

최종보고서(일반과제용)					보안등급			발간등록번호			
					일반[✓], 보안[]			11-B552989-000508-1			
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업			
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명					
공고번호	공고-제02호				총괄연구개발 식별번호			21CTAP-C152115-03			
					연구개발과제번호						
국가과학기술 표준분류	EI	20%	ED06	30%	EI0606	10%	EE13	10 %	EE1305	30 %	
총괄연구개발명	국문	기후변화를 대비한 IoT기반 레일 절손 및 좌굴 감지 시스템 개발									
	영문	Development of IoT-based rail break and buckling detection system for climate change									
연구개발과제명	국문	기후변화를 대비한 IoT기반 레일 절손 및 좌굴 감지 시스템 개발									
	영문	Development of IoT-based rail break and buckling detection system for climate change									
주관연구기관	기관명	한국철도공사				사업자등록번호		314-82-10024			
	주소	(34618) 대전광역시 동구 중앙로 240				법인등록번호		160171-0004321			
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)									
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31(9개월)									
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(12개월)									
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(12개월)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그외기관 등의 지원금 지방자치단체 기타()				합계		연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물		합계
총계	598,000	74,700	523,300	-	-	-	-	672,700	523,300	1,196,000	-
1년차	133,000	16,700	116,300	-	-	-	-	149,700	116,300	266,000	-
2년차	170,000	21,250	148,750	-	-	-	-	191,250	148,750	340,000	-
3년차	295,000	36,750	258,250	-	-	-	-	331,750	258,250	590,000	-
공동연구기관 등	기관명				비고						
					역할		기관유형				
공동연구기관	한국표준과학연구원				공동		국립연				
	(주)네이블커뮤니케이션즈				공동		중소기업				
연구기관 외 기관											

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022년 3월 18일

주관연구책임자 :

박 성 백

주관연구기관의 장 :

한국철도공사

나 희 승

공동연구기관의 장 :

한국표준과학연구원

박 현 민

공동연구기관의 장 :

(주)네이블커뮤니케이션즈

양 건 열

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업				총괄연구개발 식별번호			-				
내역사업명						연구개발과제번호			21CTAP-C152115-03				
국가과학기술 표준분류		EI	20%	ED06	30%	EI0606	10%	EE13	10 %	EE1305	30 %		
총괄연구개발명		기후변화를 대비한 IoT기반 레일 절손 및 좌굴 감지 시스템 개발											
연구개발과제명		기후변화를 대비한 IoT기반 레일 절손 및 좌굴 감지 시스템 개발											
전체 연구개발기간		2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)											
총 연구개발비		총1,196,000천원 (정부지원연구개발비 : 598,000천원, 기관부담연구개발비 : 598,000천원)											
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[✓] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]				기술성숙도			착수시점 기준() 종료시점 목표(✓)				
연구개발과제 유형		지정공모 [✓] 자유공모 []											
연구개발과제 특성		사회이슈해결											
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		○ 이상기온(폭염, 혹한)으로 장대레일에서 발생할 수 있는 레일변형(절손, 좌굴) 감지 불가 영역의 레일상태를 실시간으로 감지 및 경보를 전송하여 선제적인 열차탈선 사고를 예방할 수 있는 IoT 기반 레일변형 모니터링 시스템 개발										
	전체 내용		○ 레일변형 실내·현장 측정데이터 기반 모니터링 기준 정립 ○ 철도환경에 적합한 레일변형 감지 센서 개발 및 제작 ○ 레일변형 감지 센서 보호용 센서 Unit 설계 및 제작 ○ 레일변형 상태 무선 송출 통신통신 구현 ○ 측정데이터 실시간 분석 알고리즘 개발 ○ 측정데이터 실시간 모니터링 통합 관제플랫폼 개발 ○ 이상상태 경보전송 및 알람 표출 시스템 설계										
	1년차	목표	○ 레일변형 탐지 모듈 설계 및 센싱방법 도출										
		내용	○ 레일변형 검출 사용자 요구사항 분석 및 방법 도출, IoT 단말 및 관제플랫폼 설계										
	2년차	목표	○ 레일 변형 센싱 모듈 시제품 제작 및 시험										
		내용	○ 좌굴 테스트 베드 구축 및 LPWA IoT 단말 및 관제플랫폼 시제품 개발										
	3년차	목표	○ 레일변형 탐지 모듈 시제품 제작 테스트베드 구축, 현장설치										
		내용	○ 절손 테스트 베드 구축 및 IoT 단말 및 관제플랫폼 시제품 제작 및 시범설치										
연구개발성과		○ IoT 기반 레일변형 모니터링시스템 - 레일변형(절손, 좌굴) 모니터링 디바이스 - 레일변형 모니터링 통합관제플랫폼											
연구개발성과 활용방안 및 기대효과		○ 코레일 등 철도운영기관에서 취약개소로 관리중인 선로구간(궤도회로 및 관제센터에서 레일변형을 사전 감지할 수 없는 개소)에 개발시스템을 설치·적용하여 열차탈선 등 선제적인 선로장애 예방											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유		해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수		논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화학물	신품종	
									생명 정보	생물 자원			정보
		2	3	1		1							
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황		구입기관	연구시설·장비명		규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)		ZEUS 등록번호	
국문핵심어 (5개 이내)		레일 절손			레일 좌굴		IoT		모니터링 시스템		센서		
영문핵심어 (5개 이내)		Rail break			Rail buckling		Internet of things		Monitoring system		Sensor		

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
1.1 연구개발 목표	1
1.2 연구개발 배경 및 문제점	8
1.3 연구개발 국내·외 현황	14
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용	22
2.1 레일변형 탐지 테스트 베드 구축	25
2.2 레일변형 센싱모듈 개발	45
2.3 LPWA IoT 단말 및 관제플랫폼 설계	48
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	56
4. 목표 미달 시 원인분석(미해 당)	109
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	109
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	110
6.1 연구개발성과의 활용 방안	110
6.2 상용화 추진계획	112
6.3 성과점검기준표	114
7. 참고문헌	118

별첨자료(성과증빙보고서)

1. 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발 목표

1) 연구개발과제의 최종 목표

구분	내용
최종 목표	이상기온(폭염, 혹한)으로 장대레일에서 발생할 수 있는 레일변형(절손, 좌굴) 감지 불가 영역의 레일상태를 실시간으로 감지 및 경보를 전송하여 선제적인 열차탈선 사고를 예방할 수 있는 IoT 기반 레일변형 모니터링 시스템 개발
세부 목표	- 장기간 내구성 있는 레일변형 감지 센서 개발 및 제작 - 레일변형 감지 센서 보호용 센서 Unit 설계 및 제작 - 레일 응력 표준화 방안 정립 및 레일 응력 예측 모델 개발 - 측정데이터 무선 송출 통신 방식 선정(LoRa, LTE-M 등) - 측정데이터 실시간 분석 알고리즘 개발 - 통합 관제플랫폼 개발 또는 기존 IoT 플랫폼 호환 기술 개발 - 분석결과 경보 등 알람 표출 시스템 설계. 등.

2) 연구개발과제의 년차별 목표

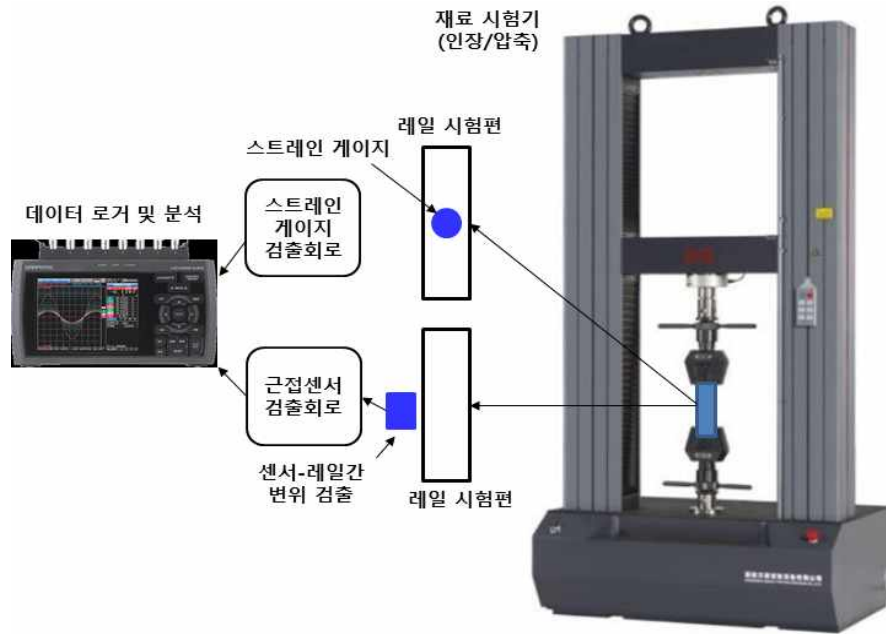
가. 1차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한국철도공사): 레일변형 검출 사용자 요구사항 분석
- 공동연구기관(한국표준과학연구원): 레일변형 검출을 위한 센싱 방법 도출
- 공동연구기관(네이블커뮤니케이션즈): LPWA IoT 단말 및 관제플랫폼 설계

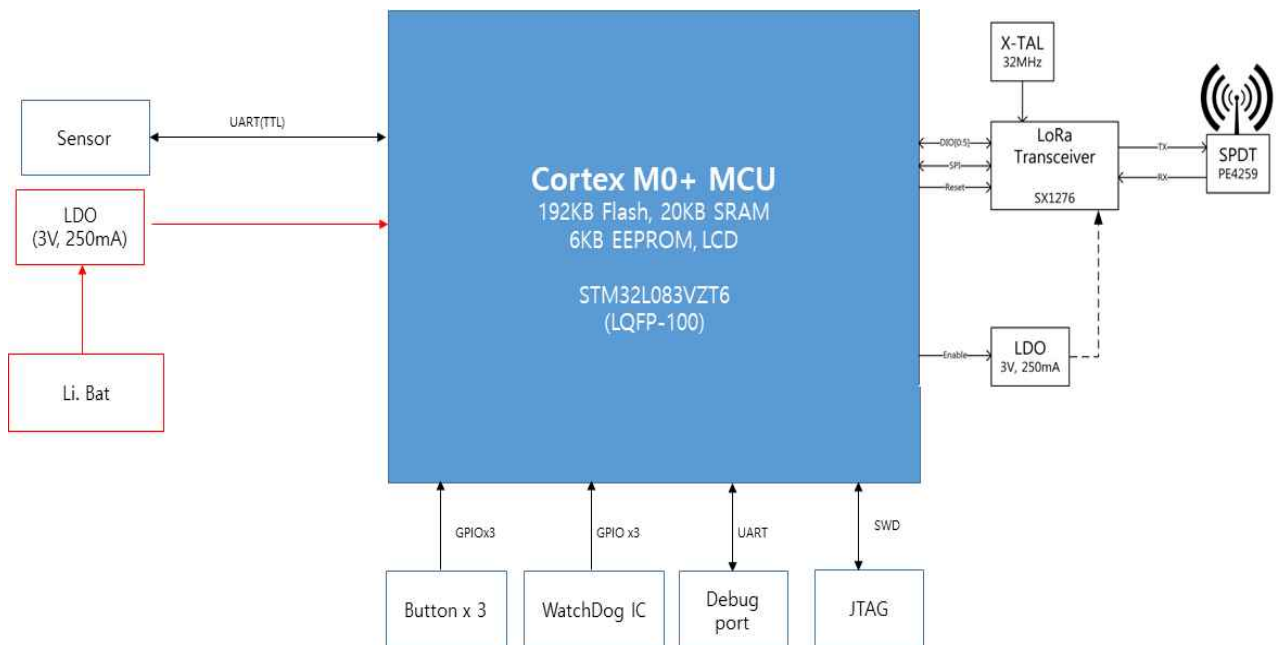
② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국철도공사):
 - 레일변형 유형 정의 및 감지한계 분석
 - 작업현장 요구사항 분석 및 탐지장비 적용 요구사항 도출
 - 테스트 베드 구축에 필요한 요구조건 도출
 - 레일변형 유형별 테스트베드 구축을 위한 가이드라인 작성
- 공동연구기관(한국표준과학연구원):
 - 레일 변형 검출에 적합한 센서 분석
 - * 레일 변형 검출 방법 도출 : 스트레인게이지, 근접센서 사양 검토
 - * 레일 축력 및 온도에 따른 변형 분석
 - * 인장/압축시험에 의한 레일 변형 검출 시험
 - 레일 변형 센싱 모듈 설계
 - * 온도/변형 검출 센싱 범위 도출, 신호처리회로 설계, 마이크로프로세서, 통신모듈 검토



- 공동연구기관(네이블커뮤니케이션즈):

- LPWA IoT 통신단말 설계
- LPWA IoT 통신단말 H/W 설계
 - * 주요부품 선정, 회로도 설계
 - * 실시간 감지 및 양방향 통신을 위한 최적의 LPWA 통신방식 결정
 - * 배터리를 이용하여 장시간 사용을 보장하는 저전력 기능 설계



- 레일 변형 감지 센서와 IoT 통신단말의 연동을 위한 통신 규격 설계
 - * 센서 ID 조회, 센싱 데이터 조회, 이상감지를 위한 Threshold 설정 및 Wakeup
 - * Calibration
- IoT 관제 플랫폼 설계
- 통신단말 연동 인터페이스 설계
 - * 통신단말과 관제플랫폼의 데이터 전송 프로토콜 정의, 주기보고 / 이상감지 메시지 규격 정의, 단말 제어 메시지 규격 정의

- UI 기획/설계(레일상태 모니터링 및 데이터 분석을 위한 UI 기획/설계), Database 설계
- 수집데이터의 저장/조회를 위한 Database 설계, 외부 인터페이스 설계
- 이상 발생시 SMS를 통한 즉시 알림이 가능하도록 철도공사SMS 시스템과의 연동 인터페이스 설계



장대레일 모니터링 시스템 구성도

나. 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한국철도공사): 레일변형 탐지(좌굴) 테스트 베드 구축
- 공동연구기관(한국표준과학연구원): 레일절손 검출 센싱모듈 시작품 개발
- 공동연구기관(네이블커뮤니케이션즈): LPWA IoT 단말 및 관제플랫폼 시작품 개발

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국철도공사):
 - 레일변형(좌굴) 운영 가이드 및 지침 마련
 - 시험 조건별 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축
- 공동연구기관(한국표준과학연구원):
 - 레일 변형 센싱모듈 시작품 제작 및 시험
 - * 센싱모듈 구성 : 스트레인게이지, 브릿지회로, 증폭회로, 근접센서, 온도센서, 신호 처리회로, 마이크로프로세서, 통신모듈, 배터리, 안테나(센서모듈의 간략화 및 집중화) 등
 - * PCB 보드 설계/제작
 - * 센싱모듈 외함 : 마그네틱으로 레일 복부에 탈부착이 가능한 구조 설계/제작, 설치
 - * 온도센서 범위/출력 : $-20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$, 아날로그 0~5V이내
 - * 변형센서 범위/출력 : $\pm 2\text{mm}$ 이내, 아날로그 0~15V이내
 - * 센싱모듈 간 설치범위 : $\sim 100\text{m}$ 이내
 - * 기타 주변 신호처리회로 개발
 - 통신모듈 선정 및 탑재 (참여기업 협업)
 - 레일 변형 센싱모듈 테스트베드 시험
 - * 센싱 모듈의 테스트베드 적용 및 시험

- 공동연구기관(네이블커뮤니케이션즈):
 - LPWA IoT 통신 단말 시제품 제작, 기능 구현 및 기능 검증
 - * LPWA IoT 시제품 HW 제작, LPWA 통신 기능 개발, 센서 연동 기능 개발, IoT 관제플랫폼 연동 IF 개발
 - LPWA IoT 통신 단말 기능 검증
 - * 센서데이터 수집 기능 검증, Threshold 설정 기능 검증, LPWA 통신 기능 검증, IoT 관제 플랫폼 개발, IoT 관제플랫폼 SW 개발
 - 사용자 모니터링을 위한 UI 개발, IoT 통신단말 연동 I/F 개발
 - SMS 전송 I/F 개발, 외부 인터페이스 연동 시험, 이상상황 발생시 전송 기능 시험

다. 3차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한국철도공사): 레일변형 탐지(절손) 테스트 베드 구축
- 공동연구기관(한국표준과학연구원): 레일 절손/좌굴 검출 센싱모듈 시제품 개발 및 적용
- 공동연구기관(네이블커뮤니케이션즈): LPWA IoT 단말 및 관제플랫폼 시제품 제작 및 시범 설치

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국철도공사):
 - 레일변형(절손) 운영 가이드 및 지침 마련
 - 시험 조건별 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축
- 공동연구기관(한국표준과학연구원):
 - 레일 절손/좌굴 검출 센싱모듈 시제품 개발

[개발 시제품 사양]

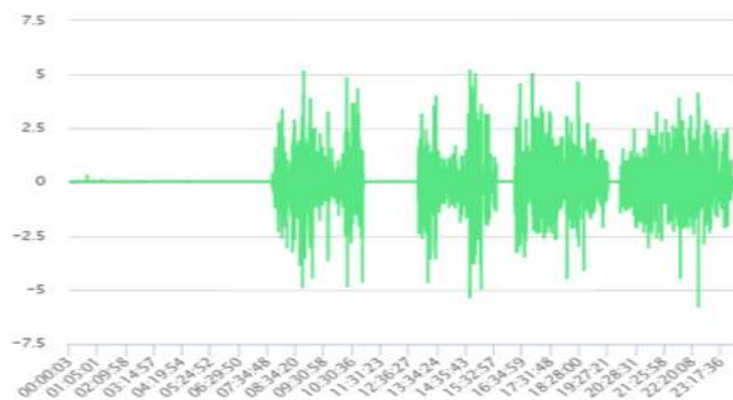
- 절손 검출센서
 - * 센서직경 : 50 mm 이내 (레일 web 부착 최대 크기)
 - * 주파수 범위 : 20 ~ 200 kHz
 - * 커넥터 부 : Micor_dot 또는 BNCI
 - * 케이블 부 : Coaxial
- 절손 검출 거리 : 100 m 이내
- A/D 변환회로
 - * Sampling rate : 2 MHz 이내
 - * 분해능 : 8 또는 12 bits
- 온도 검출 범위 : -15~75℃
- 좌굴 검출 모듈
 - * 레일 변화량 검출 범위 : ±2 mm 이내
 - * 검출 회로 : full-bridge 회로
 - * 검출 전압 범위 : 0~5V
 - * 변형 검출 분해능 : 8 또는 12 bits

[개발 내용]

- 탄성파 검출 회로 제작
- 레일 가진 트리거 수신회로 제작
- 탄성파 도달시간 검출회로 (A/D 변환회로) 제작
- 변형 검출 A/D 변환회로 제작
- IoT 통신 모듈 연계 설계·제작 (참여기업 협력 제작)
- 레일 온도센서 및 회로는 참여기업 협력 제작
- 센싱 모듈 전원회로 제작
- 레일 좌굴/절손 검출 센싱모듈 시제품 현장적용
 - * 분기기 현장설치 및 운용
 - * 절손/좌굴 검출 성능평가
 - * 절손/좌굴 판정 기준 도출
- 다양한 현장조건(차량운행 유무 등)에서의 시험데이터 취득 및 분석
- 외란 신호(차량 운행 영향 등)에 따른 신호처리 방법 도출 : 신호 필터링, 차량 미 운영 시간 구간에만 센싱 모듈 동작 등

- 공동연구기관(네이블커뮤니케이션즈):

- LPWA IoT 통신 단말 시제품 제작
- LPWA IoT 시제품 HW 제작
- LPWA IoT 통신 단말 시험
 - * KC 인증 시험
 - * 고온/저온 환경의 동작 시험
 - * IoT 관제 플랫폼 연동 시험
 - 센서, 통신단말, 관제플랫폼 연동 시험
 - 이상상황 발생시 SMS 전송 기능 시험
- 현장적용 및 시범사업
 - * IoT 통신 통신 단말 시범 설치
- 시범 설치 및 통신 기능 검증
- 현장 환경에서의 사용성 검증
 - * IoT 관제플랫폼 시범 설치
- 데이터 수집 및 실시간 알람 기능 검증
- Big Data 분석을 통한 레일 변형 예측 기준 수립



실시간 수집데이터 예시 (차량진동 측정치, 단위 : G)

3) 연구개발 정량적 연구성과 목표

구분		1차년도	2차년도	3차년도	계
국외논문 게재	SCI	목표치	목표치	목표치	
	비SCI				
	계				
국내논문 게재	SCI				
	비SCI			2	2
	계				
특허출원	국내	1	1		2
	국외				
	계				
특허등록	국내		1	1	2
	국외				
	계				
인력양성	석사				
	박사				
	계				
기술이전	계약건수			1	1
	계약액				
	징수액				
국내 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
기타	시제품		1	1	2
	성과 홍보				
	테스트베드 구축	1	1		2

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	레일변형 검출 사용자 요구사항 분석	레일변형 유형 정의 및 감지한계 분석	TRL2	레일변형 검출 관련 사용자 요구사항 분석	사용자 요구사항 분석을 통한 탐지장비 설계	30%
		작업현장 요구사항 분석 및 탐지장비 적용 요구사항 도출				
	레일 변형 센싱 모듈 개념 개발	센싱모듈 설계안 도출	TRL2	센싱모듈 설계안 도출 여부	레일변형 센싱 모듈 개념 설계	40%
		IoT 단말 설계	TRL2			
	IoT 단말 및 관계플랫폼 설계	관계플랫폼 설계	TRL2	관계플랫폼 설계	IoT 단말 및 관계플랫폼 설계	30%
		레일변형(좌굴) 운영 가이드 및 지침 마련	TRL2			
2년차 (2020)	레일변형 탐지(좌굴) 테스트 베드 구축	시험 조건별 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축	테스트베드 운영 없음	레일변형 탐지(좌굴) 테스트 베드 구축	테스트베드 구축	30%
		센싱모듈 개발	TRL5		센싱모듈 개발	
	센싱모듈 시제품개발	테스트베드시험	TRL5	센싱모듈 개발 여부	현장시험	40%
		IoT 단말 시제품 제작	TRL5		시제품 제작	
	IoT 단말 및 관계플랫폼 개발	관계플랫폼 개발	TRL5	IoT 단말 및 관계플랫폼 개발	관계플랫폼 구성	30%
		레일변형(절손) 운영 가이드 및 지침 마련	TRL5		절손 판정기준 정립	
	레일변형 탐지(절손) 테스트 베드 구축	시험 조건별 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축	테스트베드 운영 없음	레일변형 탐지(절손) 테스트 베드 구축	테스트 베드 구축	20%
		센싱모듈 현장적용	TRL8		현장시험	
3년차 (2021)	센싱모듈 시제품 개발 및 현장적용	센싱모듈 시제품 개발	TRL8	시제품 개발 여부, 현장적용 여부	센싱모듈 시제품 제작	40%
		현장적용/성능시험	TRL8		현장설치 및 시험	
	IoT 단말 및 관계플랫폼 고도화	시험설치 및 데이터 분석	TRL8	IoT 단말 및 관계플랫폼 고도화	관계플랫폼 운영	40%

평가 항목 (주요성능 Spec1))	단위	전체 항목 에서 차지하는 비중2) (%)	세계최고 수준 보유국/ 보유기업 (/)	연구개발 전 국내수준	개발 목표치			평가 방법3)
			성능수준	성능수준	1차년도 (2019년)	2차년도 (2020년)	3차년도 (2021년)	
1. 온도센서	℃	10	-20~80	-20~80		-20~80		공인시험
2. 변형율	%	30	±2	-		±3	±2	현장시험
3. 좌굴/절손검출 정확도	%	30	80	-		80	90	테스트베드 시험
4. 환경시험	-	10	-	-	-	-	-	공인시험
5. 센싱모 듈 간 거리	m	10	183~244	-		50	100	현장시험
6. 통신거리	km	10	~3.5	-		2	3	현장시험

구분	년도	성과목표	세계최고수준 (보유국/보유기관)	연구전 국내수 준	목표치	가중치 (%)	평가기준	달성치
최종목표	2021	센싱모듈 간 거리/통신거리		-	100m/ 3km	100	목표치 달성여부	100m/ 3km
1차년도	2019	센싱모듈개념 설계		-	설계도면	100	목표치 달성여부	보고서첨부
2차년도	2020	센싱모듈간 거리		-	100m	100	목표치 달성여부	100m
3차년도	2021	현장적용통신 거리		-	3km	100	목표치 달성여부	3km

구분		1차년도	2차년도	3차년도	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	■	☐	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	■	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	■	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

1.2 연구개발 배경 및 문제점

1) 추진배경

- 최근 한반도는 기후변화에 따른 이상고온, 이상한파 등 이상기후가 자주 발생하고 이로 인한 피해가 점차 커지고 있다.
 - 과거 대비 한반도의 평균 기온 상승률은 1.7℃로 전세계 평균(0.74±0.03℃)에 비해 높게 나타났고, 강수량은 변동성이 매우 크며 과거 대비 약 19%(220mm) 증가하였음(출처 : 한반도 기후변화 현재와 미래(국립기상연구소 연구성과 보고서))
- 또한 IPCC¹⁾ 4차 분석보고서에 따르면 향후 2100년까지 지구표면 온도는 1.8~3.0℃ 상승하고 강수량은 2.3~3.0% 증가될 것으로 예상된다.

표 1.1 IPCC 4차 보고서(1980~1999년에 대비한 2080~2099년 기간 동안의 온도 및 강수량의 변화)

SRES ²⁾ 시나리오	B1 (CO2 550ppm)	A1B (CO2 720ppm)	A2 (CO2 830ppm)
기온 (℃)	1.8	2.6	3.0
강수량 (%)	2.3	2.9	3.0

- 세계보건기구(WHO)는 2014년 ‘인류 건강과 기후변화’ 국제회의에서 “장기간의 폭염, 홍수와 가뭄 등 기후 변화가 인류의 생명을 위협하고 있으며, 이를 해결할 방법을 적극적으로 모색해야 하고 이를 기반으로 선제적으로 행동해야 한다” 며 대책 마련을 촉구함.
- 철도운송시스템은 이상기후에 따른 장기간 폭염으로 선로레일의 좌굴, 전차선 변형, 철도 차량의 기계적 고장발생, 접객시설(승강장) 시설물 변형으로 열차 및 고객 안전사고 발생 위험이 증가되며,
- 폭염, 한파 등 전력수급 증가에 따른 전기에너지 부족현상으로 철도차량, 철도시설물 등의 정상 전력 수급 불가로 열차운행 축소 불가피하며, 국지적 집중호우에 의한 기존 철도배수 시스템 용량 초과에 따른 침수 및 철도사면 붕괴로 인한 열차운행 중단이 발생할 수 있다.
- 특히, 지구온난화에 따른 폭염과 급작스런 기온강하로 철도 선로에 부설된 장대레일(길이 25m 레일을 연속된 용접으로 제작한 200m 이상의 레일)에서 레일변형(좌굴, 절손)에 따른 안전사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 지금도 안전사고 위험요인이 상존하고 있는 실정이다.

- 이처럼, 철도 레일에서 발생하는 레일변형은 열차 탈선사고와 밀접한 관계가 있으며, 현재 까지는 국내의 경우 레일변형으로 인한 대형 철도사고가 다행히 발생되지 않았지만 국외의 경우 다양한 탈선사고로 수많은 인명과 재산의 피해 사례가 발생하였다.



그림 1.4 Hatfield 탈선사고(좌측) 및 Painsville 탈선사고(우측)

- 국내 철도운영기관에서는 레일변형에 따른 안전사고를 선제적으로 예방하기 위하여 점검 및 유지보수에 수많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 레일좌굴은 기관사 운전 및 인력 도보순회 시에만 사전 발견할 수 있기 때문에 선제적인 예방관리가 불가능한 실정이다. 또한 레일절손은 일반선로 구간에서 절손발생 시 궤도회로에 의해 검지로 정지신호가 현시되고 있으나, 역구내 병렬회로 구성 구간³⁾에서는 레일 절손 시에도 궤도회로가 유지되어 사전에 레일절손 발견이 불가하다.



[레일절손 사례]

[레일좌굴 사례]

그림 1.5 레일변형 사례

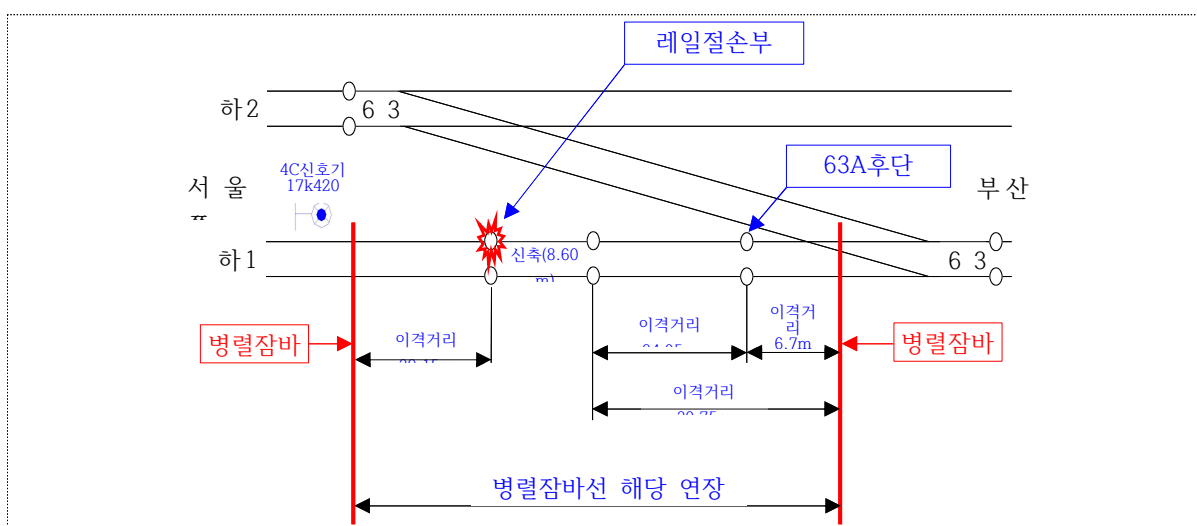


그림 1.6 경부선 금천구청구내 하1선 63AT 병렬 잠바 구성 개소 현황

1) IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) : 전세계적 기후변화를 분석 및 평가하고 국제적 대책을 마련하기 위하여 유엔환경계획(UNEP)과 세계기상기구(WMO)가 공동설립한 유엔산하 국제 협의회
 2) SRES(Special Report on Emission Scenario) : 온실가스 배출량 시나리오
 3) 역구내 부분선 정차 열차 검지를 위해 설치된 구간으로 레일절손 시 신호장애가 현시되지 않아 열차정상운행의 문제점 발생(2,590개소 약 113.4km 존재)

○ 경부선 대전조차장역 탈선사고 시사점

- 본 사고는 야간에 곡선부 장대레일 유지보수 작업 개소에서 궤도미안정과 고온으로 발생한 레일좌굴 탈선사고로 기관사 미감지, 선로순회자 부재로 인해 사전에 발견하지 못해 발생하였다. 만약에 레일좌굴을 사전에 발견했다면 충분히 예방할 수 있는 사고로 IoT 기반 레일 변형을 실시간 감지시스템의 기술의 필요성을 보여주고 있다.

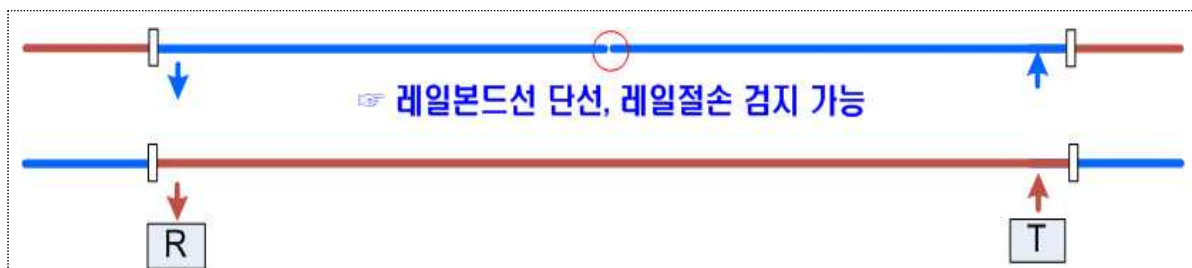
- 2018년 7월 30일 08:00분경 경부선 금천구청역구내 하1선 17.533km 부근 레일용접부에서 열차운행 충격피로가 누적되어 레일절손 후 밀림(밀림량 250mm)이 발생하였다. 레일절손 시 궤도회로가 점유되어 ‘정지신호’가 현시되어야 하나, 장애개소는 병렬점퍼선 구간으로 신호장애가 표시되지 않았고, 레일 절손이 된 후에도 열차운행이 계속되어 차륜의 레일 두부 타격으로 레일이 밀리는 현상이 발생하였으나, 다행히 선로인접 주민의 신고로 발견하여 열차운행열차의 탈선 등의 대규모 사상 사고를 예방할 수 있었다.



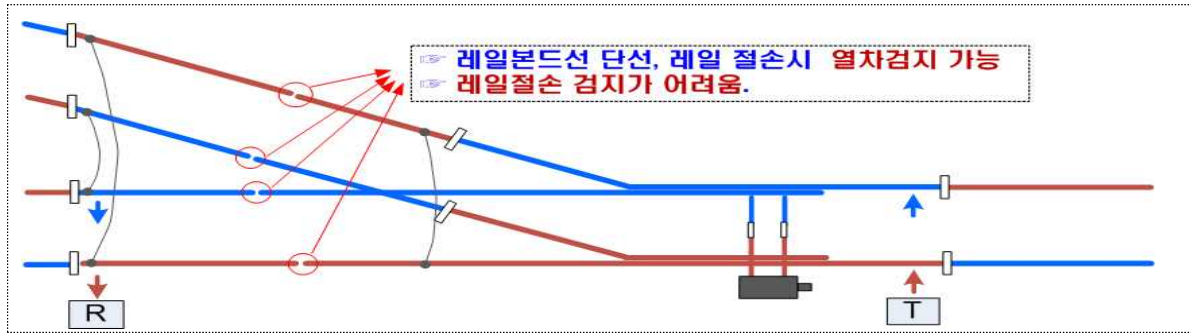
그림 1.9 대전금천구청역 레일 절손

○ 금천구청 레일절손 시사점

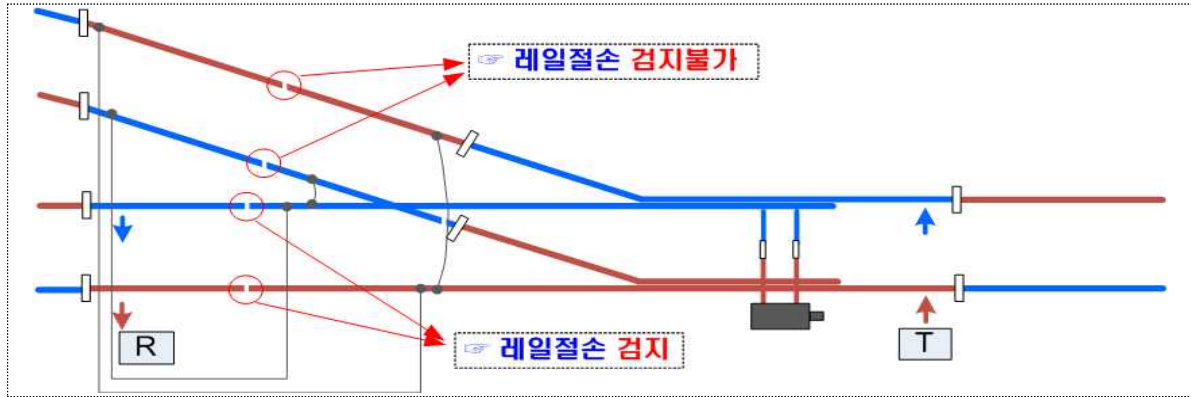
- 레일절손 시 직선 궤도회로에서는 신호정지로 안정적인 확인 가능하나, 이음매 레일본드 설치개소, 분기기 궤도회로에서는 전기적으로 병렬로 구성되어 레일절손 검지가 불가하다. 분기부에서의 검지를 위하여 병렬점퍼선의 우회 설치의 경우 본선 레일 절손검지는 최대한 가능하나, 측선 레일 절손 검지는 어려우며, 장거리 점퍼선 선로횡단으로 설치가 어렵고 유지보수 시 불편한 단점도 발생한다. 관련사례는 레일절손을 사전에 발견했다면 충분히 예방할 수 있는 사고로 IoT 기반 레일변형을 실시간 감지시스템의 기술의 필요성을 보여주고 있다.



[직선구간 궤도회로]



[분기기구간 궤도회로]



[병렬점퍼선 우회 설치]

그림 1.10 궤도회로 종류별 특성

표 1.2 본선 분기기 병렬점퍼 부설현황(19년 코레일 기준)

소속	개소	병렬점퍼연장 (m)	신축수량	WT신축	PCT신축	용접개소	비고
합계	2,629	113,962	306	200	106	14,490	
서울	165	8,181	16	13	3	569	
서부	281	8,261	36	30	6	1,163	
동부	349	11,522	27	15	12	1,182	
강원	101	4,540	0	0	0	907	
충북	188	6,828	40	29	11	479	
대전	506	24,046	40	23	17	1,865	
전북	131	6,259	26	7	19	933	
광주	153	5,638	38	38	0	590	
전남	52	2,706	0	0	0	349	
경북	1	21	1	1	0	4	
대구	211	9,887	34	33	1	1,684	
부산	211	10,956	28	7	21	1,598	
오송	188	10,462	20	4	16	2,502	
경주	49	2,268	0	0	0	562	
정읍	43	2,387	0	0	0	103	

-
- 본 연구는 레일에서 발생하는 레일변형(절손, 좌굴) 여부를 실시간으로 검출하여 레일상태를 무선으로 전송하는 IoT 기반 모니터링 시스템을 개발하는 것으로, 레일변형 센싱모듈은 2가지(레일절손 감지 센싱모듈 및 디바이스, 레일좌굴 감지 센싱모듈 및 디바이스)로 진행하고자 한다. 각각의 센싱모듈은 레일상태를 감지할 수 있는 센서와 신호처리회로, 마이크로프로세서, 통신모듈, 안테나 및 배터리로 구성되며, 레일의 변형을 측정하여 레일변형 발생여부 실시간으로 감지하여 저전력장거리 무선통신 (LPWAN)을 이용하여 모니터링하며, 열차 및 유지보수자에게 정보를 전송하는 IoT 기반 레일 변형(절손 및 좌굴) 감지 시스템을 개발하고자 한다.

