19RTRP-B097048-05

경전철용 무선급전시스템 적용기술개발 최종보고서

2020

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )

철도기술연구사업 최종보고서

R&D / 19RTRP-B097048-05

경전철용 무선급전시스템 적용기술개발 최종보고서

2020. 09.

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
협동연구기관 / 한국철도기술연구원
한국과학기술원
공동연구기관 / ㈜그린파워
대동콘덴서공업㈜
한국과학기술원
㈜그린파워
㈜우진산전
㈜메트로텍
전기안전연구원
한국교통연구원
위탁연구기관 / 부산교통공사
서울시립대학교
광주광역시도시철도공사
고려대학교
충북대학교
단국대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 (국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘경전철용 무선급전시스템 적용기술개발’(연구개발 기간 : 2015.07.21 ~ 2020.06.30) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2020. 09.

주관연구기관명 :	한국철도기술연구원	(대표자)	나희승	(연구책임자)	이병송
협동연구기관명 :	한국철도기술연구원	(대표자)	나희승	(연구책임자)	김명룡
	한국철도기술연구원	(대표자)	나희승	(연구책임자)	이수길
	한국과학기술원	(대표자)	신성철	(연구책임자)	조동호
공동연구기관명 :	㈜그린파워	(대표자)	조정구	(연구책임자)	조정구
	대동콘덴서공업㈜	(대표자)	장호조	(연구책임자)	이경진
	한국과학기술원	(대표자)	신성철	(연구책임자)	정구호
	㈜그린파워	(대표자)	조정구	(연구책임자)	유효열
	㈜우진산전	(대표자)	김영창, 김상용	(연구책임자)	이영호
	㈜메트로텍	(대표자)	민우영	(연구책임자)	김윤구
	전기안전연구원	(대표자)	조성완	(연구책임자)	정진수
	한국교통연구원	(대표자)	오재학	(연구책임자)	이 호
위탁연구기관명 :	부산교통공사	(대표자)	이종국	(연구책임자)	장문섭
	서울시립대학교	(대표자)	서순탁	(연구책임자)	이승환
	광주광역시도시철도공사	(대표자)	윤진보	(연구책임자)	오상근
	고려대학교	(대표자)	고제상	(연구책임자)	이철웅
	충북대학교	(대표자)	김수갑	(연구책임자)	김 남
	단국대학교	(대표자)	김수복	(연구책임자)	김윤명

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>19RTRP-B097048-05</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2015.07.21. ~ 2020.06.30.</td><td>단계구분</td><td>1단계/1단계</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">철도기술연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">경전철용 무선급전시스템 적용기술개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">이병송</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 588 명
내부: 588 명
외부: 명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부: 19,134,000 천원
민간: 5,390,512 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 24,524,512 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 588 명
내부: 588 명
외부: 명</td><td>총 연구비</td><td>정부: 19,134,000 천원
민간: 5,390,512 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 24,524,512 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">한국철도기술연구원 스마트전기신호본부</td><td colspan="2">참여기업명
㈜그린파워, 대동콘덴서공업㈜, ㈜우진산전, ㈜메트로텍</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: 부산교통공사
서울시립대학교
광주광역시도시철도공사
고려대학교
충북대학교
단국대학교</td><td colspan="2">연구책임자: 장문섭
이승환
오상근
이철웅
김 남
김윤명</td></tr>
</table>

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	-

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록・기탁 번호	18	43	1	2		2					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

구입기관	연구시설・장비명	규격(모델명)	수량	구입연월일	구입가격(천원)	구입처(전화)	비고(설치장소)	NTIS 등록번호
대동콘덴서공업㈜	Cu전극형성기(Cu용사기)	NWE 2016-110	1	2016.12.21	61,570	남우엔지니어링	대동콘덴서공업(주) 1층 용사실	NFEC-2017-01-235872
대동콘덴서공업㈜	커패시터(콘덴서) 자동권취기	KS-990MS	1	2018.9.18	320,000	고려기전	대동콘덴서공업 권취실	NFEC-2018-10-246369

요약 | 보고서 면수

(연구단)
- 세계최초 1MW급 경전철용 무선급전시스템 개발
(1세부) 무선급전 경전철 시스템 통합 및 운용기술개발
- 경전철용 무선급전시스템 통합시험 및 신뢰성 시험을 위한 시험선(1㎞ 이상) 구축
- 경전철용 무선급전시스템 지상 구성품 (급전 선로, 급전 인버터) 개발
- 정적/동적 신뢰성 시험(주행거리 4만㎞ 이상)을 통한 경전철용 무선급전시스템 신뢰성 확보
- 경전철용 무선급전시스템 운영 적합성 평가 및 운영 시나리오 제시
(2세부) 무선급전 경전철 차량 인터페이스 기술개발
- 무선급전 경전철 차량시스템 인터페이스 개발
- 경전철용 무선급전시스템 차상 구성품 (집전장치, DC-DC 컨버터, 에너지 저장장치) 개발
- 정적/동적 신뢰성 시험(주행거리 4만㎞ 이상)을 통한 무선급전 경전철 차량 신뢰성 확보
- 무선급전 경전철 차량 표준사양(안) 제시
(3세부) 도시철도용 무선급전시스템 안전기술 개발
- 도시철도용 무선급전시스템 전기 안전기준 제시
- 도시철도용 무선급전시스템 EMI/EMF 안전기준 제시
- EMI/EMF 감쇄 및 차폐 방안 제시
- 도시철도용 무선급전시스템 경제성 분석

