰이고 있다.

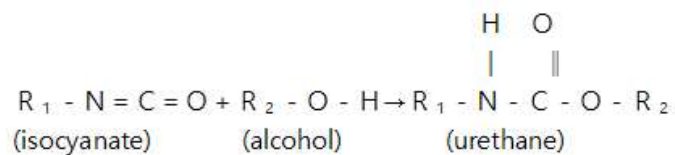
<표 3- > 각종 단열재의 열전도 특성 비교

단열재 종류	밀도 (kg/m)	열전도도 (W/mK)	thickness required for equivalent thermal barrier
rigid polyurethane foam (impermeable facing)	32	0.017	20
rigid polyurethane foam (permeable facing)	32	0.022	27
flexible polyurethane foam	16	0.035	44
polystyrene foam	16	0.035	44
kapok between paper	16	0.035	44
corkboard (low density)	86	0.036	45
rockwool (low density)	100	0.037	46
glasswool	65~160	0.045	56
rockwool (high density)	300	0.041	51
expanded diatomaceous earth	160	0.045	56
corkboard (high density)	220	0.049	61
fibre insulating board	220~250	0.049	61
timber (white pine)	350~500	0.112	140

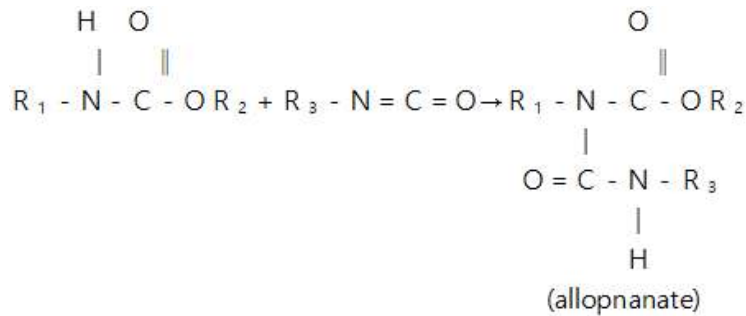
바. 우레탄의 형성 및 조성물

(1)우레탄의 형성

- 기본적으로 우레탄의 반응은 Isocyanate 그룹과 활성수소를 포함하고 있는 화합물 사이에서 일어남.



- 두개 혹은 여러 개의 관능기를 가진 Isocyanate와 두개 혹은 여러 개의 관능기를 가진 alcohol(일반적으로 폴리올)이 반응하여 복잡한 고분자 구조가 얻어지며 생성된 우레탄 그룹의 수소원자는 고온에서 isocyanate와 반응을 계속하여 all-ophanate를 형성함.

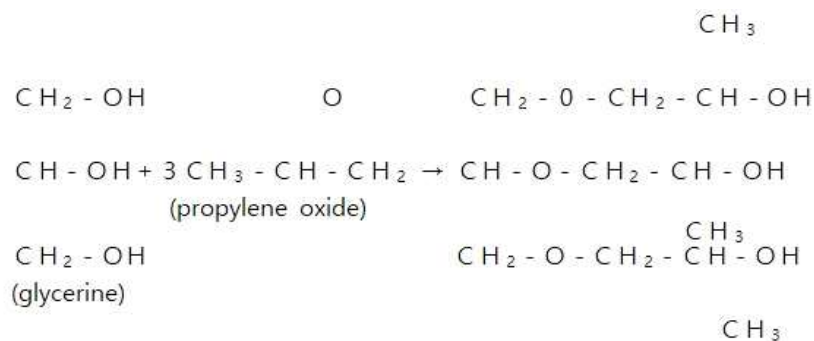


- 폼을 형성하기 위해서 이 고분자 물질은, 중합하는 동안 주입된 발포제에 의해 팽창하거나(물리적 발포), isocyanate와 물과의 반응에 의해서 생성된 carbamic acid가 분해되어 발생하는 CO_2 gas에 의해서 팽창되어(화학적 발포) 폼이 형성함.

(2) 우레탄 폼의 조성물

① 폴리올

- 경질 우레탄 폼은 초기에는 말단기가 hydroxyl group인 글리콜과 디-카르복실산의 반응물인 polyester polyol로 부터 제작되었으나, 이것은 점도가 높고 공정이 어렵기 때문에, 낮은 점도를 가진 polyether polyol이 개발됨.
- polyether polyol은 물 이상의 활성수소와 알킬렌 옥사이드를 포함한 화합물과의 반응물인데 활성수소화합물은 산화물과 중합을 시작하여 원하는 분자량의 폴리올을 얻을 수 있으며 활성수소의 수는 폴리올의 관능기수를 결정하는데, 예를들어 3개의 활성수소를 포함하고 있는 glycerine의 관능기수는 3으로 적용함.



- 경질 폼용 Polyether polyol의 특징은 3이상의 관능기를 가지고 분자량이 적음

개시제	관능기수
Glycerine	3
Trimethyioipropene	3
Pentaerytritoi	4
a - methly glucoside	4
sorbitol	6
surcose	8
triethannol amine	3
ethylene diamine	4
diethylene triamine	5
aniline	2
toluene diamine	4
diphenyl methane diamine	4

② Isocyanates

- 경질 우레탄 폼용으로는 Polymeric 4,4'-diphenylmethane diisocyanate (Crude-MDI)이 가장 보편적으로 사용되며, TDI는 거의 사용되지 않지만 종종 Quasi-prepolymer법에서는 사용되며 냉장고 단열용으로는 미국에서는 Crude-TDI을 대부분 사용됨
- 유럽에서는 MDI을 선호하는 경향이 있으며 보통 상업적으로 이용할 수 있는 crude-MDI는 50%이상의 pure-MDI를 포함하고 낮은 증기압을 갖고 있기 때문에 tdi만큼 독성이 강하지 않고 crude-MDI는 고화를 방지하기 위하여 15℃이상의 온도에서 보관하여야 함.

③ 발포제

- 대부분의 경질 폼은 NCO/OH 반응으로 생긴 열에 의해 증발될 수 있는 비점이 상온인(약24℃) 불활성액체에 의해 발포되며 실온보다 낮은 비점을 가지는 발포제도 가능한데 이것은 forthing 이라는 공법으로, 낮은 비점 때문에 압력조건만 변화하면 토출하면서 즉시 발포되고 물로 발포된 폼에 비해 물리적으로 발포된 폼은 우수한 단열특성을 갖고 낮은 점도를 가짐으로써 믹싱 효율이 좋음.
- 물로 발포된 폼은 흐름성, 내열특성, 습윤 노화 특성이 우수하나 폼이 부스러지기 쉬운 약점이 있고 원하는 물성을 가지는 폼을 얻기 위해서는 두 가지 형태의 발포제를 혼합하여 사용함.

○ 경질 우레탄 폼내에 존재하는 기체들의 열전도도 특성은 다음의 표와 같음.

<표 3 - > 경질 우레탄 폼내에 존재하는 기체의 열전도도 ($K = W / mK$)

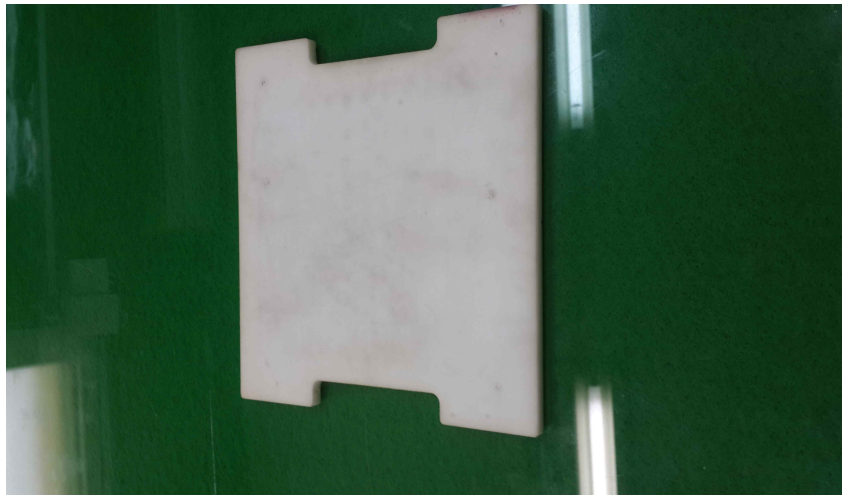
온도		CFM-11	CFM-12	공 기	CO2	수 증 기
℃	℉					
-17.8	0	0.00571	0.00778	0.0227	0.0133	0.0145
-6.7	20	0.00623	0.00813	0.0235	0.0141	0.0154
0	32	0.00643	0.00844	0.0240	0.0146	0.0159
4.4	40	0.00657	0.00846	0.0244	0.0149	0.0163
15.6	60	0.00692	0.00899	0.0253	0.0157	0.0170
26.7	80	0.00743	0.00951	0.0260	0.0166	0.0179
27.8	100	0.00778	0.00986	0.0269	0.0175	0.0188

2. 철도궤도 진동저감을 위한 고분자 재료 시제품 개발

가. 성형 몰드 제작



<그림 3-2> 성형 몰드 사진



<그림 3-3> 성형된 폴리우레탄 레일패드시편

(1) 영구압축 줄임률 시험

(가) 시험방법

- 실험은 하기 표와 같이 All MDI Prepolymer에서 특정 성분을 변화시키는 변수 실험을 진행 하였으며, 각 성분의 변화에 따라 물성 결과를 도출하고, 원하는 목표 물성이 나올 때까지 반복 실험을 실시함.
- 본 결과보고 자료에서는 전체 실험 data를 정리하면 너무 방대해지기 때문에 실험 내용중 유의한 결과가 도출된 실험을 일부 선정하여 정리한 것임.

구분	All MDI prepolymer		Sample-1-17		Sample-1-18		비고
No.	원료명	Ohv, Nco	투입량	당량수	투입량	당량수	
1	POL 1	21	0	0.0000	0	0.000	
2	POL 2	35	300	0.1872	400	0.2496	
3	POL 3	280					
4	diol amine	1601	4	0.1142	4	0.1142	
5	TDI	48.1					
6	MDI 1	33.6	600	4.8000	500	4.0000	
7	MDI 2	33.6	700	5.6000	700	5.6000	
8	MDI	33.1	400	3.1524	400	3.1524	
13	Total		2004	13.251	2004	12.389	
물 성 측 정	점도(cPs/25℃)		84		70		Blookfield vis
	NCO%(실측)		27.77		25.96		
	NCO%(이론)		27.70		25.92		
	영구압축줄임률, %		9.8		10.1		KS M ISO 1856

- 1) 레진프리믹스는 ST-300을 사용하였으며 액비는 100/70으로 고정하여 발포
- 2) 반응성 및 세틀링 측정 후 200*200*10mm 사각금형에 겔보기밀도 950 ~1,000kg/m³ 시편을 제작
- 3) 실험 결과 요약 : 1-17 영구압축줄임률 9.8%, 1-18 영구압축줄임률 10.1%

(2) 신장률 시험

(가) 시험방법

- 아래 표에 기재된 레진프리믹스와 이소시아네이트를 취하여 각각 25±2℃로 온도를 조절한 후 기재된 양의 비(reasin : 100±1wt%, iso : 30±1wt%)로 4000RPM으로 5초 60℃로 온도 조절된 200*200*20mm 몰드에 이 반응 혼합액을 넣고, 10분 뒤 발포 팽창, 폼화한 연질 폼을 꺼내고 익일 50*50*10mm의 크기로 연질 폼의 중심부를 절단하여 코어밀도를 측정함.
- 우레탄발포기를 사용할 경우 레진프리믹스 원료 충전 시 CO2를 최소 30분이상 교반 후 사용하고 아래 표와 같이 얻어진 고밀도 연질 폼의 신율은 CO2의 wt%가 증가할수록, 물이 감소할수록 증가함.

(나) 시험결과

구분		실시예						비교예		
		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	A-1	A-2	A-3
이소시아네이트 (중량부)	AM-375A	30	30	30	30	30	30	30	30	30
1	폴리올A 1)	80	80	80	80	80	80	80	80	80
2	폴리올B 2)	15	15	15	15	15	15	15	15	15
3	폴리올C 3)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	쇄연장제 4)	6	6	6	6	6	6	6	6	6
5	물 5)	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3
6	정포제 6)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7	촉매 1 7)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
8	촉매 2 8)	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1
13	인덱스	105	105	105	105	105	105	101	98	94
레진프리믹스(중량부)		100	100	100	100	100	100	100	100	100
CO2 교환시간 (분) 9)		0	10	20	30	40	50			
CO2 함량 (wt%) 10)		0	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4			
발포 폼 겔보기밀도(kg/m ³) 11)		650	650	650	650	650	650	650	650	650
프리발포에서의 코어밀도(kg/m ³) 12)		560	47.2	46.6	400	400	410	530	460	380
신 율		155	184	219	252	253	255	163	157	149

- 1) 글리세린을 개시제로 하고 프로필렌옥사이드, 에틸렌옥사이드를 부가 중합시켜서 얻어진 폴리에테르폴리올, 분자량 8,000 OHV 21mg KOH/g
- 2) 디프로필렌 글리콜을 개시제로 하고 프로필렌옥사이드, 에틸렌옥사이드를 부가 중합시켜서 얻어진 폴리에테르폴리올, 분자량 3,000 OHV 35mg KOH/g
- 3) 프탈산,아디픽산, 디에틸렌 글리콜을 개시제로 하고 부가 중합시켜서 얻어진 폴리에스테르폴리올, 분자량 2,000 OHV 56mg KOH/g
- 4) 쇄연장제 디에탄올아민, 디에틸렌글리콜, 디프로필렌글리콜, 트리프로필렌글리콜, 글리세린
- 5) 정제 증류수
- 6) 실리콘 정포제
- 7) 수지화 촉매 : 폴리올과 이소시아네이트의 반응에 의한 우레탄반응을 촉진시키는 촉매
- 8) 발포 촉매 : 이소시아네이트와 물과의 반응에 의한 우레아반응을 촉진시키는 촉매
- 9) 밀폐된 발포기의 워킹탱크 내에서 버블링 형태의 고속순환방식
- 10)KS M ISO 3251에 따른 측정
- 11)발포에서의 겔보기밀도
- 12)프리발포에서의 코어밀도
- 13)KS M 6518에 따른 측정

- 추가 시료에 대해 아래 표에 기재된 레진프리믹스와 이소시아네이트를 취하여 각각 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 온도를 조절한 후 기재된 양의 비(reasin : $100 \pm 1\text{wt}\%$, iso : $50 \pm 1\text{wt}\%$)로 4000RPM으로 5초 60°C 로 온도 조절된 $200 \times 200 \times 20\text{mm}$ 몰드에 이 반응 혼합액을 넣고, 15분 뒤 발포 팽창, 폼화한 연질 폼을 꺼내고 익일 $50 \times 50 \times 10\text{mm}$ 의 크기로 연질 폼의 중심부를 절단하여 코어밀도를 측정함.
- 하우 레진프리믹스 원료 충전 시 최소 30분이상 교반 후 사용하며 아래 표에 기재한 것과 같이 얻어진 폼의 신율은 CO_2 의 wt%가 증가할수록, 물이 감소할수록 증가함.

구분		실시예						비교예		
		1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	1-12	A-1	A-2	A-3
이소시아네이트 (중량부)	AM-375A	50	50	50	50	50	50	50	50	50
1	폴리올A 1)	70	70	70	70	70	70	70	70	70
2	폴리올B 2)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
3	폴리올C 3)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
4	쇄연장제4)	9	9	9	9	9	9	9	9	9
5	물 5)	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3
6	정포제 6)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7	촉매 1 7)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
8	촉매 2 8)	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1
13	인덱스	105	105	105	105	105	105	101	98	94
레진프리믹스(중량부)		100	100	100	100	100	100	100	100	100
CO_2 교반시간 (분) 9)		0	10	20	30	40	50			
CO_2 함량 (wt%) 10)		0	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4			
몰드폼 겉보기밀도(kg/m^3) 11)		800	800	800	800	800	800	800	800	800
프리폼 코어밀도(kg/m^3) 12)		750	702	646	610	612	615	720	690	620
신 율		154	169	185	208	209	212	168	160	154

- 1) 글리세린을 개시제로 하고 프로필렌옥사이드, 에틸렌옥사이드를 부가 중합시켜서 얻어진 폴리에테르폴리올, 분자량 8,000 OHV 21mg KOH/g
- 2) 디프로필렌 글리콜을 개시제로 하고 프로필렌옥사이드, 에틸렌옥사이드를 부가 중합시켜서 얻어진 폴리에테르폴리올, 분자량 3,000 OHV 35mg KOH/g
- 3) 프탈산, 아디픽산, 디에틸렌 글리콜을 개시제로 하고 부가 중합시켜서 얻어진 폴리에스테르폴리올, 분자량 2,000 OHV 56mg KOH/g
- 4) 쇄연장제 디에탄올아민, 디에틸렌글리콜, 디프로필렌글리콜, 트리프로필렌글리콜, 글리세린
- 5) 정제 증류수
- 6) 실리콘 정포제
- 7) 수지화 촉매 : 폴리올과 이소시아네이트의 반응에 의한 우레탄반응을 촉진시키는 촉매
- 8) 발포 촉매 : 이소시아네이트와 물과의 반응에 의한 우레아반응을 촉진시키는 촉매

- 9) 밀폐된 발포기의 워킹탱크 내에서 버블링형태의 고속순환방식
- 10) KS M ISO 3251에 따른 측정
- 11) 몰드발포에서의 겉보기밀도
- 12) 프리발포에서의 코어밀도
- 13) KS M 6518에 따른 측정

나. 진동저감형 고분자 압전소재 레일패드 시제품 제작

(1) 기계 발포 성형

(가) 기계 발포 성형기

- 본 실험에서는 기계 발포 주형기를 사용하여 몰드 주입 발포하여 시편의 성형성을 확인하는 Scale-up 실험을 진행하였음.
- Scale-up 실험에서 시편의 성형성은 다양한 기술적 요인이 존재하며 이 성형성 실험의 과정에서 도출된 기술을 토대로 기술 특허를 출원함.



<그림3-4> 성형 몰드 사진

(나) 성형 조건

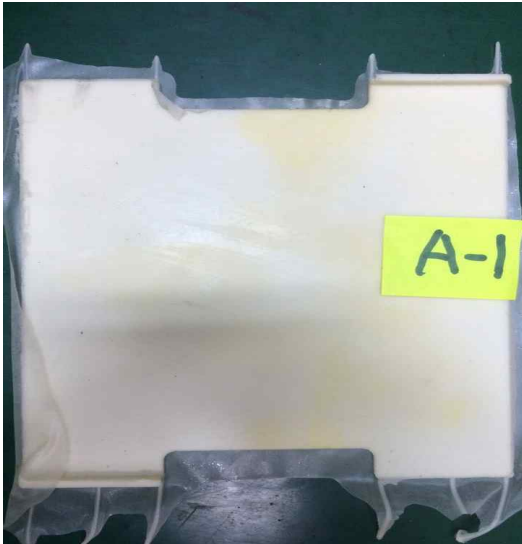
- ① 탱크온도 POL/MDI : 23℃ / 23℃
- 원료 주입 후 원료 탱크의 온도 관리는 매우 중요하다. 원료 탱크의 온도가 일정하게 유지되지 않을 경우 반응 속도가 변하게 되어 성형에 어려움 초래함.
- ② 탱크압력 POL/MDI : 3 bar / 3 bar
- 탱크 압력은 항상 양압으로 유지하고, 압력이 없으면 원액dl 이송되는 과정에서 Air Bubble등이 다수 형성되어 추후 성형 시편의 Defect로 나타날 수 있음.

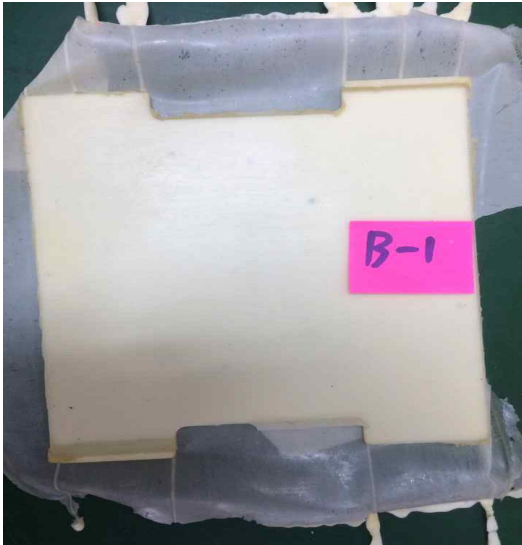
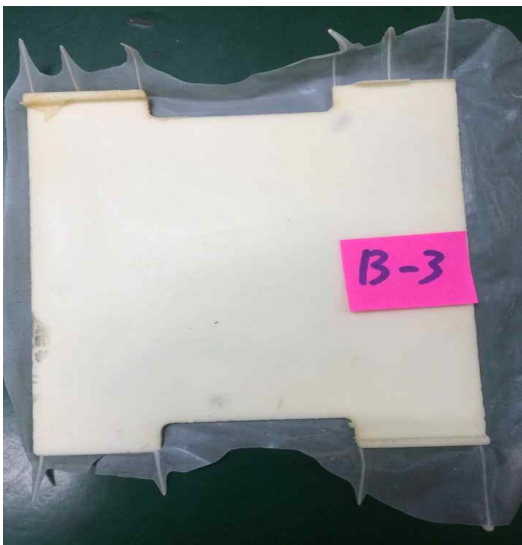
③초당 토출량 : 20g / sec

- 초당 토출량은 시편의 크기에 의해 정해진다 본 방진패드는 시편 사이즈가 일정하여 20g/sec로 고정하여 실험을 진행하였으며 단, 토출시 주입패턴을 변화시켜 성형 시 Defect 발생을 최대한 제어함.

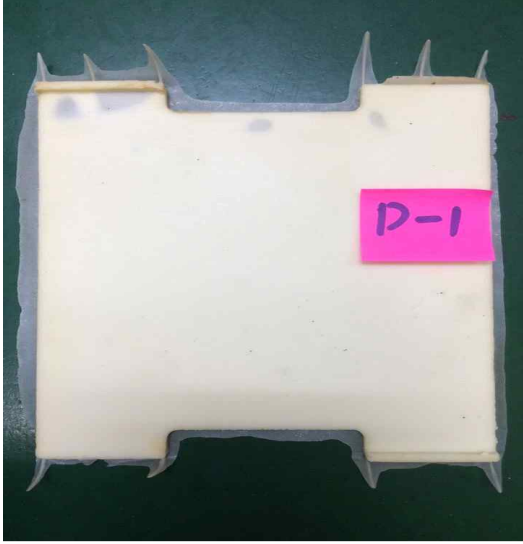
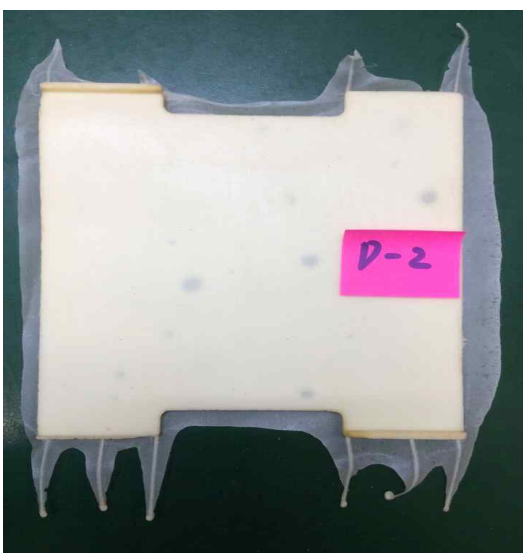
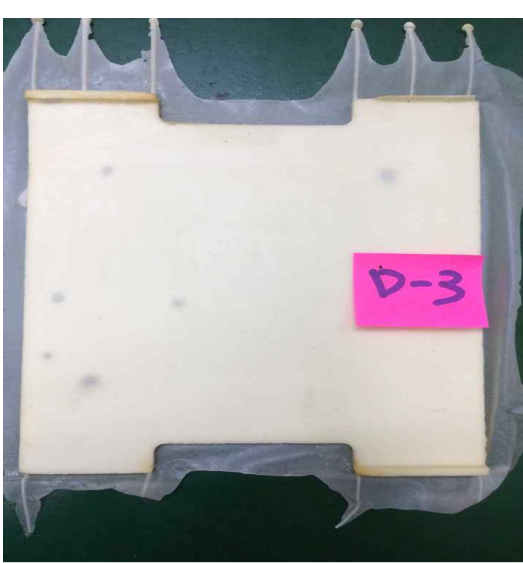
(다) 성형 조건별 사례

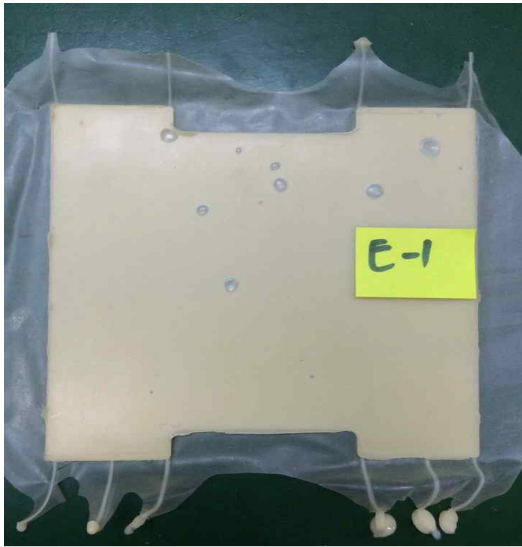
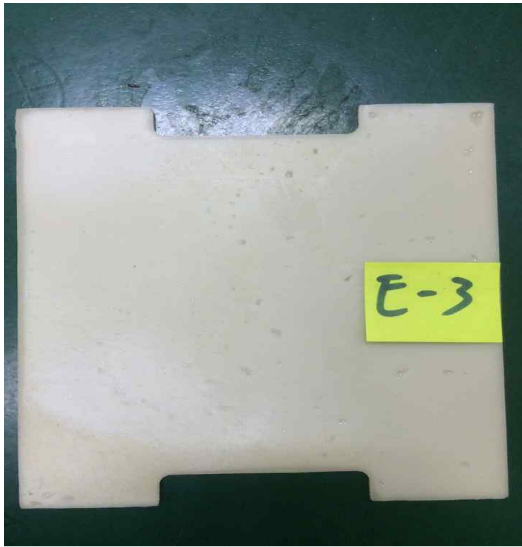
- 본 실험에서는 기계 발포 성형기의 조건을 최적화 하는 과정이며, 이과정에서 다양한 변수 실험을 진행함.
- 특히, Defect가 발생하는 원인과 이를 해결해 가는 과정은 매우 중요한 실험적 성과라고 할 수 있으며, Defect의 가장 큰 부분은 Void, colo, Mixing 불량, 주입 패턴, 반응속도에 조절 미흡에 의한 믹싱 불량과 점도 증가에 따른 변색 등이 있음.

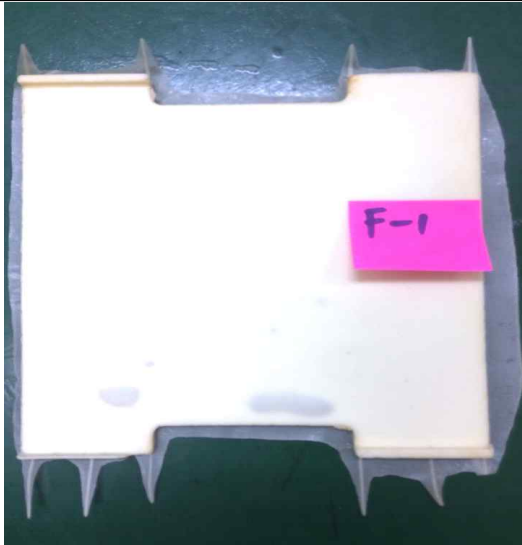
구분	성형 시편	실험 내용
성형 Foam 기계 가공 (제 1차 실험)		mixing 불량에 의한 변색 (원료 중 점도가 높아 서 생기며 이는 폴리 을 선정을 다시 하여 해결해야 함)
		중앙 기포 불량 (발포기 Head에서 토 출 과정에서 Air 유입 으로 발생)
		기포 불량 (반응성이 빨라서 Vent가 완료되기 전에 경화가 진행되어 Void 가 생성됨)

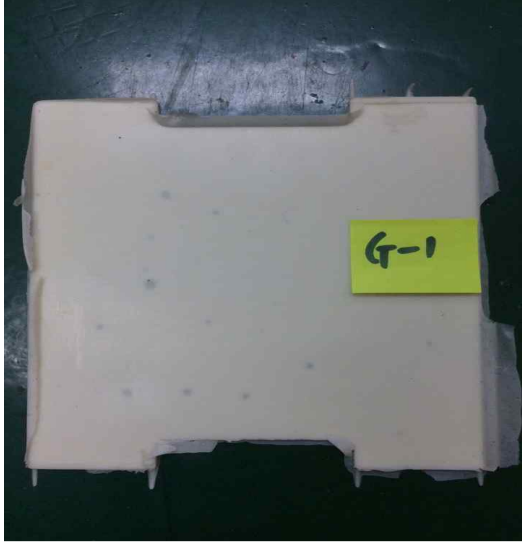
구분	성형 시편	실험 내용
성형 Foam 기계 가공 (제 2차 실험)		좌측변색 및 잔기포 (1차 평가 후 재선정한 폴리오 올레핀 점도가 여전히 높아 발생)
		잔기포 불량 (믹싱 압력을 높였으나 여전히 잔기포 발생)
		잔기포 불량 (액온을 27℃까지 높였으나 믹싱불량이 해결되지 않고 잔기포가 발생함)

구분	성형 시편	실험 내용
성형 Foam 기계 가공 (제 3차 실험)		좌측 잔기포 (2차 평가 후 폴리올 점도를 큰 폭으로 낮췄으나 반응성이 빨라 잔기포 발생)
		표면 핀홀 발생 (액온을 낮추는 과정 (20℃ 이하) 에서 Mixing 불량으로 핀홀 발생)
		중심부 기포 발생 (액온을 23℃ 정상으로 올리고 압력을 변경한 후 성형하였으나 반응이 빠른 문제로 인해 기포 문제가 해결되지 않음)

구분	성형 시편	실험 내용
성형 Foam 기계 가공 (제 4차 실험)	 A rectangular foam specimen with a central rectangular cutout. It is held in a mold by four blue plastic clips at the corners. A pink label with 'D-1' is attached to the right side. The specimen shows some surface texture and minor imperfections.	사이드 기포 불량 (본 실험에서는 몰드 Vent Hole를 집중하여 검토함, 상부 벤트가 미흡하여 Air 잔류-사진 상부)
	 A rectangular foam specimen with a central rectangular cutout, similar to D-1. It is held in a mold by four blue plastic clips. A pink label with 'D-2' is attached to the right side. The specimen shows some surface texture and minor imperfections.	표면 기포 불량 (몰드의 좌우 Vent Hole은 유지하고 주입 패턴을 "I"자에서 "Z"로 변경하였으나 시편 표면부로 Air가 몰려 기포 발생)
	 A rectangular foam specimen with a central rectangular cutout, similar to D-1. It is held in a mold by four blue plastic clips. A pink label with 'D-3' is attached to the right side. The specimen shows some surface texture and minor imperfections.	표면 기포 불량 (몰드의 좌우 Vent Hole은 유지하고 주입 주입 패턴 "Z"에서 "O"로 변경하였으나 표면 바깥쪽으로 Air가 몰려 기포 발생)

구분	성형 시편	실험 내용
성형 Foam 기계 가공 (제 5차 실험)		표면 기포 불량 (물성 중 신율을 고려하여 특수 폴리올을 사용하여 성형하였으나 점도 상승 및 반응성 빠름)
		사이드 기포 불량 (점도고려 처방 재 조정 후 성형 - 벤트홀 불량으로 잔기포 발생)
		표면 기포 불량 (상기 처방에서 사이드 벤트를 추가 - 하면 부위는 양호해 졌으나 반응이 빨라 표면 기포 발생)

구분	성형 시편	실험 내용
성형 Foam 기계 가공 (제 6차 실험)	 A rectangular foam sample with a central notch and four pointed protrusions on the sides. A pink label with 'F-1' is attached to the right side.	하부 기포 문제 (목표 물성에 근접해 진 처방으로 성형: 믹싱 문제 및 “I” 주 입 패턴 문제)
	 A rectangular foam sample with a central notch and four pointed protrusions on the sides. A pink label with 'F-2' is attached to the right side.	하부 기포 문제 (상기 처방으로 주입 패턴 변경 성형: 기포 상태가 일부 개선됨)
	 A rectangular foam sample with a central notch and four pointed protrusions on the sides. A pink label with 'F-3' is attached to the right side.	표면 기포 문제 (상기 처방으로 주입 량 조절후 Vent를 1/2 막고 성형: 표면 기포 상태가 나빠짐)

구분	성형 시편	실험 내용
성형 Foam 기계 가공 (제 7차 실험)	 A rectangular foam sample with a yellow label 'G-1' on the right side. The sample is held by a metal clamp at the top. It shows some surface texture and small dark spots.	하부 기포 불량 (최종 처방에 대한 Trouble Shooting 실험 - 성형기 액비 변경 및 압력 Down시 믹싱 불량 발생)
	 A rectangular foam sample with a yellow label 'G-2' on the right side. It is held by a metal clamp at the top. The surface appears smoother than G-1, but still has some texture.	하부 기포 불량 (기계 성형기 조건 조정 후 재성형 : 믹싱 불량 문제 상당 부분 해결되나 기포 잔존 - 추가 실험 후 특허 출원)
	 A rectangular foam sample with a yellow label 'G-3' on the right side. It is held by a metal clamp at the top. This sample shows significantly more surface texture and numerous small dark spots compared to G-1 and G-2.	하부 기포 불량 (원액 믹싱을 완전히 틀어서 성형시 기포 다량 발생)

(2) 진동저감형 고분자 압전소재 레일패드 시제품 성능

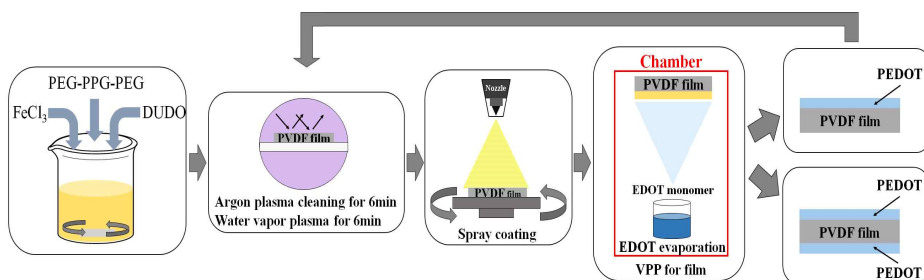
시험항목	단위	Spec	시제품
밀 도	kg/m ³	400 이상	800~1,000
인장강도	MPa	5 이상	평균 5.5
신장률	%	200 이상	평균 250
경도	Shore A	70~75	평균 75
정탄성 계수	N/mm ²	0.010~0.015	평균 0.013
영구압축 줄음률	%	20 이하	평균 13

4. 압전소재를 이용한 진동 저감형 압전소재(압전소자+고분자재료) 기본모형 개발

가. 압전소재를 이용한 진동 저감형 압전소재 방진패드 제작과정

(1) 기상중합을 이용한 PEDOT전극-PVDF Film 합성

- 혼합 산화제를 제조(FeCl_3 : 3wt%, PEG-PPG-PEG : 0.7wt%, DUDO : 0.7wt% in Butanol).
- PVDF film의 표면에 불순물을 제거 하기 위하여 에탄올을 이용하여 세척 후 Plasma 표면 처리(Ar plasma cleaning + Water vapor plasma).
- Spray coating 및 Spin coating을 하여 혼합 산화제를 PVDF film위에 코팅함.
- Thermal Evaporator을 이용하여 기상중합(Vapor-Phase Polymerization) 실시.



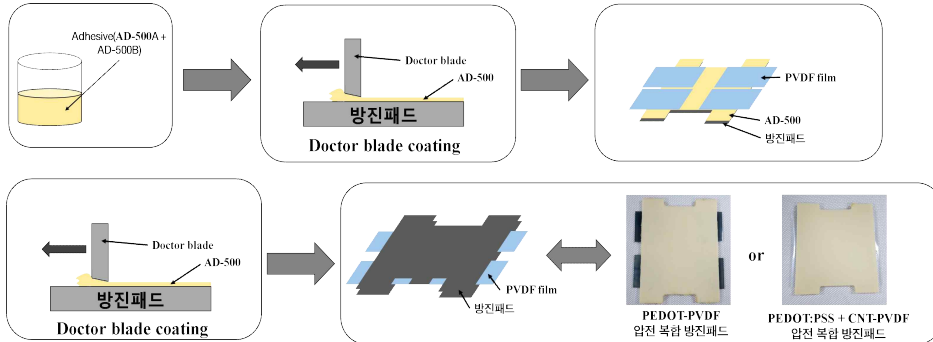
<그림 3-5> 기상중합을 이용한 Poly(3,4ethylenedioxythiophene) 전극 합성

(2) Sandwich 형태의 압전소재 방진패드

- Sandwich 형태의 압전소재 방진패드를 제작하기 위하여 접착제(AD-500)을 합성하고(합성 비율, AD-500(A액) : AD-500(B액) = 1:2), 닥터블레

이드(두께 : 0.3mm)를 사용하여 방진패드에 AD-500(접착제)이 균일 코팅을 시켜주고 코팅된 방진패드 위에 PVDF film을 접착함(건조 시간 : 4분).

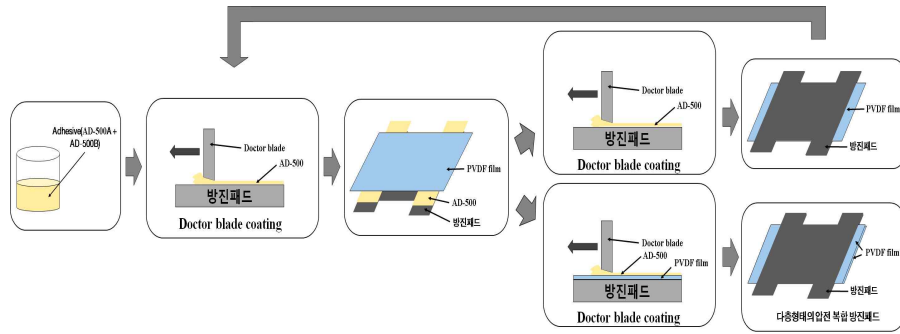
- 다른 방진패드 위에 닥터블레이드(두께 : 0.3mm)를 사용하여 AD-500(접착제)을 균일 코팅 후 코팅된 방진패드 위에 PVDF film이 접착된 방진패드를 접착함(건조 시간 : 4분).
- 이후 건조된 Sandwich 형태의 압전소재 레일패드에 압력을 가하면서 상온에서 24시간 건조 실시.



<그림 3-6> Sandwich 형태의 압전소재 방진패드 제작 과정

(3) 다층형태의 압전소재 레일패드

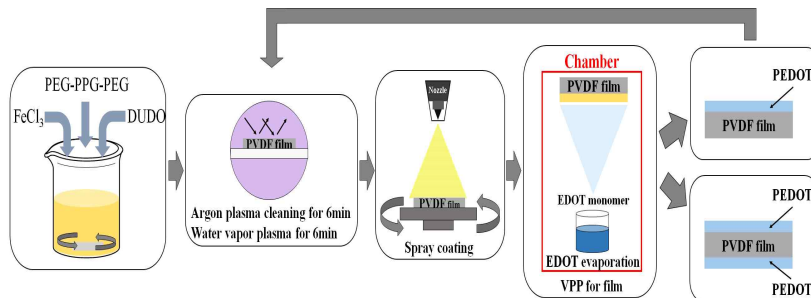
- 다층형태의 압전소재 방진패드를 제작하기 위하여 접착제(AD-500)를 합성하고(합성 비율, AD-500(A액) : AD-500(B액) = 1:2), 닥터블레이드(두께 : 0.3mm)를 사용하여 방진패드에 AD-500(접착제) 균일 코팅을 시켜주고 코팅된 방진패드 위에 PVDF film을 접착함(건조 시간 : 4분).
- 다른 방진 패드 위에 닥터블레이드(두께 : 0.3mm)를 사용하여 AD-500(접착제) 균일 코팅을 하고, 코팅된 방진패드 위에 PVDF film이 접착된 방진패드를 접착함(건조시간 : 4분).
- 다시 다른 방진패드 위에 닥터블레이드(두께 : 0.3mm)를 사용하여 AD-500(접착제) 균일 코팅하고, 코팅된 방진패드 위에 PVDF film을 접착함 (건조 시간 : 4분).
- PVDF film이 접착된 방진패드 위에 닥터블레이드(두께 : 0.3mm)를 사용하여 AD-500(접착제) 균일 코팅함.
- 먼저 Sandwich 형태로 접착된 압전소재 방진패드와 PVDF film이 접착된 방진패드와 접착함(건조 시간 : 4 분).
- 이후 건조된 다층형태의 압전소재 방진패드에 압력을 가하면서 상온에서 24간 건조를 실시.



<그림 3-6> 다층형태 압전소재 방진패드 제작 과정

(3) 패드 제작에 있어 필요한 매개변수 결정

- 압전소재 방진패드 제작에 있어 여러 가지의 매개변수들 중 첫 번째는 방진 패드의 두께로 실제 철도 구간에서 사용되는 레일패드의 두께는 10mm이나 압전소재 방진패드 경우 패드 중간에 압전소재(PVDF film)를 삽입하기 때문에 방진패드의 두께 및 접착제 두께를 결정해야 함.
- 본 연구에서는 Sandwich 형태의 압전소재 방진패드에 경우 방진패드에 두께를 5mm, 다층형태의 경우에는 3mm의 두께를 가진 방진패드를 사용하여 하였으며, 접착제 두께는 두께 별로 압전 성능을 측정하여 최적의 압전소재 방진패드 제작 조건을 찾았음.
- 두 번째로 압전소재 방진패드에 전극 연결 시 기존에는 오리집계를 활용하였으나 오리집계를 사용하면 전극 연결 면적이 작기 때문에 적정 수준의 압전 성능이 나타나지 않으며, 압전소재(PVDF film)에 부정적인 영향 끼칠 수 있을 것으로 판단되어 동판을 별도로 제작하여 전극연결에 사용하였음.
- 세번째는 압전소재(PVDF film)의 전극으로 기존에 사용하던 PEDOT:PSS +CNT전극-PVDF film 경우 저항 값 이 8022Ω 으로 상당히 높아 압전 성능에 부적절할 것으로 판단되어 기상중합법을 이용한 PEDOT(Poly(3,4-ethylene dioxythiophene)) 전극을 활용하여 보다 효율적인 압전 성능을 가진 압전소재 방진패드를 제시함.



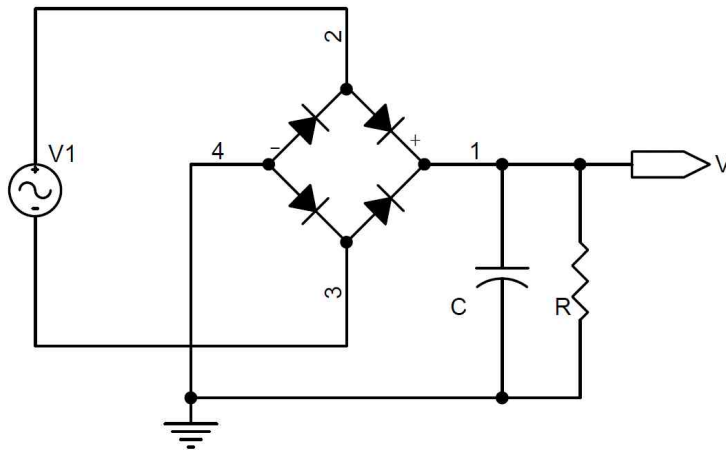
<그림 3-7> 기상중합을 이용한 Poly(3,4ethylenedioxythiophene) 전극 합성

제 2 절 압전소자 이용 자가발전 시스템 개발 내용 및 성과

1. 진동저감형 자가발전 시스템 기본모형 설계

가. 압전에너지 하베스팅 시스템

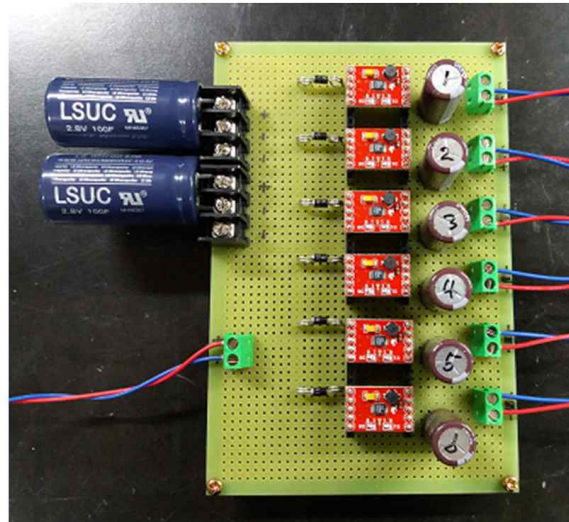
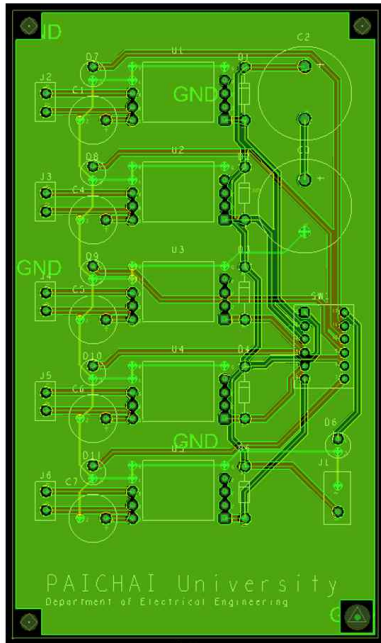
- 압전소자를 이용한 에너지 하베스팅의 기본적인 원리는 아래 그림과 같다. 외부로부터 일시적으로 혹은 지속적으로 가해지는 충격으로 변형 진동이 일어나고 압전효과에 의해서 교류(AC) 전류가 발생함.
- 이렇게 생성된 전류가 브리지 정류소자(Bridge Rectifier)를 통해서 축전지(Capacitor)에 저장되어 최종적으로 전압(V)차이에 의한 발전이 일어나게 됨.
- 이런 과정이 반복되면서 지속적인 에너지를 하베스팅을 할 수 있게 되는 원리임.



<그림 3-16> 에너지 하베스팅의 기본원리

- 현재 압전 에너지 하베스팅의 전력 변환을 위한 회로 기술은 효율적인 에너지 사용을 위해 저전력 컨트롤러 위주로 연구 개발이 진행되고 있으며, 동시에 하베스팅 회로 부분에서도 큰 임피던스 특성을 가지는 압전소자의 캐패시터 특성으로 인한 전압과 전류의 진상 위상차로 발생하는 낮은 출력 전력 특성을 개선하고자 인덕터(Inductor)를 사용하여 전기적인 LC 공진을 통해 위상차를 같게 하여 전력 특성을 높일 수 있는 방안이 적용되고 있음.
- 본 연구에서 적용된 압전소자에서 발생하는 전류는 1mA 미만의 미세전류로 선로 기반측정 시스템의 전류원으로 사용하기 위한 집전방식으로 기존의 방법은 효율을 높이기 문제점이 있음.

- 따라서, 본 연구에서는 미세전류를 집전하기 위하여 Linear Technology사에서 개발한 "Nanopower Energy Harvesting Power Supply" 전용 칩인 LTC3588을 사용하여 아래 그림과 같은 에너지 하베스팅 장치를 설계함.

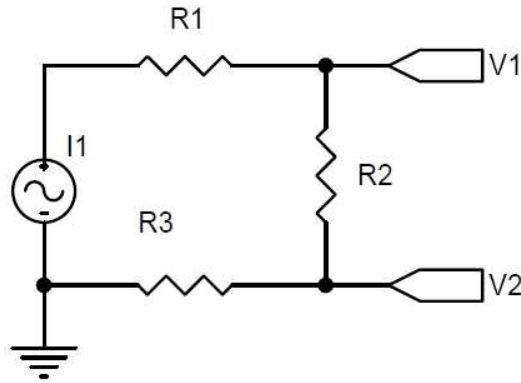


<그림 3-17> LTC3588 에너지 하베스팅 장치

- LTC3588에서 발생된 3.3V 전압을 집전하기 위해 2.8V 100F 슈퍼-콘덴서를 직렬로 연결하여 다수의 LTC3588에서 발생된 전류 집전을 테스트함.

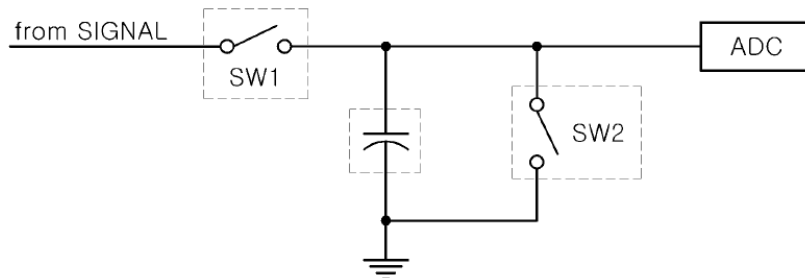
나. 압전소자의 미세전류 측정 방법

- 본 연구의 결과물인 압전패드의 성능을 확인을 위해 압력에 따른 전류의 변화를 측정을 위한 미세 전류측정 장치를 설계함.
- 기존의 전류 측정 방법은 키르히호프의 전류 법칙을 이용한 Shunt 저항 전류 측정 방식으로 그 방법은 Shunt 저항을 이용한 미세전류 측정 방법에 따르면, 아래 그림과 같이 전류원에서 나오는 전류는 R1, R2, R3에 모두 같은 양이 인가됨. 이 전류는 R2 저항 양단의 전압 차로 나타나고, 이 전압 차이를 저항값으로 나누면 흐르는 전류 양을 측정 할 수 있음.



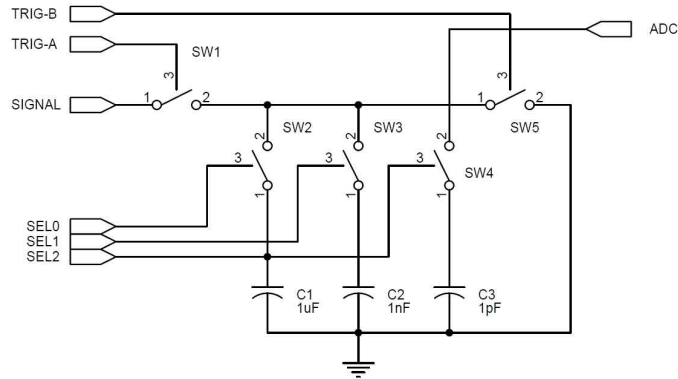
<그림 3-18> Shunt 저항 미세전류 측정 장치 방법

- Shunt 저항을 이용한 방법은 전압 차 또한 미세하여 Op-AMP를 이용하여 수백 배에서 수천 배까지 증폭을 해서 사용하여야 하며, 이런 증폭 과정에 잡음이 생기고 잡음을 배제시킬 부가적인 회로 또한 필요하게 됨.
- 본 과제에서는 적분특성을 가지고 있는 콘덴서를 이용한 미세전류 측정 방법을 설계하였고, 미세 전류 측정기의 회로와 구동 시계열 그리고 순서도는 아래의 그림과 같음.
- 적분에 사용되는 콘덴서의 용량을 변화 시켜 수uA에서 수A 까지 측정할 수 있는 특성을 가지고 있음.
- 이를 위해 미세전류 측정 장치는 축전지에 충전된 전압을 측정하는 전압 측정부 및 상기 측정된 전압, 충전 진행 시간, 및 상기 축전지의 용량에 기초하여 전류 값을 계산하는 전류 측정부를 포함하여 구성함.
- 전압 측정부는 적어도 하나의 축전지 및 축전지와 직렬로 연결되는 제1스위치, 하나의 축전지와 병렬로 연결되는 제2 스위치를 포함함.
- 축전지는 제1스위치(SW1)가 ON 되고, 제2스위치(SW2)가 OFF 되면, 제1스위치를 통해 입력된 시그널의 전류를 충전하고, 제1스위치가 OFF되고 제2스위치가 OFF되면 상기 축전지에 충전된 전압을 유지하며, 제1스위치가 OFF되고 상기 제2스위치가 ON되면 상기 축전지에 충전된 전압을 방전시킬 수 있음.



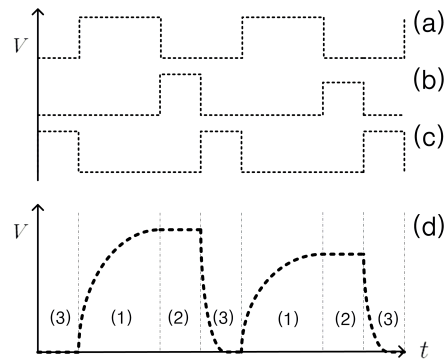
<그림 3-19> 미세전류 측정장치 회로구조

- 전압 측정부는 제1스위치가 OFF되고, 제2스위치가 OFF되면 축전지에 충전된 전압을 측정하는 ADC를 더 포함할 수 있음.



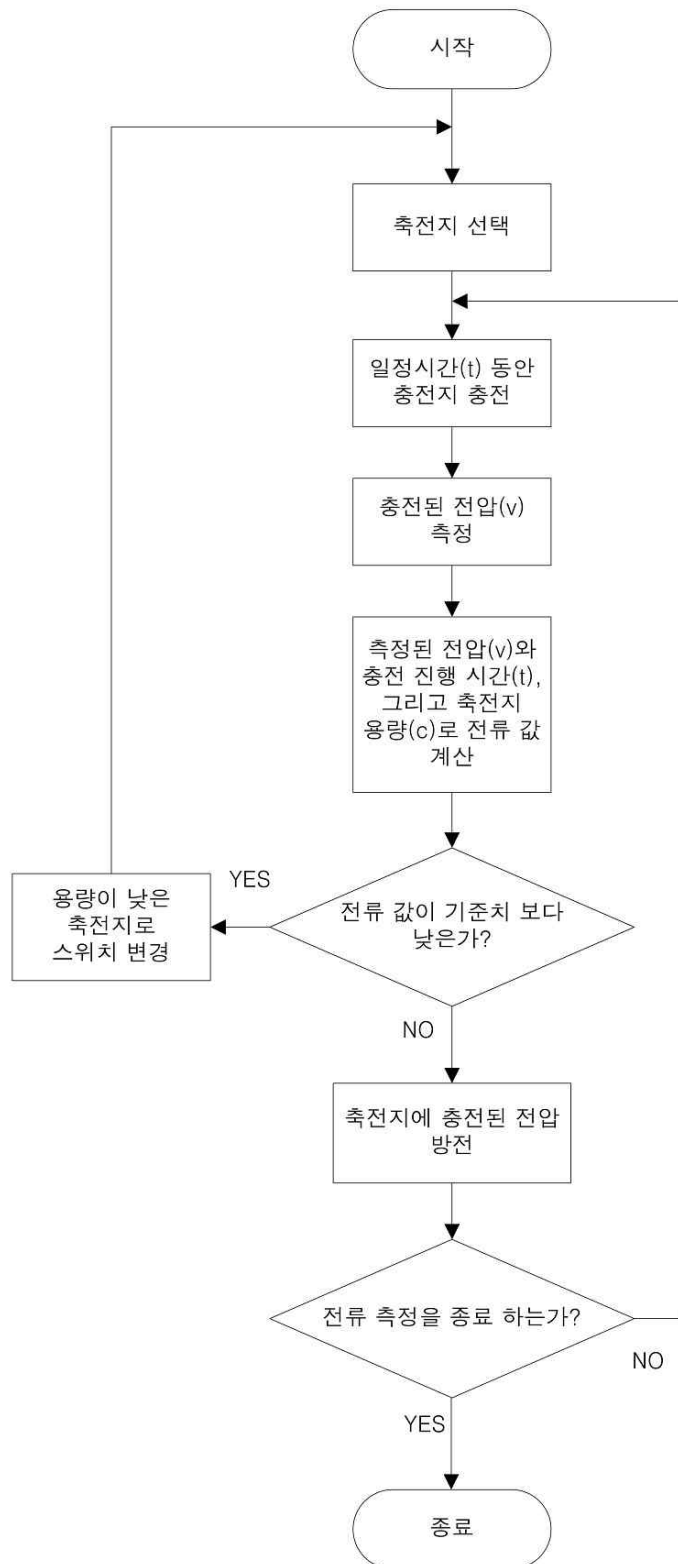
<그림 3-20> 미세전류 전압 측정장치 회로구조

- 미세전류 측정 장치는 축전지가 서로 용량이 다른 복수개로 구성된 경우, 계산된 전류 값을 미리 설정된 기준치와 비교하고, 비교의 결과에 기초하여 복수개의 축전지 중 용량이 다른 축전지를 선택하는 축전지 선택부를 더 포함할 수 있으며, 선택된 축전지에 충전된 전압을 측정할 수 있음.
- 전류 측정부는 충전 진행 시간 동안 측정된 전압의 변화량을 산출하고, 산출된 전압의 변화량에 상기 축전지의 용량을 곱하여 상기 전류 값을 계산함.
- 본 연구에서의 미세전류 측정 방법은 미세전류측정 장치의 제어부가 축전지에 입력 시그널의 전류를 충전하기 위해, 축전지와 직렬로 연결된 제1스위치에 ON신호를 인가하고, 축전지와 병렬로 연결된 제2스위치에 OFF신호를 인가하는 단계 및 미세전류 측정장치의 제어부가 축전지에 충전된 전압을 유지시키기 위해, 제1 스위치에 OFF신호를 인가하고 제2스위치에 OFF신호를 인가하는 방식을 제시함.
- 축전지에 충전된 전압을 측정하는 단계는 제1스위치에 OFF신호를 인가하고 제2스위치에 OFF신호를 인가하는 단계 이후에 전압 측정부의 ADC에 의해 측정함.
- 전류 값을 계산하는 단계는 충전 진행 시간 동안 측정된 전압의 변화량을 산출하는 단계 및 산출된 전압의 변화량에 축전지의 용량을 곱하여 전류 값을 계산하여 산출함.



<그림 3-21> 미세전류 측정장치 타이밍 차트

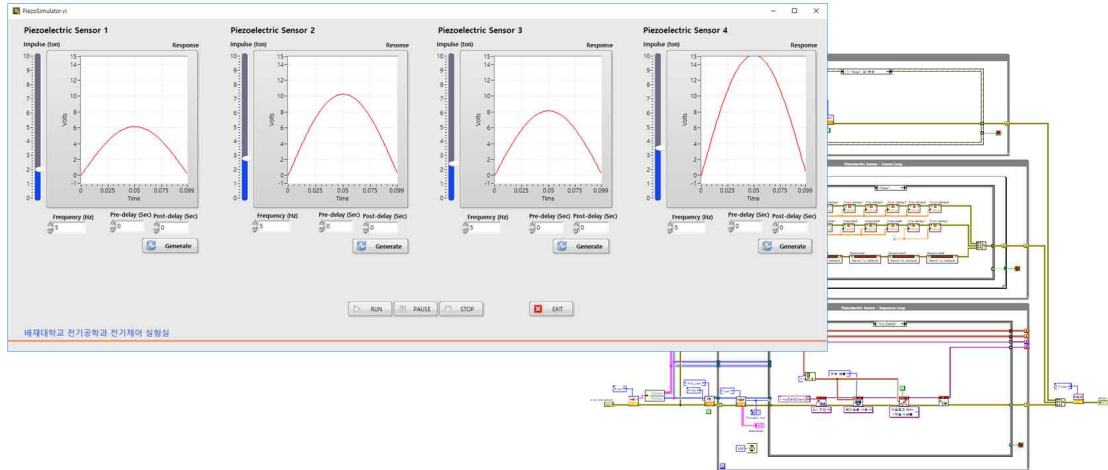
- ① 위 그림의 (a)는 콘덴서에 전류를 충전시키는 신호이다. High 상태일 때 직렬로 연결된 아날로그 스위치가 On 됨.
- ② 그림의 (b)는 콘덴서에 충전된 전압을 유지시키는 신호에 마이크로컨트롤러의 ADC는 전압을 측정하고, 계산식에 의해 전류를 계산함.
- ③ 그림의 (c)는 다음 계산을 위한 콘덴서에 충전된 전압을 방전시키는 신호이며, 콘덴서와 병렬로 연결된 아날로그 스위치를 On 시킴.
- ④ 그림의 (d)는 각 구간별 콘덴서에 충전되는 전압을 나타냄.
- ⑤ 그림에서 (1) 구간의 전압 변화를 (1) 구간의 시간으로 나눈 값에 축전지의 용량을 곱하면 그 시점의 전류 값을 계산 할 수 있음.



<그림 3-22> 미세전류 측정장치의 순서도

2. 압전소자 유사신호 연속 발생 장치

- 에너지 하베스팅 장치의 효율 및 특성을 시험하기 위해 National Instrument사의 LabVIEW 프로그램과 myDAQ 장치를 이용하여 압전패드에서 발생하는 신호와 유사한 신호를 발생하는 시스템을 아래 그림과 같이 개발함.