1.3 연구개발 국내 · 외 현황

1) 레일절손 감지기술

가. 초음파를 활용한 레일절손 감지기술

- 남아프리카 Railsonic사에서 개발한 초음파 레일절손 감지장치는 송신모듈, 수신모듈, 전원 및 통신장치, 초음파센서 및 케이블 구성
- 레일측면에 초음파센서를 부착하여 레일을 매개체로 송수신모듈에 의한 루프회로를 구성하여 레일의 절손위치를 감지하는 방식
 - 전송거리(1km), 무선원격모니터링, 태양전지, 궤도회로와 혼용 가능

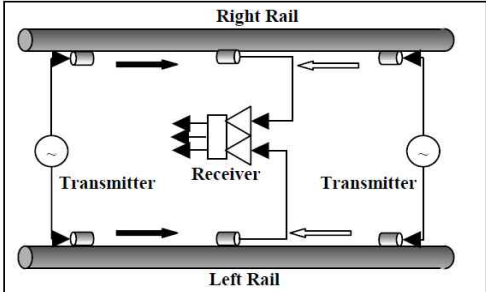
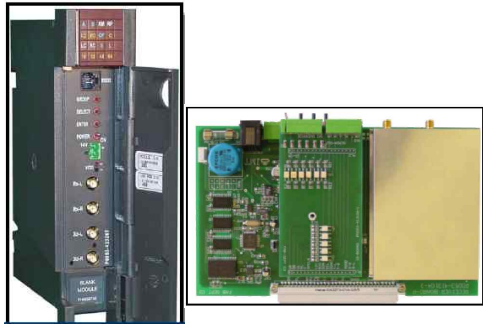
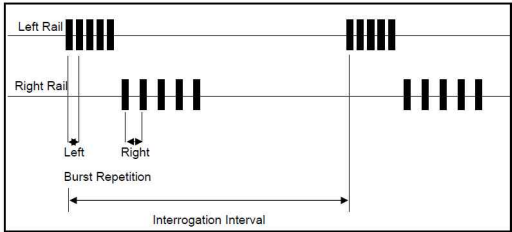
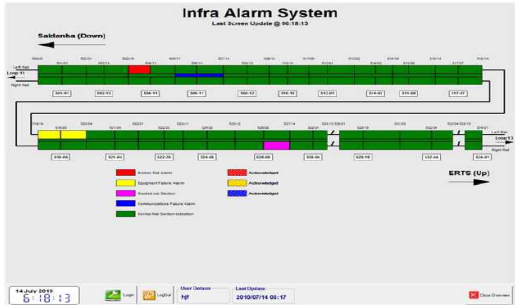
	
초음파 레일절손 감지장치 개략도	초음파송수신기
	
송수신 모듈	초음파센서 잡음 신호도
	
무선통신모듈, 태양	레일절손 모니터링 단말기

그림 1.11 초음파 레일절손 감지기 구성

나. 전류검지(Current Loop)를 활용한 레일절손 검지기술

- 미국의 GTI사에서 CBTC/PTC구간을 위하여 개발된 것으로 전원, 루프, 증폭기, PLC, Shunt로 구성
- 일정구간에 루프회로를 구성하여 이등분 등가전류를 흐르게 해서 레일절손 위치를 검지하는 방식
 - 정상시에는 이등분 등가전류(1)가 양방향으로 흐르며 그 내부에서는 균형전류(2)가 코일에 의해 유도된다. 이 유도에 의한 전압값은 PLC(3)에 의해 표출된다.
 - 레일절손(1)이 발생하면 단방향(2)으로만 전류가 흐르며 내부에 유도된 전압(3)은 PLC(4)를 통하여 전압값이 표시된다.
- 전류검지 특징
 - (장점) 절연이 필요없으며 H/W구성이 간단하다. 검지율 100%
 - (단점) 분기궤도 검지용은 회로구성이 복잡, 궤도회로와 혼용 불가

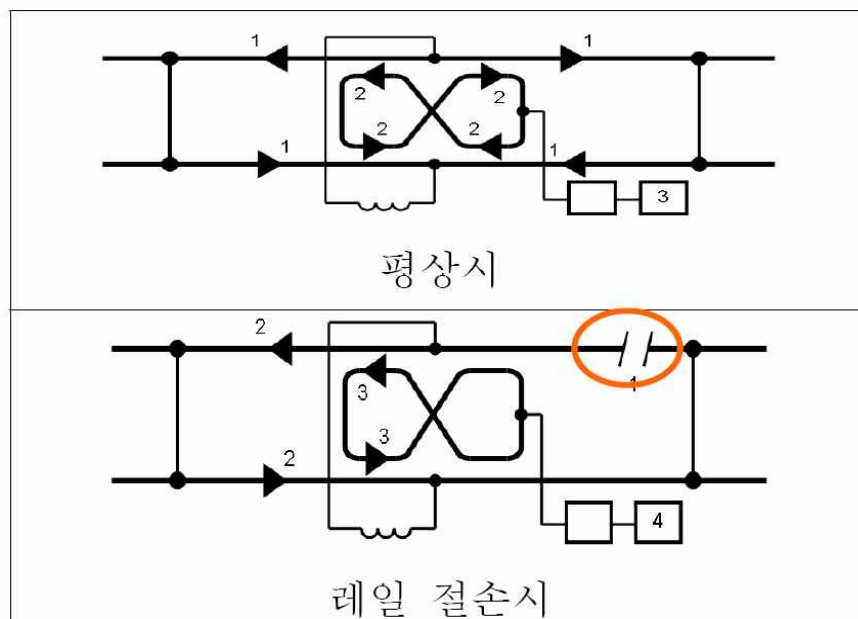
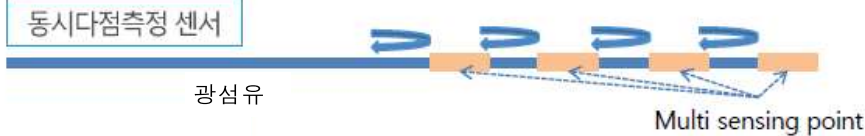


그림 1.12 전류검지 회로도

다. 광케이블을 활용한 레일절손 검지기술

- 광케이블을 설치 및 포설하여 차량 및 인프라 분야 시설물 상태 모니터링
- 기술수준
 - 포인트센서(FBG) : 상용화 단계
 - 국내·외 상용제품(온도, 변형율)이 출시되고 있으며, 다양한 인프라설비 감시에 활용중(터널, 교량 등 변형등 구조물 건전성 모니터링)
 - 분포형센서(DAS 등) : 시범적용 단계
 - (국외) 2~3개 메이저회사 시장 60~70% 선점(Optasense, APSensing 등), 철도, 도로, 해양, 플랜트 등 다양한 산업 활용
 - (국내) 한국광기술원, 한전, 국방부와 국책연구사업으로 프로토타입 개발하여 시험 적용

표 1.3 광케이블을 활용한 레일 절손 검지 기술

구분	설 명	적용 사례
포인트 센서 (FBG)	(원리) 광섬유 내 격자형센서 삽입하여 특정포인트의 변화량 계측 (특징) 특정포인트에 정확한 계측가능, 센서수에 따라 가격상승 (측정물리량) 변위량, 온도 (신뢰성) 적용 사례 다수, 부착 설치	- 홍콩 기술대 등 (홍콩, 싱가포르) - 국내 제작 기술확보 (광기술원, 철도연 등)
	동시다점측정 센서 	
분포형 센서 (DAS)	(원리) 광섬유 자체를 활용 연속적인 변화량 계측 (특징) 전체적인 트랜트 파악이 용이하나, 분석 시스템 비용 고가 (측정물리량) 변위량, 온도, 음파 (신뢰성) 시험단계, 부착 또는 이격설치 가능	- Frauscher (오스트리아) (미국 및 독일 시험운행) - 중국(고속철도)
	분포형 센서 	

○ 홍콩 폴리텍대학 광섬유 센서(FBG sensor network)

- 파장의 변화를 감지하여 광섬유를 통해 홍콩메트로 관제서버에 전송
- 각 센서는 레일과 차축, 침목, 체결장치 등에 직접 부착하는 방식
 - 홍콩 Tung Chung선의 Tung Chung역과 Yam O역 사이 2.5km에 부설

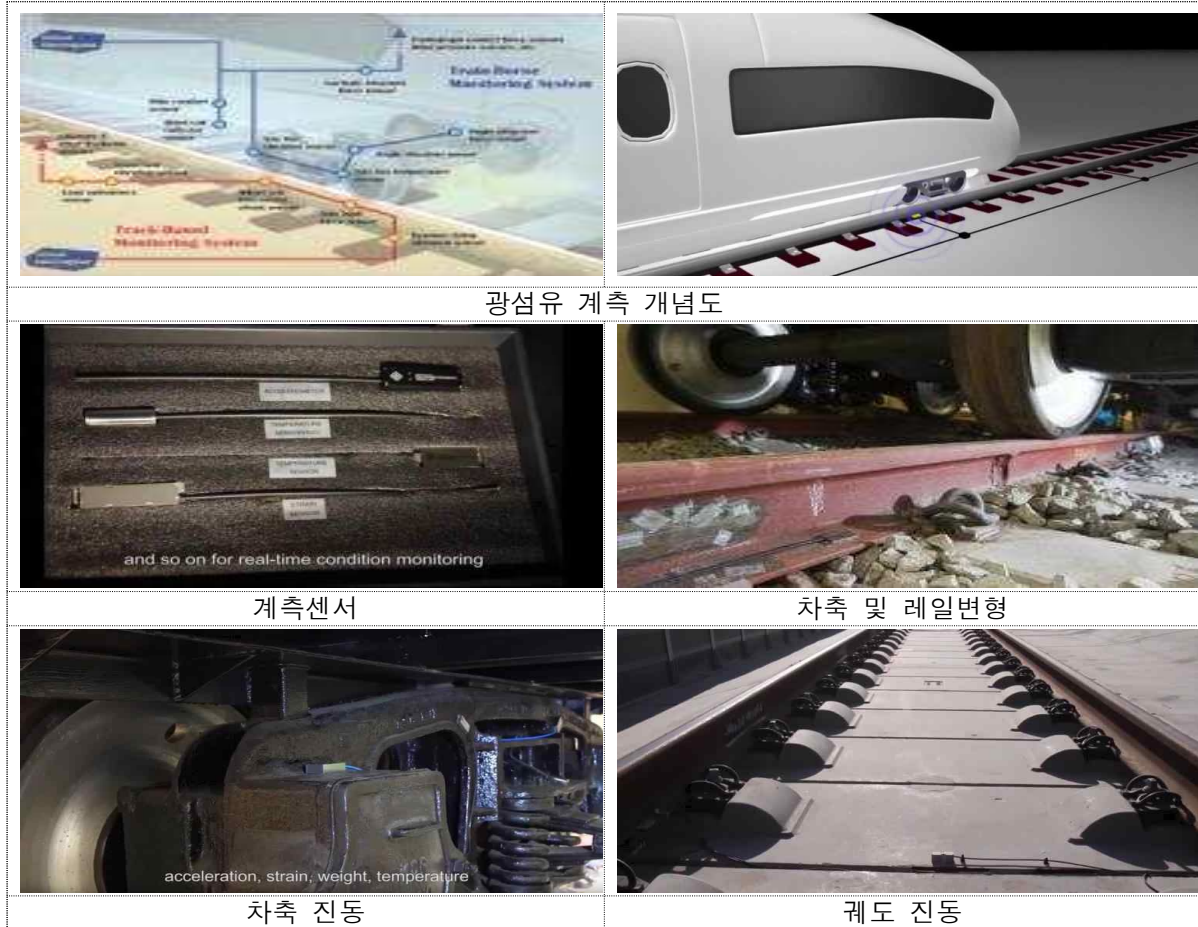


그림 1.13 홍콩 광섬유 센서 적용

○ 오스트리아 Frauscher Tracking Solution

- 광섬유를 선로하부에 설치하여 궤도에서 발생하는 음파를 측정하는 방식
- 차량주행시 발생한 음파는 광섬유의 광을 분산시키며 분산된 정도를 감지
- 레일헤손, 차축불량 개소에서 발생한 다양한 음파를 딥러닝하여 결함 판별



그림 1.14 오스트리아 광섬유 센서 적용

2) 레일좌굴 감지기술

가. 레일응력 모니터링 시스템

- 2006년 영국 철도운영기관인 Network Rail에서는 무선원격측정 전문기업에서 개발한 무선 원격 레일온도 모니터링(Wireless Rail Temperature Monitoring, RTM) 시스템을 채택하여, 레일 축력으로 인한 좌굴위험이 우려되는 선로 구간의 온도감시를 수행하고 있다.
- RTM 시스템은 레일온도를 감시하는 레일부착형 측정시험기가 탈락되지 않도록 부착하는 방법을 개발하였으며, 어느 곳의 온도든 상태감시를 하고 데이터를 기록할 수 있음. 또한 서버를 인터넷, 인트라넷 또는 SMS 문자메시지와 연계하여 데이터를 외부로 보낼 수 있고, 개인적으로 모든 정보를 원격으로 접근하는 것을 가능하게 하여 철도현장의 애로점인 계측의 어려움을 극복하였다.
- 분기부 용접레일 검지용, 역별 집중감시 용이, 궤도회로와 혼용 가능하다.

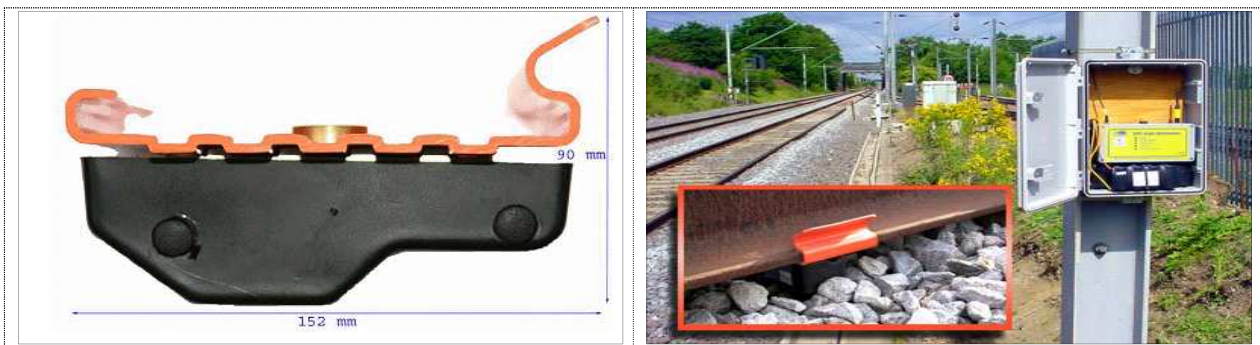


그림 1.15 무선원격 레일온도 모니터링(RTM) 시스템

- 2005년 미국 IntelliTrack사에서는 스트레인 게이지와 온도센서 기술로 레일이 압축과 인장력에 의해 발생하는 응력과 레일온도와 중립온도를 무선으로 측정할 수 있는 무선 레일응력 모듈(Wireless RailStress Module, RSM)을 개발하였으며, 2009년 NORTRAK사에서는 마찬가지로 레일의 응력과 레일온도를 무선으로 측정하고, 중립온도 또한 측정할 수 있는 무선 중립온도 모니터링(Wireless Stress Free Temperature Monitoring, SFTPRO) 시스템을 개발하였다.



그림 1.16 RSM를 이용한 응력, 레일온도, 중립온도 측정



그림 1.17 SFTPRO를 이용한 응력, 레일온도, 중립온도 측정

나. A Vibration Technique for Estimation of Neutral Temperature

- 2005년에 미국의 University of Illinois at Urbana-Champaign에서 개발된 고정된 주파수에서 인장력은 파장을 증가시키는 반면 압축력은 파장을 감소시키는 진동 기반 기술을 이용하여 장대레일의 중립온도를 추정하는 기술을 개발하였다.
- 현재 현장 실험을 수행하여 결과값의 신뢰성을 확보하고 있는 단계에 있으나, 진동을 이용할시 레일체결장치에 의한 지지조건에 영향을 많이 받으며, 탄성체결 직선궤도에서는 압축력에 대한 측정이 매우 어려운 단점이 있다.



그림 1.18 진동을 이용한 중립온도 측정

다. Rail Neutral Temperature Measurement

- 2012년 미국에서 개발된 비선형 유도초음파를 이용한 중립온도 측정 장비로, reference 응력값이 필요하지 않으며, 레일 체결장치에 의한 지지조건의 변동에 영향을 적게 받고, 레일 사이즈에 따른 보정이 필요없는 장점이 있으나, Accuracy $\pm 2.78^{\circ}\text{C}$ 로 정확도는 다소 떨어진다.
- 테스트베드 실험수행을 통해 결과값 검증(Accuracy $\pm 1.11^{\circ}\text{C}$)을 하였음. 다양한 조건의 측정실험이 요구된다.

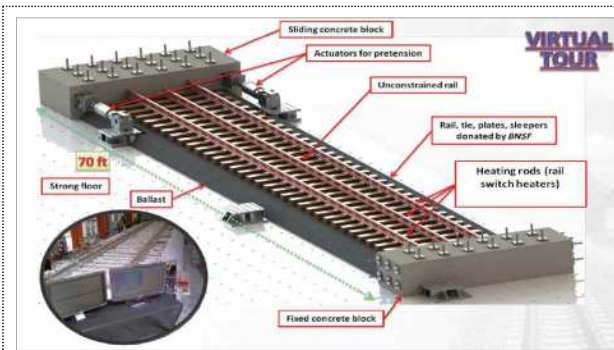


그림 1.19 비선형 유도 초음파를 이용한 중립온도 측정

3) 저전력장거리 무선통신(LPWAN) 기술

- 전 세계 저전력 광역 통신망 시장은 2016년 10억 달러에서 연평균 성장률 89.3%로 증가하여 2021년에는 244억 6,000만 달러에 이를 것으로 전망된다.(LoRaWAN은 2016년 3억 5,020만 달러에서 연평균 성장률 91.1%로 증가하여 2021년에는 89억 2,830만 달러에 이를 것으로 예상됨)
- IoT네트워크 사용량 중 LPWAN비중은 다른 네트워크 사용량을 빠르게 추월할 것으로 전망되고 있으며 2014년부터 LPWAN이 IoT 연결의 가장 지배적인 수단이 될 것으로 추정되고 있다.

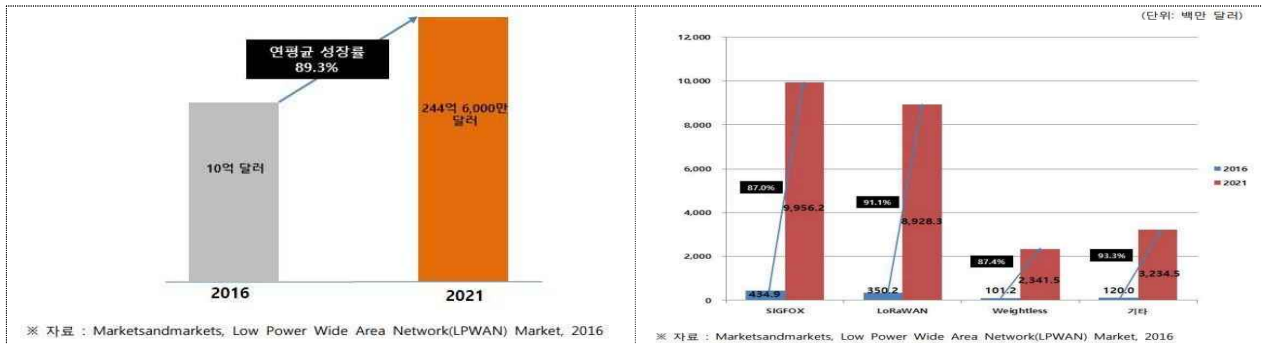


그림 1.20 무선통신 시장 성장률

표 1.4 통신방식 및 비교

구 분	LoRa	NB-IoT	LTE-M	LTE	WiFi
통달거리	10km(지방)/ 2km(도심) 미만	1Km 미만	1Km 미만	1Km 미만	100m미만
배터리수명	약 10년	약 10년	수일 이내	수일 이내	수일 이내
통신모듈가격	5\$ 이하	10\$ 이하	30\$ 이하	40\$이하	20\$이하
표준화	LoRa Alliance 표준완료	3GPP Rel.13 (' 16.6월)	3GPP Rel.12 (' 16.3월)	3GPP Rel.8 (' 08)	IEEE 802.11(' 09)
주파수대역	비면허대역 (920MHz대역)	면허대역 (기존 LTE주파수)	면허대역 (기존 LTE주파수)	면허대역	면허대역 (2.4GHz, 5GHz)
대역폭	500kHz 미만	200kHz	20MHz	10/15/20MHz	20/40MHz
전송속도	5kbps 미만	100kbps 미만	10/5Mbps (UL/DL)	50/100Mbps (UL/DL)	600Mbps 미만
통신출력	10dBm (23dBm)	23dBm	20dBm	23dBm	30dBm
디바이스 개발비용	저가	고가	고가	고가	저가
디스플레이 필요여부	없음	없음	없음	없음	필요
자판(입력장치) 필요여부	없음	없음	없음	없음	필요
1차 전지 사용 가능성	가능	가능	가능	불가능	불가능
네트워크 포설비용	없음	없음	없음	없음	발생
기존시설 변경 가능성	없음	없음	없음	있음	있음
자체망 구성	가능	어려움	어려움	어려움	가능
전국망 상용화	' 16.7월 완료(SKT)	' 17.9월 (KT, LG U+)	' 16.3월 완료(SKT, KT)	-	-

4) 레일변형(절손, 좌굴) 검출 기존 기술 검토 결과

- 국·내외 레일변형 기술 검토 결과 초음파, 광섬유 센서, 스트레인게이지를 이용하여 레일의 절손과 좌굴을 감시하는 기술이 개발 및 일부 적용되고 있었다. 그러나 대다수의 기술을 구현하기 위해서는 상시 전원의 확보와 유선통신케이블 설치가 요구되어, 많은 예산과 기간이 소요되며, 국외 기술 도입 시 구매 및 유지관리의 어려움과 관련분야 기술이 종속되는 문제점이 있는 실정이다. 또한 본 연구개발에서 진행하고자 하는 무선통신방식의 IoT기반 철도 레일 변형(절손, 좌굴)의 모니터링 기술과 관련된 국내 연구 또한 없는 것으로 조사 되었다.
 - 따라서, 본 연구의 레일변형 감시 시스템은 국내 열차 및 유지관리 실정에 맞게 개발되어야 효과적으로 유지관리에 적용이 가능해야 하며, 철도환경 특성에 맞게 장기간 모니터링 및 계측이 가능한 내구성 있는 센서 및 기술의 국산화로 상황변화에 신속하게 대처할 수 있으며, 별도의 전원/통신 설치 공사 없이 IoT 기술 구현이 가능하고, 배터리, 통신모듈, 센서 등을 하나의 디바이스로 소형, 경량으로 제작하여 국내 철도특성에 맞는 IoT기반 모니터링 시스템을 개발하였다.
 - 본 연구는 ‘기술촉진연구사업_사회이슈_걱정 없는 안심사회’ 구현을 위한 기술로서 기상재해(폭염, 폭한)로 인해 지속적으로 발생할 수 있는 레일변형 탈선 등 장애사고 예방과 국민에게 안전한 철도운행서비스 제공을 위해 시의성과 시급성이 요구되고 있다.
-

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 연구 목표 및 내용

구분	기 관	목 표	내 용
1차연도	한국철도공사	레일변형 검출 사용자 요구사항 분석	- 계획수립 및 자료조사 - 테스트 베드 구축에 필요한 요구조건 도출 - 작업현장 요구사항 분석 및 탐지장비 적용 요구사항 도출 - 레일변형 유형 정의 및 감지한계 분석 - 레일변형 유형별 테스트베드 구축을 위한 가이드라인 작성
	한국표준과학연구원	레일 변형 센싱 모듈 개념 개발	- 레일변형 시험/센서선정 - 레일 인장/압축시험 - 레일변형 센싱모듈 설계
	네이블커뮤니케이션즈	IoT 단말 및 관제플랫폼 설계	- IoT 단말 설계 - 관제플랫폼 설계
2차연도	한국철도공사	레일변형 탐지(좌굴) 테스트 베드 구축	- 레일변형(좌굴) 운영 가이드 및 지침 마련 - 시험 조건별 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축
	한국표준과학연구원	센싱모듈 시제품 개발	- 레일변형 센싱모듈 시제품 제작 - 테스트베드 시험
	네이블커뮤니케이션즈	IoT 단말 및 관제플랫폼 개발	- IoT 단말 시제품 제작 - 관제플랫폼 개발 - 시제품 평가 - 시제품 기능 개선
3차연도	한국철도공사	레일변형 탐지(절손) 테스트 베드 구축	- 레일변형(절손) 운영 가이드 및 지침 마련 - 시험 조건별 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축
	한국표준과학연구원	센싱모듈 시제품 개발 및 현장적용	- 레일 좌굴/절손 센싱모듈 시제품 제작 - 센싱모듈 현장적용 및 좌굴/절손 기준 도출
	네이블커뮤니케이션즈	IoT 단말 및 관제플랫폼 고도화	- IoT 단말 1차 시제품 제작 - 시범설치 및 데이터 분석

2) 연구개발 추진 체계

연구개발과제	
과제명	기후변화를 대비한 IoT기반 레일 변형(절손 및 좌굴) 감지 시스템 개발

기 관 별 참 여 현 황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업	1	56
중견기업		
중소기업	1	5
대 학		
국공립(연)		
출 연 (연)	1	3
기 타		

주관연구기관명
기후변화를 대비한 IoT기반 레일 변형(절손 및 좌굴) 감지 시스템 개발
담당기술개발내용
레일변형 탐지(좌굴, 절손) 테스트 베드 구축 및 현장적용성 평가 레일변형(좌굴, 절손) 운영 가이드 및 지침 마련 시험 조건별 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축

표준과학연구원	(주)네이블커뮤니케이션즈
레일변형 센싱모듈개발	IoT기반 레일변형 통신시스템 개발
담당기술개발내용	담당기술개발내용
레일변형 검출을 위한 센싱 방법 도출 레일변형 검출 센싱모듈 시제품 개발 레일 변형 센싱 모듈 현장적용 및 성능개선	LPWA IoT 단말 및 관제플랫폼 설계 LPWA IoT 단말 및 관제플랫폼 시제품 개발 LPWA IoT 단말 및 관제플랫폼 시제품 제작 및 시범설치

3) 연구개발 추진 일정

1차년도														
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (천원)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	계획수립 및 자료조사													20,000
2	테스트 베드 구축에 필요한 요구조건 도출													20,000
3	작업현장 요구사항 분석 및 탐지장비 적용 요구사항 도출													20,000
4	레일변형 유형 정의 및 감지한계 분석													20,000
5	레일변형 유형별 테스트베드 구축을 위한 가이드라인 작성													15,000
6	레일변형 시험/센서선정													20,000
7	레일 인장/압축시험													40,000
8	레일변형 센싱모듈 설계													10,000
9	IoT 단말 설계													50,000
10	관제플랫폼 설계													55,000
2차년도														
1	레일변형(좌굴) 운영 가이드 및 지침 마련													110,000
2	시험 조건별 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축													110,000
3	레일변형 센싱모듈 시제품 제작													90,000
4	테스트베드 시험													40,000
5	IoT 단말 시제품 제작													70,000
6	관제플랫폼 개발													60,000
7	시제품 평가													60,000
8	시제품 기능 개선													60,000
3차년도														
1	레일변형(절손) 운영 가이드 및 지침 마련													70,000
2	시험 조건별 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축													65,000
3	레일 좌굴/절손 센싱모듈 시제품 제작													80,000
4	센싱모듈 현장적용 및 좌굴/절손 기준 도출													60,000
5	IoT 단말 1차 시제품 제작													50,000
6	시험설치 및 운용													50,000
7	1차 시제품 평가													45,000

2.1 레일변형 탐지 테스트 베드 구축

1) 서 론

- 장대레일은 대기온도의 변화에 따라 레일길이방향으로 발생하는 힘인 레일축력이 궤도의 횡저항력을 초과할 때 장대레일 좌굴이 발생하며 이는 차량탈선 등 대형사고를 일으킬 수 있어 혹서기 레일온도측정을 통한 안전관리와 축력교란 작업 후 재설정 작업을 시행하여 비정상적으로 작용하는 레일축력을 제거하는 등 온도에 따른 장대레일 축력관리에 노력하고 있다. 그러나 현재 장대레일 축력 교란 작업 전·후 장대레일 재설정 시행여부, 작업범위, 작업효과 등 적정성에 대한 판단을 온도에 따른 신축량을 통한 간접예측 또는 작업자의 주관적 판단으로 결정하고 있으며 또한 일부 국부적인 레일/침목교란 시 축력교란을 계측할 수 없어 재설정 시행여부를 결정하기 곤란하다. 국내외 충분한 성능을 가진 레일축력 측정 기술이 없으며, 국내 고속철도에서는 레일축력측정기(VERSE_영국)를 보유하고 있으나 작업성, 사용성 측면에서 제한적이다.
- 전 세계적으로 지구온난화 등에 의해 연평균 기온이 점점 상승하는 상황을 대비하여 근본적으로 레일 좌굴 및 열차탈선을 방지할 수 있는 선로안전관리 핵심기술개발 연구를 하고 있으며 이에 하절기 폭염 대비 선로안전성 강화를 위해 선제적으로 안전사고에 대비 할 수 있는 지능형 좌굴감지 시스템의 개발이 필요한 실정이다.
- 레일의 절손 및 좌굴을 검출하기 위한 기술은 대부분 초음파 센서, 광섬유 센서, 변형을 센서(스트레인게이지 등), 온도센서 (레일 온도 및 중립온도 측정) 등을 이용하는 것으로서 특히 상용화된 검출 장치는 온도센서를 활용한 경우가 많다.
- 온도센서(레일 온도 및 중립 온도 측정) 방법은 측정 장치를 간편하게 구성할 수 있을 뿐만 아니라 다른 검출 방법과 비교하여 손쉽게 IoT 환경을 구성할 수 있다는 장점이 있으나 레일 절손 및 좌굴 예측 정확도가 다른 방법보다 떨어진다는 단점이 있다.
- 본 연구에서는 레일의 좌굴과 절손에 대하여 IoT 환경을 고려하여 보다 정확하고 손쉽게 검출할 수 있는 여러 가지 방법들을 검토하여 적합한 검출 방법을 제안하고 현장 설치를 통해 성능검증을 하였다.

2) 좌굴 및 절손 검출 방법 선정

가. 좌굴 감지 측정 방법

○ 스트레인게이지 측정 방법

- 일반적으로 (장대)레일은 온도 변화에 따라 레일에 변위가 발생하지 않고 레일의 응력만이 변화하는 부동구간 (immovable zone)이 형성됨 따라서 이러한 온도 변화에 따른 응력은 변위를 유발하지 않아 일반적인 변형률계로는 측정이 어려운 상황이다.



그림 2.1 레일 내 변위 부동구간

- 본 연구에서는 양방향 스트레인게이지 (Bi-directional strain gage) 방법을 통한 응력을 측정하는 방법으로 full-bridge 회로를 이용하여 온도에 의한 스트레인게이지의 변화를 상쇄하는 방법을 적용하고자 하였음. 양방향 스트레인 게이지 방법에 의한 길이방향 응력 및 수직 또는 횡방향 변형률은 다음과 같이 표시된다.

	길이 방향 (Longitudinal)	수직 방향 or 횡방향 (Vertical or Transverse)
응력 (Stress)	$\sigma_{xT} = -\alpha\Delta TE,$	0
변형률 (Strain)	0	$\epsilon_{yT} = \epsilon_{zT} = \alpha\Delta T - \left(\frac{\sigma_{xT}}{E}\right)\nu = (1 + \nu)\alpha\Delta T$

그림 2.2 양방향 스트레인게이지 응력 및 변형 표시

- 상기의 양방향 스트레인게이지 방법을 적용하기 위하여 스트레인게이지를 레일의 소재와 동일한 금속판 접착한 sensing plate를 제작하여 레일에 볼트 체결 또는 용접 등의 방법으로 부착하도록 하였다.

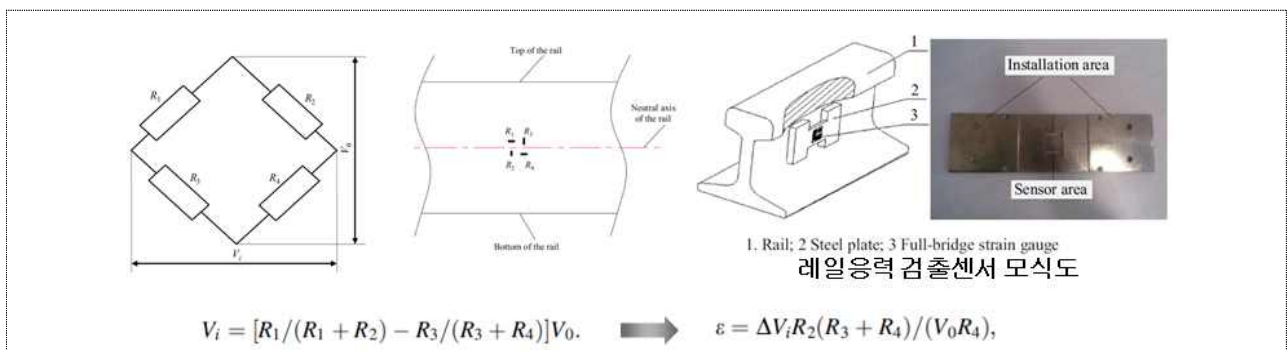


그림 2.3 스트레인게이지 full bridge 회로 및 sensing plate

○ LVDT 측정 방법

- LVDT는 Liner Variable Displacement Transducer(선형 가변 변위 변환기)의 약자이며 직선 변위를 전기신호로 변환하는 장치로서 좌굴 검출에 적용하기 위하여 검토하였다.
- 레일의 좌굴이 발생한다는 것은 기존의 마이크로 단위의 스트레인 검출보다 매우 큰 변위가 발생하는 것으로서 따라서 이러한 큰 변위를 감지하기 위해서는 LVDT를 이용하는 것이 적합하다고 사료된다.
- 아래 그림과 같이 레일 web 부에 LVDT를 부착한 다음 변위검출 wire를 레일 길이방향으로 일정 길이 (L) 이상 이격된 레일 web부에 연결하여 (볼트 조임 등) 이 길이를 기준으로 레일의 인장 및 수축에 따른 변위를 LVDT로 검출하여 좌굴 여부를 판단한다.
- 변위 감지 wire의 상부 및 하부에 스프링이 연결된 텐션 유지용 wire를 설치하여 항상 일정한 텐션을 유지할 수 있도록 한다.

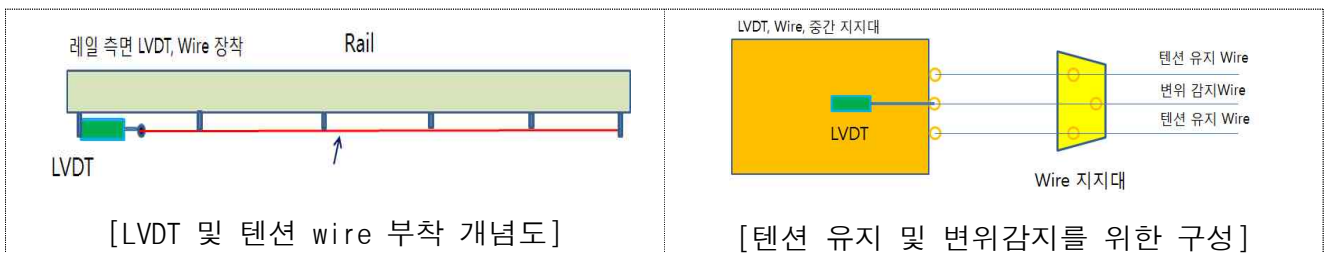


그림 2.4 LVDT 적용 개념도



그림 2.5 LVDT

- 레일 부착용 plate에 LVDT와 wire 체결용 고리를 일체화 혹은 다른 기구물 사용한다.
- LVDT의 신호처리 및 검출회로는 상기의 스트레인게이지 방법에서 설계/제작된 시스템을 동일하게 적용할 수 있다.

○ 바크하우젠노이즈 측정방법

- 레일의 좌굴과 절손은 레일 내부의 응력변화에 따라 발생하므로 이러한 응력을 측정하여 좌굴과 절손을 예측할 수 있을 것으로 판단됨. 이에 따라 현장에서 비교적 용이하게 적용할 수 있는 바크하우젠노이즈(BHN) 측정 장치를 이용하여 레일에 작용하는 응력을 산출하는 방법이다.

나. 절손 감지 측정 방법

○ 탄성파/진동을 통한 절손 검출 원리 및 방법

- 아래와 같이 레일 ①부분에 타격을 가하면 레일을 따라 진동이나 탄성파가 전파되며 레일이 절손상태가 아니면 검출 센서 ②에서 탄성파 또는 진동이 검출됨. 따라서 타격할 때의 시간을 검출센서와 동기화 시키면 충격부 ①과 센서부 ② 사이의 거리가 일정하므로 탄성파 또는 진동의 도달시간이 일정하기 때문에 이러한 수신신호가 설정 시간 내에 도달하면 레일의 절손이 발생하지 않았다고 판단이 가능하다.

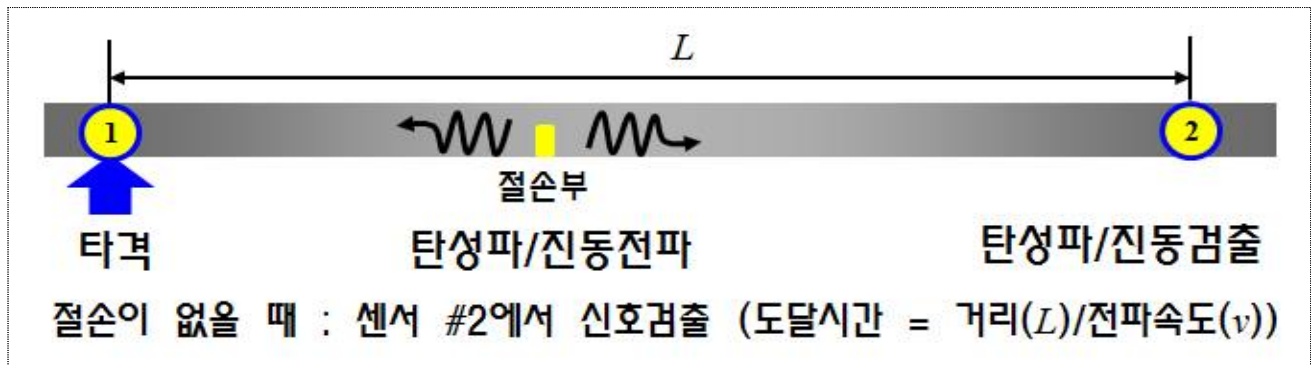


그림 2.6 탄성파 및 진동측정에 의한 레일 절손 검출원리

3) 측정 방법 선정을 위한 현장 시험

가. 스트레인게이지를 이용한 측정 방법

[스트레인게이지]

- Constant voltage excitation: Approx. 2 or 5 VDC
- Gage factor: 2.00 fixed
- Measuring range: Max. $\pm 500000 \times 10^{-6}$ strain

[온도센서]

- Thermocouple T, K type

[데이터 로거]

- No. of channel : 30 - Storage : 1.8 GB
- Operating mode : real-time monitor & automatic
- Scanning speed : 50 ms/channel (standard mode)



그림 2.7 선정된 데이터 로거

○ 선정된 스트레인게이지 측정모듈의 온도 영향 분석

- 대기온도 변화에 따른 레일의 변형을 측정해야하므로 측정모듈 자체의 온도 영향을 분석하였음. 온도 챔버에서 -10~50℃까지 온도를 변화시켜 가면서 측정한 결과 약 100 micro-strain 정도의 영향을 끼치므로 실제 현장에서는 이를 보정하여 변형률을 측정해야 하는 것으로 나타났다.

○ 스트레인/온도센서 신호처리 및 무선 데이터 통신회로 설계

- 선정된 스트레인게이지와 온도센서를 이용하여 레일의 변형과 온도에 따른 센서의 신호를 처리하기 위한 회로를 설계하였다.

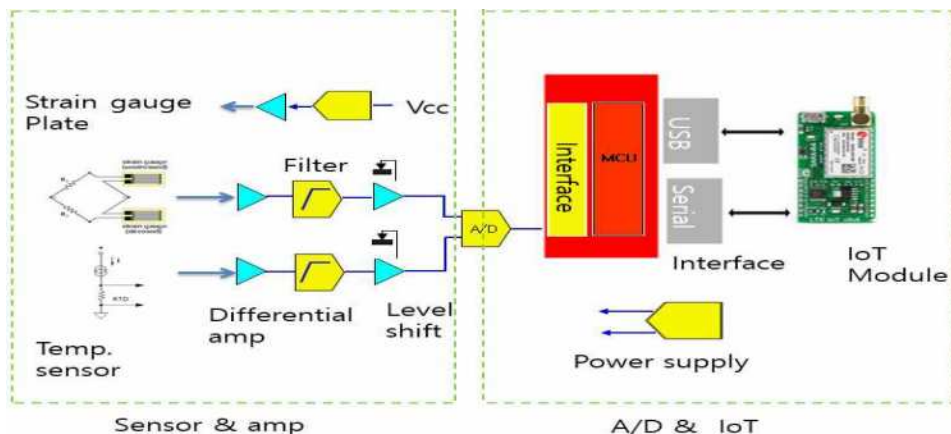
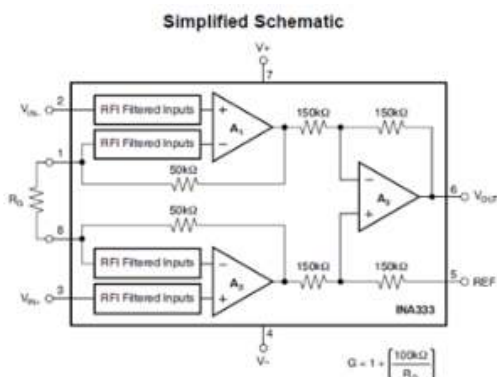


그림 2.8 스트레인/온도 센서 신호처리 및 무선 데이터 통신 구성도

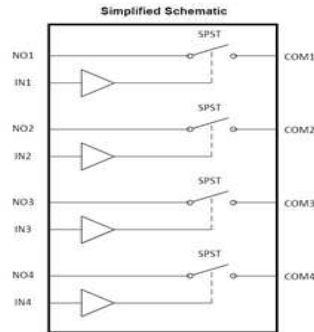
- 신호처리 회로 주요부 설명 및 동작은 아래와 같다.
 - 레일에 설치되는 스트레인게이지와 온도센서는 별도의 금속 sensing plate에 고정되기 때문에 측정 신호는 실제 레일 주변의 강한 전기적 잡음에 대해 S/N ratio(신호대 잡음비)를 향상시키기 위하여 차동 증폭기를 사용하여 필요 레벨만큼 증폭한다.
 - 동시에 스트레인게이지의 온도영향을 상쇄시키기 위한 (온도보상을 위한) 온도측정을 수행함.
 - 증폭된 신호는 저역통과필터(low pass filter)를 사용하여 신호를 측정 주파수 대역으로 제한하며 A/D 변환을 위하여 필요한 전압크기로 조정된 후 입력된다.
 - A/D 및 디지털 신호처리를 위하여 마이크로프로세서(MCU)를 사용하며 이에 따라 A/D 변환기의 제어, IoT 통신 모듈의 데이터 및 제어신호를 프로그램에 의해 처리할 수 있도록 한다. (이 부분은 참여기업의 IoT 모듈에 포함될 수 있다.)
 - 전체 신호처리 회로에 공급되는 전원은 회로 내부에서 필요한 전압으로 변환되며 전원은 배터리, 태양광 cell, 외부전원 등을 이용할 수 있도록 한다.
- 신호처리 회로 주요부 상세 설계 (스트레인게이지 신호 차동증폭 회로 설계 및 시뮬레이션)
 - 스트레인게이지의 신호를 증폭하기 위한 차동 스트레인 앰프를 설계하기 위한 회로 시뮬레이션을 수행하였다. 미국 National Instrument 사의 Multisim 시뮬레이터를 이용하여 차동 증폭회로를 설계하였으며 앰프 이득(gain)을 약 40으로 하였으며 이 값은 차후 실제 스트레인게이지를 연결한 후 감도에 따라 조절이 가능하도록 하였다.

그림 2.9 Multisim 시뮬레이터를 이용한 차동증폭 회로 시뮬레이션 모습



- ## 1 Features

그림 2.10 차동증폭회로 소자 : INA333 Micro-power, Zero-drift



1 Features

- Low ON-State Resistance (R_{ON})
 - 0.9 Ω Max (3-V Supply)
 - 1.5 Ω Max (1.8-V Supply)
- R_{ON} Flatness: 0.4 Ω Max (3-V)
- R_{ON} Channel Matching
 - 0.05 Ω Max (3-V Supply)
 - 0.15 Ω Max (1.8-V Supply)
- 1.6-V to 3.6-V Single-Supply Operation
- 1.8-V CMOS Logic Compatible (3-V Supply)
- High Current-Handling Capacity (100 mA Continuous)
- Fast Switching: $t_{ON} = 5$ ns, $t_{OFF} = 4$ ns
- Supports Both Digital and Analog Applications
- ESD Protection Exceeds JESD-22
 - ± 4000 -V Human Body Model (A114-A)
 - 300-V Machine Model (A115-A)
 - ± 1000 -V Charged-Device Model (C101)

그림 2.11 채널 전환용 Switching IC :

TS3A4751 0.9 Ω Low-voltage, Single-supply, 4-channel

○ 현장 측정을 위한 무선 스트레인 측정 모듈 제작

- 상기 설계를 바탕으로 실제 현장에 적용하기 위한 무선 스트레인 측정모듈을 주문 제작하였다. 무선측정모듈(iLog-beacon)은 블루투스 4.0 채널에 기반한 저전력, 근거리 통신모듈을 적용한 IoT 센서 디바이스로서 통신 거리는 50~70 m, 본 연구의 브릿지 회로를 연결하여 사용할 수 있도록 함. 특히 저전력 사양으로 제작하여 외부 전원공급 없이 사용조건에 따라 완전 충전 할 경우 6~12개월의 사용이 가능하며 외부 배터리를 이용한 전원공급이 가능하도록 제작하였다. 또한 주요 특징으로서는 측정된 데이터 서버에 전송할 수 있는 게이트웨이 (gate way)와 연동되며 측정모듈 별 식별이 가능하도록 하였다.

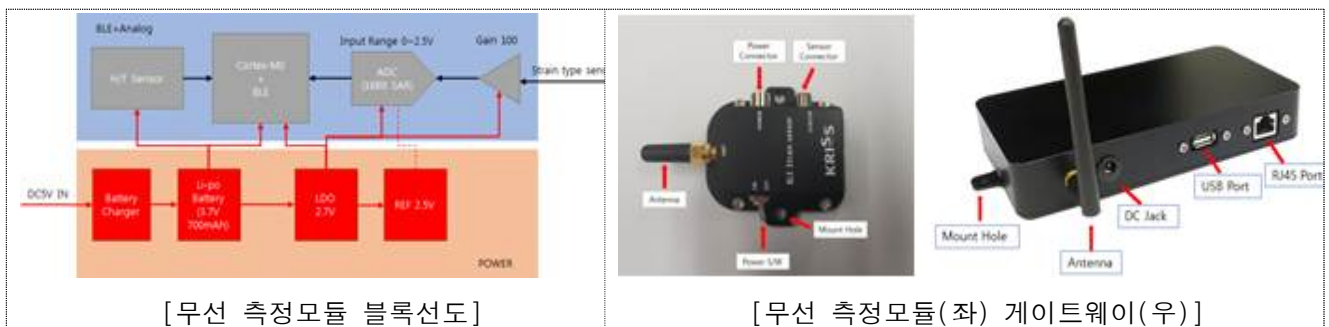


그림 2.12 현장 측정용 무선 스트레인 측정 모듈

- 제작된 무선 측정모듈과 게이트웨이를 이용하여 한국표준과학연구원 철도레일 테스트베드 야외시험장에서 테스트를 수행한 최대 70 m까지 송수신이 가능하였으며 게이트웨이에 모아진 데이터는 LTE 통신망을 통해 클라우드 서버로 전송되고 서버(제작 회사 소유 서버)에 저장된 데이터는 PC나 스마트폰을 통해 확인이 가능하다.