요약문

연구의 목적 및 내용	**<연구 목적>** ○ 경전철용 무선급전시스템 및 Test-Bed 구축을 통한 운영기술 개발 - 최고속도 60km/h(가·감속 3.5km/h/s)급 경전철용 무선급전시스템(효율 85%이상) 개발 및 Test-Bed 시험선(1km이상) 구축을 통한 성능검증 - 경전철용 무선급전 차상장치 개발 및 차량 시운전시험 신뢰성 확보(동적성능시험 4만km이상) **<연구 내용>** ○ 무선급전 경전철 시스템 통합 및 운용 기술 개발 - 무선급전 경전철 시스템 통합 및 운용 기술 개발 - 철도차량 무선급전시스템 모듈형 급전선로 개발 - 경전철용 무선급전시스템 인버터 개발 - 경전철용 무선급전시스템 선로 인터페이스 개발 - 무선급전 고주파 공진용 커패시터 기술 개발 ○ 무선급전 경전철 차량 인터페이스 기술개발 - 무선급전 경전철 차량시스템 인터페이스 기술 개발 - 무선급전 경전철 차량집전시스템 기술 개발 - 무선급전 경전철 차량적용 기술개발 - 무선급전 적용을 위한 차량측 인터페이스 기술 연구 ○ 도시철도용 무선급전시스템 안전기술 개발 - 도시철도용 무선급전시스템 안전 기준 연구 - 무선충전 철도 급집전 EMF 안전기준 요구사항 분석 - 무선충전 철도 급집전 EMF 안전성 영향 분석 - 무선급전 철도 급집전 EMI 안전기준 요구사항 분석 - 도시철도용 무선급집전시스템 안전성 확보 기술 개발 - 무선급전 철도 급집전 EMI 안전성 영향 분석
연구개발성과	○ 무선급전 경전철 시스템 통합 및 운용기술개발 - 무선 급전 경전철 시스템 시험선 - 무선 급전 경전철 시스템 통합 성능 시험 방안 및 성능 기준 - 무선 급전 경전철 시스템 운영 적합성 평가안 및 기준 - 경전철 인프라 인터페이스 영향성 평가 보고서 - 무선급전 경전철 시스템 모듈형 급전 선로 - 급전선로 평탄도 확보 기술 - 무선 급전용 인버터 개발 - 무선 급전용 인버터 유지보수 절차서 - 무선 급전 커패시터 최적화 기술 개발 - 무선급전용 필름 캐패시터 특성 시험 방법 및 신뢰성 평가 방법 및 기준 제시 ○ 무선급전 경전철 차량 인터페이스 기술개발 - 무선급전 경전철 차량 인터페이스 표준사양(안) - 무선급전 집전장치 - 고압, 대전류, 고주파용 정류기 - 경전철 무선급전용 집전장치 유지보수 절차서 - 무선급전 경전철 차량용 DC-DC 컨버터 - 무선급전 경전철 차량용 에너지 저장장치 - 무선급전 경전철 차량 전원안정화 장치 유지보수 절차서 - 무선급전 경전철 차량 조합시험