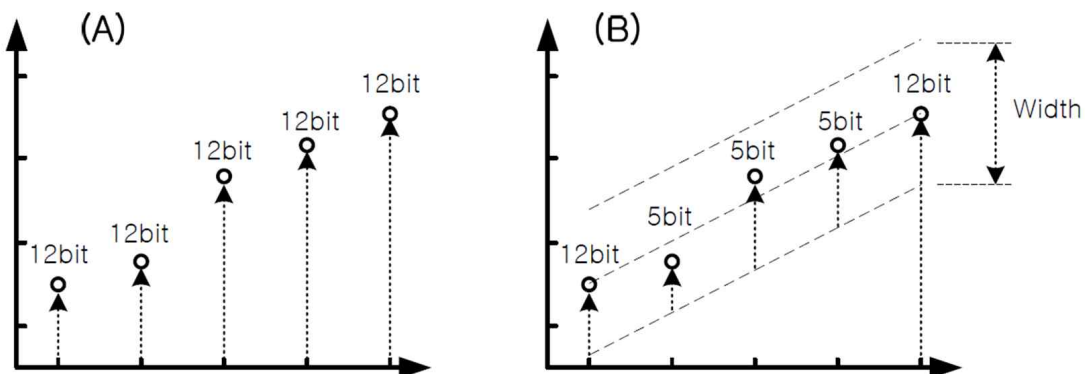


<그림 3-23> 압전소자 유사신호 연속 발생 프로그램(LabVIEW)

3. 압전신호 전송 방법 개발

- 본 연구에서는 궤도 하부노반의 이상 유무 상태 검증을 위해 철로의 침목에 데이터 획득용 압전소자활용 레일패드를 개발하였으며, 여기서 발생하는 고해상도 시계열을 보다 효율적으로 전송하기 위해 별도의 압전신호 전호방법을 제시하였음.
- 데이터 획득용 이동 수신기(열차)에 제한된 시간 내에 대량의 데이터를 외곽 없이 전송하기 위한 특성화된 새로운 압축 방법이 필요함.
- 데이터를 압축했다가 원래의 데이터와 완전히 동일하게 복원할 수 있는 압축 방법을 무손실 압축이라고 하고, 일반적으로 데이터를 무손실 압축하는 방법으로는 엔트로피 코딩(Entropy coding) 방법이 가장 널리 사용되고 있음.
- 엔트로피 코딩 방법은 출현 빈도가 높은 심볼에 짧은 코드를 배정하고 빈도가 낮은 심볼에 긴 코드를 배정하므로, 가변 길이 코딩(Variable-length coding)이라고도 하는데, 엔트로피 코딩에서는 심볼의 빈도만을 고려하는 허프만(Huffman) 코딩이 사용됨.
- 허프만 코딩의 경우, 엔트로피 코딩은 미리 각 심볼의 출현 빈도를 알아야 최적의 압축이 가능하며, 허프만 코딩에서는 각각의 심볼에 하나씩 코드워드를 배정하므로 정수 길이의 코드워드만 허용함.

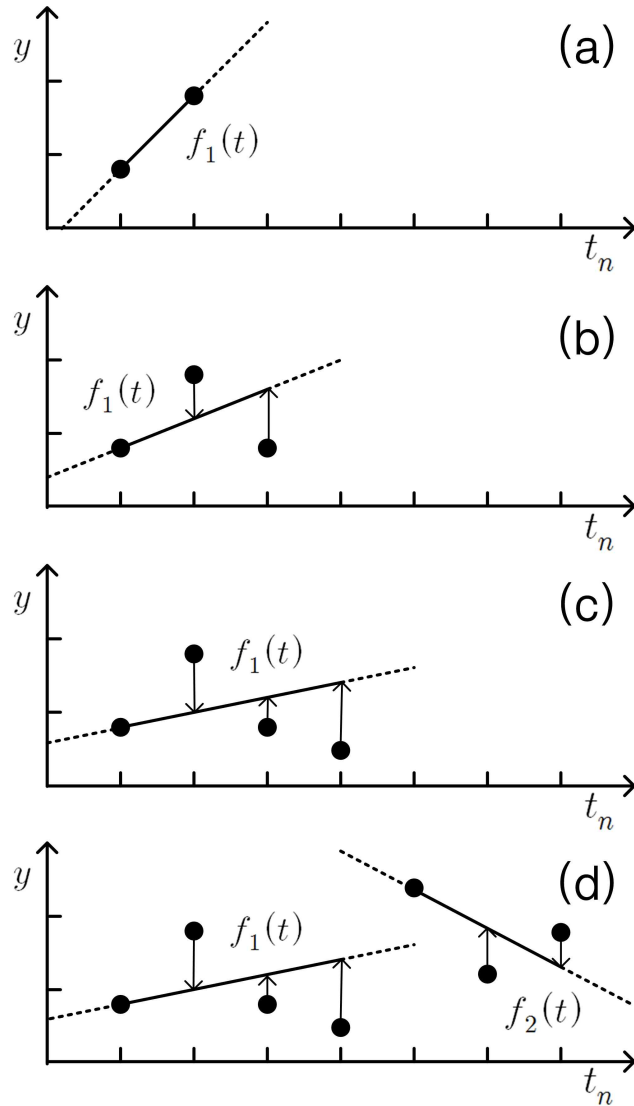
- 따라서, 엔트로피 코딩은 압축의 한계에 거의 근접했고, 비록 압축 효율을 더 높인다고 해도 무손실 압축의 한계인 엔트로피에 더 가까이 접근할 뿐 그 한계를 뛰어넘어 엔트로피 이하로 압축할 수 없는 문제점을 보유함.
- 이에, 고속으로 이동하는 열차에 의한 통신의 시간적 제약 문제가 대두되었고, 허프만 코딩을 이용한 압축만으로는 상기와 같은 통신의 시간적 제약 문제를 해결하기 어려울 것으로 판단됨.
- 따라서, 기존의 범용 데이터 압축방법인 호프만코딩(Huffman coding)방법은 알고리즘의 성능을 향상 시킨 접합함수(Fitting Function) 호프만 코딩 알고리즘을 설계함.
- 고속 전송을 위한 데이터 압축 방법은 데이터를 구간별로 나누어 접합함수(Fitting Function)를 계산하는 단계 및 접합함수를 기준으로 데이터에 대해 구간별로 오차 값을 산출하는 단계, 오차 값을 기초로 데이터를 제1압축하여 구간 압축 데이터 값을 생성하는 단계, 압축 알고리즘을 이용하여 구간 압축 데이터 값에 대한 제2 압축을 수행하는 단계로 구성됨.
- 데이터 압축 장치는 데이터를 구간별로 나누어 접합함수(Fitting Function)를 계산할 수 있으며, 데이터 압축 장치는 데이터에 대해 X축의 구간을 증가시키면서 각 구간별로 1차 다항식의 접합함수를 계산할 수 있음.
- 여기서, 데이터는 센서 소자에서 측정된 센서 데이터의 아날로그-디지털 변환 값을 가지며, 시간 영역의 값으로 표현되고 이에 따라 X축의 시간 구간을 나타냄.



<그림 3-24> 압전소자 발생신호 압축 전송방법

- 압축 방법은 압전소자에서 발생하는 신호를 임의의 변위 값을 넘지 않는 범위에서 접합함수를 계산하고 계산된 접합함수를 기준으로 변위를 다시 계산하여 그 값을 압축하는 방법임.

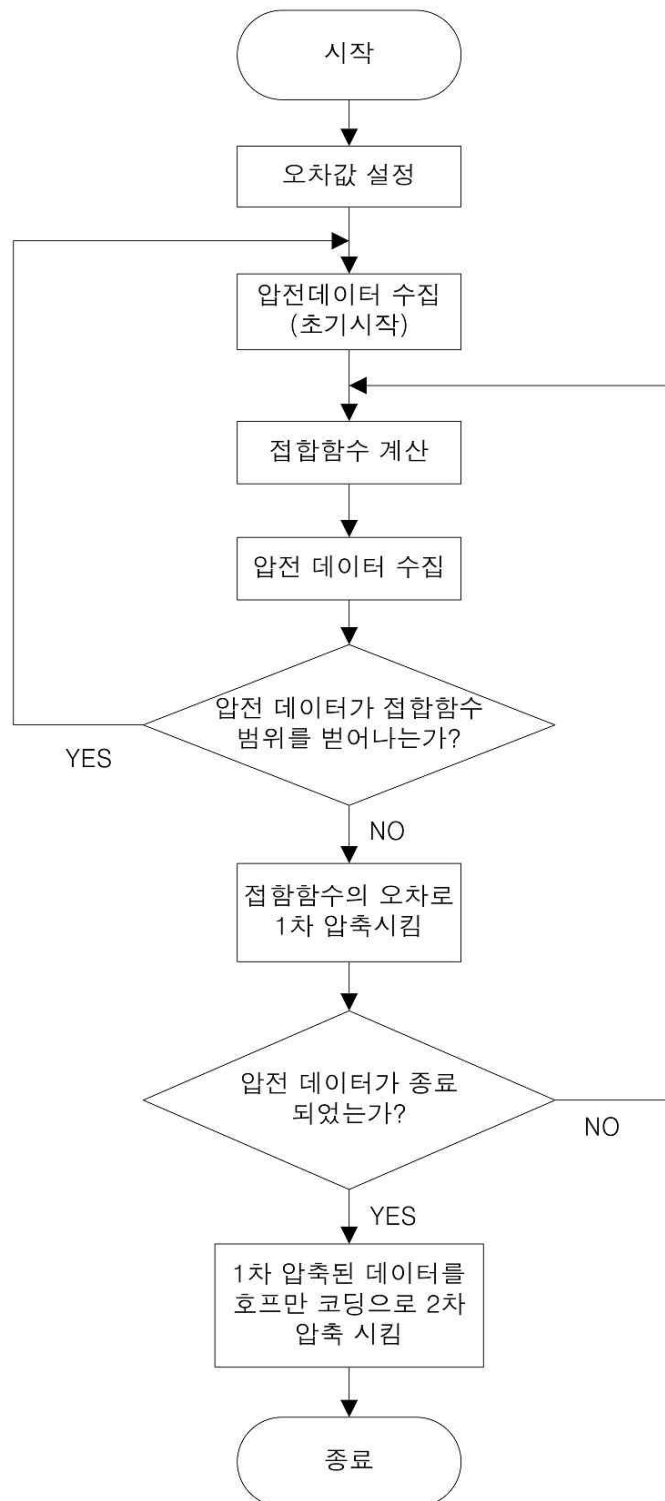
전송 방법에 대한 내용은 위에 보이고, 실행 과정과 순서도는 아래와 같음.



<그림 3-25> 압축 전송방법의 실행과정

- (a) 측정된 데이터 $\{y_0, y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 에서 인덱스 i 를 1부터 n 까지 증가 시키면서 1차 접합함수를 계산함.
- (b), (c) 계산된 접합함수 결과 값과 데이터 값의 오차가 설정된 비트 값(B)의 Width)보다 크면 구간을 종료하고, 그렇지 않으면 i 값을 계속 증가시키며 접합함수를 계산한다.
- (d) 구간이 종료되면 접합함수 $f(t) = at + b$ 에서 a, b 값과 오차 값 $\{\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_j\}$ 을 구간 압축 값으로 생성한다. 그림 2의 (d)

- 위의 내용을 반복하며 i 가 데이터의 총 개수 n 이 될 때 까지 반복하며 구간별 압축된 값을 생성함.



<그림 3-26> 압축 전송방법의 순서도

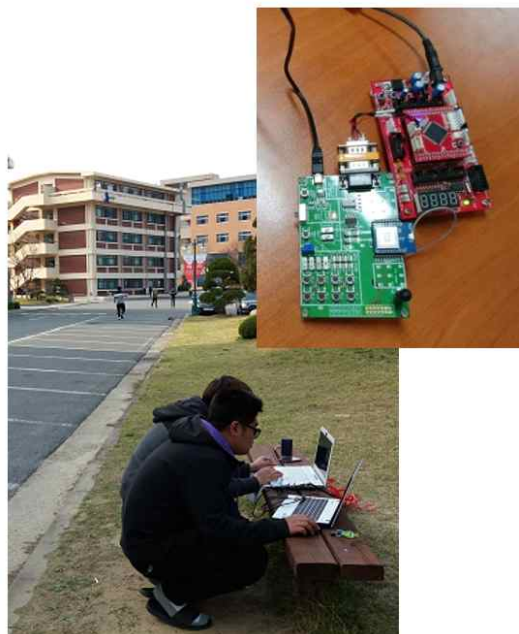
4. 압전소자 레일패드를 활용한 실시간 궤도 모니터링 시스템 개발을 위한 무선통신 모듈 개발

가. 무선통신 시스템 구성

- 압전소자 레일패드에서 발생하는 전류/전압값을 실시간으로 모니터링 시스템으로 전송할 수 있는 무선통신을 개발함.
- 진동신호를 ADC로 변환하여 서버 및 통합프로그램으로 전송하는 역할을 하고, 이를 위해 저전력 근거리 통신 프로토콜 (ZigBee, BT class1, BT class2, BLE)을 활용한 시스템을 구성함.
- 데이터 전송 및 동기화 방식 구현 방식은 C언어와 3 Way-Handshaking을 사용함.



<그림 3-27> 무선통신 모듈



<그림 3-28> 통신거리 측정실험(교내 야외)

나. 통신 거리/속도 시험 결과

- 각 통신모듈 구성별 거리와 속도 변화에 따른 수신 성공률을 아래 표와 같이 검토하였음.
- 그 결과 BT Class1과 Zigbee의 성능이 가장 적합한 결과를 보였음.

<표 3-23> 통신거리 측정결과(100byte 전송)

구분	0.1m (근접)	10m	50m	70m	100m
BLE	100%	0%	0%	0%	0%
BT Class1	100%	100%	100%	100%	100%
BT Class2	100%	0%	0%	0%	0%
ZigBee	100%	100%	100%	≒70%	0%

* ZigBee와 BT C1 동시 테스트 시 간섭으로 거리 단축됨.

<표 3-23> 통신속도 측정결과(50m, 100byte 전송)

구분	9600(BPS)	19200(BPS)	38400(BPS)	57600(BPS)
BT Class1	7.226(Sec)	6.521(Sec)	6.069(Sec)	5.524(Sec)
ZigBee	51.296(Sec)	8.244(Sec)	4.309(Sec)	6.721(Sec)

- 최종 무선통신방식 선정을 위해 아래 같은 사항을 검토함

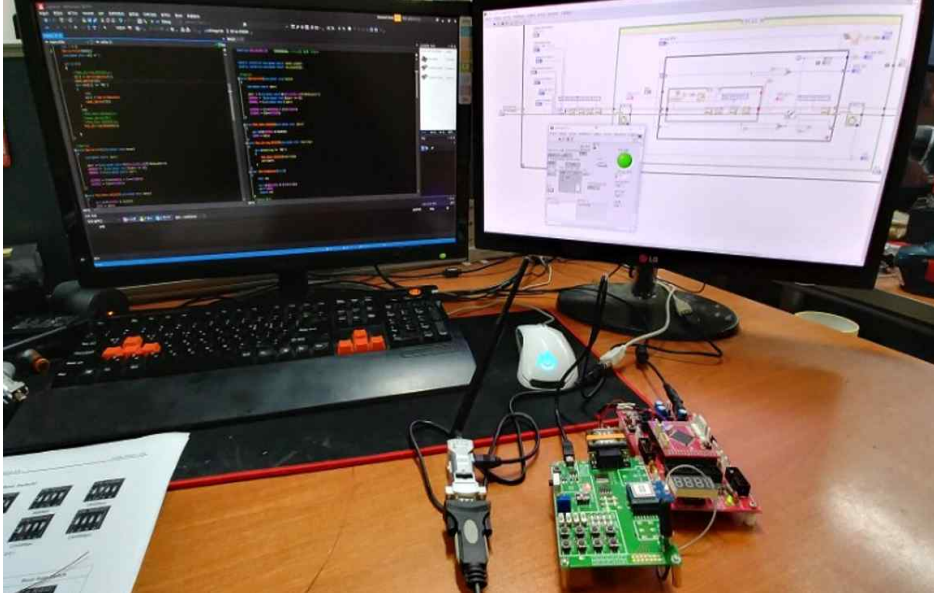
○ KTX 시속은 대략 300km/h 로 계산 시 $\approx 83\text{m/s}$.

1. 블루투스 통신거리는 200m, 통신지역 통과시간 2.4초
 $57600(\text{BPS}) \times 2.4(\text{Sec}) = 138,240(\text{BPS}) ; 17,280(\text{Byte/Sec})$
2. ZigBee 통신거리는 100m, 통신지역 통과시간 1.2초
 $38400(\text{BPS}) \times 1.2(\text{Sec}) = 46,080(\text{BPS}) ; 5,760(\text{Byte/Sec})$

- 검토결과 블루투스의 통신방식이 철도환경에 더 적절할 것으로 판단됨.

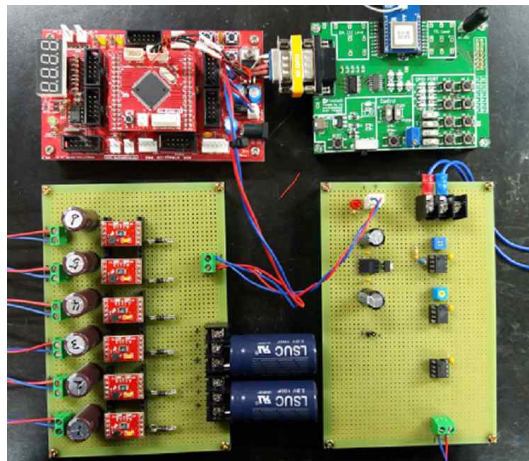
5. 압전소자 이용 자가발전 시스템 시제품 제시

- 개발된 시스템의 펌웨어 개발환경은 AVR Studio, C 언어를 활용하였으며, 모니터링 프로그램은 LabVIEW, HyperTerminal를 통해 개발함.



<그림 3-29> 펌웨어 개발 환경

- 전체 모듈을 병합하여 PCB 설계 (OrCAD PCB Designer 17.0)하고, 잡음 및 외부 환경에 대한 간섭 방지책을 제시함.

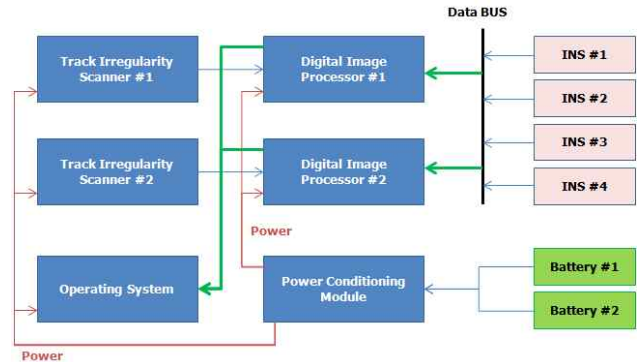


<그림 3-30> 압전소자 이용 자가발전 시스템 시제품

제 3 절 궤도 안전진단 모니터링 기술 개발 내용 및 성과

1. 궤도 안전진단 모니터링 시스템 개발 목표

- 트롤리 타입의 궤도검측 시스템의 구성은 아래 그림과 같으며 운반장치에 LFWD와 궤도 안전진단 검측 시스템을 장착하여 레일의 궤도틀림 검사와 지반에 대한 강성시험을 수행할 수 있도록 제작함.



<그림 3-31> 트롤리형 궤도 모니터링 시스템 구성(안)

- 즉, 시험구간에 대한 궤도틀림을 실시간으로 측정하여 측정된 틀림값(특히, 면틀림 및 트위스트)이 지정된 기준을 초과하는 경우, 레일과 레일의 하부구조물(체결구, 패드 등)에 이상이 없다고 판단될 때 노반이나 지반의 상태에 문제가 있을 가능성을 확인하기 위하여 LFWD를 이용하여 기준치를 초과한 궤도틀림이 발생한 지점에서의 지반 강성시험 추가 수행 할 수 있도록 제작.
- 이를 위하여 제작한 궤도틀림 검측을 위한 스캐닝 시스템 제작 시, 라인레이저와 카메라 및 인터페이스 장치를 포함하는 궤도틀림 검측모듈을 제작하였으며, 현장 운영이 가능하도록 운반체와 궤도틀림 검측모듈의 결합을 위한 Joint Zig를 제작하여 적용함.

<표 3-2> 궤도틀림 측정에 따른 목표 사항

구분	평가항목		단위	목표치
궤도틀림 검측시스템	측정 정밀도	고저	mm	±0.5
		방향	mm	±0.5
		궤간	mm	±0.5
		수평(캔트)	mm	±1.0
		뒤틀림(트위스트)	mm	±1.0
	재현성	고저	mm	±1.0
		방향	mm	±1.0
		궤간	mm	±1.0
		수평(캔트)	mm	±2.0
		뒤틀림(트위스트)	mm	±1.0

2. 궤도틀림 검측시스템 제작

가. 광학계 및 영상 시스템 최적화

- 궤도검측 시스템은 레일에 조사되는 라인레이저에 대한 영상을 획득하기 위한 광학계 및 영상시스템을 포함하고 있으며 획득한 영상으로부터 레일에 조사되는 라인레이저의 영역을 정확하게 획득하기 위하여 최적의 원시영상을 획득하는 매우 중요한 요소라고 할 수 있음.
- 이에 따라, 라인 레이저, 적외선 Band Pass Filter, 카메라 렌즈 및 카메라, 등 광학 장치의 개별적 성능을 최적화함으로써 요구 성능 사양을 만족하는 궤도 검측을 위한 영상 해상도를 확보할 수 있도록 광학계와 영상시스템을 구성하여야 함.
- 따라서 레일에 조사되는 라인레이저에 대한 영상을 획득하기 위한 최적의 영상 획득 조건을 확보하기 위한 광학계 및 영상시스템의 구성을 위하여 디지털 영상 시스템이 가지는 제한적 요소(유한 픽셀에 의한 공간 해상도 저하)와 광학적, 전기적 노이즈에 의한 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 MTF(Modulation Transfer Function) 및 NPS(Noise Power Spectrum), DQE(Detective Quantum Efficiency)의 평가 지표를 이용하여 원시영상의 정량적 분석함으로써 광학계 및 영상시스템의 최적화 작업을 수행함.

(1) MTF (Modulation Transfer Function)

(가) MTF의 개요

- MTF(Modulation Transfer Function : 변조전달함수)는 영상의 질을 결정하는 인자 중 하나인 Sharpness를 평가할 때 사용하는 지표로서 응답함수(Response Function)라고도 하며 시스템의 주파수 응답을 표시하고 주로 전기통신계에서 사용된 개념으로 광학계와 방사선계에도 도입되어 영상평가를 위한 정량적 지표로서 사용됨.
- MTF는 정현파형을 촬영해 출력정현파(영상)와의 진폭비를 구해 공간주파수에 대한 진폭을 작성함으로 표현되며 아래 표와 같은 특성을 가짐.

<표 3-3> MTF의 특성

구 분	내 용
정현파의 특성	- 시스템에서 여러 정현파를 입력해서 그 출력정현파의 진폭이 입력정현파의 진폭에 비해 어떻게 변화하는지를 입·출력정현파의 진폭비에 따라서 평가 - 출력이 입력과 같은 진폭 : 본래의 신호를 충실히 재현 - 출력의 진폭이 낮은 경우 : 감쇠되어 전달 - 어떤 임의의 파형이라도 정현파와 조합하여 표현 가능
임의의 입력파형 추정	- 정현파와 조합하여 그 출력파형을 추정 - 입력과 출력의 진폭비만으로 시스템의 해상특성을 표현가능

구 분	내 용
영상시스템에 관점에서의 MTF	- 입력 : 광원 강도가 정현파 패턴 - 공간주파수 : 정현파의 조밀성 표시하며 높을수록 농도반복시간이 좁음을 의미 즉, 주파수가 높을수록 짧은 주기의 파형을 가지며 작은 피사체에 해당
영상시스템에서의 MTF 역할	- 방사선 영상의 형성시 이용되는 시스템들의 해상특성이 MTF로 평가가능하며 최종영상의 해상도 특성 뿐만 아니라 촬영된 영상의 추측도 가능

(나) MTF의 측정 종류 및 특성

- MTF 측정 방법은 일반적으로 Chart method 및 Sit method, Edge method로 구분되며 본 용역에서는 Edge method를 이용하여 수행하였으며 각각 다음과 같은 특성을 가짐.

① Chart method

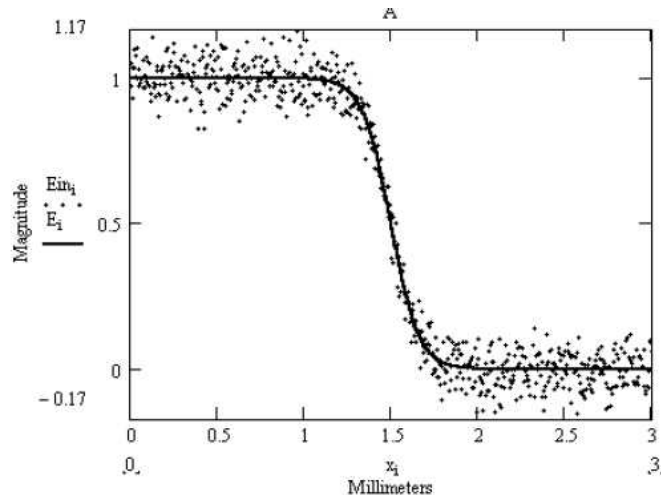
- $E_{\max}$: 임의의 정현파 주파수의 시험체를 통과한 광량의 최대치
 - $E_{\min}$: 임의의 정현파 주파수의 시험체를 통과한 광량의 최소치
 - 기대치 : $E_{\max}$ 및 $E_{\min}$ 에 대하여 기대되는 광원의 진폭으로 $D_{\max}-D_{\min}$ 로 구분
 - 실측치 : 기대치보다 일반적으로 작게 측정
 - 측정방법
 - 상기의 광량을 가진 광원을 S/F계에 조사하여 획득한 영상의 밝기를 측정하여 실측치 $D'_{\max}$, $D'_{\min}$ 에 대응하는 유효노광량에 대하여 $E'_{\max}$, $E'_{\min}$ 이면 $MTF = E'$ 로 표현.
 - 실제 측정시 Resolution Chart를 사용하고 구형파의 CTF(contrast transfer function) 측정하고 측정된 구형파의 CTF를 정현파의 MTF로 환산하여 계산
- $$R(\omega) = \pi/4\{R'(\omega) + 1/3R'(3\omega) - 1/5R'(5\omega) + 1/7R'(7\omega) - \dots\} - \text{S/F계의 MTF curve}$$
- 공간주파수의 낮은 영역에서의 우열비교 가능, 상의 선예도 추정 가능하며 $MTF(=1)$ 인 경우 상은 완전히 피사체를 재현함을 의미하며 상의 선예도는 100%를 의미하게 된다. 또한 $MTF(=0)$ 인 경우 상에 명암 구별이 전혀 없어 선예도는 0이 됨.

② Sit method

- S/F 시스템에서의 PSF(Point spread function)를 의미하며 선 식별력 (LSF, Line spread function)을 획득하여 S/F 시스템에서 빛의 확산으로 인한 불선명도를 표시하고 빛의 확산이 적은 경우 영상계면이 선명하며 선 예도도 향상을 의미함.
- 측정은 폭이 좁은 slit을 촬영하여 그 농도를 광량으로 변환한 상(LSF)을 Fourier 변환에 대한 응답함수로 표현하고 배수노광법이 주로 사용하고 유효노광량의 변환 시 slit 영상의 광량이 적을 경우 카메라의 검출능력 이하의 광량에서 검출 못해 생기는 오차(절단오차)를 방지하기 위해 기준 노광의 2배/4배/8배...와 같이 광량을 증가하여 slit을 촬영한다. 이때 각각 유효광량으로 변환한 후 광량의 배수를 보정하여 LSF를 연결하고 획득한 LSF Fourier변환 각각의 차를 공간주파수 0의 값에서 정규화 응답함수로 표현함으로서 획득함.

③ Edge method

- 절단된 면이 수직인 금속의 단면을 촬영하여 그 농도분포를 유효광량으로 변환하여 얻어진 edge분포(ESF)를 미분하여 LSF를 도출하고 획득한 LSF를 Fourier 변환하여 MTF에 대한 응답함수를 구할 수 있음.



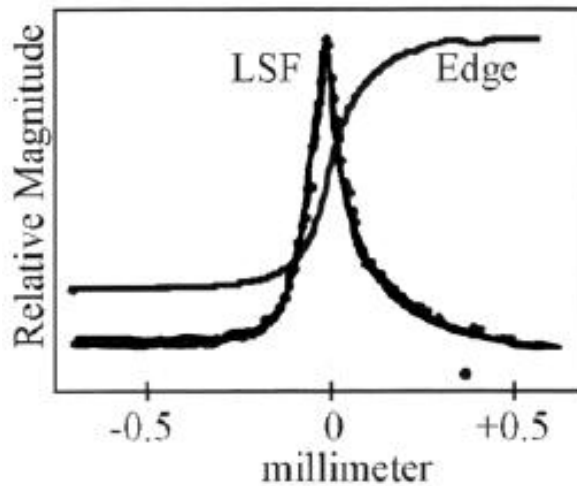
<그림 3-32> 잡음이 있는 Edge와 잡음이 없는 Edge에 대한 획득 예

(다) 광학계 및 영상시스템 최적화를 위한 MTF 측정

- 기술한 바와 같이 선형 시스템 이론의 중요한 부분인 MTF 분석은 영상분석에 있어서 중요하며 영상 전체에 대한 공간의 해상도를 평가하는 것을 평가하는 중요한 지표로서 활용됨.
- 따라서, MTF를 획득하기 위하여 대칭구조를 가지는 획득한 Edge 영상으로부터 백터적인 양을 가지는 데이터를 획득함으로써 ESF(Edge Spread Function), $ESF(x)$ 를 구할 수 있음.
- 또한, ESF를 이용하여 LSF(Line Spread Function), $LSF(x)$ 을 구할 수 있음.

$$LSF(x) = \frac{d}{dx}ESF(x)$$

- 획득한 영상으로부터 Edge에 대한 Point Spread Function, $PSF(x,y)$ 를 y축에 대하여 적분함으로써 아래 그림과 같이 잡음이 포함된 Edge에 대한 $LSF(x)$ 를 아래 그림과 같이 획득함.



<그림 3-33> ESF 및 LSF

- 이때 획득한 $LSF(x)$ 에 대하여 푸리에 변환을 수행하면 주파수 성분에 대한 복소함수를 획득하게 되고 획득한 복소함수에 대한 Magnitude가 MTF를 나타냄.

$$M(\omega) = Re(\omega) + i \cdot Im(\omega)$$

$$MTF(\omega) = \sqrt{(Real(\omega))^2 + (Im(\omega))^2}$$

(라) MTF 측정 최적화

- 정밀한 MTF를 측정하기 위해서는 Edge영상으로부터 획득한 MTF에 대한 정확한 커브 피팅을 수행하는 것이 매우 중요하며, 본 연구에서는 정확한 MTF의 정확한 커브 피팅을 위하여 유전자 알고리즘에 기초한 방식을 적용함.
- 유전자 알고리즘은 모의자연도태 및 유전학을 위해 설계된 탐색기법으로서 최적해법에 집중시키기 위해 모집단중 적자생존의 개념과 무작위 데이터를 결합하게 되며 모든 세대는 이전세대로 부터 최선의 모집단 일부로 부터 인위적 모집단의 새로운 모음을 만들어냄.
- 또한, 무작위 돌연변이는 무작위의 방법으로 유전적 순서의 부분들을 변질시키는 모의시험으로서 유전자 알고리즘은 다른 탐색 및 최적화 기법과는 다른데 그것은 하나의 해법이 아닌 해법의 모집단으로부터 탐색하고 해법들을 개선시키기 위한 객관적 정보의 결과들을 이용하게 됨.
- 유전자 알고리즘은 부모 데이터로부터 생성된 계놈을 획득하는 부분부터 시작되는데, 각 계놈은 n 차원의 벡터로 표현되는 측정 MTF로 하였고 계놈 내의 각각의 값들은 하나의 유전자로서 간주함.
- 또한, MTF^1 으로부터 MTF_m 까지 m개로 구성된 각각의 측정 MTF를 모집단으로 구성하였고 각 a_{ij} 는 공간주파수(spatial frequency), j에서의 각각의 i에 대한 유전자로서 간주함.

$$MTF_1(\xi) = [a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,3} \dots \dots a_{1,16}, a_{1,17}, a_{1,n}]$$

$$MTF_2(\xi) = [a_{2,1}, a_{2,2}, a_{2,3} \dots \dots a_{2,16}, a_{2,17}, a_{2,n}]$$

.....

$$MTF_m(\xi) = [a_{m,1}, a_{m,2}, a_{m,3} \dots \dots a_{m,16}, a_{m,17}, a_{m,n}]$$

- MTF에 대한 커브 피팅을 위한 알고리즘 개발을 수행하기 위하여 Matlab을 사용하였으며 획득한 영상에서 Edge에 대한 데이터를 획득하여 MTF를 유도해내는 과정을 수행함.
- MTF 유도를 위한 적절한 식을 찾기 위하여 다음의 식을 이용하여 프로그램 적으로 생성된 Edge 데이터를 이용하였으며 γ 는 3을 적용하였으며, 아래 식에 의하여 생성된 잡음 없는 Edge 데이터는 $0 \leq x_{i,j} \leq 1.5 \text{ mm}$ 의 구간에 대하여 640개의 데이터를 가지도록 구성함.

$$y(x) = \frac{1}{1 + \exp[-4\gamma(x - 1.5)]}$$

나. NPS(Noise Power Spectrum)

- NPS는 특정 Fluence와 Quality를 가진 균일한 광량으로부터 획득한 영상에서 관측된 진폭(Noise Amplitude)과 결(Texture)에 대하여 잘 묘사하고 있음.
- NPS는 Slit Aperture를 가진 스캐닝 Densitometer를 이용하여 획득한 스캐닝 영상으로부터 잡음의 진폭과 상관관계를 가지는 일차원 Power Spectrum으로 계산할 수 있으며 영상시스템으로부터 획득한 디지털 영상의 경우에는 모든 방위에서 Noise의 상관관계를 묘사한 이차원 NPS를 획득하기 위하여 푸리에 변환을 이용하여 NPS를 계산할 수 있음.
- 본 연구에서는 후자의 2차원 NPS 방법을 적용하였으며, 이차원 NPS는 디지털 영상 시스템의 노이즈 특성을 잘 표현하며 영상의 Artifact를 정의 하는데 사용됨.
- NPS는 다양한 주파수 성분으로 나누어진 영상 잡음에 대한 분산으로 생각할 수 있으며 주어진 공간주파수의 성분으로 표현될 수도 있으며, 연속적인 변수의 경우에 다음의 식과 같이 표현되며 여기서 I 는 Image Intensity가 되고 $\bar{I}$ 는 평균 Background Intensity이며 $\langle \rangle$ 는 전체적인 평균(Ensemble Average)를 의미함.

$$NPS(u,v) = \lim_{X,Y \rightarrow \infty} \frac{1}{2X \cdot 2Y} \left\langle \left| \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y [I(x,y) - \bar{I}] e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \right|^2 \right\rangle$$

- 특히 디지털 영상시스템의 경우 NPS의 유도는 표본 영상의 이산적인 주파수 요소에 대한 고려가 필요하기 때문에 다음과 같은 이차원적으로 표현되며 I 는 Image Intensity가 되고 S 는 평균 Background Intensity이며 N_x , N_y 는 x와 y축의 픽셀 수이고 Δx 와 Δy 는 x와 y축에서의 픽셀 크기를 나타냄.

$$\begin{aligned} NPS(u_n, v_k) &= \lim_{N_x, N_y \rightarrow \infty} (N_x N_y \Delta x \Delta y) \langle |FT_{nk} I(x,y) - S(x,y)|^2 \rangle \\ &= \lim_{N_x, N_y \rightarrow \infty} \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{(N_x N_y \Delta x \Delta y)}{M} \sum_{m=1}^M |FT_{nk} I(x,y) - S(x,y)|^2 \\ &= \lim_{N_x, N_y, M \rightarrow \infty} \frac{\Delta x \Delta y}{M \cdot N_x N_y} \sum_{m=1}^M \left\langle \left| \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (I(x_i, y_j) - S(x_i, y_j)) \exp(-2\pi i(u_n x_i + v_k y_j)) \right|^2 \right\rangle \end{aligned}$$

다. DQE(Detective Quantum Efficiency)

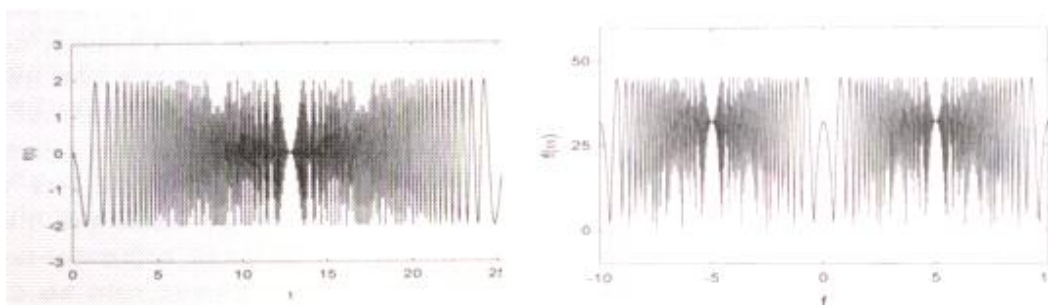
- DQE는 영상시스템에 대한 물리적 성능 평가를 위한 가장 적합한 평가지표로 사용되며, DQE는 영상시스템이 어떻게 처리하고 입사된 광원에 대한 contrast, noise, resolution으로 나타내느냐를 의미함.
- 따라서, DQE는 다음의 식과 같이 광원으로부터의 조사량(D)와 주파수(f)의 상관관계로 나타낼 수 있음.

$$DQE(D,f) = \frac{(largeareasignal)^2 MTF(f)^2}{NPS(D,f) SNR_{\infty}^2}$$

2. 웨이브렛 기반의 영상처리 알고리즘

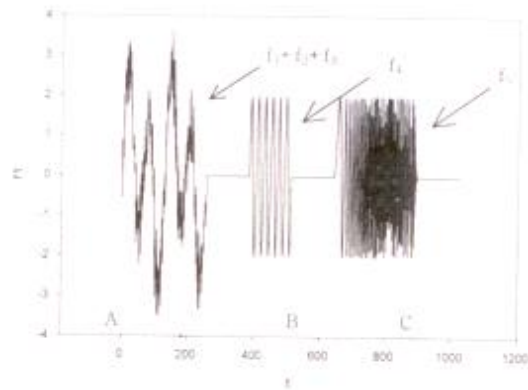
가. 개요

- 이산 웨이브렛 변환의 한 형태로서의 다해상도 분석방법(Multi-resolution Analysis)은 이미지 또는 신호에 대한 직교기저를 형성하는 스케일 함수 및 웨이브렛을 이용하여 이분주파수구간(Dyadic Frequency Band)으로 순차적으로 사영(Projection) 하는 것을 말함.
- 또한, 이 방법은 이산 웨이브렛 변환과 기존의 전자통신 분야에서 사용되던 QMF (Quadrature Mirror Filter) 이론 및 부제역 필터링(Subband Filtering)과 동일한 연산체제를 형성하는 것을 특징으로 하며, 웨이브렛 변환은 푸리에 변환 및 창 함수를 이용한 푸리에 변환 같은 “시간-주파수” 변환과 달리 신호에 포함되어 있는 스케일에 대한 뛰어난 분해능을 지니고 있어 이에 따른 “시간-스케일” 변환이라고도 함.

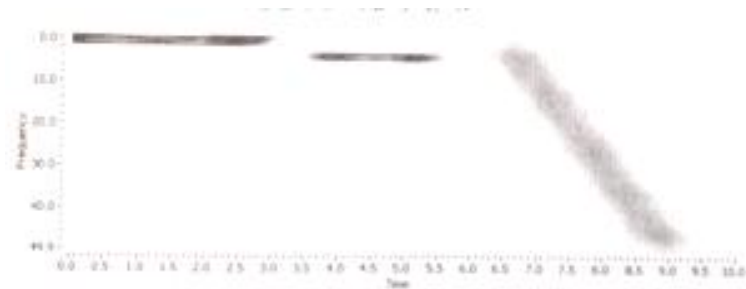


<그림 3-34> 주파수 변조 신호와 푸리에 변환의 결과

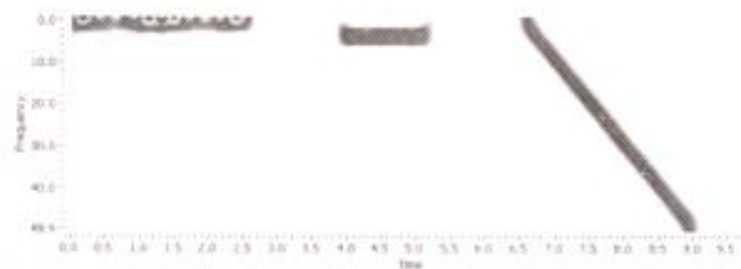
- 그러나, 푸리에 변환은 위 그림과 같이 주파수 즉, 스케일이 변화되는 경우에 시간상 서로 인접한 주파수 성분으로 구성되어 있기 때문에 스펙트럼 중첩이 발생하여 신호가 지니고 있는 주파수 변환 특성을 정확하게 분리해내지 못하는 단점을 가지고 있음.
- 이러한 단점을 보완하기 위한 창함수를 이용한 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform)의 경우에도 변환의 해상도 즉, 주파수 분해능은 전적으로 선택되는 창함수의 크기에 의존하기 때문에 아래 그림과 같이 멀티스케일의 특성을 지닌 신호에 대해서는 크기가 다른 여러 개의 창함수를 사용하여야하는 단점을 가짐.



<그림 3-35> 멀티스케일의 특성을 지닌 신호>



<그림 3-36> 창함수를 이용한 푸리에 변환 (가우스 창함수 : 창함수 길이=1)>



<그림 3-37> 창함수를 이용한 푸리에 변환 (가우스 창함수 : 창함수 길이=0.5)>

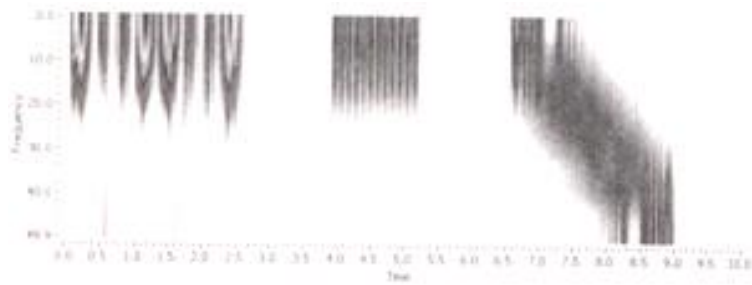


그림 <3-38> 창함수를 이용한 푸리에 변환(가우스 창함수 : 창함수 길이=0.05)

- 멀티스케일의 특성을 지닌 신호에 대하여 각각 창 함수의 길이가 다른 창함수를 이용한 푸리에 변환을 적용한 위 그림 결과를 보면 창함수의 길이가 작아짐에 따라 고주파 성분의 주파수 특성이 잘 표현되는 반면 저주파 성분에 대한 정보는 정확하게 나타나지 않음을 볼 수 있음.
- 그러나 아래 그림과 같이 웨이브렛 변환은 한번의 연산으로 신호가 지닌 모든 스케일 성분을 하나의 공간에 표현하는 장점을 가짐.

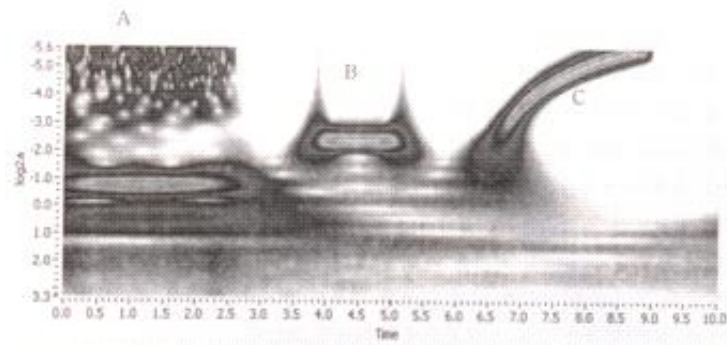


그림 <3-39> 주파수 변조에 대한 연속 웨이브렛 변환 결과

- 따라서, 본 연구에서는 라인 레이저가 조사된 레일을 카메라로 촬영하고 획득한 영상으로부터 레이저의 외곽선을 정밀하게 추출하고, 이에 대한 2차원 좌표데이터를 획득하기 위하여 모든 스케일에 대한 성분 분석이 가능한 웨이브렛 방식을 적용함.

나. 외곽선에 대한 웨이브렛 변환

- 물체의 외곽선은 매개변수의 표기방법을 사용하여 물체의 2차원적 표현을 1차원적 표현으로 변환할 수 있기 때문에 외곽선은 매개변수 t 의 함수로 표현되고, 그것은 두 개의 함수 $\{X(t), Y(t)\}$ 의 쌍으로 연속함수로 표현할 수 있음.

- 따라서, 외곽선은 1차원 웨이브렛 변환에 의해 분할(decompose)될 수 있고, 모든 스케일(scale)의 외곽선 정보를 얻을 수 있으며 본 연구에서는 웨이브렛 변환을 이용하여 모든 스케일에 대한 외곽선을 표기하여 물체의 특성을 추출함.
- 스케일함수로는 3차(cubic) B-spline 함수의 이원적 형태(dual form)를 사용하고, B-spline 함수는 bi-orthonormal의 기초함수(basis)가 되며 orthonormal 웨이브렛 보다 bi-orthonormal 웨이브렛은 많은 이점을 갖고 있음.
- 이에 따라 스케일함수로 dual B-spline 함수를 선택하여 신호를 dilated B-spline 함수로 필터링(filtering)할 수 있게 되고 B-spline 함수는 하드웨어와 소프트웨어 실현이 쉽고 해석하기가 쉬우므로 smoothing 함수로 적절하게 사용할 수 있음.
- 이때 스케일함수와 웨이브렛 사이의 두 스케일에 대한 관계식은 다음과 같음.

$$\Psi\left(\frac{x}{2}\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d(k) \hat{\beta}^3(x-k)$$

$$\Psi\left(\frac{x}{2}\right) = \hat{\beta}^3\left(\frac{x}{2}\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b(k) \hat{\beta}^3(x-k)$$

- 위의 식에서 b(R)와 d(R)는 스케일에 대한 관계를 설명하는 유한계수들이며 분해된 두 개의 신호는 근사화(approximated)된 신호와 웨이브렛에 관계된 신호로서 이들 두 신호에 의하여 웨이브렛 변환을 구성함.
- 스케일 표현을 위해서 근사화된 신호가 사용되고 원래의 신호로 복원하기 위해서는 웨이브렛 변환을 사용함.
- B-spline 함수를 사용하는 것의 한가지 중요한 이점은 B-spline 함수와 그것의 도함수(미분함수)가 아주 잘 해석되고 단순한 연산만 필요로 한다는 점이며, B-spline 함수는 적절한 근사화된 신호를 제공한다. 그것이 의미하는 바는 근사화된 신호는 원래의 신호와 비슷한 모양을 갖는다는 것임.
- 근사화된 신호는 수학적으로 다음과 같이 묘사되며, 우선 $LX_s(t)$ 를 스케일 s에서 근사화된 신호라고 가정함.

$$LX_2(t) = X(t) \cdot \beta^3_s(t)$$

- 근사화된 신호는 원래 신호의 B-spline 함수로 interpolation된 것으로 간주할 수 있으며, 결과적으로 원래의 물체 외곽선 표기 $\{X(t), Y(t)\}$ 로부터 각 스케일마다 한 쌍의 웨이브렛 변환 $\{LX_s(t), LY_s(t)\}$ 이 얻어질 수 있음.

다. 곡률함수와 웨이브렛 변환과의 관계

- 외곽선에 대한 곡률은 일반적으로 곡선에 대한 tangent 각의 미분으로 표현되며, 곡선에 대한 매개변수 표현을 사용해서 곡률함수를 계산하는 공식은 다음과 같이 구함.

$$k(t) = \frac{d\theta}{ds} = \frac{\dot{X}(t)\ddot{Y}(t) - \ddot{X}(t)\dot{Y}(t)}{(X^2(t) + Y^2(t))^{3/2}}$$

- 위의 식은 원래의 외곽선에 대한 곡률함수를 나타내는 것으로, 낮은 해상도로 외곽선을 획득한 후, 다음과 같이 웨이브렛 변환 계수에 의하여 곡률함수를 나타낼 수 있으며 이에 따라, 모든 스케일에 걸쳐 곡률함수의 zero-crossing 점들을 다음에서 찾을 수 있음.

$$\frac{W^1 X_5(t) W^2 Y_5(t) - W^2 X_5(t) W^1 Y_5(t)}{([W^1\{X_5(t)\}]^2 + [W^1\{Y_5(t)\}]^2)^{3/2}}$$

$$k_5(t) = O \text{ all over scales}$$

- 곡률함수의 zero-crossing들은 모양해석(shape analysis)에서 중요한 특징이 있으며, 이 곡률함수의 zero-crossing 점들은 제안된 스케일 무관한 표기 기법에 사용됨.

라. 웨이브렛 변환 알고리즘 분석

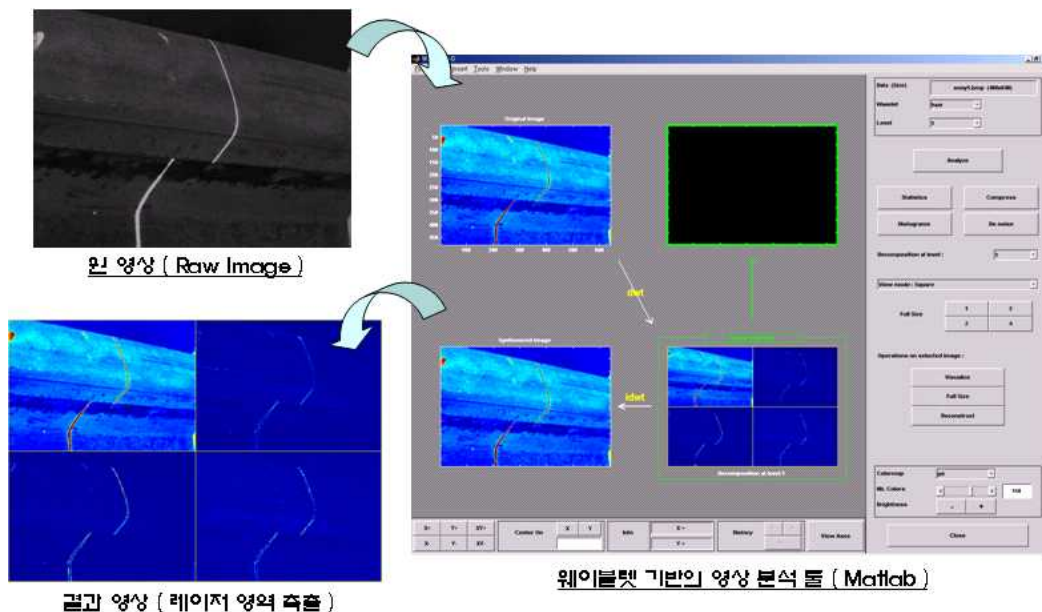
- Mallet의 2차원 웨이브렛 변환은 행방향으로서의 1차원 웨이브렛 변환과 열방향으로서의 1차원 웨이브렛 변환으로 생각할 수 있으며, 2차원 웨이브렛 변환은 영상의 행과 열을 1차원 필터들로 순차적으로 연이어 필터링함으로써 계산할 수 있음.
- 즉, 원래신호 $LX_0(n_1, n_2)$ 는 저역통과필터와 고역통과필터의 조합에 의해서 4개의 밴드로 분리할 수 있으며 다시 $LX_1(n_1, n_2)$ 는 같은 필터링 과정에 의해서 더 많은 밴드로 분할이 됨.
- 실제로 이 알고리즘은 2차원 product separable 필터 뱅크의 피라미드 구조로 볼 수 있으며, 2차원 product separable 필터 구현은 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$\begin{aligned} y(n_1, n_2) &= \sum_{t=0}^{N_1} \sum_{t=0}^{N_2} k(i, j) x(n_1 - i, n_2 - j) \\ &= \sum_{t=0}^{N_1} k(i) \sum_{t=0}^{N_1} k(j) x(n_1 - i, n_2 - j) \end{aligned}$$

- 여기서 $h(ij)$ 는 필터의 임펄스 응답을 나타내고, N_1 N_2 는 수평 수직 방향의 필터의 차수를 나타내며, 위의 식에서 두 번째 식은 product separable 2차원 필터의 임펄스 응답인 $h(ij)$ 가 1차원 필터의 임펄스 응답인 $h(i)$ 와 $h(j)$ 의 곱으로 분리되는 것을 보여준다.
- 또한 2차원 필터링 알고리즘의 행-열 분할(row-column decomposition)을 보여주고 있다. 이와 같이 분할된 알고리즘은 상태 변수 표현(state space representation) 방법을 사용하여 효율적으로 구현할 수 있는데, 열방향의 수직 상태 변수와 행방향의 수평 상태 변수를 사용하여 출력 신호와 상태 변수를 독립적인 식으로 표현해보면 파이프라인에 적합한 병렬처리 연산구조를 찾아낼 수 있음.

마. 영상처리 알고리즘 구현

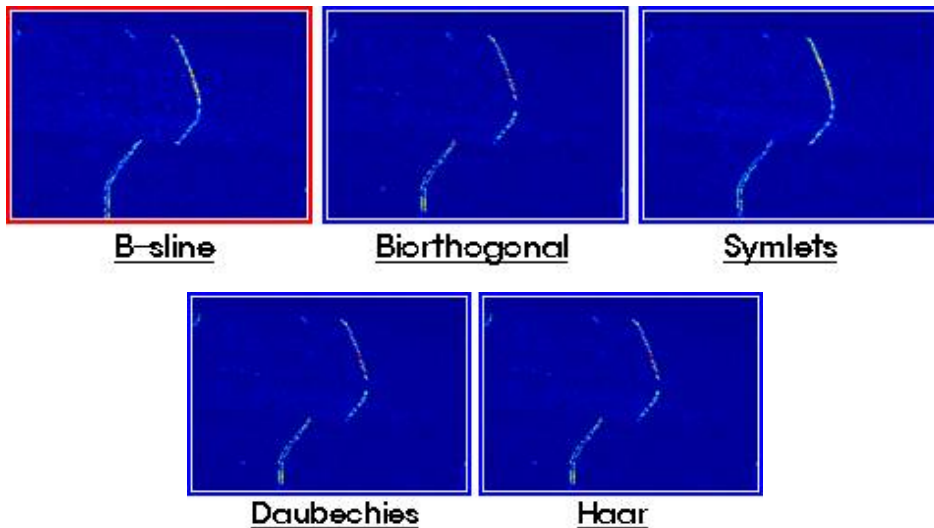
- 웨이블릿 기반의 영상처리 알고리즘을 개발하기 위하여 아래 그림과 같이 Matlab에서 제공하는 웨이블릿 분석 툴을 이용하여 영상분석 테스트를 진행하였으며, 레일에 조사된 라인 레이저의 정확한 윤곽선 추출을 위하여 웨이블릿 베이스와 적용될 차수에 대한 기본적인 테스트를 진행함.



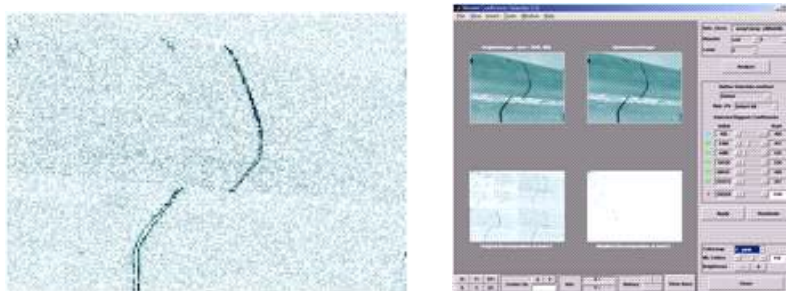
<그림 3-40> 영상처리 알고리즘 구현을 위한 영상 분석

- 또한, B-spline함수를 사용할 경우 B-spline함수와 그것의 도함수(미분함수)가 아주 잘 해석되고 단순한 연산만 필요로 한다는 점을 감안할 때 하드웨어와 소프트웨어 실현이 쉽고 해석하기가 쉬워 적절한 smoothing 함수로 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 베이스 적용에 따른 윤곽선 추출의 정량적 평가를 위하여 웨이블릿 분석 툴에 의한 영상 분석을 진행함.

- 아래 그림에서 보는 바와 같이 B-spline함수를 포함하여 Biorthogonal, Symlets, Daubechies, Haar, 등 대표적인 웨이블릿 베이스스를 적용한 결과 B-spline함수에 의한 윤곽선 추출 결과가 가장 우수한 것으로 나타났으며, 윤곽선의 끊어짐이 가장 적어 최적화된 레이저 조사 영역을 추출해낼 수 있음을 확인함.
- 특히, 영상분석과정에서 샘플로 사용된 레일에 대하여 100 포인트에 해당하는 지점으로부터 획득한 영상을 분석한 결과 획득한 레이저 영역 추출의 결과가 레일의 상태를 정확하게 표현할 수 있는 정확성을 가지는 것을 알 수 있었음.
- 이와 같은 영상 분석 결과를 이용하여 B-spline 함수 사용을 위한 웨이블릿 계수를 획득하기 위하여 Matlab에서 제공하는 Selection 프로그램을 이용하였고 이를 기반으로 구현된 웨이블릿 기반의 영상처리 알고리즘을 수행능력과 카메라로부터 입력되는 1.3M 급 영상에 대한 처리능력을 검증하기 위하여 Matlab의 Simulink에서 제공하는 TI사의 C6000 DSP Core 및 C6000 Target Preference를 이용함.



<그림 3-41> 영상처리 알고리즘 구현을 위한 웨이블릿 패밀리 적용 시험

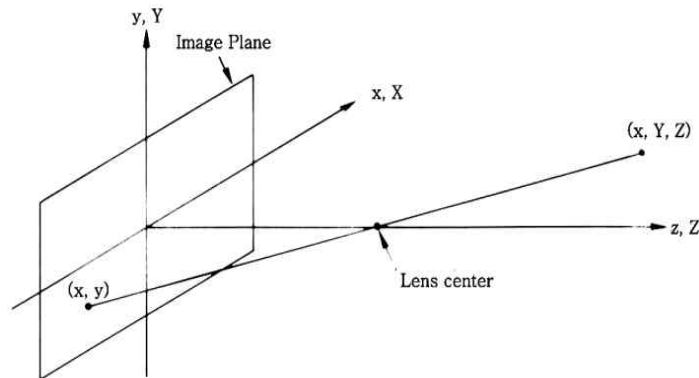


<그림 3-42> 획득한 웨이블릿 베이스스에 대한 차수와 계수 적용 시험

3. 레일 프로파일 데이터 매핑

가. 투시변환 (Perspective Transform)

- 원근변환은 3차원 상의 한 점을 평면에 투사하고, 원근 변환은 인간이 3차원 세계를 직접 눈으로 봄으로써 한 영상을 구성하는 방법과 매우 근사한 방식이기 때문에 영상처리에서 중심적인 역할을 함.
- 이 변환은 좌표값에 의해 나뉘지는 비선형성을 포함하는 다른 변환들과는 기본적으로 차별되는 역할을 제공하며, 아래 그림에서 보는 바와 같이 카메라 좌표계 (x,y,z) 에는 xy 평면과 일치하는 영상 평면이 있고 Z 축을 따라서 광축 (렌즈의 중심에 의해 결정됨)이 있음.
- 따라서, 영상 평면의 중심은 원점이고, 렌즈 중심은 좌표 $(0,0,\lambda)$ 이며, 만일 카메라가 멀리 떨어진 물체와 초점이 맞는 거리에 있다면 λ 를 렌즈의 초점거리라고 함.
- 여기에서의 가정은 카메라 좌표계가 실좌표계 (x,y,z) 와 일직선상에 맞춰져 있다는 것임.