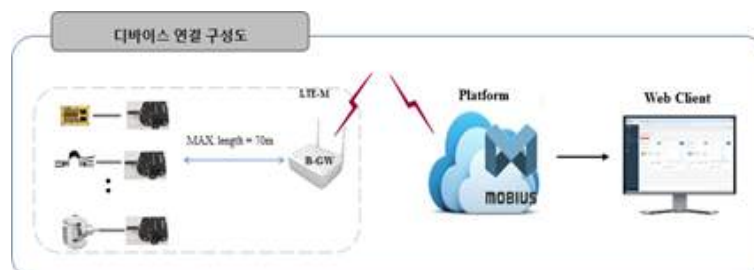


그림 2.13 무선 측정모듈과 게이트웨이 연결

○ 현장 측정 시험

- 한국철도기술연구원 오송 시험장에 설치된 시험선에서 절단시 발생하는 변형을 계측하기 위한 시험을 수행하였음(2019년 8월 6,7일). 약 6 m 간격으로 7군데에 레일의 web 부분에 스트레인게이지를 설치한 다음 절단 시 발생 변형을 측정하여 분석한 결과 레일 절단지점에서의 변형을 변화의 검출하였으며 온도에 따른 레일의 변화량에 대해 측정하였다.
- 결론적으로 레일 절단 지점에서 가까운 지점 이외에는 변형을 변화는 미미하게 나타났으며, 온도에 따라 레일응력의 변형률은 측정 가능함으로 판단되었다.



그림 2.14 현장 측정 시험

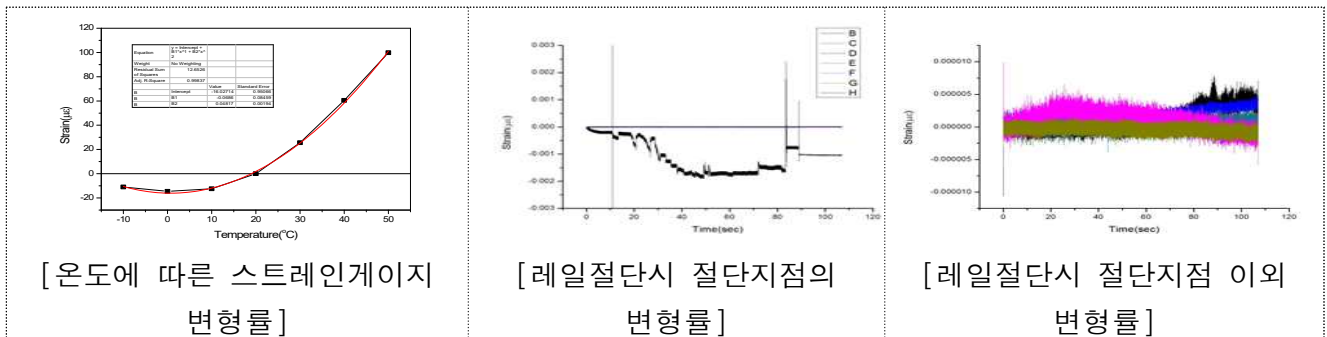


그림 2.15 현장 측정 시험 결과

○ 레일 응력측정을 통한 레일변형 측정 방법

- 레일의 좌굴과 절손은 레일 내부의 응력변화에 따라 발생하므로 이러한 응력을 측정하여 좌굴과 절손을 예측할 수 있을 것으로 판단됨. 이에 따라 현장에서 비교적 용이하게 적용할 수 있는 바크하우젠 노이즈 (BHN) 측정 장치를 이용하여 레일에 작용하는 응력을 산출하고자 하였다.
- KR 60 레일의 헤드부에서 시편을 제작한 다음 재료시험기를 이용하여 인장을 가하면서 시편의 바크하우젠노이즈를 측정하여 응력을 분석하였다.



그림 2.16 바크하우젠 노이즈 분석 절차

○ 바크하우젠 노이즈 분석 결과

- 시편의 자화 진폭에 따라 다양한 응력상태에서의 BHN 신호 크기 변화는 아래 그림과 같으며 응력이 증가함에 따라 바크하우젠 노이즈 크기도 증가하는 것으로 나타났음. 바크하우젠 노이즈의 변화가 일정하게 나타나는 자화진폭 구간을 대상으로 보다 상세한 분석을 수행한 결과 바크하우젠 노이즈와 응력 사이에 결정계수 0.97 이상의 매우 강한 상관관계를 나타내어 향후 바크하우젠 노이즈를 측정하여 레일 응력상태의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

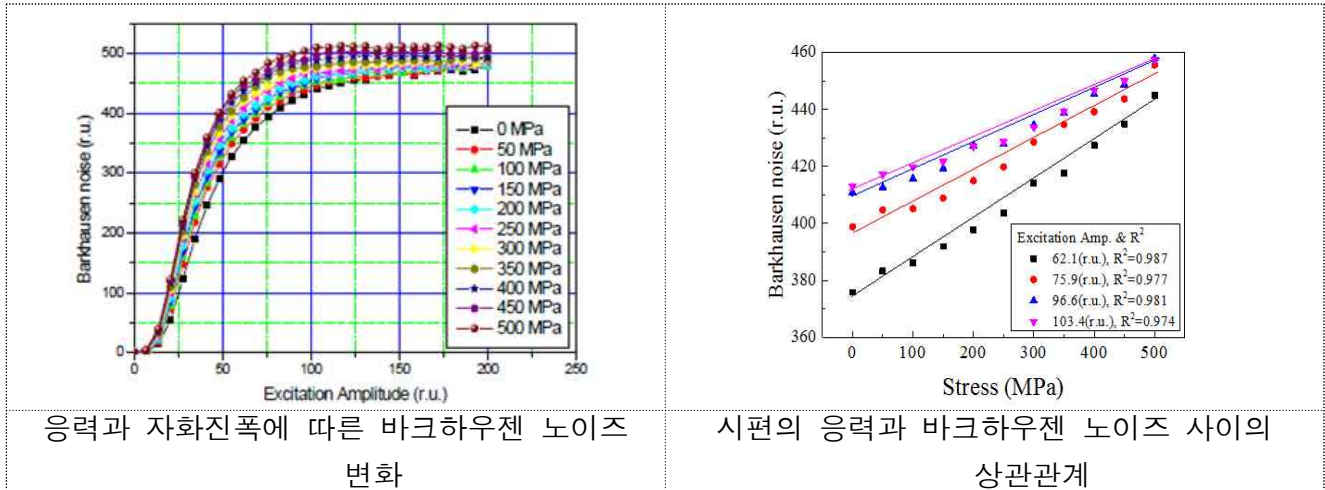


그림 2.17 바크하우젠 노이즈 분석 결과

나. 탄성과 센서를 이용한 측정 방법

- 예비시험 : 타격해머로 레일에 손상이 발생하지 않을 정도로 타격을 가한다음 전파되는 탄성과 또는 진동을 정밀측정 장비인 Laser vibro-meter로 측정하여(아래 그림) 오실로스코프로 수신되는 신호의 파형과 주파수를 분석하였다.
- 타격 해머로 아주 약한 타격을 가했을 때도 약 1.5 m 길이의 레일에 대하여 탄성과 및 진동의 검출이 가능하였으며 신호파형에 대한 주파수 분석결과 검출 가능한 주파수 범위는 약 15 kHz 내외인 것으로 나타났다.

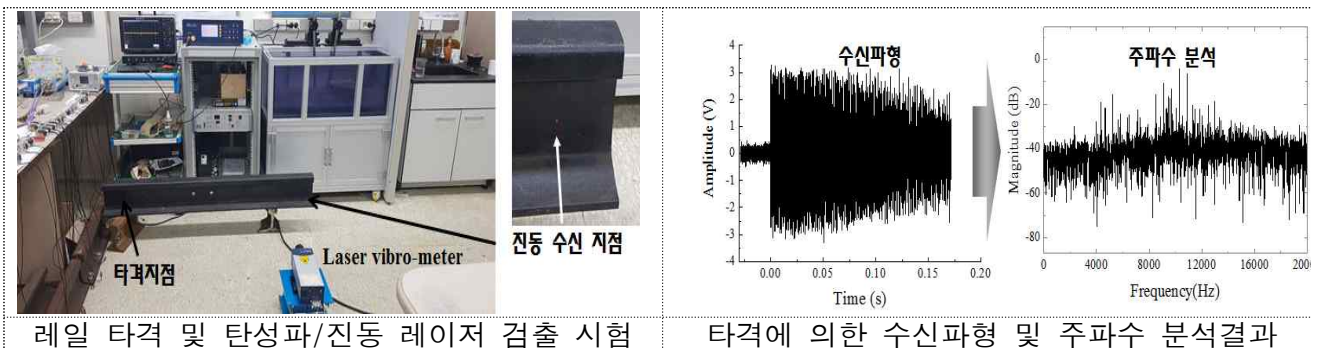


그림 2.18 바크하우젠 노이즈 분석 결과

○ 탄성과 타격 장치 및 검출 센서 제작

- 레일의 web 부에 부착되어 타격을 가할 수 있는 솔레노이드와 이를 지지할 수 있는 자석부로 구성된 타격부를 제작하였다. 솔레노이드는 시중에서 쉽게 구할 수 있는 제품들 중에서 비교적 큰 스트로크를 구현할 수 있는 제품을 구매한 다음 레일 web 부분 타격이 용이하도록 금속으로 타격부를 제작하여 부착하였다. 또한 레일 web 부 면에 잘 부착이 되도록 탈착이 용이한 자석으로 전체 타격장치를 제작하였다.



그림 2.19 솔레노이드 탄성과 발생 장치

- 레일 타격에 따른 탄성과 및 진동을 검출하기 위하여 압전소자 기반 검출센서를 제작하였다. 직경 1인치 (2.54 cm), ~200 kHz 범위의 대역폭(광대역)을 가지는 검출 센서의 구조로서 압전소자, 전면정합층, 후면재 등으로 구성되었다. 레일에서 전파되는 탄성파의 수신감도를 최대한 크게 할 수 있는 알루미늄 소재의 전면정합층으로 구성하였다. 제작된 센서를 레일에 부착시킬 수 있도록 자석 등을 이용하여 아래 그림과 같은 부착 장치를 제작하였다.



그림 2.20 솔레노이드 탄성과 발생 장치

- 탄성과 검출시험 결과 제작된 센서를 이용하여 레일에 타격을 가한 다음 전파되는 탄성파를 검출하기 위하여 실험실에서 기초실험을 수행 결과 탄성파 수신이 가능하였다. 수신된 신호의 주파수 범위는 약~20 kHz 범위로서 Laser vibro-meter와 유사한 특성을 나타내었다.

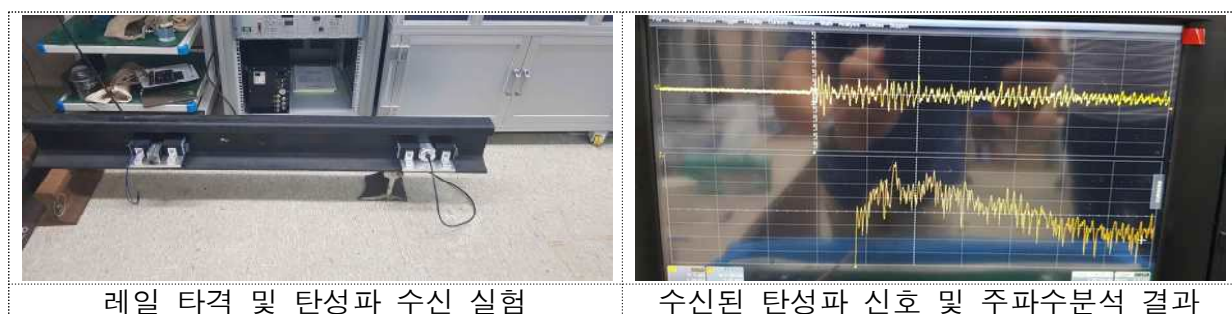


그림 2.21 탄성파 수신 실험



그림 2.22 테스트베드 탄성과 검출 실험

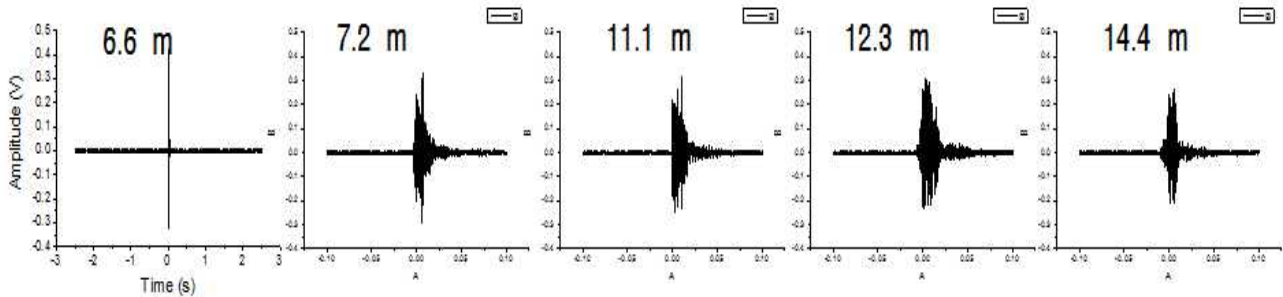


그림 2.23 타격점 증가에 따라 수신된 탄성과 신호

- 실제 레일에 적용하기 위하여 대전차량정비단 구내 레일 탄성과 수신실험을 수행한 결과

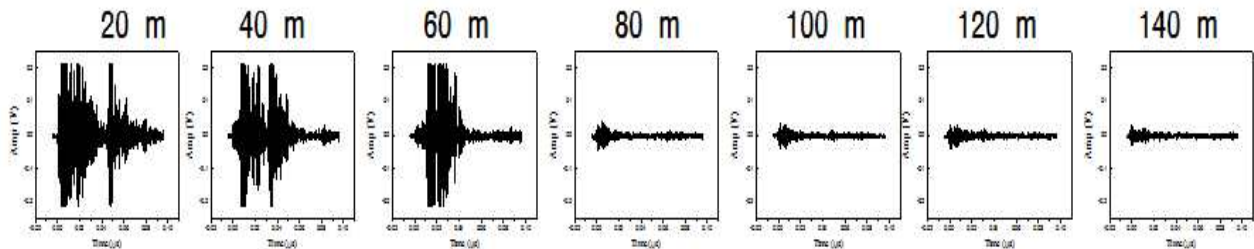


그림 2.24 대전차량정비단 구내 레일에서의 탄성과 검출 실험 결과

- 타격 거리 140 m 까지 탄성파가 수신되었으며 향후 센서의 감도를 보다 향상시킬 경우 검출 거리를 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 레일 분기부의 길이가 약 200m 정도임을 고려할 때 레일 타격 지점 좌우로 검출 센서를 설치할 경우 레일 분기부의 절손 검출이 가능할 것으로 판단된다.

○ 고찰 및 결론

- 상기의 좌굴 및 절손에 대한 4가지 검출 방법에 대하여 연구개발에 적용하기 위한 장단점을 정리하였다.
- 최종적으로 선정된 측정방법은 스트레인게이지(좌굴), 탄성파(절손) 검출 방법으로 결정되었으며 LVDT방법 또한 개발 예정이다.

표 2.1 측정방법별 장단점 비교

측정방법	장점	단점
스트레인게이지	· 일반적으로 검증된 방법 회로구성이 비교적 간단함	· 레일 설치가 까다롭고 유지보수의 문제점 · 좌굴/절손 예측 정확도가 떨어짐
LVDT	· 좌굴 검출에 유리	· 철도공사의 레일 유지관리 측면에서 불리함
탄성파/ 진동검출	· 절손 검출에 유리, 절손 위치 검출 가능	· 시스템 구성이 다른 방법보다 다소 복잡함
바크하우젠 노이즈	· 응력상태를 정확하게 측정할 수 있음	· 현장설치 및 IoT 기반 모니터링에 불리함

4) 테스트베드 구축을 위한 실내 외 시험

가. 변형률 측정 실내시험

○ 만능시험기를 이용한 변형률 측정 실험

- 절단 레일(KR50) 시편에 센싱 플레이트를 부착하여 시험기 용량 최대 하중 10 톤까지 하중을 가하여 변형률을 측정하였다.
- 측정결과, 최대 하중 100kN에서 레일 응력은 15MPa이고 변형률은 $250\mu\epsilon$ 으로 나타남

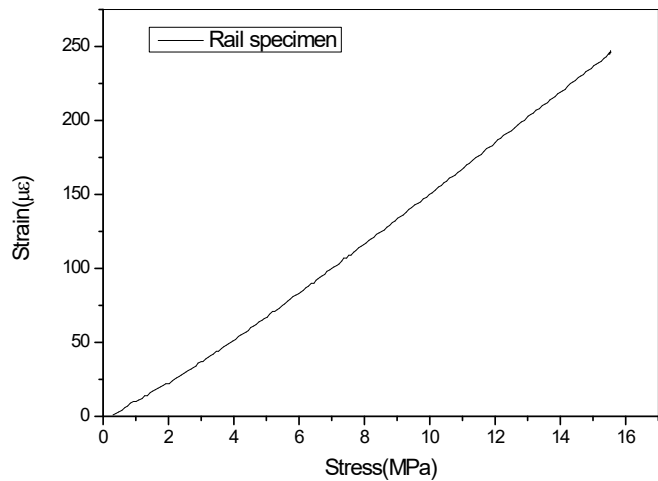
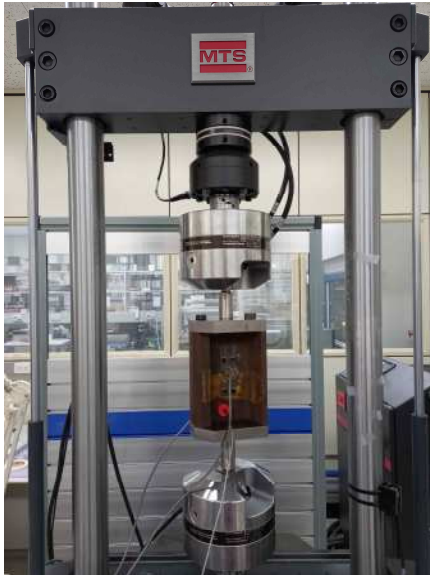


그림 2.25 레일시편 실내시험 및 측정결과

○ 센싱플레이트 변형률 측정 시험

- 최대 변형률 2% 에서의 측정 가능여부를 확인하기 위하여 센싱 플레이트만을 가지고 인장 시험을 수행하였다.
- 측정결과, 하중 2.5 kN에서 응력 500 MPa이었으며 이 때의 변형률은 $20900\mu\epsilon$ 로 2% 변형률 측정이 가능함을 확인하였다.

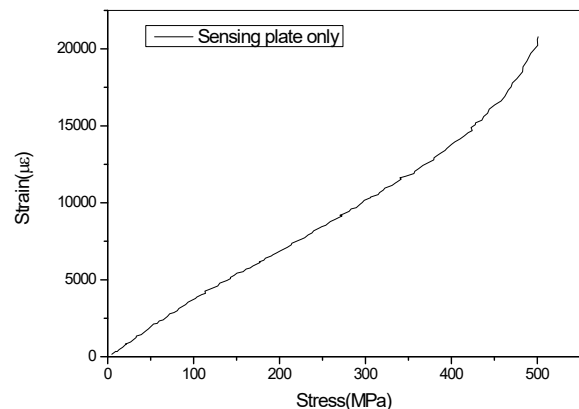


그림 2.26 센싱플레이트 실내시험 및 측정결과

나. 레일 변형 측정 센서 외부 노이즈 영향 측정

○ 현재 한국철도에서 사용되고 있는 궤도회로는 임펄스궤도회로와 AF궤도회로가 있으며 궤도회로 형식에 따라 노이즈 발생 경향이 다를 수 있기 때문에 각각의 궤도회로 종류에 따라 센서에 노이즈가 미치는 영향을 분석하기 위해 궤도회로별 외부유입 노이즈를 측정하였으며 측정결과 외부유입 노이즈가 센서의 데이터 측정에 끼치는 영향은 미소한 것으로 분석되었다.

- 일 시 : 2021. 3.19 (금) 10:00 ~ 16:00
- 위 치 : 경부선 증평역 분기부(임펄스 궤도회로), 음성역(AF 궤도회로)
- 참여기관 : 한국철도공사, 한국표준과학연구원, 네이블커뮤니케이션즈
- 내 용 : 궤도회로별 센서에 미치는 외부 노이즈 영향 측정

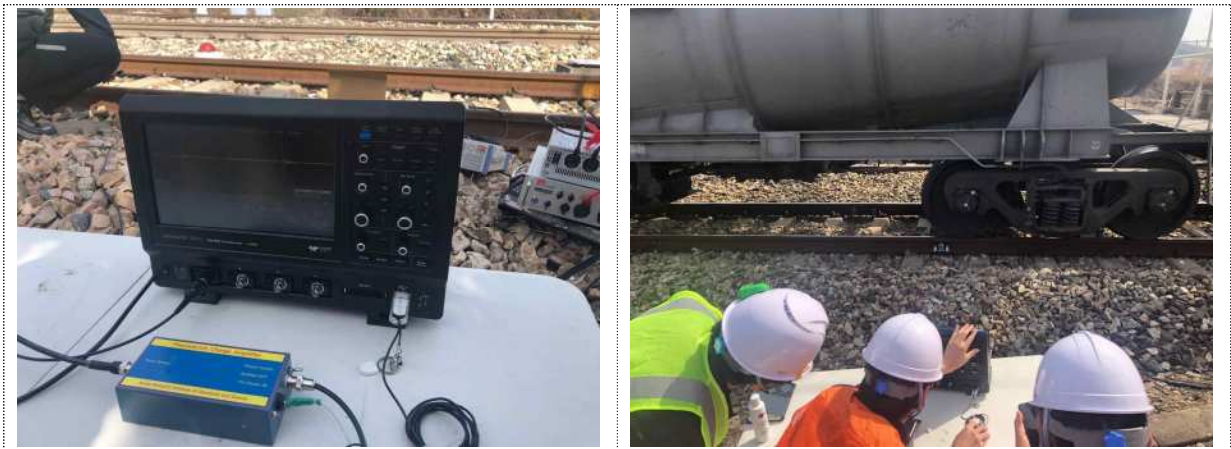


그림 2.27 외부노이즈 측정

○ 현장측정 결과 AE 신호 진폭을 높이기 위해 Amplifier를 제작하여 실제 시험에 사용하여 데이터를 취득하였다. 측정결과 Amplifier를 적용 시 데이터 파형의 측정이 더 선명한 것으로 판단되었다.

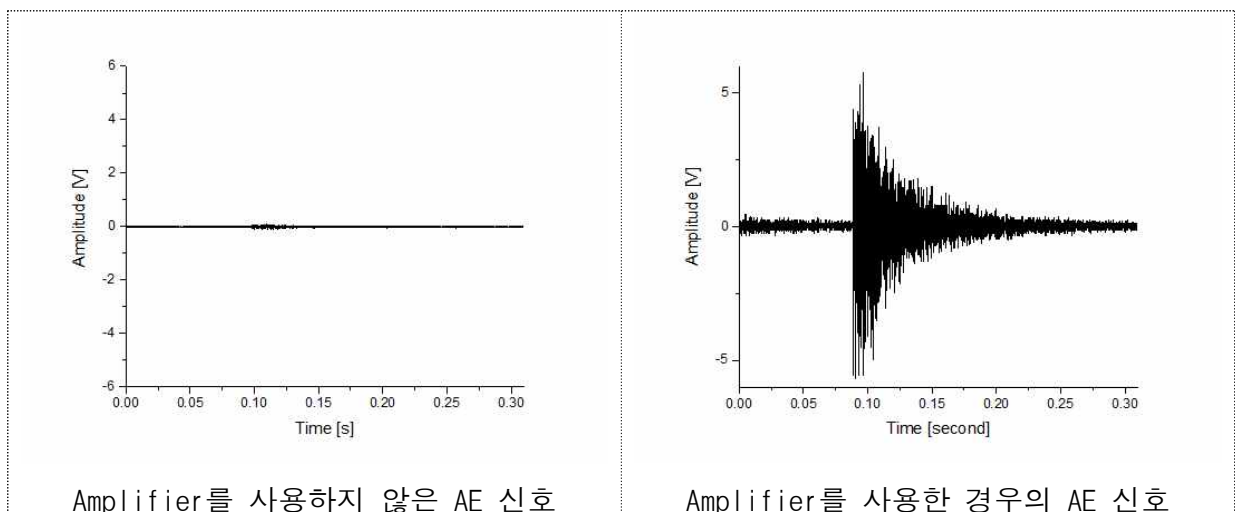


그림 2.28 Amplifier를 이용한 AE 신호 진폭 비교

다. 레일 변형 측정 모듈 기능 동작 시험

- 시제품 제작에 앞서 현재까지 개발 된 센싱모듈과 IoT 통신 보드 등의 기능 및 동작 시험을 실제 철도운영 환경에서 시행하였으며 레일 변형 측정 모듈의 데이터 측정과 통신거리 등 문제없는 것으로 나타나 운행선 테스트베드 구축 대상지를 선정하기 위한 준비를 수행하였다.

- 일 시 : 2021. 4.15 (금) 13:00~15:00
- 위 치 : 대전역 장비유치선
- 참여기관 : 한국철도공사, 한국표준과학연구원, 네이블커뮤니케이션즈
- 내 용 : 센싱 모듈 및 통신 보드 기능 동작 시험

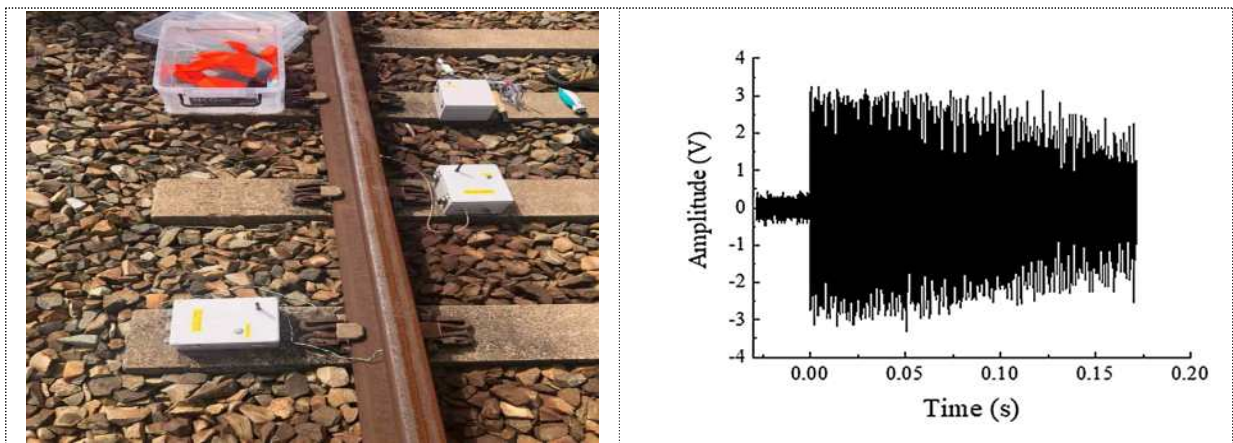


그림 2.29 센싱모듈 및 통신보드 기능동작 시험

- 레일타격에 의해 발생하는 탄성파의 주파수 범위에 해당하는 탄성파 검출 센서를 제작하여 장비유치선내 일정한 힘의 가진기(솔레노이드)로 타격을 가한 후 전파되는 탄성파를 레이저 변위 검출기로 측정하였으며 센서 동작에 이상이 없음을 확인하였다.

5) 레일변형 감지시스템 테스트 베드 구축

가. 옥천 폐연결선 테스트베드 구축

- 혹서기 장대레일 취약개소 구간에서 나타나고 있는 레일 좌굴은 승차감저하 뿐만 아니라 안전을 위협하는 탈선 등의 문제를 일으킬 수 있으며 이 문제를 대응하기 위해 실시간 좌굴을 감시할 수 있는 기술이 필요하다. 국내에서는 처음 시도되는 기술이므로 신뢰성과 적용성을 실질적으로 검증할 수 있는 테스트베드 구축이 필요하다. 기간시설로서 국가적 중요성과 국민의 생명과 재산의 보호가 필수적으로 요구되는 철도 기술 특성상, 성능검증이 절대적으로 요망되므로 충분한 신뢰성 시험을 수행해야한다.
- 본 연구에서는 다음과 같이 테스트베드 계획을 수립하고 현장설치 시험을 통해 테스트-베드를 구축하고 센싱 모듈의 현장시험을 수행하였으며 선정된 테스트베드 조건은 다음과 같다.
 - 센싱모듈 손상을 최소화 할 수 있는 개소
 - 레일온도가 일정수준까지 올라갈 수 있는 개소
 - 절손 및 좌굴 시험을 동시에 진행 할 수 있는 개소
 - 항상 센서의 이상 유무를 확인할 수 있도록 접근성이 용이한 개소
 - 장대레일 및 선로시설물에 손상을 주지 않고 절손을 측정할 수 있는 개소
- 1차년도 연구에서는 레일의 좌굴과 절손에 대하여 IoT 환경을 고려하여 보다 정확하고 손쉽게 검출할 수 있는 여러 가지 방법들을 검토하여 적합한 검출 방법을 제안하였으며 2차년도에는 테스트베드를 구축하고 좌굴 검출 시험과 탄성파 및 진동검출 방법을 적용한 레일 절손센서의 현장시험을 수행하였다.
 - 기 간 : 2020. 7월 ~ 10월
 - 위 치 : 경부고속선 대전남연결선 구간(충북 옥천로 옥천읍 옥천로1720)
 - 참여기관 : 한국철도공사, 한국표준과학연구원, 네이블커뮤니케이션즈
 - 내 용 : 좌굴(대변위) 및 절손(탄성파, 진동) 검출 시험



그림 2.30 테스트 베드 전경 및 위치



그림 2.31 레일 좌굴/절손 센서 설치 절차

- 이번 현장시험은 레일변형 감지센서의 시제품의 성능 확인이 첫 번째 목적이므로 반드시 운영선에서 실시할 필요는 없을 것으로 판단되어 폐선된 옥천 경부고속선 남연결선에 테스트 베드를 구축하였으며 3달간 현장시험을 수행하였다. 레일변형 좌굴 센서를 설치하기 위해 레일 복부에 2개소 천공하였으며 솔레노이드 가진거리를 확인하기 위해 레일이음매 부설 장소에 절손센서를 설치 후 이음매 체결을 풀어 신호를 확인하였다.
- 1차, 2차에 걸쳐 레일변형 검출 시험을 수행하였으며 1차 진동 검출 시험에서 나타난 문제점을 보완하기 위해 탄성과 검출시험을 진행하였고 레일 온도변화에 따른 센싱 플레이트 변형 검출 시험을 수행하였다. 솔레노이드 가진거리를 30m→180m로 증가시키면서 탄성과 신호를 획득하였으며 데이터 취득결과 180m이상에서도 절손데이터가 검출 가능할 것으로 판단되었다. 또한 레일변형(응력) 검출시험을 위해 개발된 센싱플레이트와 상용스트레인게이지의 비교 분석을 위해 동일 개소에 부착하여 36시간 온도변화에 따른 데이터를 비교 분석하였으며 센싱플레이트의 감도가 높고 선형성이 낮은 것으로 분석되었다.

나. 경부선 옥천역 분기기 절손감지시스템 테스트 베드 구축

- 폐선에서 시험결과 도출된 결과를 통해 시제품을 보완하여 제작 완료(21.7월)하였으며 제작된 시제품의 성능 검증을 위해 현장설치가 필요하다. 옥천역 폐선과 실제 운행선과의 데이터 측정결과의 차이가 발생할 수 있기 때문에 실제 열차가 운행하는 운행선에 절손 감지 시스템을 설치하였으며 3달간 (8~10월) 모니터링을 수행을 통해 데이터를 취득하였다. 테스트 베드 구축을 위한 조건은 절손의 경우 고장 및 문제 발생 시 즉각 대처 할 수 있도록 선로 접근성과 병렬점퍼 구간은 분기부에서만 적용되기 때문에 운행선 분기부를 선정하였다.

- 기 간 : 2021. 8월 ~ 10월
- 위 치 : 경부선 옥천역구내(상) 21A호 분기기
- 참여기관 : 한국철도공사, 한국표준과학연구원, 네이블커뮤니케이션즈
- 내 용 : 절손 감지 시스템 테스트베드 구축



그림 2.32 테스트 베드 전경 및 위치

- 경부선 옥천구내(상) 182.850km 21A호 분기기에 절손 감지시스템을 설치하였으며 탄성파를 발생시키는 솔레노이드 타격기와 탄성파를 수신하는 감지 센서간의 거리는 100m이격하여 설치하였다. 센싱모듈 사이에 분기기 1틀이 포함되어 분기부 절손 시 감지할 수 있도록 테스트베드를 구축하였으며 관제플랫폼 상에서 실시간 모니터링을 통해 절손 여부를 모니터링 할 수 있다. 테스트 베드 구축을 후 3개월간 모니터링을 통해 알고리즘 수정 및 센서에 대한 내구성을 평가하였으며 레일 절손 시 탄성파 데이터가 취득 되지 않으면 절손으로 판정된다.



그림 2.33 테스트 베드 전경 및 위치

다. 경부선 대전-세천 간 좌굴감지시스템 테스트 베드 구축

- 경부선 대전-세천(하) 171.800km에 좌굴감지 시스템을 설치하였으며 레일 온도변화에 따라 응력변화량을 측정하여 레일의 하절기 최대온도상승률에 비례하여 레일 응력 변화량을 측정하였으며 좌굴발생 시 급격한 응력 변화량이 발생하여 관제플랫폼 데이터 모니터링 그래프상 급격한 변화가 발생하기 때문에 실시간 감시가 가능하다.

- 기 간 : 2021. 8월 ~ 10월
- 위 치 : 경부선 대전-세천(하) 171.800km
- 참여기관 : 한국철도공사, 한국표준과학연구원, 네이블
- 내 용 : 좌굴 감지 시스템 테스트베드 구축



그림 2.34 테스트 베드 전경 및 위치

- 좌굴측정을 위해 레일온도계와 스트레인게이지를 부착하였으며 데이터 통신을 위한 통신모듈과 전력을 제공하기 위한 배터리로 구성된 모듈 Box를 설치하였다. 모니터링 결과 온도 상승에 따라 응력변화량은 비례하여 증가 및 감소하였으며 향후 좌굴발생 시 변형량이 크게 나타나 좌굴발생을 감지할 것으로 판단된다.



그림 2.35 테스트 베드 전경 및 위치

라. 경부선 옥천-이원 레일 응력 및 온도 측정 테스트 베드

- 시제품 제작 전까지 온도변화에 따른 응력 데이터 측정을 위해 시중에서 판매중인 데이터 로거와 레일 온도계를 활용하여 경부선 옥천-이원(하) 184.250km 부근에 설치하여 모니터링을(21.4 ~ 8월) 수행하였다. 본 측정 결과를 활용하여 좌굴 측정 알고리즘을 개발하였으며 온도 변화에 따른 응력 변화량에 대한 DB를 구축하였다.



그림 2.36 테스트 베드 전경 및 위치



그림 2.37 레일 온도 및 응력 측정

2.2 레일변형 센싱모듈 개발

가. IoT 기반 센서 네트워크 설계

○ 레일 절손 및 응력 변화를 검출하기 위한 IoT 기반 센서 네트워크 구성

- 레일 분기부에서의 절손 및 곡관부의 응력 변화를 검출하기 위한 IoT 기반 센서 네트워크의 구성은 크게 센서 노드와 게이트웨이 데이터 서버로 구성된다.
- 본 연구에서는 레일의 절손 및 응력을 측정하는 모듈로 각각 2종류의 센서 노드가 적용되었으며, LoRa망을 이용하여 게이트웨이의 무선 통신용 RF 모듈을 통해 센서노드의 데이터가 전송된다.
- 전송된 데이터는 게이트웨이의 마이컴 또는 마이크로 프로세서에 의해 서버에 필요한 데이터 형태로 처리된 다음 LTE 망 또는 이더넷을 통해 서버로 전송된다.
- 최종 사용자는 서버에 접속함으로써 레일의 상태를 온라인으로 모니터링할 수 있으며, 본 연구에서의 서버는 레일 관제 모니터링 시스템으로 활용될 수 있도록 구축되었다.

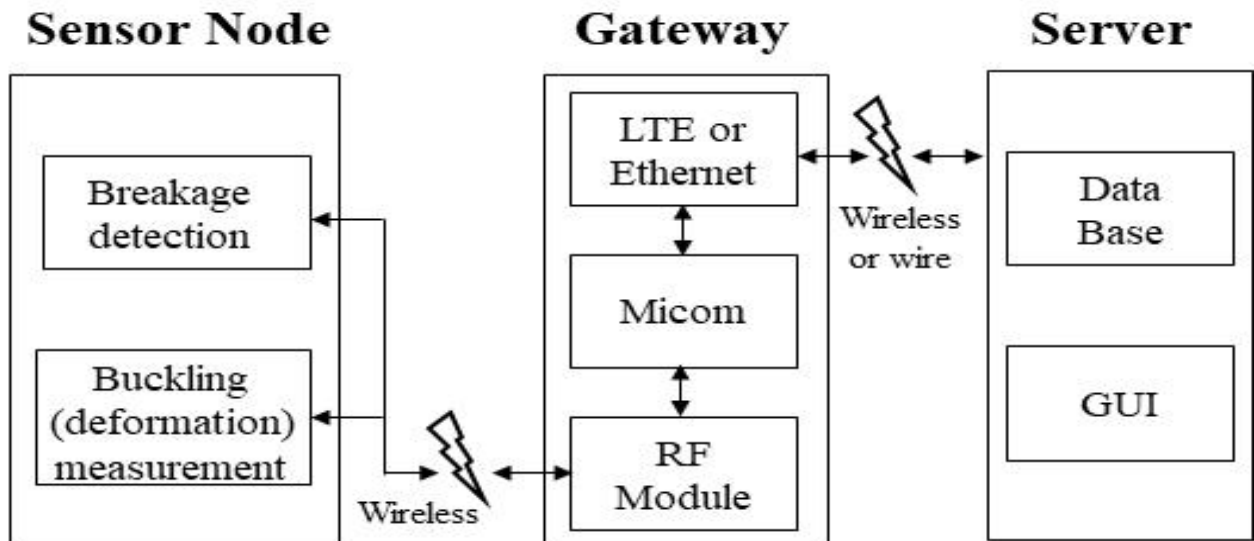


그림 2.38 철도 레일의 절손 및 좌굴 모니터링을 위한 센서 네트워크 기반 LoRa WAN 구조

나. 레일 절손 검출 센서노드

○ 레일 절손 센싱 방법 도출

- 레일의 타격 지점에서 발생한 탄성파가 전파될 때 절손 부분을 만나면 더이상 탄성파가 전파되지 않게 되는 원리를 활용하여, 레일에 일정한 타격을 가한 후에 발생하는 저주파 탄성파를 일정한 거리에서 검출하는 방법을 레일 분기부에서 발생하는 절손의 검출 방법으로 적용하였다.
- 레일 타격 시간을 탄성파 검출 센서와 동기화시키면 레일의 타격점과 센서 위치가 고정되어 있으므로 레일에서의 탄성파 속도(약 5900 m/s)를 이용하면 절손이 없는 정상 레일의 경우 탄성파 도달 시간을 알 수 있게 되므로, 레일을 타격한 다음 레일을 전파하는 탄성파가 일정한 도달 시간 범위 내에서 검출되면 레일이 정상이라고 판단하는 것이다.

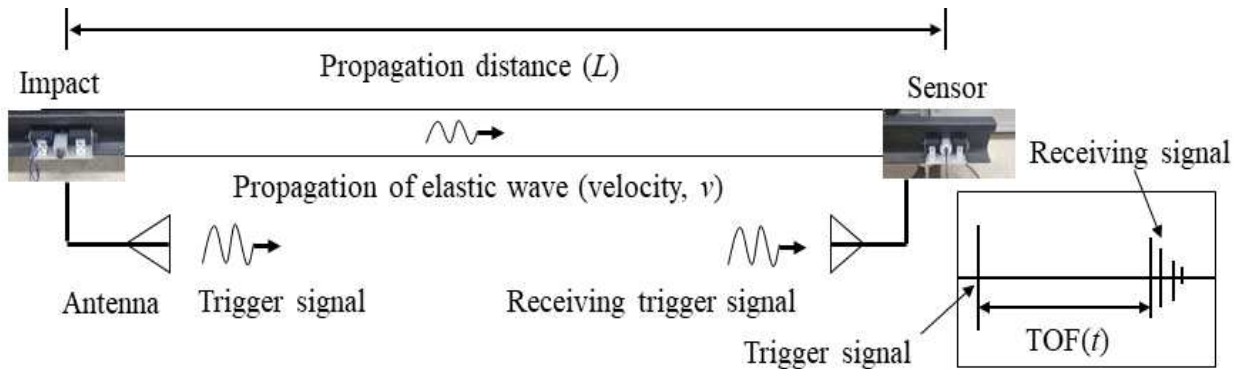


그림 2.39 철도 레일의 절손 검출 개념도

- 상기의 방법을 적용하기 위하여 레일 타격에 의해 발생하는 탄성파의 주파수 범위에 해당하는 탄성파 검출 센서를 제작하였다.
- 실험실에서 레일 시편에 일정한 힘의 가진기로 타격을 가한 후 전파되는 탄성파를 레이저 변위 검출기로 검출하여 주파수를 분석하였다. 약 1.5 m 길이의 레일 시편에 가진기로 타격을 가한 후 수신되는 신호를 분석하였으며, 검출 신호 파형에 대한 주파수 분석 결과 주파수 범위는 약 2~15 kHz 범위인 것으로 확인되었다.

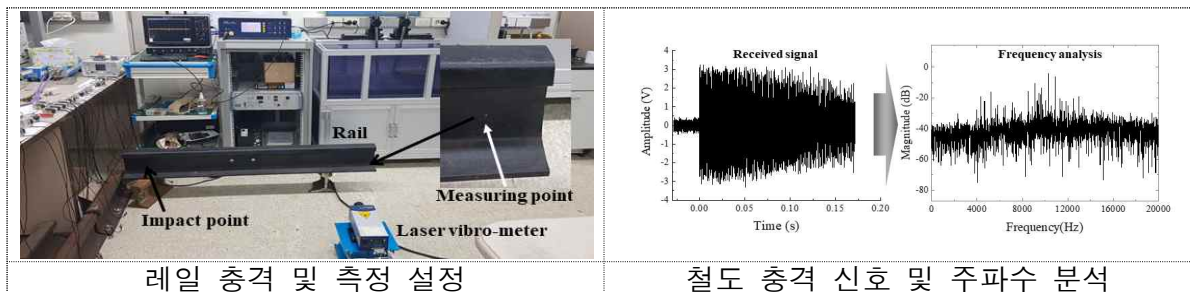


그림 2.40 철도 레일 충격 실험 및 수신 신호 분석 결과

다. 레일 좌굴 감지 센서노드

○ 레일 좌굴 감지 방법 도출

- 레일 곡선부의 좌굴을 검출하기 위하여 스트레인 게이지 방법을 적용하였다. 즉, 레일의 길이 방향과 수직 방향의 변형을 주기적으로 모니터링하면서 레일 중립온도에서의 변형보다 큰 변형이 검출될 경우 좌굴 발생 가능성이 높다고 판단하는 것이다.
- 이를 위하여 레일의 길이 방향과 수직 방향으로 스트레인 게이지를 각각 부착하여 일정한 주기로 각각의 변형과 레일 온도를 측정하도록 하였다. 선정된 스트레인 게이지는 인가전압 범위 2~5 V, 인가전류 범위 5.7~16.7 mA, 스트레인 측정범위 $\pm 5 \times 10^5 \mu \epsilon$, 게이지 factor 2.0이다.

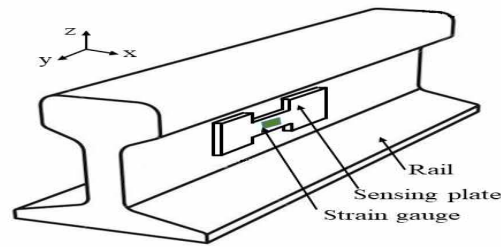


그림 2.41 스트레인 게이지 방법

- 레일의 web 부분에 스트레인 게이지를 직접 부착하는 것은 부착작업의 번거로움과 유지/관리의 어려움 등을 고려하여 레일에서 일정한 크기로 시편을 가공하여 스트레인 게이지를 접착한 다음 전체 시편을 레일 web 부분에 용접이나 볼트 체결로 설치할 수 있는 센싱 플레이트를 제작하였다. 그림 2.42은 레일 좌굴 검출용 센싱 플레이트를 제작하여 설치한 모습을 나타낸다.

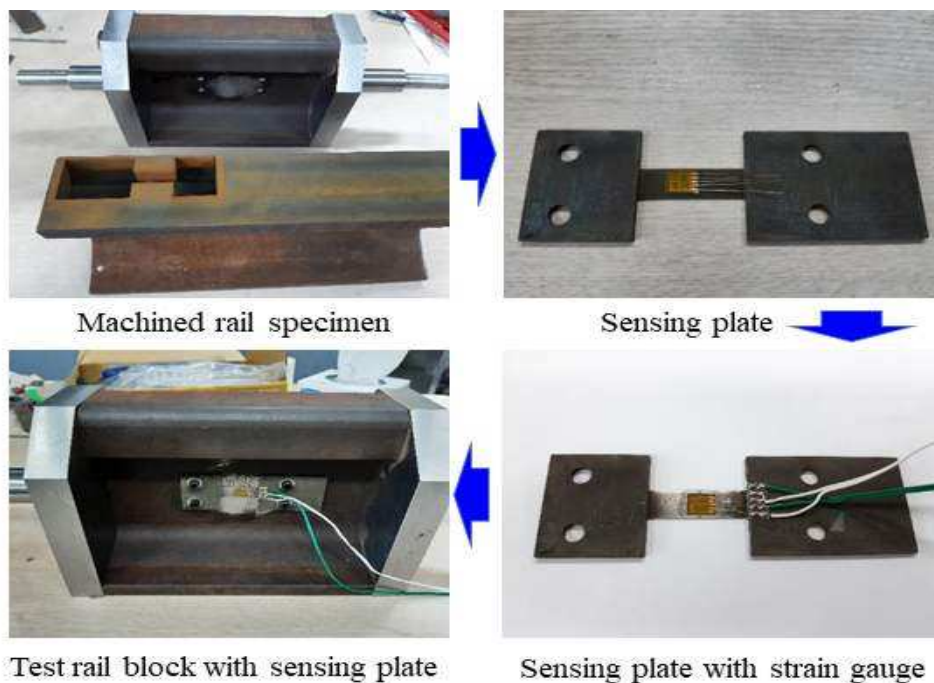


그림 2.42 레일 좌굴 감지용 스트레인 게이지가 있는 감지 플레이트

2.3 LPWA IoT 단말 및 관제플랫폼 설계

가. 레일 좌굴 및 절손 감지 시스템

- 레일 좌굴 및 절손 감지 시스템은 이상기온 (폭염, 혹한)으로 장대레일에서 발생할 수 있는 레일변형 (절손,좌굴)감지 불가 영역의 레일상태를 실시간으로 감지 및 경보를 전송하여 선제적인 열차탈선 사고를 예방할 수 있도록 좌굴과 절손을 감지할 수 있는 센서를 부착하고, 해당 센서로부터 데이터를 수신 받아 서버에 전달하는 시스템이다.
- 이를 위해 해당 시스템은 광대역 통신모듈을 내장하고, 센싱 데이터 측정이 가능한 센싱 모듈을 포함한 광대역 IoT 통신 단말과 측정된 데이터를 수신 받는 서버와 관제시스템으로 구성되어있다.
- 시스템의 동작은 디바이스가 주기적으로 레일의 변형을 감지하여 광대역 통신을 활용하여 서버에 전달하고, 서버에서는 이를 사용자를 위한 데이터로 가공하여 정보를 제공함으로써 원격에서 레일의 상태를 파악함과 동시에 사전 조치를 취할 수 있도록 하는 시스템이다.
- 다음은 레일 좌굴 및 절손 감지시스템의 동작 컨셉이다.

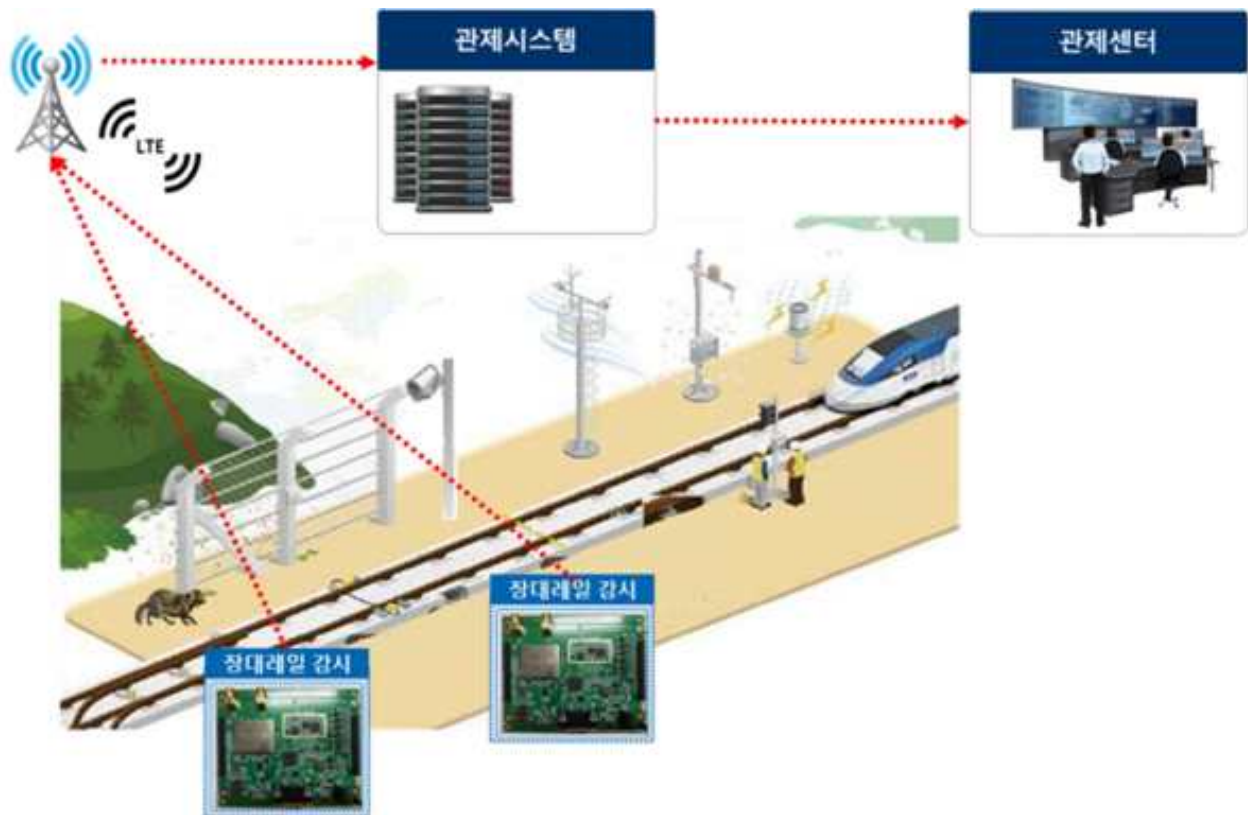


그림 2.43 레일 좌굴 및 절손 감지시스템 동작 개요도

나. 광대역 IoT 통신 단말 시제품

○ 통신 단말 시제품 개요

- 광대역 IoT 통신 단말은 통신부, 센서 측정을 위한 센서 인터페이스부를 포함하고 있다. 광대역 통신을 위해 멀티밴드 LTE 모듈을 포함하고 있고, 통신 모듈은 Gemalto 사 PLS62W 모델을 내장하고 있다. 또한 해당 단말은 설치 특성을 고려하여 독립전원을 사용하도록 설계되었으며, 전압은 4.3V ~ 24V까지 허용한다. 또한 설치 환경에 대한 이슈로 인하여 기구 설계 시 방수가 가능하도록 하였으며, 센서가 선로에 직접연결되어야 하므로 역전압 혹은 외부 임펄스에 대비할 수 있도록, 기구 외부에 실드 처리를 하도록 하였다.

○ 다음은 통신모듈의 재원이다.

- Gemalto PLS62-W
- Multi Band 지원(LTE-R 주파수 대역 Band 28 포함)
- FDD LTE Cat.1 : DL - 10Mbps, UL - 5Mbps
- KC 전파인증 획득



그림 2.44 LTE-R 통신 모듈

- 센서 인터페이스부는 센싱 데이터의 충분한 가독성을 위한 증폭회로를 포함하고 있다. 절손 측정을 위한 증폭회로는 차동 증폭과 반파정류가 가능하도록 설계하였다. 증폭 배율은 기본 150배 증폭이 하도록 하였으며, 150배 이상의 증폭은 회로의 저항값 변경을 통해 조절이 가능하다.
- 반파정류회로를 추가한 것은, 센서의 출력이 Zero-Offset을 기준으로 증폭하기 때문에 +/-의 차동값을 가지게 되고, 일반적인 경우, AMP 회로에 Adder (Moving)를 추가하여 Peak to Peak를 임의의 최대 전압값과 Zero 영역으로 맞추어 사용한다. 그러나 본 과제의 절손 센서는 상하의 파형이 반전과 유사하고, 하위 파형이 상위 파형에 대하여 반대적인 의미를 갖지 않기 때문에 회로설계의 효율성을 위해 하위 파형을 제거하도록 설계하였다.
- 증폭된 신호를 위해 ADC를 내장하고 있다. 내장된 ADC는 고속샘플링을 위해 12Bits@5Msps 샘플링을 지원하도록 하여 지연 없는 센서 신호 측정이 가능하다.

- 또한, 일정한 신호측정 주기를 위해 RTC를 내장하고 있다. RTC는 32.768Khz를 사용하며 오차 범위 +/- 5ppm 수준으로 사용한다.
- 설계에 사용된 MCU는 ST Micro 사의 Cortex-M4 32Bits RISC 를 사용하며 주요 재원은 다음과 같다.
- 통신 단말은 외부 확장이 용이하도록 80Pin Ext. 소켓을 내장하고 있으며, 이를 통해 좌굴 및 절손 센서의 인터페이스를 연동한다.
- 통신 단말의 전원은 최소 4.3V ~ 24V 까지 사용할 수 있고, USB 4.3V ~ 5V까지 입력 받을 수 있도록 설계되었다. 또한 USB를 통하여 전원을 입력 받는 것은 Currnet Limiter를 사용함으로써, USB를 통해 전원을 공급할 시, 공급장치의 훼손 발생을 방지하기 위함이다.
- 통신 단말은 Ext. Main DC7V ~ 24V 입력을 받아 각각 통신부, 메인MCU 및 주변 장치로 전원을 분산하여 디바이스의 동작 간에 Voltage Drop을 방지하였다.
- 다음은 시스템 및 전원 블록도이다.

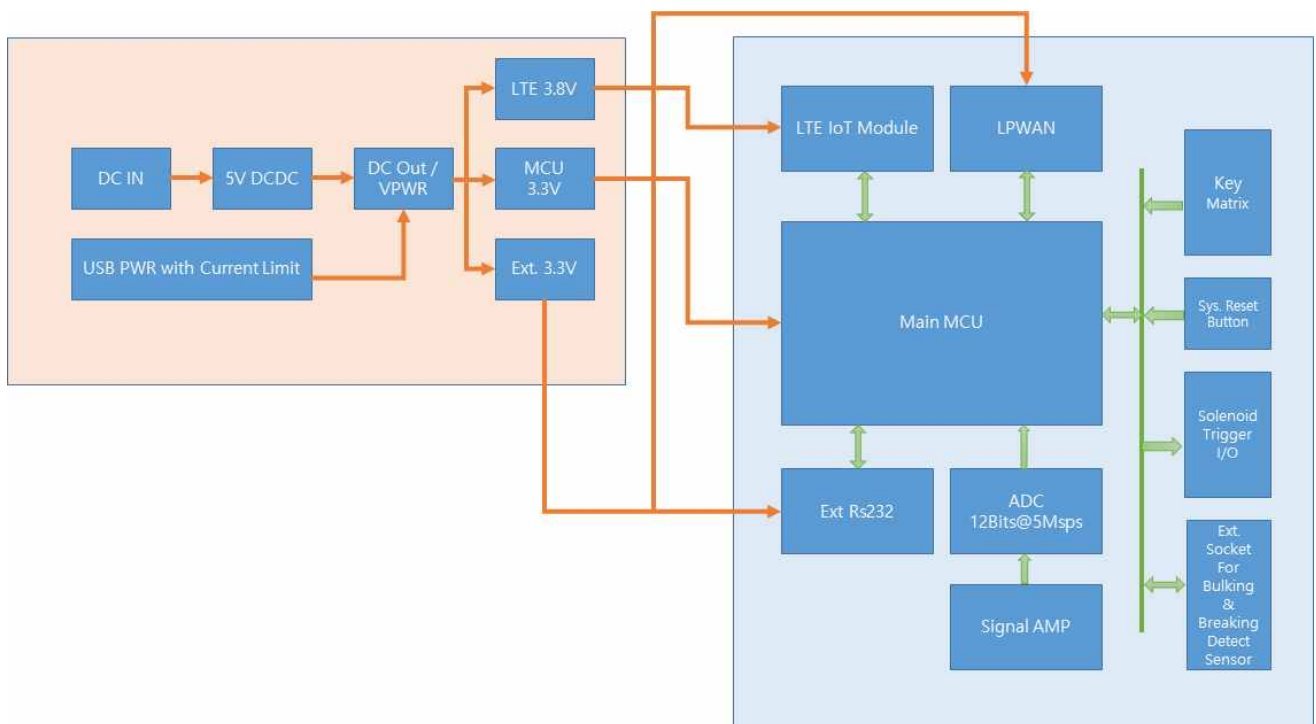


그림 2.45 시스템 및 전원 블록도

- IoT 광대역 통신 단말은 외부에 설치되고, 선로에 센서가 직접 연결된다는 특징을 가지고 있다. 이러한 특성으로 인하여 IoT 광대역 통신 단말은 전원 분리형으로 설계하고, 단말 및 배터리에 각각 외부 환경에 설치 될 수 있도록 방수 구조를 설계하였다. 특히나 단말의 경우는 이중 방수가 가능하도록 별도의 방수 설계를 하였다. 또한 선로에 센서가 직접 연결되므로, 측정을 위한 센서라인을 통한 역전위가 발생하여 보드에 직접영향을 줄 수 있으므로 외부 센서에 쉴드처리를 할 수 있도록 설계하였다.

○ 다음은 방수 및 실드 구조 컨셉이다.

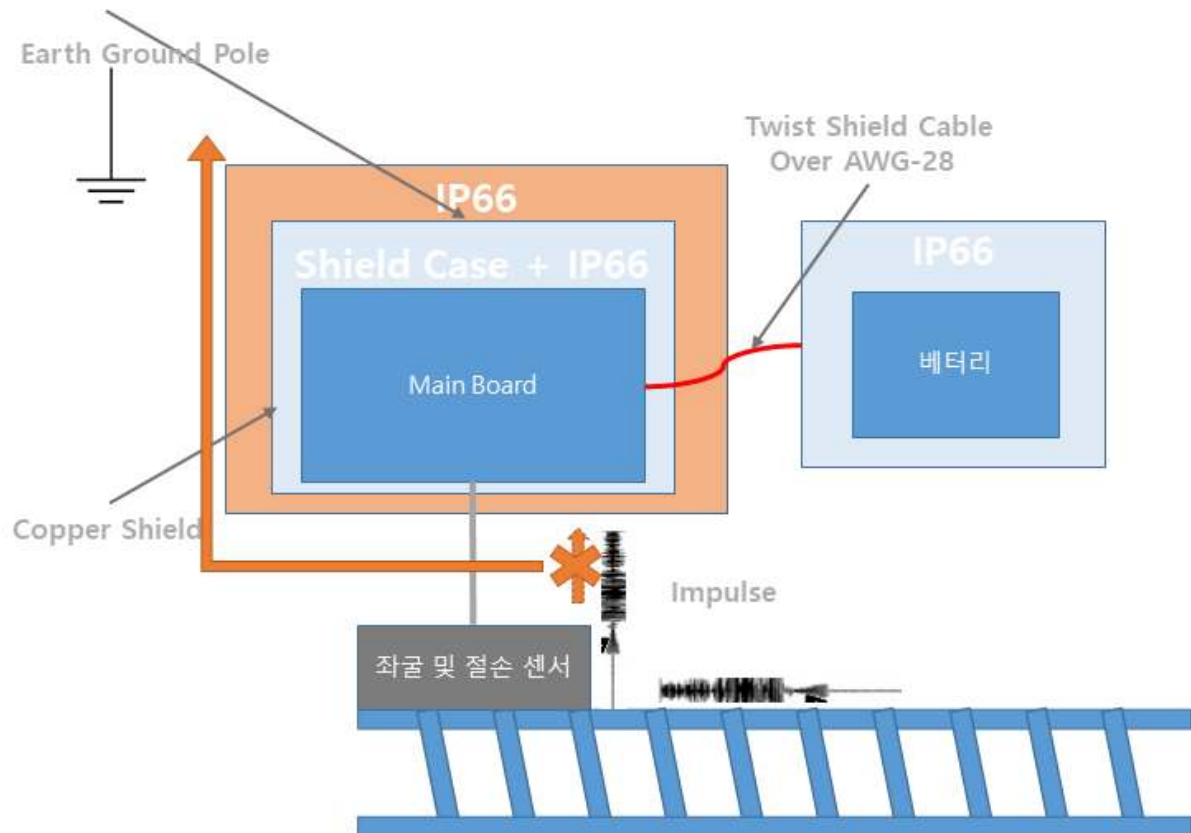


그림 2.46 방수 및 실드 구조 컨셉도

다. 광대역 IoT 통신단말 관제 플랫폼

○ 데이터 연동 설계

○ 단말과 서버의 통신을 위해 단말이 사용하는 통신 방식을 기준으로 Private과 Public 망으로 구성이 가능하다. Private 망은 Public 망에 비해 상호 데이터 연결에 유연한 함을 가지며, 외부에서 데이터를 확인할 방법이 일반적이지 않다는 장점을 가진다. 그러나, 망 구성에 있어 비용의 소요가 많으며, 광대역으로 망을 넓히기 쉽지 않다는 단점을 가진다.

○ 이에 비해 Public망은 일정 요금이 징수되기는 하나, Private망에 비해 전국에 구성되어진 통신 인프라를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다. 이에 본 과제에서는 LTE 통신방식을 사용하도록 하였다.

○ LTE는 기본적으로 최하위 단말에서 데이터를 송신할 경우 통신사 서버를 통하여 외부 서비스로 전달되어진다. 본 과제에서는 서비스를 위한 LINK를 서버를 두어 데이터를 전달 받을 수 있도록 설계하였다.

○ 다음은 서비스 흐름도를 나타낸다.

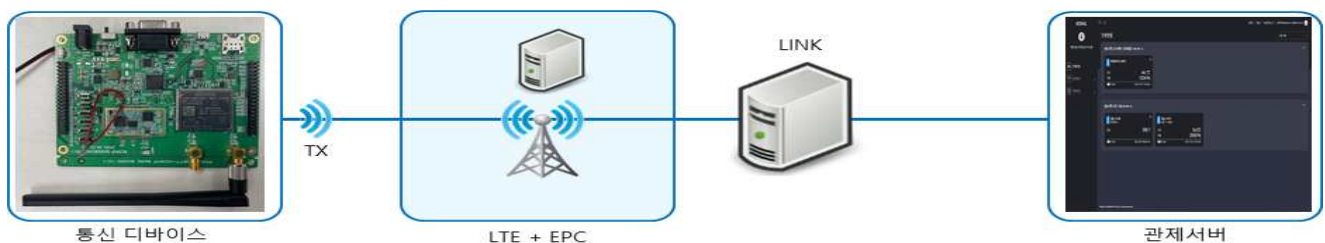


그림 2.47 서비스 흐름도

○ 디바이스에서 서버로 데이터 전달을 위한 메시지 컨트롤을 하게 되는데 이를 위해 하기와 같이 데이터 UpLink Flow를 정의하였다.

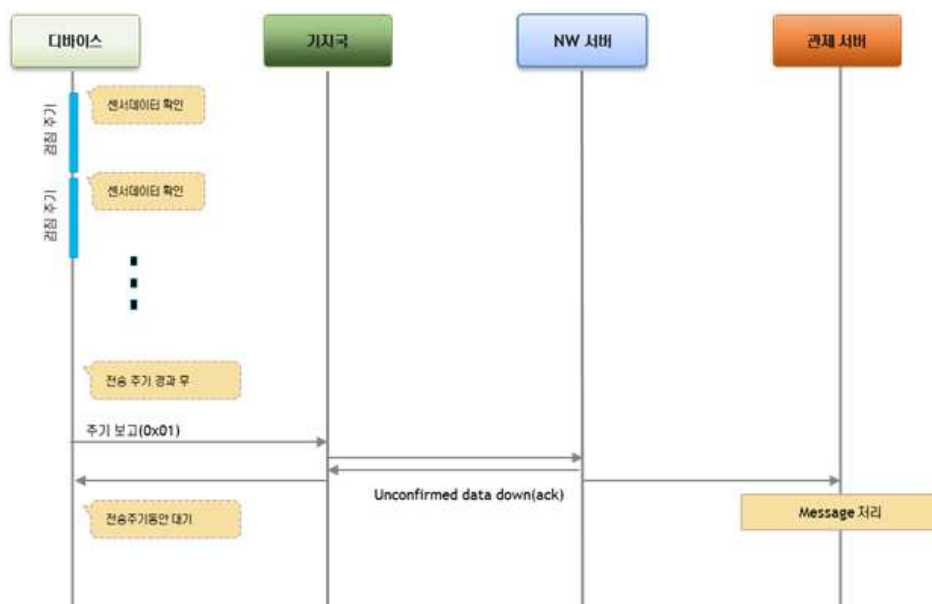


그림 2.48 데이터 UpLink Flow

- 이와 반대로 서버에서 단말의 제어를 위한 데이터 Flow도 필요하기 때문에 별개의 단말 제어 Flow를 정의하였고, DownLink Flow로 정의하였다.

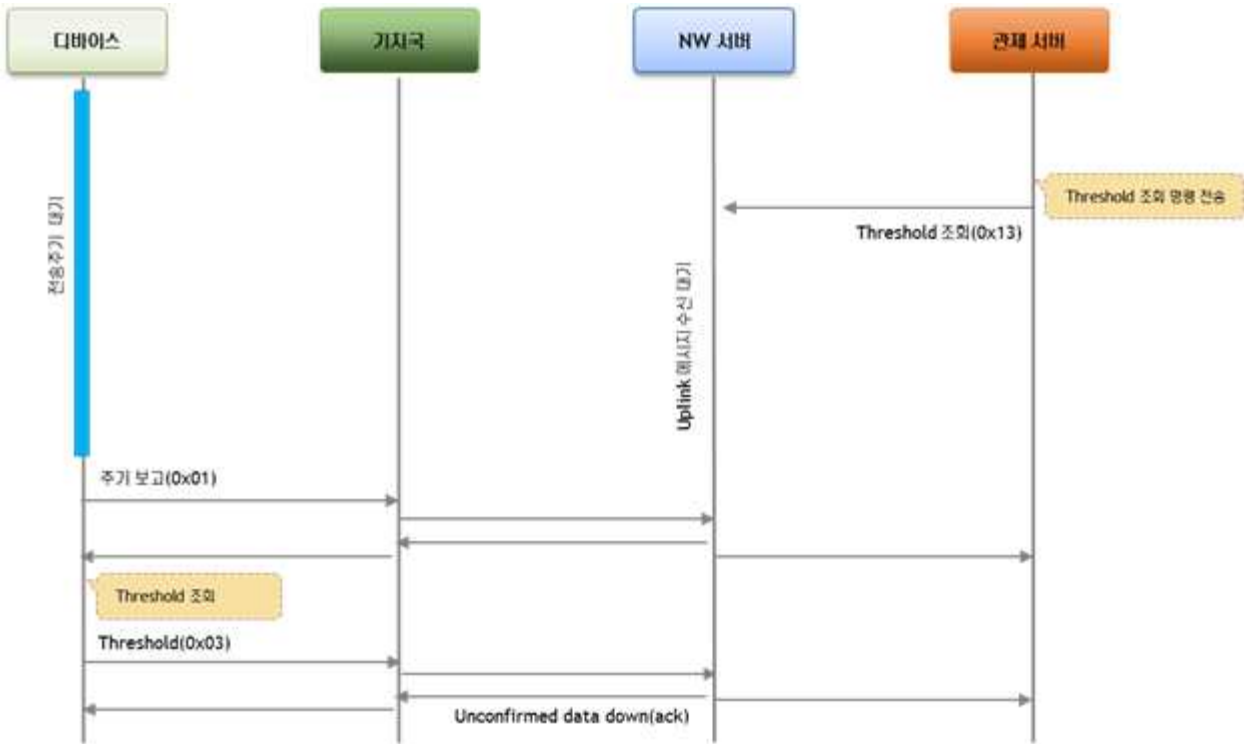


그림 2.49 데이터 DownLink Flow

- 다음은 정의된 메시지 맵이다.

표 2.2 정의된 메시지 맵

Size (Byte)	1	1	2	8	3	1	N
	Msg.Type	Msg.Ver.	Sequence No.	전송시간	Battery 전압(V)	Status Code	센서데이터

Direction	Message Type	Message
UP	0x01	주기보고
UP	0x02	이벤트
UP	0x03	Threshold 조회
UP	0x0F	제어 결과
DOWN	0x12	모드 변경
DOWN	0x13	Threshold 조회 요청
DOWN	0x14	Threshold 설정
DOWN	0x1F	제어 명령

라. 관제플랫폼

- 관제플랫폼은 단말에서 측정된 데이터를 사용자에게 최종으로 보여주기 위한 시스템이다. 관제시스템에는 LTE망으로부터 데이터를 전달받는 LINC, 단말의 데이터를 Parsing 하고 저장하도록 하는 CS, 실제 데이터를 저장하는 DB, 사용자에게 보여주기위한 WEB 및 운영 시스템으로 구성되어 하나의 서버시스템으로 역할을 수행하도록 구성된다.
- 관제시스템을 세분화하여 구성한 것은 서버의 부하를 위한 증설 및 감설에 유리하도록 설계하기 위해 구조적으로 세분화 한 것이다.
- LINC 시스템의 주역할은 하위 단말에서 들어오는 데이터가 어떠한 단말에서 오는지를 판별하고, 이를 개별 서비스를 위한 CS에 넘겨주도록 설계되어 있다. LINC 시스템은 다양한 서비스를 효율적으로 관리하기 위한 목적을 가지고 있고, 일종의 서버 앞단의 Load Balancer와 같은 역할을 수행한다.
- CS 시스템은 데이터를 수신받고, 데이터의 유효성을 판별하고, DB에 저장하도록 하는 시스템이다. 또한 CS는 WEB이 데이터를 사용자에게 보여줄 수 있도록 Parsing한 데이터를 가공하고, WEB에 필요한 정보를 별도로 가공하며, WEB 시스템에서 요청한 Query를 수행하여 데이터 전송 혹은 사용자의 요청에 의한 실제 동작을 수행한다.
- WEB 시스템은 사용자에게 정보를 제공하기 위한 시스템으로서 CS로부터 가공되어진 단말의 데이터 및 기타 정보들을 DB를 Query하여 화면에 표현하고, 사용자의 입력을 받아 CS로 명령어를 전달하는 등 사용자 운영에 필요한 동작을 수행하고, 모든 수행동작은 사용자 화면에서 보여지게 된다.
- DB는 서버운영에 필요한 모든 것을 기록하며, 주 기록 정보는 LINC가 사용하는 단말정보, CS가 요청하는 가공된 단말 데이터 등이 주가 된다.
- 본 과제에서는 개별 시스템들을 하나의 서버에 통합 설치하도록 구성하였고, 개별 서버간의 통신은 TCP와 HTTP로 Query 및 IPC 통신하도록 구성하였다.
- 다음은 서버 시스템의 사양과 서버 구성을 나타낸다.

장비명	OS	스펙	접속용 IP정보	비고
IoTPlatform(LINC)서버	centos-7.7	CPUx2, 8GB Mem, 40GB Disk MariaDB(10.1.43)	1.237.186.4	ID기반접속
CS서버 (Customer Server)				
WEB서버 (Spring Framework)				

그림 2.50 서버시스템 사양

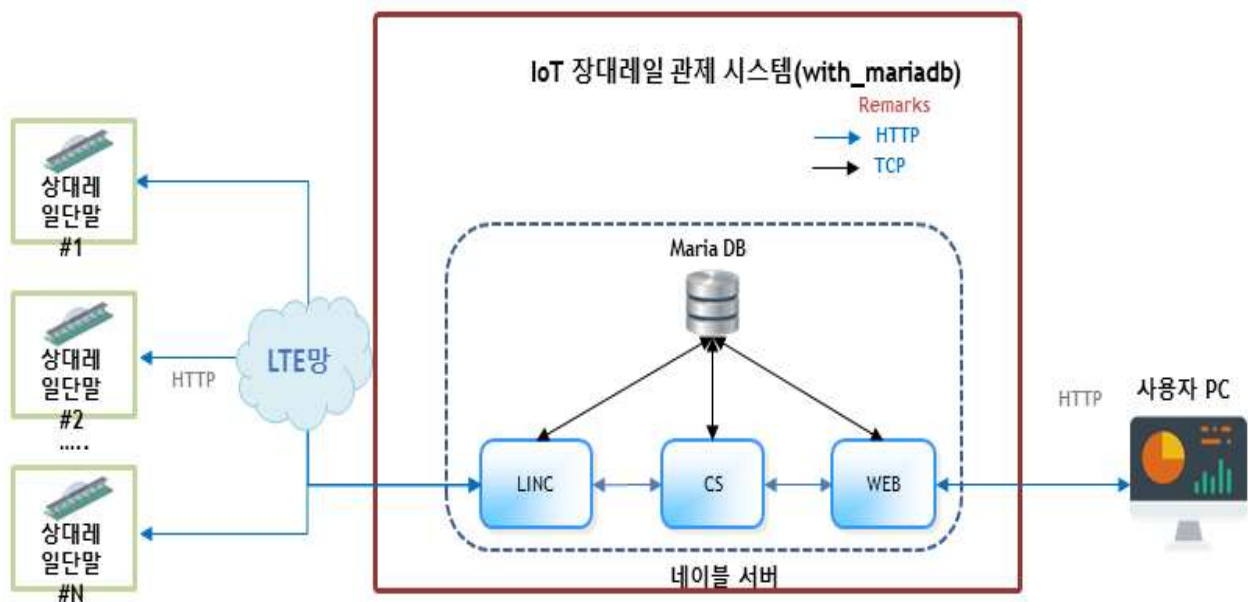


그림 2.51 서버시스템 구성

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

가. 레일변형 감지 가이드라인 제시

- 절손의 경우 아래와 같이 레일 ①부분에 타격을 가하면 레일을 따라 진동이나 탄성파가 전파되며 레일이 절손상태가 아니면 검출 센서 ②에서 탄성파 또는 진동이 검출된다. 따라서 ①과 센서부 ② 사이의 거리가 일정하므로 탄성파 또는 진동의 도달시간이 일정하기 때문에 이러한 수신신호가 설정 시간 내에 도달하면 레일의 절손이 발생하지 않았다고 판단이 가능하다.

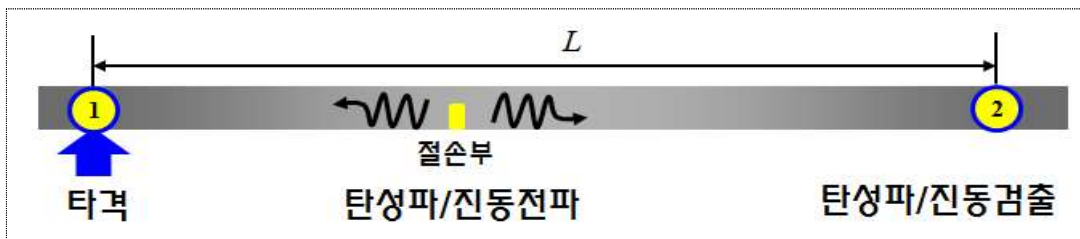


그림 3.1 탄성파 및 진동측정에 의한 레일 절손 검출원리

- 평균적으로 수신부에 들어오는 데이터 값은 일정하며, 열차운행 시 발생하는 진동 및 탄성파의 경우 솔레노이드 타격에 의해 발생하는 수치보다 매우 큰 것을 시험을 통해 알 수 있었다. 이러한 데이터를 필터하고 일정시간에 따라 반복되는 솔레노이드 타격에 의한 데이터 수치값이 발생하지 않으면 이때 절손으로 판정한다.
- 스트레인게이지를 활용한 레일 좌굴 감지의 경우 일반적으로 최고 온도시 평균적 측정된 응력 변화량 값은 비례하여 증가한다. 본 시스템의 경우 좌굴이 발생하면 사전에 미리 좌굴 발생여부를 감지할 수 있도록 개발된 시스템이기 때문에 급격하게 응력 변화량값이 크게 변화할 경우 좌굴로 판정한다.
- 스트레인 게이지 뿐만 아니라 현재 변위계를 활용한 3채널 측정 방식의 모듈을 추가 개발 중이며 레일 횡변위 값이 비정상적으로 크게 발생한 경우 좌굴로 판정한다.

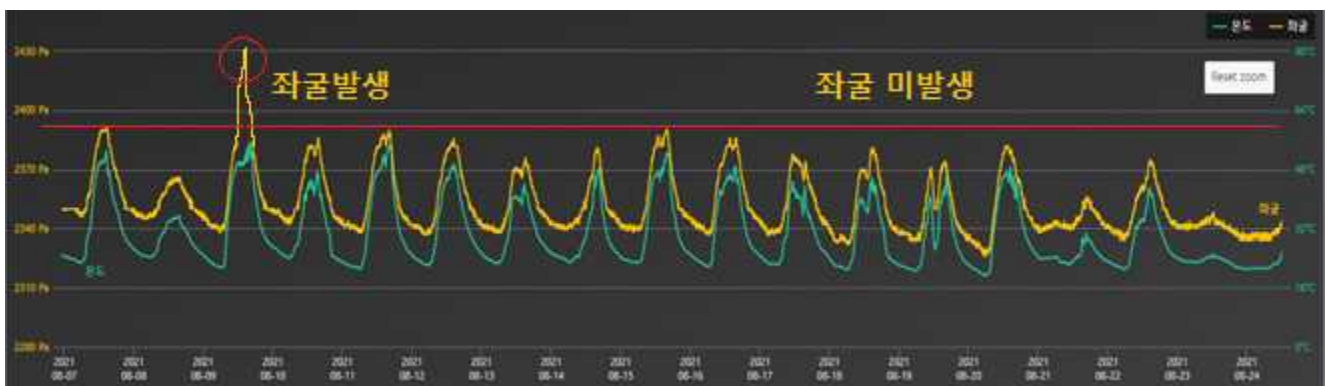


그림 3.2 좌굴 발생시 데이터 변화량 차이

나. 레일변형 센싱모듈 개발

○ 절손 검출 센서노드 제작

- 레일 절손 검출 무선 센서노드의 개념도는 그림 3.3에서 보는 바와 같다.

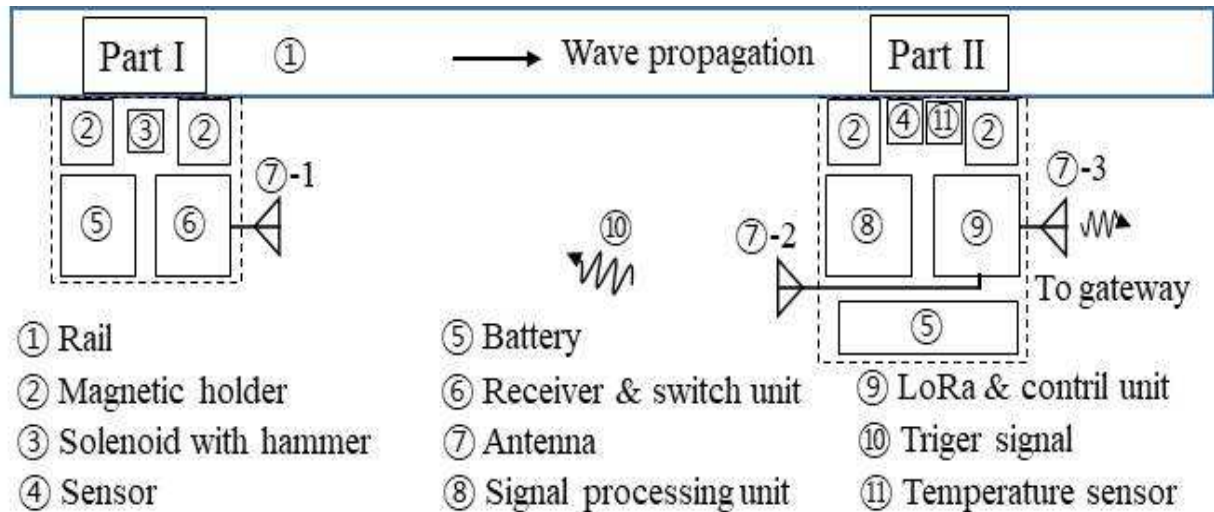


그림 3.3 절손 레일 검출을 위한 무선 센서 노드 개념

- Part I은 레일(①) 타격을 위한 장치로써 타격봉(③), 솔레노이드(③), 솔레노이드 구동 트리거 신호 수신 및 스위칭 회로(⑥), 안테나(⑦), 배터리(⑤), 장치 부착용 자석 홀더(②) 등으로 구성된다.
- Part II는 레일 타격을 위한 트리거 신호를 발신한 다음 레일을 전파하여 전달되는 탄성파를 수신하는 절손 검출센서(④), 절손 검출센서 수신신호 증폭/피크값 검출 및 레일 온도센서(⑪) 신호처리부(⑧), LoRa 통신 및 제어 유닛(⑨), 안테나(⑦) 등으로 구성된다.
- Part II의 LoRa 통신 및 제어 유닛은 내장된 마이크로프로세서에 의해 Part I의 솔레노이드 구동을 위한 트리거 신호(⑩)를 발신한다. 또한 신호처리부(⑧)의 2개 출력(절손 검출센서 피크전압 및 온도센서 출력전압)에 대한 AD변환을 수행한 다음 안테나를 통하여 그림 3.3의 게이트웨이로 전송한다.
- 레일에 탄성파를 발생시키기 위한 가진 장치 (Part I)는 솔레노이드, 타격 해머, 무선 신호 수신 및 솔레노이드 구동 회로, 배터리, 레일 고정용 자석홀더로 구성하였다. 타격 해머는 둥근 형태로 제작하여 레일 타격시 손상을 최소화하였다.
- 솔레노이드 구동을 위한 무선 트리거는 무선 주파수, 전송출력, 최대 무선 전송 거리가 각각 477 MHz, 10 mW, 약 300 m이며 절손 검출 무선 센서노드(Part II)로부터 전송된다.
- 그림 3.4은 제작된 레일 타격을 위한 무선 가진 장치와 레일에 설치된 모습을 나타낸다.



- ① Rail
- ② Magnetic holder
- ③ Solenoid
- ④ Wireless receiver
- ⑤ Battery

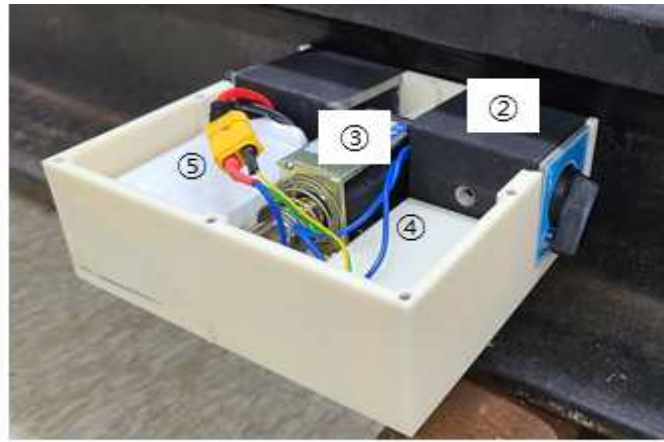


그림 3.4 무선 레일 충격 장치

- 예비실험 및 분석 결과를 토대로 레일 가진 후 전파되는 탄성파를 검출할 수 있는 압전형 센서를 제작하였다. 압전소자는 탄성파 수신 특성이 우수한 PMN-PT 단결정을 이용하였다. 그림 3.5은 제작된 절손센서 구조 레일에 부착하기 위한 자석홀더와 결합한 모습을 나타낸다.

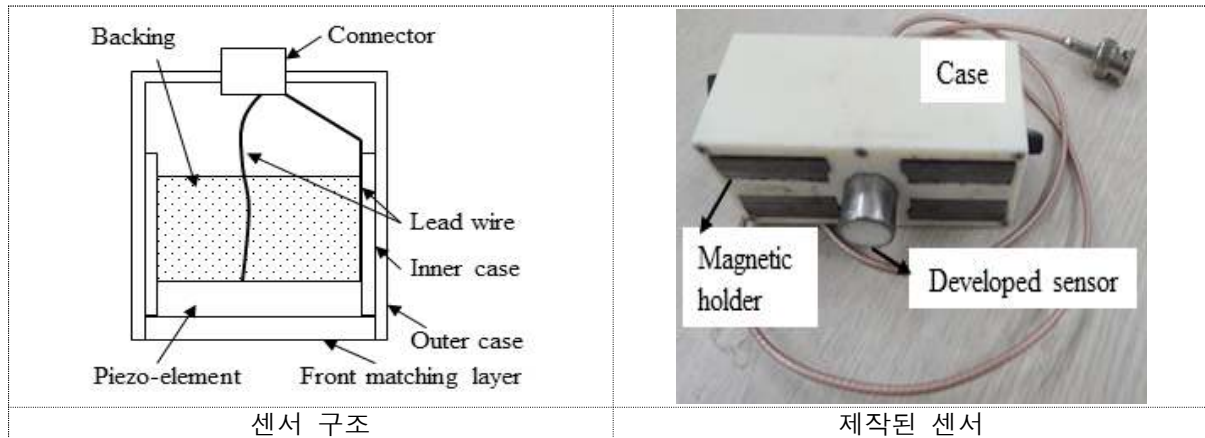


그림 3.5 레일 절손 감지 센서 개발

- 분기부 레일의 길이가 약 200 m 내외이므로 레일 가진 신호의 장거리 전파에 따라 감쇠되는 신호를 증폭하기 위하여 증폭비가 약 30dB인 신호증폭기를 설계 제작하였으며 그림 3.3의 Part II-⑧을 구성한다.