〈그림 3-43〉 영상 형성 과정의 기본 모델

- 따라서, 다음의 식을 통해 투사된 3차원 점의 영상 평면 좌표를 다음과 같이 직접 구할 수 있음.

$$\chi = \frac{\lambda X}{\lambda - Z} \quad , \quad y = \frac{\lambda X}{\lambda - Z}$$

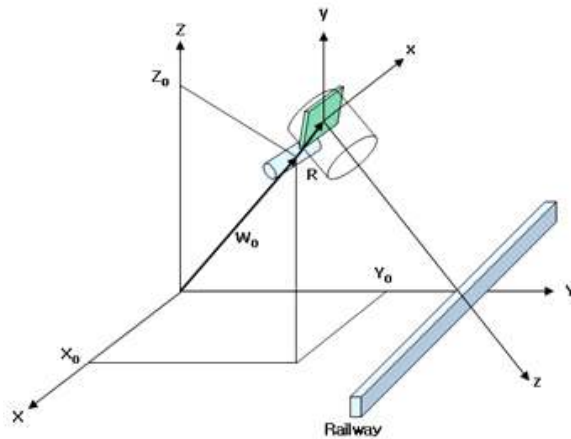
- 위의 식에서 변수 Z 에 의해 나뉘지는 비선형 구조를 가지며 회전, 이동, 배율조정처럼 선형 행렬의 형태로 표현되는 동차 좌표(homogeneous coordinates)를 이용하는 것이 바람직하며 이에 따라 직교 좌표 (x, y, z) 를 갖는 한 점의 동차 좌표가 (kX, kY, kZ, k) 일 때 다음과 같이 벡터적인 표현이 가능해짐.

$$C_h = PW_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa X \\ \kappa Y \\ \kappa Z \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa X \\ \kappa Y \\ \kappa Z \\ -\frac{\kappa Z}{\lambda} + \kappa \end{bmatrix}$$

- 여기에서 C_h 의 원소들은 동차 형태의 카메라 좌표이며 앞에서 언급했듯이 이 좌표는 네 번째 원소로 C_h 의 앞의 세 원소를 나누면 직교 형태로 바꿀 수 있음. 따라서 카메라 좌표계의 어떤 직교 좌표도 다음 벡터의 형태가 될 수 있음.

나. 카메라 모델 (Camera Model)

- 카메라 모델은 카메라의 기본적인 수학적 모델을 구성하며 카메라와 실좌표계가 일직선상에 있다는 가정 하에 이루어지며, 아래 그림은 카메라와 3차원 점들 (W로 표기)을 찾아내는데 이용되는 실좌표계 (X,Y,Z)를 보이고 있음.
- 이때 카메라는 각 Θ 만큼 좌우로, 각 α 만큼 기울어져 레일을 비스듬한 각도에서 바라보고 있으며, Pan은 x와 X축 사이의 각이고, Tilt는 z와 Z축 사이의 각임.
- 실좌표계의 원점에서 카메라 축의 중심까지 오프셋을 W_0 로 표기하고, 카메라 축의 중심에서 영상 평면 중심까지의 오프셋은 구성요소 (r_1, r_2, r_3) 인 벡터 r 이고, 이후 실제 점에 대해 영상 평면 좌표를 얻기 위해서는 단지 원근 변환을 적용하면 됨.



<그림 3-44> 카메라 모델

- 카메라 축의 중심과 영상 평면의 원점이 실좌표계의 원점에 있고 모든 좌표 축들이 일치한다는 점에서 카메라가 정규 위치에 있다고 할 때 (1) 원점에서 짐벌 중심의 변위 (2) x축의 팬 (3) z축의 경사 (4) 짐벌 중심에 대한 영상 평면의 변위의 순서로 조정되었다고 보면 이러한 순서들은 실제 지점에는 영향을 미치지 못함.
- 이는 정규 위치로부터 옮겨진 후에 카메라를 통해 보는 이 일련의 점들은 매우 다르기 때문이며 실질적으로 모든 실제 점에 같은 순서의 단계로 정확하게 적용하면 정규위치로 다시 옮길 수 있게 되어 정규위치에 있는 카메라는 원근변환의 적용을 위한 조건을 만족하게 됨.
- 이에 따라, 벡터 r 에 의한 영상 평면의 원점 변위에 대한 변환 행렬(C)과 Pan Angle($\ominus$) 및 Tilt Angle(α)에 대한 변환 행렬(R)은 다음의 식에 의하여 표현됨.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r_1 \\ 0 & 1 & 0 & -r_2 \\ 0 & 0 & 1 & -r_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta \cos \alpha & \cos \theta \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \theta \sin \alpha & -\cos \theta \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- 이때 기하학적 배열을 만족하는 카메라에 의한 동차 실점은 카메라 좌표계에서 다음의 식과 같은 동차 표현을 가짐.

$$c_h = PCRGw_h$$

- 따라서, c_h 의 네 번째 요소로 첫 번째와 두 번째 요소를 나누어서 영상점의 직교 좌표 (x,y)를 얻음으로서 각 점에 대한 좌표는 다음의 식에 의하여 획득됨.

$$x = \lambda \frac{(X - X_0) \cos \theta + (Y - Y_0) \sin \theta - r_1}{-(X - X_0) \sin \theta \sin \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \sin \alpha - (Z - Z_0) \cos \alpha + r_3 + \lambda}$$

$$y = \lambda \frac{-(X - X_0) \sin \theta \cos \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \cos \alpha - (Z - Z_0) \sin \alpha - r_2}{-(X - X_0) \sin \theta \sin \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \sin \alpha - (Z - Z_0) \cos \alpha + r_3 + \lambda}$$

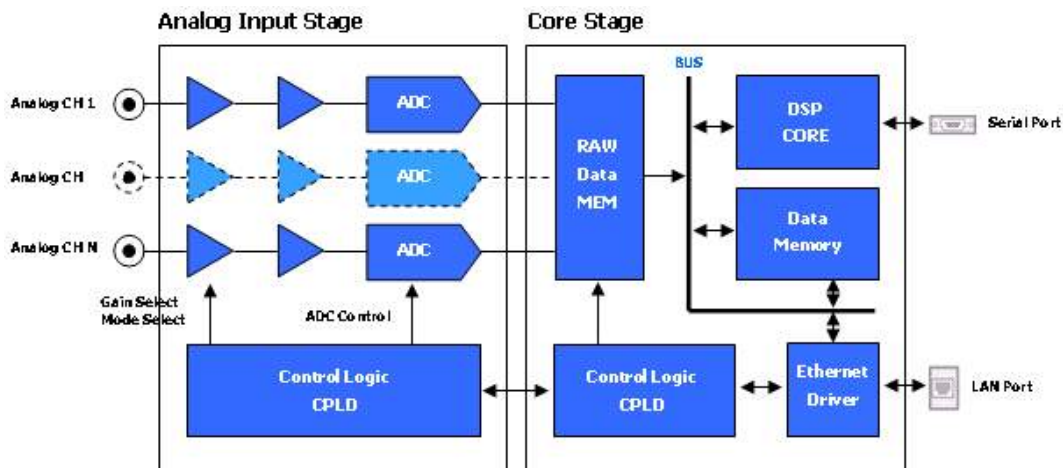
4. 웨도틀림 데이터 획득

가. DSP 기반의 관성센서(INS) 데이터 신호처리

- 3개의 가속도 센서와 3개의 자이로 센서로 구성된 INS 센서로부터 데이터를 획득하고 검측 데이터에 대한 실시간 처리를 위하여 DSP 기반의 보드를 제작하였으며 이중의 INS와의 연결 및 호환이 가능하도록 INS 인터페이스를 위한 센서 인터페이스 보드와 INS로부터 입력된 검측 데이터를 처리하기 위한 DSP 보드로 구분하여 구성함.

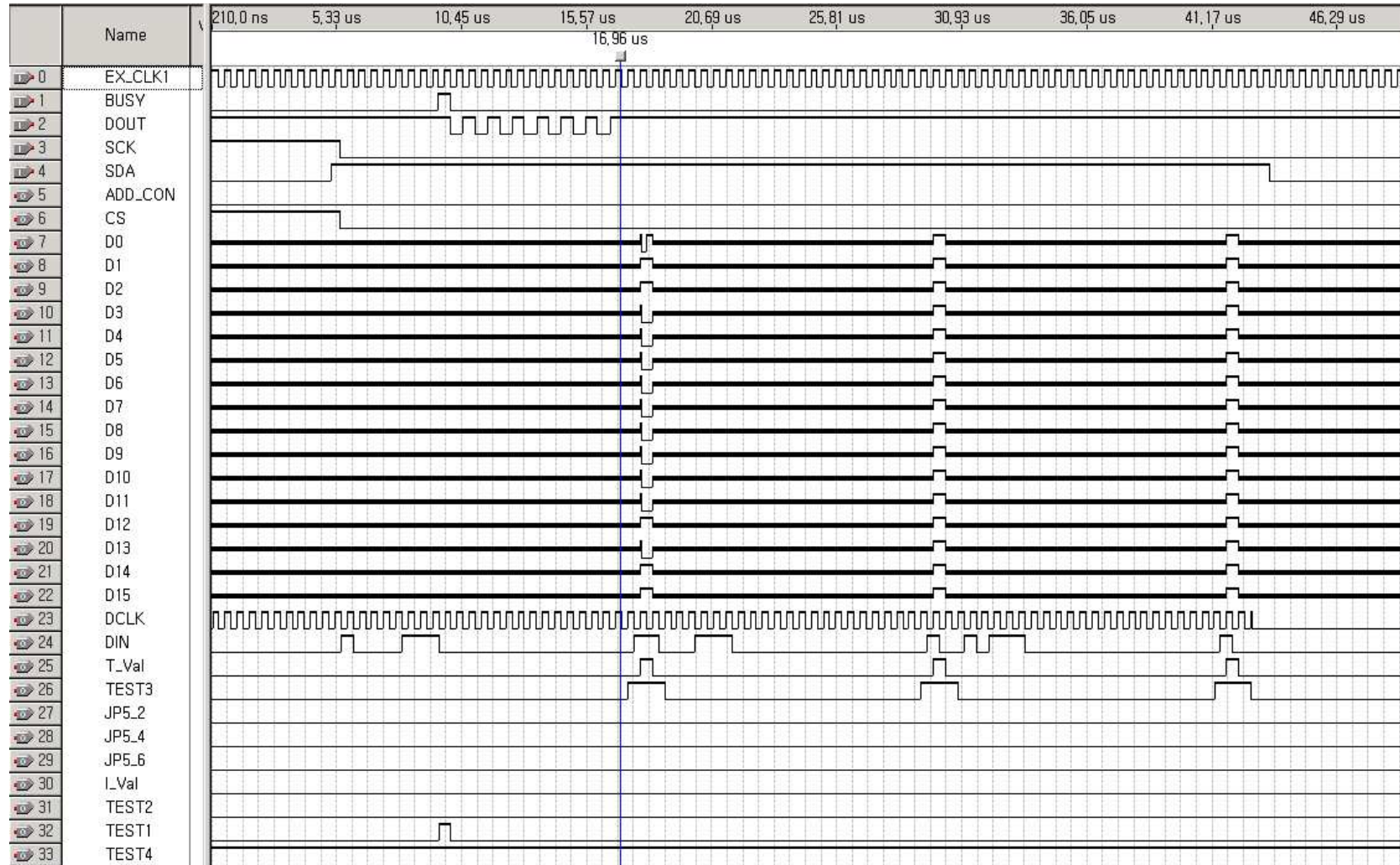
(1) 센서 인터페이스 보드

- 본 연구에 사용된 INS는 3개의 가속도 센서와 3개의 자이로 센서로 구성되어 있으며, 가속도 센서는 검측 결과가 연속된 아날로그 신호로 출력되며 자이로 센서는 1kSPS의 전송속도를 가지며 기준 클럭에 동기화되어 일정한 주기의 디지털 데이터를 검측데이터로 출력함.



<그림 3-45> 센서 인터페이스 보드 구성도

- 이에 따라 가속도 센서로부터 출력되는 아날로그 신호를 디지털 데이터로 변환하기 위한 아래 그림과 같이 아날로그 신호처리를 위한 회로를 구성하였으며 1.2MSPS의 샘플링 스피드와 멀티 입력 채널을 가지는 ADC를 이용하여 구현함.

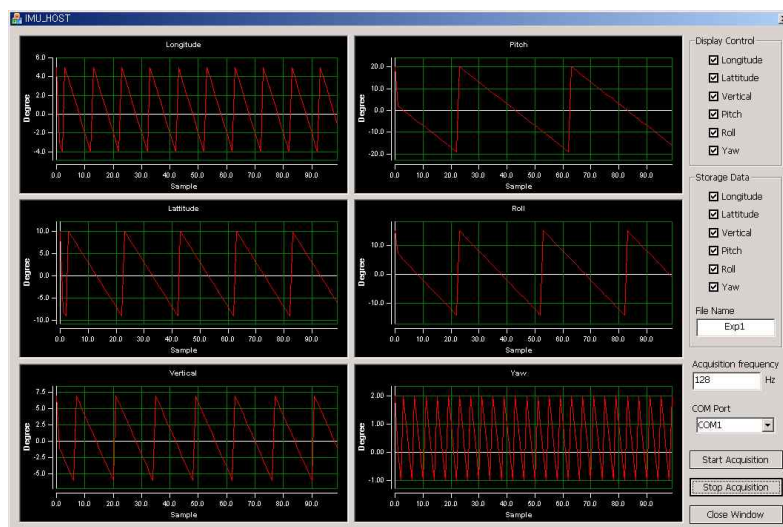


<그림 3-46> 센서 인터페이스 보드에 대한 CPLD 설계를 위한 시뮬레이션

- 또한, 자이로 센서로부터 출력되는 디지털 데이터는 디지털 입력 버퍼를 통하여 CPLD(Complex Programmable Logic Device)로 입력하여 자이로 센서로부터 기준 클럭과 동기화하여 데이터를 획득하도록 구성함.
- 이때 CPLD는 다양한 기능의 디지털 로직 회로를 프로그래밍으로 구현할 수 있는 디바이스로서 센서 인터페이스 보드에서 가속도 센서에 대한 디지털 데이터 획득을 위한 ADC 제어 모듈과 자이로 센서에 대한 검측 획득을 위한 모듈로 구성함.
- 또한 CPLD를 통하여 가속도 센서($16\text{bit} \times 3\text{CH.} = 6\text{Byte}$)와 자이로 센서($32\text{bit} \times 3\text{CH.} = 12\text{Byte}$)로부터 획득되는 데이터는 18Byte/회 의 양을 가지며 최대 500Hz 의 데이터 획득 속도로 작동할 수 있도록 개발 툴을 이용하여 디지털 논리회로를 설계하고 아래 그림과 같이 타이밍 분석을 위한 시뮬레이션을 수행함으로써 그 성능을 검증함.

(2) INS 측정 시험용 소프트웨어

- 본 연구에 적용된 DSP Core는 TMS2000 계열로서 주변회로 구성이 용이하고 최대 200MHz 의 동작 주파수로 구동되어 다양한 신호처리 알고리즘 구현과 다양한 인터페이스 구현이 가능함.
- 최대 500Hz 에서 작동할 때 측정 데이터를 호스트 컴퓨터의 운영프로그램으로 신속하게 전달하기 위하여 Ethernet과 RS232를 이용할 수 있도록 이중화된 통신체계를 구성함.



<그림 3-47> INS 시험용 소프트웨어

- 또한 아래 그림과 같이 시험용 소프트웨어를 제작하여 각각의 INS 센서를 테스트함.

$$CF = EC \sin \alpha = [h_r - (b_A + l_P) \tan \beta] \sin \alpha$$

$$y_E = y_P + BP - CE = y_P + [(b_A + l_P) \cos \alpha - [h_r - (b_A + l_P) \tan \beta] \sin \alpha]$$

$$z_E = z_P - BC - EF = z_P - [(b_A + l_P) \sin \alpha + [h_r - (b_A + l_P) \tan \beta] \cos \alpha]$$

○ 이때 α 와 β 가 매우 작은 값을 가진다고 하면, $\sin \alpha \simeq \alpha$, $\cos \alpha \simeq 1$, $\sin \beta \simeq \beta$, $\cos \beta \simeq 1$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$\begin{aligned} y_{light} &= y_E = y_P + [(b_A + l_P) - [h_r - (b_A + l_P) \beta] \alpha] \\ &= y_P - h_r \alpha + (b_A + l_P) + (b_A + l_P) \alpha \beta = y_P - h_r (\beta - \phi) + (b_A + l_P) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{right} &= z_E = z_P - [(b_A - l_P) \alpha + [h_r - (b_A + l_P) \beta]] \\ &= z_P - h_r - (b_A + l_P) (\alpha - \beta) = z_P - h_r - (b_A + l_P) \phi \end{aligned}$$

○ 왼쪽 선로에 대한 계산은 다음과 같음.

$$B'C' = (b_A - l_P) \sin \alpha \quad ; \quad B'P = (b_A - l_P) \cos \beta$$

$$C'D' = (b_A - l_P) \tan \beta$$

$$C'E' = D'E' + C'D' = h_l + (b_A - l_P) \tan \beta$$

$$E'F' = C'E' \cos \alpha = [h_l + (b_A - l_P) \tan \beta] \cos \alpha$$

$$C'F' = C'E' \sin \alpha = [h_l + (b_A - l_P) \tan \beta] \sin \alpha$$

$$y_E = y_P - B'P - C'F' = y_P - [(b_A - l_P) \cos \alpha + [h_l - (b_A - l_P) \tan \beta] \sin \alpha]$$

$$z_E = z_P - B'C' - E'F' = z_P - [(b_A - l_P) \sin \alpha + [h_l + (b_A - l_P) \tan \beta] \cos \alpha]$$

○ α 와 β 가 매우 작은 값을 가진다고 하면, $\sin \alpha \simeq \alpha$, $\cos \alpha \simeq 1$, $\sin \beta \simeq \beta$, $\cos \beta \simeq 1$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$\begin{aligned} y_{left} &= y_E = y_P - [(b_A - l_P) + [h_l + (b_A - l_P) \beta] \alpha] \\ &= y_P - h_l \alpha - (b_A - l_P) + (b_A - l_P) \alpha \beta = y_P - h_l (\beta + \phi) - (b_A - l_P) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{left} &= z_E = z_P - [(b_A - l_P) \alpha + [h_l + (b_A - l_P) \beta]] \\ &= z_P - h_l + (b_A - l_P) (\alpha - \beta) = z_P - h_l + (b_A - l_P) \phi \end{aligned}$$

(3) 좌, 우 면 틀림

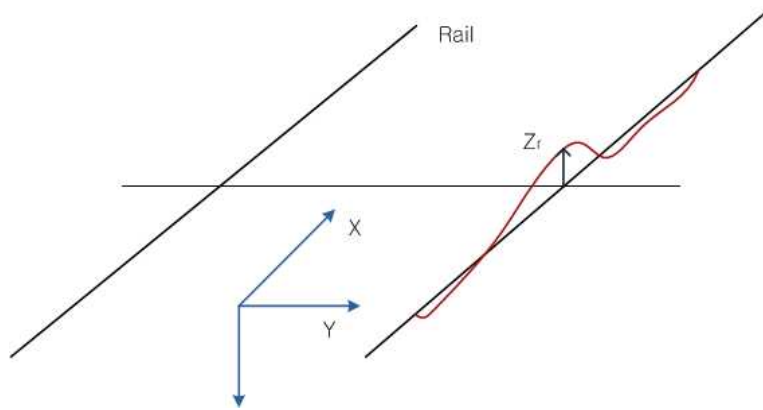
○ 레일의 주행면으로 부터의 z 축 방향 편차로 관성시스템(Inertial system)과 레이저 시스템(Laser system)의 측정값으로부터 계산됨.

.Inertial system output : z_p, ϕ

.Laser system output : h_r, h_l

$$z_r = z_p - h_r - (b_A + l_p)\phi$$

$$z_l = z_p - h_l + (b_A - l_p)\phi$$



<그림 3-49> 면 틀림

(4) 줄 틀림

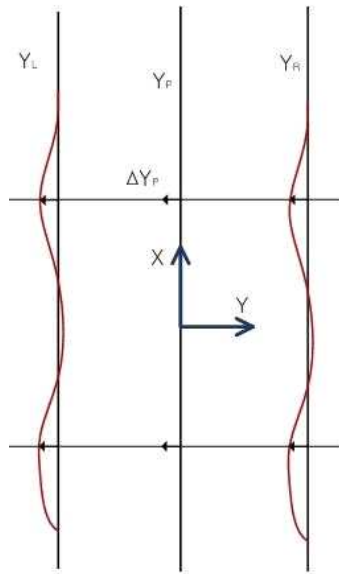
○ 점P 부터의 y 축 방향 편차로 관성시스템(Inertial system)과 레이저 시스템(Laser system)의 측정값으로부터 계산됨.

.Inertial system output : y_p, ϕ

.Laser system output : h_r, h_l

$$y_r = y_p - h_r(\beta + \phi) + (b_A + l_p)$$

$$y_l = y_p - h_l(\beta + \phi) - (b_A - l_p)$$



<그림 3-50> 줄 틀림

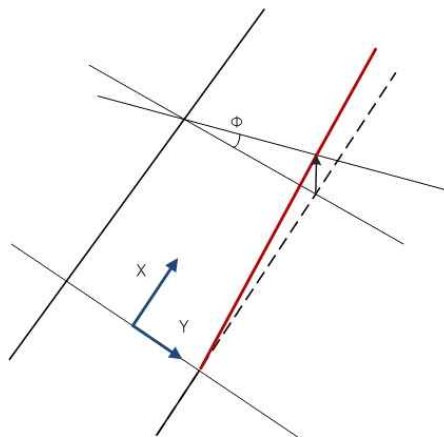
(5) 수평틀림

- 좌, 우 레일의 z축 거리 차이로, 각 레일 두부의 높이차를 의미한다. 수평틀림은 관성시스템(Inertial system)과 레이저 시스템 (Laser system)의 측정값으로부터 계산됨.

.Inertial system output : ϕ

.Laser system output : h_r, h_l

$$cant = z_l - z_r = (h_r - h_l) + 2b_A\phi$$



<그림 3-51> 수평 틀림

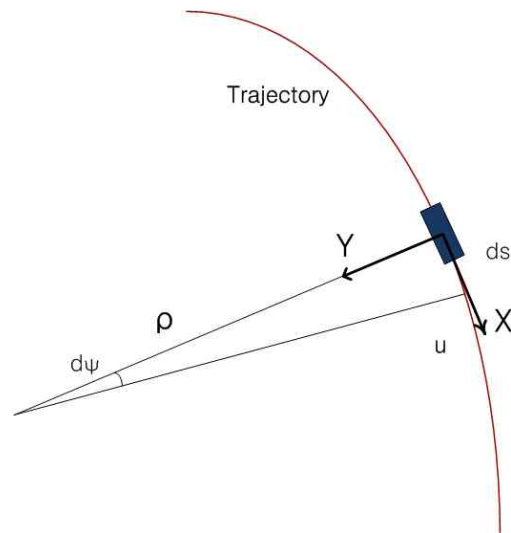
(6) 궤도곡률

- 궤도 곡률은 지면과 수직인 Z축의 각속도 r 값과 열차의 진행방향인 X축의 속도성분 u 값(Tachometer 출력)으로 부터 구할 수 있음.

.Inertial system output : r

.Tachometer output : u

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\psi}{ds} = \frac{\dot{\psi}}{u} = \frac{r}{u}$$

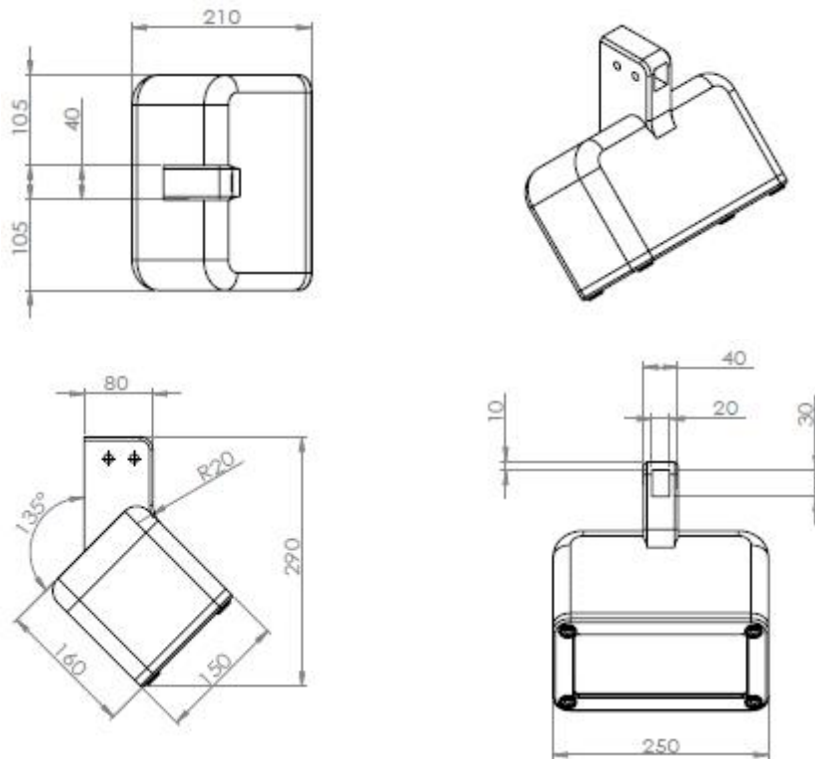


<그림 3-52> 궤도곡률

5. 궤도틀림 검측시스템 구현

가. 궤도틀림 검측 모듈 및 Joint Zig 제작

- 궤도틀림 검측 모듈은 탈부착이 가능하도록 아래 그림과 같이 제작하였으며, 또한 무게를 줄이기 위하여 ABS 재질로 제작하였으며 내부에는 궤도틀림 검측을 위한 라인 레이저 및 카메라와 궤도틀림 데이터를 실시간으로 측정 및 연산할 수 있도록 영상처리보드를 탑재함.

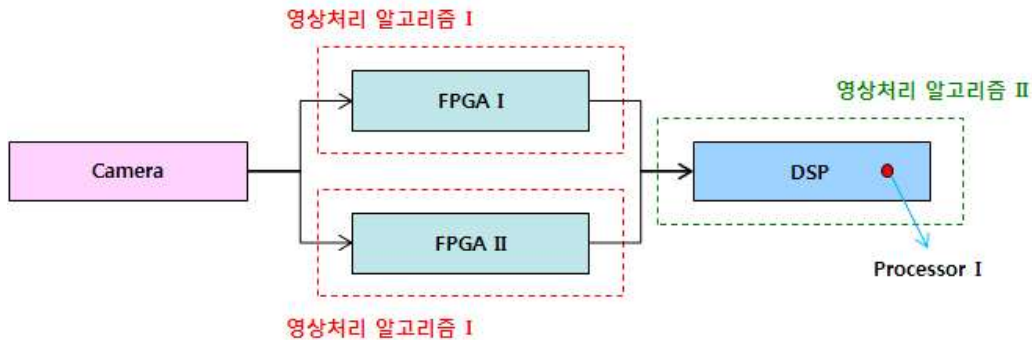


<그림 3-53> 궤도검측 모듈 설계도면

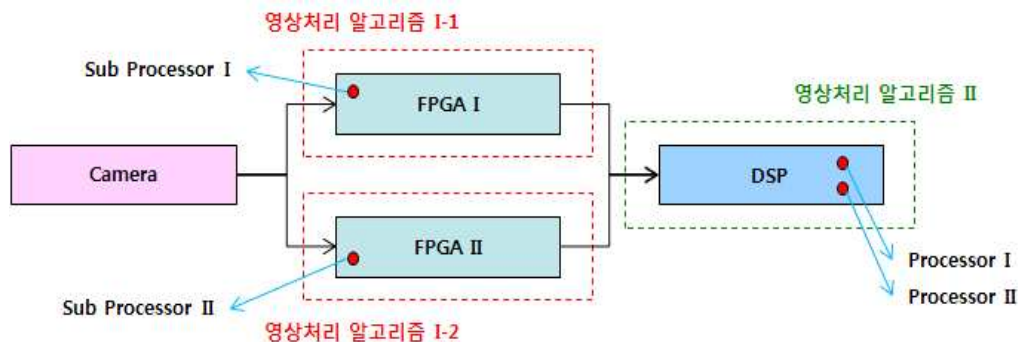
나. DSP와 FPGA를 이용한 하이브리드 구조 기반의 다중처리기 구현

- 본 연구에서 적용된 영상처리 알고리즘과 같이 다중 신호 프로세싱 알고리즘이 요구되는 1,000MMAC 이상의 애플리케이션에 해당하는 경우에 DSP와 FPGA의 하이브리드 구조를 활용함으로써 시스템의 성능을 최대로 끌어올릴 수 있는 장점을 제공할 수 있음.
- DSP는 신호 프로세싱 애플리케이션에 특화된 CPU이며 이 코어는 신호 프로세싱 알고리즘을 최적화하여 수행할 수 있도록 설계되어 있으므로 주요 연산(곱셈과 누적)이 거의 모든 알고리즘에서 비슷함.

- 또한, DSP는 마이크로컨트롤러가 제공하는 탄력성 및 기능성 모두를 동시에 제공하면서도 저 성능과 중간 성능 애플리케이션을 위한 최적화, 온 칩 주변 기기를 한 패키지로 묶은 점 등을 감안했을 때, 본 시스템에 최적화된 솔루션을 제공할 수 있는 장점을 가짐.



<그림 3-54> 다중처리기 구현 전의 하드웨어 구조

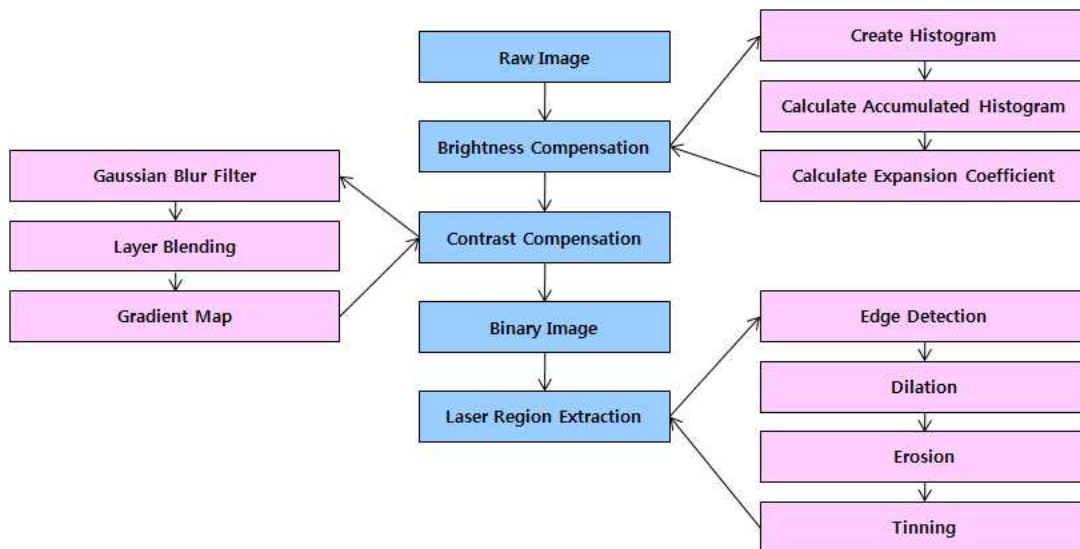


<그림 3-55> 다중처리기 구현 후의 하드웨어 구조

- FPGA의 경우 넓은 병렬의, 계산 속도가 높은 신호 프로세싱에 맞추어 설계자가 맞춤형 로직을 만들 수 있도록 해야 하며, 예를 들어, 초당 400메가 샘플의 81-tap FIR(Finite Impulse Response) 필터에는 320억 MMAC 이상이 필요하며, 이와 같은 성능은 싱글 DSP의 성능을 뛰어넘는 것이지만 싱글 FPGA만으로도 충분히 성능을 달성할 수 있음.
- 아래 그림에서 보듯 바와 같이 고성능 DSP와 FPGA를 이용한 하이브리드 구조 기반의 다중처리기 구현 전, 후에 대한 하드웨어 구조를 도식화함.
- 이때 알고리즘 I는 영상 이진화와 레이저 영역을 보정하는 연산을 수행하며 각 프레임의 영상에 대한 밝기(Brightness)와 대조도(Contrast)가 다를 경우 영상 이진화의 결과가 다르게 나올 수 있기 때문에 영상 이진화 전에 각 프레임별 영상에 대하여 히스토그램을 이용한 밝기(Brightness) 보정과

Gaussian Blur 필터 및 레이어 블렌딩(Layer Blending), 그라디언트 맵(Gradient Map)을 이용한 대조도(Contrast) 보정을 수행하여 각 프레임의 영상이 유사한 밝기(Brightness)와 대조도(Contrast)를 가질 수 있도록 함.

- 보정한 후 레이저 영역을 가장 잘 찾아 대조도는 Threshold 값을 찾기 위하여 Threshold 값 0 - 255로 변화시켜 가며 각 레이저 라인에 대한 자유도가 가장 높은 Threshold 이진화 레벨을 찾아 영상 이진화를 수행함.
- 가장 높은 영상 이진화를 거쳐 생성된 이진화 영상으로부터 레이저 윤곽선을 추출하기 위하여 Edge Detection 및 Dilation, Erosion을 수행한 후 세션화 작업을 거치게 됨.



<그림 3-56> 영상처리 알고리즘 I

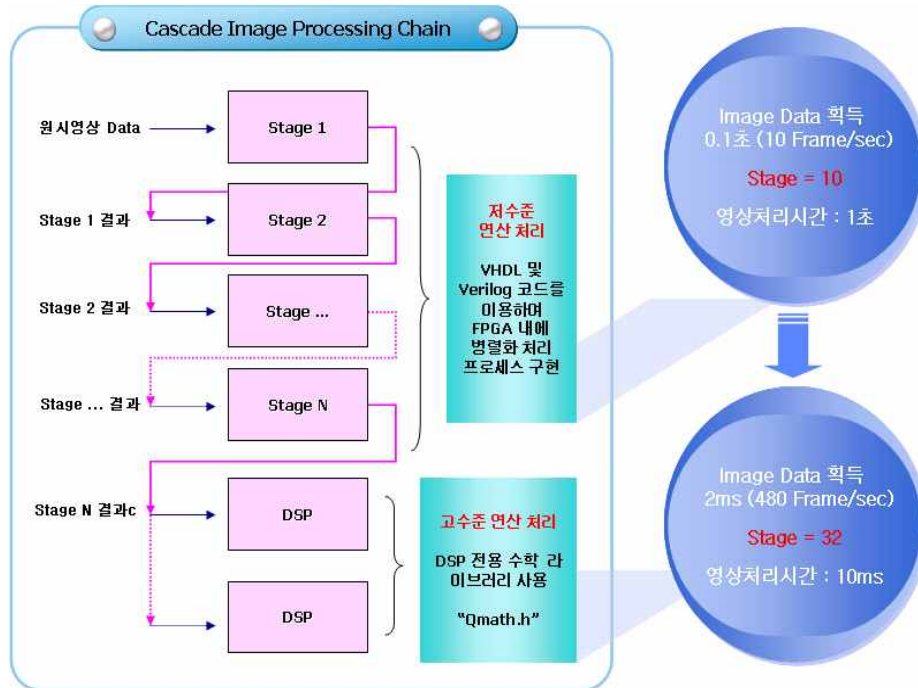
- 또한, 영상처리 알고리즘 II는 영상처리 알고리즘 I에서 추출한 레이저 영역에 대한 좌표 데이터에 카메라 모델(Camera Model)과 투시 변환(Perspective Transform)을 적용하여 레이저 영역에 대한 좌표 데이터를 실제 레일의 수직 절단면과 같은 위치에 오도록 하는 작업을 수행하며 비록 전체 영상이 아닌 레이저 영역에 대한 좌표 데이터만을 이용 하지만 카메라 모델(Camera Model)과 투시 변환(Perspective Transform) 역시 행렬연산을 기반으로 한 반복적인 연산이 매우 많아 실제 연산량은 영상처리 알고리즘 I의 약 1.5배에 달함.
- 따라서 아래 그림에서 보는 바와 같이 레이저 영역의 좌표 데이터를 추출하는 과정은 크게 4단계이지만 세부적인 과정으로 보면 11단계로 나누어지고 각 단계 내에서도 행렬 연산을 기반으로 한 반복적인 연산이 수행되기 때문

에 변경 전에는 영상처리 알고리즘 I이 FPGA I, II에 각각 포팅되어 독립적으로 작동하도록 하였음.

- 위 그림과 같은 11단계의 영상처리 과정은 각 과정마다 연산량의 차이가 발생하기 때문에 연산량의 차이에 따른 프로세서 사용시간이 다르게 나타나며 각 영상처리 과정의 프로세서 사용시간을 바탕으로 연산량 및 프로세서 사용시간을 최적화할 수 있도록 FPGA I과 II에 11단계의 영상처리 각 과정을 나누어 분산 배치하고 병렬연산이 이루어질 수 있도록 함으로서 전체 영상처리 알고리즘 I에 대한 연산 효율성 및 공간 사용을 극대화하였으며 Sub Processor I, II는 FPGA 1, II 사이의 병렬연산을 위하여 FPGA 내에 Sub Processor를 위치시킴.
- 즉, 변경 전에는 DSP 내의 단일 Processor가 영상처리 알고리즘 II에 대한 FPGA와 DSP 사이의 병렬연산을 주관하지만 변경 후에는 DSP에 고정성된 두 개의 Processor가 이중과정으로 되어 영상처리 알고리즘 II에 대한 FPGA와 DSP 사이의 병렬연산을 주관하도록 하여 처리속도, 등을 최적화하여 설계함.

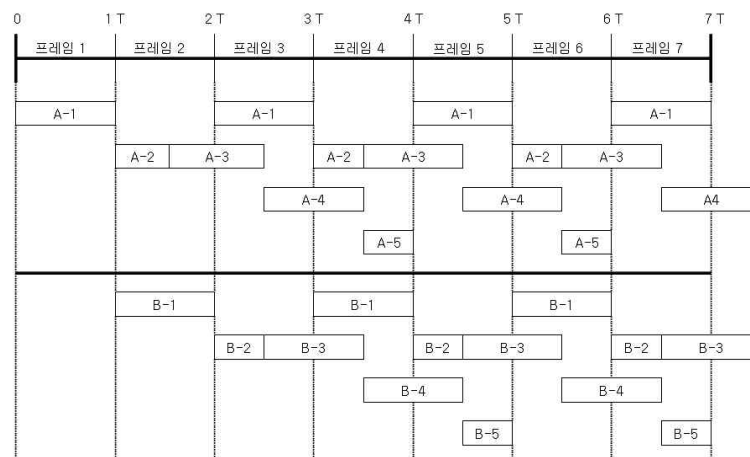
다. 궤도틀림 파라미터 추출을 위한 DSP 펌웨어 제작

- 효율적인 영상처리와 자세측정센서 및 레이저-카메라 모듈을 이용한 궤도틀림 파라미터 추출을 위하여 DSP와 FPGA의 하드웨어 구조에 기반을 둔 아래 그림과 같은 개념의 병렬처리 연산을 수행하였다. 이때, 병렬 연산처리의 프로세스와 같이 카메라로부터 원시영상이 0T의 시작 시간으로부터 1T씩 증가하며 프레임 1에서 시작하여 연속적으로 획득될 때 A로 시작되는 홀수 프레임과 B로 시작하는 짝수 프레임은 서로에 대한 간섭 없이 독립적인 영상처리가 가능해짐.



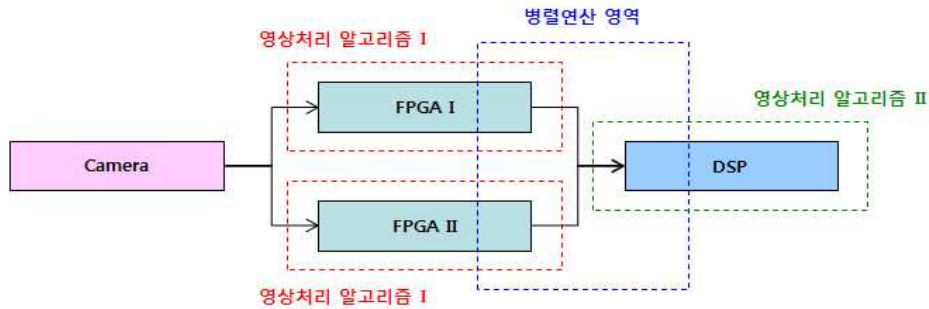
<그림 3-57> 병렬 프로그래밍 개요도

- 이에 따라 0T에서 1T까지의 시간동안 카메라로부터 획득된 홀수 프레임의 원시영상이 A-1 프로세스에 의하여 홀수 프레임에 대한 영상처리 경로 상에 위치한 원시영상 메모리에 저장되고 1T에서 2T까지의 동안 이중화 방식으로 구성된 영상처리에 의하여 카메라로부터 획득된 짝수 프레임의 원시영상이 B-1 프로세스에 의하여 짝수 프레임에 대한 영상처리 경로 상에 위치한 원시영상 메모리에 저장될 때 홀수 프레임에 대한 영상처리 경로에서는 레이저영역검출기와 외곽선 좌표추출기에 의하여 영상처리 프로세스 A-2와 A-3가 진행된다.

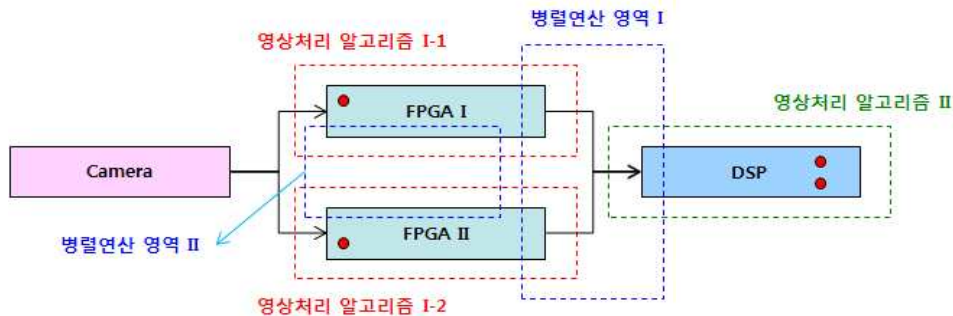


<그림 3-58> 병렬 연산처리의 프로세스

- 또한, 2T에서 3T까지의 시간동안 이중화 방식으로 구성된 영상처리기에 의하여 홀수 프레임에 대한 영상처리 경로에서는 카메라로부터 획득된 새로운 홀수 프레임의 원시영상이 원시영상 메모리에 저장되는 새로운 A-1 프로세스가 진행되고 동시에 짝수 프레임에 대한 영상처리 경로에서는 레이저영역 검출기와 외곽선 좌표추출기에 의하여 영상처리 프로세스 B-2와 B-3가 진행될 때 홀수 프레임에 대하여 외곽선 공간변환기에 의한 철도레일 수직 절단면 공간좌표 연산이 진행됨으로서 아래 그림에서 도시한 바와 같이 메모리 저장 수단에 의하여 영역1과 영역 2, 영역 3의 독립된 영상처리 영역으로 구분된 각 영역에서 동시에 일련의 영상처리 프로세스가 진행됨.
- 이에 따라, 3T부터 4T까지의 시간동안 최초로 획득된 홀수 프레임의 원시영상에 대한 최종 좌표데이터가 좌표메모리로부터 통신모듈을 통하여 호스트 컴퓨터로 전송되는 A-5 프로세스가 추가적으로 진행되고 3T이후부터 도 9에서 도시한 바와 같이 메모리 저장 수단에 의하여 영역1과 영역 2, 영역 3, 영역 4의 독립된 영상처리 영역으로 구분된 각 영역에서 동시에 일련의 영상처리 프로세스가 간섭하지 않고 동시에 진행됨.
- 아래 그림에서 파이프 라인 기반의 병렬 연산처리 알고리즘 구현 전, 후의 병렬연산 역역의 변경에 따른 구조 변화를 보여주고 있으며, 파이프 라인 기반의 병렬 연산처리 알고리즘 구현 전을 보여줌.
- 연속된 데이터 처리를 위하여 각 FPGA 내에 영상처리 알고리즘 I이 동일하게 위치하며 기능적으로 독립되어 영상처리를 수행하는 구조를 가짐.
- 따라서, 병렬연산 영역에서는 전체 영상처리 알고리즘(I, II)을 기능적으로 분할하여 FPGA와 DSP에 나누어 포팅하고 DSP와 FPGA 간의 병렬연산처리 수행함.
- 그러나, 파이프 라인 기반의 병렬 연산처리 알고리즘 구현 후에는 영상처리 과정에서 발생하는 연산량의 차이에 따른 각 영상처리 과정의 프로세서 사용시간을 바탕으로 연산량 및 프로세서 사용시간을 최적화할 수 있도록 FPGA I과 II에 영상처리 알고리즘 I의 각 과정을 나누어 분산 배치하고 병렬연산이 이루어질 수 있도록 함으로서 영상처리 알고리즘 I 전체에 대한 연산 효율성 및 공간 사용을 극대화하였으며, 기술한 바와 같이 Sub Processor I, II는 FPGA 1, II 사이의 병렬연산을 위한 Processor로서의 역할을 수행함.



<그림 3-59> 파이프 라인 기반의 병렬 연산처리 알고리즘 구현 전



<그림 3-60> 파이프 라인 기반의 병렬 연산처리 알고리즘 구현 후

- 또한, 영상처리 알고리즘 II의 경우 변경 전에는 DSP 내의 단일 Processor가 영상처리 알고리즘 II에 대한 FPGA와 DSP 사이의 병렬연산을 주관하지만 변경 후에는 DSP에 구성된 두 개의 Processor가 이중 구조로 되어 영상처리 알고리즘 II에 대한 FPGA와 DSP 사이의 병렬연산을 주관하도록 구성함.
- 즉, 영상처리 알고리즘 II 전체가 2분할되어 FPGA와 DSP 사이에서 병렬연산이 이루어졌다면 변경 후에는 영상처리 알고리즘 II 전체가 4분할되어 FPGA와 DSP 사이에서 병렬연산이 이루어지고 한 개의 Processor에 문제가 생길 경우 나머지 하나의 Processor에서 영상처리 알고리즘 II 전체를 2분할하여 FPGA와 DSP 사이에서 병렬연산이 이루어질 수 있도록 함으로서 처리속도와 신뢰성을 향상시킴.

6. 웨도틀립 검측 운영 소프트웨어

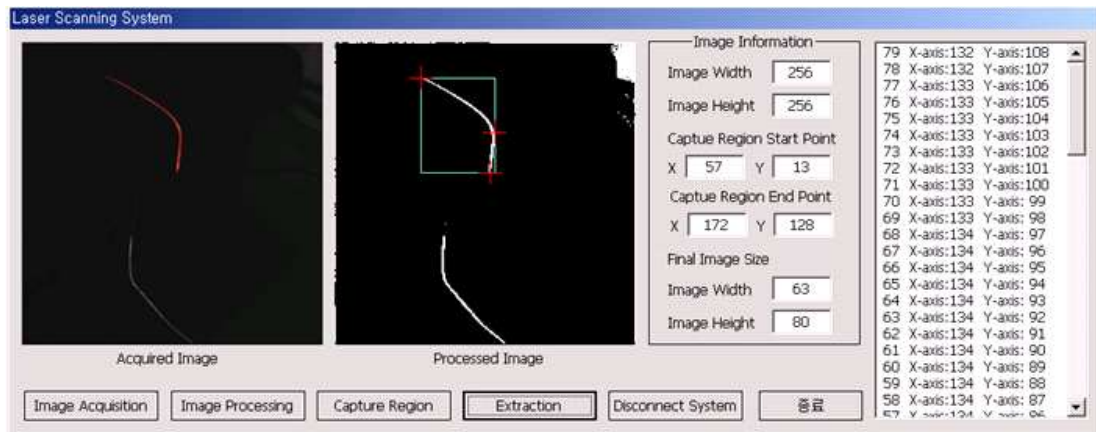
가. 웨도틀립 검측을 위한 독립형 운영 소프트웨어 제작

(1) 영상처리 알고리즘 평가 소프트웨어

- 아래 그림과 같이 효율적인 영상처리와 자세측정센서 및 레이저-카메라 모듈을 이용한 웨도틀립 파라미터 추출을 위하여 DSP와 FPGA의 하드웨어

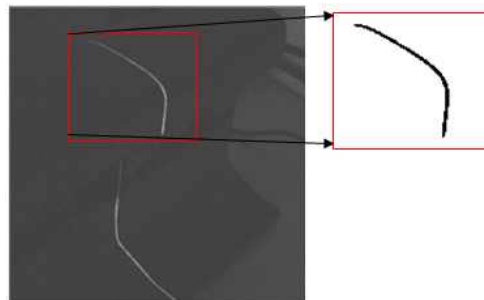
구조에 기반하였으며 입력되는 영상을 효과적으로 처리하기 위하여 전체 영상으로부터 레이저 조사 영역을 설정하고 이를 카메라에 내장된 FPGA에 적용하여 카메라로부터 출력되는 원 영상 데이터로부터 지정된 ROI(Region of Interest)의 영역만을 출력 하도록 함.

- ROI가 적용되어 얻어지는 영상에 대하여 매 프레임마다 웨이브렛 기반의 영상처리 알고리즘을 적용하고 최적의 레이저 영역을 추출함으로써 프레임마다 최적화된 이진화 영상을 획득할 수 있도록 하였으며 윈도우 기반의 영상처리 알고리즘 평가 소프트웨어를 제작하여 이를 평가함.

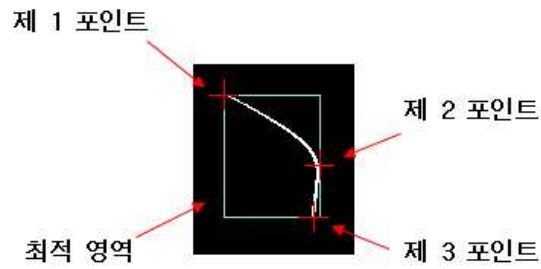


<그림 3-61> 영상처리 알고리즘 평가 소프트웨어

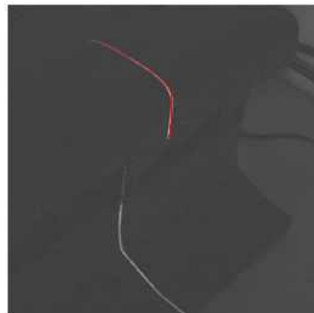
- 아래 그림과 같이 웨이브렛 영상처리 결과에 따라 추출된 레이저 영역으로부터 2차원의 좌표값을 획득하기 위하여 레이저 영역에 대하여 레이저 영역에 대한 3개의 특징점(제 1 포인트 - 레일 영상으로 시작점 제 2 포인트 - 레일 영상으로 변곡점 제 3 포인트 - 레일 영상으로 종료점)을 구함으로써 원영상의 레이저 영역과 정확하게 일치하는 좌표 값을 획득함.



<그림 3-62> 원시영상으로부터 레이저 영역 추출



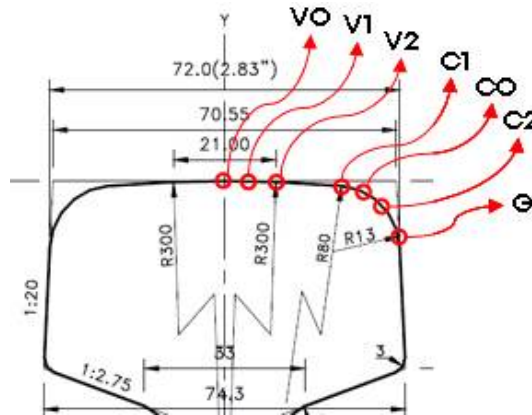
<그림 3-63> 레이저 영역에 대한 3개의 특징점 추출



<그림 3-64> 추출된 좌표 데이터를 원 영상 과 매칭 시킨 결과

(2) 독립형 운영 소프트웨어

- 효과적으로 궤도틀림을 측정하기 위하여 아래 그림과 같이 레일에 대한 7개의 특징점을 기준으로 레일의 상태를 측정하였다. 입력되는 영상으로부터 각 특징점에 대한 측정 결과 값을 정량적으로 판단하기 위하여 레일 프로파일 데이터로부터 정상 레일에 대한 프로파일을 제작하고 제작된 정상레일의 프로파일을 시스템에 저장하여 측정되는 7개의 특징점과 비교한 결과 값을 그래프로 도시하고 이를 측정 파일 또는 구성된 데이터베이스에 저장함으로써 각 프레임마다 측정되는 결과를 현시하고 핸들링할 수 있도록 함.



<그림 3-65> 60kg UIC Rail에 대한 7개의 측정 포인트 정의

- 제작된 통합운영 프로그램의 레일 단면 분석을 위한 기능 구현은 아래 표와 같은 세부사항을 가지도록 구성함.

<표 3-4> 레일 단면 분석 프로그램의 세부사항

항목	사항
Platform	VC++ .net 2012
OS	Window XP
GUI Resolution	1280×960, Full Screen Mode
Image Data Acquisition	70fps (User-defined Format)
Rail Profile Data Acquisition	70fps (Hardware dependent Format)
Image Data Format Support	JPG
Image Data Processing	Basic Processing, Wavelet-based Processing

- 또한, 사용자 편의성 증대와 정밀 측정을 위한 시스템 보정, 등의 하드웨어 Calibration 및 Setup을 위하여 다음과 같은 하드웨어 제어기능과 분석 기능을 포함하도록 제작함.
- 하드웨어 제어 기능(영상획득보드 및 주변 시스템)
- Longitudinal profile left& Right rail Display 기능 (7개의 측정 포인트 : C0, C1, C2, G, V0, V1, V2에 대한 변위 측정 및 현시)

- 또한 C0, C1, C2, G, V0, V1, V2의 7개의 측정 포인트에 대한 결과 표시와 함께 성능검증을 위하여 EN 1323 규정에 따라 측정 데이터 전체를 분석할 수 있는 자동분석 기능을 포함하고 있어 측정 중 이상 지점에 대한 알람 기능, 등의 사용자 편의 기능을 추가하여 제작함.



<그림 3-66> 독립형 운영 소프트웨어의 메인 GUI

7. 트롤리 설계 및 제작

가. 트롤리 구성

- 이동형 궤도 결합 측정을 위한 트롤리는 대차, 레일 롤러장치, 연결장치, 기타 부수장치 등으로 구성됨.

<표 3-5>레일트롤리의 주요부품 재료

부품	재료	적용기준
대차	일반구조용 압연강재 (SS 400)	KS D3503
차축	알루미늄 프로파일 (DNF4040)	
차륜	탄소단조강 (RSA1)	KS R9220
축상	일반구조용 압연강재 (SS 400)	KS D3503
연결핀	일반구조용 압연강재 (SS 400)	KS D3503

나. 트롤리 사이즈

구분	사이즈(mm)
궤간	1,435
폭	약 2,050
길이	약 1,600(손잡이 제외)
높이	약 540(레일스토퍼 제외)
레일지지부재	침목
적재능력	300kg 이상
통과최소곡선	R=80
연결봉, 연결핀	연결봉 10M(24개), 7M(12개), 0.4M(36개), 연결핀(80개)

다. 트롤리 설계 사양 도출

- 장비의 모든 작업장치, 각종 장치 및 구조부재들은 신뢰도가 높은 재료를 사용하고, 차량에 적용되는 모든 재료들은 난연성 재질을 사용함.

(1) 대차

- 대차는 최대하중과 정상운행 조건하에서 성능을 만족하도록 충분한 강성을 고려하여 설계 및 제작되어야 하며, 모든 장치가 지지 또는 집합 조립되는 부분으로 형강 및 모형 절단된 강판을 사용하여 정·동 하중에 충분히 견딜

수 있는 축교, 횡교, 단교 등으로 구성, 전부분을 용접구조물로 비틀림 없이 제작되어야 함.

- 여기에, 진동에 의하여 모든 스크류 및 나사 체결부 등이 이완되지 않도록 해야 하고, 대차는 차체를 지지하고, 안전하게 주행할 수 있는 구조로 제작되어야 함.
- 강판, 형강 기타 강재의 절단은 깨끗하고 틈 또는 어긋남이 없어야 하고 용접 접합부분의 겉 모양은 깨끗하여야 하고 용접 후 비틀림이 없어야 함.
- 트롤리 프레임 전, 후 상부에 고무패드를 설치하여 레일하화 작업 시 충격을 흡수하도록 하여야 함.

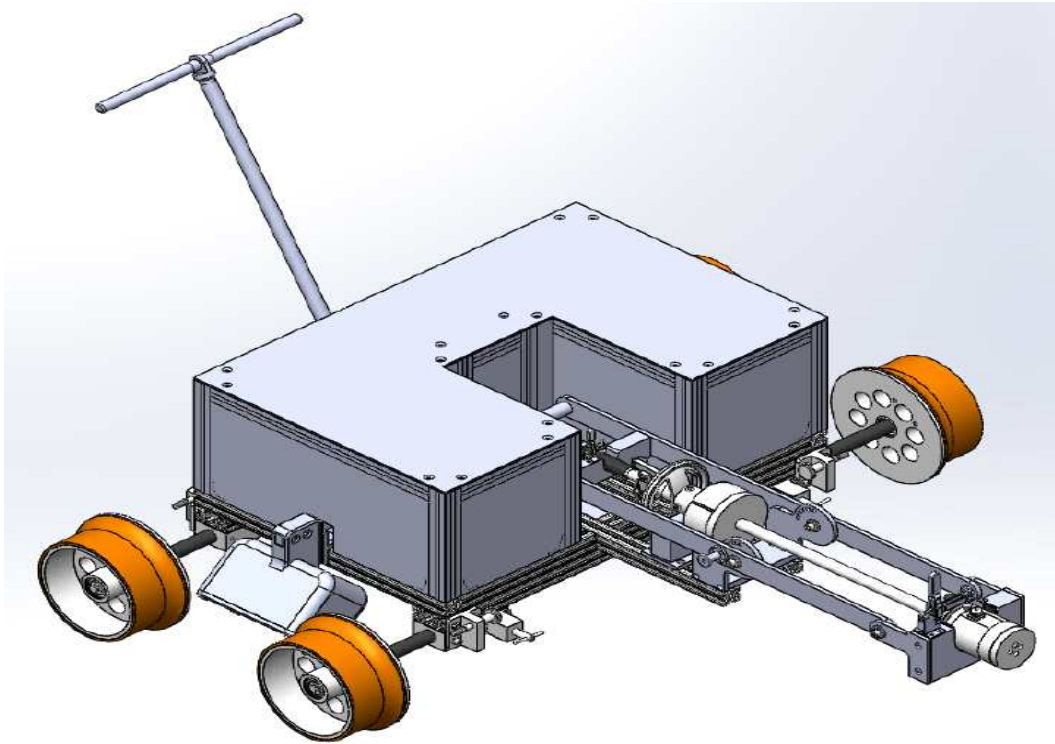
(2) 주행장치

- 차체의 주행 하중지지 장치로 공인기관의 시험 결과에 따른 합격품을 사용한 차축 및 차륜을 압입 조립한 일체형으로 차륜내면거리는 1,354mm가 되도록 하여 궤도상 주행이 안전하도록 제작되어야 함.
- 차륜은 소정의 열처리를 시행한 후 레일단면 및 후렌지를 철도차량 차륜규격에 의하여 정밀하게 가공하고, 차륜과 레일 접촉저항이 0.06Ω 미만으로 유지하여 궤도 신호현시가 원활하도록 제작함.
- 윤축은 최대 하중조건과 운행 시 발생하는 충격하중에 충분히 견딜 수 있는 강도와 강성을 가져야 하고, 레일트롤리 10대 중 2대는 개별 제동장치(레버형)을 설치하여야 함.

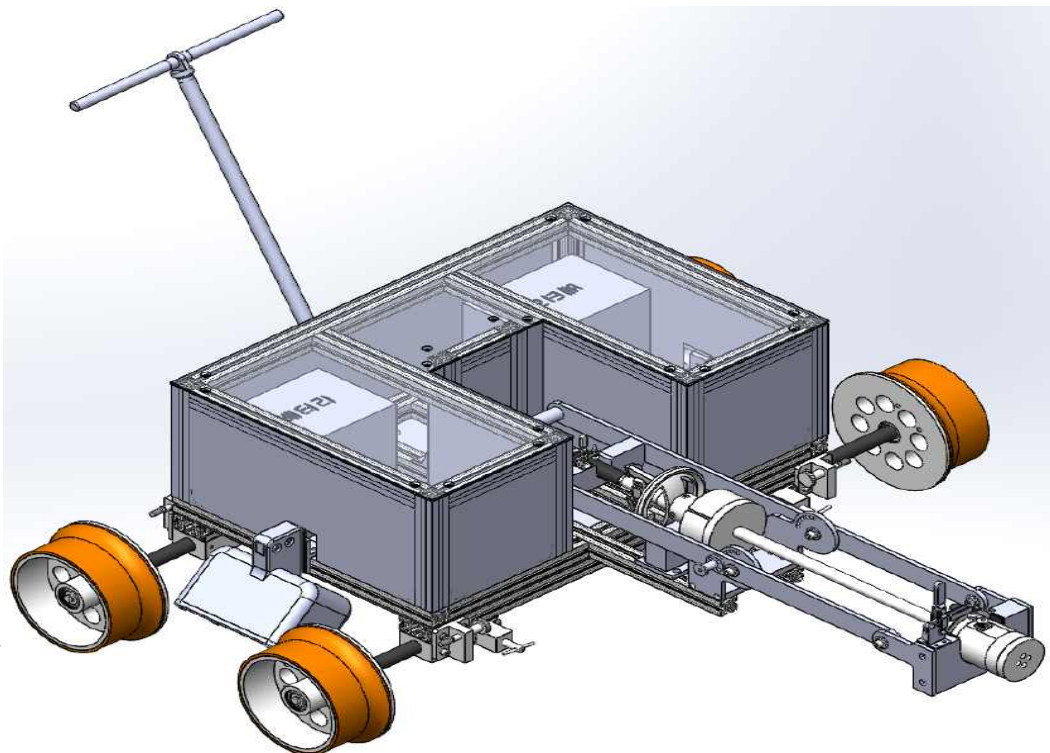
(3) 완충장치

- 윤축의 축상과 대차 사이의 완충장치로 코일스프링을 장착시켜 트롤리의 적재하중이나 주행충격 등이 완충되도록 대차와 적재물을 보호할 수 있어야 하며, 차륜의 접지기능 향상과 탈선 예방기능을 갖도록 함.