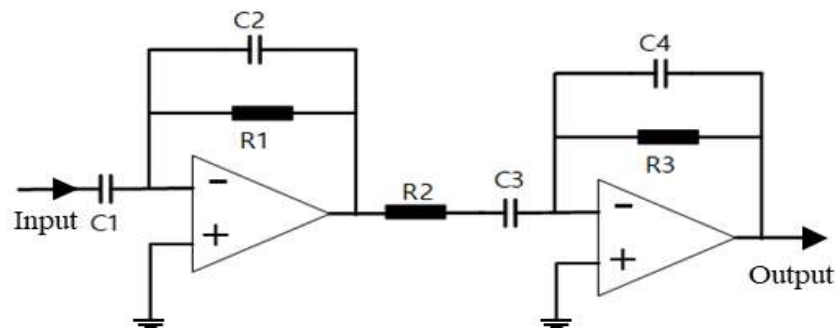


그림 3.6 개발된 센서용 신호증폭기

- 그림 3.6는 신호증폭기 출력신호에 대한 포락선 검출회로를 나타내며 그림 3.3의 Part II-⑧에 포함된다.

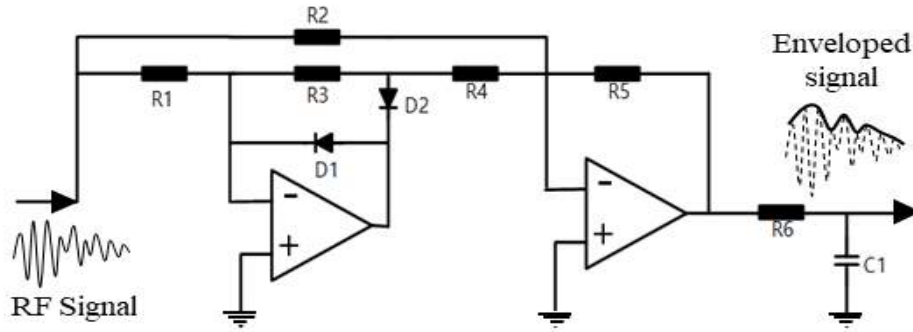


그림 3.7 RF 신호의 포락선 감지 회로

- 레일의 온도를 측정하기 위하여 T-형 써모커플을 사용하였으며 신호처리 회로는 그림 3.8에서 보는 바와 같으며 마찬가지로 그림 3.3의 Part II-⑧에 포함된다.

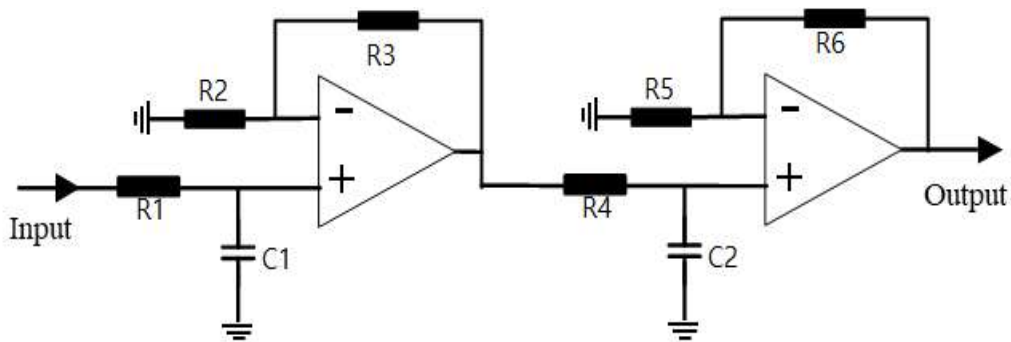


그림 3.8 온도 센서용 신호 조절 회로

- 그림 3.3의 Part II-⑧에 의해 처리된 레일 절손센서의 포락선 신호와 레일 온도에 따른 전압 검출값은 그림 3.3의 Part II-⑨의 LoRa 송신 모듈(PLM100, PLNewokrs사, 한국)의 ADC 단자에 입력되어 AD 변환된다.
- PLM100은 IEEE802.15.4(e) MAC 호환 LoRa RF모듈로써 LoRa 무선 송수신기와 이를 제어하기 위한 저전력 MCU로 구성되며 외부 센서 연동을 위한 General GPIO, 12bit-ADC 및 I2C(Inter-Integrated Circuit)를 제공한다. 또한, 호스트 MCU(CPU)와 연결을 위한 UART 인터페이스를 제공한다.
- 그림 3.9는 최종적으로 제작되어 레일에 설치된 절손 검출 무선센싱 모듈을 나타낸다.

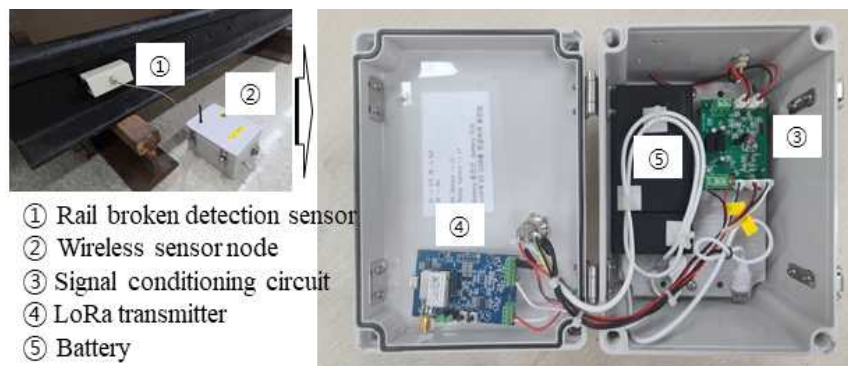


그림 3.9 절손 레일 감지용 무선 센서 노드

○ 좌굴 감지 센서노드 제작

- 스트레인 게이지가 부착된 센싱 플레이트에서 검출된 레일의 변형은 full-bridge 방법을 적용하였으며 출력단의 전압을 증폭할 수 있는 프리앰프 회로를 고려하여 그림 3.10과 같은 신호처리 회로를 구성하였다. 또한 레일 온도는 철손 센싱모듈과 마찬가지로 T-형 써모커플과 동일한 신호처리 회로로 제작하였다.

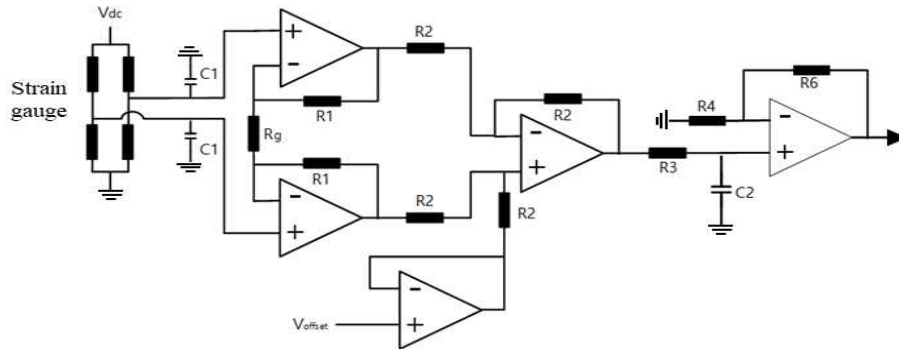


그림 3.10 스트레인 게이지용 신호 조절 회로

- 그림 3.11은 레일 좌굴 검출을 위하여 제작된 좌굴 검출 무선 센싱 노드를 나타내며 레일 변형 신호처리를 제외한 LoRa 통신 모듈 등 나머지 구성품들은 레일 철손 검출 센서노드와 동일하다. 스트레인 게이지의 프리앰프에 의해 증폭된 신호는 LoRa 통신 모듈의 MCU의 GPIO 단자에 입력되어 12bit AD 변환이 수행된다. 측정된 레일의 변형 및 온도로부터 좌굴의 발생 가능성 판단 기준은 최종 사용자가 조정할 수 있도록 하였다.

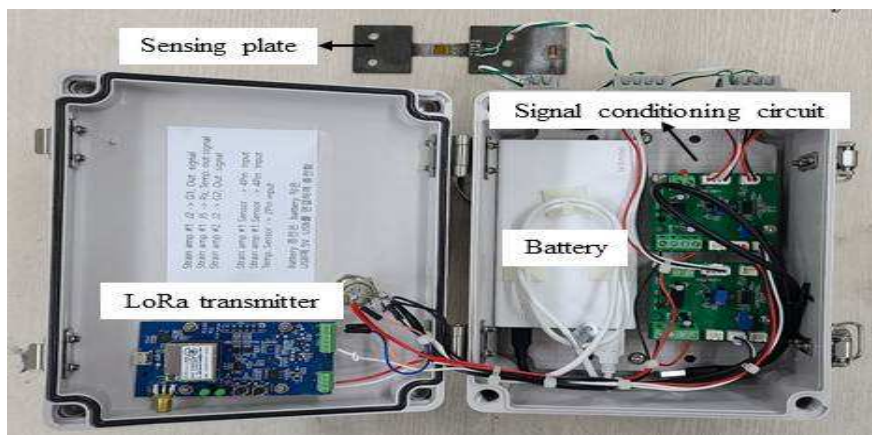


그림 3.11 레일 좌굴 감지용으로 제작된 무선 센서 노드

○ LoRa 네트워크 및 서버 제작

- 상기 제작된 철손 및 좌굴 검출용 무선센싱 노드와 LoRa DAQ는 센서에 의해 검출된 신호 (raw data)를 수신하여 철손 신호(음향탄성파)의 포락선 검출, 좌굴 신호(스트레인게이지 출력전압)의 증폭, 온도측정 신호처리를 각각 수행한 다음 LoRa 통신 모듈에 내장된 제어용 MCU에 12bit AD변환된 다음 결과값을 송신하는 무선 센싱 노드이며 송신된 각각의 신호는 그림 3.12(a)와 같은 게이트웨이를 통해 전송된다.
- 게이트웨이는 이더넷을 통해서 LoRa 네트워크 서버로 연결되며 전송된 각각의 계측 데이터들은 TCP/IP 프로토콜 위에서 동작하는 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) 메시징 서버를 통해 모니터링용 어플리케이션 서버로 전달된다.

- 웹기반 모니터링 시스템은 3.12(b)와 같은 라즈베리 파이에 탑재되어 MQTT 클라이언트와 오픈소스의 관계형 데이터베이스 관리한다.
- 시스템인 MySQL 기반으로 개발하였으며 게이트웨이의 상태, 각 센서노드에서 계측된 값을 실시간 모니터링할 수 있도록 하였다. LoRa 네트워크 및 서버는 게이트웨이 브릿지 (Gatewae Bridge), 네트워크 서버(Network Server), 어플리케이션 서버(Application Server)로 구성되며 오픈소스 기반의 ChirpStack Open Source LoRaWAN Network 서버를 기반으로 개발되었다.

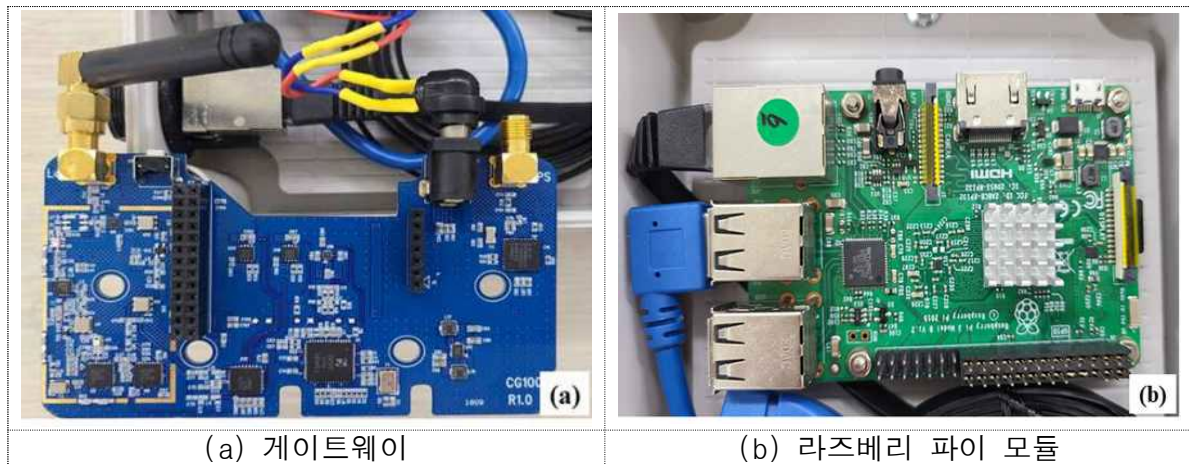


그림 3.12 무선 LoRa 통신을 위한 게이트웨이 및 라즈베리 파이 모듈

- LoRaWAN을 위한 무선통신 환경은 ISM (Industrial Scientific and Medical Band) 대역인 920~923 MHz 대역을 사용하였으며 채널, 대역폭, 최대 출력 등은 LoRa Alliance의 KR920-923 Regional Parameter에 제시된 기준을 만족하도록 하였다. 그림 3.13은 철도공사 대전역 구내에 설치되어 시험한 개발된 레일 절손 및 좌굴 모니터링을 위한 사용자 인터페이스를 나타낸다.

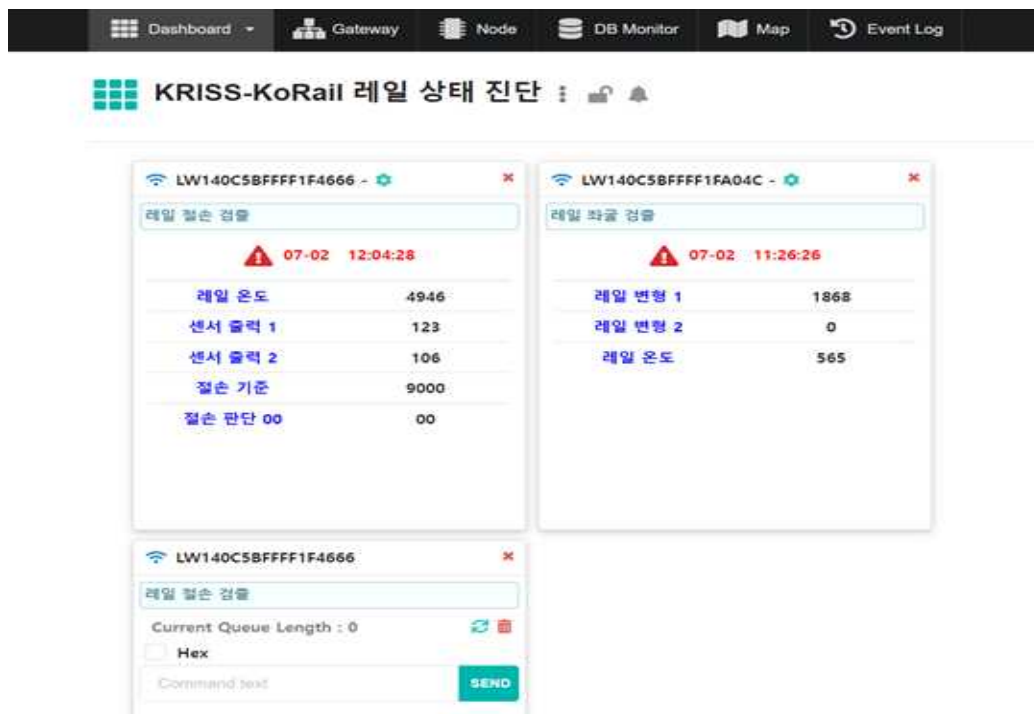


그림 3.13 무선 철도 모니터링 시스템을 위한 사용자 인터페이스

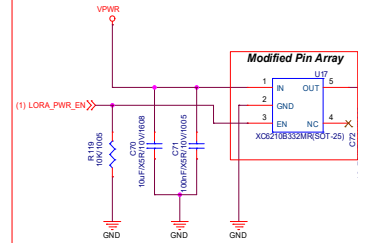
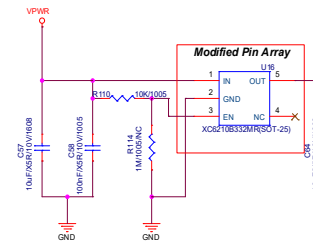
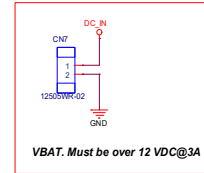
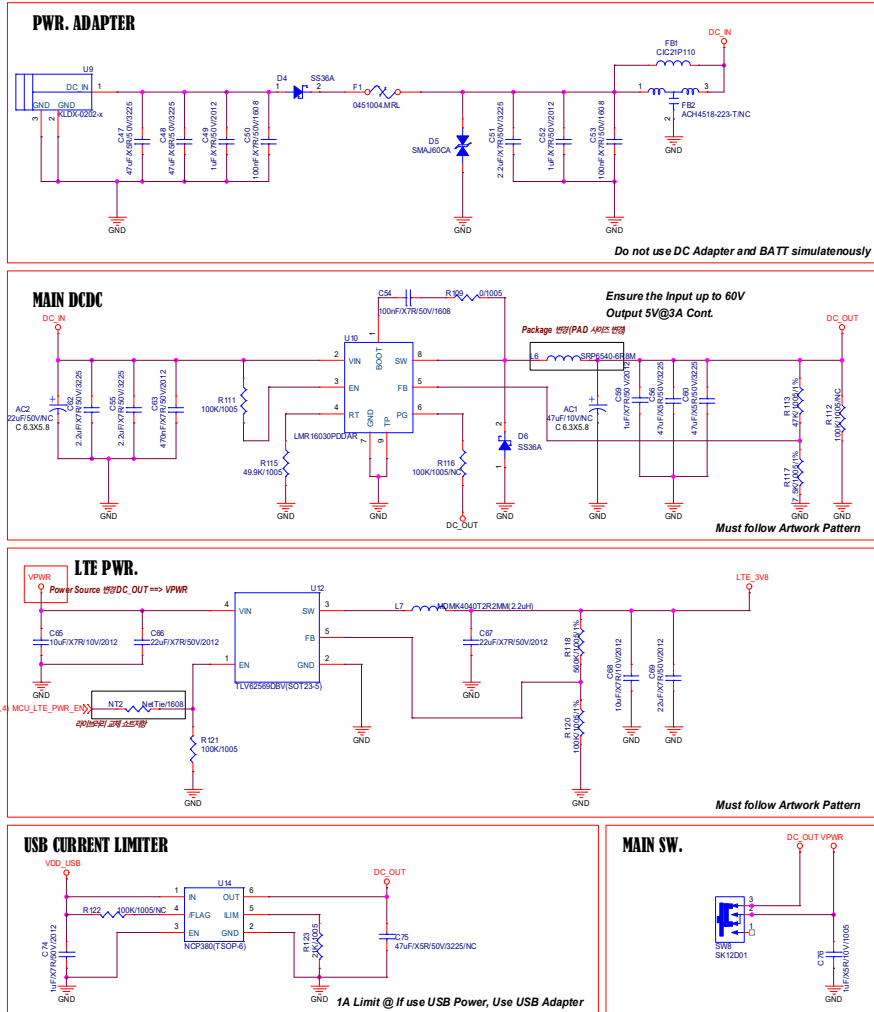


그림 3.18 Power 설계

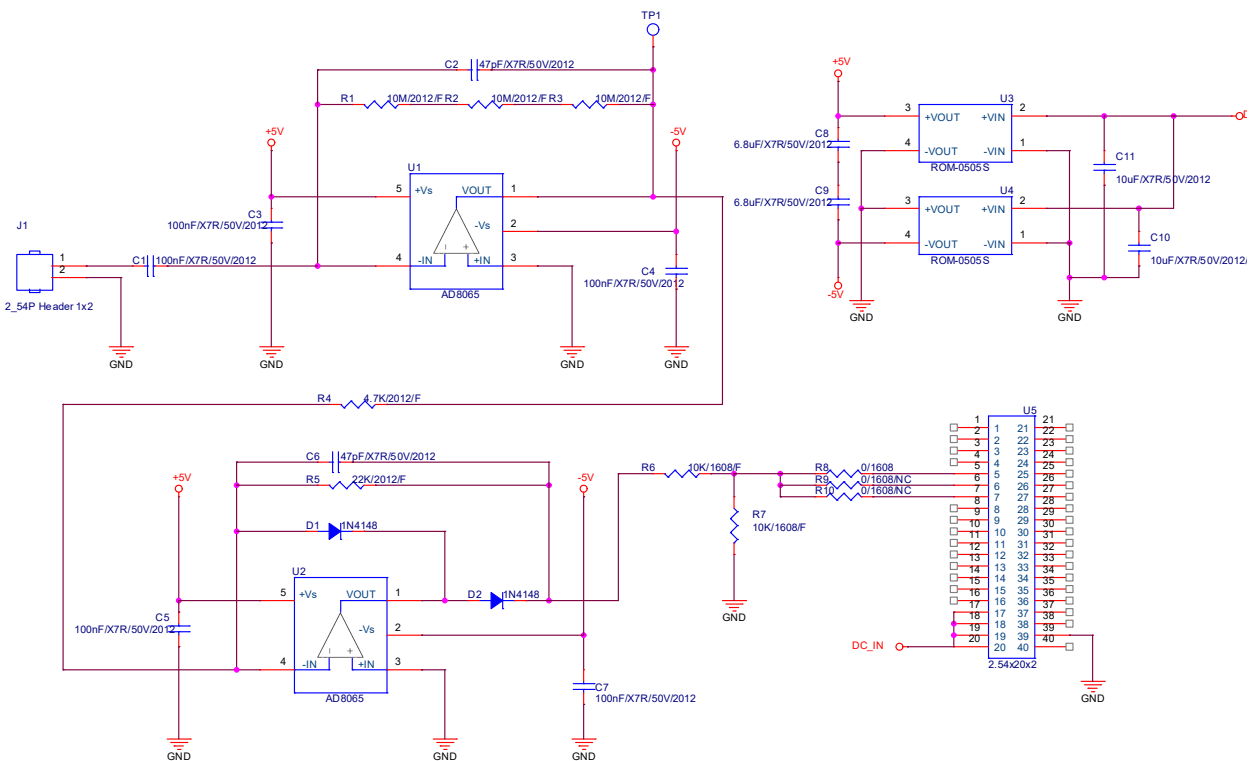
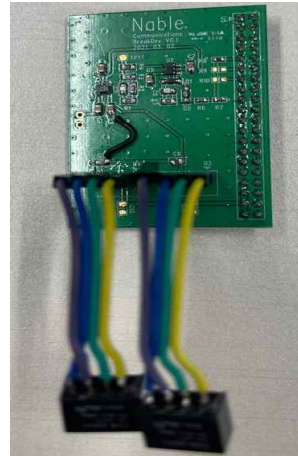


그림 3.19 Sensor Signal 증폭 회로

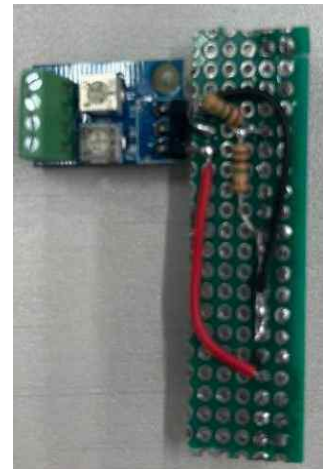
- 다음은 개발된 IoT 광대역 통신단말 시제품이다.



광대역 통신 단말 통신 및 측정부



Sensor Signal 증폭부



절손센서 인터페이스부

그림 3.20 IoT 광대역 통신단말 시제품

표3.1 IoT광대역 통신단말 사양

항목	사양
MCU	ARM Cortex-M4 @ 80MHz
전원	외부 전원 : DC 4.3 ~ 24V / USB Power
통신 인터페이스	RS-232(422, 485) USB 2.0 FS(Host/Device) I2C, SPI
센서 인터페이스	12Bits@5Msps ADC x3 Channel Solenoid Trigger

○ 보드 케이스 및 외부 함체 설계

- 본 과제에서는 설치 환경에 영향을 덜 받기 위해 보드 케이스 및 함체에 방수 설계를 진행하였다.

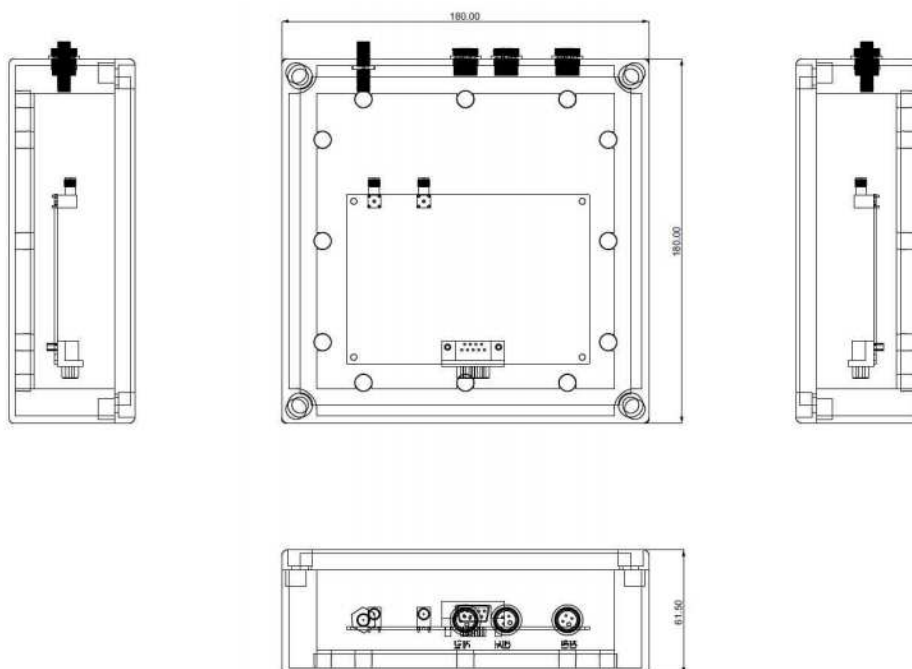


그림 3.21 보드 케이스 설계도면

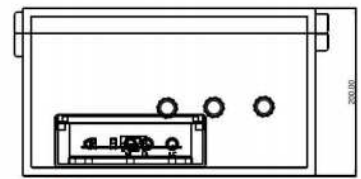
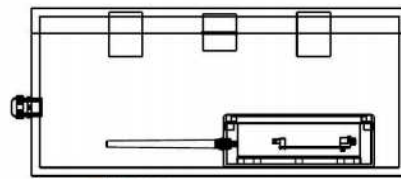
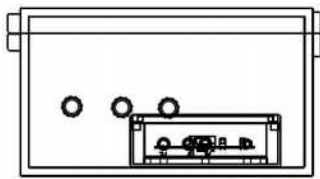
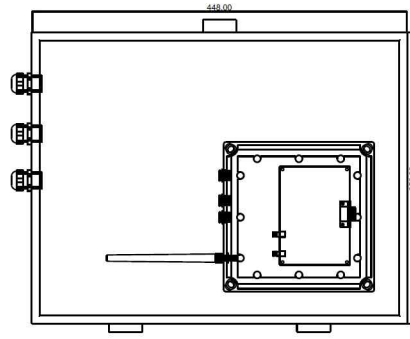


그림 3.22 외부 함체 설계도면

○ 멀티밴드 안테나

- 본 과제에서는 광대역통신을 위해 LTE를 사용한다. 이를 위해 본 과제에서는 멀티밴드 안테나를 제작하였다. 멀티밴드 안테나 제작사양은 다음과 같다.

표 3.2 멀티밴드 안테나 사양

No.	ELECTRICAL DATA	SPECIFICATIONS		REMARK
5. 1	FREQUENCY RANGE	800 ~ 960 MHz		
		1448 ~ 1880 MHz		
		1920 ~ 2700 MHz		
5. 2	IMPEDANCE	50 Ω NOMINAL		
5. 3	V. S. W. R	800~960 MHz	LESS THAN 1:5.0	
		1448~1880 MHz	LESS THAN 1:3.0	
		1920~2700 MHz	LESS THAN 1:3.0	
5. 4	GAIN(Min)	800~960 MHz	-1.1 dBi	
		1448~1880 MHz	2.4 dBi	
		1920~2700 MHz	2.6 dBi	
5. 5	RADIATION PATTERN	OMNI - DIRECTIONAL		
5. 6	POLARIZATION	VERTICAL		

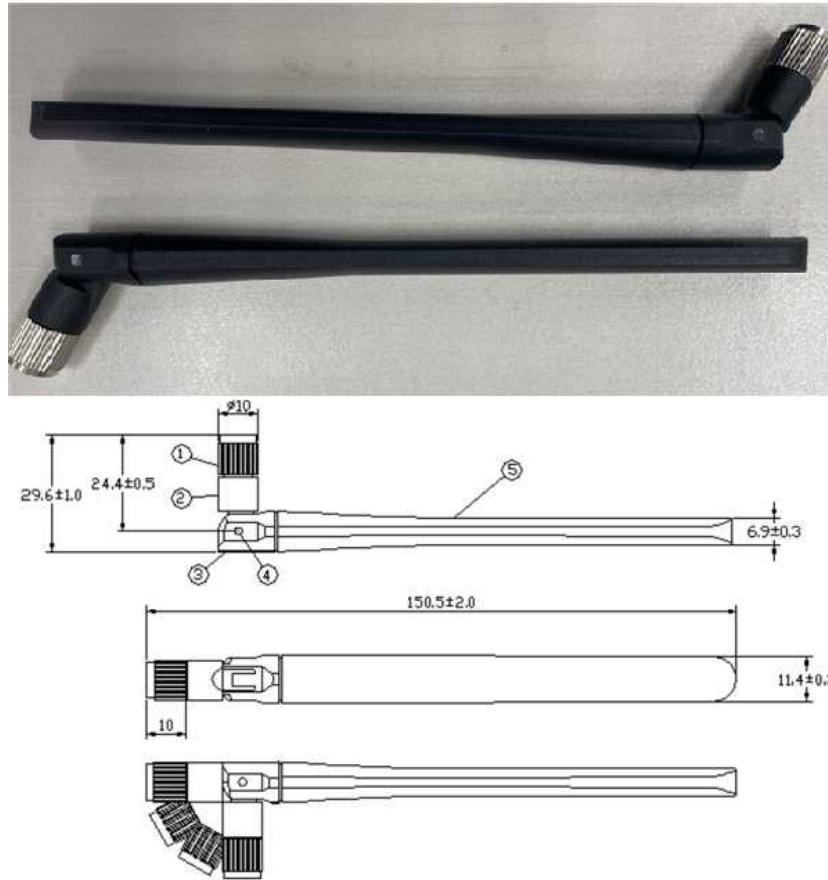


그림 3.23 안테나 시제품 및 설계도면

- 다음은 주파수별 VSWR 측정 결과이다.

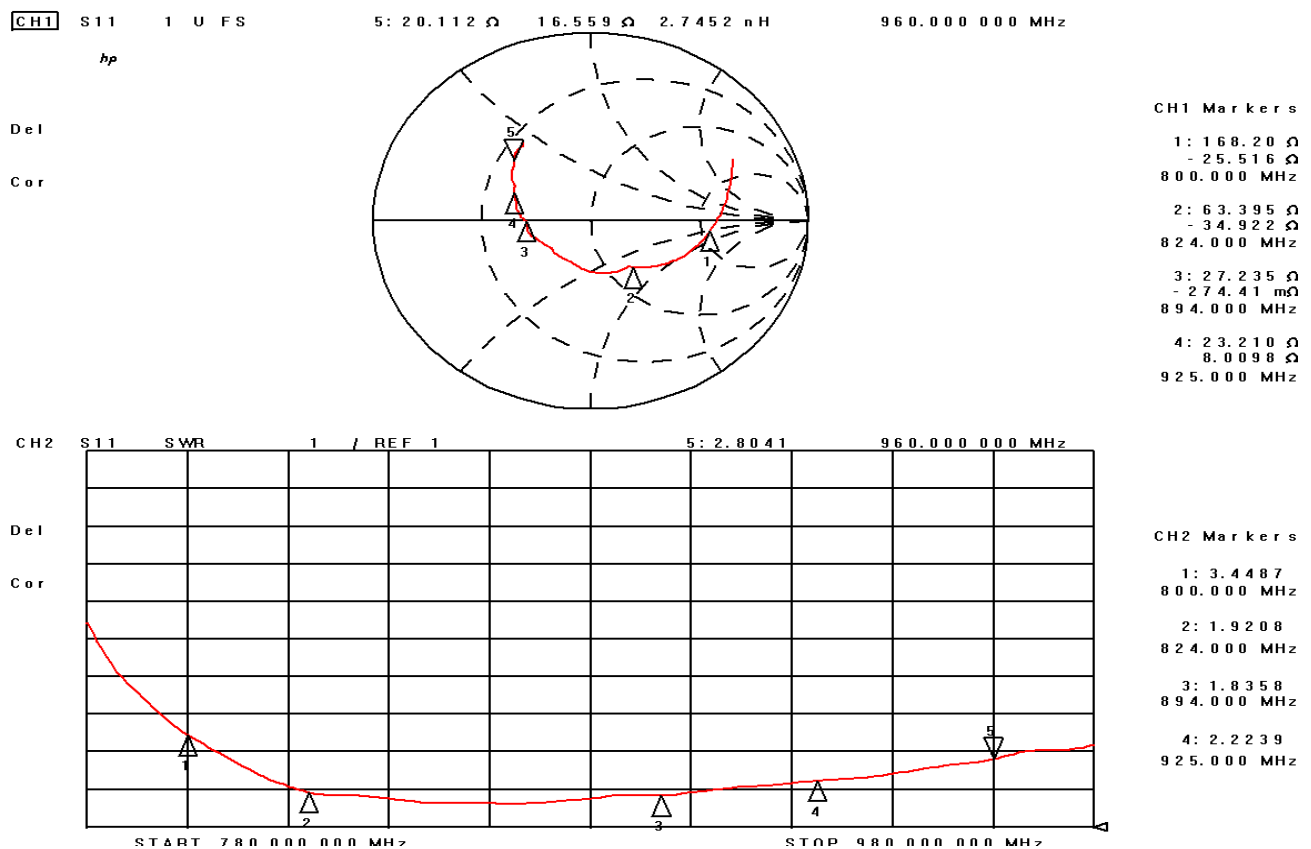


그림 3.24 VSWR 800Mhz ~ 960Mhz

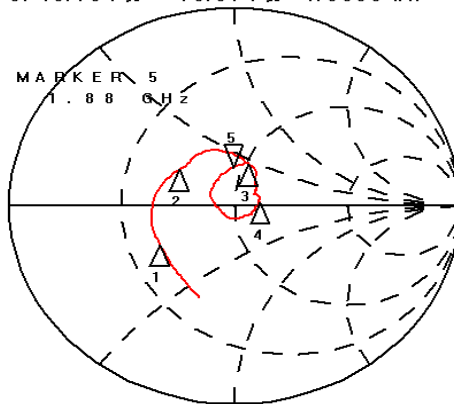
CH1 S11 1 U FS 5: 46.164 Ω 18.674 Ω 1.5809 nH 1 880.000 000 MHz

hp

Del

Cor

↑



CH1 Markers

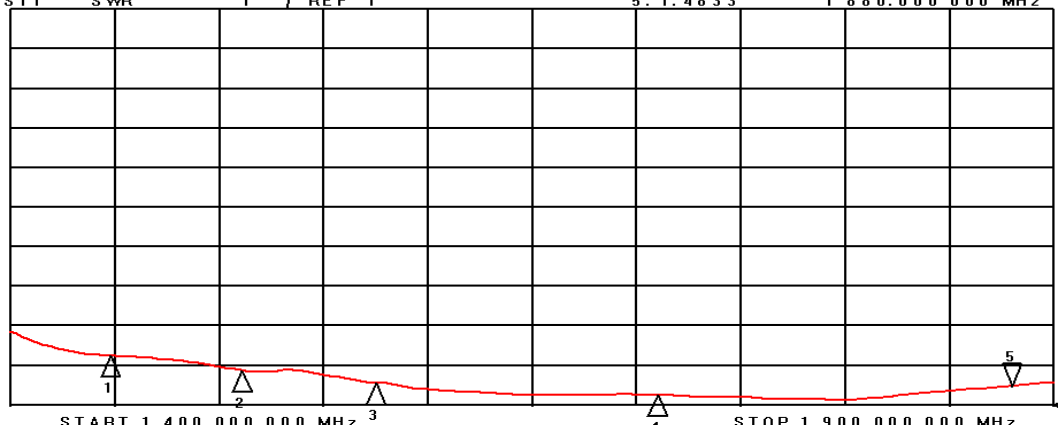
1: 23.526 Ω
- 10.823 Ω
1.44800 GHz
2: 28.763 Ω
11.603 Ω
1.51100 GHz
3: 51.422 Ω
22.633 Ω
1.57500 GHz
4: 62.607 Ω
2.3203 Ω
1.71000 GHz

CH2 S11 SWR 1 / REF 1 5: 1.4833 1 880.000 000 MHz

Del

Cor

↑



CH2 Markers

1: 2.2512
1.44800 GHz
2: 1.8737
1.51100 GHz
3: 1.5584
1.57500 GHz
4: 1.2569
1.71000 GHz

그림 3.25 VSWR 1448Mhz ~ 1880Mhz

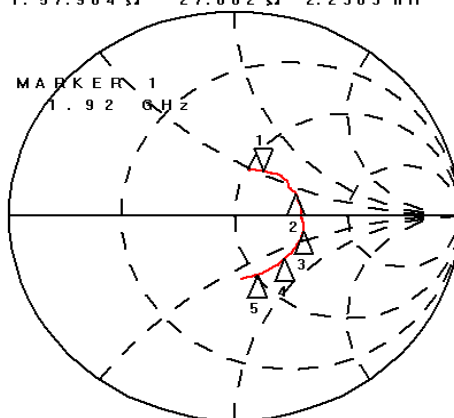
CH1 S11 1 U FS 1: 57.984 Ω 27.002 Ω 2.2383 nH 1 920.000 000 MHz

hp

Del

Cor

↑



CH1 Markers

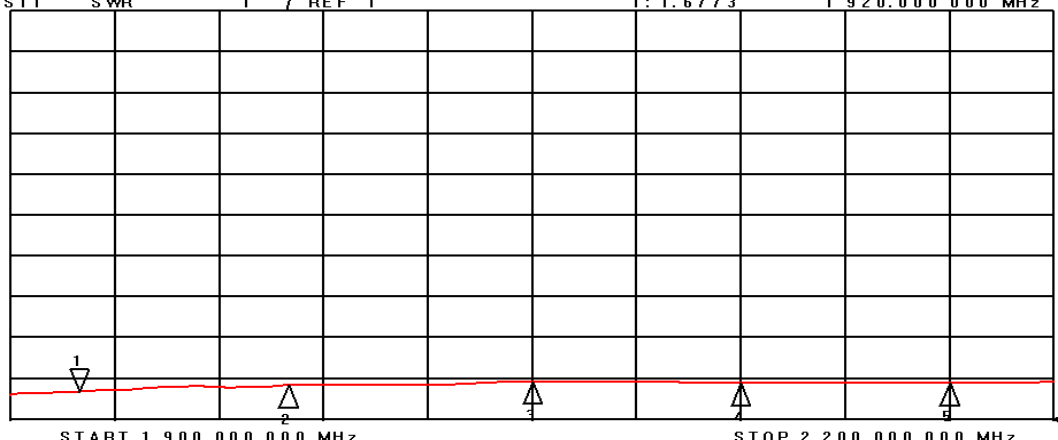
2: 84.340 Ω
20.203 Ω
1.98000 GHz
3: 92.531 Ω
- 15.852 Ω
2.05000 GHz
4: 69.828 Ω
- 32.402 Ω
2.11000 GHz
5: 50.715 Ω
- 32.482 Ω
2.17000 GHz

CH2 S11 SWR 1 / REF 1 1: 1.6773 1 920.000 000 MHz

Del

Cor

↑



CH2 Markers

2: 1.8300
1.98000 GHz
3: 1.9260
2.05000 GHz
4: 1.8821
2.11000 GHz
5: 1.8862
2.17000 GHz

그림 3.26 VSWR 1920Mhz ~ 2170Mhz

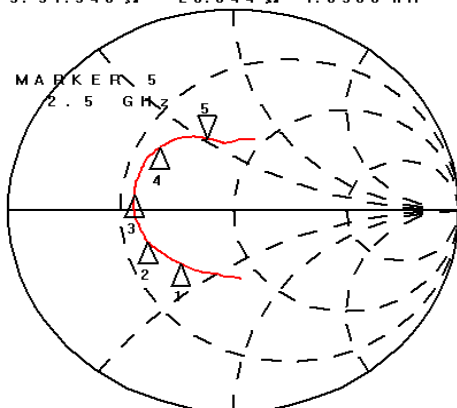
CH1 S11 1 U FS 5: 31.348 Ω 26.044 Ω 1.6580 nH 2 500.000 000 MHz

hp

Del

Cor

f



CH1 Markers

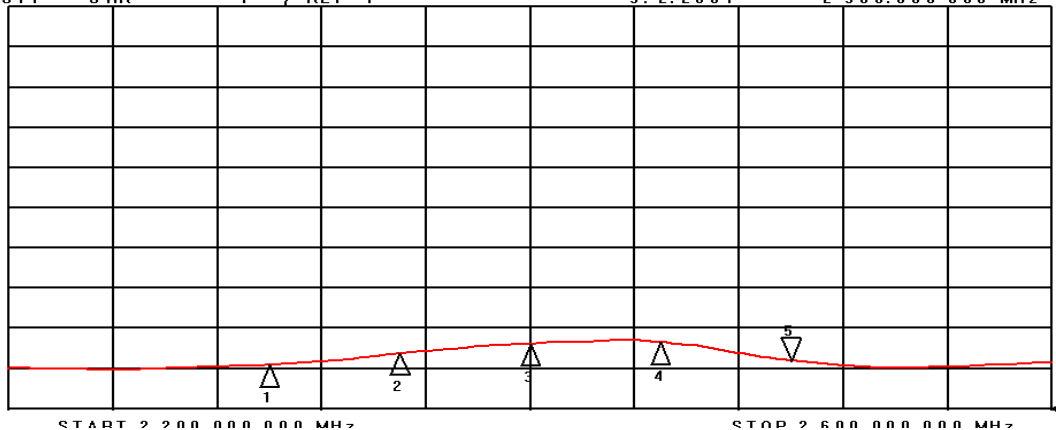
1: 27.507 Ω
- 16.667 Ω
2.30000 GHz
2: 21.657 Ω
- 8.0430 Ω
2.35000 GHz
3: 19.253 Ω
3.5576 Ω
2.40000 GHz
4: 21.466 Ω
16.813 Ω
2.45000 GHz

CH2 S11 SWR 1 / REF 1 5: 2.2001 2 500.000 000 MHz

Del

Cor

f



CH2 Markers

1: 2.0917
2.30000 GHz
2: 2.3815
2.35000 GHz
3: 2.6123
2.40000 GHz
4: 2.6433
2.45000 GHz

그림 3.27 VSWR 2300Mhz~2500Mhz

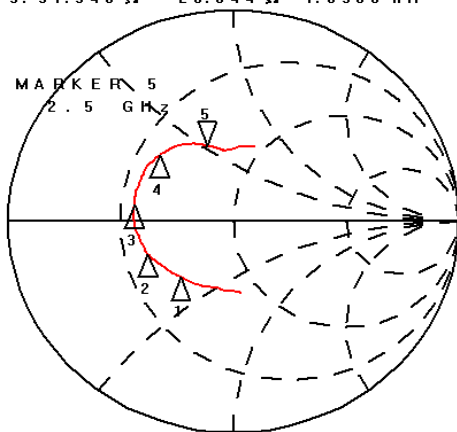
CH1 S11 1 U FS 5: 31.348 Ω 26.044 Ω 1.6580 nH 2 500.000 000 MHz

hp

Del

Cor

f



CH1 Markers

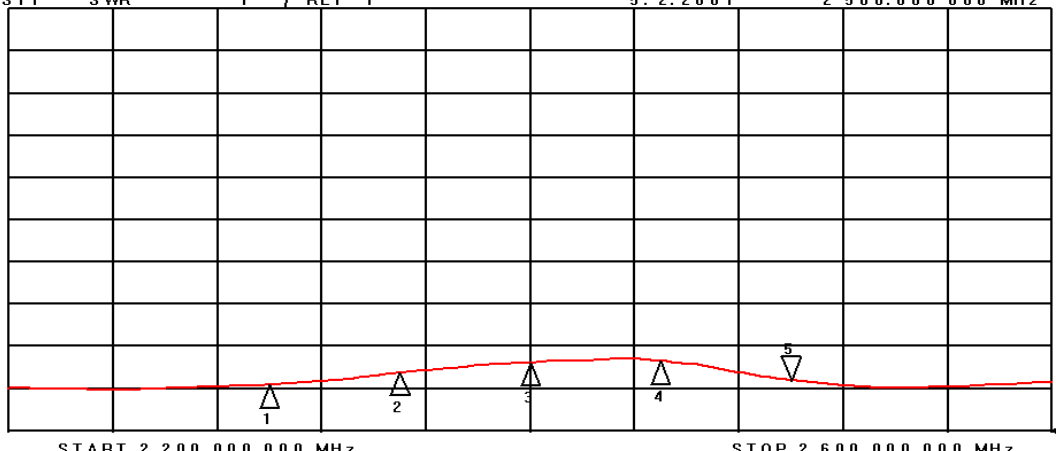
1: 27.507 Ω
- 16.667 Ω
2.30000 GHz
2: 21.657 Ω
- 8.0430 Ω
2.35000 GHz
3: 19.253 Ω
3.5576 Ω
2.40000 GHz
4: 21.466 Ω
16.813 Ω
2.45000 GHz

CH2 S11 SWR 1 / REF 1 5: 2.2001 2 500.000 000 MHz

Del

Cor

f



CH2 Markers

1: 2.0917
2.30000 GHz
2: 2.3815
2.35000 GHz
3: 2.6123
2.40000 GHz
4: 2.6433
2.45000 GHz

그림 3.28 VSWR 2500Mhz ~ 2700Mhz

- 다음은 주파수별 3D 방사 Gain 측정결과이다.



그림 3.29 방사패턴 800Mhz ~ 960Mhz



그림 3.30 방사패턴 1448Mhz ~ 1576Mhz



그림 3.31 방사패턴 1710Mhz ~ 1880Mhz



그림 3.32 방사패턴 1920Mhz ~ 2170Mhz



그림 3.33 방사패턴 2300Mhz ~ 2400Mhz



그림 3.34 방사패턴 2500Mhz ~ 2700Mhz

○ 레일변형 센서 시험

① ADC 정확도 시험

- 좌굴 및 절손도를 측정하기 위해 ADC를 사용한다. ADC는 2.5V, 12Bits@5MSPS 측정이 가능하며, ADC가 부정확하게되면, 센서 측정값에 오류가 발생하게 되므로, 정확도에 대한 시험을 진행하였고, 정전압 기준 테스트, 캐패시터 및 분배저항 등을 추가하여 테스트를 진행하였고, 정확도를 위해 1번의 센싱을 위해 1,000번의 ADC 데이터를 획득하였고, 상,하위의 일정한 트림으로 정확도를 높이도록 하였다.
- 해당 시험을 통해 정전압 기준의 오차는 최대 20mV내외였고, 분배저항을 거칠 경우, 저항의 오차가 1%를 사용하더라도 200mV내외의 오차를 발생하는데, 캐패시터 여부에 따라 오차 범위가 다르다는 것을 알 수 있었다. 또한, 이러한 오차가 전압간 일정하게 발생하므로, 측정 오차만큼 보상하여 센싱하고 원하는 결과를 획득하는데 문제가 없음을 알게 되었다.

표 3.3 1V 정전압 측정 결과

구분	1,000mV				
	1차 측정	2차 측정	3차 측정	4차 측정	5차 측정
1000회 측정 평균	1654.3	1654.7	1655.2	1654.2	1654.9
상/하위 10% Trim	1655.0	1654.6	1655.8	1655.0	1655.1
상/하위 20% Trim	1655.2	1654.7	1655.8	1655.2	1655.1
상/하위 30% Trim	1655.2	1654.6	1656.0	1655.2	1655.2
상/하위 40% Trim	1655.3	1654.7	1656.0	1655.4	1655.4
측정간 오차 상/하위 10% Trim	-0.35	-0.48	0.97	-0.71	1.28
측정간 오차 상/하위 20% Trim	0.42	-1.20	0.81	-0.14	0.74
측정간 오차 상/하위 30% Trim	0.50	-1.13	0.62	0.08	0.73
측정간 오차 상/하위 40% Trim	0.59	-1.37	0.72	0.05	0.95
전압환산	1009.563	1009.307	1010.036	1009.539	1009.625
인가전압대비 오차	9.562963	9.306762	10.03571	9.539325	9.625487

표 3.4 1.75V 전압 측정 결과

구분	1,000mV				
	1차 측정	2차 측정	3차 측정	4차 측정	5차 측정
1000회 측정 평균	2898.5	2898.6	2897.9	2900.0	2899.4
상/하위 10% Trim	2899.3	2899.3	2899.0	2900.0	2899.7
상/하위 20% Trim	2899.6	2899.5	2899.1	2900.1	2899.8
상/하위 30% Trim	2899.6	2899.4	2899.0	2900.2	2899.6
상/하위 40% Trim	2899.4	2899.2	2898.7	2900.3	2899.5
측정간 오차 상/하위 10% Trim	-0.09	0.73	-2.13	0.57	-0.17
측정간 오차 상/하위 20% Trim	-0.03	0.34	-1.01	0.30	0.42
측정간 오차 상/하위 30% Trim	0.04	0.48	-1.00	0.29	0.59
측정간 오차 상/하위 40% Trim	0.14	0.47	-1.25	0.59	0.62
전압환산	1768.576	1768.594	1768.385	1768.998	1768.815
인가전압대비 오차	18.57605	18.59435	18.38542	18.99847	18.81548

표 3.5 2.5V(1.25V) None Cap 측정결과

구분	2.5V (전압분배 1.25V, None-Cap)				
	1차 측정	2차 측정	3차 측정	4차 측정	5차 측정
1000회 측정 평균	1671.7	1668.9	1668.2	1666.4	1663.5
상/하위 10% Trim	1671.9	1669.5	1668.7	1666.8	1663.8
상/하위 20% Trim	1672.3	1669.8	1669.0	1667.1	1664.1
상/하위 30% Trim	1672.5	1670.0	1669.3	1667.3	1664.3
상/하위 40% Trim	1672.6	1670.1	1669.5	1667.7	1664.3
측정간 오차 상/하위 10% Trim	2.74	0.76	1.78	2.94	-0.11
측정간 오차 상/하위 20% Trim	2.48	0.74	1.88	3.05	-0.30
측정간 오차 상/하위 30% Trim	2.52	0.76	1.90	3.06	-0.41
측정간 오차 상/하위 40% Trim	2.45	0.76	1.92	3.01	-0.39
전압환산	1019.9	1018.4	1017.9	1016.8	1014.9
인가전압대비 오차	-230.12	-231.63	-232.08	-233.23	-235.09

표 3.6 2.5V(1.25V) 10pF 측정결과

구분	2.5V (전압분배 1.25V, 10pF)				
	1차 측정	2차 측정	3차 측정	4차 측정	5차 측정
1000회 측정 평균	1786.7	1785.8	1787.4	1785.9	1786.7
상/하위 10% Trim	1786.7	1785.8	1787.4	1785.9	1786.7
상/하위 20% Trim	1786.7	1785.8	1787.4	1785.9	1786.7
상/하위 30% Trim	1786.7	1785.8	1787.4	1785.9	1786.7
상/하위 40% Trim	1786.7	1785.8	1787.4	1786.0	1786.8
측정간 오차 상/하위 10% Trim	0.91	-1.61	1.47	-0.80	1.44
측정간 오차 상/하위 20% Trim	0.91	-1.61	1.47	-0.80	1.44
측정간 오차 상/하위 30% Trim	0.91	-1.61	1.48	-0.80	1.44
측정간 오차 상/하위 40% Trim	0.91	-1.61	1.48	-0.80	1.44
전압환산	1089.881	1089.323	1090.307	1089.408	1089.896
인가전압대비 오차	-160.119	-160.677	-159.693	-160.592	-160.104

② 좌굴 및 절손 센서 시험

- 좌굴 및 절손센서 시험을 위해 시험개소의 선로에 설치하여 시리얼로그와 서버로 데이터를 획득하였다.
- 시험을 통해 절손의 경우, 데이터 획득에 문제가 없음을 확인하였고, 좌굴은 센서 설치 위치와 밀착 여부에 따라 정상데이터 획득이 되지 않는 것을 확인하였다.
- 하기는 시험 시료에 사용된 센서, 측정보드 및 외부 함체이다.

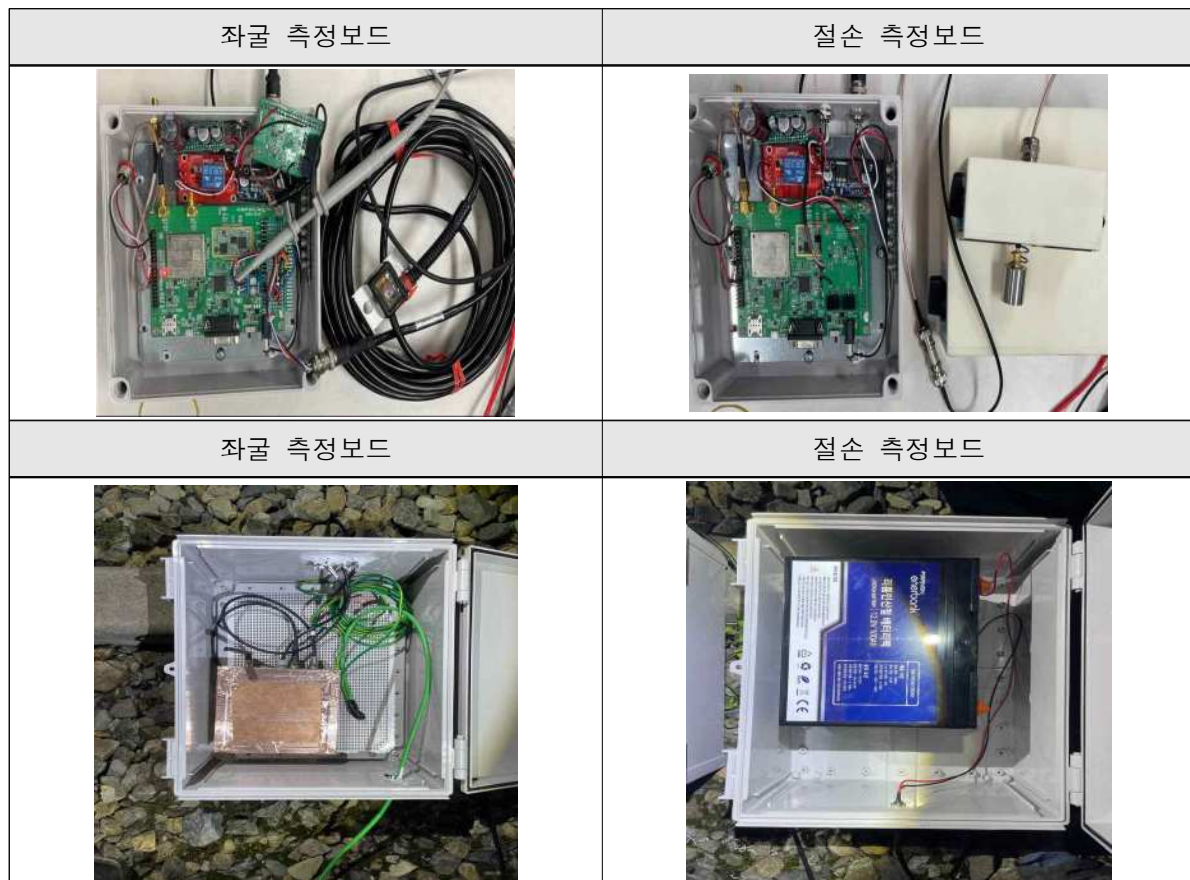


그림 3.35 시험시료

- 하기는 시험을 위해 현장에 시험 설치한 현황이다.

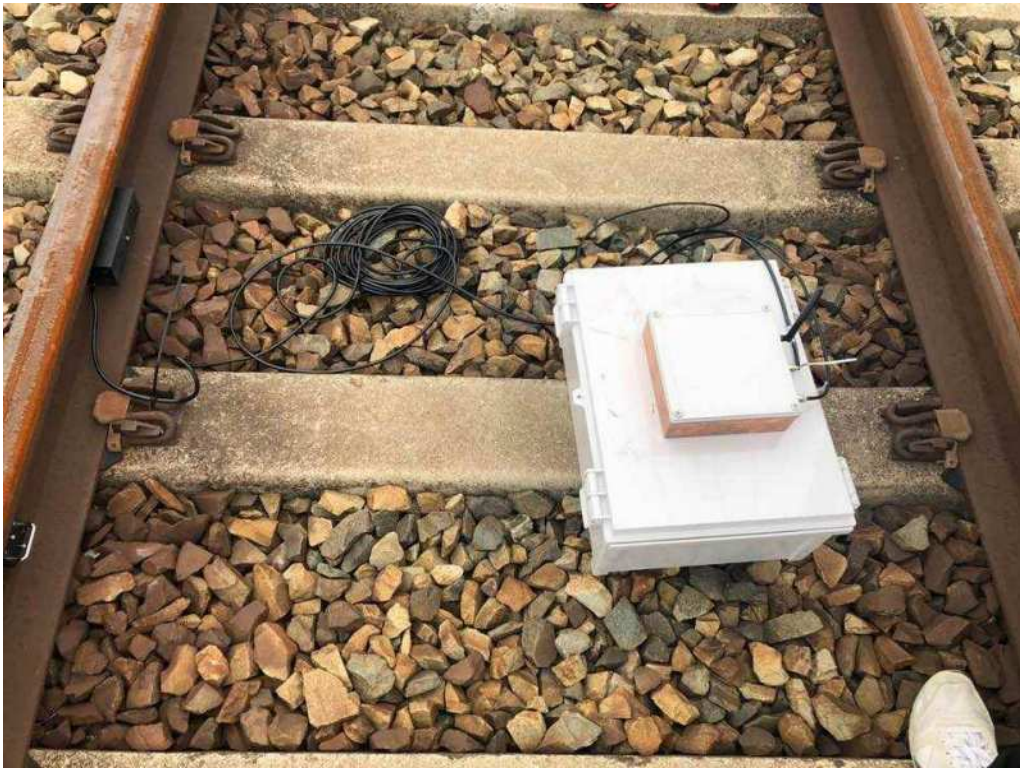


그림 3.36 좌굴 및 절손 감지시스템 시험설치



브라켓에 장착된 좌굴센서



레일에 설치된 좌굴 및 절손센서

그림 3.37 센서 현장설치 전경

- 절손 데이터 수집은 주기적인 시간에 데이터를 수집하는 것으로 진행하였고, 정해진 수집간격마다 솔레노이드를 동작시켜, 증폭된 탄성파를 수집하였다. 탄성파는 레일의 절손이 발생하지 않을 경우, 항상 데이터가 존재하였고, 측정시마다 데이터는 일정하지 않음을 알 수 있었다.

▶ 절손센서를 활용한 측정 결과는 다음과 같다.



그림 3.38 절손 데이터 측정 결과

- 좌굴센서는 온도의 변화에 따라 비례하게 변하는 특성을 지니고 있다. 이에 따라 온도 변화에 따른 추이를 보이는 것이 정상적인 결과이다.
 - 본 실험을 통해 비정상적인 설치되었을 때, 결과를 측정할 수 있었고, 일정 패턴을 보이긴 하나 온도의 변화에 비례하지 않는 결과를 나타내는 것을 알게 되었고, 부착 방법에 대한 고찰이 필요하다는 것을 알 수 있었다.
- ▶ 좌굴센서를 활용한 측정 결과는 다음과 같다.



그림 3.39 좌굴 비정상 설치 결과



그림 3.40 작금 정상 설치 결과

○ 관제플랫폼

- 본 과제에서 개발된 관제 플랫폼은 Maria DB 가반에 LINC, CS, Spring Framework 기반의 WEB으로 나누어 개발하였고, Linux Centos.7.7 OS에서 동작하도록 개발하였다.
- 본 개발 결과물은 최종 WEB에서 확인일 수 있고, Linc, CS, DB와 상호 운용하여 최종데이터를 사용자에게 보여준다.

▶ 다음은 로그인 화면이다.

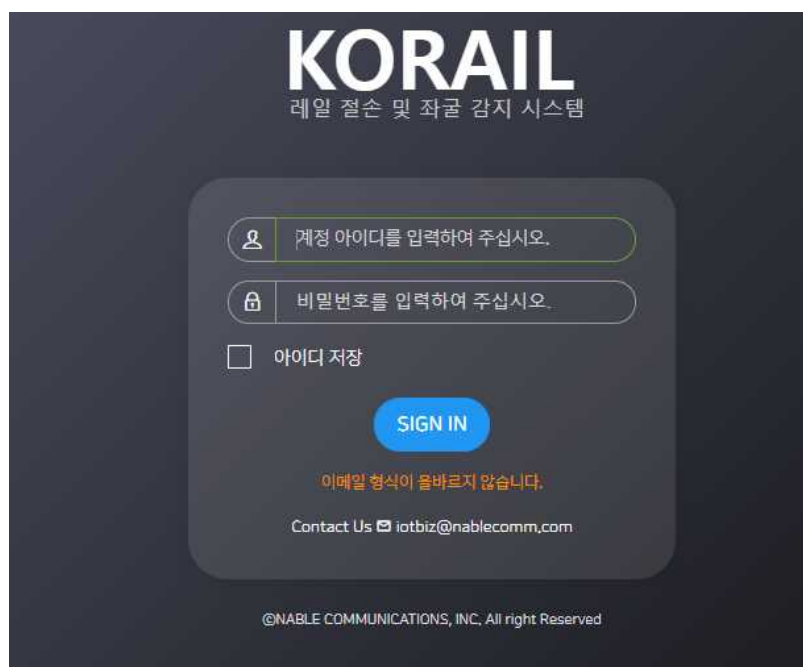


그림 3.41 로그인 화면

▶ 전체 현황을 보여주는 화면은 다음과 같으며 개소별 설치 센서와 현황을 보여준다.



그림 3.42 개소별 센서 현황

- 설치현황에서 상세를 보고 싶은 탭을 클릭하면 각 센서들의 상세 화면을 볼 수 있고, 기간 별로 조회가 가능하다.
 - 해당 화면에서는 수집된 데이터를 차트로 보여주고, 수집된 데이터를 테이블로 보여준다. 또한, pdf로 차트와 저장된 데이터의 테이블을 출력할 수 있고, 엑셀 파일로 데이터를 저장 가능하다.
- ▶ 전체 현황의 센서 상세 화면은 다음과 같다.

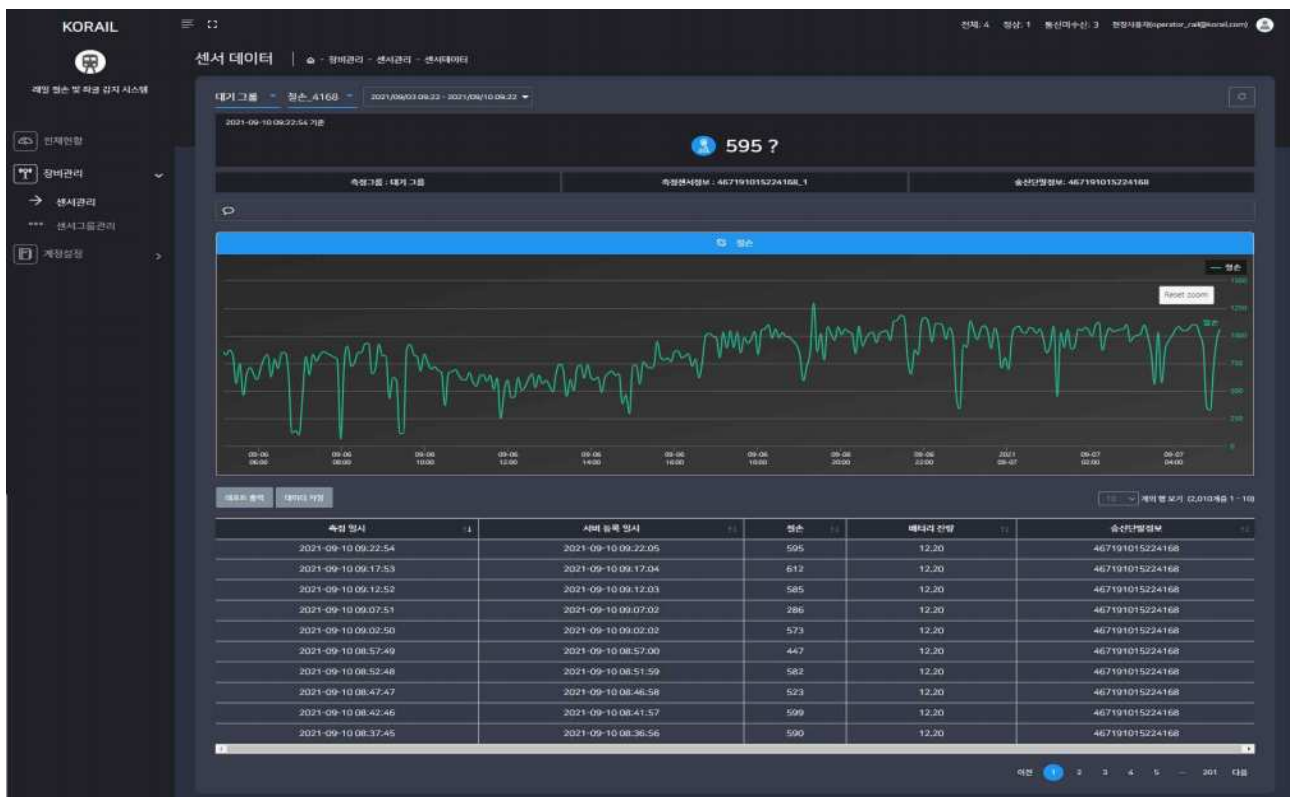


그림 3.43 전체 현황의 센서 상세 화면

- ▶ pdf 출력 기능으로 출력한 화면은 다음과 같으며 지정된 기간에 대한 데이터를 pdf로 출력할 수 있다.

SENSOR DATA REPORT

조회기간	2021/09/03 09:22 - 2021/09/10 09:22		
그룹명	대기 그룹	센서명	절손_4168
송신단말정보	467191015224168		

절손



총: 2010 개

측정 일시	절손(?)	배터리잔량	송신단말정보
2021-09-10 09:22:54	595	12.2	467191015224168
2021-09-10 09:17:53	612	12.2	467191015224168
2021-09-10 09:12:52	585	12.2	467191015224168
2021-09-10 09:07:51	286	12.2	467191015224168
2021-09-10 09:02:50	573	12.2	467191015224168
2021-09-10 08:57:49	447	12.2	467191015224168
2021-09-10 08:52:48	582	12.2	467191015224168
2021-09-10 08:47:47	523	12.2	467191015224168
2021-09-10 08:42:46	599	12.2	467191015224168

그림 3.44 PDF출력 화면

- 센서관리 화면은 다음과 같다. 각 센서에 대한 그룹지정 및 위험상황에 대한 허용 임계치 등을 설정할 수 있다.

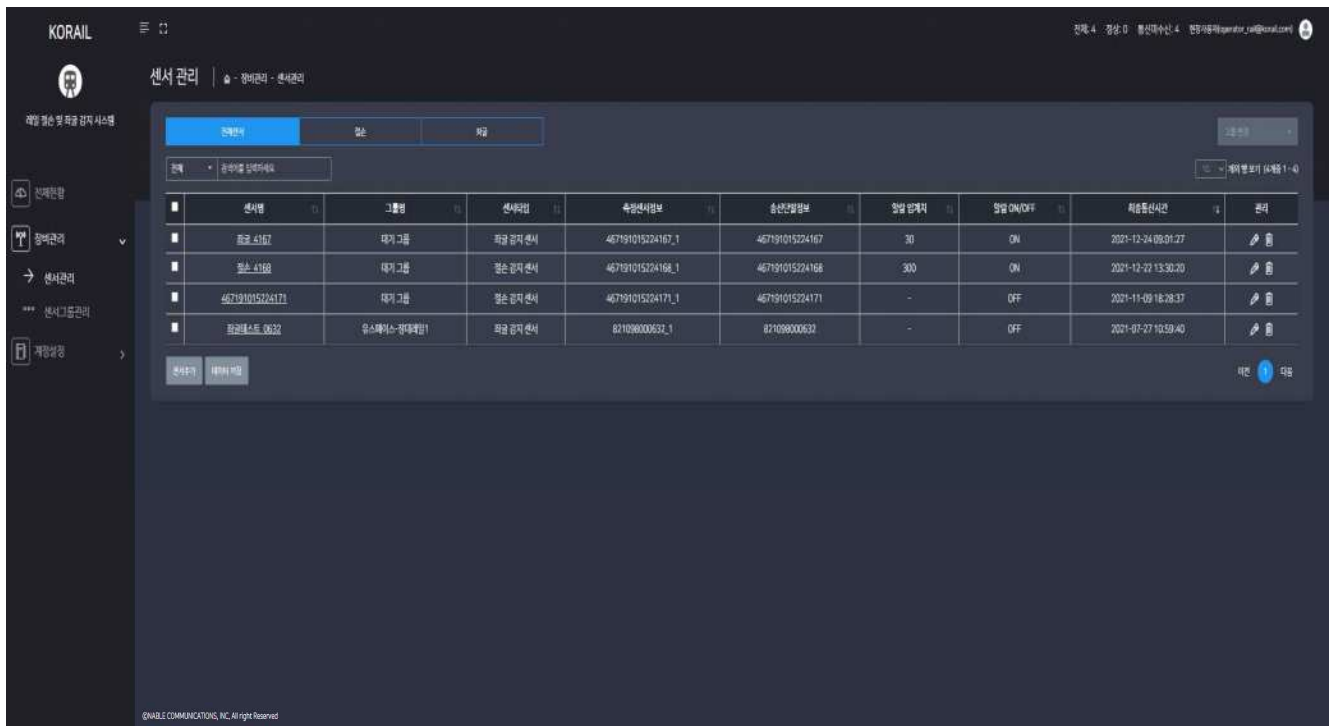


그림 3.45 센서 관리 화면

- 센서그룹관리 화면은 다음과 같다. 센서를 등록하면 초기 모든 센서는 대기 그룹에 있고, 사용자가 생성하는 그룹으로 이전 할 수 있다.

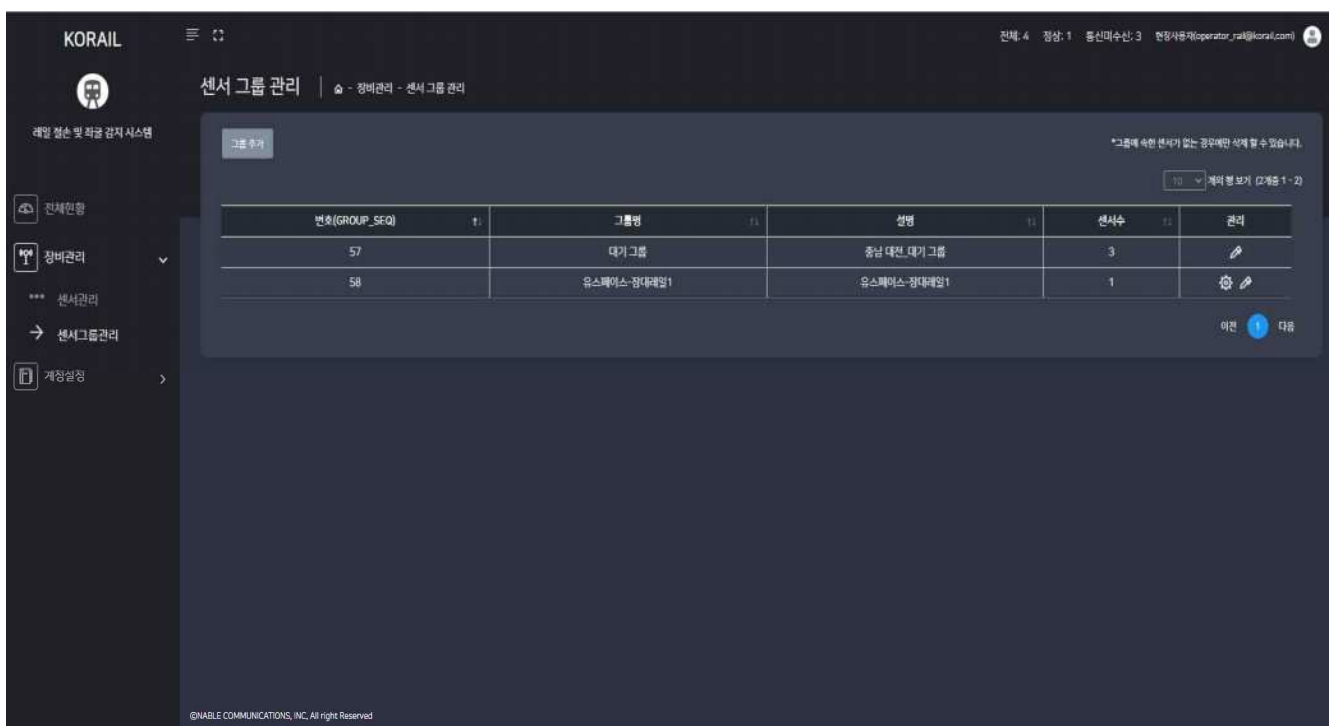


그림 3.46 센서 그룹 관리 화면

- 계정 정보 변경 화면이며 계정에 대한 비밀번호를 설정할 수 있다.

그림 3.47 계정정보 변경 화면

- SMS알림 설정 화면은 다음과 같다.

그림 3.48 SMS 알림 설정 화면

- 해당 페이지를 통해 위험 알림의 SMS 발송 여부를 지정할 수 있다.
- 위험 알림 SMS는 센서 설정에서 임계치를 벗어난 경우 발송한다.

- 다음은 설정된 사용자에서 알람이 전송된 화면이다.

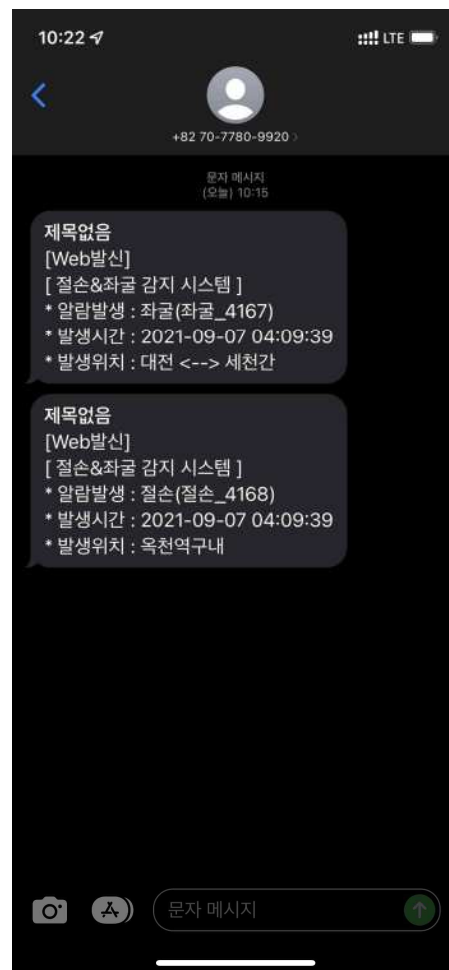


그림 3.49 SMS 알림 결과

- 다음은 배터리 유지관리 계획이다.

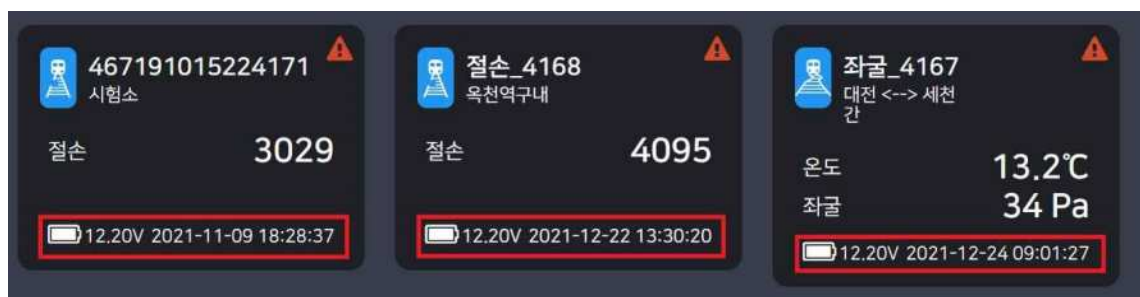


그림 3.50 배터리 잔량 표시

- 관제플랫폼 상 배터리 잔량 표시 기능을 활용하여 배터리 부족 시 사용자가 즉시 알 수 있다.
- 3개월간 현장 모니터링 결과 배터리 소모량이 약 20% 소모되었으며 개소당 년 1회 배터리 교체를 시행하면 시스템 운용에 문제가 없음

라. 레일변형 센싱모듈 관리 기준(안)

○ 센서 설치위치 선정기준

- 한국철도에서 관리하고 있는 중점관리개소 중 좌굴위험이 큰 통풍불량개소 47개소와 궤도 회로가 병렬로 구성되어 있어 절손여부를 감지할 수 없는 역구내 병렬잠바선 구간 2629개소를 레일변형 감지시스템 우선적용 대상개소로 선정하였다.
- 좌굴센서의 경우 통풍불량 개소 중 상승 방향틀림개소에 설치하며, 절손센서의 경우 병렬 잠바선 구간의 분기부 앞뒤에 슬레노이드 타격기와 수신센서가 50~100m이격되어 설치된다.

○ 데이터 취득시간

- 좌굴 감지시스템 : 레일변형 중 좌굴이 주로 발생하는 시간은 온도가 상승하는 오전 10시부터 온도가 하강하기 시작하는 오후 4시까지 사이임, 센서 설치후 상기 시간에 1분 간격으로 데이터를 취득하도록 설정하였다. 필요시 데이터 측정 간격, 시간을 변경 할 수 있다.
- 절손 감지시스템 : 절손의 경우 열차 운행 전후 사전감지가 중요하므로 열차 간격을 고려하여 오전 5시부터 오전 2시까지 5분 간격으로 데이터를 취득하도록 설정하였다.

측정일자	측정시간	온도	타격타격	수신타격	타격타격
2021-07-27 10:50:40	2021-07-27 10:50:30	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:30	2021-07-27 10:50:20	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:20	2021-07-27 10:50:10	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:10	2021-07-27 10:50:00	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:00	2021-07-27 10:49:50	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:00	2021-07-27 10:49:40	44.1	1234	1234	1234

측정일자	측정시간	온도	타격타격	수신타격	타격타격
2021-07-27 10:50:40	2021-07-27 10:50:30	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:30	2021-07-27 10:50:20	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:20	2021-07-27 10:50:10	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:10	2021-07-27 10:50:00	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:00	2021-07-27 10:49:50	44.1	1234	1234	1234
2021-07-27 10:50:00	2021-07-27 10:49:40	44.1	1234	1234	1234

(a) 절손 센서 데이터 취득 간격

(b) 좌굴 센서 데이터 취득 간격

그림 3.51 센서 데이터 취득 간격

○ 센서 유지관리 방안

- 관제플랫폼 센서관리탭에서 최종통신시간 확인을 통해 센서 상태를 확인하여 현장통보 및 유지보수를 시행(센서 교체 및 재부착)한다.

센서명	그룹명	센서타입	측정센서정보	송신단말정보	알림 임계치	알림 ON/OFF	최종통신시간	관리
좌굴_4167	대기 그룹	좌굴 감지 센서	467191015224167_1	467191015224167	30	ON	2021-12-24 09:01:27	관리
절손_4168	대기 그룹	절손 감지 센서	467191015224168_1	467191015224168	300	ON	2021-12-22 13:30:20	관리
467191015224171	대기 그룹	절손 감지 센서	467191015224171_1	467191015224171	-	OFF	2021-11-09 18:28:37	관리
좌굴센서_0632	유스페이스-장대역1	좌굴 감지 센서	821098000632_1	821098000632	-	OFF	2021-07-27 10:50:40	관리

그림 3.53 센서관리 탭

(2) 정량적 연구개발성과

가. 레일변형 감지 테스트베드 구축

- 본 과제 수행을 위하여 시제품 성능검증을 위한 현장 설치 및 모니터링 시험을 수행하기 위한 테스트베드를 선정하였다. 좌굴의 경우 혹서기에 주로 발생하므로 1년 중 온도가 가장 상승하는 7~8월에 시험설치를 하였으며 온도변화에 따라 좌굴 감지센서의 데이터 변화량을 측정하기 위하여 4월부터 매주 운행선에 설치된 센서를 활용 데이터를 측정하였다. 설치기간은 총3일이며 모니터링은 10월까지 4개월 수행하였다. 구축된 테스트베드 현황은 다음과 같다.

표 3.7 테스트 베드 현황

NO	본부	선별	구간	선별	위치	비고
1	대전충청	경부선	옥천-이원	하	184k250	좌굴(7월)
2	대전충청	경부선	옥천구내	상	21A호 분기기	절손(8월)
3	대전충청	경부선	대전-세천	하	171k800	좌굴(8월)

- 실제 열차가 운행하는 경부선에 시스템 설치를 위해 대전충청본부 시설처 및 사업소에서 시스템 설치에 대한 제반사항을 협의하였으며, 작업시 운행선에 센서를 설치해야 함으로 야간(차단)작업으로 수행하기로 협의하였다. 그 외 작업방법에 대한 검토 회의를 진행하였으며 내용은 다음과 같다.

- 일시/장소 : '21.5.31(월)/대전충청본부 대전시설사업소
- 내용 : 연구개발품 성능 검증을 위한 운행선 센서설치
- 참여기관 : 한국철도 연구원, 대전시설사업소 담당자, 표준과학연구원 등 5명

표 3.8 검토회의 결과

공종	수 량	상례,차단	단전여부	비 고
운행선 센서 설치	6 EA	차단	불필요	
항목	7월 2주		8월 1주	
	필요시	7/13	8/4	8/5
레일변형 센서 설치 <새벽>[차단]	세천구내 51호 분기기	옥천-이원(하) 184.250km	옥천구내 21A호 분기기	대전-세천(하) 171.800km

- 시스템 설치 전 협의된 테스트베드의 현장조사 시행, 현장시험 단계이기 때문에 작업자의 현장 접근성, 열차운행시 즉시 대피할 수 있는 안전성을 고려하여 선정하였다.



(a) 옥천-이원(하)



(b) 옥천구내(상)



(c) 대전-세천(하)

그림 3.54 테스트베드 전경

- 경부선 옥천-이원역간 하선 184.250km 부근에 상시 데이터 취득을 할 수 있도록 센서를 설치하였으며 이를 활용하여 4~8월까지 기존 사용하는 데이터 로거를 사용하여 누적 데이터를 측정하였다.
- 본 데이터를 활용하여 온도변화에 따른 데이터의 변화량을 측정하였으며 최고온도에서의 응력변화량이 얼마나 되는지 확인하였다.



(a) 설치장소



(b) 데이터 로거



(c) 센서 설치

그림 3.55 테스트베드 전경

- 병렬점퍼구간의 경우 보통 분기부 전후에 설치되 있기 때문에 완성된 절손 감지시스템의 성능검증을 위하여 분기부에 설치하였다. 최대 감지거리 100m를 만족시켜야 하기 때문에 옥천역구내 21A호 분기기에서 탄성과 발생 솔레노이드와 수신센서를 100m 이격하여 설치하였으며 4개월간 모니터링 하였다.
- 또한, 옥천-이원역간 곡선부에 설치하여 데이터를 측정하고 있기 때문에 대전-세천(하)171.800km부근 직선부에 추가로 테스트베드를 구축하였다.



(a) 좌굴 및 응력 측정센서



(b) 통신모듈 세팅



(c) 좌굴 감지시스템



(d) 탄성과 수신 센서



(e) 탄성과 발생 솔레노이드



(f) 절손 감지시스템

그림 3.56 레일 절손 및 좌굴 감지시스템 설치 현황

나. 레일변형 센싱모듈 개발

○ 절손 검출 센서노드 시험 결과

- 탄성파 수신 실험을 수행한 결과, 그림 3.49와 같이 타격 거리 140 m 까지 탄성파가 수신되었으며 100 %의 검출 정확도로 레일 분기부의 절손 검출이 가능하였음.
- 레일 분기부 간의 간격이 약 200 m 정도임을 고려하여 각 레일 분기부마다 레일 타격 지점 좌우로 검출 센서를 설치한다면 100 %의 정확도로 레일 분기부의 절손 검출이 가능함.

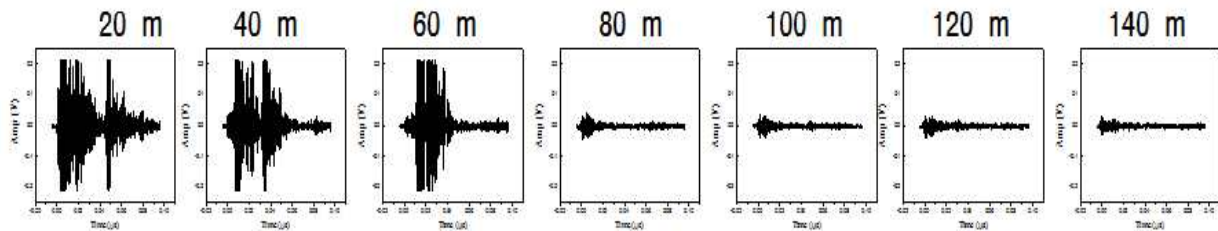


그림 3.57 거리에 따른 탄성파 수신 실험 결과

- 실제 절손이 발생하였으나 볼트 체결이나 물리적으로 단순히 접촉하고 있는 경우, 신호 검출 가능 여부를 시험한 결과 진동 신호가 검출되어 나타남.
- 절손 상태 레일에 대한 시험 결과, 그림 3.50과 같이 전달되는 탄성파는 잡음 수준으로 신호가 작으나 증폭기의 감도를 조정하고 문턱값을 설정함으로써 신호 검출이 가능하였음.