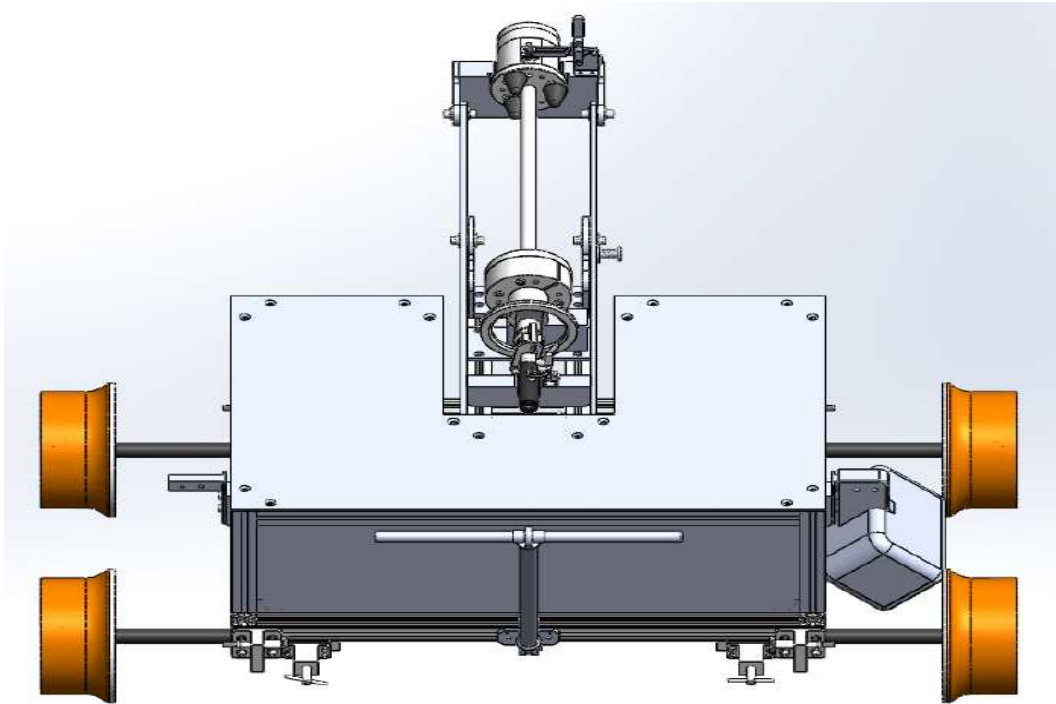
라. 트롤리 랜더링 이미지 작업



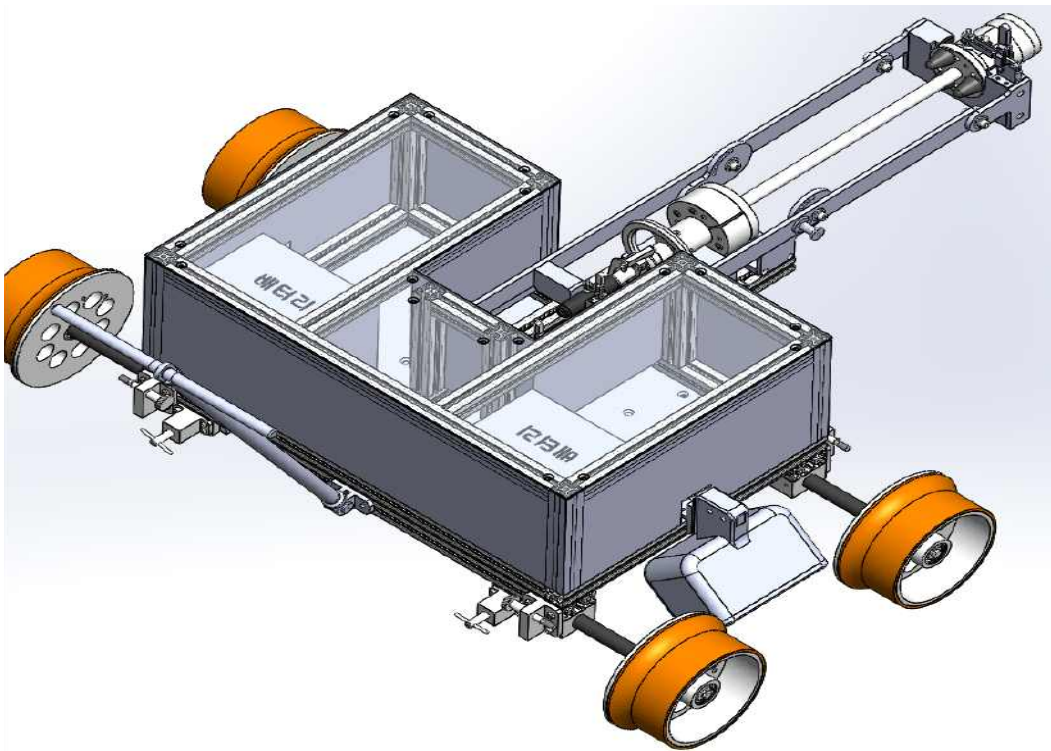
<그림 3-67> 트롤리 랜더링 측면사진(1/2)



<그림 3-68> 트롤리 랜더링 측면사진(2/2)



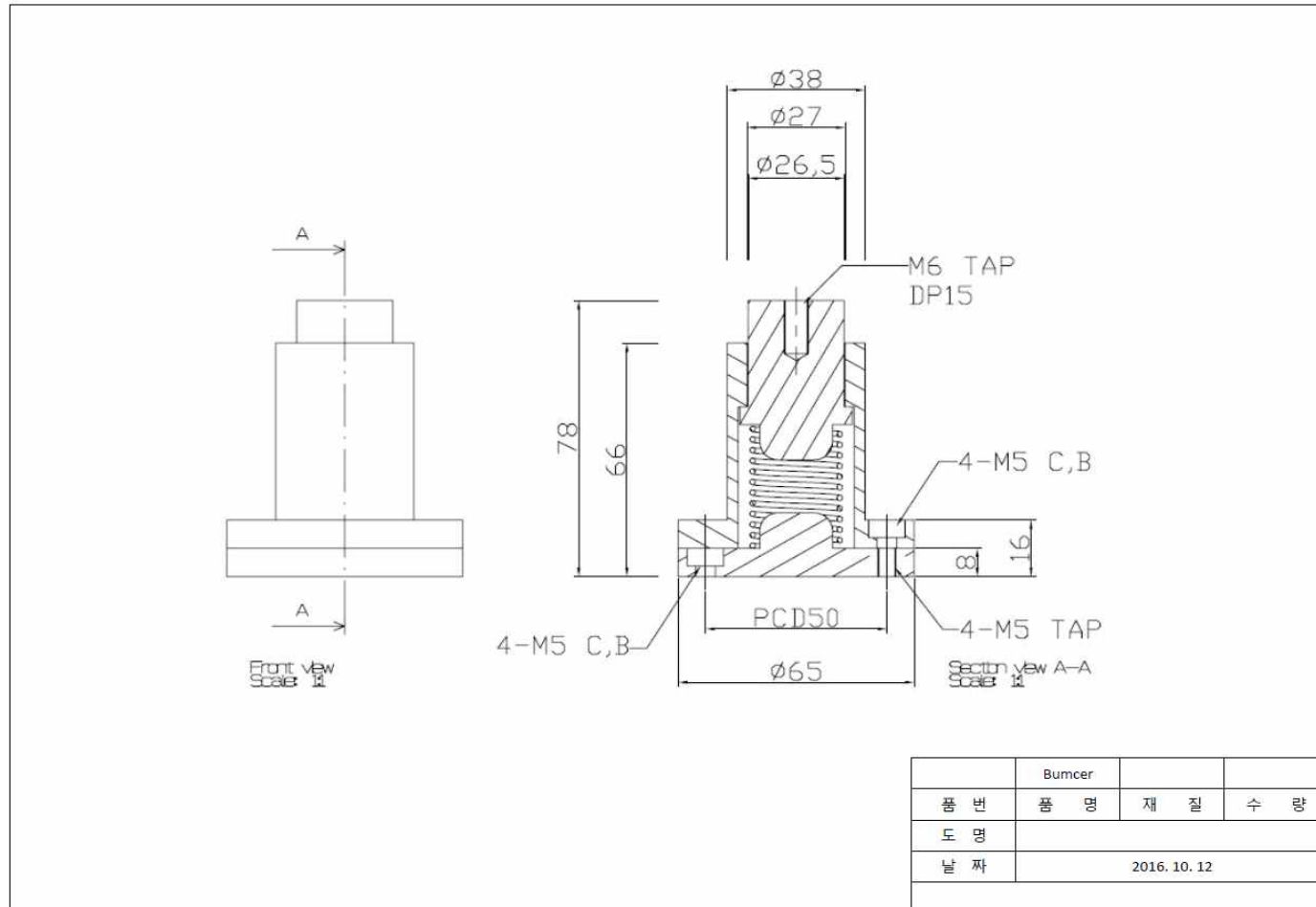
<그림 3-69>트롤리 랜더링 후면사진(1/2)



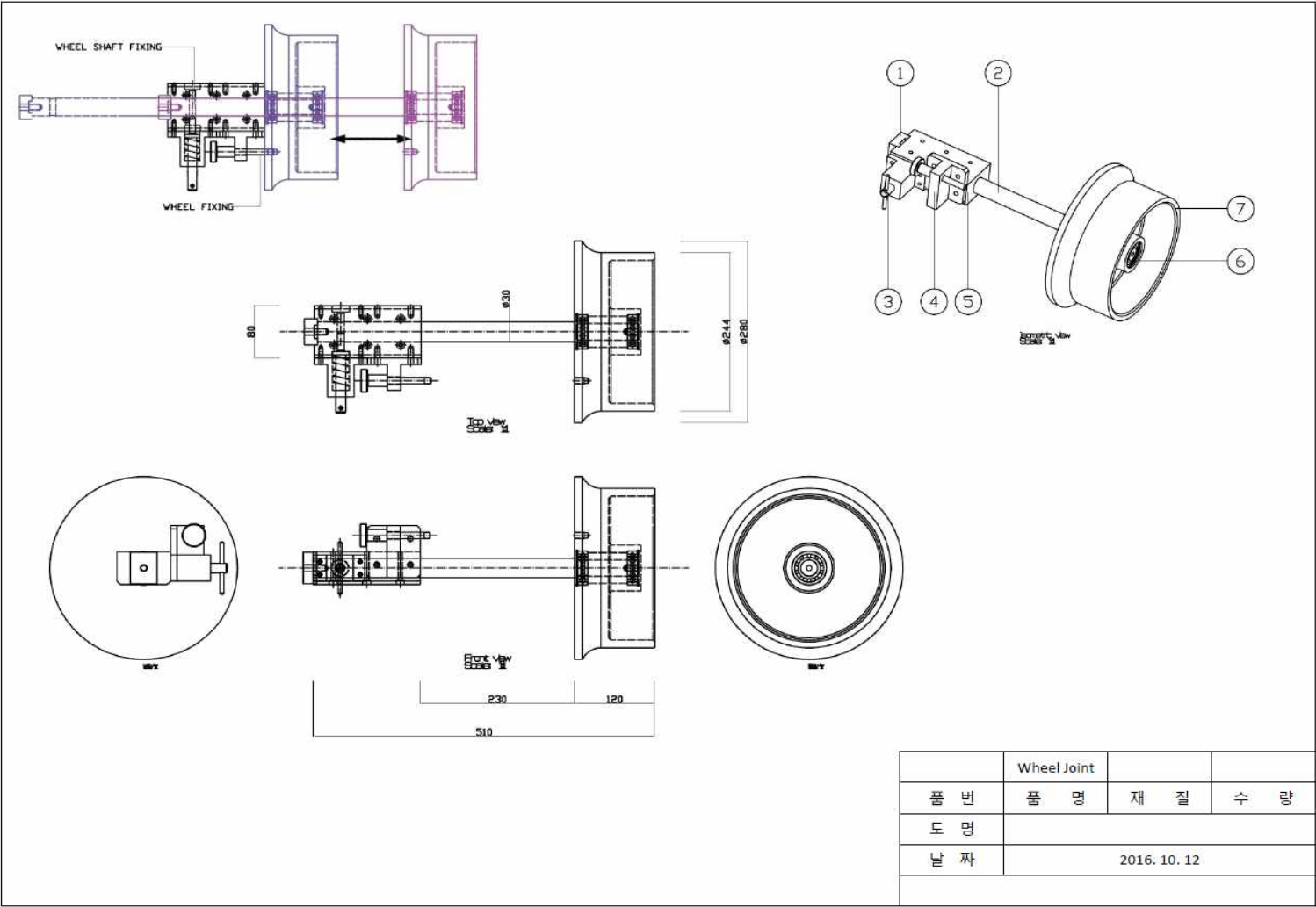
<그림 3-70>트롤리 랜더링 후면사진(2/2)

라. 트롤리 도면 작업

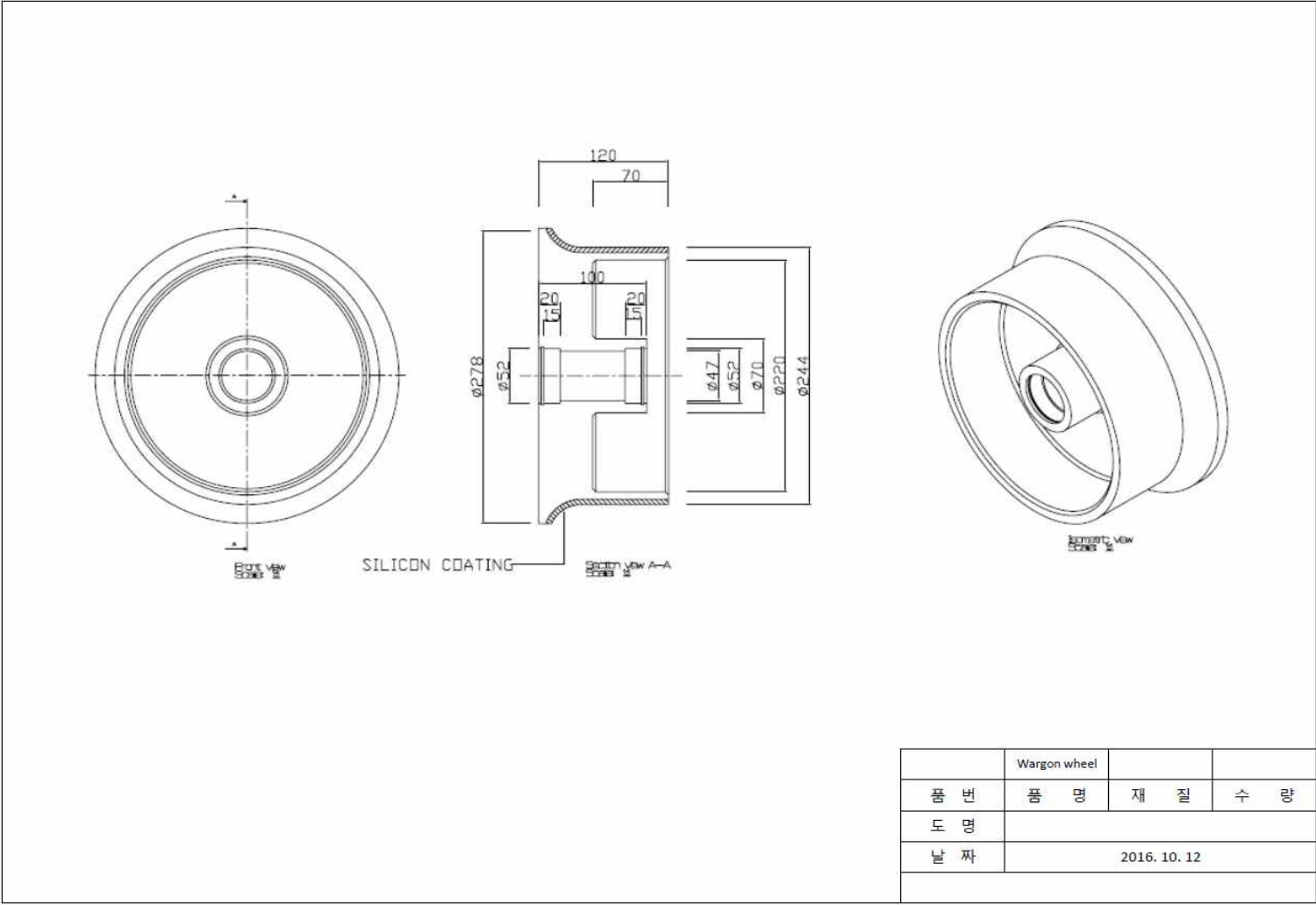
(1) 차축 베어링 상세도



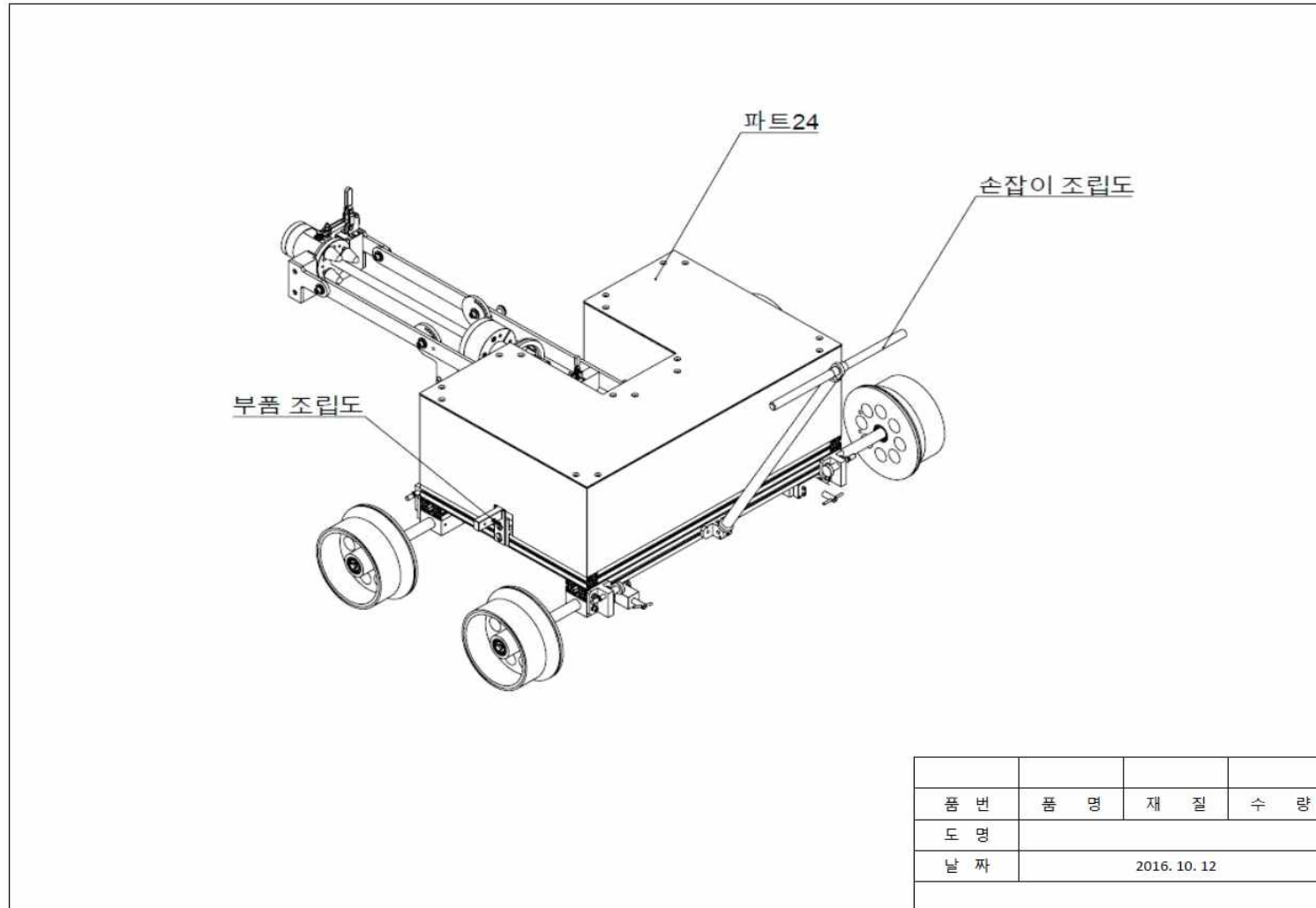
(2) 차축 상세도



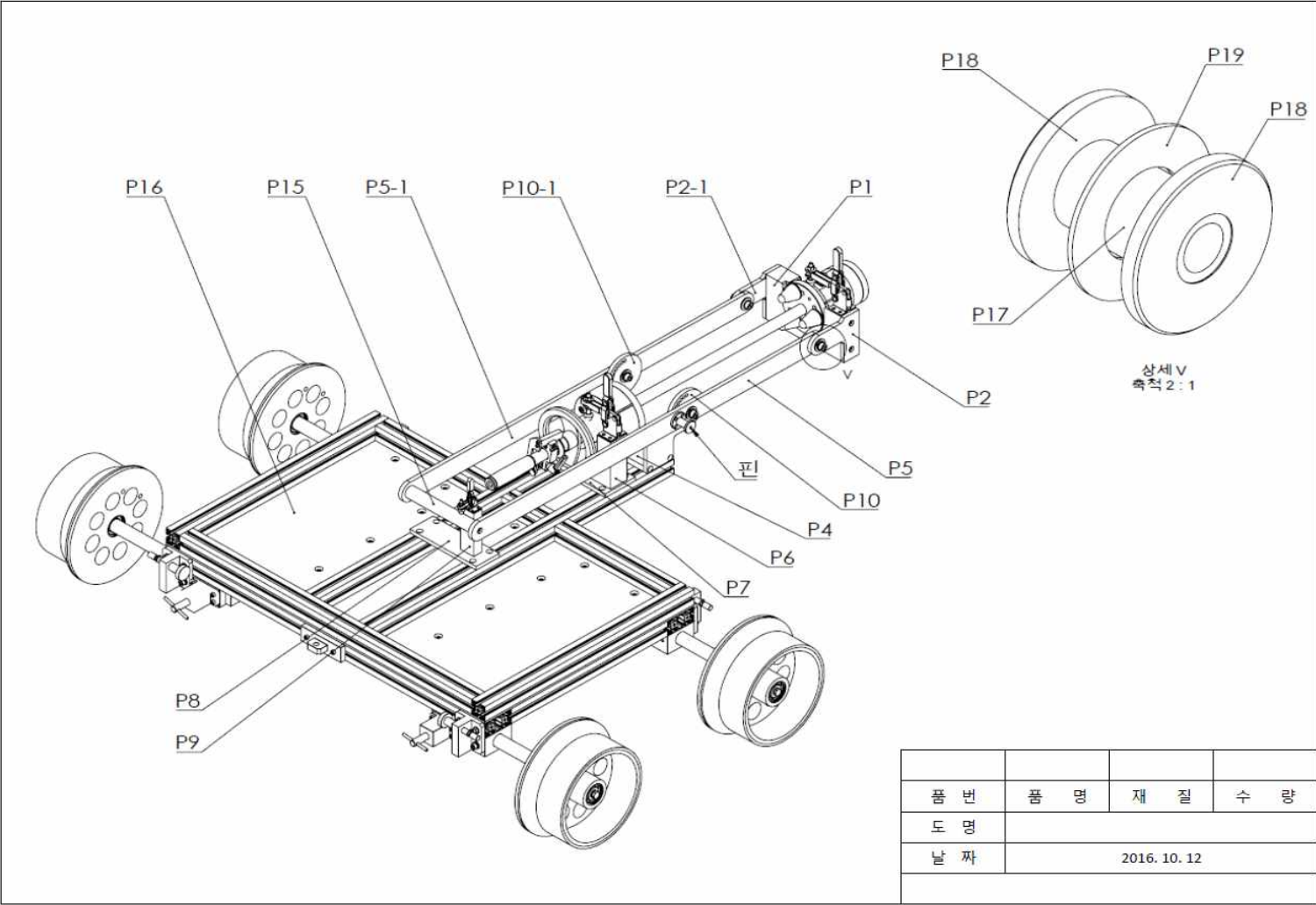
(3) 차륜 상세도



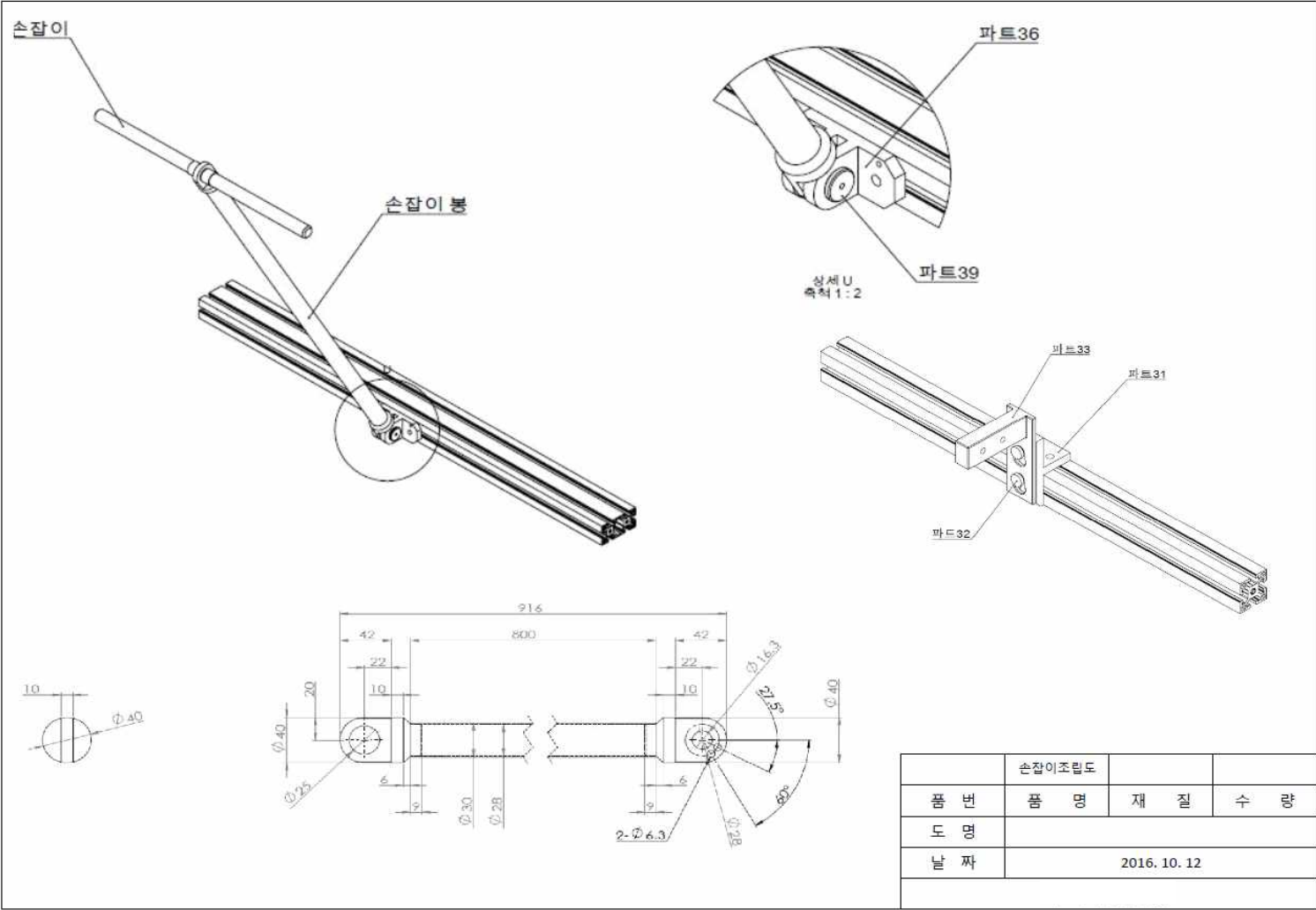
(4) 트롤리 전체 상세도(1/2)



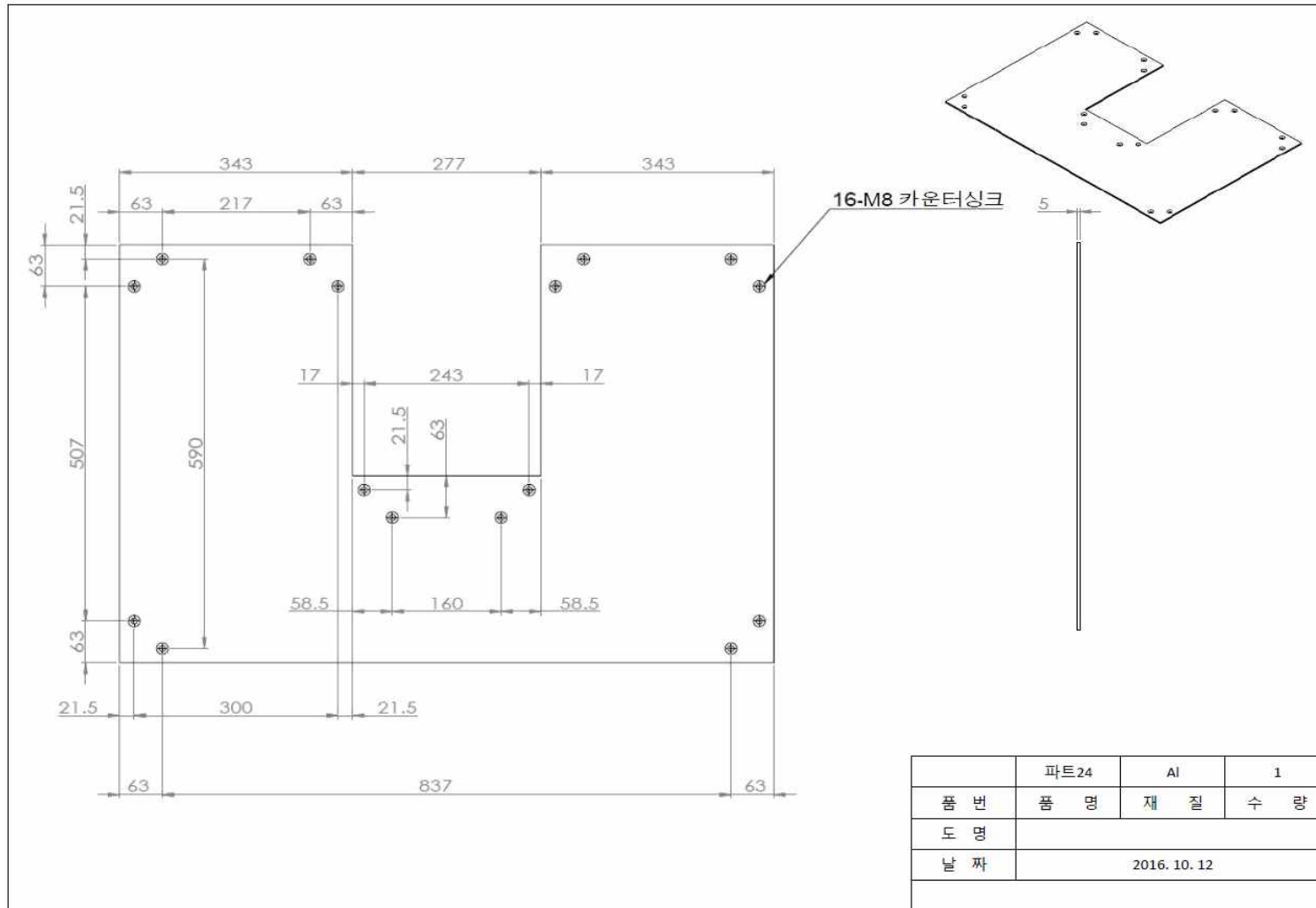
(5) 트롤리 전체 상세도(2/2)



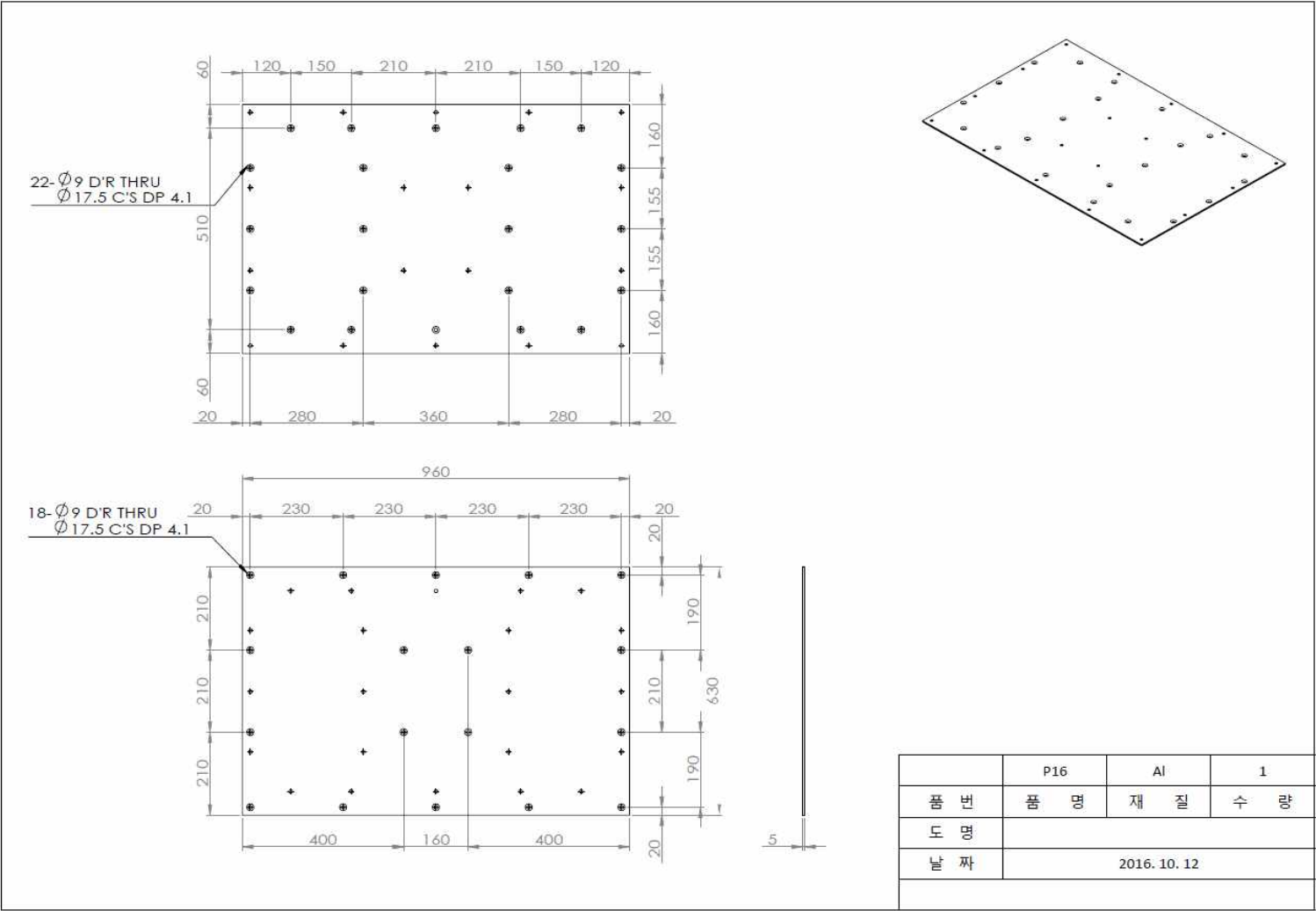
(6) 트롤리 손잡이 연결부 상세도



라. 트롤리 하우스 상세도(1/2)

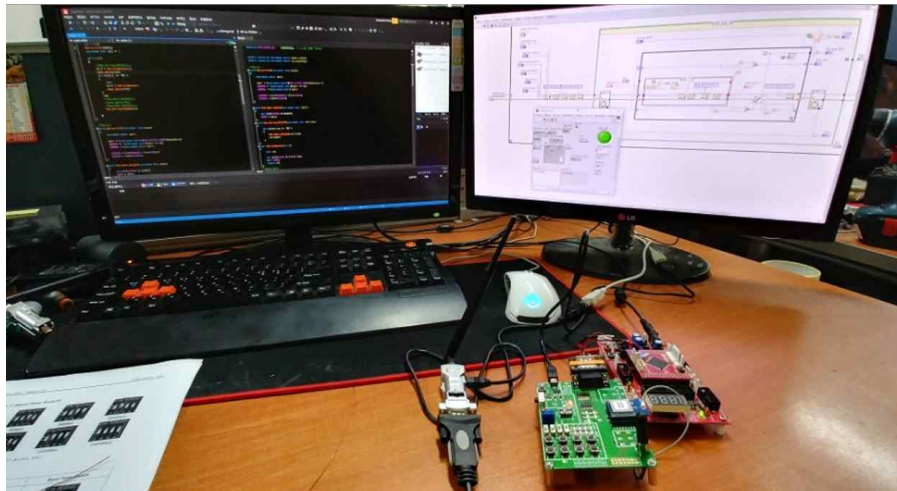


라. 트롤리 하우스징 상세도(2/2)

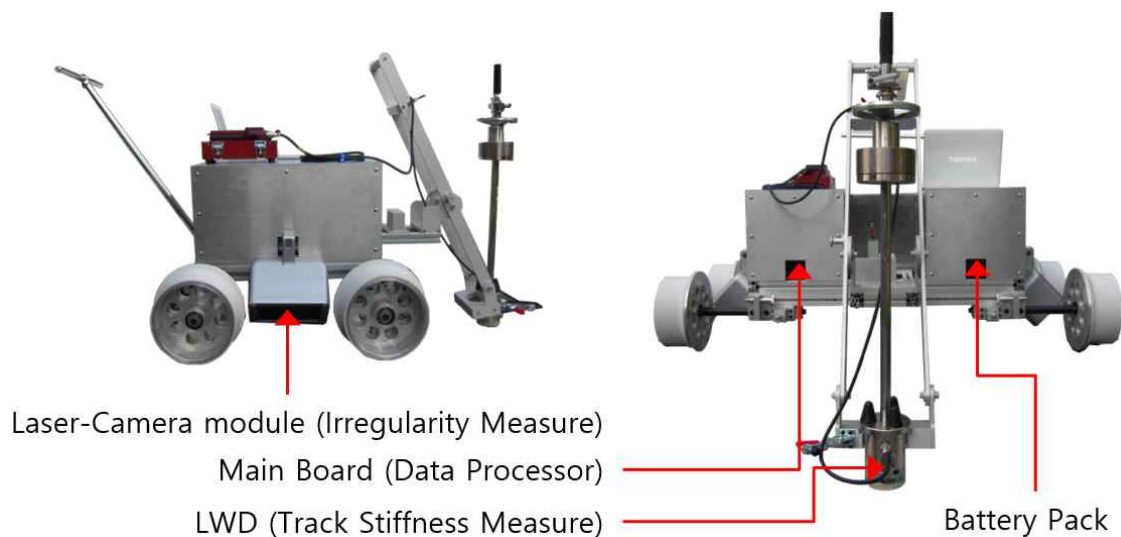


8. 궤도 안전진단 시스템 시제품 제시

- 이동형 트롤리 및 LWD(Light Weight Deflectomete)를 통해 철도 궤도 하부 강성변화를 측정하고 라인레이저 및 카메라를 이용하여 궤도틀림 및 결함을 측정프로그램(노트북 및 전용 테블릿pc 설치)을 활용하여 실시간으로 확인할 수 있도록 제시함.
- 여기에 압전소자 레일패드에서 발생하는 전류/전압 값을 정현파로 변환한 데이터를 무선타데이터 전송 시스템(Zigbee, Bluetooth)를 통해 측정프로그램으로 전송받아 분석할 수 있도록 개발함.



<그림 3-71>진동신호 전송 시스템 소프트웨어 및 하드웨어



<그림 3-72>궤도안전진단 시스템 시제품



<그림 3-73>궤도안전진단 시스템 운용 예시

9. 철도 압전소자 레일패드를 이용한 궤도안전진단 시스템 측정 알고리즘 제시

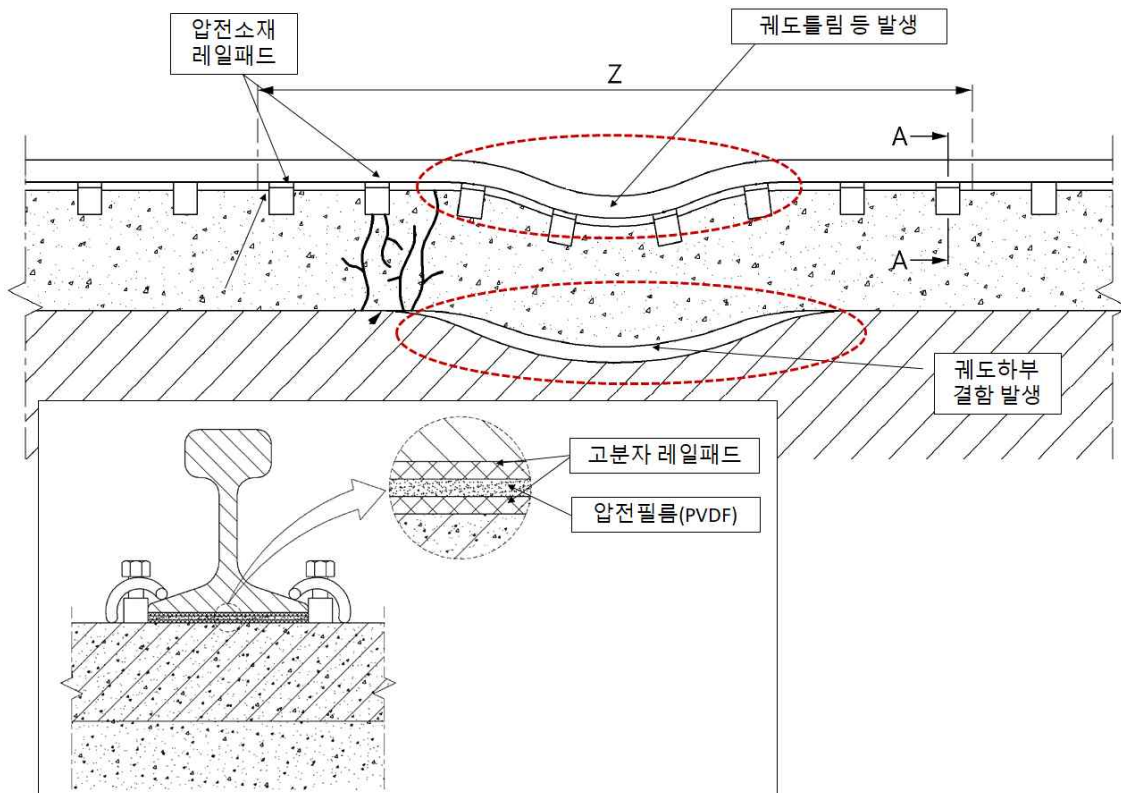
가. 철도 궤도안전진단 시스템의 구성환경

- 철도의 침목들과 궤도 사이에 본 연구를 통해 제시된 압전소자 레일패드를 설치하고, 압전 신호를 측정하도록 해당 패드들에 신호 전달 가능하게 연결함.
- 압전 신호들의 측정 파형을 도출하는 신호 측정 유닛, 신호 측정 유닛으로부터 압전 신호들의 측정 파형 및 측정 환경 정보를 전달 받을 수 있도록 신호 측정 유닛에 통신 가능하게 연결됨.
- 압전 신호들의 측정 파형 및 측정 환경 정보를 분석하여 궤도의 상태를 진단하는 통합 분석 유닛 및 통합 분석 유닛에 연결되고 통합 분석 유닛에 의해서 궤도의 이상 상태가 검출되면 궤도의 이상 상태에 관한 정보를 관리자에게 통보하는 알림 유닛을 포함하는 궤도 안전 진단 시스템의 측정 알고리즘을 제시함.
- 압전소자 레일패드를 이용하여 궤도와 침목들 사이에서 발생하는 진동을 압전신호로 전환할 수 있고, 압전 레일 패드들의 압전 신호에 대한 측정 파형을 분석하여 측정 파형이 비정상적으로 나타나는 압전 레일 패드를 도출할 수 있을 것으로 판단됨.

- 압전 레일 패드들 중에서 이상 상태로 판단되는 압전 레일 패드의 정보를 관리자에게 실시간으로 알려주어 궤도의 이상 상태에 신속하게 대처할 있도록 측정 알고리즘을 제시함.

나. 철도 궤도안전진단 시스템의 측정 알고리즘

- 침목들이 지반의 상부에 형성된 도상을 따라 일정 간격으로 배치되고, 해당 침목들에는 궤도가 체결구에 의해 열차(미도시)의 주행 방향을 따라 길게 배치됨.
- 레일, 침목, 도상등의 궤도는 열차의 종류, 주행 환경, 설치 장소, 설치 비용 등에 따라 다양한 형태로 설계될 수 있지만, 궤도 안전 진단 시스템은 다양한 종류의 철도에 모두 적용 가능할 것으로 판단됨.



<그림 3-74>궤도하부 결함에 의한 궤도틀림 및 문제점 발생 모식도

(1) 압전신호 측정단계

- 신호 측정 시스템은 1개에서 다수의 압전 신호를 측정한 후 압전 신호들의 측정 파형을 도출하고, 신호 측정 유닛은 압전 레일 패드에 신호 전달이 가능하게 각각 연결됨.
- 신호 측정 시스템은, 압전 레일 패드에 유선으로 연결되며 궤도의 진단 구간(Z)에 하나씩 배치되어 각 패드에서 발생하는 전류/전압값을 측정함.
- 따라서, 시스템 구성은 신호측정시스템이 2개 이상으로 구성될 수 있을 것으로 보이고, 통합 분석 시스템은 신호 측정 시스템에서 압전 신호들의 측정 파형 및 측정 환경 정보를 전달 받은 후 그 압전 신호들의 측정 파형 및 측정 환경 정보를 분석하여 궤도의 상태를 진단함.
- 통합 분석 시스템은 신호 측정 시스템에 무선통신방식을 활용하여 데이터를 전송하거나, 업로드 함.
- 여기서, 압전 신호들의 측정 파형은 열차의 주행 시 압전 레일 패드로부터 연속적으로 측정되는 압전 신호를 정현파 형상의 전류 파형으로 나타낼 것이며, 측정 환경 정보는 신호 측정시스템에 의해 측정되는 압전레일 패드의 각종 정보로서, 압전 레일 패드의 위치, 압전 레일 패드의 측정 시간과 측정 일자, 주행 열차의 정보 등을 기록함.
- 통합 분석 시스템은 매우 넓은 분석 대상 지역에 존재하는 모든 진단 구간(Z)의 궤도 상태를 분석할 수 있으며, '분석 대상 지역'이라 함은 궤도 안전 진단 시스템의 설계 조건 및 상황에 따라 다양하게 설정될 수 있음.
- 따라서, 통합 분석시스템의 분석 대상 지역에는 복수개의 신호 측정시스템이 배치되어 압전 신호들의 측정 파형 및 측정 정보가 각 진단 구간(Z) 별로 전송됨.
- 이때, 통합 분석 시스템은 복수개의 신호 측정 시스템에서 전송되는 압전 신호들의 측정 파형 및 측정 정보를 분석하여 각 진단 구간(Z)에서의 궤도 상태를 실시간으로 진단할 수 있음.

(2) 이상신호 알림단계

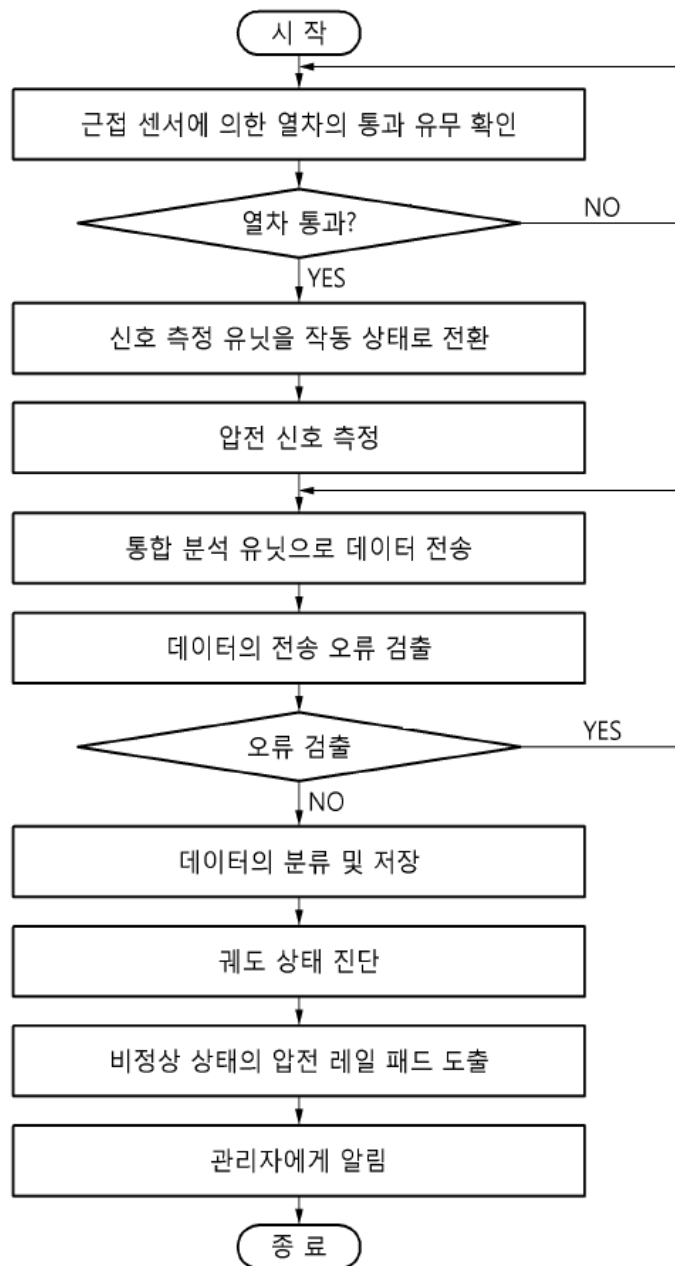
- 알림 유닛은 통합 분석시스템에 의해서 궤도의 이상 상태가 검출되면 궤도의 이상 상태에 관한 정보를 관리자에게 통보할 수 있음.
- 추가적으로 근접 센서는 궤도의 일측에 배치되어 진단 구간(Z)으로 접근하는 열차가 근접 센서에 감지될 때에만 그 진단 구간(Z)에 설치된 신호 측정 시스템의 작동이 제한적으로 작동될 수 있도록 구성함

(3) 데이터 전송단계

- 데이터를 전송하는 단계에서는, 압전 신호들의 측정 파형과 측정 환경 정보를 무선 데이터 통신 방식에 의해서 통합 분석시스템으로 전송함
- 전송방식은 신호 측정시스템과 통합 분석시스템이 서로 멀리 떨어진 상태에서 데이터가 무선 통신 방식으로 전송되는 경우, 데이터가 비정상적으로 전송되어 데이터의 전송 오류가 발생할 가능성에 따라 데이터의 전송 오류를 검사하고, 전송 오류 검사의 결과에 따라 데이터를 재전송함.

(4) 데이터 분류 및 저장단계

- 데이터를 분류 및 저장하는 단계에서는, 측정 환경 정보에 포함된 압전 레일 패드의 위치 및 압전 신호의 측정 일시에 따라 압전 신호들의 측정 파형을 분류하고 저장함.
- 통합 분석시스템에서 분류 및 저장된 데이터는 다음의 궤도의 상태 진단 시 다시 활용할 수 있음.
- 이러한 측정단계를 종합하면 아래 그림과 같음.