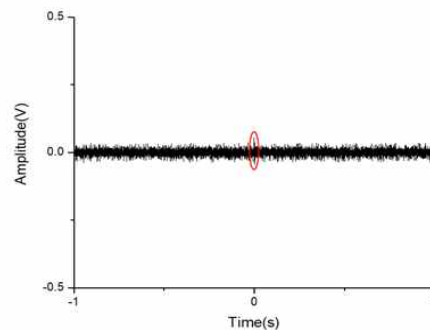


그림 3.58 물리적으로 접촉된 절손상태 레일에 대한 탄성파 검출 시험

- 제작된 탄성파 센서를 자석홀더를 이용하여 레일에 부착한 다음 신호증폭기에 연결하여 레일 타격에 의해 발생되어 전달되는 탄성파를 오실로스코프로 검출한 결과는 그림 3.51에서 보는 바와 같다. 신호증폭기의 게인을 조정할 경우 레일의 타격지점과 절손센서 사이의 거리가 약 180 m 이상에서도 전달되는 탄성파를 잘 검출할 수 있을 것으로 나타났다.

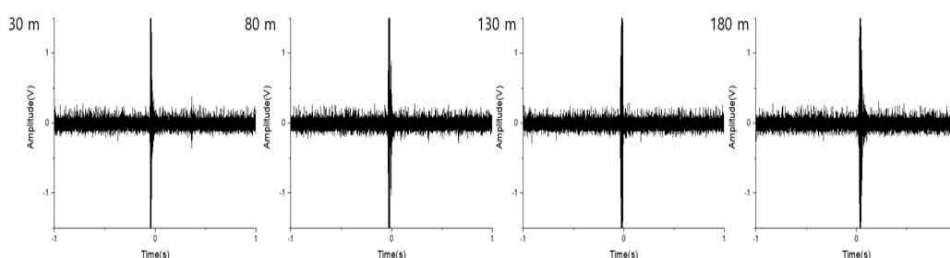


그림 3.59 감지센서와 레일 충돌 위치의 거리에 따른 신호 수신

- 제작된 신호증폭기는 전기적 잡음 및 백그라운드 잡음 등을 동시에 검출할 수 있으므로 증폭된 신호의 크기를 절손 판단 여부로 활용하고자 하였다. 즉, 완전히 절손된 레일에서는 탄성파가 더이상 전파되지 못하게 되므로 어떤 형태로든 탄성파가 검출된다면 절손이 발생하지 않았다고 판단할 수 있다.
- 절손 유무 판단에 영향을 줄 수 있는 임의의 신호 유입에 대한 방안으로 레일 가진 장치 구동 신호와 절손 검출 모듈을 동기화하여 일정 시간 범위 내에서 탄성파 신호가 있고 신호 크기가 일정한 크기 이상일 경우 정상 레일이라고 판단하도록 하였다. 이를 위하여, 신호증폭기에서 출력되는 신호의 포락선을 검출한 다음 AD 변환을 수행하여 얻어진 값(비트값 또는 전압 환산값)을 사전에 설정한 절손 판단 기준값과 비교하도록 하였다.
- 진동 센서를 레일 30 m 간격으로 가진 장치에서 전달되는 진동 신호를 취득하였으며, 그림 3.55와 같이 가진 지점 간의 거리를 증가하는 조건에서 진동 신호가 잘 검출되는 것으로 확인하였다.

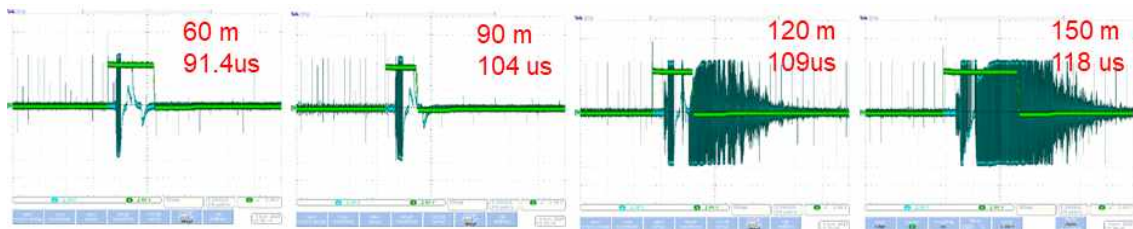


그림 3.60 가진 위치에 따라 검출되는 진동신호

- 최대 검출 가능 거리를 측정하기 위하여 트리거 신호 없이 가진 장치를 구동하며 최대 검출 가능 거리를 측정한 결과 그림 3.56과 같이 약 500 m 거리에서도 진동 신호가 잘 수신되었다.

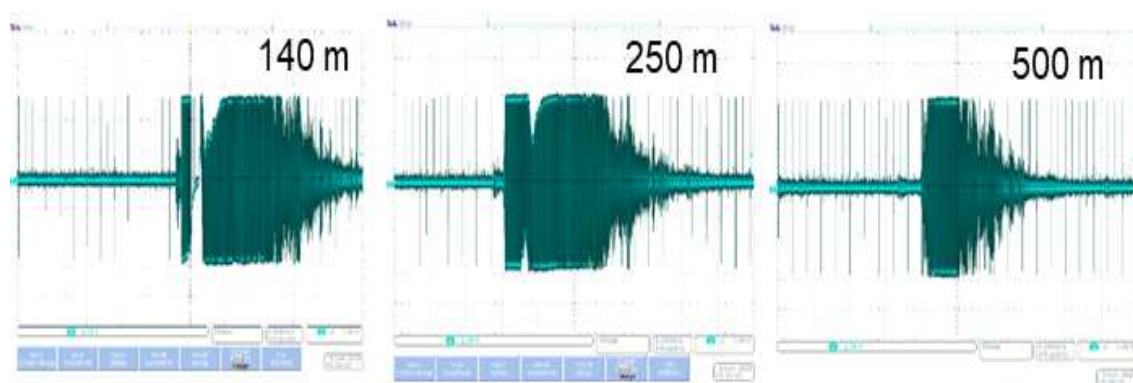


그림 3.61 최대 검출 가능 거리 시험 결과

○ 좌굴 감지 센서노드 시험 결과

- 상기 제작된 센싱 플레이트와 프리앰프 회로를 대전역 정비사업단 구내 레일에 설치하여 데이터로거(UCM 60B, Koywa Co., Ltd. 일본)로 검출하여 측정된 변형과 레일의 온도 변화 패턴을 비교한 결과 그림 3.57에서 보는 바와 같이 두 측정값이 유사한 변화 경향을 나타내어 온도 변화에 따른 레일의 변형을 잘 검출할 수 있을 것으로 나타났다.

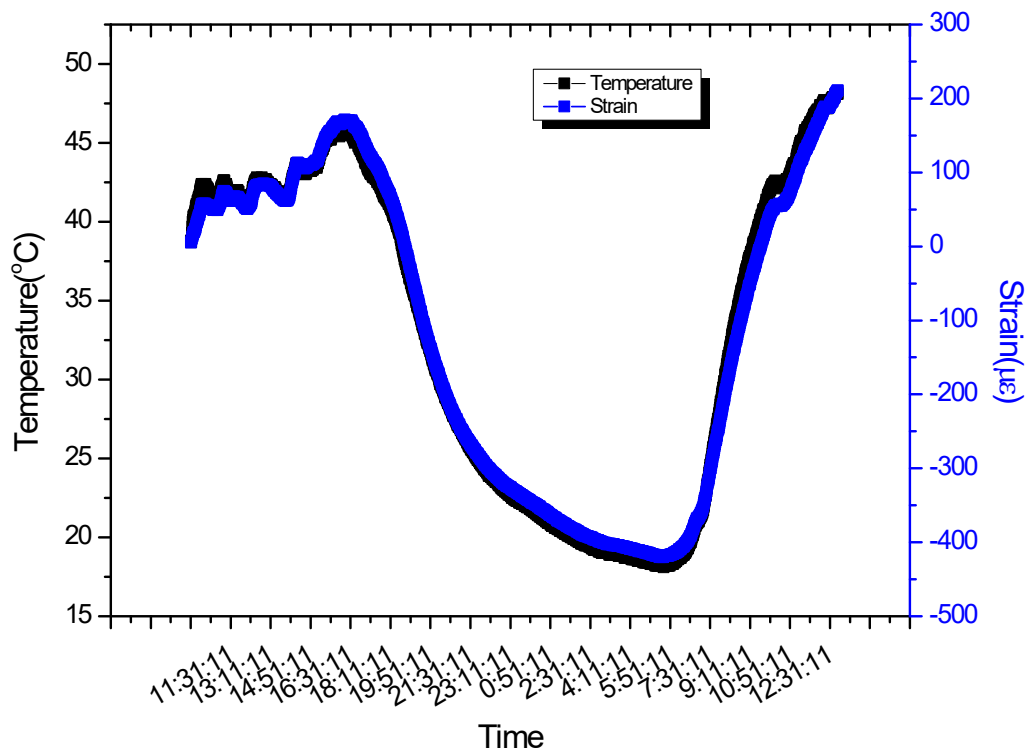
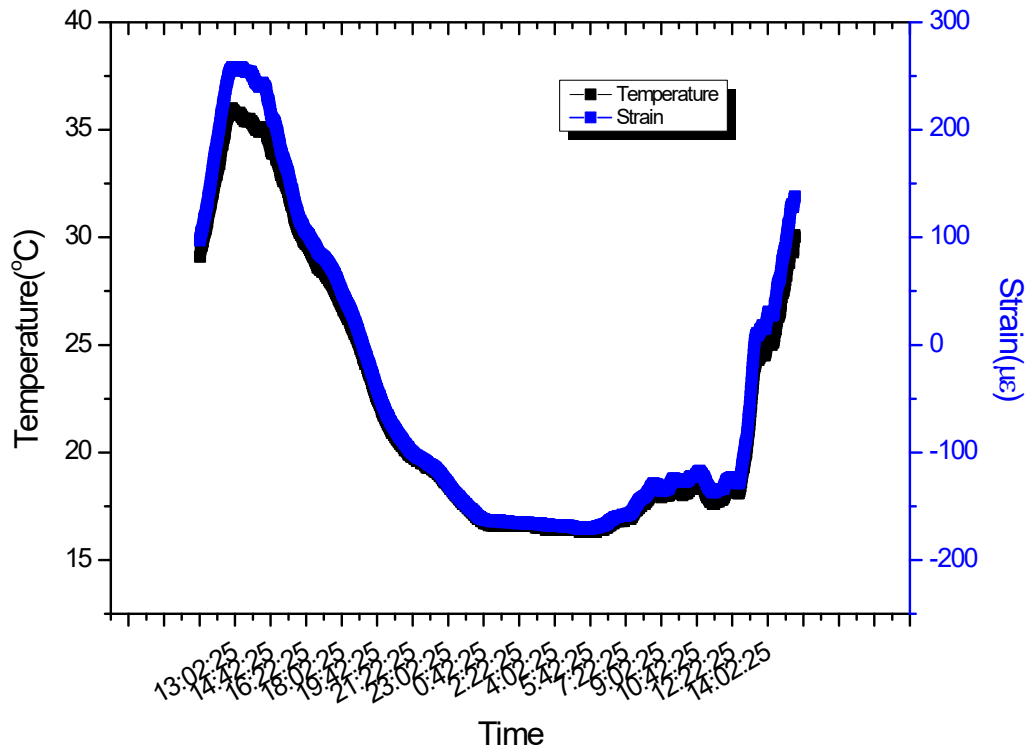


그림 3.62 레일 좌굴용 센싱 플레이트의 필드 테스트 결과

- 경부선 옥천-이원(하) 184.250km 부근에 설치하여 스트레인 게이지와 레일 온도센서를 이용하여 측정한 결과를 그림 3.58에 나타내었다. 온도 변화에 따라 변형률의 변화가 선형적으로 나타남을 확인할 수 있다. 본 기술품에서 상한, 하한을 설정하면 온도변화에 따른 변형률이 이를 벗어나는 경우 좌굴 위험성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

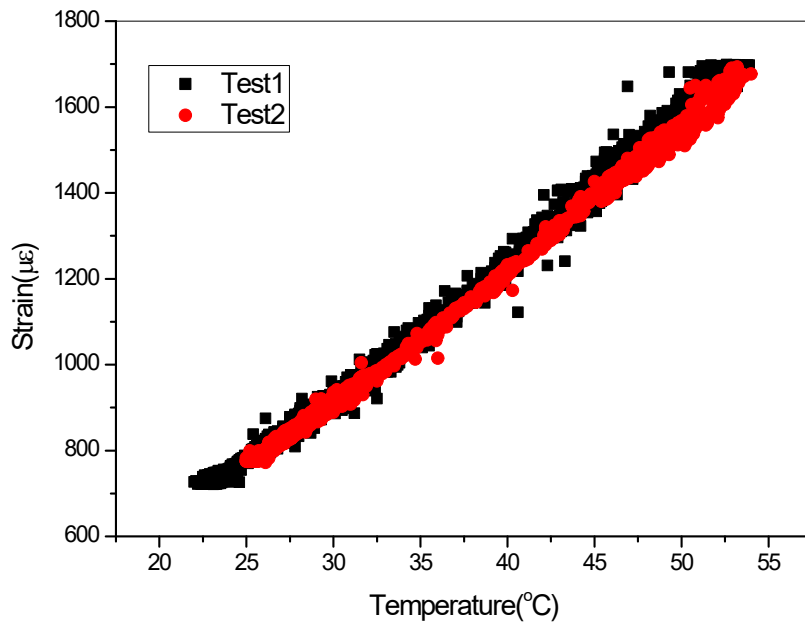


그림 3.63 레일 온도 변화에 따른 변형률 변화

다. IoT기반 레일변형 통신시스템 개발

- 레일절손 및 좌굴 감지 시스템은 레일의 상태를 파악하여 사고를 미연에 방지하는 목적을 가지고 있다. 해당 시스템의 중요성은 열차 탈선 및 전복 등으로 연결될 수 있고, 대형사고로 발생할 수 있다.
- 이로 인해 해당 시스템의 주요 목적은 단말은 측정된 데이터를 손실하지 않고, 서버로 전송하는 것이고, 또한 단말과 서버간 데이터의 지연을 최소화 하는 것이 중요하다.
- 이를 위해 별도의 인증기관에 통신 정확도와 통신 지연 시험을 의뢰하여 테스트를 진행하였고, 이를 통해 통신 정확도 상승과 지연시간 단축이 가능하도록 성능 확보를 하였다.
- 또한, 좌굴센서의 경우, 레일의 온도변화가 중요함으로 인해 별도의 온도센서를 부착한다. 이를 위해 온도센서의 정확도를 측정하기 위한 시험도 진행하였다.
- 통신 정확도 시험
 - 통신 정확도 시험을 위해 디바이스에서 30초마다 1개의 메시지를 전송하고 서버가 수신하는 과정을 확인함으로써 통신 정확도 시험을 진행하였다.
 - 통신 성공률 시험방법
 - ① 시험전 모든 장비는 계측오류를 방지하기 위해 30 분간 예비가동을 수행한다.
 - ② USB TO TTL 모듈을 노트북 USB 포트에 연결하고 DC 12V 를 인가한다.
 - ③ USB TO TTL 모듈의 스위치를 On 으로 변경하여 제품이 동작하는지 확인한다.
 - ④ PC 장치관리자를 열고 포트를 이용하여 USB TO TTL 의 연결포트번호를 확인한다.
 - ⑤ Tera term Program 을 열고 USB TO TTL 의 연결포트번호를 선택한다.
 - ⑥ Tera term Program 에서 Serial port 를 선택하고 통신 속도를 115200bps 로 설정한다.
 - ⑦ USB TO TTL 모듈이 Tera term Program 을 이용하여 30 초당 1 개의 data 를 전송하는지 확인한다.
 - ⑧ Internet Browser 을 이용하여 KORAIL 서버(1.237.186.4:3849)에 접속하고 정상 통신을 확인한다.
 - ⑨ 센서관리를 선택하고 USB TO TTL 모듈이 Tera term Program 으로 data 를 전송한 시간을 확인한다.
 - ⑩ 30 초당 하나씩 총 100 개의 data 를 전송하는지 확인하고 기록한다.
 - 본 시험은 신청자 기준 규격이며 다음과 같은 시험 절차와 판단 기준을 근거로 제시한다.

표 3.9 결과요약

구분	입력전압	판정기준	결과
통신 성공률시험	12VDC	전압 인가 시 데이터를 30 초당 1 개씩 50 분 동안 100 개 전송 여부 확인	Pass

- 다음은 시험의 절차 및 결과이다.



페이지 (9) / (총 Total) 14)

4.1.5 통신 성공률시험 수행사진



Figure 8. 모듈 USB 노트북 연결사진



Figure 9. 전원공급기 12V 인가사진

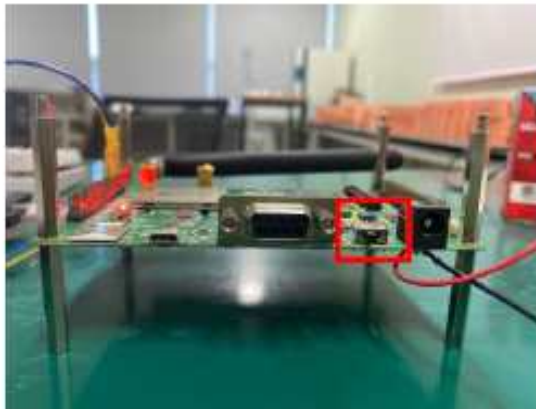


Figure 10. Switch 사진



Figure 11. 전원인가 후 모듈 동작확인사진



Figure 12. PC장치관리자 연결포트번호 확인사진



Figure 13. Tera term Program 포트연결사진



Figure 14. Tera term Program 통신속도변경사진

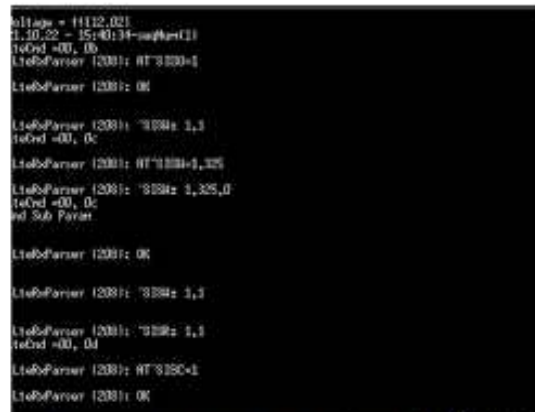


Figure 15. Teraterm Program data 전송확인사진

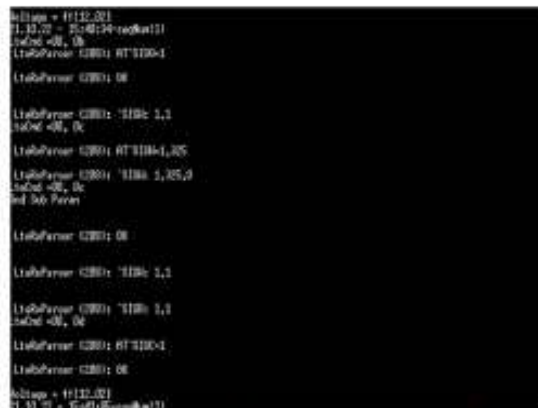


Figure 16. 30초당 하나의 data전송 확인사진



Figure 17. 서버(1.237.186.4:3849) 연결사진

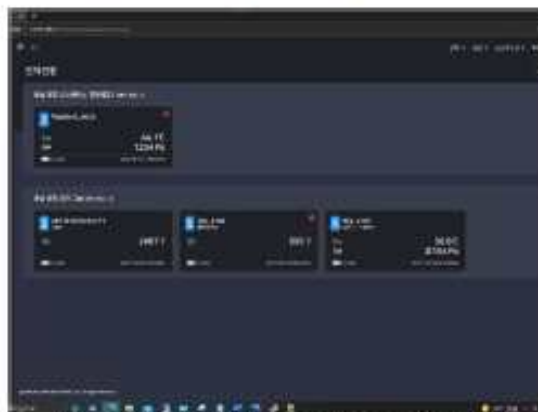


Figure 18. 서버(1.237.186.4:3849) 접속사진



2021-10-21 15:54:47	2021-10-21 15:54:49	2787	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:54:16	2021-10-21 15:54:18	2923	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:53:45	2021-10-21 15:53:47	3037	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:53:14	2021-10-21 15:53:16	3135	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:52:43	2021-10-21 15:52:45	2901	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:52:12	2021-10-21 15:52:14	3029	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:51:41	2021-10-21 15:51:43	3113	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:51:10	2021-10-21 15:51:12	2867	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:50:39	2021-10-21 15:50:41	2979	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:50:08	2021-10-21 15:50:10	3079	12.20	467191015224171

Figure 25. 15:50-15:54 data 10개 전송결과사진

2021-10-21 15:58:57	2021-10-21 15:59:59	3027	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:58:26	2021-10-21 15:59:28	3111	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:58:55	2021-10-21 15:58:57	2885	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:58:24	2021-10-21 15:58:26	3001	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:57:53	2021-10-21 15:57:55	3125	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:57:22	2021-10-21 15:57:24	2904	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:56:51	2021-10-21 15:56:53	3009	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:56:20	2021-10-21 15:56:22	3135	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:55:49	2021-10-21 15:55:51	2903	12.20	467191015224171
2021-10-21 15:55:18	2021-10-21 15:55:20	3037	12.20	467191015224171

Figure 26. 15:55-15:59 data 10개 전송결과사진

2021-10-21 16:05:07	2021-10-21 16:05:09	2947	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:04:36	2021-10-21 16:04:38	3063	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:04:05	2021-10-21 16:04:07	2826	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:03:34	2021-10-21 16:03:36	2981	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:03:03	2021-10-21 16:03:05	3071	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:02:32	2021-10-21 16:02:34	2823	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:02:01	2021-10-21 16:02:03	2939	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:01:30	2021-10-21 16:01:32	3051	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:00:59	2021-10-21 16:01:01	2794	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:00:28	2021-10-21 16:00:30	2917	12.20	467191015224171

Figure 27. 16:00-16:05 data 10개 전송결과사진

2021-10-21 16:10:17	2021-10-21 16:10:19	2821	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:09:46	2021-10-21 16:09:48	2951	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:09:15	2021-10-21 16:09:17	3063	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:08:44	2021-10-21 16:08:46	2832	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:08:13	2021-10-21 16:08:15	2951	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:07:42	2021-10-21 16:07:44	3065	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:07:11	2021-10-21 16:07:13	2831	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:06:40	2021-10-21 16:06:42	2963	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:06:09	2021-10-21 16:06:11	3079	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:05:38	2021-10-21 16:05:40	2835	12.20	467191015224171

Figure 28. 16:05-16:10 data 10개 전송결과사진

2021-10-21 16:15:27	2021-10-21 16:15:29	3055	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:14:56	2021-10-21 16:14:58	2811	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:14:25	2021-10-21 16:14:27	2911	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:13:54	2021-10-21 16:13:56	3039	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:13:23	2021-10-21 16:13:25	2797	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:12:52	2021-10-21 16:12:55	2933	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:12:21	2021-10-21 16:12:23	3062	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:11:50	2021-10-21 16:11:52	2815	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:11:19	2021-10-21 16:11:21	2925	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:10:48	2021-10-21 16:10:50	3050	12.20	467191015224171

Figure 29. 16:10-16:15 data 10개 전송결과사진

2021-10-21 16:20:37	2021-10-21 16:20:39	2999	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:20:06	2021-10-21 16:20:08	3091	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:19:35	2021-10-21 16:19:37	2855	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:19:04	2021-10-21 16:19:06	2978	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:18:33	2021-10-21 16:18:35	3079	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:18:02	2021-10-21 16:18:06	2837	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:17:31	2021-10-21 16:17:33	2943	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:17:00	2021-10-21 16:17:02	3059	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:16:29	2021-10-21 16:16:31	2811	12.20	467191015224171
2021-10-21 16:15:58	2021-10-21 16:16:00	2931	12.20	467191015224171

Figure 30. 16:15-16:20 data 10개 전송결과사진

○ 이상감지 지연 시험

- 통신 지연 시험을 위해 디바이스에서 30초마다 1개의 메시지를 전송 및 전송 시간을 확인하고, 서버에서는 수신한 메시지 시간을 확인함으로써 10초 이내 지연인가를 확인하였다.

- 이상감지 Latency 시험 방법

- ① 시험전 모든 장비는 계측오류를 방지하기위해 30 분간 예비가동을 수행한다.
- ② USB TO TTL 모듈을 노트북 USB 포트에 연결하고 DC 12V 를 인가한다.
- ③ USB TO TTL 모듈의 스위치를 On 으로 변경하여 제품이 동작하는지 확인한다.
- ④ PC 장치관리자를 열고 포트를 이용하여 USB TO TTL 의 연결포트번호를 확인한다.
- ⑤ Tera term Program 을 열고 USB TO TTL 의 연결포트번호를 선택한다.
- ⑥ Tera term Program 에서 Serial port 를 선택하고 통신 속도를 115200bps 로 설정한다.
- ⑦ USB TO TTL 모듈이 Tera term Program 을 이용하여 data 를 전송하는지 확인한다.
- ⑧ Internet Browser 을 이용하여 KORAIL 서버(1.237.186.4:3849)에 접속하고 정상 통신을 확인한다.
- ⑨ 센서관리를 선택하고 USB TO TTL 모듈이 Tera term Program 으로 data 를 전송한 시간을 확인한다.
- ⑩ Tera term 측정시간과 서버 등록 시간을 비교하여 data 를 10 초이내 전송하는지 확인하고 기록한다.

- 본 시험은 신청자 기준 규격이며 다음과 같은 시험 절차와 판단 기준을 근거로 제시한다.

표 3.10 시험판정 기준

구분	입력전압	판정기준	결과
이상감지 Latency 시험	12VDC	30 초당 1 개의 데이터를 받아 서버로 10 초이내 수신이 안되는게 있는지 100 개 데이터 확인	Pass

- 다음은 시험의 절차 및 결과이다.



4.1.5 이상감지 Latency시험 수행사진



Figure 8. 모듈 USB 노트북 연결사진



Figure 9. 전원공급기 12V 인가사진



Figure 10. Switch 사진



Figure 11. 전원인가 후 모듈 동작확인사진

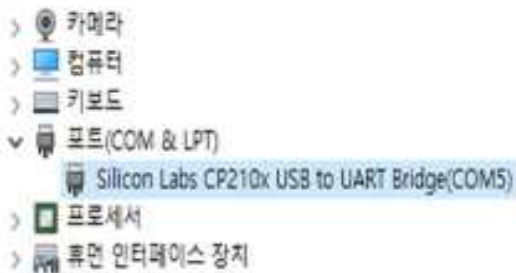


Figure 12. PC장치관리자 연결포트번호 확인사진



Figure 13. Tera term Program 포트연결사진

4.1.5 이상감지 Latency시험 수행사진

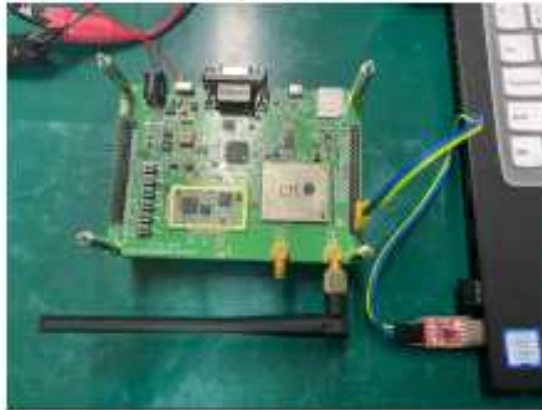


Figure 8. 모듈 USB 노트북 연결사진



Figure 9. 전원공급기 12V 인가사진

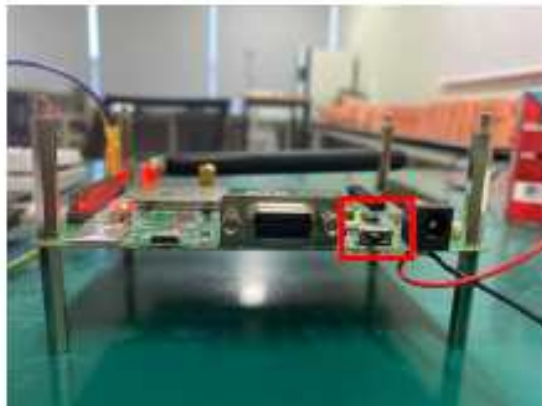


Figure 10. Switch 사진



Figure 11. 전원인가 후 모듈 동작확인사진



Figure 12. PC장치관리자 연결포트번호 확인사진



Figure 13. Tera term Program 포트연결사진

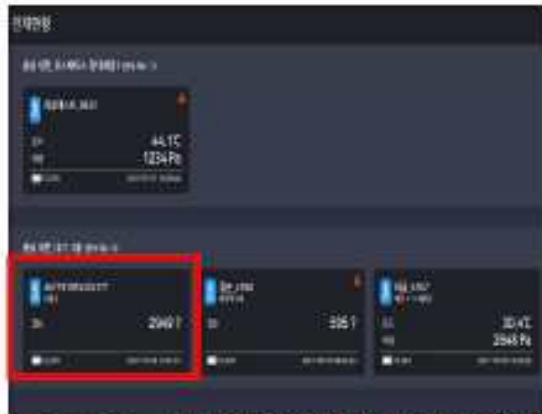


Figure 19. 서버(1.237.186.4:3849) 전체현황사진



Figure 20. 센서관리 시험소 연결사진



Figure 21. 센서관리 시험소 접속사진

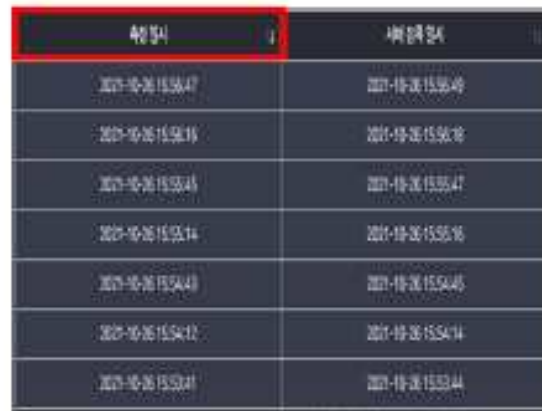


Figure 22. data: 즉정일시 확인사진



Figure 23. 2021.10.21 16:55 시험시작사진



Figure 24. 2021.10.21 17:45 시험종료사진

○ 온도센서 검교정시험

- 온도센서는 좌굴 측정 시, 온도 변화율을 함께 센싱하기 위해 사용하며, 온도 변화에 따라 좌굴센싱이 달라지기 때문에, 온도가 좌굴센싱에 주요하게 작용한다. 이를 위해 온도센서의 검교정 시험을 진행하였고, 총 3점의 온도를 시험하고 교정하였다.



교정성적서

CALIBRATION CERTIFICATE

경기도 이천시 마장면 서이천로 578번길 74
TEL : 031-645-6900, FAX : 031-645-6969



성적서발급번호(Certificate No) : IC-2021-03127
교 정 번 호(Calibration No) : C-2021-004444

페이지(page) : 1 of 2

1. 의뢰자 (Client)

- 기관명 (Name) : (주)네이클러 커뮤니케이션즈
- 주소 (Address) : 경기도 성남시 분당구 대왕판교로 660, A동 702호(삼평동, 유스페이스1)

2. 측정기 (Calibration Subject) ◇ 등록번호 : 326851

- 기기명 (Description) : 온도센서
- 제작회사 및 형식 (Manufacturer and Model Name) : MAXIM / DS18B20
- 기기번호 (Serial Number) : KRL-L100

3. 교정일자 (Date of Calibration) : 2021.01.14

4. 교정환경 (Environment)

- 온도 (Temperature) : (23.6 ± 0.1) °C
- 습도 (Humidity) : (46 ± 1) % R.H.
- 교정장소 (Location) : 교정표준실 (Permanent Calibration Lab)
(주소: 경기도 이천시 마장면 서이천로 578번길 74)

5. 측정표준의 소급성 (Traceability) ◇ Field code : 50102 (TEMPERATURE INDICATOR)

교정방법 및 소급성 서술 (Calibration method and/or brief description)

상기 기기는 온도지시계, 지시/기록/조절계(센서포함, 열전식)의 교정절차(HCT-CS-135-50102)에 따라 국가측정표준기관으로부터 측정의 소급성이 확보된 아래의 표준장비를 이용하여 교정 되었음.

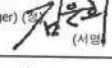
교정에 사용한 표준장비 명세 (List of used standards/specifications)

기기명 (Description)	제작회사 및 형식 (Manufacturer and Model Name)	기기번호 (Serial Number)	차기교정에정일자 (The due date of next Calibration)	교정기관 (Calibration laboratory)
PRECISION THERMOMETER	WIKA CTR2000	043338-07	2021/11/06	(주)에이치시티
TEMPERATURE & HUMIDITY CHAMBER	ESPEC PL-3J	15001476	2021/12/04	(주)에이치시티

6. 교정결과 (Calibration result) : 교정결과 참조 (Refer to attachment)

7. 측정불확도 (Measurement uncertainty) : 교정결과 참조 (Refer to attachment)

신뢰수준 약 95 %, k = 2 (Confidence level about 95 %, k = 2)

확 인 (affirmation)	작성자 (Measurements performed by) 성명 (Name) 양 무 영		승인자 (Approved by) 직위 (Title) 기술책임자(Technical Cal. Manager)
	성명 (Name) 김 은 희		성명 (Name) 김 은 희 (서명)

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인 받은 분야의 교정결과입니다.

2021. 01. 14

한국인정기구 인정
Accredited by KOLAS, Republic of KOREA

쥬에이치시티 대표이사
President, HCT Co., Ltd.



※ 이 성적서는 측정기의 정밀정확도에 영향을 미치는 요소(과부하, 온도, 습도 등)의 급격한 변화가 발생한 경우에는 무효가 됩니다.
 ※ 고객전문사이트(http://www.callab.co.kr)에서 성적서의 진위여부 확인이 가능합니다.
 ※ 성적서의 원본은 상단에 HCT 로고그림이 들어간 워터마크 방지 용지에 인쇄되어 발급되며, 원본 복사시에는 복사본이라는 표시가 처리됩니다.

F-02P-02-008 (Rev.02)

그림 3.66 온도센서 시험성적서



교정결과

CALIBRATION RESULT

성적서발급번호(Certificate No) : IC-2021-03127
교 정 번 호(Calibration No) : C-2021-004444



페이지(page) : 2 of 2

1. Temperature Calibration

Condition	Standard Value (°C)	Measured Value (°C)	Correction (°C)	Uncertainty (°C)
	10.0	10.1	-0.1	0.9
	40.0	40.0	0.0	0.9
	70.0	70.4	-0.4	0.9

※ Correction = Standard Value - Measured Value

그림 3.67 교정결과

○ 환경시험(고온 및 저온 동작시험)

- 고온과 저온 환경에서 동작을 검증하기 위해 온도챔버를 통해 고온과 저온 사이클을 시험을 진행한다. 시험 진행간 최고, 최저 및 상온에서 데이터 통신 유무를 확인한다.
- 온도 프로파일 및 시험은 하기의 표와 같이 수행한다.

표 3.11 온도프로파일 및 시험 조건

구분	상온 25℃	고온 80℃	상온 25℃	저온 -20℃	상온 25℃
온도 상승/하강 시간	0H	2H	2H	2H	2H
온도 방치 시간	1H	2H	1H	2H	1H
통신 확인	시작전 10분	고온 방치 후 10분	방치 후 10분	방치 후 10분	방치 후 10분

- 고온 및 저온 동작시험(환경시험) 방법

- ① 시험전 모든 장비는 계측오류를 방지하기 위해 30분간 예비가동을 수행한다.
- ② 시험품에 DC12V를 인가하여 정상통신 여부를 확인한다.
- ③ 정상통신을 확인하기 위하여 서버([Http://1.237.186.4:1349/loginForm.app](http://1.237.186.4:1349/loginForm.app))에 접속한다.
- ④ 접속한 서버에 로그인하여 좌굴_4167 서버에 들어가 정상 통신유무를 확인한다.
- ⑤ 정상통신 확인 후 고온 및 저온 프로파일에 따라 시험을 진행한다.
- ⑥ 시험 전, 고온시험 유지 후, 상온복귀 후, 저온시험 유지 후, 시험 후 각 10분간 정상통신 유무를 확인한다.
- ⑦ 시험 후 온도 데이터와 통신 데이터를 기록한 후 저장한다.

표 3.12 시험판정 기준 및 결과 요약

구분	입력전압	판정기준	결과
고온 및 저온 동작시험	12VDC	고온 및 저온시험 전, 중, 후 10분간 데이터 통신 유무 확인	Pass

- 다음은 시험소의 절차 및 결과이다.

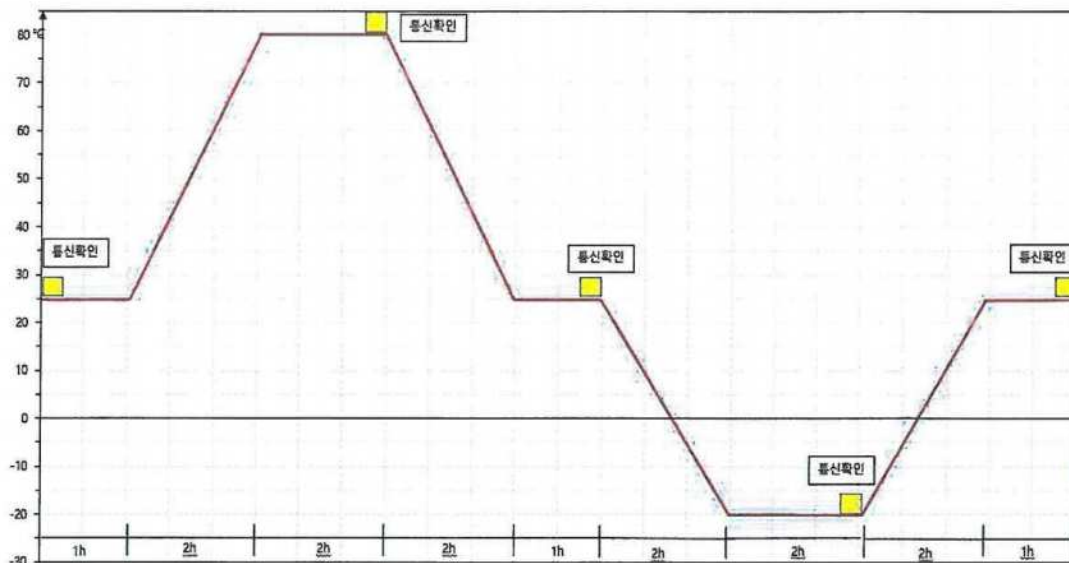


그림 3.68 온도 프로파일

항목	설명
MCU	ARM Cortex-M4 @ 80MHz
전원	외부 전원 : DC 4.3 ~ 24V Battery USB Power
무선통신	Multi Band LTE (Band 1,2,3,4,5,7,8,12,18,19,20,28) LoRa (920 MHz)
인터페이스	RS-232(422, 485) USB 2.0 FS(Host/Device) 80 I/O pin(I2C, SPI, ADC, UART, GPIO)
관제 서버 사양	CPU - Intel®Xeon® E5-2697, 2.6GHz RAM - 8GHz OS - CentOS 7.7 개발 Framework - Spring 기반 WEB Framework

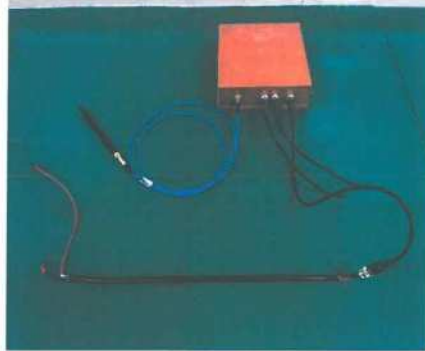


Figure 4. 시험품 전체 사진



Figure 5. 시험품 본체 사진

그림 3.69 시험품 정보

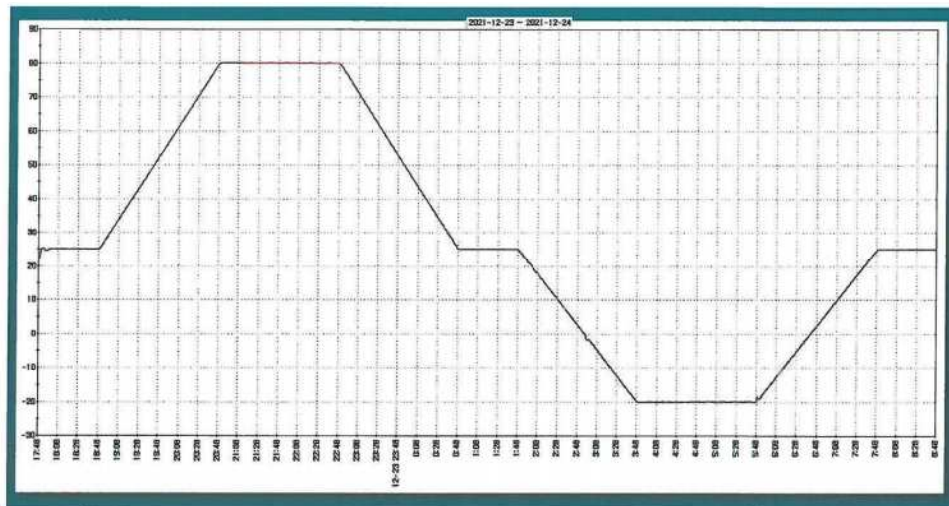


그림 3.70 챔버 온도 그래프 사진

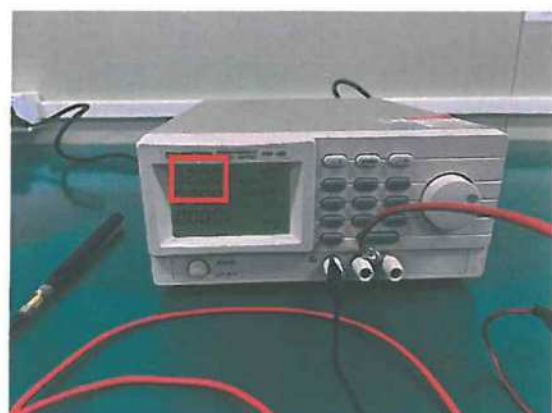


그림 3.71 고온 및 저온 동작시험(환경시험) 수행 사진

라. IoT기반 레일 좌굴 감지시스템 개발

○ 레일변위센서 적용 좌굴 감지시스템 추가 개발

- 좌굴감지를 위한 기존 방식은 온도변화에 따른 레일응력을 측정하여 이상 유무를 판단하는 방법이다.
- 레일응력 측정을 위한 스트레인게이지의 경우 본드로 레일에 부착하는 방식으로 설치 후 센서의 재사용이 불가능하다.
- 상습 유지보수 필요 개소에서는 전용보수차량 및 인력에 의한 유지보수 시행 시 센서의 탈 부착이 필요한 경우가 발생할 수 있다. 또한 레일 응력변화량과 함께 변위량을 측정할 경우 좌굴 판단기준 수립에 더 유리할 것으로 판단된다.
- 이러한 이유로 유지보수 담당자의 사용자 편의성을 고려하고 레일 좌굴 판정 신뢰성 향상을 위해 센서의 추가 적용을 검토하였다.

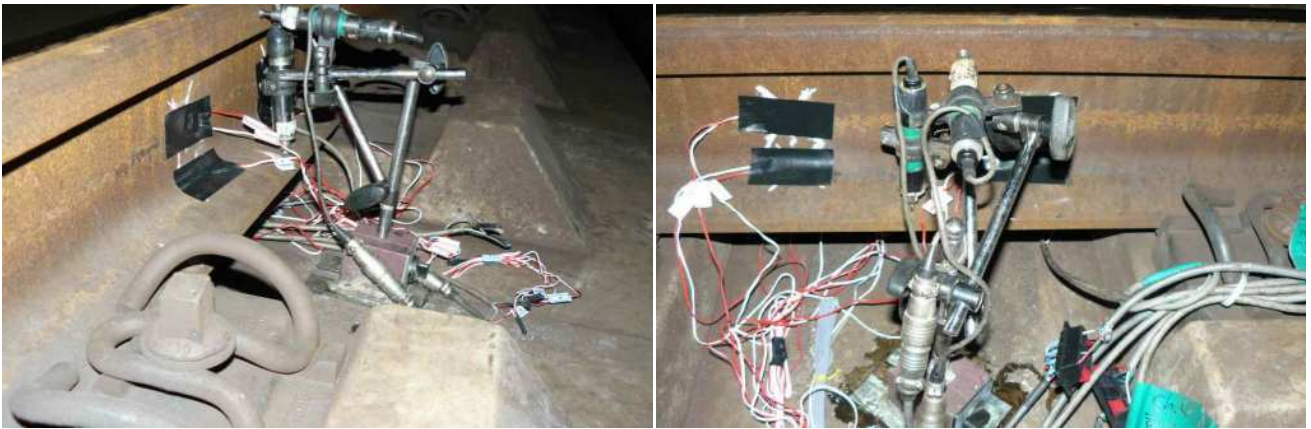


그림 3.72 레일 변위계 설치전경

- 다음 표와 같이 방향틀림 기준을 초과할 경우 좌굴이 발생할 확률이 매우 높은 것으로 판단할 수 있다.
- 본 연구에서 수립한 온도변화에 따른 레일응력 변화량 가이드라인과 더불어 철도운영기관에 유지보수 시 사용하는 선로유지보수지침의 궤도틀림 관리기준을 적용하여 관리할 수 있음

표 3.13 일반철도 궤도틀림 관리기준(방향틀림)

관리단계	방향틀림(mm)					방향틀림 표준편차 (mm)	비고
	$V \leq 40$	$40 < V \leq 80$	$80 < V \leq 120$	$120 < V \leq 160$	$160 < V \leq 230$		
준공기준 (CV)	≤ 4	≤ 4 [3]	≤ 4 [3]	≤ 4 [3]	≤ 3 [3]	-	
목표기준 (TV)	≤ 6	≤ 5	≤ 4	≤ 4	≤ 4	-	
주의기준 (WV)	$14 \leq$	$12 \leq$	$9 \leq$	$7 \leq$	$6 \leq$	$1.6 \leq$	
보수기준 (AV)	$18 \leq$	$16 \leq$	$12 \leq$	$9 \leq$	$8 \leq$	-	2개월내 보수
속도제한기준 (SV)	23 (10 km/h)	22 (40 km/h)	17 (80 km/h)	17 (80 km/h)	14 (160 km/h)	-	

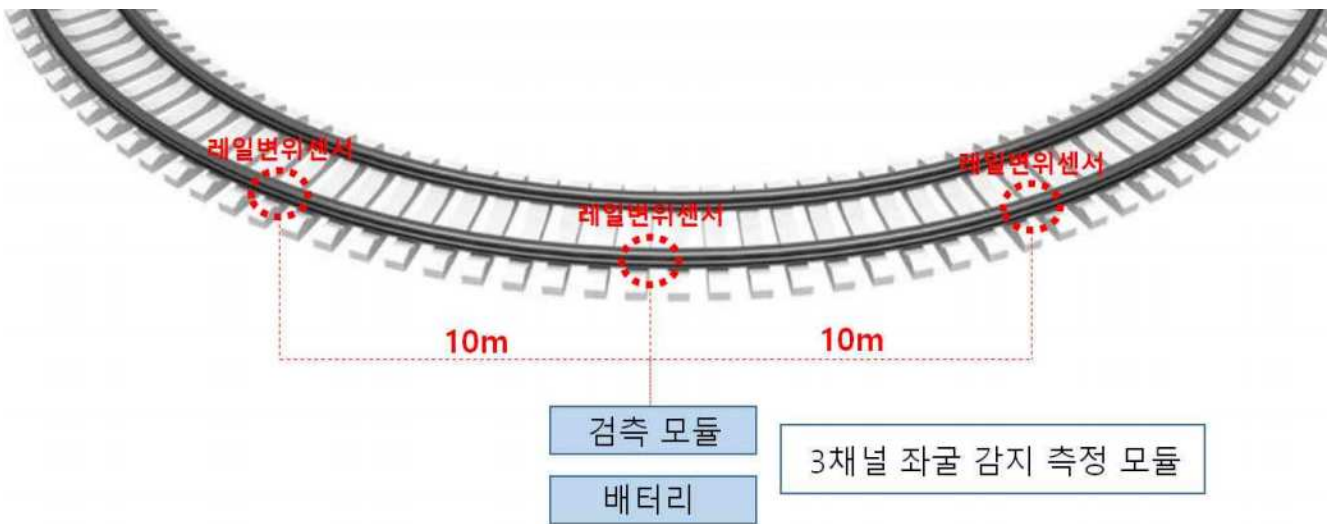


그림 3.73 레일 좌굴감지 측정모듈 설치도

- 그림 3.69는 변위센서를 활용한 좌굴감지 측정모듈 설치도이며 10~15m 이격하여 곡선부 혹은 설정범위 내 레일의 전체적인 변화를 감지할 수 있다.

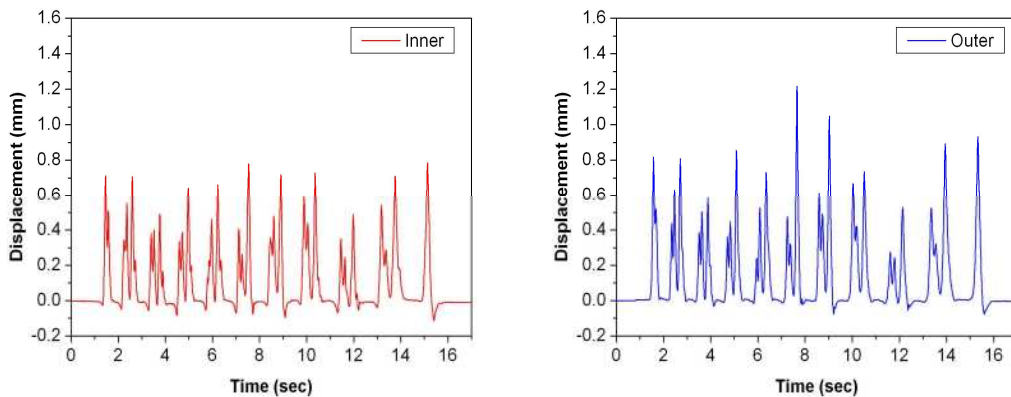


그림 3.74 레일 좌굴 감지 변위 측정

- 일반철도 궤도틀림 관리기준의 보수기준 이상의 횡변위가 발생할 시 좌굴위험으로 판단하여 점검을 실시하여 선제적 장애예방을 통한 열차사고를 방지할 수 있다.

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Experimental Consideration of Conditions for Measuring Residual Stresses of Rails Using Magnetic Barkhausen Noise Method	materials 2021	14	스위스	MDPI	SCIE	2021.9.17	14185374	100
2	Experimental Measurement of Residual Stress Distribution in Rail Specimens Using Ultrasonic LCR Waves	Appl. Sci. 2021	11	스위스	MDPI	SCIE	2021.10.7	11199306	100
3	IoT 기반 레일 철손 및 좌굴 모니터링 시스템 연구	Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing	**	대한민국	비파괴학회	비SCIE	2021.10.	12257842	100

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호
1	2022	기후변화를 대비한 IoT기반 레일 철손 및 좌굴 감지시스템 개발 최종보고서	발간예정	

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	탄성파를 이용한 철도레일 철손감지장치 및 이를 이용한 감지 방법	대한민국	한국철도 표준연 앨라캅	20.01.17	10-2020-0006353	한국철도 표준연 앨라캅	2022.01.26	10-2357725	100	
2	특허	탄성파를 이용한 철도레일 좌굴 감지장치 및 이를 이용한 감지 방법	대한민국	한국철도 표준연 앨라캅	20.01.17	10-2020-0006350	한국철도 표준연 앨라캅	2022.01.26	10-2357716	100	
3	특허	선로 상태 감지 및 이상 유무 분석 시스템	대한민국	한국철도 네이블 케이티엠 엔지니어링	21.06.28	10-2021-0083698	등록절차 진행중			100	

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	레일변형 감지시스템	20.7.1	표준과학연구원	대전남연결선				
2	철손 감지 시스템	21.7.28	네이블커뮤니케이션즈	옥천역		사업화 추후검토		
3	좌굴 감지 시스템	21.7.28	네이블커뮤니케이션즈	대전-세천		사업화 추후검토		
4	철손 측정기	21.8.1	표준과학연구원	표준연시험실		사업화 추후검토		
5	좌굴 측정기	21.8.1	표준과학연구원	표준연시험실		사업화 추후검토		
6	광대역 IoT 통신단말 관제플랫폼	21.8.1	네이블커뮤니케이션즈	네이블시험실		사업화 추후검토		

□ 현장적용(테스트베드)

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)
1	무선 스트레인게이지 측정모듈	'19.8.1~8.2	한국철도공사	한국표준과학연구원	표준연 야외시험장
2	레일 철손 및 좌굴 감지시스템	'20.7.1~9.30	한국철도공사	한국철도공사	경부고속선 대전남연결선
3	레일 철손 감지시스템	'21.8.5~10.30	한국철도공사	한국철도공사	옥천역구내 182.850km
4	레일 좌굴 감지시스템	'21.8.6~10.30	한국철도공사	한국철도공사	대전-세천(하) 171.800km
5	레일 좌굴 감지시스템	'21.5.1~8.31	한국철도공사	한국철도공사	옥천-이원(하) 184.250km

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)
1						

[사회적 성과]

□ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)
1	한국철도공사	2021.5.10	2021.5.10.~2021.7.26	1	

2) 목표 달성 수준

세부 연구 목표 (연구 계획서의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
레일변형 검출 사용자 요구사항 분석	15	100	[정성적 연구성과] 보고서 1건 - 테스트 베드 구축에 필요한 요구조건 도출 - 사용자 및 탐지장비 적용 최소 요구사항 도출 - 레일변형 유형 정의 및 감지한계 분석 - 테스트베드 구축을 위한 가이드 라인 작성
레일 변형 센싱 모듈 개념 개발	15	100	[정성적 연구성과] 보고서 1건 - 레일변형 시험/센서선정 - 레일 인장/압축시험 - 레일변형 센싱모듈 설계 [정량적 연구성과] 특허 2건, 논문3건 - 특허등록 2건 - 논문 SCI 게재 1건, 비SCI 게재 진행 1건
IoT 단말 및 관제플랫폼 설계	10	100	[정성적 연구성과] 보고서 1건 - IoT 단말 설계 - 관제플랫폼 설계 [정량적 연구성과] 특허 1건 - 특허출원 1건
레일변형 탐지(좌굴) 테스트 베드 구축	10	100	[정성적 연구성과] 보고서 1건 - 레일변형(좌굴) 운영 가이드 및 지침 마련 - 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축 [정량적 연구성과] 테스트베드 1건 - 좌굴 감지시스템 테스트베드 2건
센싱모듈 시제품개발	10	100	[정성적 연구성과] 보고서 1건 - 레일변형 센싱모듈 시제품 제작 - 테스트베드 시험 [정량적 연구성과] 시제품 2건, 시험성적서 1건 - 센싱모듈 시제품 2건 - 공인시험성적서 1건
IoT 단말 및 관제플랫폼 개발	10	100	[정성적 연구성과] 보고서 1건 - IoT 단말 시제품 제작 - 관제플랫폼 개발 - 시제품 평가 및 기능개선 [정량적 연구성과] 시제품 3건, 시험성적서 3건 - IoT통신 단말 시제품 2건, 관제플랫폼 1건 - 공인시험성적서 3건
레일변형 탐지(절손) 테스트 베드 구축	10	100	[정성적 연구성과] 보고서 1건 - 레일변형(절손) 운영 가이드 및 지침마련 - 테스트 베드 운영 가이드 및 관리시스템 구축 [정량적 연구성과] 테스트베드 1건 - 절손 감지시스템 테스트베드 1건
센싱모듈 시제품 개발 및 현장적용	10	100	[정성적 연구성과] 보고서 1건 - 레일 좌굴/절손 센싱모듈 시제품 제작 - 센싱모듈 현장적용 및 좌굴/절손 기준 도출
IoT 단말 및 관제플랫폼 고도화	10	100	[정성적 연구성과] 보고서 1건 - IoT 단말 1차 시제품 제작 - 시범설치 및 데이터 분석
합계	100점		

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

5. 연구개발성과 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 기술적 기여

- 4차 산업혁명과 관련된 IoT 기반 철도시설물 유지보수 모니터링 기술 개발을 통한 철도시설물 유지보수 기술을 확보하고, 외산장비를 대체하고 외화절감 및 해외 의존도 감소
- 레일 유지보수 최적화 및 열차운행 안전성 향상에 기여
- 레일 절손 및 좌굴 관련 객관적이고 지속적인 모니터링 결과 Big-Data 분석으로 철도 이상개소의 조기 탐지로 선제적 장애 예방 및 열차안전운행 확보 가능

○ 경제적기여

- 철도시설물의 유지보수 효율화를 위한 검측장비의 수요가 기하급수적으로 증가함에 따라 레일 모니터링 기술 개발을 통한 국내외 시장 진출 기대
- 레일 절손 및 좌굴 검지시스템 활용을 통한 열차 탈선 및 불안감 감소로 철도이용 고객 증대와 경영개선 기여
- 레일변형 모니터링 기술 확보를 통한 국내 타산업 분야로 확대 적용 가능
- 기술개발을 통한 기술자립과 국부유출을 막고 해외시장 진입 가능성 제고

○ 사회적기여

- 선로유지보수 및 예방보수를 통한 철도차량의 주행안전성 및 승차감 향상 가능
- 최적의 유지관리 기술을 도입하여 시설물 사용주기의 증대 및 안전사고를 미연에 방지함으로써 시설물의 안정성 향상 및 대국민 신뢰도 제고
- 레일변형 검측 자동화로 기존 검측 인력을 효율성 제고와 철도 운행 안전에 기여

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

6.1 연구개발성과의 활용 방안

- 철도운영기관의 이상기후 대비 선로안전관리는 하절기 장대레일 장비작업 제한(폭염특보기간 다짐작업 금지), 레일온도 검지장치 설치(각 지점의 레일온도를 측정하여 정보 제공), 차열성 페인트 도포(도포 초기 약 4~5℃의 온도저감 효과), 안전점검 및 감시원 배치(혹서기 선형취약선구에 인력 배치), 레일결함 탐상 등이 있으나,
- 사전 감지 불가(사구간) 개소에서 레일변형 발생 시 탈선사고 등 대형사고가 발생할 수 밖에 없는 실정으로 개발 성공 시 즉시 적용이 가능하다. 따라서, 3차년도부터 본 기술의 성과물(IoT 기반 레일변형 모니터링 시스템)의 성능검증을 운행선에서 시행하였고 21년 좌굴 및 절손 발생개소에 과제 종료 후 설치를 통해 시범운용을 시행하고 2023년부터 현장적용 예정임
- 국내에서 효과가 입증되면 국내시장 뿐 아니라 해외시장의 판매 추진

표 6.1 레일좌굴감지 시스템 우선적용 대상지(총 47개소 / 51.2km)

순위	선별	위치				평면선형		비고
		시점	종점	연장	통풍상태 및 토공종별	직곡선	곡선 반경	
47개소		총연장		51,179				
1	T1,2	41.200	42.000	1600	통풍불량	곡선	10000	
2	T2	42.500	45.500	3000	통풍불량	원곡선	7000	
3	T1,2	48.500	49.500	2000	통풍불량	곡선	8000	
4	T1,2	49.500	50.750	2500	통풍불량	곡선	8000	
5	T1,2	59.800	60.500	1400	통풍불량	곡선	8000	관정굴착
6	T1,2	60.500	61.100	1200	통풍불량	곡선	8000	
7	T1	67.650	68.100	450	통풍불량(돋기)	직선		
8	T2	67.650	67.800	150	통풍불량(돋기)	직선		
9	T2	68.000	68.850	850	통풍불량(깎기)	직선		
10	T1	68.700	69.000	300	통풍불량(깎기)	직선		
11	T1,2	75.200	76.000	1600	통풍불량	원곡선	8000	
12	T1,2	76.000	77.800	3600	통풍불량	원곡선	8000	관정굴착
13	T1,2	81.570	82.500	1860	통풍불량(깎기)	곡선	15000	관정굴착
14	T1,2	82.500	83.300	1600	통풍불량(깎기)	곡선	15000	
15	T1,2	83.300	83.900	1200	통풍불량(깎기)	곡선	15000	
16	T1,2	98.619	99.000	762	통풍불량	직선		
17	T1,2	99.000	99.800	1600	통풍불량	직선		관정굴착
18	T1,2	99.800	100.269	938	통풍불량			
19	T1,2	110.000	110.500	1000	통풍불량(깎기)	직선		
20	T1,2	111.800	112.000	400	통풍불량	직선		자주조각수
21	T1,2	116.000	116.200	400	통풍불량	직선		자주조각수
22	T1,2	132.232	133.075	1686	통풍불량	원곡선	7000	자주조각수
23	T1,2	139.800	140.000	400	통풍불량(깎기)	직선		자주조각수
24	T2	153.560	154.400	840	통풍불량	원곡선	500	관정굴착
25	T1	162.401	163.239	838	통풍불량	원곡선	600	

26	T2	162.418	163.257	839	통풍불량	원곡선	600	
27	T1,2	180.268	180.568	600	통풍불량	원곡선	10000	
28	T1,2	183.500	184.500	2000	통풍불량	원곡선	10000	관정굴착
29	T1,2	184.700	185.100	800	통풍불량	원곡선	10000	
30	T2	189.600	189.900	300	통풍불량	직선		
31	T2	190.200	191.000	800	통풍불량	원곡선	15000	
32	T2	191.000	191.700	700	통풍불량	원곡선	15000	
33	T1,2	199.050	199.353	606	통풍불량	직선		
34	T1,2	200.500	200.700	400	통풍불량	직선		저수조설
35	T1,2	207.000	207.200	400	통풍불량	직선		저수조설
36	T1,2	208.600	208.800	400	통풍불량	직선		저수조설
37	T1,2	218.818	219.100	564	통풍불량	직선		저수조설
38	T1,2	221.000	222.000	2000	통풍불량	원곡선	10000	관정굴착
39	T1,2	222.000	222.500	1000	통풍불량	원곡선	10000	
40	T2	223.000	223.600	600	통풍불량	직선		
41	T1	223.300	223.400	100	통풍불량	직선		
42	T1,2	231.000	231.788	1576	통풍불량	직선		
43	T1,2	232.800	233.500	1400	통풍불량	직선		
44	T1,2	233.500	233.900	800	통풍불량	직선		
45	T1,2	241.000	241.200	400	통풍불량	직선		저수조설
46	T1	246.121	246.581	920	통풍불량	원곡선,원화곡선	10000	저수조설
47	T1,2	266.000	266.900	1800	통풍불량	원곡선,원화곡선	2000	

표 6.2 역구내 병렬잠바선 구간 2차 피해 발생 우려 개소(총 2629개소 / 114km)

소속	개소	병렬잠바연장(m)	신축량	WT 신축	PCT 신축	용접 개소	비고
합계	2,629	113,962	306	200	106	14,490	
서울	165	8,181	16	13	3	569	
서부	281	8,261	36	30	6	1,163	
동부	349	11,522	27	15	12	1,182	
강원	101	4,540	0	0	0	907	
충북	188	6,828	40	29	11	479	
대전	506	24,046	40	23	17	1,865	
전북	131	6,259	26	7	19	933	
광주	153	5,638	38	38	0	590	
전남	52	2,706	0	0	0	349	
경북	1	21	1	1	0	4	
대구	211	9,887	34	33	1	1,684	
부산	211	10,956	28	7	21	1,598	
오송	188	10,462	20	4	16	2,502	
경주	49	2,268	0	0	0	562	
정읍	43	2,387	0	0	0	103	

표 6.3 적용 대상 설치 비용

구분	수량	단가	견적가	비고
절손 감지시스템	10	10,000,000원	100,000,000원	필요구간 시범설치
좌굴 감지시스템(3CH)	10	12,000,000원	120,000,000원	필요구간 시범설치

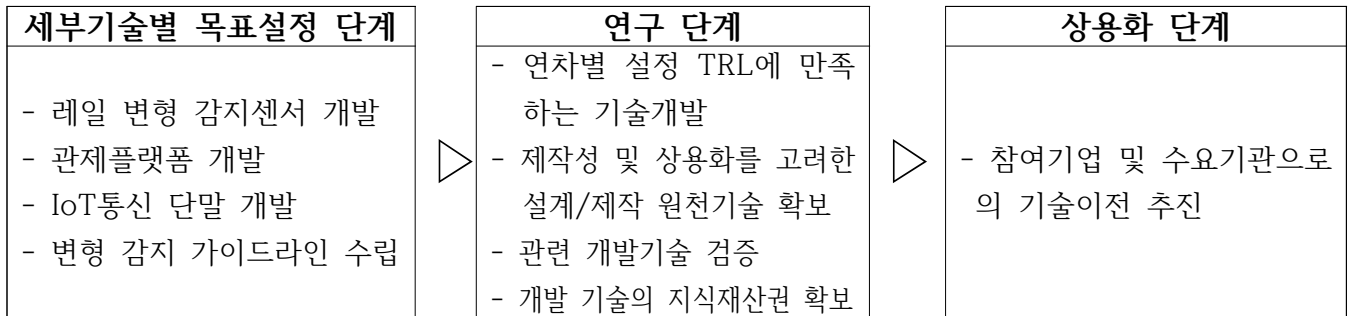
- 절손 감지시스템의 경우 상습 절손 발생 우려개소 10개소(병렬점퍼구간)를 선정하여 시범설치 후 운영을 통해 동절기 절손으로 인한 열차탈선 및 사고를 선제적으로 방지
- 좌굴은 주로 혹서기(여름) 폭염에 따른 온도상승, 도상자갈 유실로 인한 도상횡저항력 약화, 열차운행에 따른 방향틀림이 원인이 되어 발생하며, 한국철도공사는 매년 좌굴 발생을 방지하기 위하여 재설정, 도상횡저항력 확보를 위한 자갈살포 등 좌굴예방을 위한 대책 수립 중
- 그러나, 좌굴발생시 기관사의 통보나, 선로순회점검을 통해서만 확인 가능하여, 좌굴 감지시스템 설치를 통해 상습 좌굴 발생개소의 안전성을 확보와 좌굴발생시 즉시 보수 시행 가능함

6.2 상용화 추진계획

○ 연구개발성과 관리(상용화 추진 계획)

- 본 과제를 위해 제안된 레일변형 감지시스템 세부 기술별 수요기관 및 검증기관을 사전에 발굴/확보하고 연구단계에서 수요맞춤형 개발기술의 검증을 통한 년차별 설정 TRL수준에 만족하는 지적재산권을 확보하여 상용화를 추진함. 최종 개발단계에서 확보한 지적재산권을 바탕으로 상용화수준의 연구결과물을 관련 기술인증과 참여기업 및 수요기관으로 기술이전 추진함

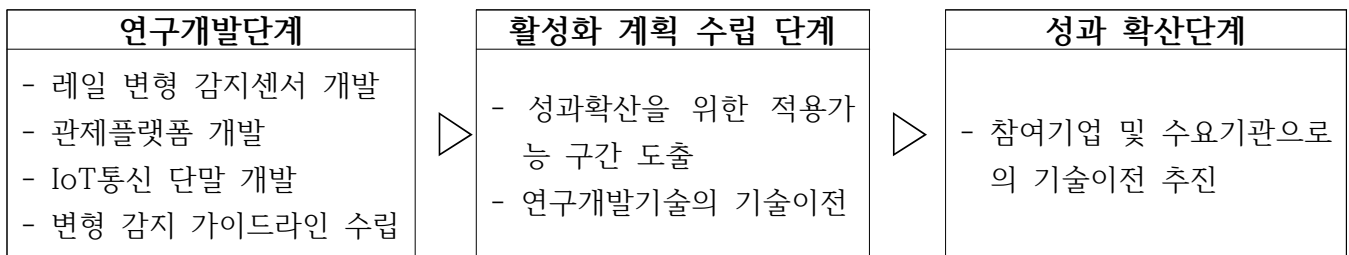
표 6.4 연구개발성과 관리(상용화 추진) 세부 계획



○ 연구개발성과 활용 계획(성과 확산 전략)

- 연구개발단계에서, 개발하고자 하는 레일 절손 및 좌굴 감지시스템 성과도출을 위해 철도 현장 실증을 통한 성능 검증을 진행함
- 활성화 계획 수립 단계에서, 성과확산을 위해 적용이 가능한 산업분야를 도출하고 상용화수준의 연구결과물이 수요처에 기술이전 되도록 계획을 수립함
- 성과확산단계에서는 계획수립단계에서 도출된 산업분야에 해당 기술을 필요로 하는 수요기관을 대상으로 개발된 기술을 적극 홍보함. 관련 기술을 List-up하고 성과를 활용할 계획임

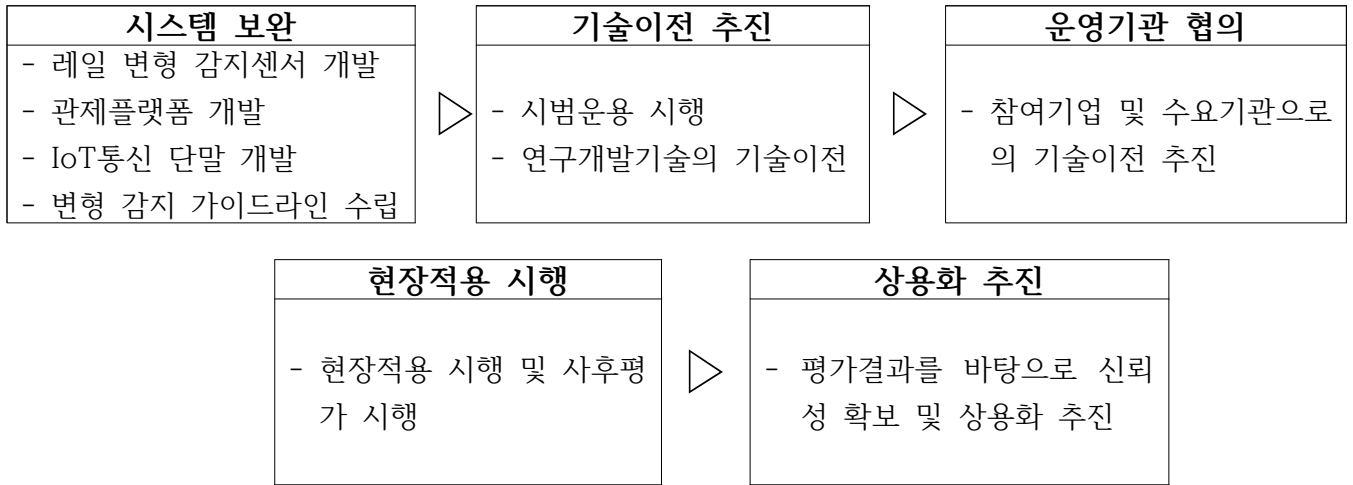
표 6.5 연구개발 성과 확산 전략



○ 레일변형 감지시스템 상용화 세부 계획

- 레일변형 감지시스템의 시범적용을 통한 성능검증 결과 및 운영기관 및 전문가 의견을 반영하여 시스템 최적화
- 특허등록 및 기술이전을 통해 상용화 추진
- 운영기관과의 협의를 통해 대상개소 채택
- 현장적용 완료 후 검증결과와 시스템의 적합성 등 결과 분석
- 현장적용 결과를 바탕으로 신뢰성 확보 및 상용화 추진

표 6.6 상용화 세부계획



○ 운영기관 도입계획

- 철손감지시스템의 경우 병렬점퍼구간중 향후 철손 발생 우려가 되는 구간을 선정하여 설치
- 좌굴감지시스템은 센서의 내구성, 재사용성, 활용성을 고려하여 효율적 좌굴 감지를 위해 기존 시장에서 구입 가능한 센서를 함께 적용할 수 있게 IoT통신 단말 수정 필요
- 변위센서를 활용할 수 있게 3채널 통신단말을 추가 개발 진행
- 한국철도에서 제시한 시범운용 개소에 설치 후 6개월 간 시범운용을 통해 현장적용성과 신뢰성을 추가 검증
- 시범운용 결과를 바탕으로 신뢰성 확보 및 도입 추진

표 6.7 추진일정

구분	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16
좌굴감지용 센서 설정 및 수급																
좌굴 회로 설계 변경/제작																
좌굴 센서 검출 펌웨어 수정 개발																
좌굴 센서 고정 브라켓 설계/제작																
좌굴 센서 측정 내부/현장 시험																
시험개소 선정/설 치(1set)																

6.3 성과점검기준표

1-1. 총괄

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준								양적성과 현황			
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중 치
주관 공동	A	IoT기반 레일 변형(절손 및 좌굴) 감지 시스템	A-1	1.레일 온도센서	①	1.온도센서	-20~80	-20~80	공인시험	시험 성적서	15	철도공사 표준연	221	사제품: <u>2 건</u>	사제품: <u>5 건</u>	
			A-2	2.레일 변화량 측정 센서	②	2.변화량	±2	±2	현장시험	보고서 수록	15	철도공사 표준연	221	테스트베드: <u>2 건</u>	테스트베드: <u>5 건</u>	
			A-3	3.레일 좌굴/절손 검출 정확도	③	3.좌굴/절손 검출 정확도	90	90	현장시험	보고서 수록	15	철도공사 표준연	221	특허: 출원 <u>2 건</u> 특허: 등록 <u>2 건</u>	특허: 출원 <u>3 건</u> 특허: 등록 <u>2 건</u>	
			A-4	5.센싱모듈 간 거리	④	5.센싱모듈 간 거리	100	100	공인시험	시험 성적서	15	철도공사 표준연	221	계약서 <u>1 건</u>	계약서 <u>0 건</u> 과제종료 후 진행	
			A-5	6. 레일상태 모니터링 통신 플랫폼 통신성공률	⑤	6. 레일상태 모니터링 통신성공률	99%	99%	공인시험	시험 성적서	20	철도공사 네이블	221	<u>일자리 창출 : 0건</u>	<u>일자리 창출 : 1건</u>	
			A-6	7. 레일상태 이상 감지 통신 플랫폼	⑥	7. 레일상태 이상 감지 Latency	10초 이내	10초 이내	공인시험	시험 성적서	20	철도공사 네이블	221	논문(바SCI): <u>2 건</u> 논문(SCI): <u>0 건</u>	논문(바SCI): <u>1 건</u> 논문(SCI): <u>2 건</u>	
	계									100			특허: 출원 <u>2 건</u> 등록 <u>2 건</u> 논문(SCI): <u>0 건</u> 논문(바SCI): <u>2 건</u> 사제품: <u>2 건</u> 계약서 <u>1 건</u> 테스트베드: <u>2 건</u> <u>일자리 창출 : 0 건</u>	특허: 출원 <u>3 건</u> 등록 <u>2 건</u> 논문(SCI): <u>2 건</u> 논문(바SCI): <u>1 건</u> 사제품: <u>5 건</u> 계약서 <u>0 건</u> 테스트베드: <u>5 건</u> <u>일자리 창출 : 1 건</u>		

1-2. 1차년도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준									양적성과 현황		
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중치
주관 공동	A	IoT기반 레일 변형(절손 및 좌굴) 감지 시스템	A-1	1.레일 온도센서	①	1.온도센서	-10~70	-10~70	현장조사 및 센서 설계	보고서 첨부	15	철도공사 표준연	44			
			A-2	2.레일 변화량 측정 센서	②	2.변화량	±5	±5	현장조사 및 센서 설계	보고서 첨부	15	철도공사 표준연	44	테스트베드: <u>1건</u>	테스트베드: <u>1건</u>	
			A-3	3.레일 좌굴/절손 검출 정확도	③	3.좌굴/절손 검출 정확도	70	70	현장조사 및 센서 설계	보고서 첨부	15	철도공사 표준연	44	특허: 출원 <u>1건</u>	특허: 출원 <u>1건</u>	
			A-4	5.센싱모듈 간 거리	④	5.센싱모듈 간 거리	30	30	현장조사 및 센서 설계	보고서 첨부	15	철도공사 표준연	44			
			A-5	6. 레일상태 모니터링 통신 플랫폼 통신성공률	⑤	6. 레일상태 모니터링 통신성공률	80%	80%	사전검증 시험	보고서 첨부	20	철도공사 네이블	44			
			A-6	7. 레일상태 이상 감지 통신 플랫폼	⑥	7. 레일상태 이상 감지 Latency	2분 이내	2분 이내	사전검증 시험	보고서 첨부	20	철도공사 네이블	44			
	계									100			특허: 출원 <u>1건</u> 등록 <u>1건</u> 논문(SCI): <u>1건</u> 논문(BCI): <u>1건</u> 계약서: <u>1건</u> 테스트 베드: <u>1건</u>	특허: 출원 <u>1건</u> 등록 <u>1건</u> 논문(SCI): <u>1건</u> 논문(BCI): <u>1건</u> 계약서: <u>1건</u> 테스트 베드: <u>1건</u>		

1-3. 2차년도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준									양적성과 현황		
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중치
주관 공동	A	IoT기반 레일 변형(절손 및 좌굴) 감지 시스템	A-1	1.레일 온도센서	①	1.레일 온도센서	-15~75	-15~75	공인시험	보고서 수록	15	철도공사 표준연	98	사제품: <u>1</u> 건	사제품: <u>1</u> 건	
			A-2	2.레일 변화량 측정 센서	②	2.레일 변화량	±3	±3	현장시험	보고서 수록	15	철도공사 표준연	98	테스트베드: <u>1</u> 건	테스트베드: <u>1</u> 건	
			A-3	3.레일 좌굴/절손 검출 정확도	③	3.좌굴/절손 검출 정확도	80	80	현장시험	보고서 수록	15	철도공사 표준연	98	특허: 등록 <u>1</u> 건	특허: 등록 <u>0</u> 건	
			A-4	5.센싱모듈 간 거리	④	5.센싱모듈간 거리	50	50	현장시험	보고서 수록	15	철도공사 표준연	98			
			A-5	6. 레일상태 모니터링 통신 플랫폼	⑤	6. 레일상태 모니터링 통신성공률	90%	90%	공인시험	보고서 수록	20	철도공사 네이블	98	특허: 출원 <u>1</u> 건	특허: 출원 <u>1</u> 건	
			A-6	7. 레일상태 이상 감지 통신 플랫폼	⑥	7. 레일상태 이상 감지 Latency	1분 이내	1분 이내	공인시험	보고서 수록	20	철도공사 네이블	98			
	계										100			특허: 출원 <u>1</u> 건 등록 <u>1</u> 건 논문(SCI): <u> </u> 건 논문(BSCI): <u> </u> 건 사제품: <u>1</u> 건 테스트베드: <u>1</u> 건	특허: 출원 <u>1</u> 건 등록 <u> </u> 건 논문(SCI): <u> </u> 건 논문(BSCI): <u> </u> 건 사제품: <u>1</u> 건 테스트베드: <u>1</u> 건	

1-4. 3차년도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준								양적성과 현황			
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중치
주관 공동	A	IoT기반 레일 변형(절손 및 좌굴) 감지 시스템	A-1	1.레일 온도센서	①	1.온도센서	-20~80	-20~80	공인시험	시험 성적서	15	철도공사 표준연	78	테스트베드: 0 건	테스트베드: 3 건	
			A-2	2.레일 변화량 측정 센서	②	2.변화량	±2	±2	현장시험	보고서 수록	15	철도공사 표준연	78	일자리 창출: 0 건	일자리 창출: 1 건	
			A-3	3.레일 좌굴/절손 검출 정확도	③	3.좌굴/절손 검출 정확도	90	90	현장시험	보고서 수록	15	철도공사 표준연	78	논문(BQ): 2 건	논문(SQ): 2 건 논문(BQ): 1 건	
			A-4	5.센싱모듈 간 거리	④	5.센싱모듈 간 거리	100	100	공인시험	시험 성적서	15	철도공사 표준연	78	사제품: 1 건	사제품: 4 건	
			A-5	6. 레일상태 모니터링 통신 플랫폼 통신성공률	⑤	6. 레일상태 모니터링 통신성공률	99%	99%	공인시험	시험 성적서	20	철도공사 네이블	78	특허: 등록 1 건	특허: 등록 2 건 특허: 출원 1 건	
			A-6	7. 레일상태 이상 감지 통신 플랫폼	⑥	7. 레일상태 이상 감지 Latency	10초 이내	10초 이내	공인시험	시험 성적서	20	철도공사 네이블	78	계약서 1 건	계약서 1 건	
	계										100			특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문(SQ): 2 건 논문(BQ): 2 건 사제품: 1 건 계약서: 1 건 일자리 창출: 1 건 테스트베드: 3 건	특허: 출원 1 건 등록 2 건 논문(SQ): 2 건 논문(BQ): 1 건 사제품: 4 건 계약서: 1 건 일자리 창출: 1 건 테스트베드: 3 건	

7. 참고문헌

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Hatfield_rail_crash
- [2] <https://www.chagrinsehzmat.com/painesville.html>
- [3] M. P. Papaelias, C. Roberts, and C. L. Davis, "A review on non-destructive evaluation of rails: state-of-the-art and future development," Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.222, pp. 367–384 (2008)
- [4] J. Rajamaki, M. Vippola, and A. Numikolu, T. Viitala, "Limitations of eddy current inspection in railway rail evaluation", Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 232, pp.121–129 (2018)
- [5] S. Shi, Z. Han, Z. Liu, P. Vallely, S. Souza, S. Kaewunruen, and M. Papaelias, "Quantitative monitoring of brittle fatigue crack growth in railway steel using acoustic emission", Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 232, pp. 1211–1224 (2018)
- [6] J. L. Rose, C. M. Lee, and Y. Cho, "A feasibility study of guided wave technique for rail monitoring," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol.26, No. 6, pp. 411–416 (2006)
- [7] G. Kim, M. K. Seo, N. Choi, K. B. Kim, S. Kwon, and Y. Kim, "Development of phased array ultrasonic transducers for detecting defects of KR60 rail road (I) –Simulation by CIVA software", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 37, No. 6, pp. 411–417 (2017)
- [8] G. Kim, M. K. Seo, N. Choi, K. B. Kim, S. Kwon, and Y. Kim, "Development of phased array ultrasonic transducers for detecting defects of KR60 rail road (II) –Fabrication and performance test", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 37, No. 6, pp. 418–425 (2017)
- [9] M. K. Seo, Y. Hwang, G. Kim, S. Kwon, H. J. Kim, T. H. Ha, K. S. Baek, and K. B. Kim, "A study on multi-channel ultrasonic detecting system for high speed rail defect inspection", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 41, No. 1, pp. 59–66 (2021)
- [10] C. Du, S. Dutta, P. Kurup, T. Yu, and X. Wang, "A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors", Sensors and Actuators A: Physical, 303, pp. 1–21 (2020)
- [11] A. Mariscotti, "Rail current measurement with noninvasive large dynamic probe", IEEE Transactions and Instrumentation, Vol. 58, pp. 1610–1616 (2009)
-

-
- [12] G. Liu, H. Liu, A. Wei, J. Xiao, P. Wang, and S. Li, "A new device for stress monitoring in continuously welded rails using bi-directional strain method", *Journal of Modern Transportation*, Vol. 26, No. 3, pp.179–188 (2018)
- [13] D. Read and B. Shust, "Investigation of prototype rail neutral temperature measurement system", *Railway Track and Structures*, Vol.103, No. 6, pp.19–21 (2007)
- [14] C. Nucera and F. Lanza di Scalea, "Nondestructive measurement of neutral temperature in continuous welded rails by nonlinear ultrasonic guided waves," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 136, No. 5, pp.2561–2573 (2014)
- [15] S. Santa-aho, A. Sorsa, A. Nurmikolu, and M. Vippola, "Review of railway track applications of Barkhausen noise and other magnetic testing methods", *Insight*, Vol. 56, Vol. 7, pp.657–663 (2014)
- [16] <http://www.railsonic.co.za/>
- [17] <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/Case%20Study%20-%20Hong%20Kong%20Rail.pdf>
- [18] Y. K. Kim, Y. K. Yoon, J. H. Lee, W. H. Kawk, and K. H. Lee, "A study on the rail rupture detection by the return current", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 65. No. 7, pp.1303–1310, (2016)
- [19] http://www.datatraks.com/PDFs/rail_stress_monitoring_system.pdf
- [20] <https://www.networkrail.co.uk/>
- [21] <https://wabtec-city.fr/SFTPPro>
- [22] J. O. Park, S. H. Park, S. J. An, W. J. Park and J. H. Kim, "Bridge wireless measurement system development based on LoRa IoT", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 23, No. 7, pp.164–171 (2019)
- [23] J. W. Park, "Overview of IoT sensors for structural health monitoring", *Computational Structural Engineering*, Vol.33, No. 3, pp.7–15 (2020)
- [24] B. S. Chowdhry, A. A. Shah, M. A. Uqaili, and T. Memon, "Development of IoT based smart Instrumentation for the real time structural health monitoring", *Wireless Personal Communications*, Vol.113, pp.1641–1649 (2020)

-
- [25] C. Chellaswamy, T. S. Geetha, A. Vanathi, and K. Venkatachalam, "An IoT based rail track condition monitoring and derailment prevention system", *International Journal of RF Technologies*, Vol. 11, No.2, pp. 81–107(2020)
- [26] Y. Zhao, X. Yu, M. Chen, M. Zhang, Y. Chen, X. Niu, X. Sha, Zhikun Zhan, and W. J. Li, "Continuous monitoring of train parameters using IoT sensor and edge computing", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, No. 14, pp.15458–15468 (2020)
- [27] A. A. Shah, N. A. Bhatti, K. Dev, and B. S. Chowdhry, "MUHAFIZ: IoT-based track recording vehicle for the damage analysis fo the railway track", *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 8, No. 11, pp.9397–9406 (2021)
- [28] S. H. Mah, and B. S. Kim, "LoRa technology analysis and LoRa use case analysis by country", *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol. 19, No. 1, pp.15–20 (2019)
- [29] LoRa Alliance, "A technical overview of LoRa and LoRaWAN TM", (2015)
- [30] K. B. Kim, D. Hsu, B. Ahn, and D. Barnard, "Fabrication and comparison of PMN-PT single crystal, PZT, and PZT-based 1–3 composite ultrasonic transducers for NDE applications", *Ultrasonics* Vo. 50, pp.790–797 (2010)
- [31] G. Kim, M. K. Seo, N. Choi, Y. I. Kim, and K. B. Kim, "Comparison of PZT, PZT based 1–3 composite and PMN-PT acoustic emission sensors for glass fiber reinforced plates", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 20, pp.1007–1015 (2019)
- [32] LoRa Alliance Technical committee, "LoRa AllianceTM 1.0.2. Regional Parameters", *LoRaWAN Alliance, Inc.*, pp.43–47 (2017)

< 별첨 >

별첨 자료

1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 성과증빙보고서

2. 최종보고서 별첨자료

3. 연구개발성과 활용보고서

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.