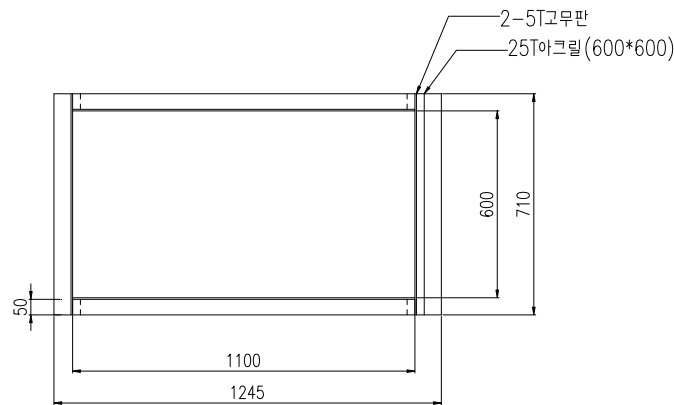


<그림 3-75>궤도안전진단 측정 알고리즘

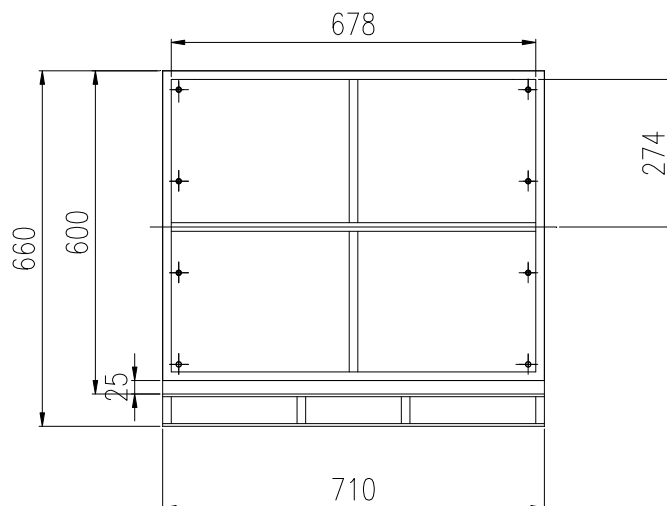
제 4 절 철도 압전소재 레일패드를 활용한 궤도안전진단 시스템 성능평가

1. 철도 압전소재 레일패드 압전 성능평가를 위한 조건 구성

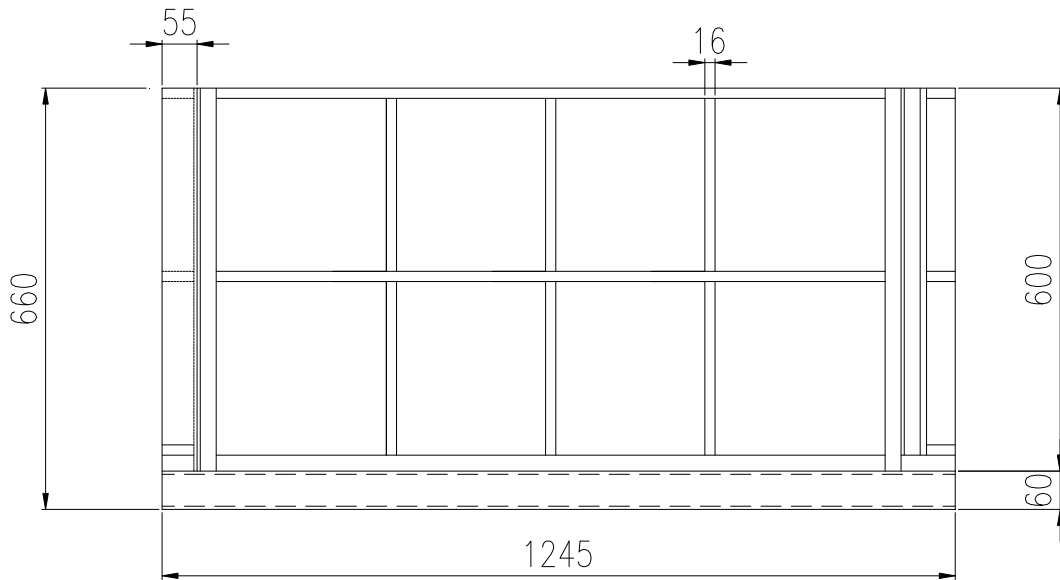
- 기존 레일패드와 본 연구를 통해 개발한 철도 압전소재 레일패드(PEDOT-PVDF)의 적층형태에 따른 압전 효율을 평가하며, 진동 저감형 압전패드의 압전소재와 레일패드의 최적 적층구조 및 배열 등의 설계요소(design factor)를 파악하고 하중변화에 따른 압전 성능을 평가하고자 함
- 아래와 같은 모형토조(W=0.6m, D=0.6m, L=1.1m)에 자갈도상, 침목 및 체결장치를 재현한 후 침목상단에 정적 및 동적반복하중을 scale-down시켜 재하하고 변위계(LVDT) 및 하중계 등의 센서를 설치하여 재하시의 변위 발생과 토압의 크기를 측정함. 또한 가속도계를 침목 및 도상상부에 부착하여 진동발생 특성을 측정/분석함



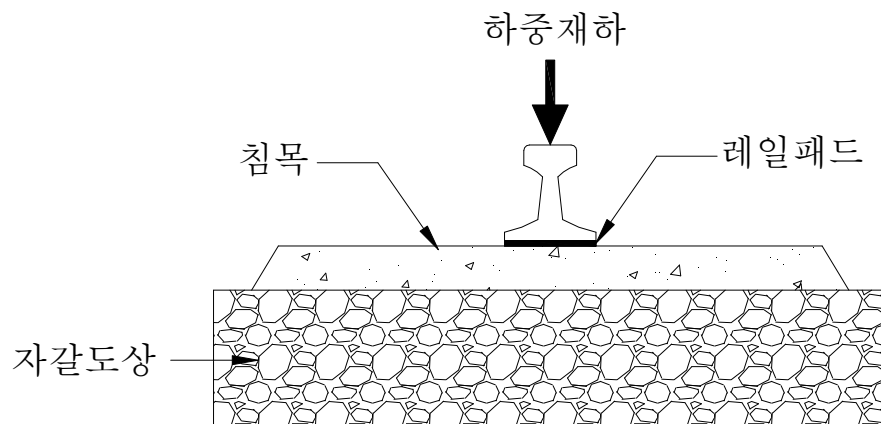
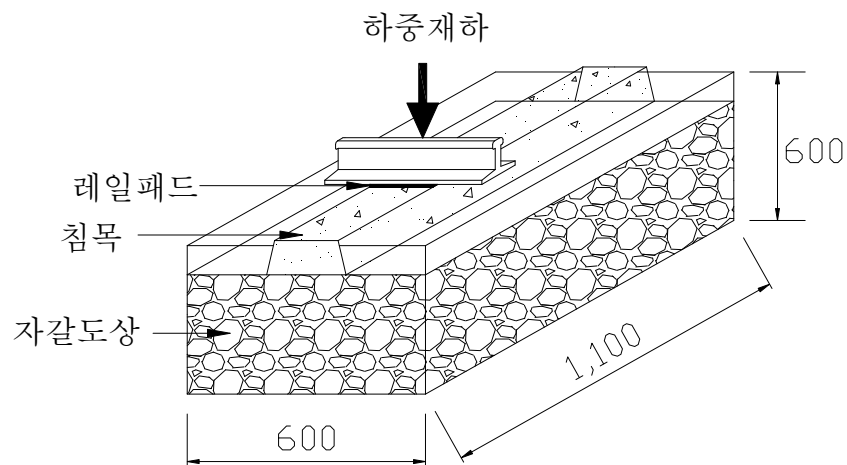
<그림 113> 모형 토조 평면도



<그림 2> 모형토조 측면도

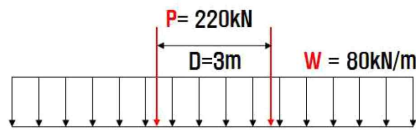


<그림 3> 모형토조 정면도

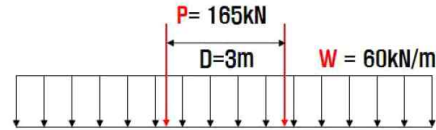


<그림 4> 자갈도상궤도

- 압전소재가 적용된 레일패드(PEDOT -PVDF)의 압전 효율을 측정하기 위하여 오실로스코프를 연결하여 출력전압을 측정함
 - 각 압전소자와 레일패드의 적층구조에 따른 정적 및 동적 재하 시 발생하는 출력전압을 측정하며 동시에 궤도의 진동 발생특성을 분석함
 - 가속도계를 이용한 패드별 진동저감 특성 측정/분석
- 본 시험에서 적용할 재하중의 아래와 같이 KRL-2012 표준열차하중 및 속도별 동적할증계수(DAF)를 고려하여 아래 표와 같이 결정되나 본 시험의 경우 scale-down되는 시험임을 고려하여 시험하중의 크기를 설계하중의 약 40%로 가할 예정임(등분포하중 제외)
- 하중주파수는 scale-down되는 하중크기를 고려하여 결정하며 하중크기와 하중주파수의 면밀한 상관관계를 고려하여 결정할 것임



여객/화물 혼용선



여객 전용선

<그림 5> KRL-2012 표준 열차하중

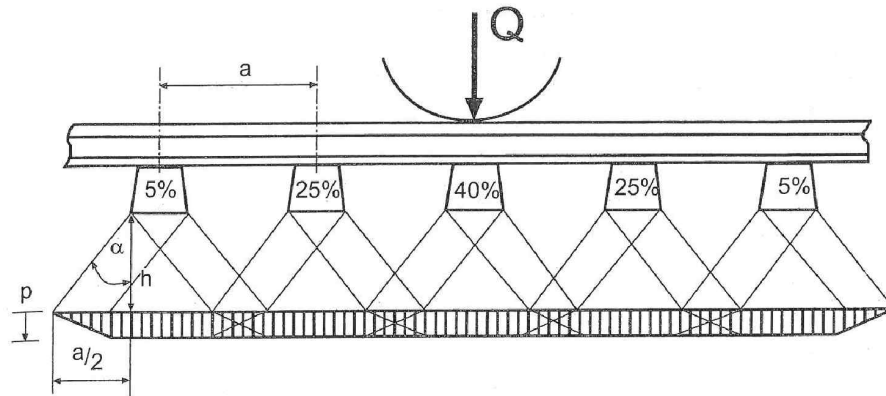
$$P_{dyn} = P_{eff} \times DAF$$

- 여기서, $V \leq 60 \text{ km/h}$ 일 경우, $DAF = 1 + t \cdot \phi$, $60 < V \leq 350 \text{ km/h}$ 여객열차일 경우, $DAF = 1 + t \cdot \phi \left(1.0 + 0.5 \frac{V-60}{190}\right)$, $60 < V \leq 140 \text{ km/h}$ 화물열차일 경우, $DAF = 1 + t \cdot \phi \left(1.0 + 0.5 \frac{V-60}{80}\right)$
- P_s 는 정적윤중(kN), P_{eff} 는 유효윤중($P_s \times 1.2$, kN), P_{dyn} 는 동적윤중(kN), DAF (Dynamic Amplitude Factor)는 동적할증계수, t 는 확률의 신뢰구간에 좌우되는 표준편차의 가중치(접촉응력, 레일, 레일체결장치, 침목, 도상(슬래브) 계산 시 $t=3$ 적용), ϕ 는 궤도품질에 좌우되는 계수(양호한 궤도의 경우 $\phi = 0.2$ 적용)

<표 33> 속도에 따른 최대시험하중

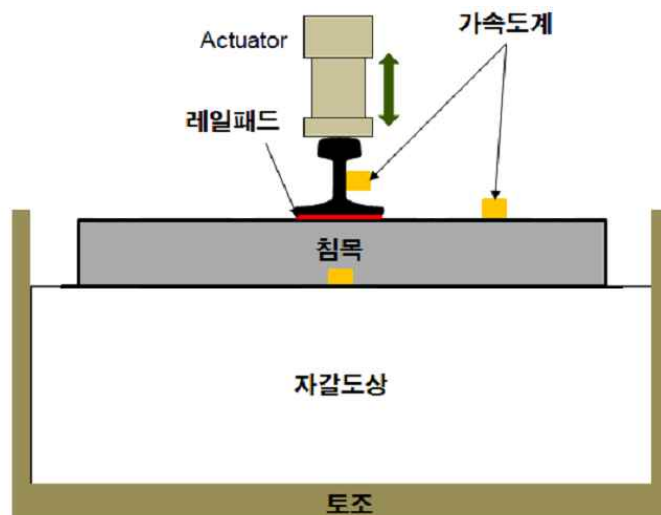
구 분	Ps(kN)	Vmax(km/h)	DAF	Pdyn(kN)	0.4xPdyn(kN)
여객/화물 혼용선	110	140	1.900	251	100
여객 전용선	82.5	350	2.058	204	81

- 따라서, 시험 최대하중은 설계시 불리한 조건에 해당하는 여객/화물 혼용선의 최고 설계속도인 140 km/h에 의하여 산정된 100 kN으로 결정함



<그림 6> 열차하중에 의한 침목위치 별 하중 분담률

- 하중재하장치는 유압식 액츄에이터(hydraulic actuator)로서 아래과 같으며 최대 동적하중 30ton, 최대정적하중 50ton을 기동할 수 있고 궤도 상에서의 차량 설계 속도(V)를 고려하여 하중주파수(load frequency) 변화를 최대 5Hz까지 가할 예정임



<그림 7> 하중재하시험 모식도



<그림 8> 반복하중 재하장치

- 정재하시험의 목표하중은 여객/화물 혼용선의 정적윤중인 110 kN의 40%에 해당하는 44 kN을 기준으로 0 kN부터 5kN씩 단계별 재하를 3회 실시하여 압전소자로부터 발생하는 전압 및 궤도의 강성을 측정함
- 동재하시험은 정적차륜하중이 44kN 일 때 동적차륜하중 100 kN, 진동주파수 5Hz에 대하여 재하횟수 5만회 실시
- 압전소자 및 적층구조에 따른 모든 시험을 동일한 조건으로 동재하시험 수행

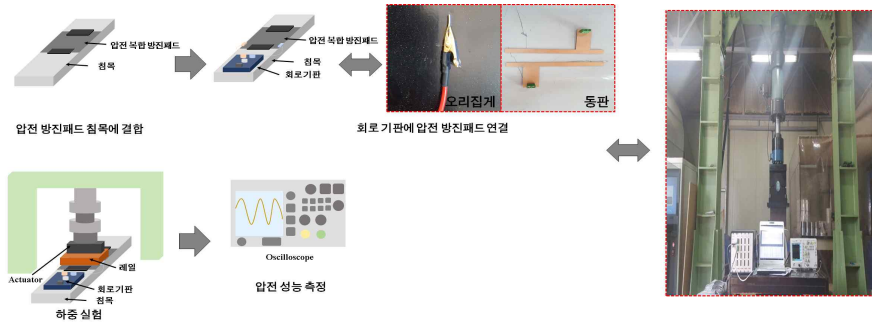
5. 압전소재를 이용한 진동 저감형 압전소재(압전소자+고분자재료) 압전 성능평가

가. 액추에이터를 이용한 압전 압전소재 패드 성능 검증

(1) 압전소재 레일패드 압전 성능 측정

(가) 압전성능 측정 실험 방법

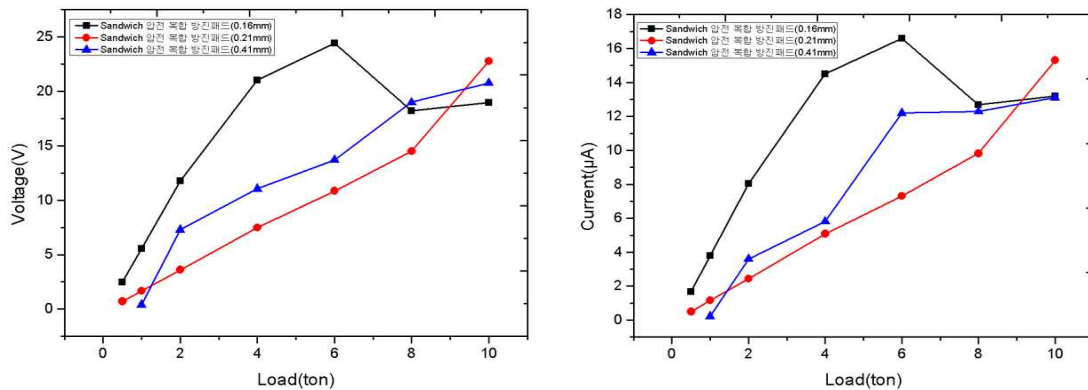
- 침목에 압전소재 방진패드를 결합하고 압전소재 방진패드의 전극부분에 회로기판을 연결함.
- 이후 Actuator를 이용하여 하중(0.5 ~ 10ton)을 반복으로(2500번) 주면서 Oscilloscope를 활용하여 압전소재 방진패드의 압전 성능을 측정함.



<그림 3-8> 압전소재 방진패드의 압전성능 측정 과정

(나) 압전소재 방진패드의 접착제 두께에 따른 압전 성능 측정

- Sandwich 형태의 압전소재 방진패드(방진패드 두께 : 3.15mm)의 접착제 두께는 각각 0.16mm, 0.21mm, 0.41mm로 제작하여 압전 성능을 측정함.
- 그 결과 접착제 두께가 0.16mm일 때 낮은 압전 성능(Voltage : 18.99V, $13.2 \mu A$)을 보였으나, 접착제 두께가 0.21mm일 때 높은 압전 성능(Voltage : 22.79V, $15.3 \mu A$)을 나타냄.
- 이는 압전소재 방진패드 제작에 있어 접착제 두께가 0.21mm일 때 최적 조건이라고 볼 수가 있음.

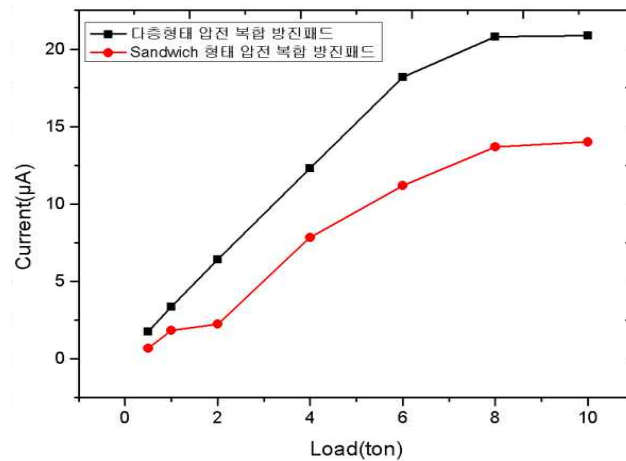
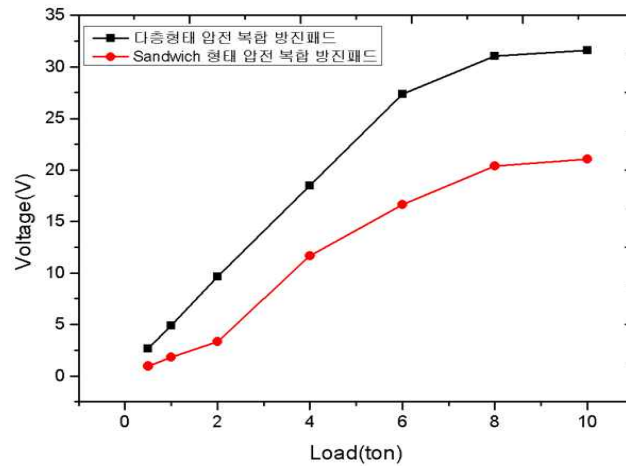


<그림 3-9> 접착제 두께에 따른 Sandwich 형태 압전소재 방진패드 압전 성능(Voltage, Current)

(다) 다층형태 압전소재 방진패드 압전성능 측정

- 다층형태 압전소재 방진패드(방진패드 두께 : 3.15mm, 접착제 두께 : 0.21mm)를 제작하여 압전 성능을 측정하고 Sandwich 형태 압전소재 방진패드(방진패드 두께 : 5.1mm, 접착제 두께 : 0.21mm)와 비교 분석함.

- 그 결과 다층형태 압전소재 방진패드와 Sandwich 형태 압전소재 방진패드보다 높은 압전 성능(Voltage : 31.61V, Current : 20.9 μ A)이 측정됨.
- 이는 Sandwich 형태는 1장의 압전 소재(PVDF film)이지만 다층형태 경우 압전소재(PVDF film)가 2장이기 때문에 더 효율적인 압전성능을 보이는 것으로 판단됨.

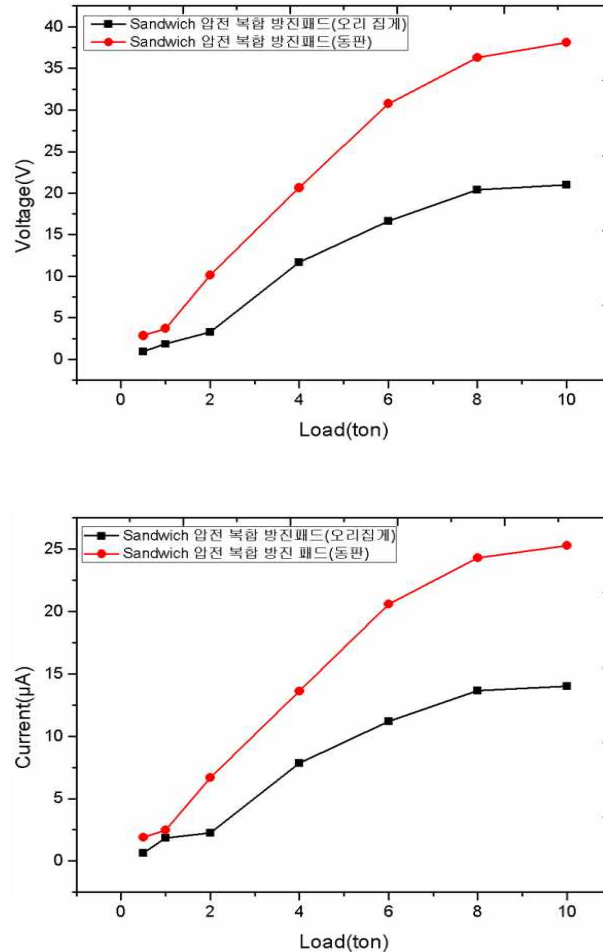


<그림 3-10> 다층형태 와 Sandwich 형태 압전소재 방진패드의 압전 성능 비교 분석

(라) 압전소재 방진패드 전극 연결(오리집게, 동판)에 따른 압전 성능 측정

- Sandwich 형태 압전소재 방진패드(방진패드 두께 : 5.1mm, 접착제 두께 : 0.21mm)를 제작하고 전극 연결을 각각 오리집게 및 동판으로 하여 이에 따르는 압전 성능을 측정함.

- 그 결과 압전소재(PVDF film)에 오리집게로 전극 연결 시 낮은 압전 성능 (Voltage : 21.03V, Current : $14\mu\text{A}$)을 보였으며, 반대로 동판으로 전극 연결 시 높은 압전 성능 (Voltage : 38.11V, Current : $25.3\mu\text{A}$)을 보임.
- 이는 동판이 오리집게 보다 압전소재(PVDF film)에 닿는 면적이 넓고 압전소재 (PVDF film)에 미치는 손상 정도가 적기 때문으로 판단됨.



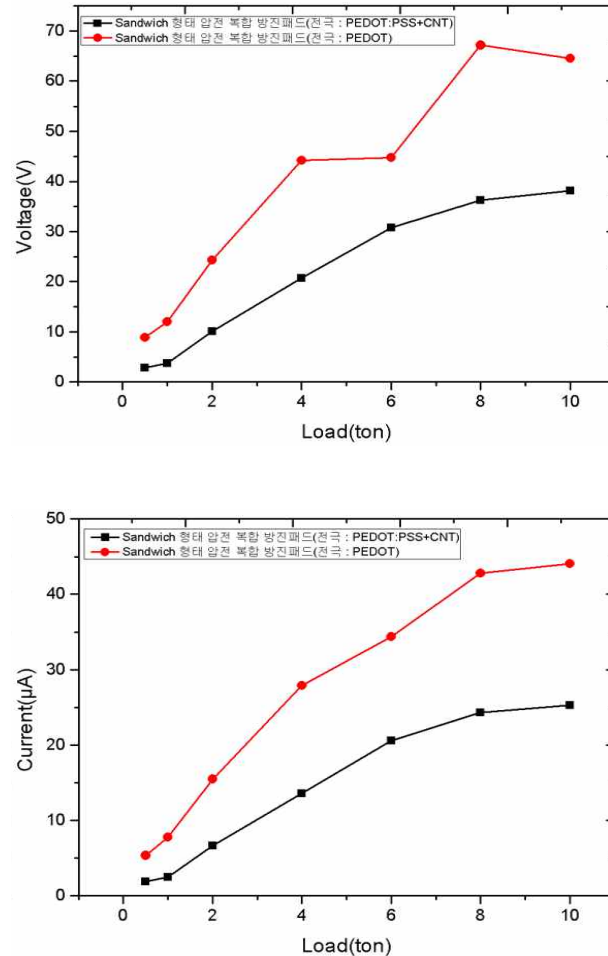
<그림 3-11> 전극 연결(오리집게, 동판)에 따른 Sandwich 형태 압전소재 방진패드 압전 성능(Voltage, Current)

(마) PVDF film 전극 소재에 따른 압전소재 방진패드 압전 성능 측정

- 기존에 사용하던 PEDOT:PSS+CNT-PVDF film과 기상중합으로 합성한 PEDOT-PVDF film으로 제작된 Sandwich 형태 압전소재 방진패드(패드 두께 : 5.1mm, 접착제 두께 : 0.21mm)를 가지고 압전 성능을 측정함.
- 그 결과 PEDOT:PSS+CNT-PVDF film의 압전소재 방진패드는 낮은 압전 성능 (Voltage : 38.31V, Current : $25.3\mu\text{A}$)을 보였지만, PEDOT-PVDF

film의 압전소재 방진패드는 약 2배 높은 압전성능 (Voltage : 64.52V, Current : 44.1 μ A)을 나타냄.

- 이는 PEDOT:PSS+CNT-PVDF film의 경우 저항 값이 8022 Ω 으로 상당히 높아 압전 성능에 부정적인 영향을 미치며, 반대로 PEDOT-PVDF film은 저항 값이 약 50 Ω 이므로 압전 성능에 효율적인 영향을 미치는 것으로 보임.



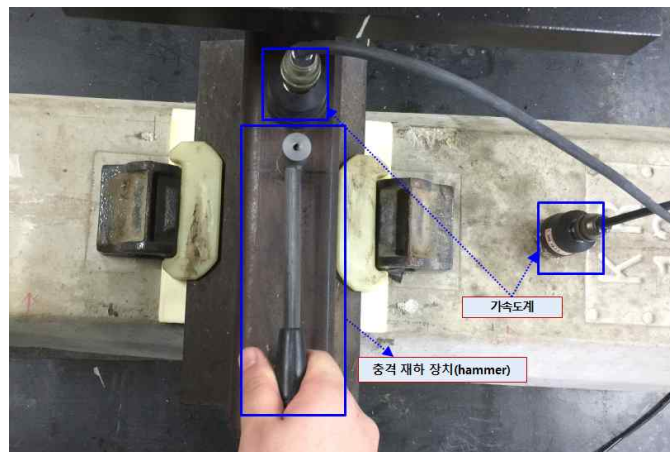
<그림 3-12> PVDF film 전극소재 (PEDOT:PSS+CNT, PEDOT)에 따른 Sandwich 형태 압전소재 방진패드 압전 성능 (Voltage, Current)

6. 개발된 진동저감형 압전소재 레일패드를 적용한 동적 거동 분석

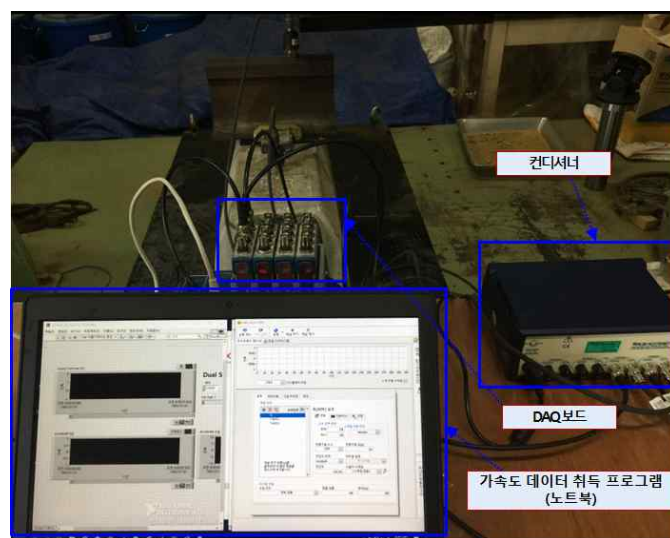
가. 압전소재 레일패드 방진 성능 측정

(1) 압전소재 레일패드 방진 성능 측정 실험 방법

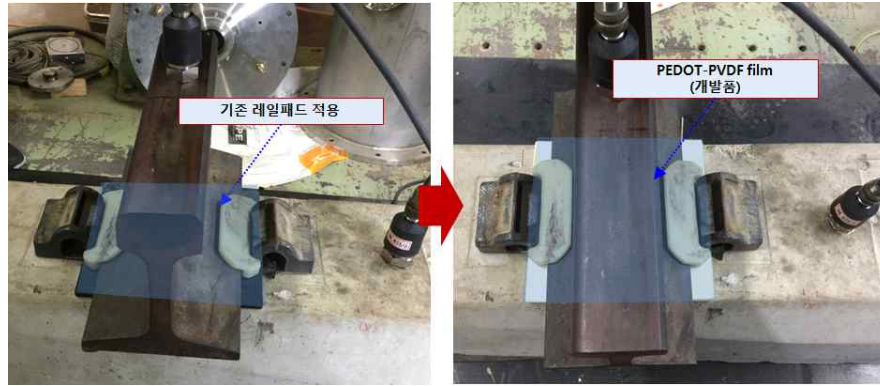
- 침목에 압전소재 레일패드를 결합하고 그 위에 레일을 올린 후 가속도계 센서를 레일 및 침목에 각각 설치하고 앞서 충격재하 장치를 이용하여 충격에 의한 진동의 진폭 및 감쇠비를 확인함.



<그림 3-13> 가속도계 및 충격재하장치를 이용한 기존/개발 레일패드 진동 비교분석



<그림 3-13> 기존/개발 레일패드 진동 비교분석 장비구성



<그림 3-13> 기존/개발 레일패드 진동 비교분석

(2) 압전소재 레일패드의 방진 성능(Damping) 검토

- Half-Power Bandwidth법과 자유진동감쇠법(free vibration decay)을 이용하여 감쇠비를 구할 수 있음.
- Half-Power Bandwidth법은 공진주파수 근처에서 주파수응답곡선의 폭을 측정함으로써 이루어진다. 그림 3.10는 전형적인 주파수 응답곡선을 보여준다. 주파수응답곡선에서 로그편차를 아래 식으로부터 구할 수 있음.

$$\delta = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_r^2} \cdot \sqrt{\frac{A^2}{A_{\max}^2 - A^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - 2D^2}}{1 - D^2} \quad (3.26)$$

- 여기서, f_1 는변형률 진폭이 A인 공진 바로 전의 주파수, f_2 는 변형률 진폭이 A인 공진 바로 후의 주파수, f_r 는 공진주파수, D는 감쇠비임

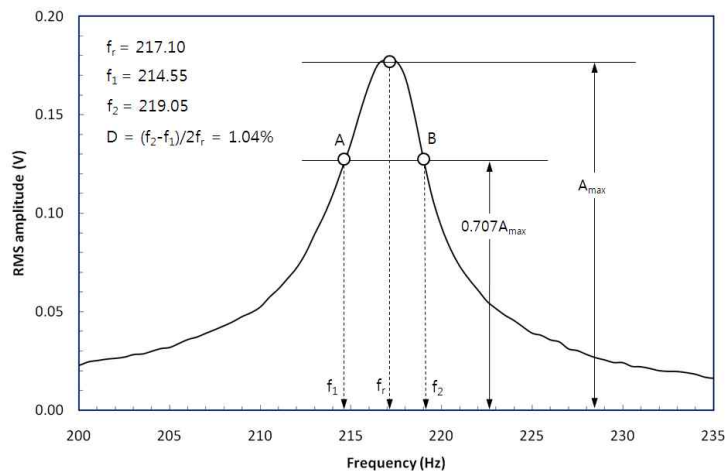


그림 3.10 Half-Power Bandwidth법을 이용한 재료감쇠비의 결정

- 감쇠비가 매우 작은 경우 A를 Half-Power Point인 $0.707A_{\max}$ 로 하면 아래 식과 같이 간단히 구할 수 있음.

$$\delta \simeq \pi \frac{f_2 - f_1}{f_r}$$

$$D \simeq \frac{f_2 - f_1}{2f_r}$$

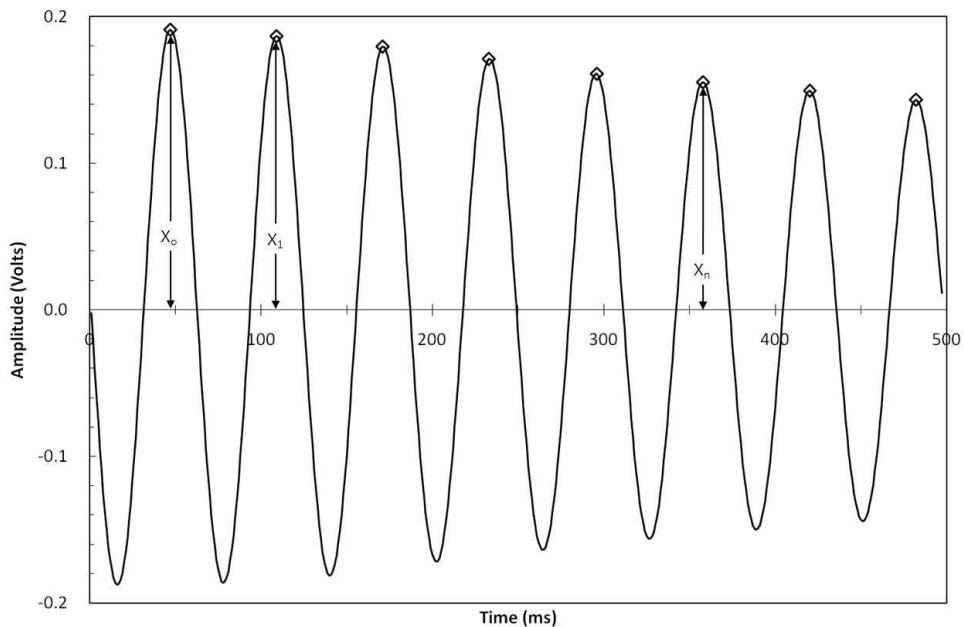
- 자유진동감쇠법은 시료가 공진주파수로 진동하는 동안 가진력을 차단하면 아래와 같은 자유진동감쇠곡선이 기록되며, 이 감쇠곡선에서 각 cycle의 진폭을 측정하고, 아래와 같이 잇따른 두 개의 진폭의 자연로그비, δ 를 계산함.

$$\delta = \ln \frac{X_n}{X_{n+1}} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}}$$

- 여기서, X_n , X_{n+1} 는 두 개의 잇따른 진폭, D는 감쇠비 임.

- 아래 식으로부터 감쇠비는 다음식과 같이 구할 수 있음.

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}}$$



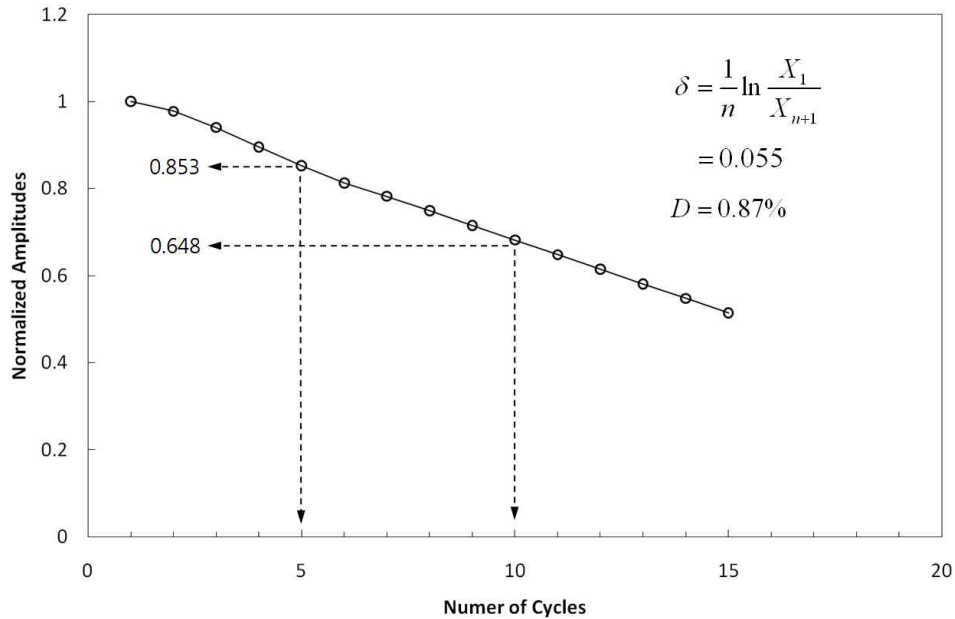


그림 3.11 자유진동 감쇠곡선을 이용한 감쇠비 결정방법

- 위에서 제시한 두가지 감쇠비 구하는 방식중에서 자유진동감쇠법(free vibration decay)을 이용하여 감쇠비를 구할 수 있음.
- 앞서 가속도 센서를 레일 및 침목에 각각 설치할 하고 앞서 충격재하 장치를 이용하여 충격하여 취득한 가속도 데이터를 활용하고 레일/침목, 기존/개발된 레일 패드별로 진폭 및 감쇠비를 아래 그림과 같은 방법을 활용하여 확인함.

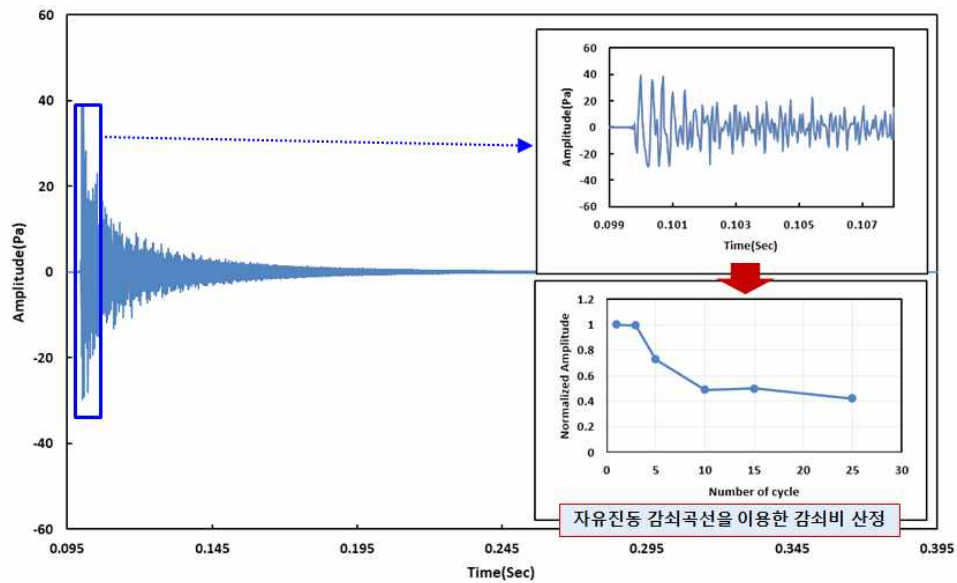
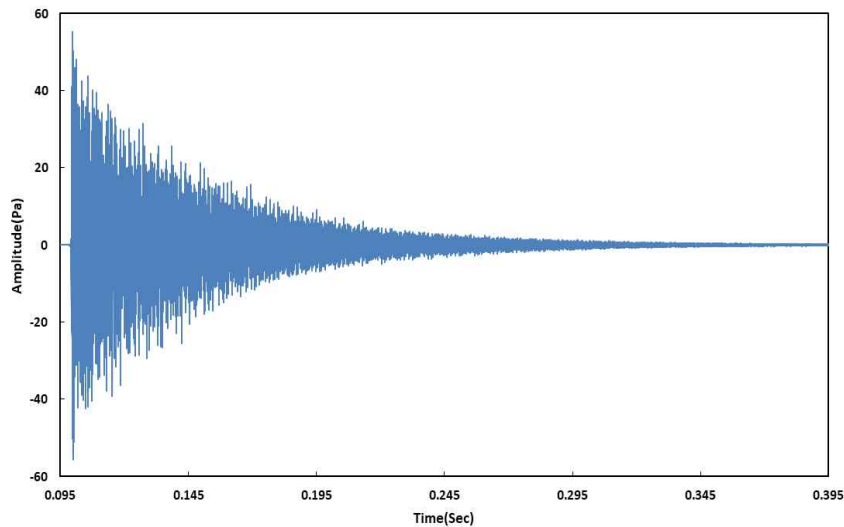
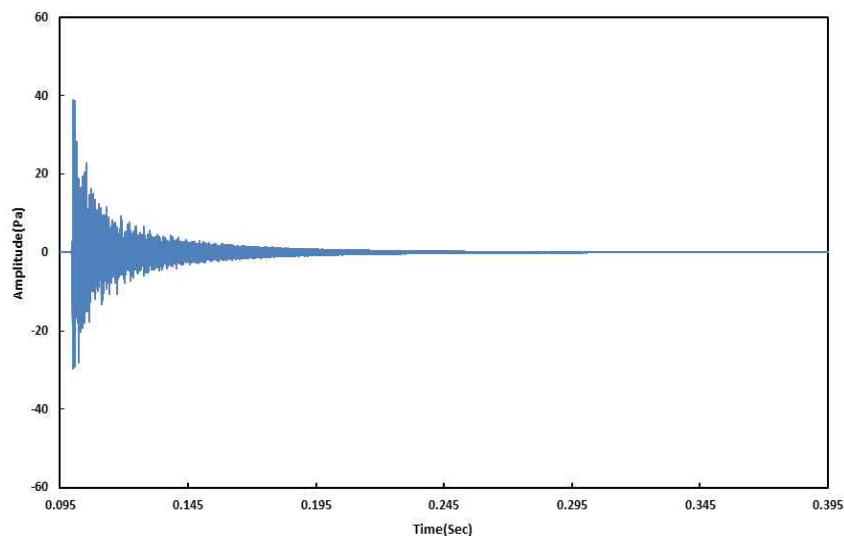


그림 3.11 자유진동 감쇠곡선을 이용한 감쇠비 결정방법

- 앞서 가속도 센서를 레일 및 침목에 각각 설치하고 앞서 충격재하 장치를 이용하여 충격하여 취득한 가속도 데이터를 활용하고 레일/침목, 기존/개발된 레일패드별로 진폭 및 감쇠비를 아래 그림과 같은 방법을 활용하여 확인함.
- 기존 레일패드와 개발된 압전소재 레일패드(PEDOT -PVDF)의 진동특성 확인을 위해 해당조건(기존 레일패드/개발 레일패드) 별로 각각 30회 이상의 가속도 데이터를 취득시험을 실시하였음.
- 진동특성을 확인한 결과 본 연구를 통해 제시한 압전소재 레일패드(PEDOT - PVDF)의 진폭(Amplitude)이 약 10~20% 정도로 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었음.



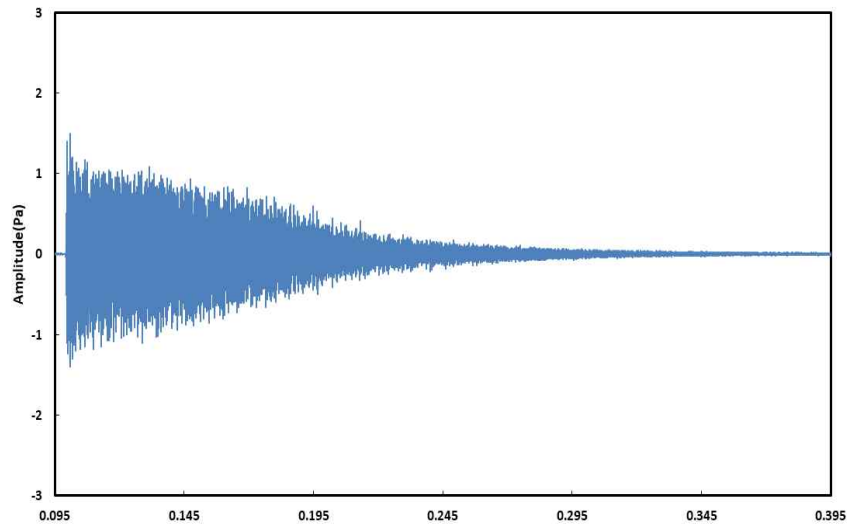
(a) 기존 레일패드를 적용한 경우의 레일에서의 가속도 데이터



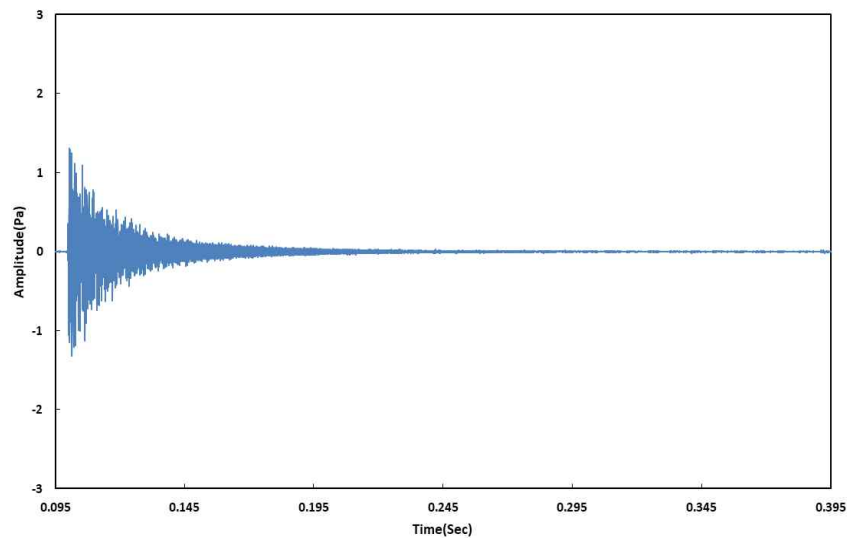
(b) 개발된 레일패드(PEDOT -PVDF)를 적용한 경우의 레일에서의 가속도 데이터

그림 3.11 기존/개발 레일패드 진동 가속도 특성 비교분석(레일)

- 상부(레일)에 재하된 하중이 패드를 거쳐 일정 크기가 감소된 후 침목으로 전달된 하중에 의한 진동특성은 앞서 제시한 레일의 진폭(Amplitude)에 비해 많은 감소를 보임.
- 또한, 침목에서 측정한 기존 레일패드와 압전소재 레일패드(PEDOT -PVDF)의 비교분석 결과도 상부레일과 동일하게 개발된 압전소재 레일패드(PEDOT -PVDF)의 진폭이 감소된 것을 확인할 수 있었음.



(a) 기존 레일패드를 적용한 경우의 하부 침목에서의 가속도 데이터



(b) 개발된 레일패드(PEDOT -PVDF)를 적용한 경우의 하부 침목에서의 가속도 데이터

그림 3.11 기존/개발 레일패드 진동 가속도 특성 비교분석(침목)

- 아래 표는 각각의 실험을 통해 취득한 가속도 데이터의 감쇠비를 자유진동감쇠법 (free vibration decay)을 이용하여 구한 결과임.
- 감쇠곡선에서 각 cycle의 진폭을 측정하고, 아래와 같이 잇따른 두 개의 진폭(5번째, 15번째)의 자연로그비, δ 를 계산함.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{X_n}{X_{n+1}}$$

- 위에서 계산된 자연로그비, δ 를 활용하여 최종적으로 감쇠비는 다음식과 같이 구할 수 있음.

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}}$$

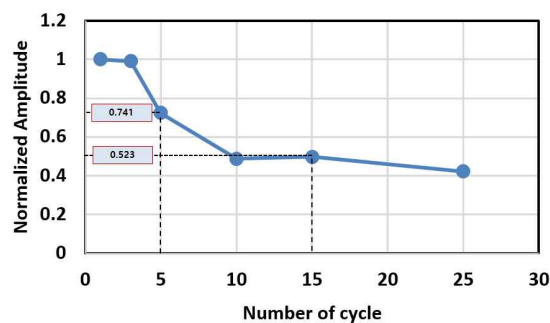


그림 3.11 레일패드 감쇠비 산정을 위한 자연로그비 δ 산정 방법

- 위 방법을 이용한 감쇠비 검토 결과, 압전소재 레일패드(PEDOT -PVDF)의 감쇠비가 레일에서 평균 2.46%, 침목에서 3.20% 정도로 나타났으며, 기존 레일패드는 레일서 1.37%와 침목에서 1.33%를 나타내었음.
- 전체적으로 이번 연구를 통해 개발한 압전소재 레일패드(PEDOT -PVDF)가 감쇠특성이 개선된 것으로 분석되었음.

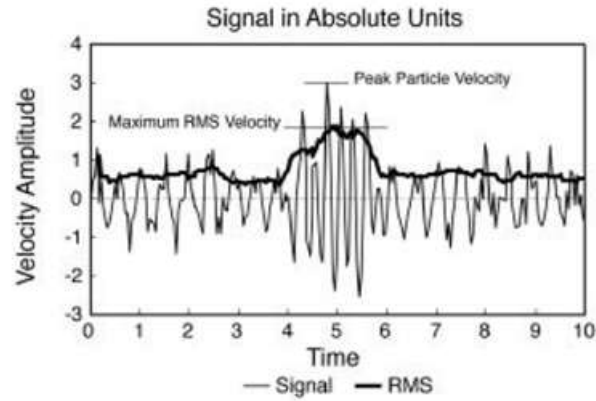
<표 3-76> 기존/개발 레일패드 감쇠비 비교분석 결과

구분	기존 레일패드(레일)				개발된 레일 패드(레일)			
	Xn	Xn-1	δ	D	Xn	Xn-1	δ	D
1	0.950	0.750	0.016	1.596%	0.741	0.523	0.023	2.352%
2	0.912	0.741	0.014	1.400%	0.841	0.524	0.032	3.194%
3	0.851	0.713	0.012	1.196%	0.641	0.421	0.028	2.838%
4	0.898	0.713	0.015	1.557%	0.713	0.513	0.022	2.222%
5	0.721	0.613	0.011	1.095%	0.532	0.413	0.017	1.710%

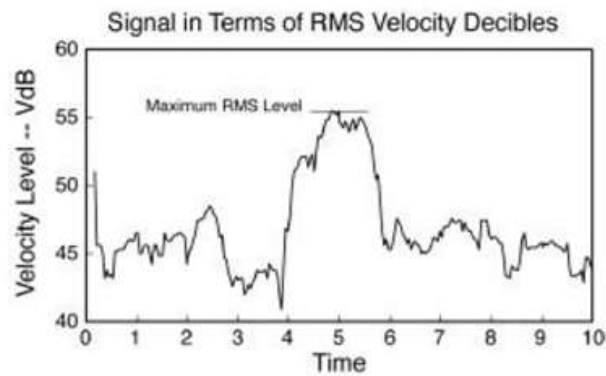
구분	기존 레일패드(침목)				개발된 레일패드(침목)			
	Xn	Xn-1	δ	D	Xn	Xn-1	δ	D
1	0.800	0.650	0.014	1.402%	0.950	0.550	0.036	3.690%
2	0.985	0.713	0.021	2.176%	0.851	0.560	0.028	2.827%
3	0.813	0.701	0.010	1.007%	0.752	0.440	0.036	3.615%
4	0.716	0.612	0.010	1.061%	0.742	0.423	0.037	3.788%
5	0.910	0.785	0.010	1.003%	0.810	0.595	0.021	2.086%

(3) 기존/개발된 레일패드의 최대입자속도(PPV) 비교분석

- 진동(vibration)은 반복운동의 일종이며 변위(displacement), 속도(velocity) 및 가속도(acceleration)로 표현되며, “운동이 반복(반복운동)된다” 함은 진동체의 순 이동(net movement)이 없고 어떠한 물리량으로서의 운동 평균이 영(‘0’)이 된다는 의미임
- 일반적으로 진동을 표현하기 위한 가장 손쉬운 물리량으로서 속도 또는 가속도 보다 ‘변위’를 들 수 있지만 지반진동의 경우는 예외로 가속도 또는 속도를 사용하여 표현함
- 이는 일반적으로 지반진동 측정을 위하여 사용하는 센서가 가속도 또는 속도를 측정하고 더욱이 진동에 대한 인간의 체감도 또는 건조물 및 장비 등의 반응을 가속도 및 속도로 표현하는 것이 보다 정확하기 때문임
- 앞서 설명한 바와 같이 진동(2장)은 급격한 반복운동으로 표현되며 그 평균은 ‘0’이 되며, 진동의 크기 즉, 진폭(amplitude)을 정량적으로 표현 하는 여러 가지 방법을 아래 그림에 설명함
- 진동의 원 데이터(raw data)를 속도로 표현(진동속도)할 경우, 시간축에 대해 속도 ‘0’ 점을 기준으로 급격히 반복적으로 변화하는 물리량이며, 이때 최대입자속도(peak particle velocity; PPV)는 측정된 진동신호의 정(正 : +, positive) 또는 부(負: -, negative)의 영역 중 순간 최대진동속도를 의미함.
- PPV는 폭발의 크기를 주변지반에서 모니터링 할 때 하며, 건조물에 미치는 손상 정도를 파악하기 위해서 PPV를 사용하는 것이 합리적이지만, 사람이 진동에 대해 느끼는 체감도를 표현하기에는 적절하지 않음.
- 사람이 진동을 느끼기 위해서는 약간의 시간지체가 요구되기 때문이며 진동 체감시에도 사람의 몸은 PPV가 아닌, 평균 진동진폭(average vibration amplitude)에 대해 반응하는 것으로 알려져 있음.



(a)



(b)

<그림 2.27> 진동속도 신호의 표시방법 (ISO 2631-2-2003)

- PPV 또는 RMS는 초당 변위값 즉, meter/sec 또는 inch/sec으로 표현하며, 일반적인 표현방법은 아니지만, 데시벨(decibel)로도 표현할 수 있음.
- 데시벨 표현법은 수치로 표현되는 진동의 크기를 압축해서 RMS 진동그래프를 데시벨로 다시 그려 도시하는 방식으로 데시벨로 표현하는 진동속도 수준은 아래 식으로 정의됨.

$$L_v = 20 \times \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right)$$

- 여기서, L_v 는 데시벨로 표현한 속도수준이며, v 는 RMS 속도 진폭, v_{ref} 는 참고 속도 진폭임
- 데시벨로 표현 시 참고값은 반드시 정의되어야 하며 진동속도의 참고값(v_{ref})은 1×10^{-8} m/sec 또는 5×10^{-8} m/sec을 사용하며, 진동속도의 참고값은 변량이므로 진동속도를 데시벨로 표현할 때는 반드시 참고값을 정의한 후 사용하여야 함.

- 일반적으로 미국의 경우 1×10^{-6} inch/sec을 참고값으로 사용하며, 진동의 크기를 데시벨로 표시할 경우 이를 VdB 단위로 표현하기도 함. (ISO 2631-2-2003) (ANSI S3.29-1983)
- 해당 분석에서는 기존 레일패드와 개발된 압전소재 레일패드(PEDOT -PVDF)의 진동 데시벨 환산을 통한 철도 연변 진동제한 기준을 만족여부는 기존 레일패드도 만족할 것으로 판단되어, PPV를 상호 비교하여 상대적 평가를 하였음.
- 또한, 기존/개발된 레일패드별로 진폭 및 감쇠비 분석에서 레일에 설치한 가속 계데이터를 활용하고 MATLAB 프로그램의 detrend 함수를 이용하여 가속도 값(m/s^2)을 속도(m/s)로 변환하였음.

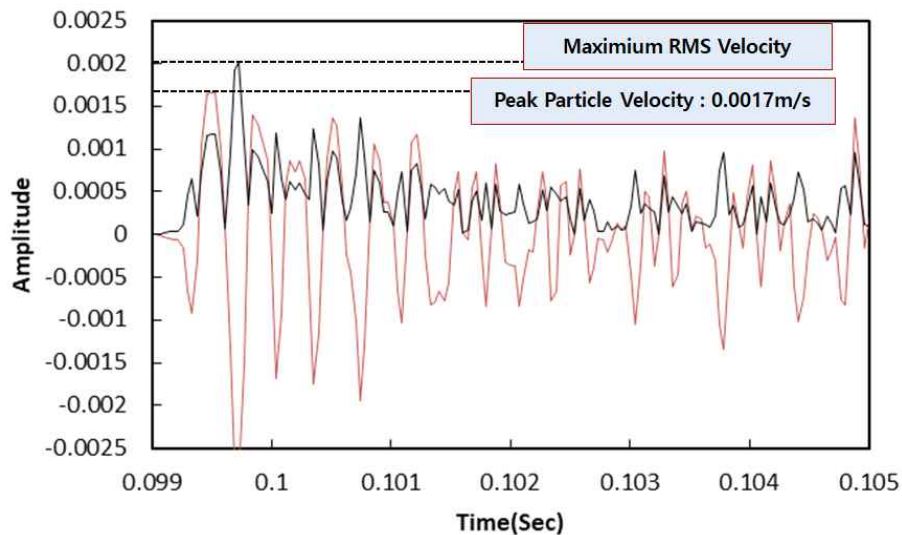


그림 3.11 기존 레일패드(PEDOT -PVDF)의 PPV 측정 결과(레일)

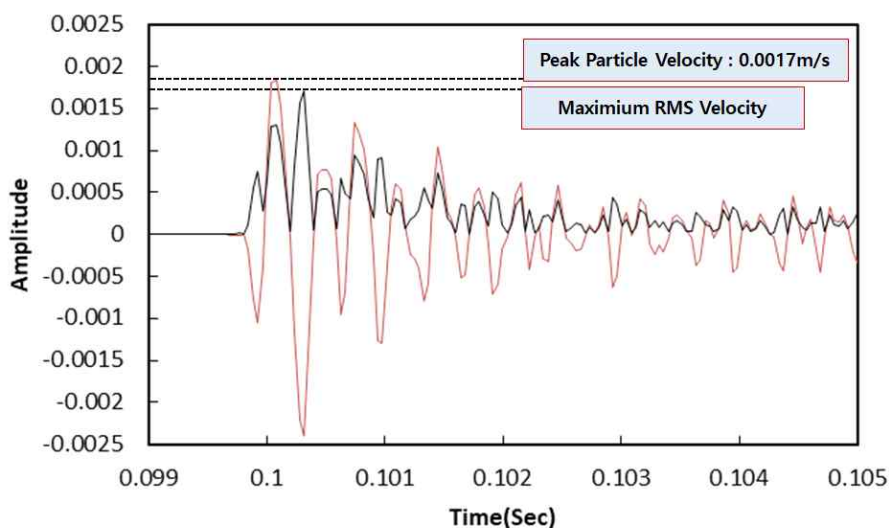


그림 3.11 개발된 레일패드(PEDOT -PVDF)의 PPV 측정 결과(레일)

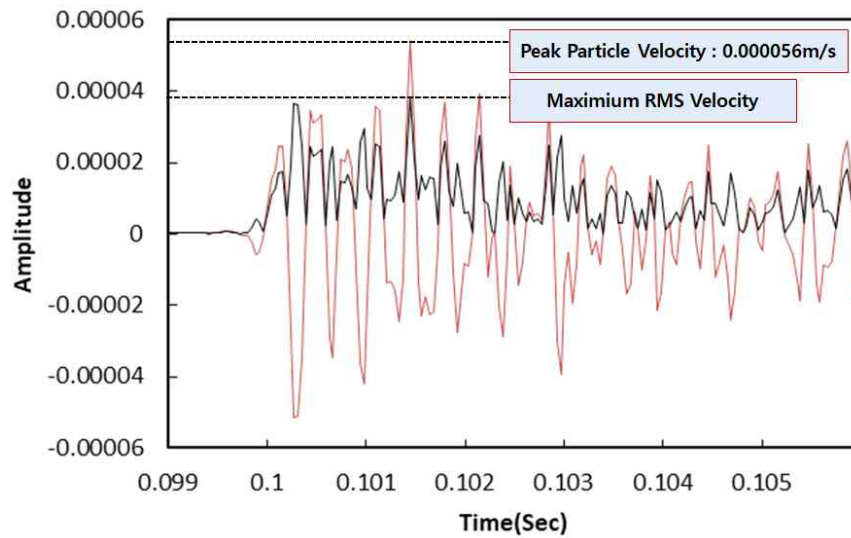


그림 3.11 기존 레일패드(PEDOT -PVDF)의 PPV 측정 결과(침목)

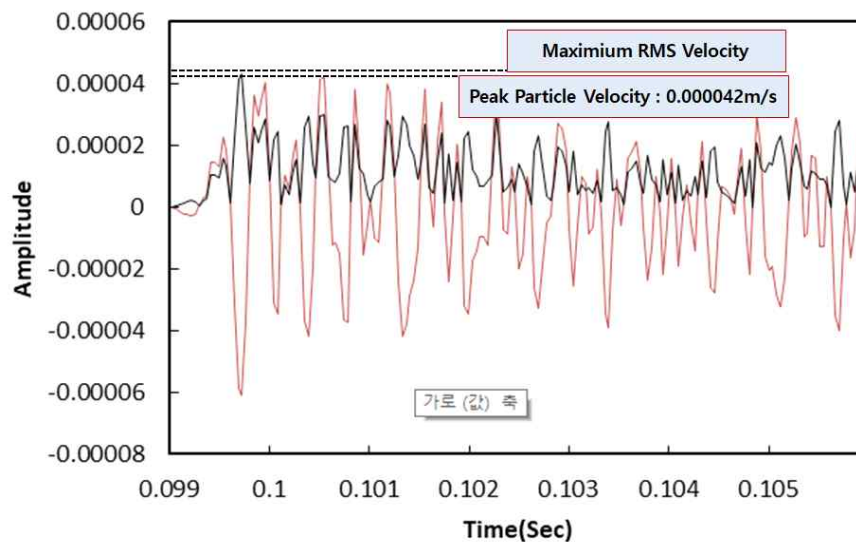


그림 3.11 개발된 레일패드(PEDOT -PVDF)의 PPV 측정 결과(침목)

- 분석결과 레일상부에서 측정된 데이터의 PPV는 기존레일패드와 개발된 레일패드(PEDOT -PVDF)의 차이점을 분석할 수 없었으나, 침목부에서 측정한 값에서는 개발된 레일패드의 PPV값이 감소한 것을 확인하였음(0.000056 → 0.000042 m/s, 2.5%의 감소)

나. 압전소재 방진패드 내구성(박리) 측정

(1) 압전소재 방진패드 내구성(박리) 측정 실험

- Sandwich, 다층형태 및 VPP-PEDOT 압전소재 방진 패드를 침목에 결합 후 앞서 압전성능 평가(하중 : 0.5 ~ 10ton(각각의 반복 횟수 : 2,500번)) 이후 하중 8ton에서 지속적인 반복 횟수 : 2,500번을 주어서 압전소재 방진 패드의 내구성(박리)을 측정함.
- 그 결과 Sandwich, 다층형태의 압전소재 방진패드 경우 압전성능 평가(하중 : 0.5 ~ 10ton(각각의 반복 횟수 : 2,500번))이후 하중 8ton에서 반복 횟수 : 20,000번 일 때 박리 현상이 관찰 되었으며, VPP-PEDOT 압전소재 방진패드 경우 압전성능 평가(하중 : 0.5 ~ 10ton(각각의 반복 횟수 : 2,500번)) 이후 하중 8ton에서 반복 횟수 : 20,000번 일 때 박리 현상이 관찰됨.



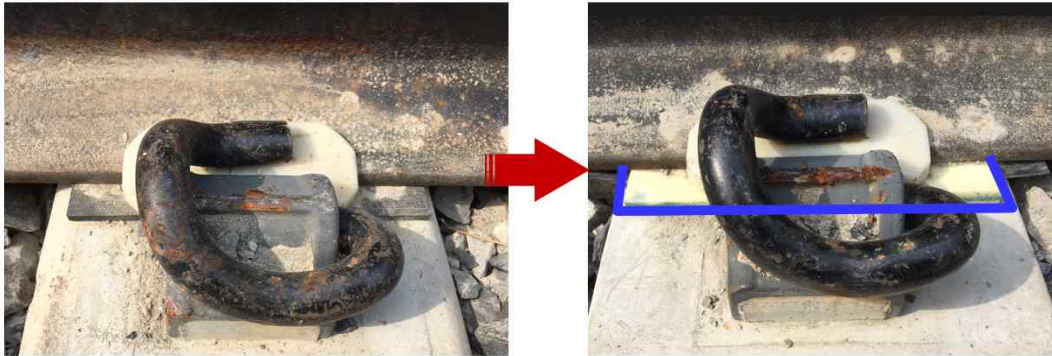
<그림 3-15> 압전소재 방진패드 내구성(박리) 측정

1. 압전소자 레일패드를 활용한 궤도 안전진단 시스템 간이 적용성 평가

- 압전소자 레일패드의 현장 적용 가능성과 궤도안전시스템의 성능검토를 위해 배재대학교 야외 시험동의 궤도간이부설시험장을 이용하여 시험을 실시함.

가. 시험방법

1. 기존 설치된 KR 체결구 레일패드를 제거하고 본 연구를 통해 개발된 압전소재 레일패드를 설치함.



2. 침목기준으로 10개(레일패드 총 20개)에 6m정도의 설치구간에 압전레일패드를 설치하고 유선으로 전류/전압값을 측정할 수 있는 회로구성
3. 본 연구를 통해 개발된 자가발전 시스템과 해당 레일패드를 연결하여 발생값 측정



3. 측정된 전류/전압값을 트롤리에 설치된 분석프로그램으로 무선전송
- 실험에서 사용한 ZigBee 모듈은 ZigBee Alliance 표준에 따라 Ember사에서 제작한 EM250 RCM (Radio Communication Module)을 사용
(4GHz 대역을 사용하며 IEEE 802.15.4-2003 규격을 적용)
 - 1개의 싱크 노드 즉 Coordinator와 20개의 레일패드에서 들어오는 데이터를 측정한 데이터를 전송할 예정(배터리는 6V 4FM 사이즈 2개 사용)



나. 시험결과

(1) 전류/전압 측정결과 압전레일패드 20개 활용 시 아래와 같은 전압/전류값이 발생할 것으로 판단됨.

$$V(\text{전압}) = V_1 + V_2 \dots + V_{20} = 46.031 V$$

$$I(\text{전류}) = 1.53 \times 10^{-4} A$$

(2) 데이터 전송 파워는 적절한 수준으로 유지하며 진행.

<표 3-76> EM250 송신/수신 특성

구분	Min	typ.	Max	Unit
최대출력(boost mode)		5		dBm
최대출력	0	3		dBm
최소출력		-32		dBm
수신감도(boost mode)		-100	-95	dBm
수신감도		-99	-94	dBm

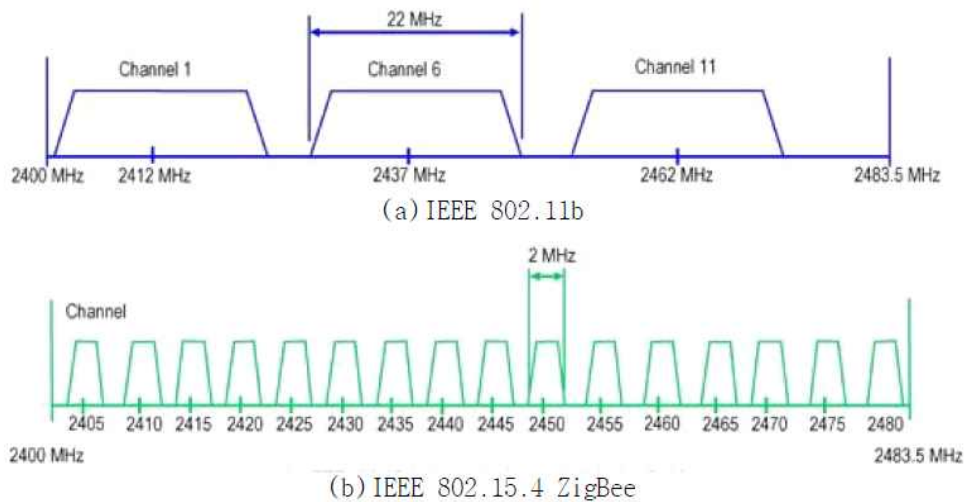
(3) PANID는 0x23ff로 설정하였고, 채널은 같은 2.4 GHz 대역의 주파수를 사용하는 IEEE 802.11b (WiFi)와 겹치지 않는 25번 채널(2.457 GHz)로 설정하여 실험 진행

```

#ifndef EMBER_MAX_DEPTH
#define EMBER_MAX_DEPTH
#elif (EMBER_MAX_DEPTH > 15)
// Depth is a 4-bit field
#error "EMBER_MAX_DEPTH cannot be greater than 15"
#endif
#ifndef EMBER_MAX_HOPS
#define EMBER_MAX_HOPS (2 * EMBER_MAX_DEPTH)
#endif

```

<그림 3-77> 최대 홉 수 정의



<그림 3-78> ZigBee와 WiFi의 채널 별 주파수

- (4) 데이터 전송 시동 12,340번 중 MAC 계층 재시도 4회, APS 계층 재시도 4회를 시도하였으며, 총 전송실패는 9건이 발생하였음.

따라서, 데이터 전송 신뢰성 99.344%를 확보함

<표 3-> 데이터 전송 신뢰성 검토 결과

홉수	전송성공			전송실패
	재시도 없음	전송재시도		
		MAC 계층 재시도	APS 계층 재시도	
20	12,340	38	2	9

2. 궤도 안전진단 시스템 궤도결합 측정 성능평가

가. 용어정의 및 설명

(1) 반복성(Repeatability)

○ 다음과 같은 동일한 조건 즉, 속도 및 주행방향이 동일한 조건하에서 반복 측정값의 일치 여부

- 동일한 측정방법
- 차량주행 방향 동일
- 해석방법의 동일
- 유사한 환경조건
- 반복 측정시험간 시간간격이 작을 것

(2) 재현성(Reproducibility)

○ 다음과 같은 조건하에서 반복 측정값의 일치여부

- 시험속도 상이
- 차량주행 방향 상이
- 상이한 환경조건
- 반복 측정시험간 시간간격이 작을 것

<표 3> 파장대역 및 차단주파수

기 호	설 명	단 위
D1	궤도틀림 파장대역 $3m < \lambda \leq 25m$	m
D2	궤도틀림 파장대역 $25m < \lambda \leq 70m$	m
D3	궤도틀림 파장대역 $70m < \lambda \leq 150m$ 면틀림 궤도틀림 파장대역 $70m < \lambda \leq 200m$ 줄틀림	m
Lo	궤도틀림 파장대역 하한치 D1, D2, D3	m
Lu	궤도틀림 파장대역 상한치 D1, D2, D3	m
λ	궤도틀림 파장	m
ℓ	뒤틀림 현길이(Twist base-length)	m

나. 신호처리 및 데이터 처리

(1) 샘플링

- 일정한 거리간격으로 측정되어야 하며, 0.5m 간격 이내이어야 함

(2) 필터링

- 상호비교시에 사용되는 필터 특성은 반드시 동일하여야 하므로 사용된 필터의 차단 공간주파수, 필터종류 및 감쇠율 등을 반드시 명시하여야 함
- 다음과 같은 조건을 만족하는 필터를 사용하여야 함.
 - 하한치 차단 파장대역 (Lo) : -3dB 상당치
 - 상한치 차단 파장대역 (Lu) : -3dB 상당치
 - 24 dB/octave 이상의 기울기

(3) 매개변수 해석

- 매개변수 해석에는 다음과 같은 방법을 포함하여야 함.
 - 평균치와 표준편차 계산
 - 명시된 한계치를 초과하는 값에 대하여 발생위치, 궤도틀림종류, 결함의 정도 및 길이

다. 성능검증의 절차

- 새로 개발된 검측시스템은 반복성과 재현성에 대한 성능검증을 수행하여야 하며, 개발된 궤도검측 장비 및 처리시스템의 효과적 운영을 위해서는 캘리브레이션(Calibration) 및 현장시험 검증을 수행하여야 함.

(1) Calibration

- 측정시스템의 정확성을 보증하기 위하여 캘리브레이션이 수행되어야 하며, 제조사는 캘리브레이션 매뉴얼을 제시하여야 함.
- 다음과 같은 경우에 Calibration을 실시하여야 한다.
 - 궤도틀림 검측시스템의 차량 설치 이후
 - 궤도틀림 검측시스템에 영향을 미칠 수 있는 검측시스템의 S/W 또는 H/W, 검측장비, 차량 등 변화가 있는 경우
 - 제조사에서 제시한 검측시스템 및 차량의 주기적 보수 또는 유지관리 이후

(2) 현장시험에 의한 검증

- 검측시스템에 대한 정지상태에서의 검증 뿐 만 아니라 동일구간에 대한 반복측정치간의 비교(repeatability & reproducibility)를 수행하여 검측시스템을 평가하여야 함.
- 현장시험에 의한 검증은 다음과 같은 경우에 수행하여야 함.
 - 새로운 또는 보완된 검측시스템의 최초 시험
 - 검측시스템의 유지보수 및 수리 이후

(3) 시험조건

- 정상적 차량 운행조건
- 검측차의 속도 및 운행선의 속도를 고려하여 검측 최대 속도 및 최소 속도를 포함한 다양한 속도에서의 시험을 실시
- 양방향 차량 주행시험
- 다양한 곡선반경, 캔트, 곡선의 교차 및 직선구간 등 궤도설계 특성을 반영하 광범위한 시험을 실시
- 다양한 궤도틀림 수준에 대한 시험을 실시

라. 현장시험 기준

- 코히어런스 함수는 시간영역의 상관함수에 상응하는 주파수영역의 함수를 의미한다. 이는 전달함수의 신뢰성 즉, 입력과 출력사이의 선형성의 정도를 나타내는 척도임.

(1) 반복성(Repeatability) 시험

(가) 궤도틀림 측정치의 통계분석

- 각 주행시험간 검측결과 사이의 차이값의 분포를 평가하여야 하며, 95%확률 분포의 값을 다음에 나타내었음.

<표 3-9> 반복성(Repeatability) - 변수값 - 면틀림 및 줄틀림- 95th %

변 수	단위(m, mm)		
	과장 대역		
	D1	D2	D3
면 틀 림	± 0.5	± 1	± 3
줄 틀 림	± 0.7	± 2	± 4

<표 3-10> 반복성(Repeatability) - 변수값 - 궤간 및 수평틀림 - 95th %

항 목	단위(mm)
궤 간	± 0.5
수평 틀림	± 1.5

<표 3-11> 반복성(Repeatability) - 변수값 - 뒤틀림(Twist) - 95th %

변 수	단위(m, mm)	
	$\ell \leq 5.5m$	$5.5m < \ell \leq 20m$
뒤 틀 림(측정치)	$\pm 0.7/\ell$	$\pm 0.8/\ell$
뒤 틀 림(수평틀림을 이용한 계산치)	$\pm 1/\ell$	$\pm 2/\ell$
ℓ : 뒤틀림 현길이		

(나) 표준편차에 대한 통계분석

- 각 표준편차의 계산이 요구되는 궤도틀림 항목에 대하여 각각의 주행시험에서 획득한 표준편차사이의 차이값의 분포도를 분석하여야 하며 다음 표에서 한도치를 나타냄.

<표 3-12> 반복성(Repeatability) - 표준편차 - 면틀림 및 줄틀림 - 95th %

변 수	단위(m, mm)		
	파장 대역		
	D1	D2	D3
면 틀 림	0.04	not applicable	not applicable
줄 틀 림	0.06	not applicable	not applicable

<표 3-13> 반복성(Repeatability) - 표준편차 - 뒤틀림 - 95th %

변 수	단위(m, mm)	
	$\ell \leq 5.5m$	$5.5m < \ell \leq 20m$
뒤 틀 림(측정치)	$0.04/\ell$	$0.04/\ell$
뒤 틀 림(수평틀림을 이용한 계산치)	$0.1/\ell$	$0.2/\ell$
ℓ : 뒤틀림 현길이		

(다) 주파수 분석

- 동일한 조건하에서 수행된 검증시험에서 획득한 전달함수와 코히어런스 함수 분석을 각각의 궤도틀림 항목에 대하여 수행하여야 하며, 관련 기준값은 다음과 같음.

<표 3-14> 주파수 해석 - 반복성(Repeatability) - 면틀림 및 줄틀림 - 허용오차

변 수	함 수	과장 대역		
		D1	D2	D3
면 틀 림	전달 함수	$\pm 5\%$	$\pm 7\%$	$\pm 10\%$
	Coherence function	> 0.97	> 0.95	> 0.90
줄 틀 림	전달 함수	$\pm 7\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$
	Coherence function	> 0.95	> 0.90	> 0.85

<표 3-15> 주파수 해석 - 반복성(Repeatability) - 궤간 및 수평틀림 - 허용오차

변 수	함 수	허용 오차
궤 간	전달 함수	$\pm 5\%$
	Coherence function	> 0.95
수 평 틀 림	전달 함수	$\pm 10\%$
	Coherence function	> 0.90

<표 3-16> 주파수해석 - 반복성(Repeatability) - 뒤틀림 - 허용오차

변 수	함 수	허용 오차	
		$\ell \leq 5.5\text{m}$	$5.5\text{m} < \ell \leq 20\text{m}$
뒤 틀 림 (측정치)	전달 함수	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
	Coherence function	> 0.97	> 0.97
뒤 틀 림 (수평틀림을 이용한 계산치)	전달 함수	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
	Coherence function	> 0.97	> 0.97
ℓ : 뒤틀림 현길이			

(2) 재현성(Reproducibility) 시험

(가) 궤도틀림 측정치의 통계분석

- 각 주행시험간 검측결과 사이의 차이값의 분포를 평가하여야 하며, 95% 확률분포의 값을 다음 표에 나타냄.

<표 3-17> 재현성(Reproducibility) - 변수값 - 면틀림 및 줄틀림 - 95th %

변 수	단위(m, mm)		
	과장 대역		
	D1	D2	D3
면 틀 림	± 0.8	± 2	± 5
줄 틀 림	± 1.1	± 3	± 7

<표 3-18> 재현성(Reproducibility) - 변수값 - 궤간 및 수평틀림 - 95th %

변 수	단위(mm)
궤 간	± 1
수평 틀림	± 2.5

<표 3-19> 재현성(Reproducibility) - 변수값 - 뒤틀림 - 95th %

변 수	단위(m, mm)	
	$\ell \leq 5.5m$	$5.5m < \ell \leq 20m$
뒤 틀 림(측정치)	$\pm 1/\ell$	$\pm 1/\ell$
뒤 틀 림(수평틀림을 이용한 계산치)	$\pm 1.5/\ell$	$\pm 3/\ell$
ℓ : 뒤틀림 현길이		

(나) 표준편차에 대한 통계분석

- 각 표준편차의 계산이 요구되는 궤도틀림 항목에 대하여 각각의 주행시험에서 획득한 표준편차 사이의 차이값의 분포도를 분석하여야 하며 다음 표에 한 도치를 나타냄.

<표 3-20> 재현성(Reproducibility) - 표준편차 - 면틀림 및 줄틀림 - 95th %

변 수	단위(mm)		
	과장 대역		
	D1	D2	D3
면 틀 림	0.08	not applicable	not applicable
줄 틀 림	0.1	not applicable	not applicable

<표 3-21> 재현성(Reproducibility) - 표준편차 - 뒤틀림 - 95th %

변 수	단위(m, mm)	
	$\ell \leq 5.5m$	$5.5m < \ell \leq 20m$
뒤 틀 림(측정치)	$0.08/\ell$	$0.08/\ell$
뒤 틀 림(수평틀림을 이용한 계산치)	$0.2/\ell$	$0.3/\ell$
ℓ : 뒤틀림 현길이		

(다) 주과수 분석

- 동일한 조건하에서 수행된 검측시험에서 획득한 전달함수와 코히어런스 함수 분석을 각각의 궤도틀림 항목에 대하여 수행하여야 하며, 관련 기준값은 다음 표 4-16 ~ 4-18과 같다.

<표 3-22> 주파수해석 (재현성) - 면틀림 및 줄틀림 - 허용오차

변 수	함 수	파장 대역		
		D1	D2	D3
면 틀 림	전달 함수	$\pm 7\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$
	Coherence function	> 0.95	> 0.90	> 0.85
줄 틀 림	전달 함수	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$
	Coherence function	> 0.90	> 0.85	> 0.80

<표 3-23> 주파수해석 (재현성) - 궤간 및 수평틀림 - 허용오차

변 수	함 수	허용 오차
궤 간	전달 함수	$\pm 10\%$
	Coherence function	> 0.90
수 평 틀 림	전달 함수	$\pm 15\%$
	Coherence function	> 0.85

<표 3-24> 주파수 해석 - 재현성 (Reproducibility) - 뒤틀림 - 허용오차

변 수	함 수	허용 오차	
		$\ell \leq 5.5\text{m}$	$5.5\text{m} < \ell \leq 20\text{m}$
뒤 틀 림 (측정치)	전달 함수	$\pm 7\%$	$\pm 7\%$
	Coherence function	> 0.95	> 0.95
뒤 틀 림 (수평틀림을 이용한 계산치)	전달 함수	$\pm 7\%$	$\pm 7\%$
	Coherence function	> 0.95	> 0.95
ℓ : 뒤틀림 현길이			

마. 정적 환경 시험 (Lab Test)

(1) 시험개요

- 궤도 틀림 검측 시스템의 구동 성능과 검측 성능을 평가하기 위하여 실험실 내에서 샘플 레일을 이용하여 측정 시험을 수행하였으며 테스트 용 카메라와 라인 레이저 제너레이터를 이용하여 제작된 통합 DSP 보드 및 운영 프로그램을 연동하여 시스템 성능 평가를 수행함.



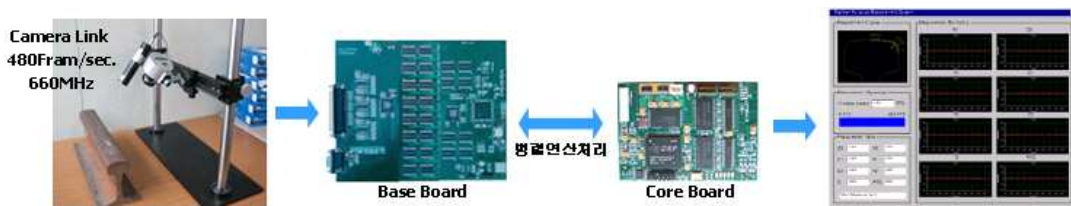
(a) 실험 장치 구현



(b) 레일 영상

<그림 3-79> 정적 환경 시험을 위한 실험 장치 셋업

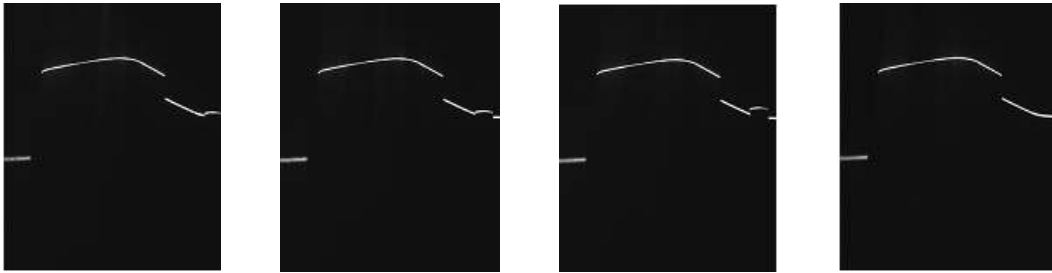
- 또한, 이를 궤도틀림 검출을 위한 측정 파라미터 추출을 위하여 아래 그림과 같이 정적 환경 하에서의 측정 시험을 위한 장치를 셋업하여 진행하였으며 Zig를 따라서 레이저-카메라 모듈이 이동하면서 레일의 두부면과 측면을 측정하도록 함.
- 이때 레이저-카메라 모듈의 이동 속도는 RGV의 이동속도와 동일하게 적용함.
- 샘플 레일을 따라 등속 이동할 수 있는 테스트 지그에 라인레이저와 카메라를 장착하고 샘플 레일과 평행으로 정속 이동하며 라인 레이저가 샘플 레일에 조사된 영상을 획득하였다. 획득한 레일 영상은 아래와 같음.



<그림 3-80> 정적환경 시험을 위한 장치 셋업

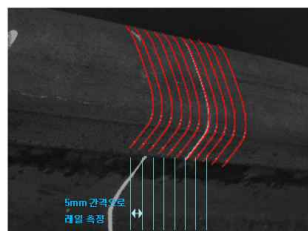
(2) 시험 방법

- 샘플 레일을 이용하여 카메라의 Full Frame Rate 상에서 프레임의 누락 없이 전 프레임에 대한 영상처리가 진행되는 것과 종방향과 횡방향의 오차범위가 각각 $\pm 0.5\text{mm}$ 와 $\pm 0.5\text{mm}$ 이하이며 95% 신뢰도 수준의 정밀도(반복성)를 만족하는 지에 대한 시스템의 성능을 검증하였음.
- 또한, 아래 그림과 같이 레일 영상에 비하여 고해상도의 레일 프로파일 데이터를 획득하기 위하여 근접 촬영을 수행하여 원시 영상을 제시함.

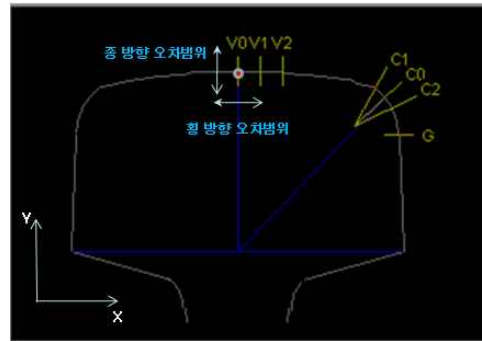


<그림 3-81> 정적환경 시험을 위한 원시영상

- 시험 방법은 샘플 레일(총 연장 50cm)에 대하여 5mm 단위로 이동 측정하여 총 100개의 원시영상과 레일 프로파일 데이터를 획득하였으며, 같은 구간을 100회 반복 측정하여 총 100개의 측정데이터 셋을 확보함.
- 샘플 레일 중 50cm 길이에 해당하는 시험구간을 설정하고 시험구간을 100회 반복 측정하여 총 100개의 측정 데이터 셋을 획득한 것임.
- 즉, 각 측정 데이터 셋은 샘플 레일의 시험구간을 5mm 단위로 측정하여 각 데이터 셋 내에 100개의 레일 프로파일 데이터를 가지도록 하였고, 각 측정 데이터 셋에 대하여 동일한 위치에서의 7개의 측정 포인트를 비교한 구간서 종방향과 횡방향의 오차범위가 각각 $\pm 0.5\text{mm}$ 와 $\pm 0.5\text{mm}$ 이하이며 95% 신뢰도 수준의 정밀도(반복성)의 만족여부를 확인함.
- 아래 그림과 같이 샘플 레일을 5mm 간격으로 측정하여 총 연장 길이 50cm에 대해서 일회 측정에서 100개의 레일 프로파일 데이터를 획득하였고 총 100회의 측정을 수행하여 100개의 측정 데이터 셋을 확보함.



<그림 3-82> 샘플 레일 측정 방법

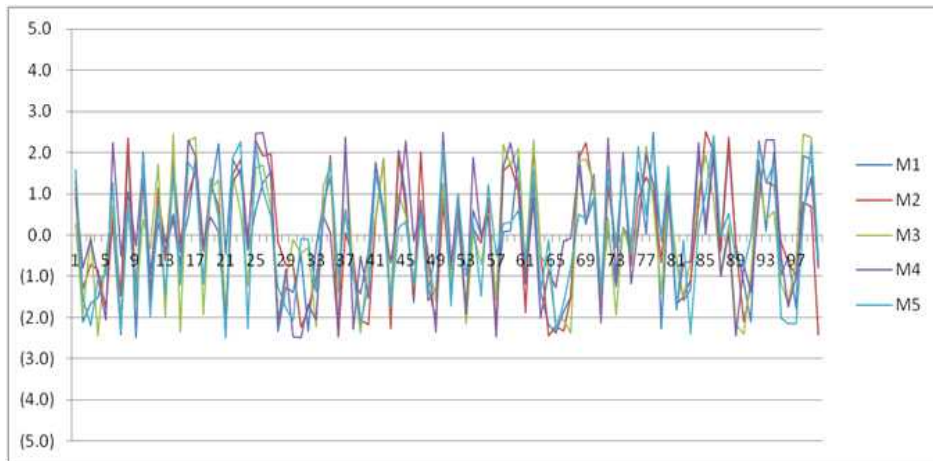


<그림 3-83> 샘플 레일 측정 방법

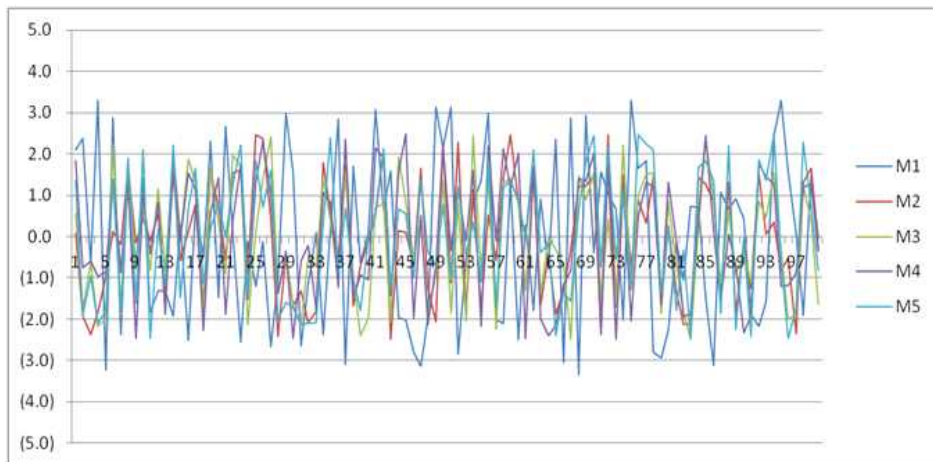
- 샘플 레일 내에 위치하는 100개의 측정 포인트 각각에 대한 7개의 특징점은 $\pm 0.1\text{mm}$ 이내의 편차를 가지므로 각 데이터 셋에 대한 7개의 특징점의 평균값을 구하고 전체 데이터 셋에서 7개의 특징점이 오차 범위 내에 존재하는 지를 확인하였음.
- 또한, 아래 그림과 같이 종 방향과 횡 방향에 대한 성능 평가를 V0 특징점의 경우 레일 프로파일 데이터가 2차원의 공간 상에 위치할 때 각 측정 데이터 셋의 종 방향 및 횡 방향의 측정오차가 각각 $\pm 0.5\text{mm}$ 와 $\pm 0.5\text{mm}$ 이하이며 95% 신뢰도 수준의 정밀도(반복성)를 만족하는 지를 확인함.

(3) 1차 측정 시험 결과 (반복성)

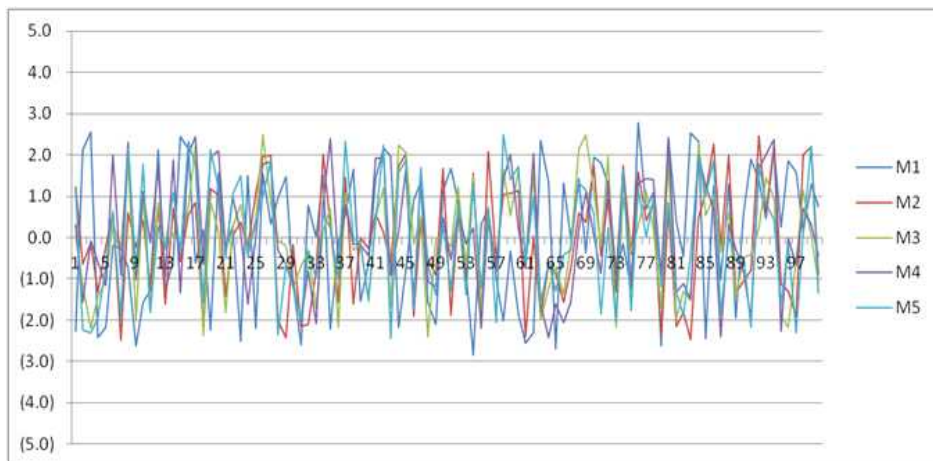
- 1차 측정 시험은 반복성 측정으로 진행하였으며 다음과 같은 동일한 조건 즉, 속도 및 주행방향이 동일한 조건하에서 반복 측정값의 일치 여부를 확인함.
 - 동일한 측정방법
 - 측정 방향 동일
 - 해석방법의 동일
 - 유사한 환경조건
- 궤도틀림 측정은 측정 대상 레일에 대한 7개의 특징점으로부터 얻은 3차원 좌표 값으로부터 계산되기 때문에 1차 정적 환경시험에서는 동일한 측정 조건에서 5회 측정 후 궤도틀림 결과 값을 계산하기 위한 7개의 특징점의 측정 결과가 95% 신뢰도 수준의 반복성을 확보하는 지 검증함.



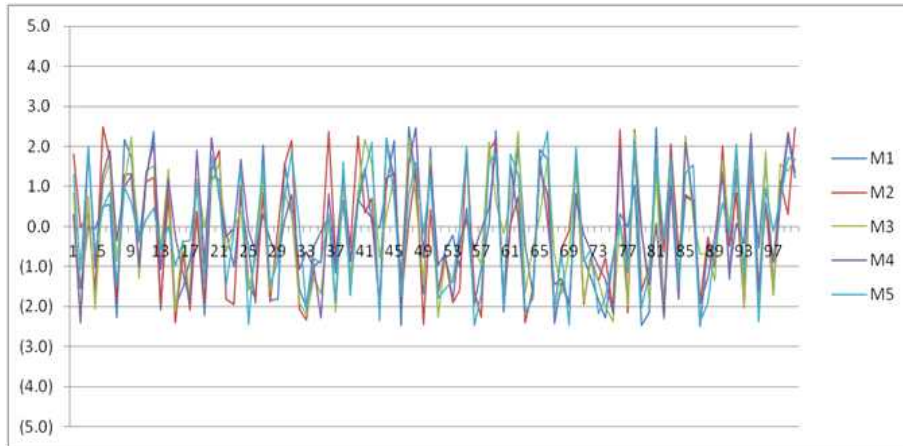
<그림 3-84> 반복성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (V0)



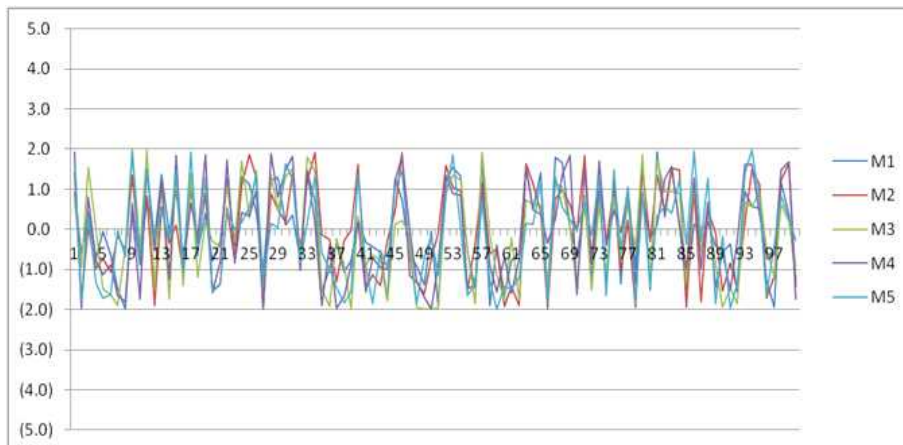
<그림 3-85> 반복성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (V1)



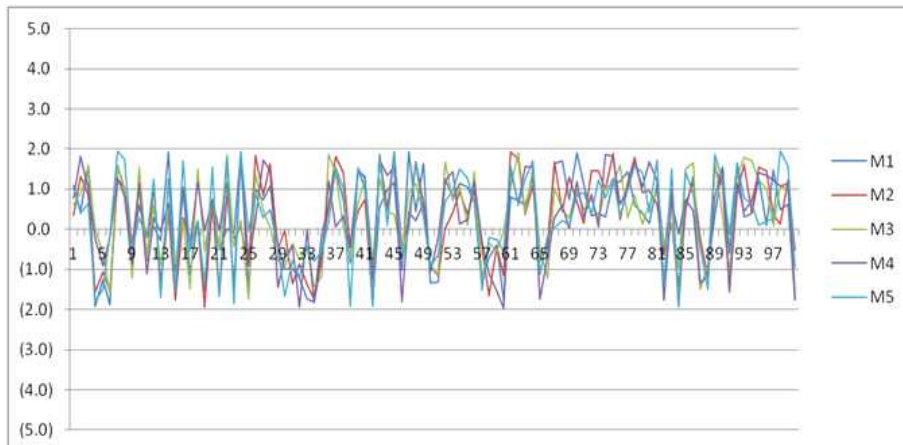
<그림 3-86> 반복성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (V2)



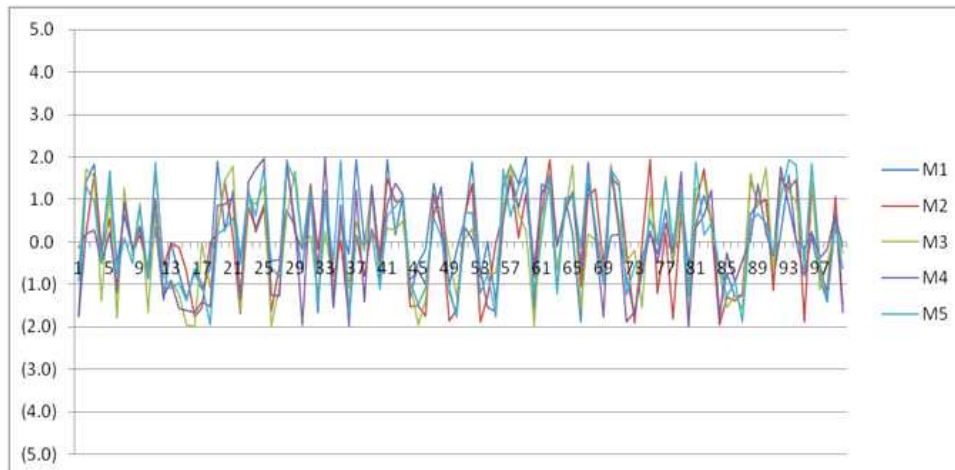
<그림 3-87> 반복성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (C1)



<그림 3-88> 반복성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (C0)



<그림 3-89> 반복성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (C2)



<그림 3-90> 반복성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (G)

- 샘플 레일의 시험구간에 대하여 100개의 측정 데이터 셋을 획득하고 각 데이터 셋에서 동일한 측정 위치 포인트 중 한 지점에 대한 7개의 특징점에 대한 측정 결과 값은 표 4-21과 같으며 종방향과 횡방향의 오차범위가 각각 $\pm 0.5\text{mm}$ 와 $\pm 0.5\text{mm}$ 이하이며 95% 신뢰도 수준의 정밀도(반복성)를 만족함을 확인함.

특징점	횡 방향		종 방향	
	평균	표준편차	평균	표준편차
V0	35.8	0.45	37.5	0.25
V1	42.3	0.37	37.2	0.32
V2	48.2	0.48	36.9	0.22
C0	60.5	0.41	32.4	0.41
C1	56.7	0.35	35.2	0.38
C2	64.3	0.43	30.6	0.40
G	71.5	0.47	25.0	0.35

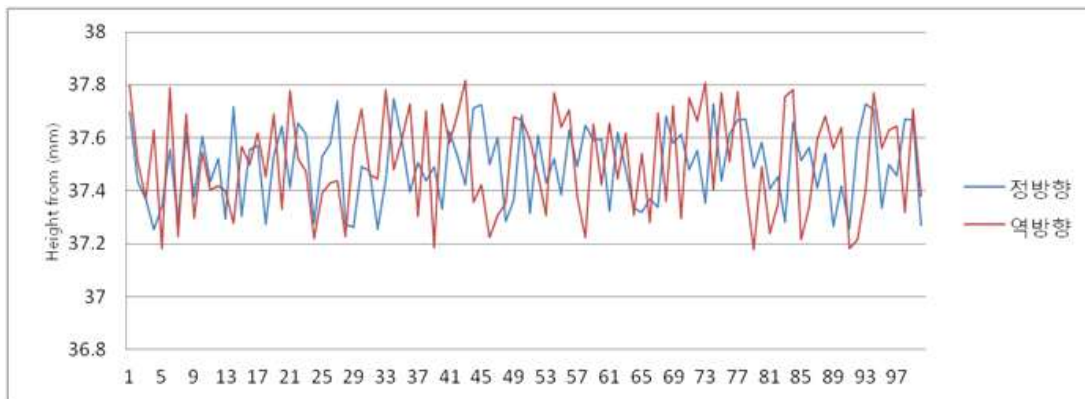
<표 3-27> 반복성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (단위 : mm)

(4) 2차 측정 시험 결과 (재현성)

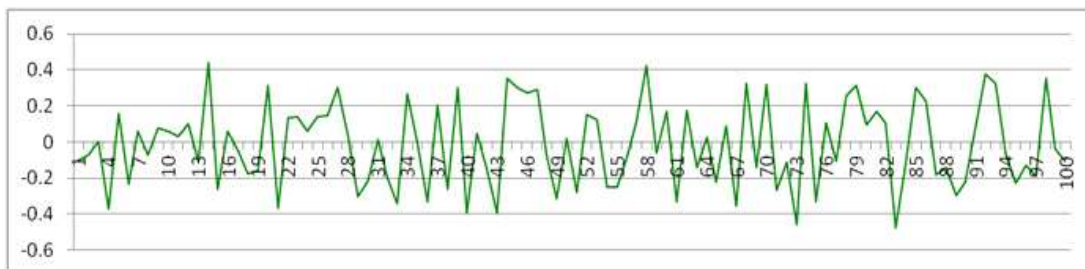
- 2차 측정 시험은 재현성 측정으로 진행하였으며 다음의 조건에서 반복 측정값의 일치 여부를 확인함.

- 시험속도 상이
- 측정 방향 상이
- 상이한 환경조건

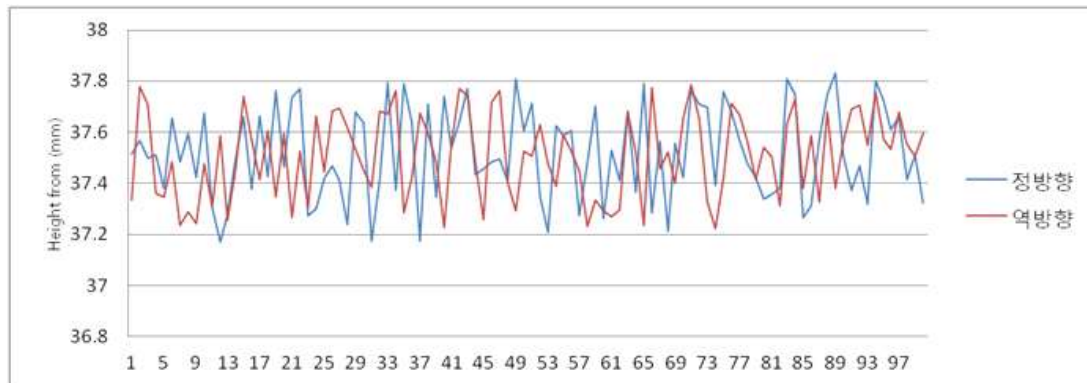
- 이때 시험 속도는 시험 지그의 이동 속도를 조정하여 실시하였으며 정방향의 경우 6km/hr 그리고 역방향의 경우 4km/hr로 설정하여 1차 시험과 같이 궤도틀림 측정은 측정 대상 레일에 대한 7개의 특징점으로 부터 얻은 3차원 좌표 값으로부터 계산하였고 동일한 측정 조건에서 5회 측정 후 궤도틀림 결과 값을 계산하기 위한 7개의 특징점의 측정 결과가 95% 신뢰도 수준의 반복성을 확보하는 지 검증함.
- 또한 역방향 측정 결과는 역으로 Plotting 하여 정방향 측정 결과와 비교할 수 있도록 도시함.



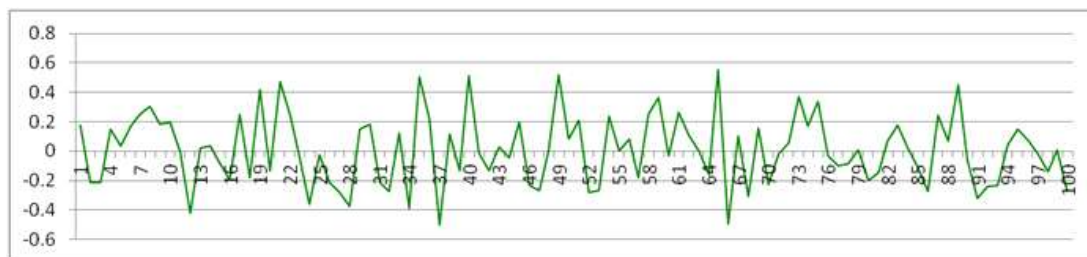
<그림 3-91> 재현성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (V0)



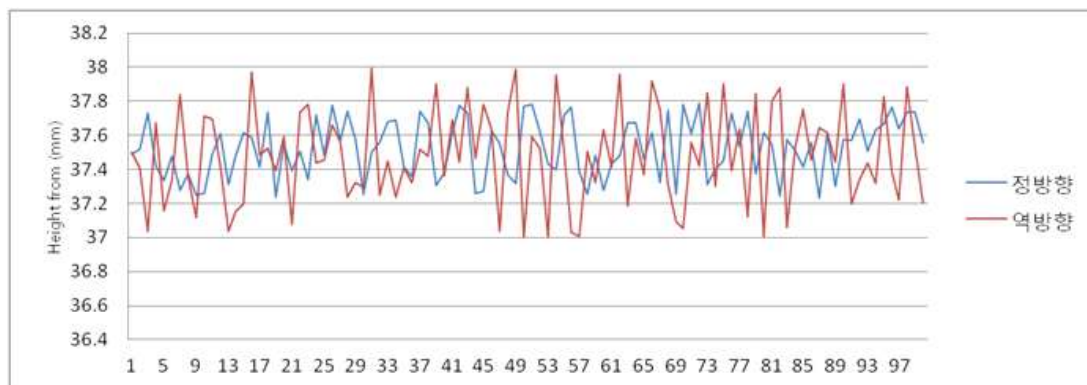
<그림 3-92> V0 측정 시 정, 역방향에 대한 측정오차



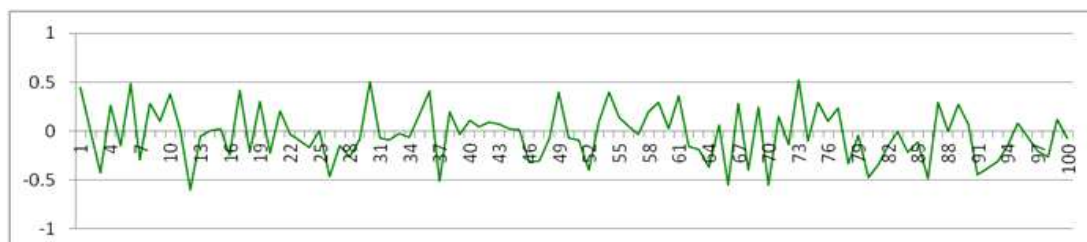
<그림 3-93> 재현성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (V1)



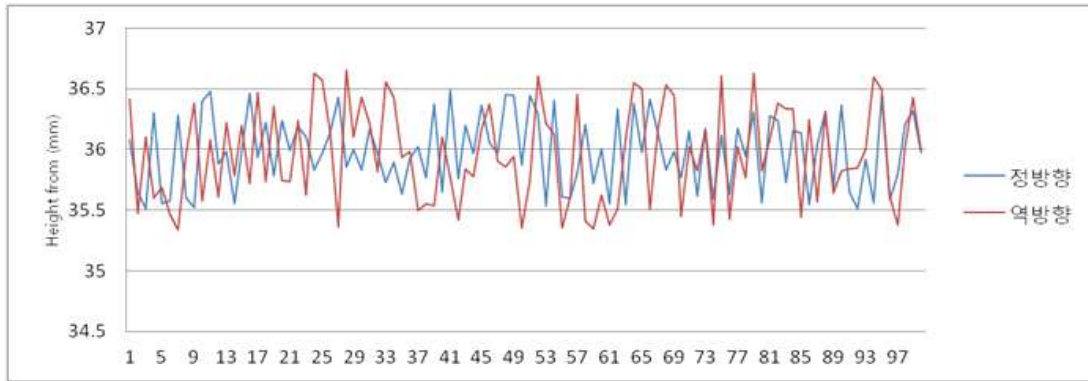
<그림 3-94> V1 측정 시 정, 역방향에 대한 측정오차



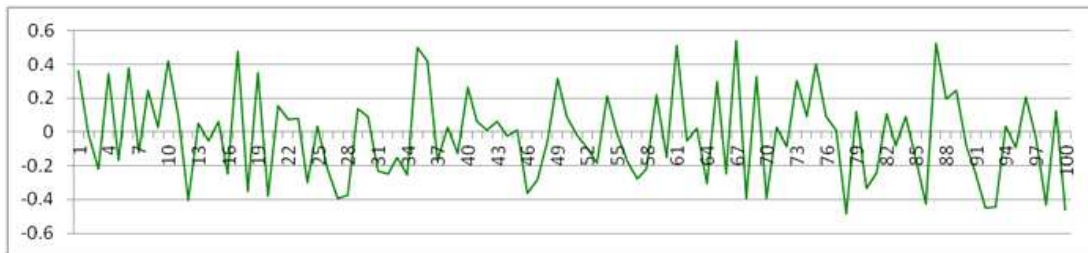
<그림 3-95> 재현성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (V2)



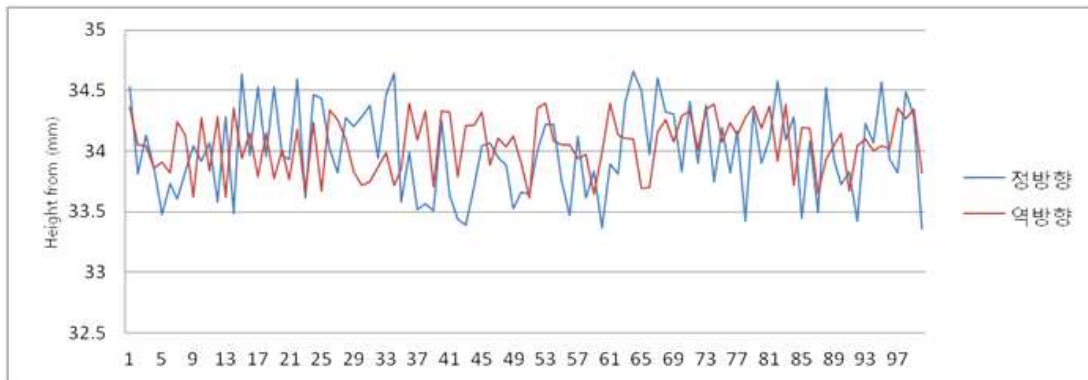
<그림 3-96> V2 측정 시 정, 역방향에 대한 측정오차



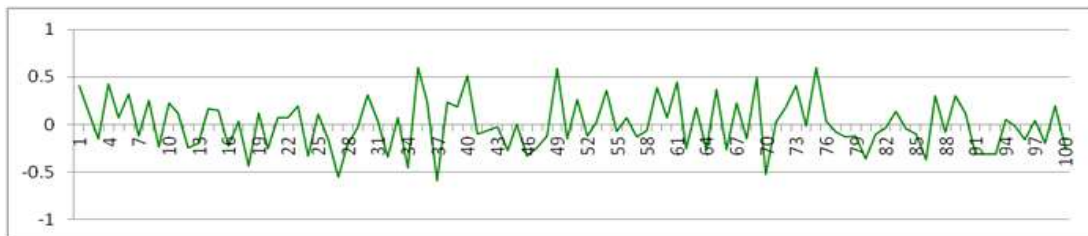
<그림 3-97> 재현성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (C1)



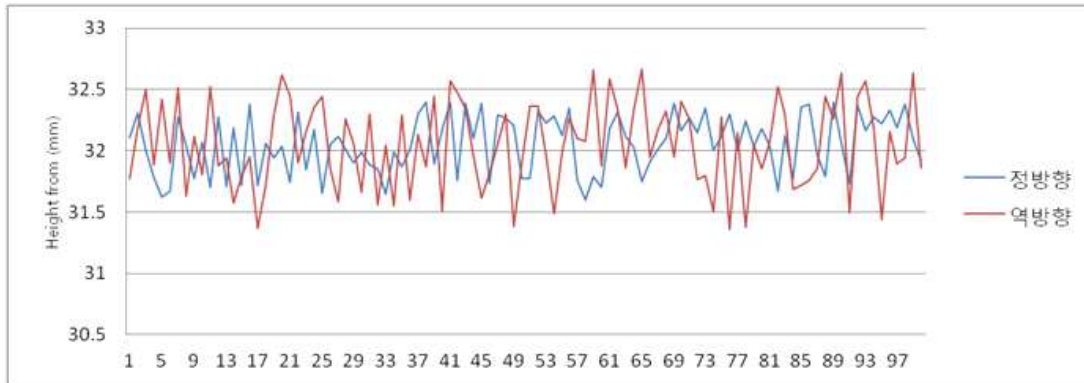
<그림 3-98> C1 측정 시 정, 역방향에 대한 측정오차



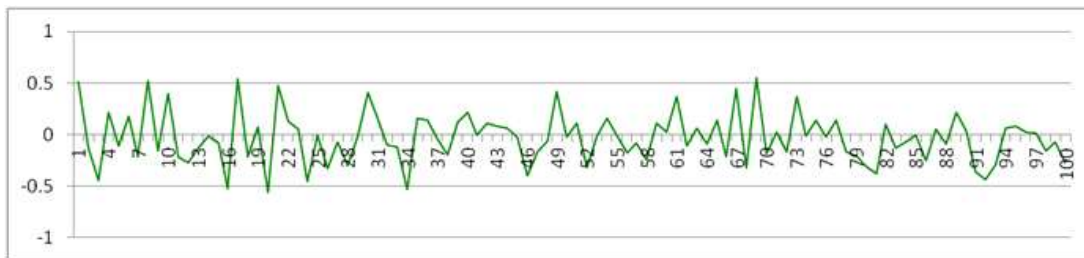
<그림 3-99> 재현성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (C0)



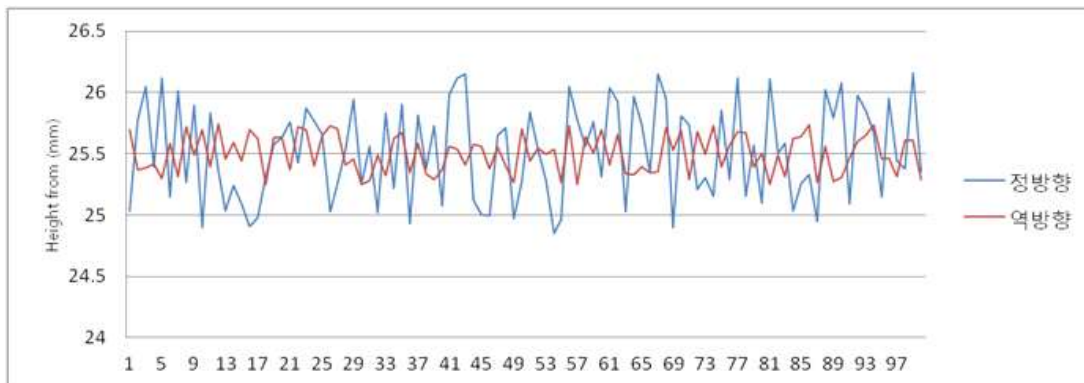
<그림 3-100> C0 측정 시 정, 역방향에 대한 측정오차



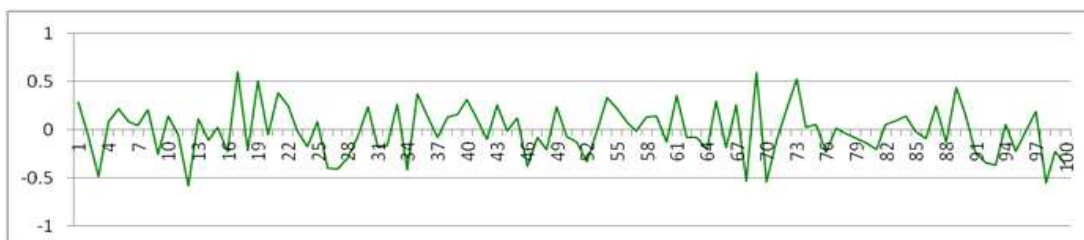
<그림 3-101> 재현성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (C2)



<그림 3-102> C2 측정 시 정, 역방향에 대한 측정오차



<그림 3-103> 재현성 검증을 위한 정적환경 측정 결과 (G)



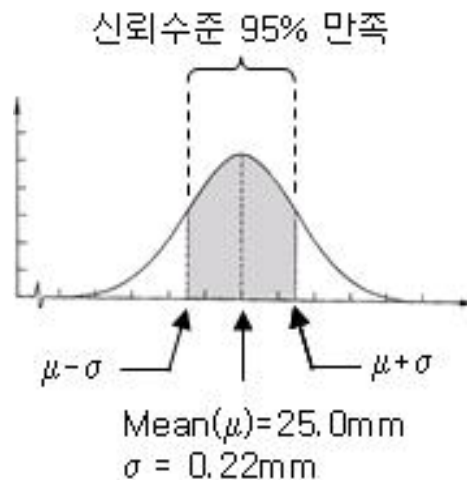
<그림 3-104> G 측정 시 정, 역방향에 대한 측정오차

- 또한 7개의 각 특징점에 대한 정밀성과 재현성 검증을 위하여 7개의 각 특징점에 대한 측정값이 표준 불확도 평가에 의거하여 95%의 신뢰수준($\bar{X} \pm (5 \times u(\bar{X}))$)을 만족하는 지 확인함.
- 다음에 그 결과는 아래 표와 같으며 각 특징점에 대한 기준값에 대하여 각 측정값의 평균값과 표준편차를 이용하여 표현함.
- 이로부터 표준편차가 최소 $\pm 0.13\text{mm}$ 로부터 최대 $\pm 0.22\text{mm}$ 의 범위 내에 존재함에 따라 목표치인 $\pm 0.5\text{mm}$ 를 만족하는 것으로 나타남.

측정 포인트	측정결과
V0	$37.5 \pm 0.13\text{mm}$
V1	$37.5 \pm 0.19\text{mm}$
V2	$37.5 \pm 0.17\text{mm}$
G	$25.0 \pm 0.22\text{mm}$
C1	$35.9 \pm 0.15\text{mm}$
C0	$33.9 \pm 0.18\text{mm}$
C2	$32.0 \pm 0.21\text{mm}$

<표 3-28> 정적환경에 대한 측정 결과

- 또한, 측정 결과 중 가장 변화가 큰 G 특징점에 대하여 측정 불확도 추정을 적용한 결과 아래 그림과 같이 95%의 신뢰 수준을 만족하는 것으로 확인됨.



<그림 3-105> G에 대한 신뢰수준 평가

바. 동적 환경 시험 (Field Test)

(1) 시험개요

- 도시철도 구간에서의 측정 시험을 수행하여 측정 데이터의 분석을 통한 측정 정밀도, 등의 정량적 평가를 통한 성능을 검증함.
- 궤도틀림 검측시스템에 대한 성능 검증은 EN13848 규격에 상응하는 성능 평가 절차에 따라 수행하며 EM140의 정밀도와 재현성을 만족하는 지에 대한 검증을 수행함.

(2) 시험방법

- 제작된 궤도 검측 측정 시스템의 성능을 평가하기 위하여 EN13848 규정을 준용하여 이미 검증된 장비를 참조 장비(Reference Device)를 이용하는 방식을 취함.
- 사용한 참조 장비는 Track Master로서 본체와 수집장치로 구성되어 있으며 궤간(G), 수평틀림(C), 면틀림(좌우레일, H), 줄틀림(좌우레일, V), 평면성(T), 등 5가지를 측정할 수 있고 측정범위와 정밀도는 아래 표와 같음.

<표 3-29> 참조장비의 측정범위 및 정밀도

구 분	측정범위	측정정밀도
줄틀림	-20 - +10 mm	0.02 mm
면틀림	±10 mm	0.01 mm
궤간	-25 - +50 mm	0.04 mm
수평틀림	±230 mm	0.03 mm
백게이지	35 - 53 mm	0.03 mm

(3) 현장시험

- 현장 시험 시 참조 장비를 이용하여 측정하고자 하는 구간(30m)을 선행 반복 측정하고 이후 제작된 궤도틀림 검측 시스템을 이용하여 동일한 구간을 측정하였음.

(4) INS 측정결과 및 성능 평가

- 시스템에 적용된 INS는 2.5mm 마다 적분 값을 초기화하기 때문에 기차의 최고속도를 6km/hr 라고 가정하면, 적분 값을 초기화하기 전에 최소한 한번의 sampling을 해야 하므로, 최대 sampling time은 다음과 같이 계산할 수 있음.

$$6km/h = 1.67m/s = 2.5mm / t_s$$

$$\therefore t_s = \frac{2.5}{167} \simeq 0.015 \text{ [sec]}$$

- Sampling Theorem 에 의해서 alias 현상을 방지하기 위한 sampling time 을 확보하고 있음을 확인할 수 있음.
- 본 과업에서 수행한 simulation에서는 INS의 한계로 인하여 최대 data 수집률이 128 Hz로 한정하여 적용하였음.
- $128Hz = \frac{1}{t_s}$ 이므로, sampling time $t_s = 0.0078125 \text{ [sec]}$ 이다. 2.5mm 마다 최소한 한 번의 적분을 수행해야하므로, simulation에서 가정할 수 있는 최대한의 속도는 다음과 같이 계산할 수 있음.

$$v_{\max} = \frac{s}{t} = \frac{2.5}{0.0078125} = 320 [mm/s]$$

- 기술한 바와 같이 속도가 작아지면, 적분의 횟수가 늘어나게 되어 필연적으로 error 가 증가하게 됨.
- 현장시험에서는 3개의 다른 속도에서 측정을 수행하였으며 이에 따라 각 속도별 error의 RMS(Root Mean Square)를 아래 표와 같이 정리하였음.

<표 3-30> del_y Error의 RMS

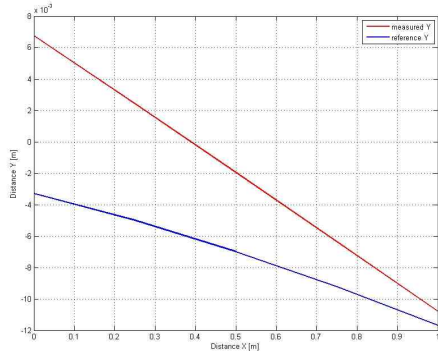
Sampling Time sec	Speed km/h	Reset time sec	Error RMSmm
0.0078125	6.0	0.015	0.021
	4.0	0.018	0.043
	2.0	0.023	0.086

<표 3-31> del_z Error의 RMS

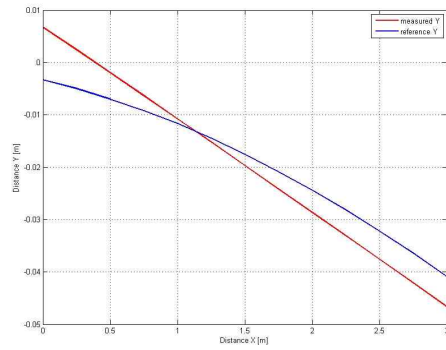
Sampling Time sec	Speed km/h	Reset time sec	Error RMSmm
0.0078125	6.0	0.015	0.071
	4.0	0.018	0.143
	2.0	0.023	0.286

- 이상에서 RGV의 속도가 감소함에 따라 가속도의 이중적분에 의한 변위의 오차가 증가함을 알 수 있었음.

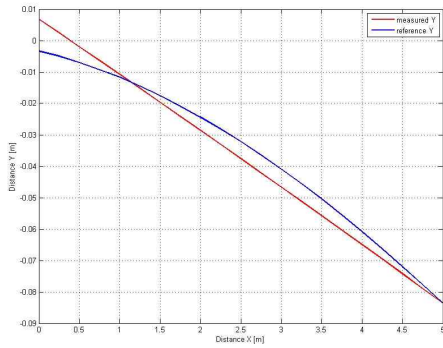
○ RGV 진행 거리 과장대역3에서 y축과 z축의 변위를 구간별(2.5mm) 변위인 del_y와 del_z를 더하는 방식으로 계산 하였다. 1, 3, 5, 10m 의 과장대역에서 계산하였음.



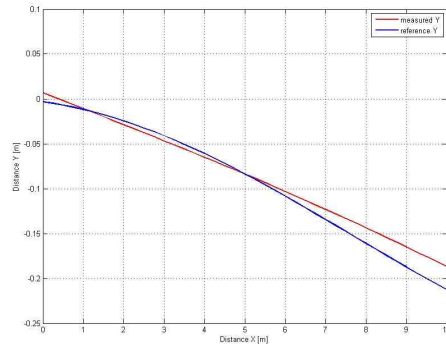
$$\lambda = 1m$$



$$\lambda = 3m$$

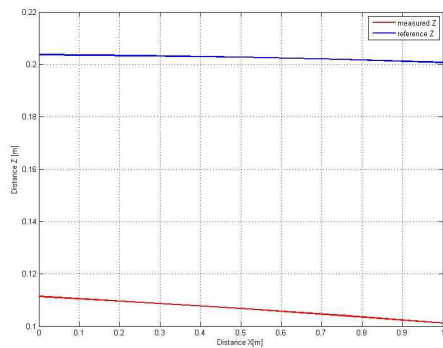


$$\lambda = 5m$$

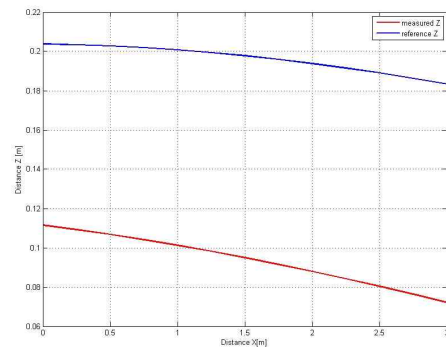


$$\lambda = 10m$$

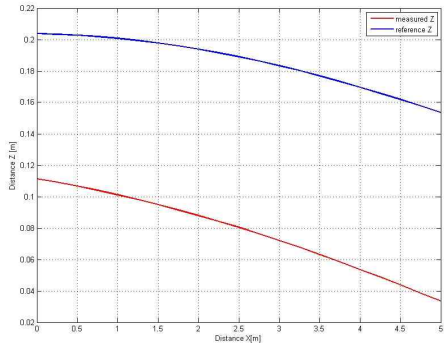
<그림 3-106> RGV의 진행방향 속도가 6.0 km/h 일 경우의 Y 축 변위



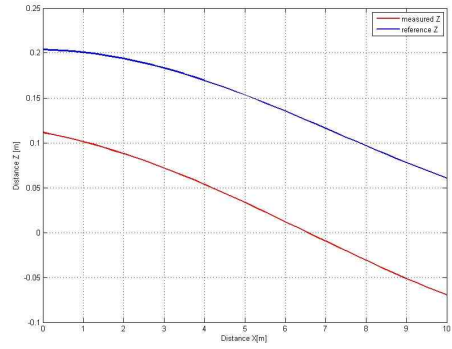
$$\lambda = 1m$$



$$\lambda = 3m$$

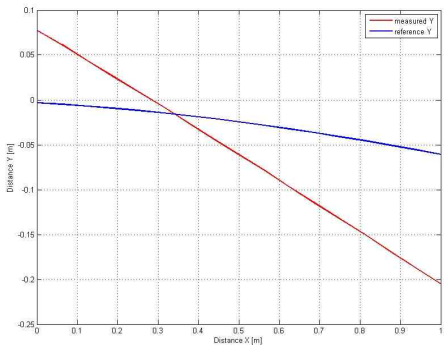


$$\lambda = 5\text{m}$$

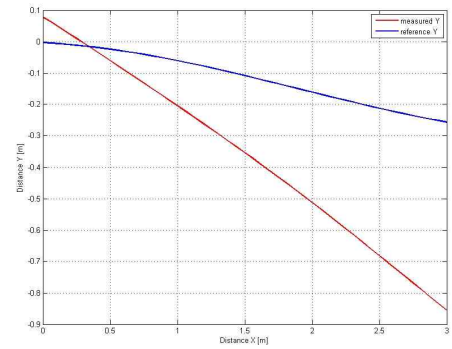


$$\lambda = 10\text{m}$$

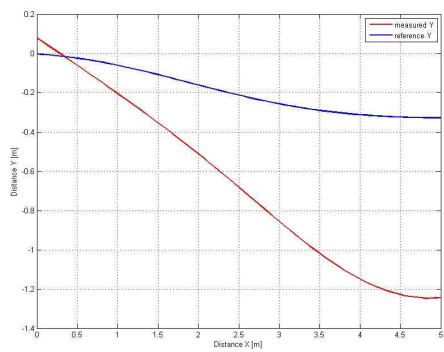
<그림 3-107> RGV의 진행방향 속도가 6.0 km/h 일 경우의 Z 축 변위



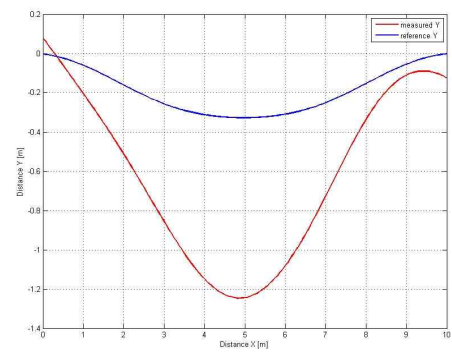
$$\lambda = 1\text{m}$$



$$\lambda = 3\text{m}$$

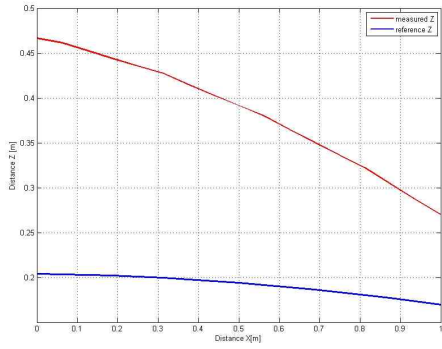


$$\lambda = 5\text{m}$$

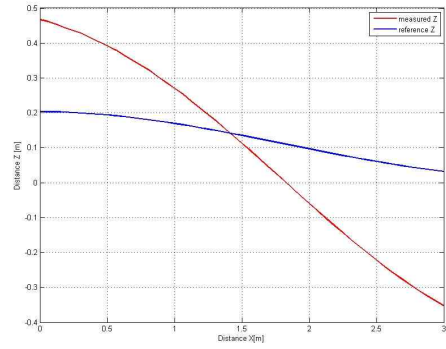


$$\lambda = 10\text{m}$$

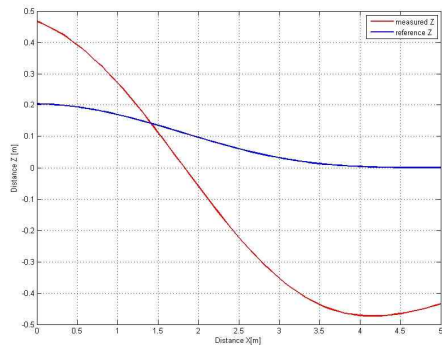
<그림 3-108> RGV의 진행방향 속도가 4.0 km/h 일 경우의 Y 축 변위



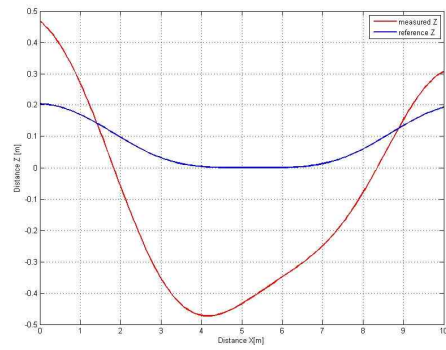
$$\lambda = 1\text{m}$$



$$\lambda = 3\text{m}$$

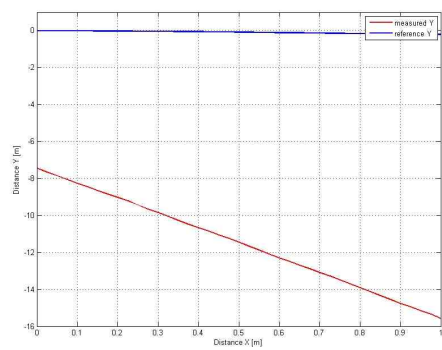


$$\lambda = 5\text{m}$$

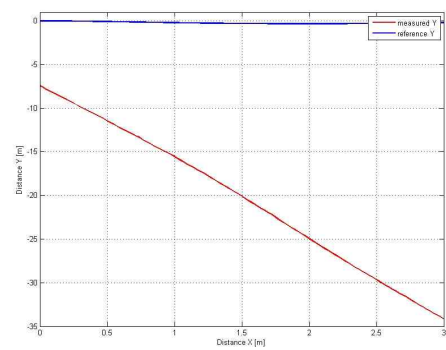


$$\lambda = 10\text{m}$$

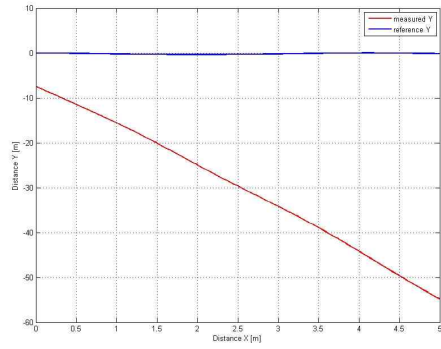
<그림 3-109> RGV의 진행방향 속도가 4.0 km/h 일 경우의 Z 축 변위



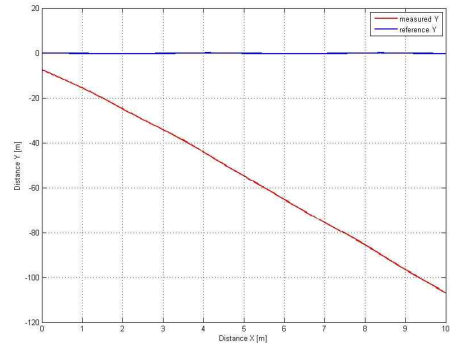
$$\lambda = 1\text{m}$$



$$\lambda = 3\text{m}$$

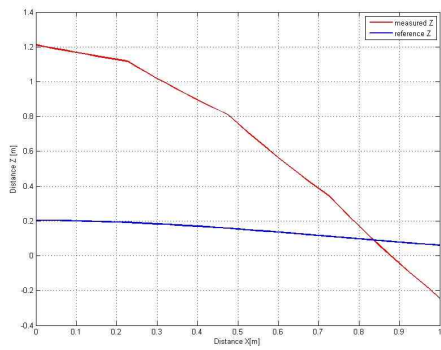


$$\lambda = 5\text{m}$$

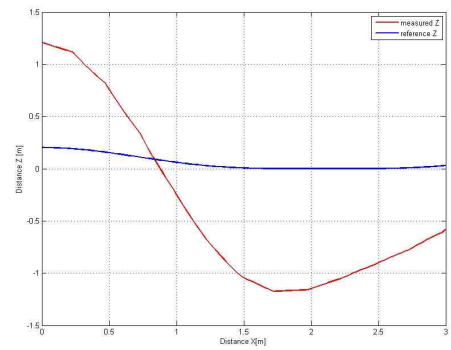


$$\lambda = 10\text{m}$$

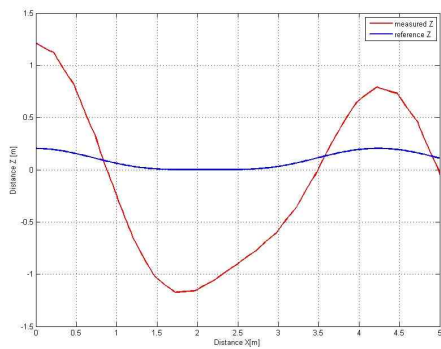
<그림 3-110> RGV의 진행방향 속도가 2.0 km/h 일 경우의 Y 축 변위



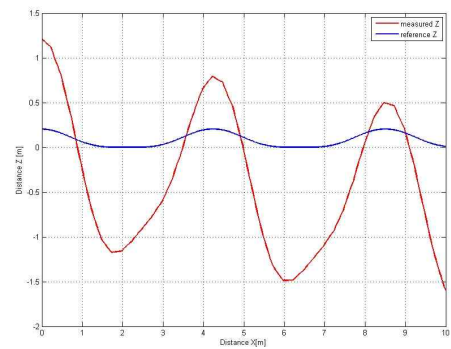
$$\lambda = 1\text{m}$$



$$\lambda = 3\text{m}$$



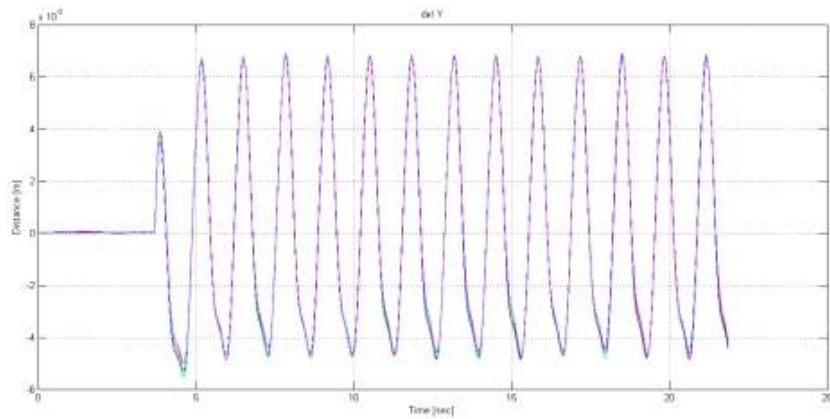
$$\lambda = 5\text{m}$$



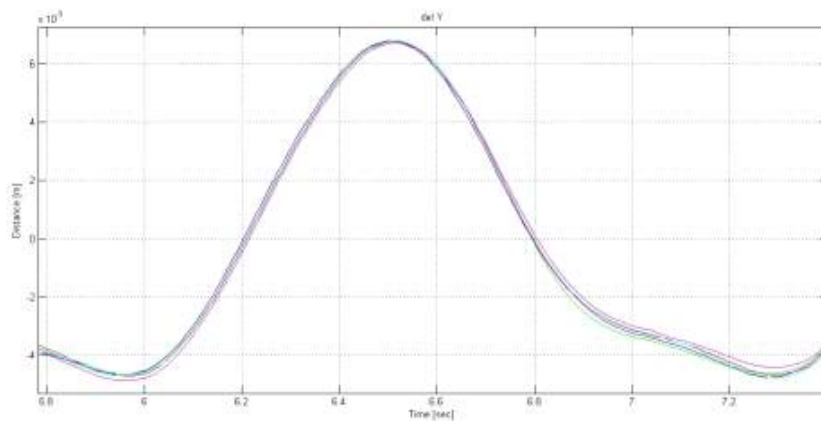
$$\lambda = 10\text{m}$$

<그림 3-111> RGV의 진행방향 속도가 2.0 km/h 일 경우의 Z 축 변위

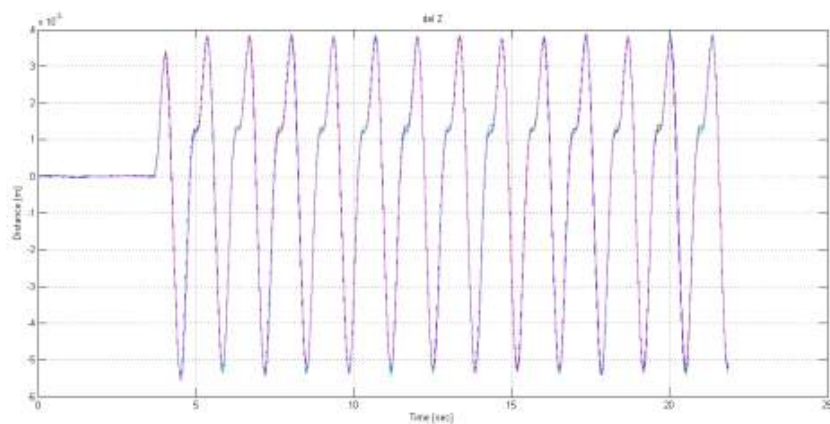
상기와 같이 획득한 데이터로부터 필터링, 등의 신호처리를 거친 del_y, del_z 값을 계산하여 한 그래프에 겹쳐서 plot 하면 다음과 같음.



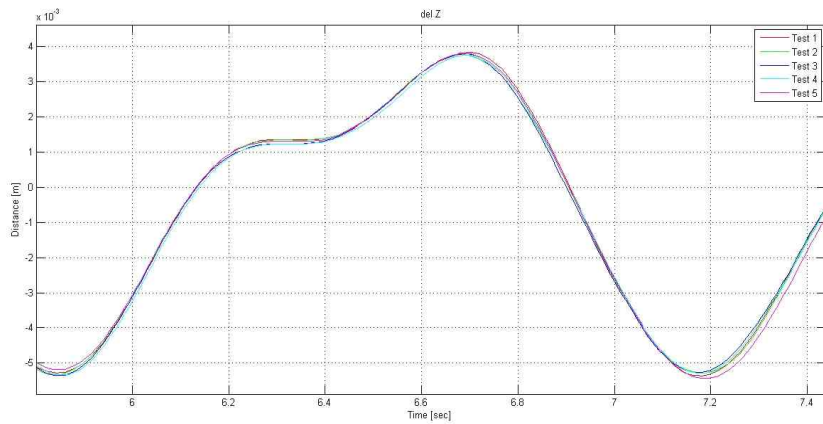
<그림 3-112> del_y 데이터 후처리 결과



<그림 3-113> del_y 데이터 후처리 결과 (확대)

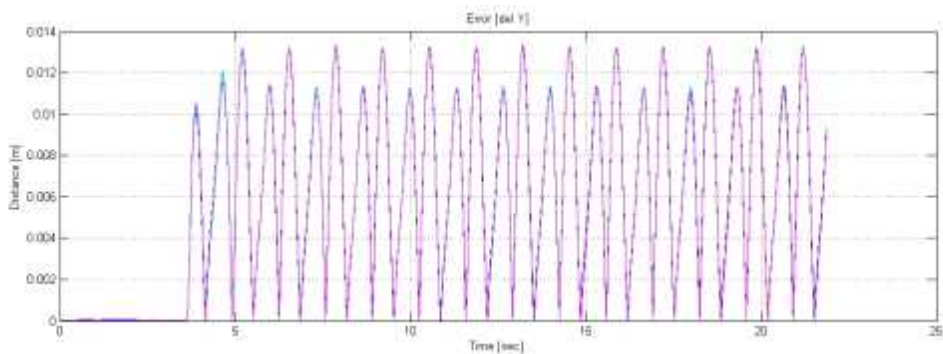


<그림 3-114> del_z 데이터 후처리 결과

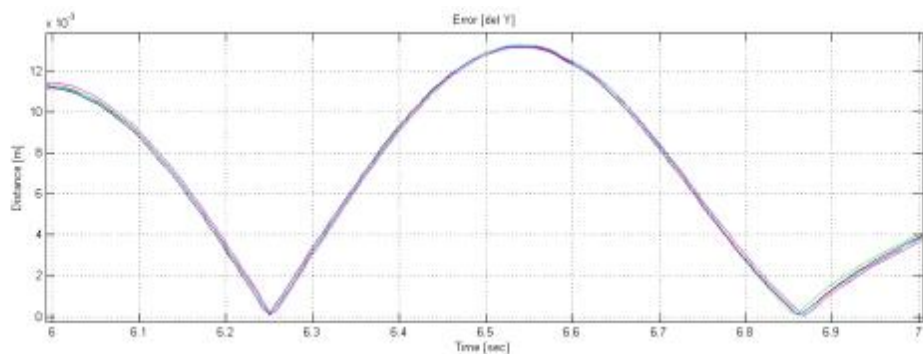


<그림 3-115> del_z 데이터 후처리 결과 (확대)

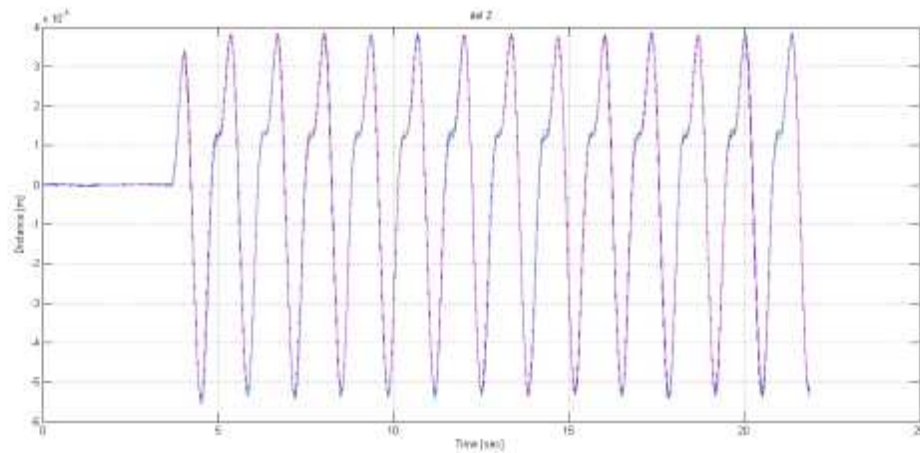
- 상기와 같이 획득한 데이터로부터 필터링, 등의 신호처리를 거친 del_y, del_z 값을 계산하여 한 그래프에 겹쳐서 plot 하면 다음과 같으며 앞서 계산한 방법으로 엔코더의 출력 값으로 기준 변위 값을 계산하고 측정된 센서 값으로부터 계산된 값과 비교하여 오차를 계산하였고 아래 그림은 기준 변위 값과의 오차를 한 그래프에 겹쳐서 plot 한 것임.



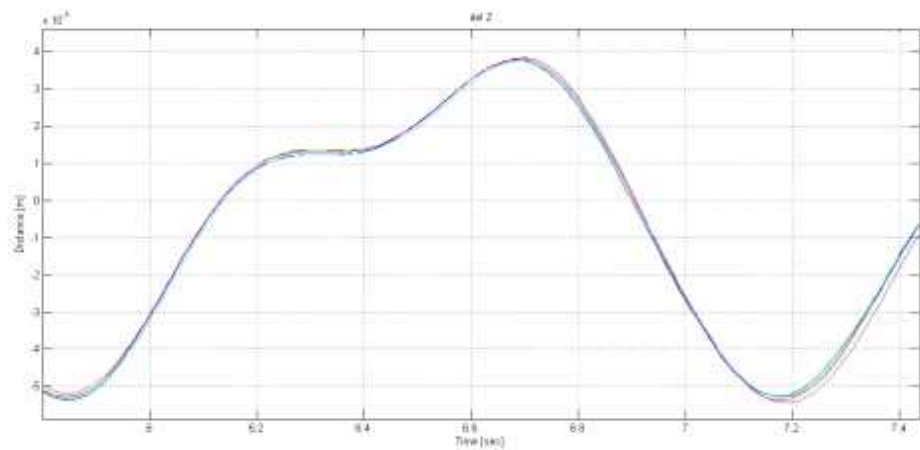
<그림 3-116> del_y 의 오차



<그림 3-117> del_y 의 오차 (확대)



<그림 3-118> del_z 의 오차



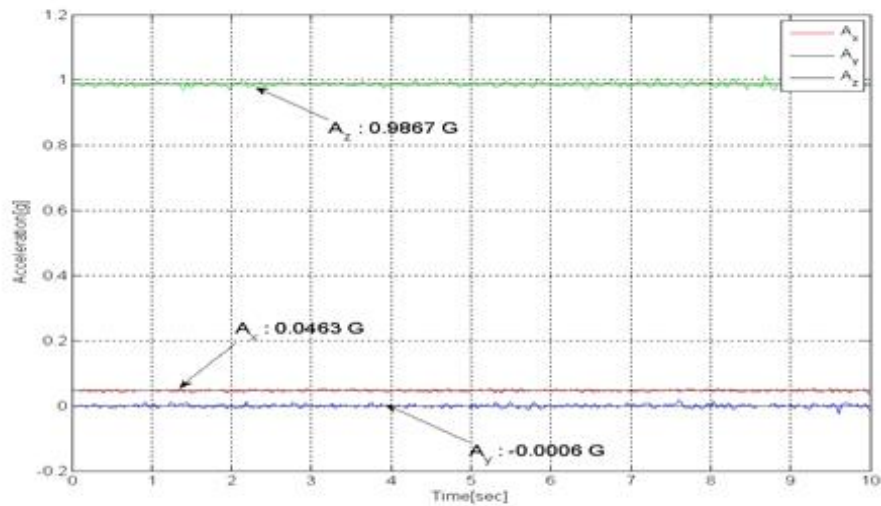
<그림 3-119> del_z 의 오차 (확대)

○ 이상의 결과 값으로부터 각 실험마다 오차의 RMS를 계산한 결과는 아래 표와 같으며 각 축의 RMS 오차 값이 모두 1mm 이하이며 각각의 측정 Case 마다 균일한 값을 가지고 있음을 확인할 수 있음.

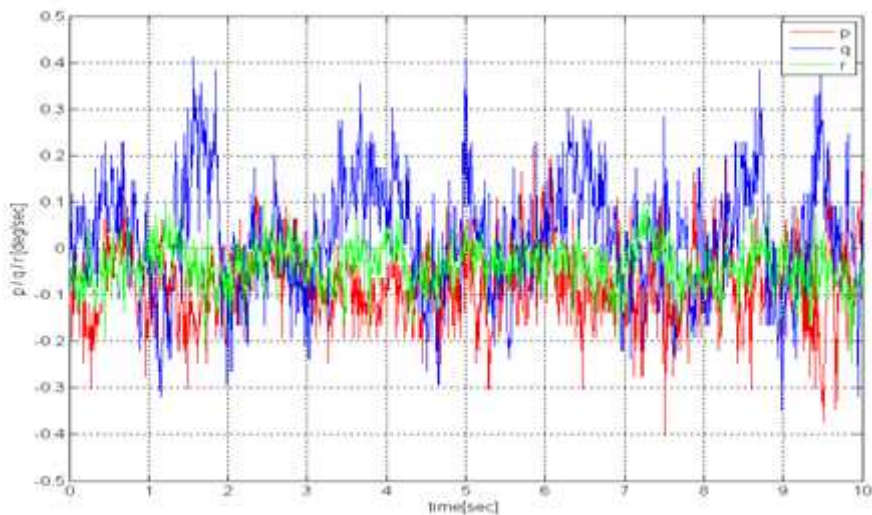
<표 3-32> del_y, del_z Error의 RMS

	Y axis RMS mm	Z axis RMS mm
Test #1	0.7381	0.6341
Test #2	0.7362	0.6341
Test #3	0.7367	0.6327

- 또한 측정한 INS 데이터를 이용하여 실제 주행환경에서의 진동특성을 분석 함으로서 적용된 INS 센서의 적합성을 판단하고 노이즈 제거를 위한 필터 의 적용된 파라미터를 검증하였음.
- 이때 INS 센서 데이터는 100Hz 단위로 수행되었으며 $p, q, r, a_x, a_y, a_z, \phi, \theta$ 에 대한 측정결과를 수집하였으며 특히 관성센서의 의 데이터에 대한 FFT 분석은 400Hz 대역에서 a_x, a_y, a_z, p, r 에 대하여 수행하였고 가속 및 감속, 등속(주행) 구간에서 그 결과를 분석하고 검증하였음.

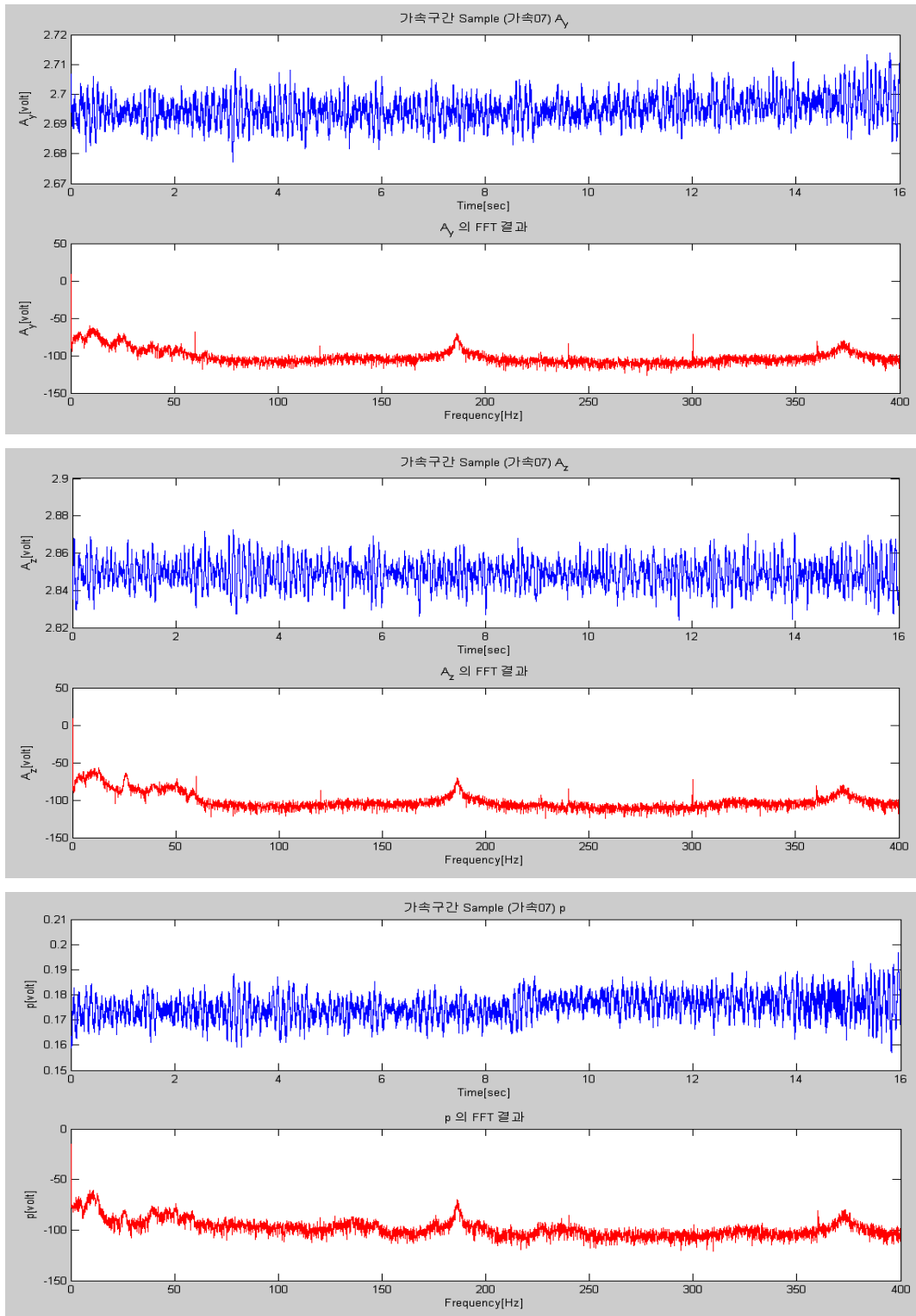


<그림 3-120>은 가속구간의 INS Digital output data 를 plot 한 것이다.

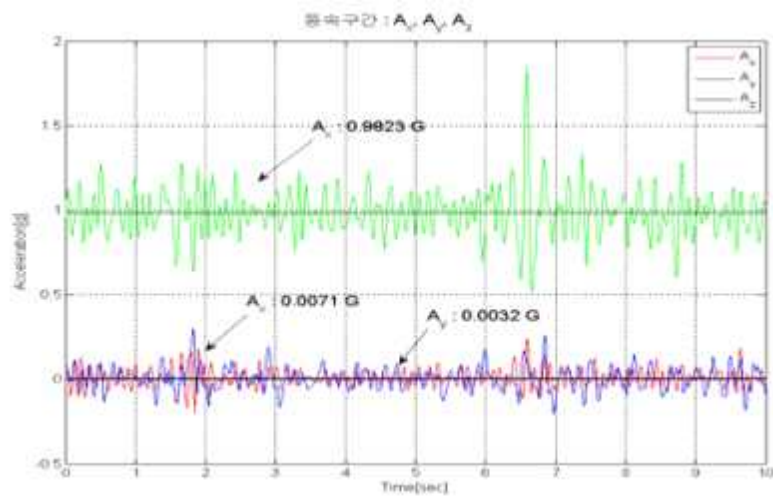


<그림 3-121> 가속 구간의 INS 출력 데이터

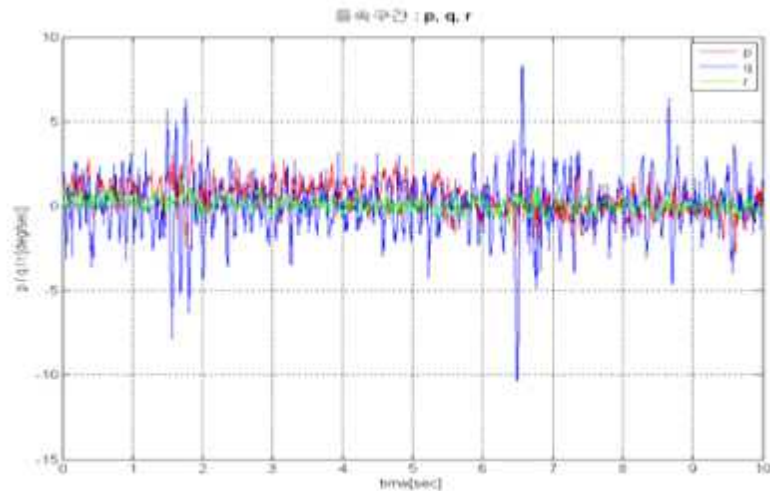
- X방향 즉, RGV의 진행방향 가속도가 0.0463g로 가속구간임을 알 수 있음.
- 아래 그림은 가속 구간의 INS 출력 데이터를 FFT 한 결과임.



<그림 3-122> 가속 구간의 INS 출력 데이터에 대한 FFT 결과

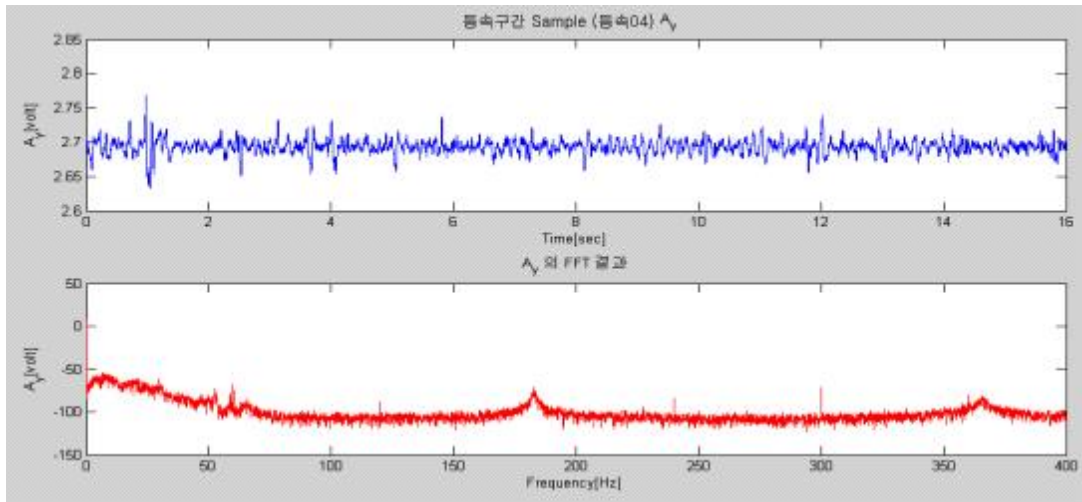


<그림 3-123>는 등속(주행)구간의 INS Digital output data를 plot 한 것이다

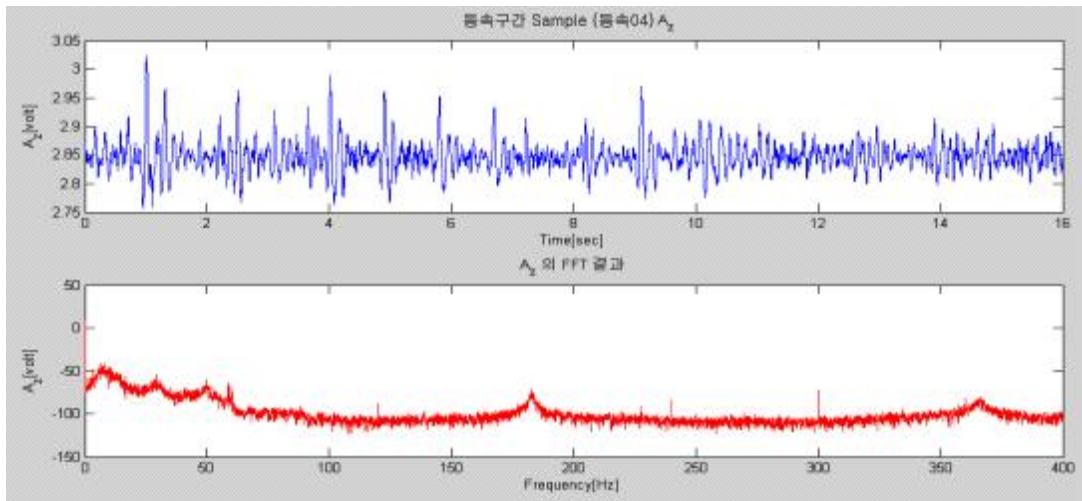


<그림 3-124> 등속(주행)구간의 INS Digital output data

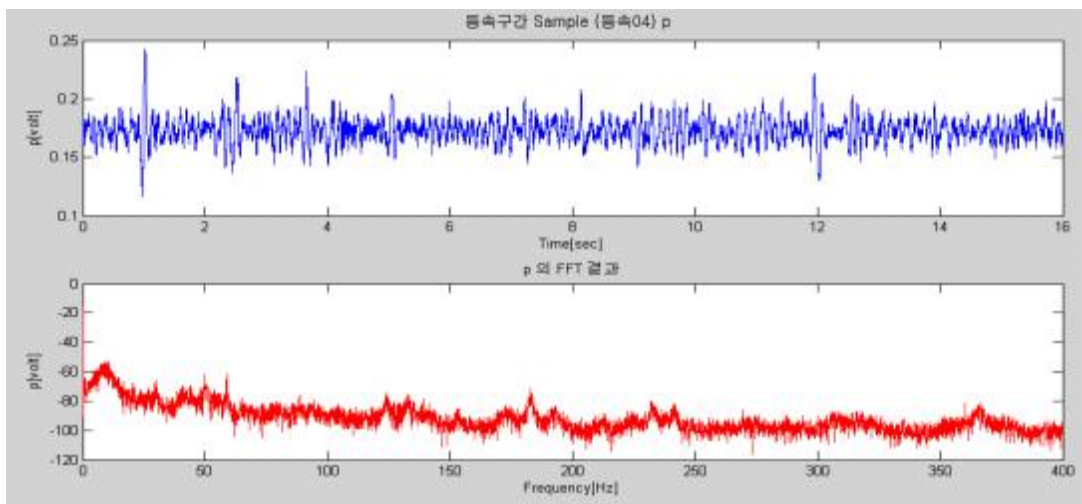
- X방향 즉, 열차의 진행방향 가속도가 0.0071g로 등속구간임을 알 수 있으며 가감속 구간에 비하여 속도가 빠른 구간으로 가감속 구간에 비하여 진동이 비교적 큰 것을 확인할 수 있음.
- 또한 자이로의 측정치(p, q, r)도 주기운동을 보이고 있기 때문에 칼만 필터 처리로 충분한 자세각을 계산할 수 있음을 확인할 수 있음.
- 또한 자이로 데이터와는 다르게 가속도로 계산한 자세각은 오차가 누적되지 않지만 가속도계는 오차를 발산하지 않기 때문에 범위 안에서 절대오차를 유지하는 특징을 보임을 확인할 수 있음.



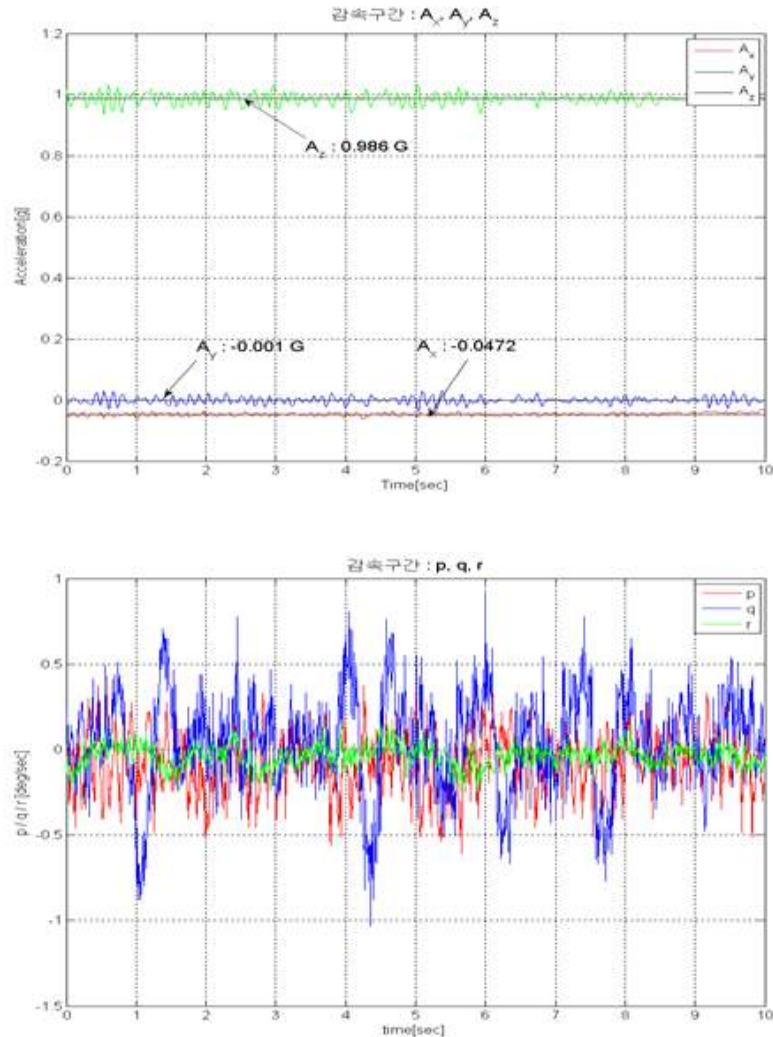
<그림 3-125>는 등속(주행)구간에서 FFT 결과를 plot한 것이다.



<그림 3-126> 등속(주행) 구간의 INS 출력 데이터에 대한 FFT 결과



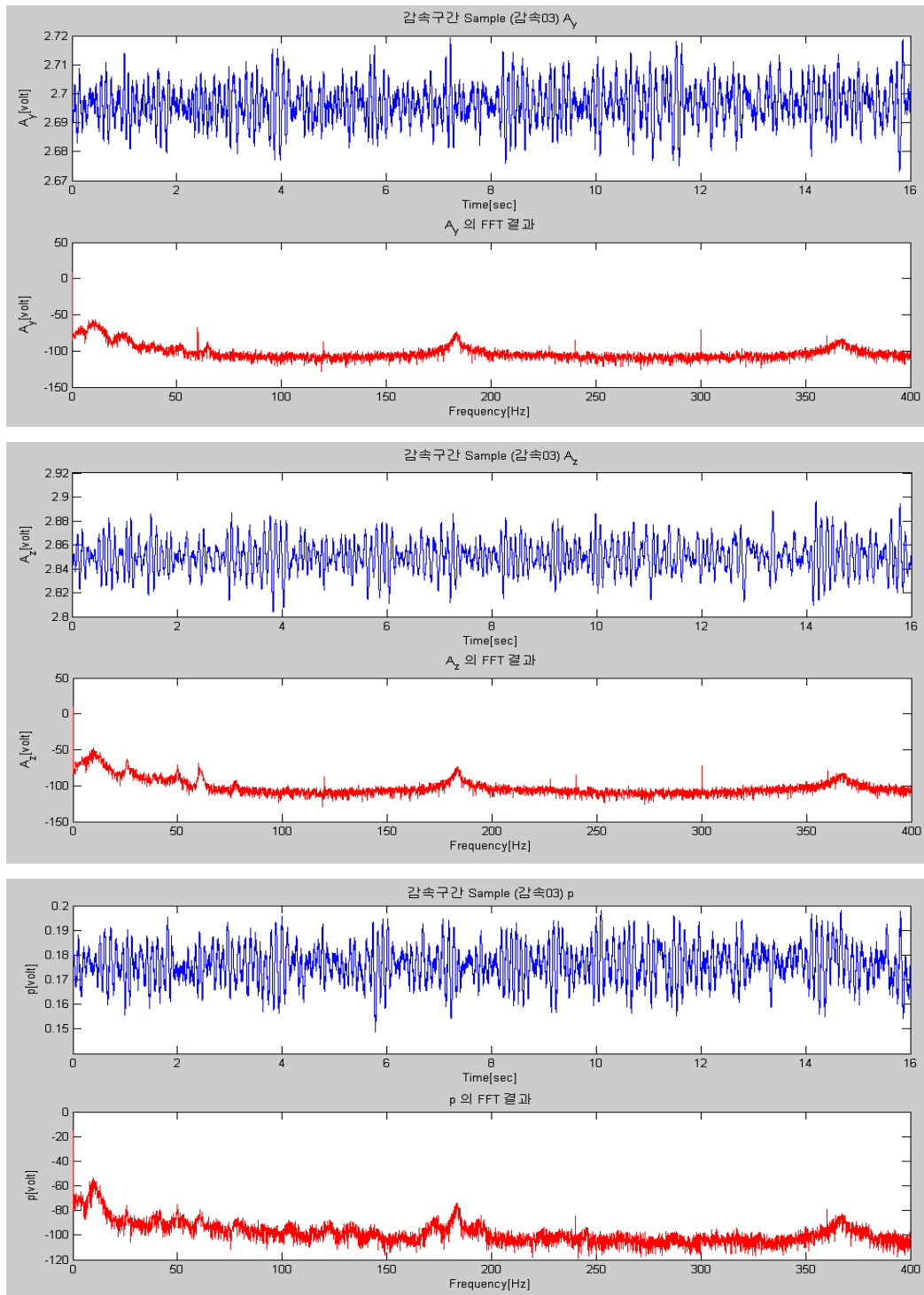
○ <그림 3-127>은 감속구간의 INS Digital output data를 plot 한 것이다.



<그림 3-128> 감속구간의 INS Digital output data

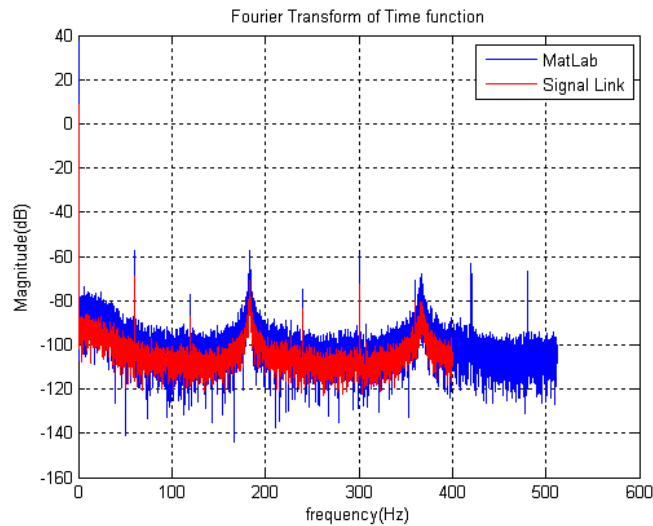
- 특히 등속구간에서는 다수 레벨의 변환 신호들 중에서 가장 낮은 저주파 대역의 변환신호는 등속 구간에서의 잡음이 원신호 성분에 대비하여 크지 않으나, 상대적으로 높은 주파수 대역의 변환신호들인 의 경우에는 등속 구간에서 가속도 값이 0으로 수렴하지 않는 잡음에 해당하는 값들이 상대적으로 많이 나타나게 됨.
- 따라서, 가속도 데이터의 왜곡을 감소시키면서 잡음을 제거하기 위하여 주파수 대역별로 변환 신호의 잡음을 제거하였음.
- 즉, 가변 임계치에 포함되는 부분을 일정한 값으로 수렴하도록 하여 잡음을 제거하였다.

○ X방향 즉, 열차의 진행방향 가속도가 $-0.0472g$ 로 감속구간임을 알 수 있으며 이에 대한 Signal Analyzer의 FFT 결과는 아래 그림과 같음.



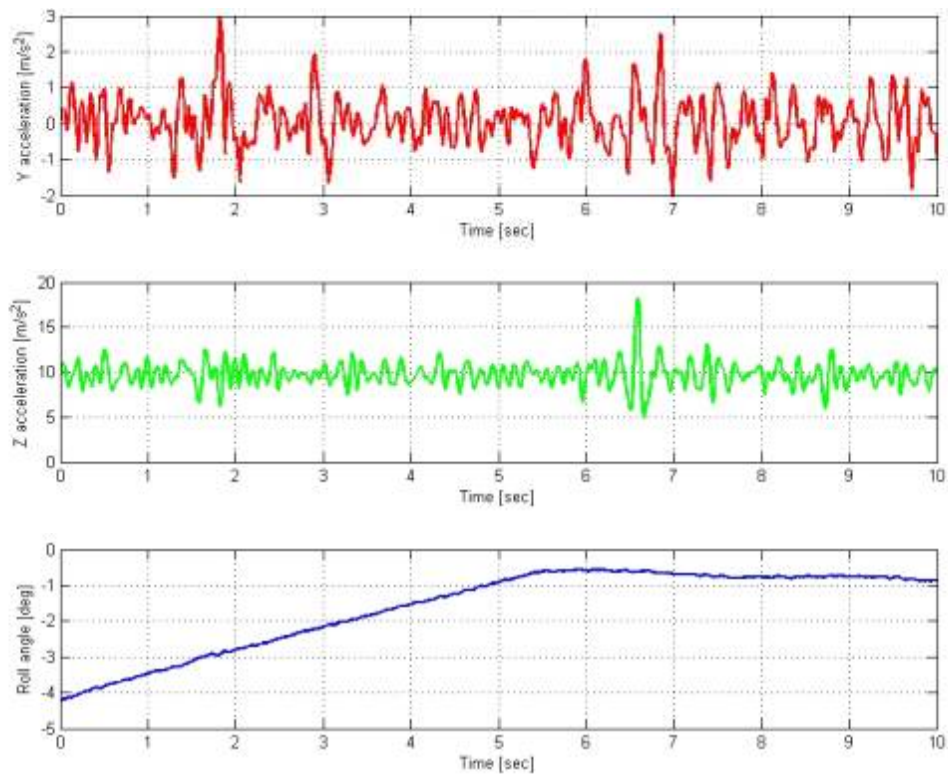
<그림 3-129> 감속구간의 INS 출력 데이터에 대한 FFT 결과

- 또한 가속 및 등속(주행), 감속 구간의 FFT 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 MATLAB을 이용하여 측정된 data에 주파수 도메인 상의 분석을 수행하였으며 그 결과는 아래 그림과 같음.
- 지정된 속도에서 평지를 주행하는 시뮬레이션 결과에 대한 Signal link의 FFT 결과와 실제 측정한 데이터의 FFT를 수행한 결과 값이 일치하는 것을 확인할 수 있으며 이를 통하여 신뢰할 수 있는 결과를 확보하였음을 알 수 있음.

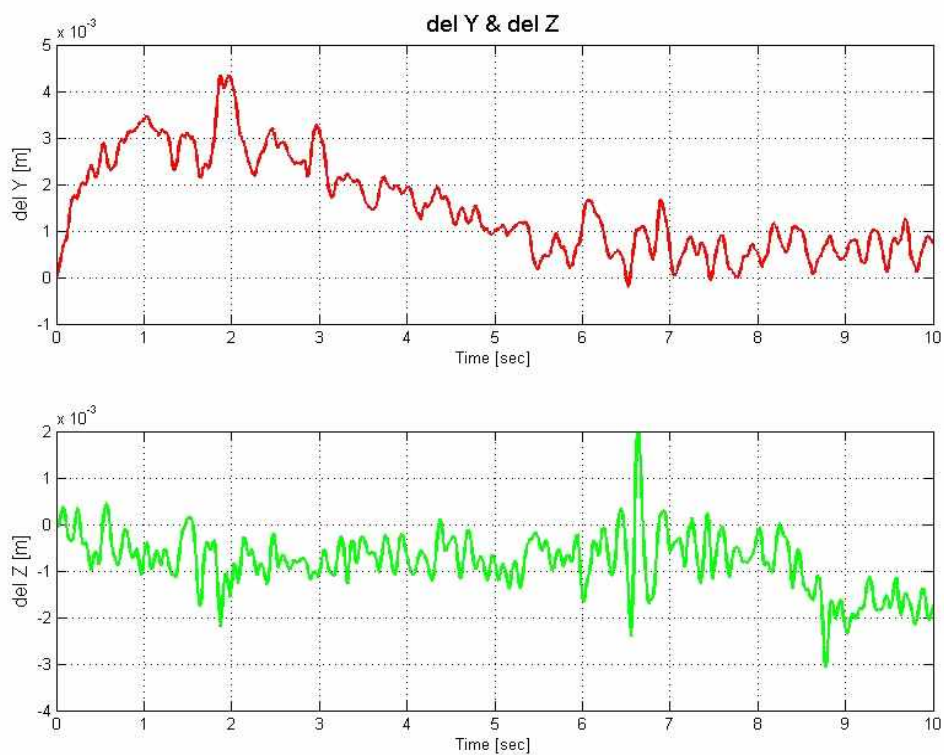


<그림 3-130> FFT 결과 비교

- 현장시험 시 적용된 주향속도를 측정한 각도 데이터에 대한 보상을 적용하고 주행속도센서의 Digital Data를 알고리즘에 적용한 결과는 아래 그림과 같음.
- 이때 알고리즘으로 계산된 Y, Z축의 결과 값이 실제 측정과 달리 기저선에 대한 보상이 수행되지 않아 Fluctuation이 발생하는 것을 제외하고는 아래 그림과 같이 측정 데이터와 파형의 형태와 경향이 일치함을 확인할 수 있음.



<그림 3-131>측정된 INS Data (위에서부터 Y축 가속도, Z축 가속도, Roll 각도)



<그림 3-132>알고리즘으로 계산된 del_Y, del_Z

(5) 반복성 성능검증

○ 반복성에 대한 성능검증은 기술한 바와 같이 다음과 같은 동일한 조건 즉, 속도 및 주행방향이 동일한 조건하에서 반복 측정하여 측정값의 일치 여부를 확인하였음.

·동일한 측정방법

·측정 방향 동일

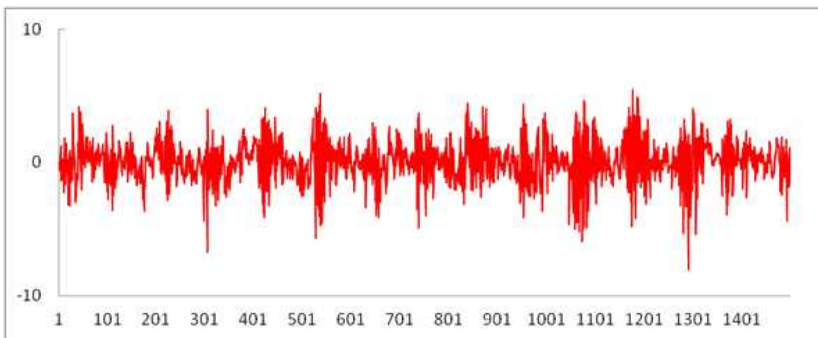
·해석방법의 동일

·유사한 환경조건

○ 측정 시 수집한 데이터의 간격을 2cm 단위로 하였기 때문에 총 30m의 구간에 대하여 발생한 데이터의 수는 1500 포인트가 됨.

○ 현장측정 시 4km/hr의 시험 속도로 측정을 수행하였음.

○ 상기의 조건을 적용하여 측정구간에 대하여 2회 측정을 반복 수행하였으며 각 항목에 대한 측정 결과는 다음과 같음.



Y축 범위

-10 ~ +10 mm

X축

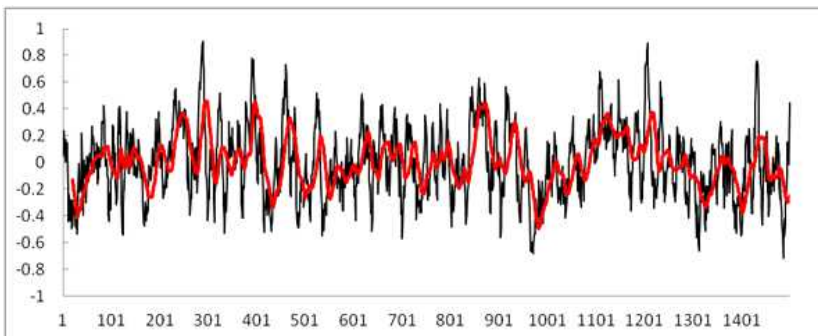
측정 포인트 수

1 ~ 1,500

흑색 : Case #1

적색 : Case #2

<그림 3-133> 면틀림 (Height, 고저)의 측정 결과



Y축 범위

-1 ~ +1 mm

X축

측정 포인트 수

1 ~ 1,500

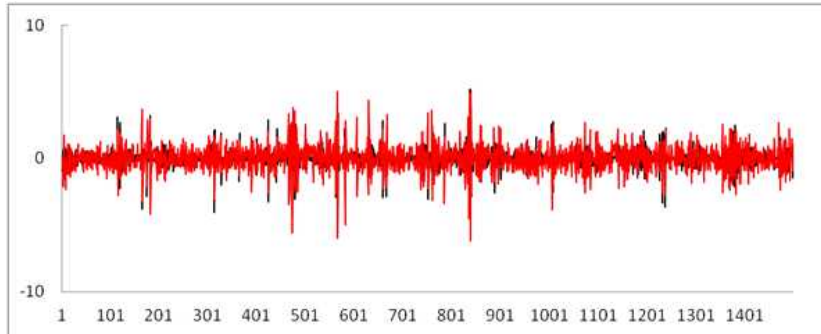
흑색 : Case #2

Difference

적색 : 추세선

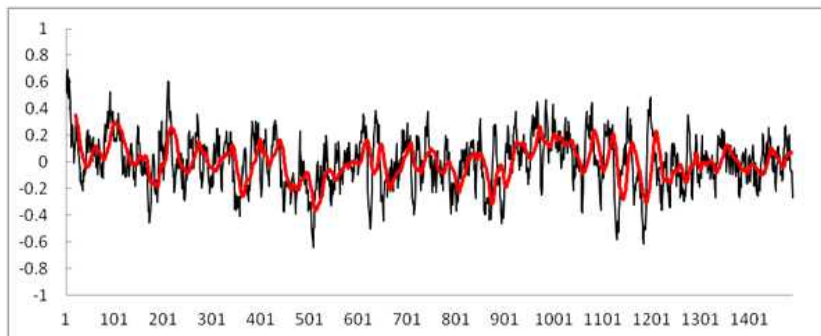
<그림 3-134> 면틀림 (Height, 고저)에 대한 반복성 시험 결과

- 면틀림(Height, 고저)에 대한 측정 결과, 반복된 측정 간 Difference의 최대값은 0.905mm 이며 최소값은 -0.714mm로서 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



Y축 범위
-10 ~ +10 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 : Case #1
적색 : Case #2

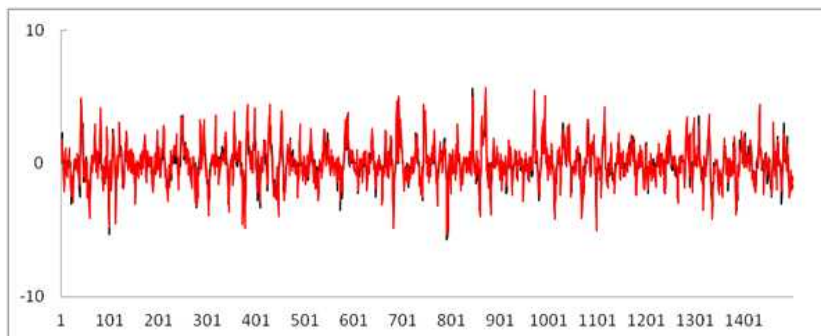
<그림 3-135> 줄틀림(Alignment, 방향)의 측정 결과



Y축 범위
-1 ~ +1 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 :
Difference
적색 : 추세선

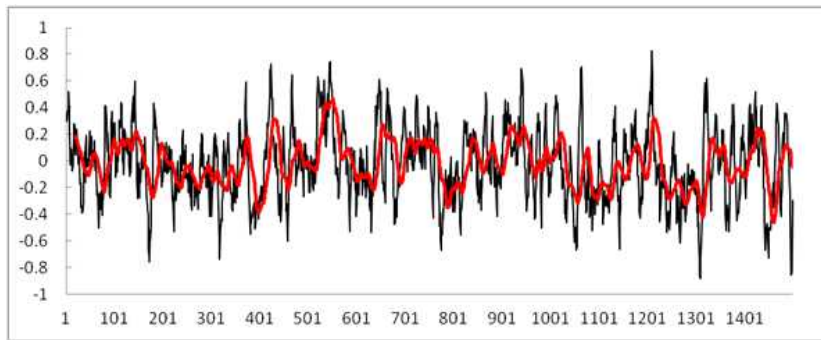
<그림 3-136> 줄틀림(Alignment, 방향)에 대한 반복성 시험 결과

- 줄틀림(Alignment, 방향)에 대한 측정 결과, 반복된 측정 간 Difference의 최대값은 0.693mm 이며 최소값은 -0.715mm로서 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



Y축 범위
-10 ~ +10 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 : Case #1
적색 : Case #2

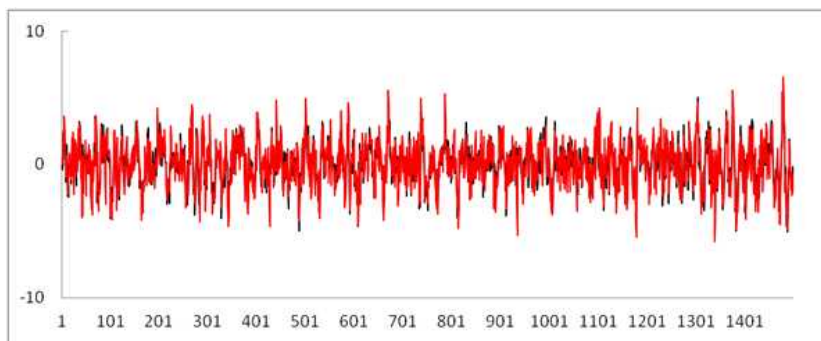
<그림 3-137> 제간의 측정 결과



Y축 범위
-1 ~ +1 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 :
Difference
적색 : 추세선

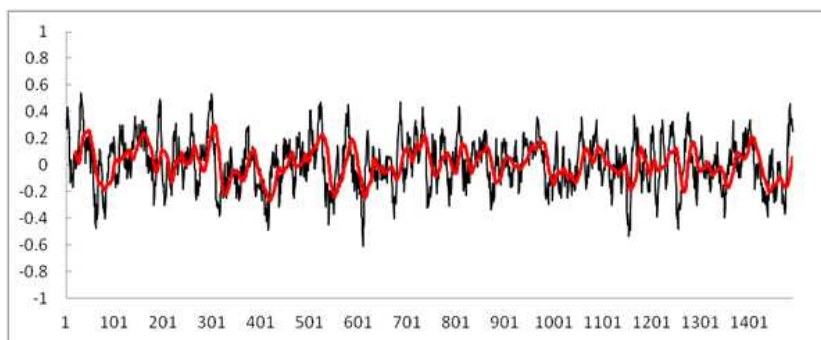
<그림 3-138> 궤간에 대한 반복성 시험 결과

궤간에 대한 측정 결과, 반복된 측정 간 Difference의 최대값은 0.829mm 이며, 최소값은 -0.881mm로서 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



Y축 범위
-10 ~ +10 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 : Case #1
적색 : Case #2

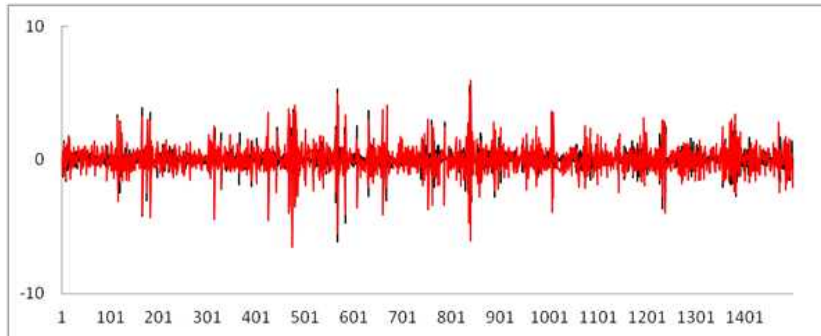
<그림 3-139> 캔트의 측정 결과



Y축 범위
-1 ~ +1 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 :
Difference
적색 : 추세선

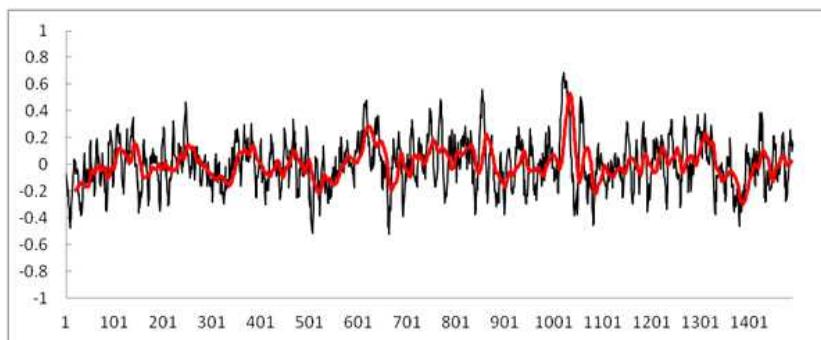
<그림 3-140> 캔트에 대한 반복성 시험 결과

- 캔트에 대한 측정 결과, 반복된 측정 간 Difference의 최대값은 0.678mm이며 최소값은 -0.625mm로서 $\pm 2.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



Y축 범위
-10 ~ +10 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 : Case #1
적색 : Case #2

<그림 3-141> 트위스트의 측정 결과



Y축 범위
-1 ~ +1 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 :
Difference
적색 : 추세선

<그림 3-142> 트위스트에 대한 반복성 시험 결과

- 캔트에 대한 측정 결과, 반복된 측정 간 Difference의 최대값은 0.766mm이며 최소값은 -0.521mm로서 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.

(6) 재현성 성능검증

재현성에 대한 성능검증은 기술한 바와 같이 다음과 같은 조건 하에서 반복하여 측정값의 일치 여부를 확인하였음.

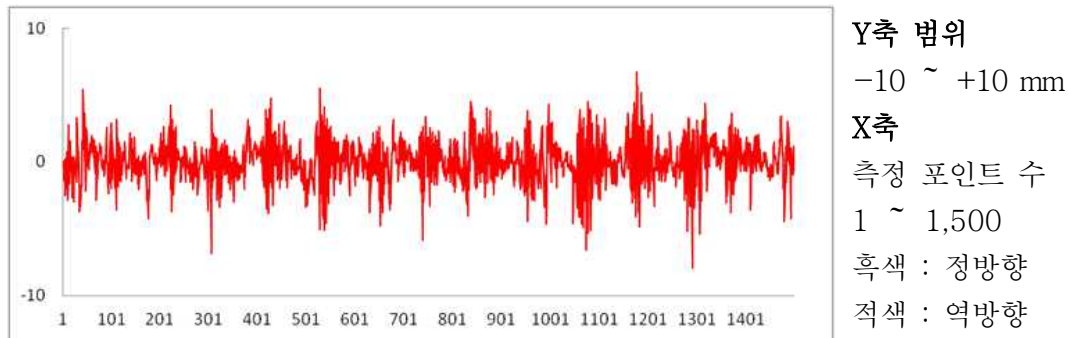
- 시험속도 상이
- 차량주행 방향 상이
- 상이한 환경조건

·반복 측정시험간 시간간격이 작을 것

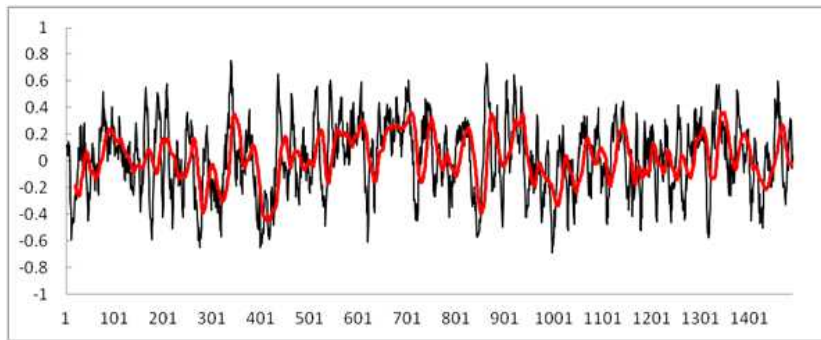
- 이때 측정 Case는 모두 3가지로 하였고 2km/hr, 4km/hr, 6km/hr의 시험 속도를 적용하였으며 각 속도에서 정방향 주행과 역방향 주행으로 각 1회씩 측정하여 데이터를 취득하였음.
- 또한 역방향 측정 결과는 역으로 Plotting 하여 정방향 측정 결과와 비교할 수 있도록 도시하였으며 각각의 속도에서 측정한 데이터에 대하여 방향별로 평균값을 취하여 도시하였음.
- 재현성에 대한 요구 성능은 아래 표 와 같으며 5개의 측정 결과가 목표치의 오차 범위 내에 있는 지를 확인하였음.

<표 4-33> 재현성에 대한 요구성능

평 가 항 목	단 위	목 표 치	비 고
재현성 - 고저	mm	± 1.0	
재현성 - 방향	mm	± 1.0	
재현성 - 궤간	mm	± 1.0	
재현성 - 수평(켄트)	mm	± 2.0	
재현성 - 뒤틀림(트위스트)	mm	± 1.0	



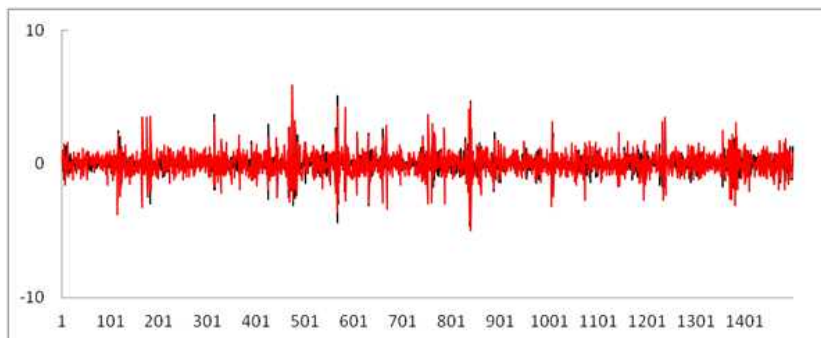
<그림 3-143> 면틀림(Height, 고저)의 측정 결과



Y축 범위
-1 ~ +1 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 :
Difference
적색 : 추세선

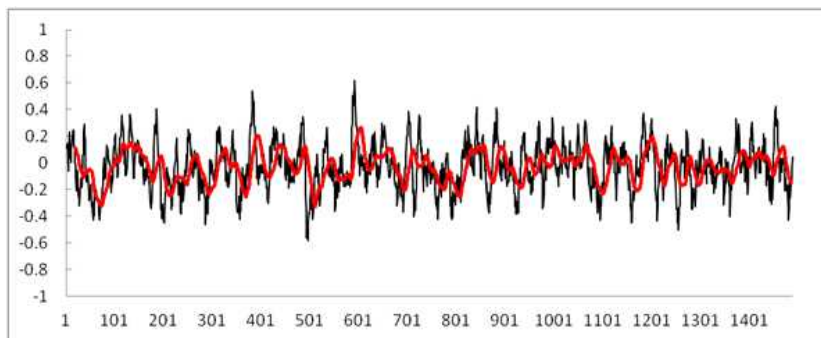
<그림 3-144> 면틀림(Height, 고저)에 대한 재현성 시험 결과

○ 면틀림(Height, 고저)에 대한 측정 결과, 측정 간 Difference의 최대값은 0.704mm 이며 최소값은 -0.868mm로서 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



Y축 범위
-10 ~ +10 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 : 정방향
적색 : 역방향

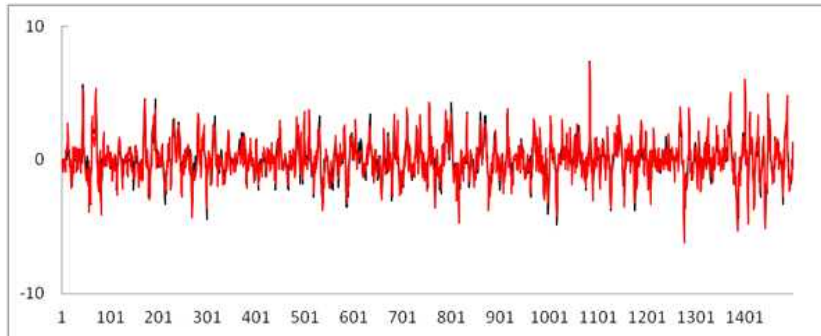
<그림 3-145> 줄틀림(Alignment, 방향)의 측정 결과



Y축 범위
-1 ~ +1 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 :
Difference
적색 : 추세선

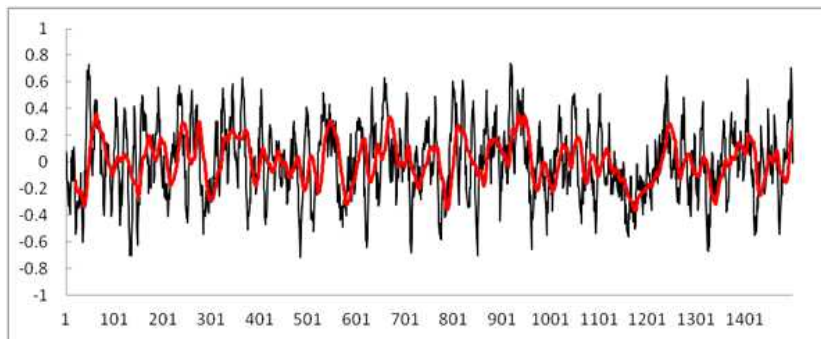
<그림 3-146> 줄틀림(Alignment, 방향)에 대한 재현성 시험 결과

- 줄틀림 (Alignment, 방향)에 대한 측정 결과, 측정 간 Difference의 최대값은 0.619mm 이며 최소값은 -0.892mm로서 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



Y축 범위
-10 ~ +10 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 : 정방향
적색 : 역방향

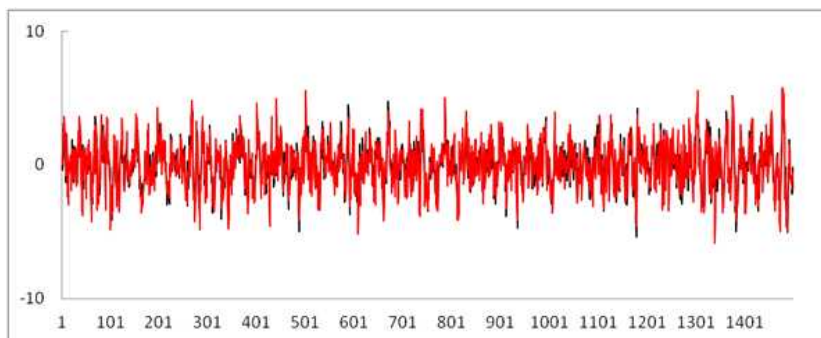
<그림 3-147> 케간의 측정 결과



Y축 범위
-1 ~ +1 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 :
Difference
적색 : 추세선

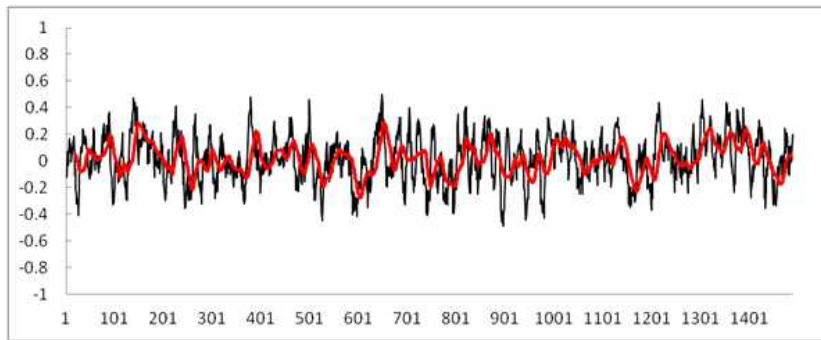
<그림 3-148> 케간에 대한 재현성 시험 결과

- 케간에 대한 측정 결과, 측정 간 Difference의 최대값은 0.740mm 이며 최소값은 -0.717mm로서 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



Y축 범위
-10 ~ +10 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 : 정방향
적색 : 역방향

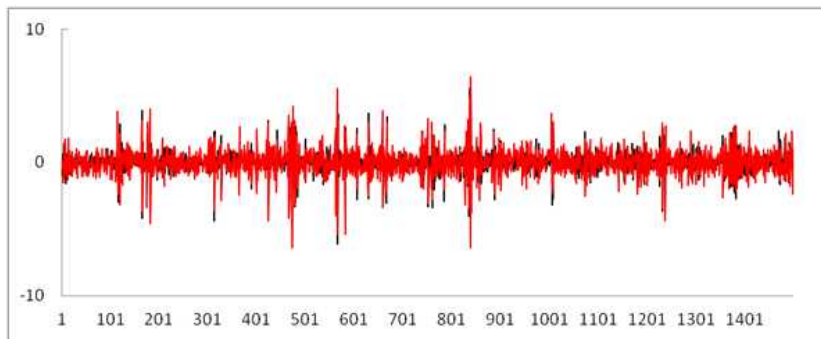
<그림 3-149> 켄트의 측정 결과



Y축 범위
-1 ~ +1 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 :
Difference
적색 : 추세선

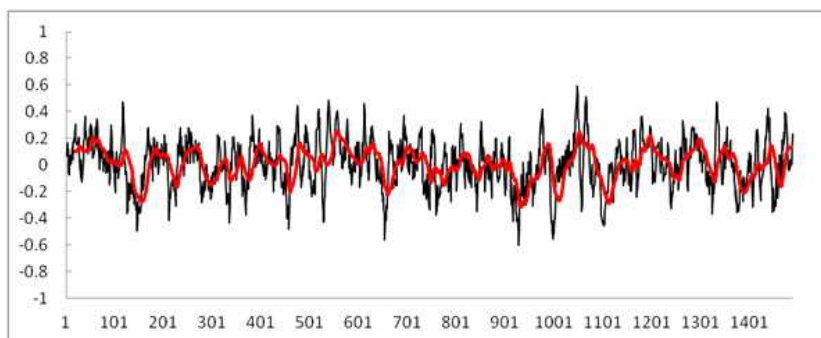
<그림 3-150> 캔트에 대한 제현성 시험 결과

○ 캔트에 대한 측정 결과, 측정 간 Difference의 최대값은 0.580mm 이며 최소값은 -0.540mm로서 $\pm 2.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



Y축 범위
-10 ~ +10 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 : 정방향
적색 : 역방향

<그림 3-151> 트위스트의 측정 결과



Y축 범위
-1 ~ +1 mm
X축
측정 포인트 수
1 ~ 1,500
흑색 :
Difference
적색 : 추세선

<그림 3-152> 트위스트에 대한 재현성 시험 결과

○ 캔트에 대한 측정 결과, 측정 간 Difference의 최대값은 0.591mm 이며 최소값은 -0.881mm로서 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.

- 아래 표에서 보는 바와 같이 주요항목에 대한 현장시험의 결과가 요구성능을 만족함을 확인할 수 있음.

<표 3-34> 재현성에 대한 성능검증 결과

항목	단위	요구성능	현장시험 결과
재현성 - 고저	mm	± 1.0	-0.868 ~ 0.704
재현성 - 방향	mm	± 1.0	-0.892 ~ 0.619
재현성 - 궤간	mm	± 1.0	-0.717 ~ 0.740
재현성 - 수평(캔트)	mm	± 2.0	-0.540 ~ 0.580
재현성 - 뒤틀림(트위스트)	mm	± 1.0	-0.881 ~ 0.591

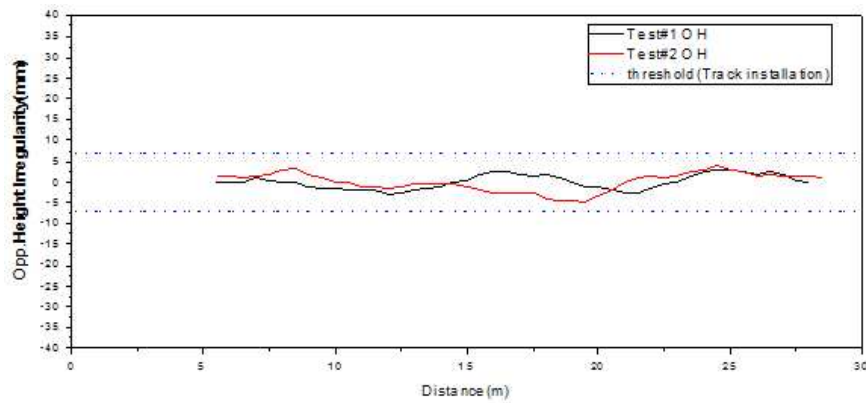
(7) 측정정밀도 성능검증

- 기술한 바와 같이 시험 장비의 측정정밀도 검증을 위하여 참조장비인 Track Master를 이용하였음.
- 즉, 참조장비의 측정결과를 신뢰할 수 있는 측정결과로 보고 동일한 구간에 대하여 시험장비의 측정결과와 비교하여 측정 결과값의 차이가 95%의 신뢰 수준으로 일치하는 지를 확인하였음.
- 다만 참조장비인 Track Master의 측정결과가 0.5m 단위로 출력되는 것을 감안하여 시험장비의 측정결과가 참조장비와 비교 가능하도록 시험장비로 측정한 결과를 조정하였음.
- 따라서, 참조장비가 30m 구간에 대하여 60개의 측정 포인트(0.5m 마다 측정)를 가지기 때문에 시험장비의 측정결과에 대하여 Moving Average 방식(Window Size = 50cm/2cm = 25)을 적용하여 동일한 측정 포인트 수를 가지도록 조정하였음.

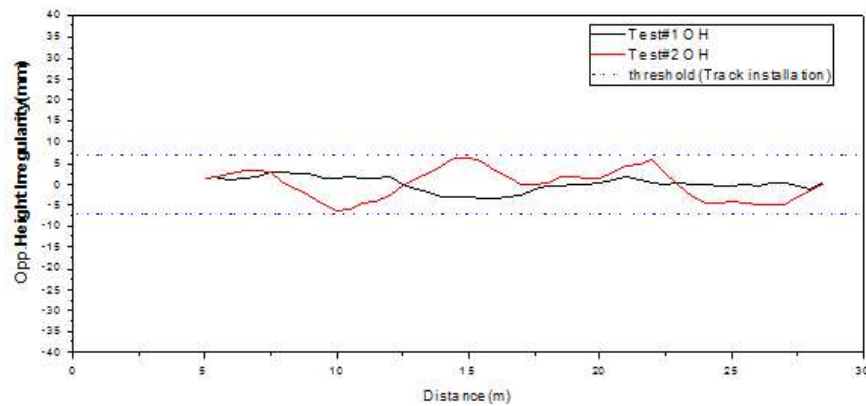
<표 3-35> 측정정밀도에 대한 요구성능

평가항목	단위	목표치	비고
측정정밀도 - 고저	mm	± 0.5	궤도틀림검측
측정정밀도 - 방향	mm	± 0.5	궤도틀림검측
측정정밀도 - 궤간	mm	± 0.5	궤도틀림검측
측정정밀도 - 수평(캔트)	mm	± 1.0	궤도틀림검측
측정정밀도 - 뒤틀림(트위스트)	mm	± 1.0	궤도틀림검측

- 측정정밀도에 대한 요구 성능은 위에 표와 같으며 시험장비의 측정결과와 참조장비의 측정 결과가 목표치의 오차 범위 내에 있는 지를 확인하였음.

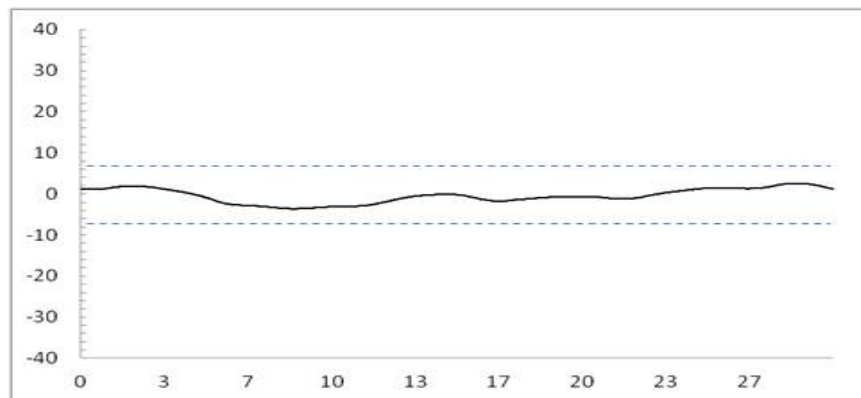


<그림 3-153> 참조장비 측정 결과 1 (Height:고저, Test#1:정방향, Test#2:역방향)



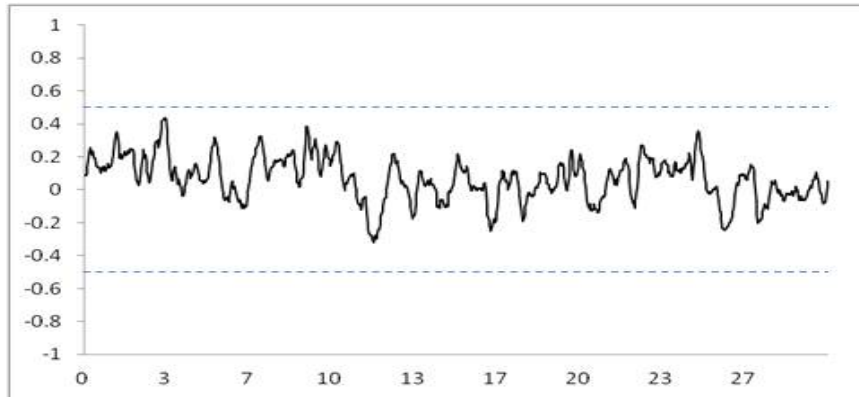
<그림 3-154> 참조장비 측정 결과 2

(Height:고저, Test#1:정방향, Test#2:역방향)

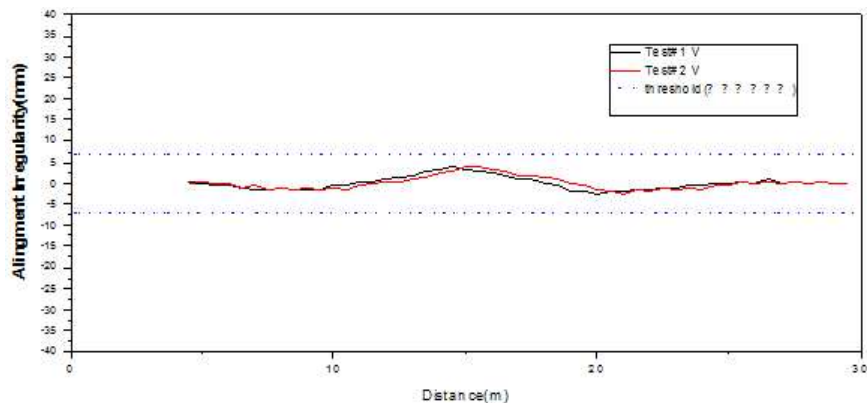


<그림 3-155> 시험장비 측정 결과 (Height:고저)

- 참조장비의 측정결과와 시험장비의 측정결과와의 차를 비교한 결과는 아래 그림과 같으며 Difference의 최대값은 0.437mm 이며 최소값은 -0.322mm로서 $\pm 0.5\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.

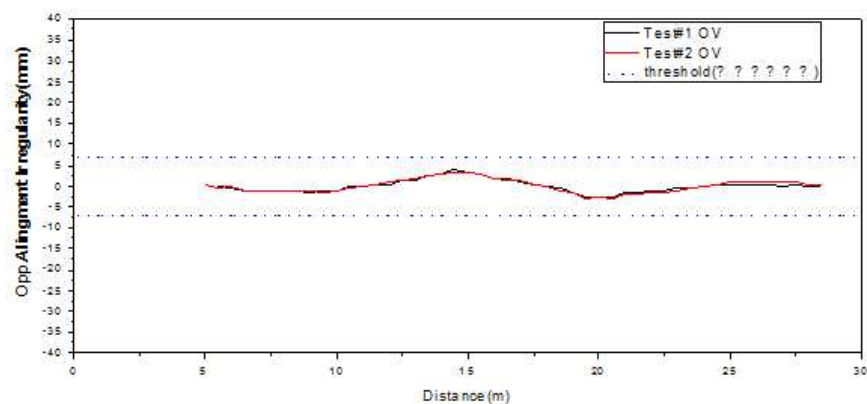


<그림 3-156> 참조장비와 시험장비의 측정결과 비교 (Height:고저)



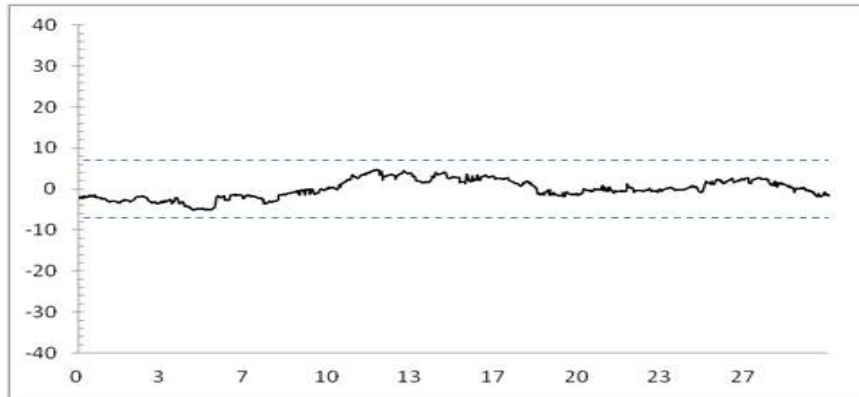
<그림 3-157> 참조장비 측정 결과 1

(Alignment:방향, Test#1:정방향, Test#2:역방향)



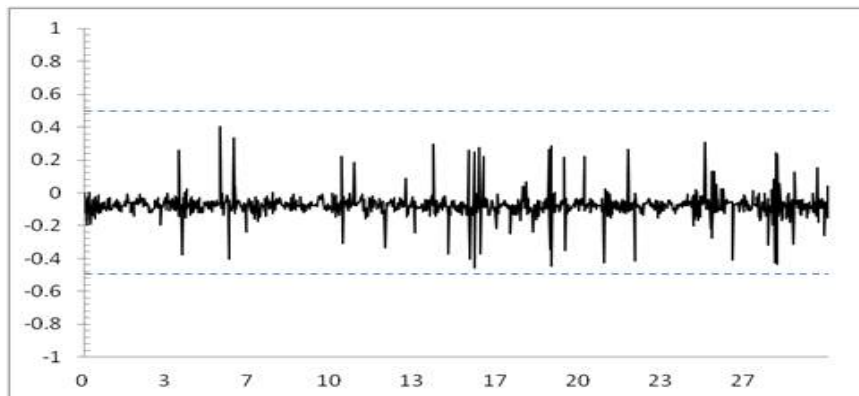
<그림 3-158> 참조장비 측정 결과 2

(Alignment:방향, Test#1:정방향, Test#2:역방향)

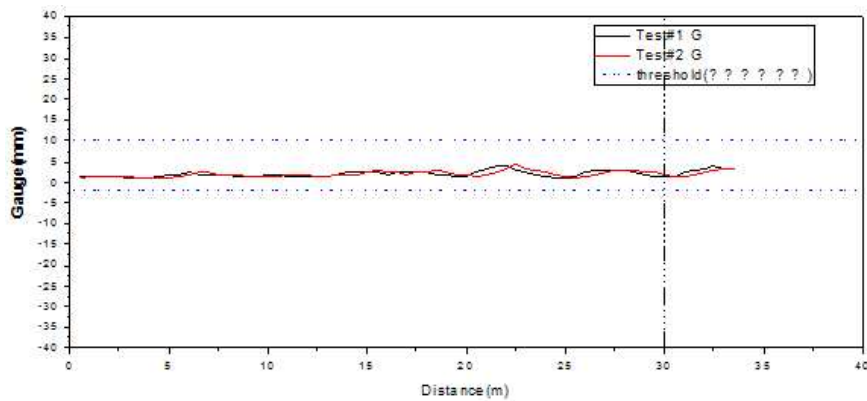


<그림 3-159> 시험장비 측정 결과 (Alignment:방향)

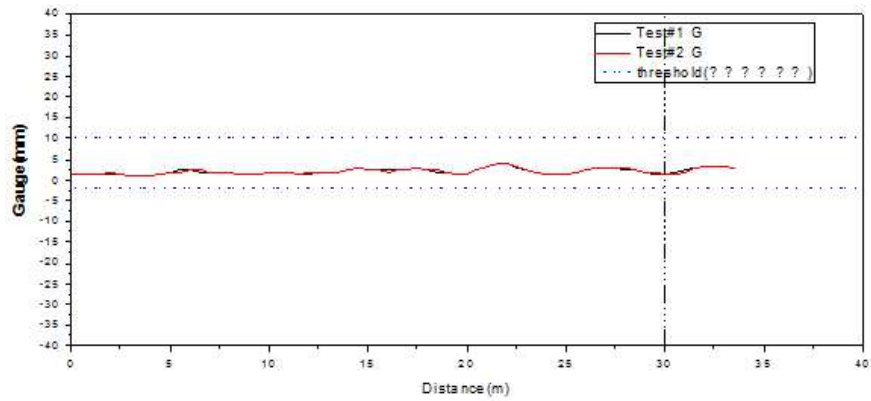
- 참조장비의 측정결과와 시험장비의 측정결과의 차를 비교한 결과는 아래 그림과 같으며 Difference의 최대값은 0.401mm 이며 최소값은 -0.457mm로서 $\pm 0.5\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



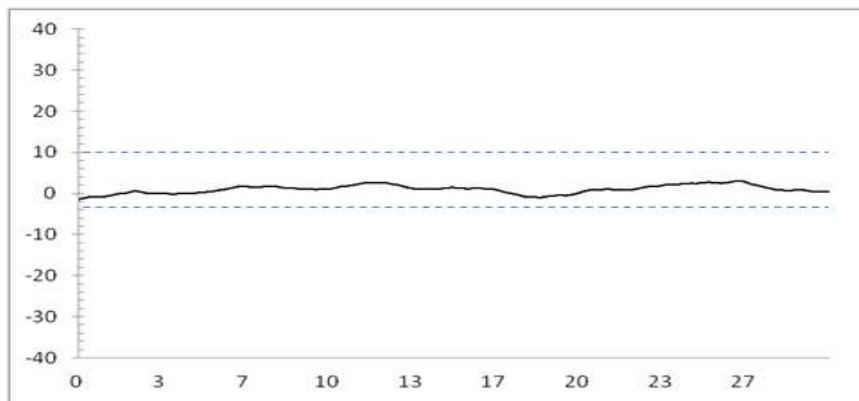
<그림 3-160> 참조장비와 시험장비의 측정결과 비교 (Alignment:방향)



<그림 3-161> 참조장비 측정 결과 1 (계간, Test#1:정방향, Test#2:역방향)

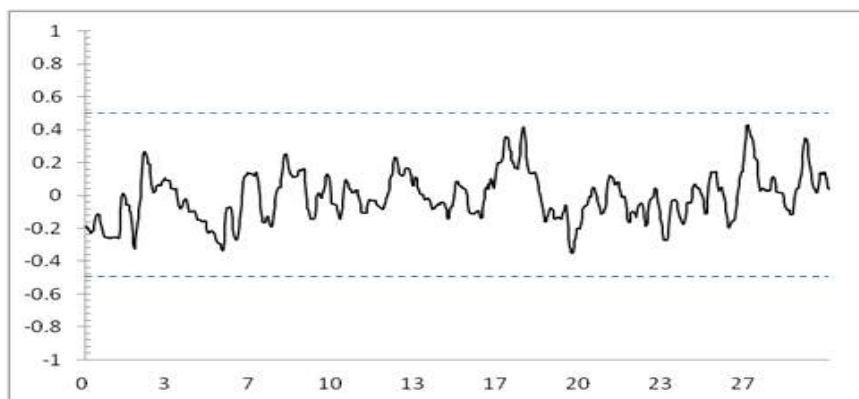


<그림 3-162> 참조장비 측정 결과 2 (궤간, Test#1:정방향, Test#2:역방향)

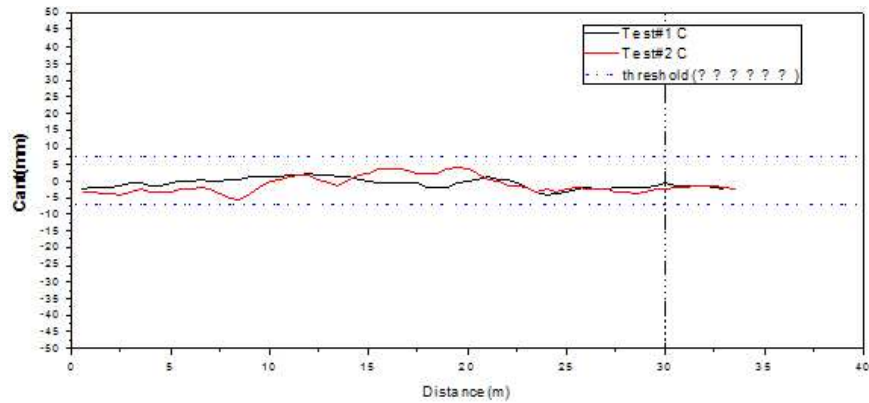


<그림 3-163> 시험장비 측정 결과 (궤간)

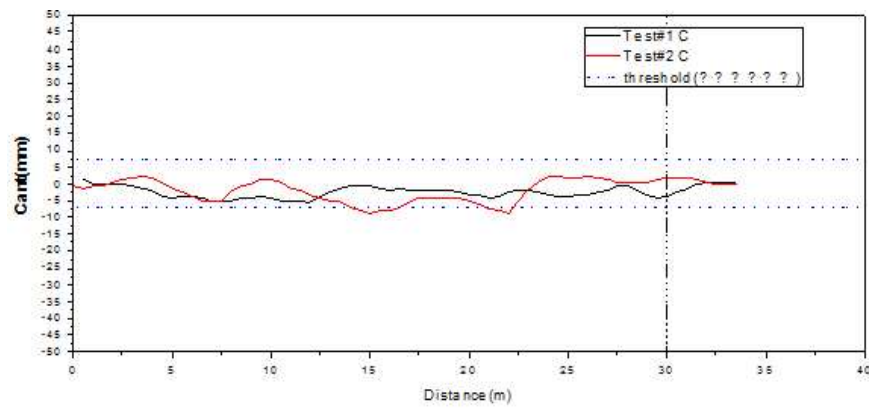
- 참조장비의 측정결과와 시험장비의 측정결과의 차를 비교한 결과는 아래 그림과 같으며 Difference의 최대값은 0.426mm 이며 최소값은 -0.350mm로서 $\pm 0.5\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



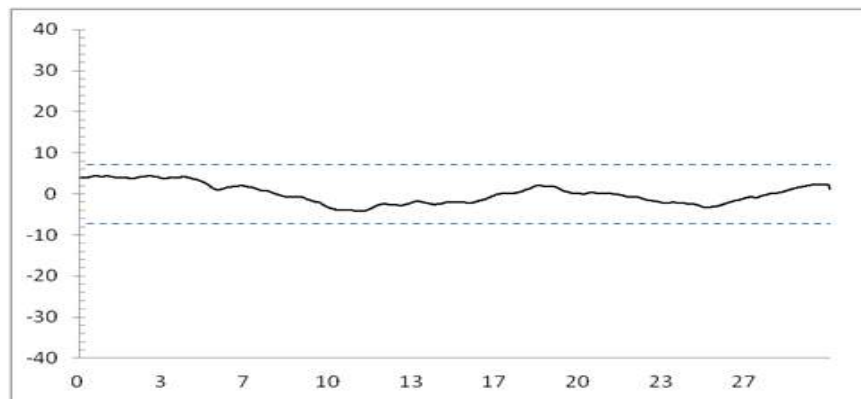
<그림 3-164> 참조장비와 시험장비의 측정결과 비교 (궤간)



<그림 3-165> 참조장비 측정 결과 1 (켄트, Test#1:정방향, Test#2:역방향)

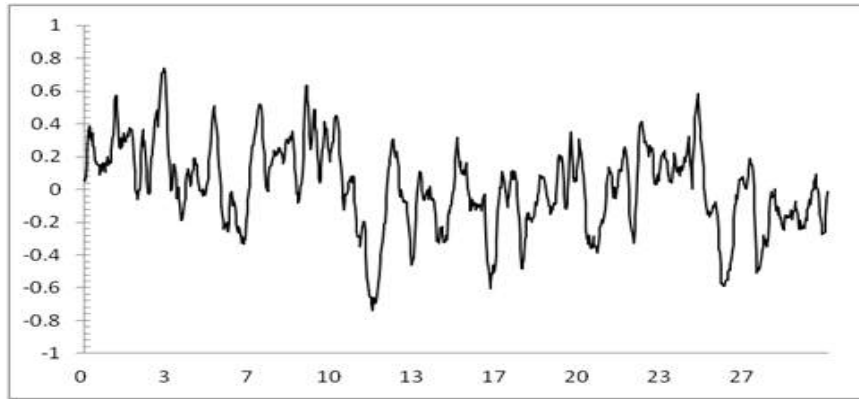


<그림 3-166> 참조장비 측정 결과 2 (켄트, Test#1:정방향, Test#2:역방향)

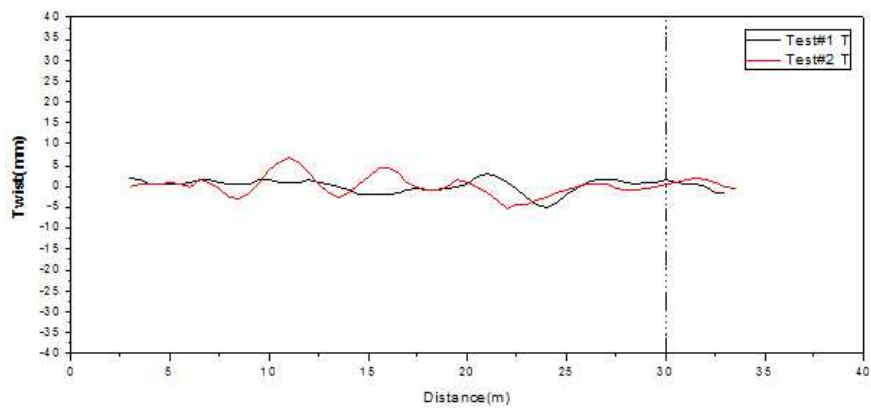


<그림 3-167> 시험장비 측정 결과 (켄트)

- 참조장비의 측정결과와 시험장비의 측정결과의 차를 비교한 결과는 아래 그림과 같으며 Difference의 최대값은 0.737mm 이며 최소값은 -0.740mm로서 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.

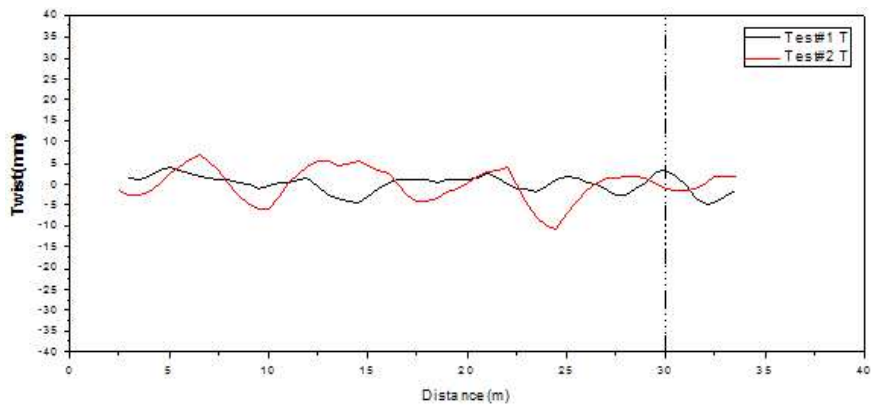


<그림 3-168> 참조장비와 시험장비의 측정결과 비교 (캔트)



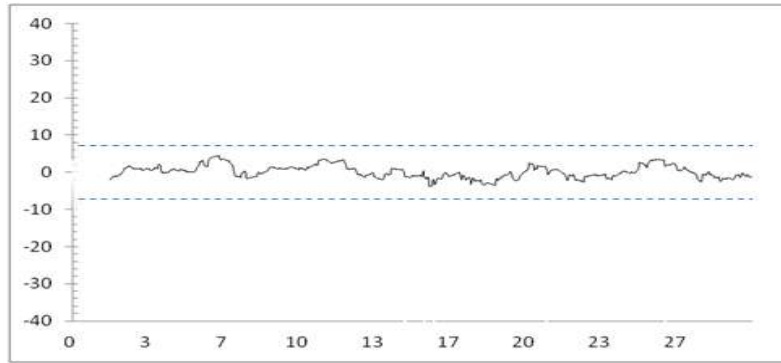
<그림 3-169> 참조장비 측정 결과 1

(트위스트, Test#1:정방향, Test#2:역방향)



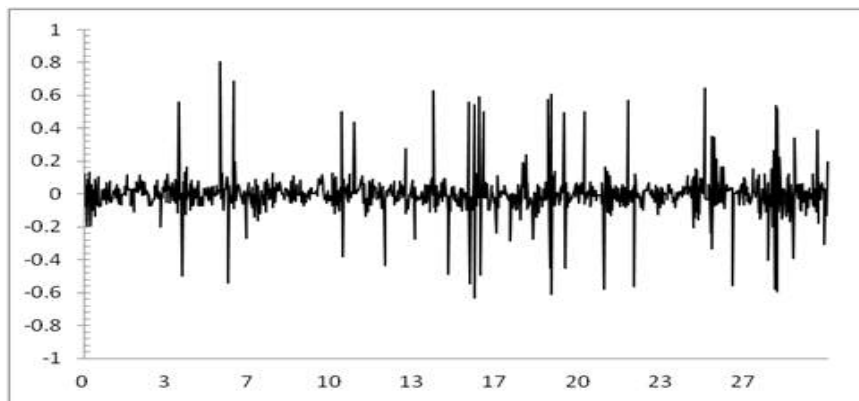
<그림 3-170> 참조장비 측정 결과 2

(트위스트, Test#1:정방향, Test#2:역방향)



<그림 3-171> 시험장비 측정 결과 (트위스트)

- 참조장비의 측정결과와 시험장비의 측정결과의 차를 비교한 결과는 아래 그림과 같으며 Difference의 최대값은 0.806mm 이며 최소값은 -0.632mm로서 $\pm 0.5\text{mm}$ 의 범위 내에 있음을 확인할 수 있음.



<그림 3-172> 참조장비와 시험장비의 측정결과 비교 (트위스트)

- 아래 표에서 보는 바와 같이 주요항목에 대한 현장시험의 결과가 요구성능을 만족함을 확인할 수 있음.

<표 3-36> 측정 정밀도에 대한 성능검증 결과

항목	단위	요구성능	현장시험 결과
측정정밀도 - 고저	mm	± 0.5	-0.322 ~ 0.437
측정정밀도 - 방향	mm	± 0.5	-0.457 ~ 0.401
측정정밀도 - 레간	mm	± 0.5	-0.350 ~ 0.426
측정정밀도 - 수평(켄트)	mm	± 1.0	-0.740 ~ 0.737
측정정밀도 - 뒤틀림(트위스트)	mm	± 1.0	-0.632 ~ 0.806

제 4 장 목표 달성도 및 관련분야 기여도

제 1 절 질적성과 달성도

1. 1차년도 연구목표 및 달성도

연구목표	세부추진내용	달성도
■ 진동저감형 고분자 압전 소재 개발	- 국내외 압전소재 적용 사례 조사 - 압전소재 종류 및 성능 조사 - 철도궤도 진동 발생저감을 위한 고분자 재료 방진패드 합성 완성 - 진동발생 저감형 압전소재(압전소재+고분자재료) 기본모형 개발 - 압전소재와 구조적 결합한 방진패드 성형물 개발	100%
■ 압전소재 이용 자가발전 시스템 모델링	- 진동저감형 자가발전 시스템 기본 모형 설계 - 압전소재 활용 자가발전형 패드, 매트 및 침목의 궤도상 최적설치 위치 설계	100%
■ 궤도 안전진단 모니터링 기술 개발	- 기존 궤도 모니터링 기법 자료 조사 - 압전소재 회로망 구성 설계 - 압전소재 기반 궤도모니터링 기술 기본모형 개발 - 패드 및 매트소재별 철도 차량하중에 의한 진동 발생 동적 거동 분석	100%

2. 2차년도 연구목표 및 달성도

연구목표	세부추진내용	달성도
■ 진동저감형 고분자 압전 소재 개발	- 진동 발생저감을 위한 고분자 재료 시제품 개발 - 진동발생 저감형 압전소재(압전소재+고분자재료) 시제품 개발 - 신 개발된 진동발생 저감형 패드 및 매트를 적용한 동적 거동 분석	100%
■ 압전소재 이용 자가발전 시스템 모델링	- 패드형 압전소자를 이용한 전하 펌프 테스트 - 압전소재 자가발전 시스템 제작 - 압전소재 자가발전 시스템 테스트 - 진동저감형 자가발전 시스템 mock-up 테스트	100%
■ 궤도 안전진단 모니터링 기술 개발	- 압전소재 활용 자가발전형 패드, 매트 및 침목의 궤도상 최적설치 위치 설계 완성 - 압전소재 기반 궤도모니터링 기술 모형 개발 - 궤도상 차량위치파악, 하중, 침하 모니터링 파악 회로망 모형구성	100%

3. 질적성과 목표기준표

구분	연구목표		세부목표		성과점검기준					
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	기준치	달성률
주관	1	압전소자 이용 자가발전 시스템 개발	1-1	자가발전 시스템 구성	① 집전효율	10%	10%	성능평가	10	100%
					② 자가발전 시스템 개발	1건	1건	자가발전시스템 개발 여부	7	100%
					③ 무선 센서를 이용 한 데이터 전송	99%	99%	성능평가	18	100%
	2	케도 모니터링 기술 개발	2-1	모니터링 시스템 구성	① 케도 안전진단 시스템 설계	1건	1건	케도 안전진단 시스템 설계 여 부	15	100%
					② 케도안전진단 모형제시	1건	1건	케도 안전진단 기본 모형제시 여부	15	100%
공동	3	진동저감형 고분자 압전소재 개발	3-1	진동저감형 압전소재 개 발	① 진동저감효율	5% (PPV)	5% (PPV)	성능평가	20	100%
					② 영구압축 줄임률	25%	25%	성능평가	15	100%

제 2 절 양적성과 달성도

본 연구는 당초 연구개발계획서에 명시된 논문게재, 논문발표, 특허 등의 성과를 적절하게 달성하였음.

세부 수치 및 연차별 실적은 아래와 같음.

구분		목표	달성	달성률
국외 논문 게재	SCI	1	1	100%
국내 논문 게재	비SCI	3	3	100%
국내 논문 발표	국내외	3	4	100% (초과달성)
특허 출원	국내	3	4	100% (초과달성)
인력 양성	석사	2	2	100%

1. 국외논문게재

- ① Synthesis of Double-Sided Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Electrodes on Poly(vinylidene fluoride) Film via a Combination of Spray Coating and Vapor-Phase Polymerization Methods

2. 국내 논문게재

- ① PVDF 압전소자 활용 전기 에너지 수집
- ② 철도레일 복합 압전패드의 구성 차이에 따른 전압 발생 특성 분석
- ③ 철도의 진동신호 고속 전송을 위한 데이터 압축 알고리즘 설계 및 구현

3. 국내 논문 발표

- ① 레일패드 내 압전소자의 적층형태에 따른 전력 생산평가
- ② Test Evaluation of Voltage Production for PZT Elements Installed in Railway Pad with Different Bonding Structures
- ③ A Comparative Evaluation of Piezoelectric Polymer and Ceramic Materials Laminated in a Vibration-Proof Track Pad as an Alternative Energy Source
- ④ Synthesis of Double-Sided Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Electrodes on Poly(vinylidene fluoride) Film viaa Combination of Spray Coating and Vapor-Phase Polymerization Methods

4. 특허출원

- ① 궤도안전진단 시스템 및 방법
- ② 고속전송을 위한 데이터 압축방법 및 장치
- ③ 미세전류 측정장치 및 방법
- ③ 고밀도 연질 우레탄 폼 및 이의 제조방법

제 5 장 연구개발성과의 활용계획

1. 연구결과의 활용방안

- 개발된 기술은 친환경 교통 시스템인 철도에 신재생 에너지 수확기술을 접목한 것으로서 철도의 취약점인 진동의 저감과 에너지 수집이라는 목적을 함께 달성하는데 기술개발의 초점이 맞추어져 있음.
- 따라서, 이와 같은 기술개발의 효과를 높이기 위해 집전 효율을 높이고 진동을 효과적으로 저감할 수 있는 고품질의 폴리머 재료를 활용한 진동저감형 압전소재를 지속적으로 개발할 것임.
- 이러한 원천 기술개발은 궁극적으로 상용화를 목적으로 하고 있으며 제품의 완성도를 높일 경우 기존선 구간과 신설 철도구간에 대한 개발기술의 적용을 시도할 것이며 이를 통해 효과가 검증되면 해외 판매 또한 진행할 수 있을 것임
- 국내 철도 총 운행노선 연장은 2013년 현재 약 3,600km이며 도시철도의 연장은 1,214.4km에 이릅니다. 도시철도는 특히, 운행빈도가 높아 본 개발기술의 초기 적용과 판매가 상대적으로 용이할 것으로 예상함. 개발기술의 판매를 위하여 기술의 적극적인 홍보와 마케팅을 진행할 것이며 주관기관과 협동기업은 집전효율을 증가시키는 기술개발 노력을 지속할 것임
- 본 연구를 통하여 개발 예정인 성과물의 활용방안은 다음과 같음
 - 진동소음 저감형 자가발전 시스템의 기존선 철도구간 적용
 - 진동소음 저감형 자가발전 시스템의 신규선 철도구간 적용
 - 압전소재 활용 궤도 진단모니터링 시스템의 기존선 철도구간 적용
 - 압전소재 활용 궤도 진단모니터링 시스템의 신규선 철도구간 적용
 - 진동소음 저감형 압전소재 및 자가발전 시스템의 상용화 및 해외수출

2. 기대성과 및 파급효과

가. 경제적 효과

- 철도연변은 철도차량 주행을 위하여 기 확보된 공유지로서 발전을 위한 추가의 용지매수가 필요 없어 기존 선로를 활용한 경제적인 신재생 에너지 수확이 가능함
- 철도궤도진동은 중량의 철도주행에 따라 불가피하게 발생하는 현상으로서 이를 활용한 자가발전은 매우 경제적인 에너지원이 될 수 있음

- 철도케도 진동을 저감하면서 자가발전을 할 수 있는 시스템은 새로운 시장수요를 창출할 것이며 국내 뿐 아니라 유럽 등 신재생 에너지에 대한 수요가 큰 지역과 전력 인프라 상황이 열악한 동남아 등의 국외시장 진출이 가능함
- 생산품의 매출증대를 위해 개발완료 후 아래와 같은 단계별 노력을 강구함

구분	홍보단계	초기시장진입단계	시장확대 단계	
시장	현장부설 및 인증단계	국내시장	국내시장	세계시장
내용	도시철도은행구간 현장부설 및 인증확보	도시철도 대상역사 등 효과확산이 용이한 지역선정 및 적용	도시철도 및 일반철도	급속이 성장하고 있는 개발기술이 필요한 개도국을 중심으로 확대
매출액(목표)	8억	10억	50억	100억

나. 사업화 · 상품화에 미치는 영향

- 철도케도에 발생하는 진동소음을 줄여주면서 자가발전하는 에너지 수확 시스템은 최근 개발되기 시작한 압전소자 활용 에너지 수확분야중 새로운 영역으로서 진동과 소음 등 환경문제가 첨예한 문제로 대두되고 있는 철로변 주거환경을 개선할 수 있기 때문에 에너지수확과 환경개선을 동시에 추구하는 사업수종이 될 수 있으며 시장성과 시장규모 또한 점진적으로 커 질 수 있을 것으로 예측됨

3. 연구결과의 기업 활용방안

가. 참여기업의 현황분석

- 업체명 : 대한폴리텍(주)
- 업 종 : 제조업 (석유화학관련제품생산)
- 매출액 : 29,044 백만원
- 고용현황 : 36명 (2015.4.30.기준)
- 본과제의 성공적인 종료 후 신규분야의 진출로 인하여 매출액기준 5%정도 증가 예상됨

제 6 장 기타사항

제 1 절 연구과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당사항 없음

제 2 절 연구개발성과의 보안등급

해당사항 없음

제 3 절 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

해당사항 없음

제 4 절 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 기술적 위험요소 대책 수립

- 철도 현장조사 및 현장계측 시 선로 내 출입으로 인한 위험요소
 - － 작업자 운행 중인 열차접촉 및 계측장비 열차운행 장애
 - － 야간작업으로 인한 작업자 피로누적 및 인지능력 저하
- ※ 철도공사 관계규정 준수(열차운행선로지장작업 업무지침)

나. 실내피로시험 시 장시간 시험에 따른 위험요소

- 연구자 피로누적 및 인지능력 저하
- 장시간 작동으로 인한 시험기 오작동

다. 안전관리대책

- 연구실 안전점검 정기적 실시
 - － 연구실의 기능 및 안전을 유지 관리하기 위하여 안전점검지침에 따라 연구실에 관한 안전점검을 정기적으로 실시
- 공동연구 연구원의 안전관련 교육훈련 시행
 - － 산업안전보건법 제31조 (안전보건교육) 및 연구실 안전환경조성에 관한 법률 제 18조에 의거, 전 직원에 대한 안전보건교육을 매달 실시. 교육 방법은 모든 직원에 대한 자체교육(2시간)을 실시하고, 안전보건교육 일지를 작성하여 관리
- 연구 내용 및 결과물 안전 확보
 - － 정기적으로 인원 및 시설 보안 항목, 문서보안 항목 그리고 정보보안 항목의 보안점검을 실시하여 연구 내용 및 결과물의 안전을 확보하고 있음.
 - － 공동연구 연구원들을 대상으로 연구 결과의 안전한 관리를 위한 안전교육 실시
- 연구실 안전 확보 계획
 - － 공동연구 연구원들이 안전관련 각종 법규, 규정 및 지침을 준수하도록 하며, 요구되는 안전교육 및 훈련 실시
 - － 실험에 관련된 위험 정보를 숙지하고 적절한 개인 보호 장비 착용 실험실에 노출된 위험을 안전관리책임자에게 보고
 - － 연구실의 잠재되어 있는 위험성 발견 및 위험물질과 각종 실험장비 등 사용에 따른 안전수칙이 잘 이행될 수 있도록 지도점검 및 교육
- 철도 현장조사 및 현장계측 시 열차정상운행에 따른 안전교육 필요
 - － 선로 내 출입 전 관계부서와 협의 및 안전교육 실시
 - － 선로 내 출입 시 철도안전관리자 1인 입회
 - － 현장조사 및 현장계측 시 연구책임자 참가
 - － 선로 내 작업 시 열차차단시간 및 철도안전관리자의 허가 후 작업 실시
 - － 선로 내 작업 시 열차감시자 2인 이상 배치
 - － 야간작업 시 작업자는 주간에 충분한 휴식을 취하도록 교육
 - － 선로 내 출입 시 안전장비(안전모, 안전조끼, 안전화) 착용 의무화

제 7 장 참고문헌

권수안, 이재준, 문학룡, 류승기 (2012), "압전세라믹 연결방식에 따른 전력생산 평가 연구", 한국도로학회 논문집, 14권, 제2호. pp.37-44.

김애림, 남상우, 오주웅, 배현웅, 임남형 (2013), "철도시스템에서의 군중압력을 이용한 에너지 수확", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.

김영문, 양민욱, 임진혁, 이근애, 김건중 (2012), "압전세라믹의 기술동향 및 도로 압전 발전시스템", 대한전기학회 전력계통·전력경제연구회 공동 춘계학술대회 논문집.

김현주 (2012), "저탄성패드 적용에 따른 노반의 전달하중 저감효과 연구", 서울과학기술대학교 철도전문대학원, 석사학위논문.

민경주, 이성욱, 이방우 (2014), "레일체결구 비선형거동에 대한 비교 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.

박광화 (2011), "레일체결장치용 폴리우레탄 탄성패드의 피로수명에 대한 온도 영향", 서울과학기술대학교 철도전문대학원, 석사학위논문.

박수홍 (2008), "진공증착법을 이용한 P(VDF-TrFE) 공중합체 박막의 압전특성에 관한 연구", 한국진공학회논문집, 17권, 제3호, pp.220-225.

배영훈, 김만철 (2013), "레일패드 정적 수직강성 시험규격 분석 및 시험방법 제안", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.

배지훈, 장승환 (2015), "복합재료구조물 거동 관찰을 위한 P(VDF-TrFE) 스마트센서의 기초연구", 한국복합재료학회논문집, pp.75-80.

이재준, 류승기, 문학룡, 권수안 (2011), "도로용 압전발전체 시험모듈 설계를 위한 기초 실험 연구", 한국도로학회 논문집, 13권, 제4호, pp.159-166.

이재준, 문학룡, 권수안, 류승기 (2011), "충격에너지를 활용한 압전 발전기의 특성을 이해하기 위한 실험 연구", 대한토목학회논문집, 31권 제5호, pp.689-695.

최윤영 (2010), "투명하고 유연한 기관 위에서 Poly(vinylidene trifluoroethylene) 박막의 제조와 특성분석", 한국과학기술원, 석사학위논문.

한국과학기술정보연구원 (2004), "압전결정소자", 한국과학기술정보연구원.

한국철도시설공단 (2013), "궤도설계일반", 한국철도시설공단.

한국철도시설공단 (2014), "궤도재료설계", 한국철도시설공단.

한국철도시설공단 (2015), "공단 표준규격서", 한국철도시설공단.

한국철도표준규격 (2006), "레일체결장치-이음매 PC침목용(KRS TR 0011-07R)".

한국철도표준규격 (2009), "레일체결장치(KRS TR 0014-15R)".

Bormashenko, E., Pogreb, R., Socol, Y., Itzhaq, M.H., Streltsov, V., Sutovski, S., Sheshnev, A., Bormashenko Y., (2004) "Poly vinylidene fluoride—piezoelectric polymer for integrated infrared optics applications", Elsevier, Ptical Materials, pp.429-434.

British Standard (2012), "Railway applications — Track— Test methods for fastening systems(Part 1: Determination of longitudinal rail restraint)", British Standard.

Cardoso, V.F., Minas, G., Costa, C.M., Tavares, C.J., Lanceros-Mendez, S. (2011), "Micro and nanofilms of poly(vinylidene fluoride) with controlled thickness, morphology and electroactive crystalline phase for sensor and actuator applications", Institute of Physics, Smart materials & structures.

Cardoso, V.F., Minasa, G., Lanceros-Mendez, S., (2013) "Multilayer spin-coating deposition of poly(vinylidene fluoride) films for controlling thickness and piezoelectric response", Elsevier, Sensors and Actuators, pp.76–80.

Carmo, T.B.D., (2014), "MULTIFACETED APPROACH FOR THE ANALYSIS OF RAIL PAD ASSEMBLY RESPONSE", Master Thesis, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana–Champaign.

Chatrathi, K.K., (2006), "Microfabrication and characterization of PVDF copolymer thin films suitable for integrating with optical microsystems", Masters thesis, Concordia University.

He, X., Yao, K. (2006). "Crystallization mechanism and piezoelectric properties of solution-derived ferroelectric poly (vinylidene fluoride) thin films", Institute of Materials Research and Engineering, Singapore.

Jian Xu, B.E., M.E. (2010), "Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University", SENSORS AND ACTUATORS A PHYSICAL.

Jones, G.D., Assink, R.A., Dargaville, T.R., Chaplya, P.M., Clough, R.L., Elliott, J.M., Martin, J.W., Mowery, D.M., Celina, M.C. (2005), "Characterization, Performance and Optimization of PVDF as a Piezoelectric Film for Advanced Space Mirror Concepts", Sandia National Laboratories.

Liu, F., Hashim, N.A., Liu, Y., Moghareh, M.R., Li, A.K., (2011), "Progress in the production and modification of PVDF membranes", Elsevier, Journal of Membrane Science, pp.1–27.

Lu, Y., He, C., Song, G., Wu, B., Chung, C.H. & Lee, Y.C. (2014), "Fabrication of broadband poly(vinylidene difluoride-trifluoroethylene) line-focus ultrasonic transducers for surface acoustic wave measurements of anisotropy of a (100) silicon wafer", Elsevier, Ultrasonics, pp.296–304.

Matsumotoa, E., Biwab, S., Katsumib, K., Omotoa, Y., Iguchib, K. & Shibata, T., (2004), "Surface strain sensing with polymer piezoelectric film", Elsevier, NDT&E international, pp.57–64.

Ploss, B. (1999), "Dielectric nonlinearity of PVDF-TrFE copolymer", Elsevier, Polymer, pp.6087–6093.

Sharmaa, T., Je, S.S., Gill, B., Zhanga, J.X.J., (2012) "Patterning piezoelectric thin film PVDF-TrFE based pressure sensor for catheter application", Elsevier, Sensors and Actuators, pp.87–92.

Siamak, N., Chanhee, B., Chinedum, O.O. & Menachem, E., (2015), "Engineering flat sheet microporous PVDF films for membranedistillation", Elsevier, Journal of Membrane Science, pp.355–363.

Szurgott, P., Gotowicki, P., Niezgoda, T., (2012), "NUMERICAL ANALYSIS OF A SHAPED RAIL PAD UNDER SELECTED STATIC LOAD", Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 19, No. 1.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발 성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.