	- 무선급전 경전철 차량 신뢰성 보고서 ○ 도시철도용 무선급전시스템 안전기술 개발 - 급전장치 전기안전 기준 - 집전장치 전기안전 기준 - 무선급전시스템 EMI 안전 기준 - 무선 집전시스템 EMI 안전 기준 - 급전 EMI 감쇄 및 차폐 모듈 - 집전 EMI 감쇄 및 차폐 모듈 - 급집전 EMF 안전 기준 - 전기안전지원 통신 프로토콜 제안 - 경제성 분석
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 무선급전 경전철 실용화 기술에 활용 - 대용량 고주파 인버터 기술을 활용한 급전시스템 구축 - 고전압, 고전류 급전선로 기술을 활용한 급전선로 구축 - 무선급전 경전철 표준화 기준에 적극 활용 - 향후 계획이 있는 경전철 시스템에 적극 실용화 추진 - 트램, 도시철도 및 일반철도, 고속철도의 급전방식 전환을 통한 실용화 추진 ○ 타 산업분야 무선급전 시스템에 활용 - 항구 타워 크레인의 전력공급을 무선으로 적용하는 기술에 활용 - 전기기관차의 급전을 무선으로 공급하여 전차선을 최소화 사용하는 전기차량 개발에 활용 ○ 기술적 기대 효과 - 배터리 용량에 따른 운행거리 제한 해소, 고속철도 속도한계 극복 등에 활용 - 배터리 용량을 기존대비 50% 수준으로 개발하여 운행거리 제한을 극복하고, 판토그래프 제거를 통해 공기저항 및 소음 감소로 고속철도 속도증속에 유리 ○ 무선급전시스템 안전기준 연구를 통해 보다 안전한 철도시스템 구축에 기여 가능 ○ 기존의 교통시스템에 존재하지 않는 무선충전 철도에 대한 법률적 토대 마련에 참고자료로서 활용될 수 있음 ○ 무선충전 철도에서의 EMI 저감에 대한 원천 기술 확보를 통해 기술 경쟁력 우위를 선점할 수 있음 ○ 철도 이외의 타 교통수단에 대한 무선충전 기술 적용 시 EMI 기준 설정에 있어 참고자료로 활용할 수 있음 ○ 기술적으로 저감 가능한 전자파 수준에 대해 사전 검토하여 이를 기반으로 세계 표준 등의 선점을 위한 도구로서 활용할 수 있음

국문핵심어 (5개 이내)	무선급전	경전철	모듈형 급전선로	고주파 공진형 인버터	집전장치
영문핵심어 (5개 이내)	Wireless Power Transfer	Light Rail	Modular Transmitter Track	High Frequency, High Power Resonant Inverter	Receiver Module

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
가. 연구개발 목적 ····· 1
나. 연구개발 필요성 ····· 1
다. 연구개발 범위 ····· 2
2. 연구수행내용 및 성과 ····· 7
가. 무선급전 경전철 시스템 통합 및 운용기술개발 ····· 7
나. 철도차량 무선 급전 시스템 모듈형 급전 선로 개발 ····· 30
다. 경전철용 무선급전시스템 인버터 개발 ····· 52
라. 무선급전 고주파 공진용 커패시터 개발 ····· 72
마. 무선 급전 경전철 차량 시스템 표준 사양(안) 연구 ····· 84
바. 무선급전 경전철 차량시스템 인터페이스 기술개발 ····· 98
사. 무선급전 경전철 차량집전시스템 개발 ····· 114
아. 무선급전 경전철 차량적용 기술개발 ····· 145
자. 무선급전 전력안정화를 위한 에너지저장 인터페이스 연구 ····· 174
차. 도시철도용 무선충전 전력설비 및 인체 안전 기준 개발 ····· 191
카. 집전장치 전기안전기준 설계 및 분석 ····· 206
타. 급집전 EMI 안전 기준 설계 및 분석 ····· 218
파. 급집전 EMF 안전 기준 설계 및 분석 ····· 231
하. 급집전 EMI 안전성 ····· 250
거. 급집전 EMF 안전성 ····· 262
너. 전기안전지원 통신 프로토콜 검증 ····· 270
더. 경제성 분석 ····· 276
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 296
가. 목표 달성도(1세부) ····· 296
나. 목표 달성도(2세부) ····· 302
다. 목표 달성도(3세부) ····· 308
라. 관련 분야 기여도 ····· 315
4. 연구개발성과의 활용 계획 및 기대효과 ····· 318
가. 활용계획 ····· 318
나. 기대효과 ····· 329
다. 선진기술수준과의 기술격차 ····· 330

<표 목차>

표 1 무선급전 경전철 시험선 구축 ····· 7
표 2 인버터 입력 측정의 각 구간별 전력 ····· 8
표 3 주차별 70 kWh 이상 사용한 전력량 확인 결과 ····· 9
표 4 측정 및 수집항목 ····· 10
표 5 TCMS 데이터 형식 ····· 12
표 6 전원안정화장치 데이터 형식 ····· 12
표 7 집전장치 데이터 형식 ····· 13
표 8 무선급전장치 데이터 형식 ····· 13
표 9 급전선로길이 측정 결과 ····· 14
표 10 급집전 공극 측정 결과 ····· 14
표 11 무선급전 차량 최고속도 결과 ····· 15
표 12 무선급전 동적 집전 시험 결과 ····· 15
표 13 동적시험 운행거리 결과 ····· 15
표 14 왕복횟수 확인 결과 ····· 15
표 15 총 운행거리 확인 결과 ····· 16
표 16 정격부하 종합효율 결과 ····· 16
표 17 측정센서/장비 확인 ····· 17
표 18 최대 효율 데이터 ····· 18
표 19 공칭전압과 값 및 지속시간의 허용한계 (출처: KS C IEC 60850:2014) ····· 19
표 20 운영기관 요구 전압 ····· 20
표 21 출력 전압 결과 ····· 20
표 22 구성품 주요사양 ····· 22
표 23 셔틀 운행 중에 각 인버터가 동작하는 차량의 위치 (단위: m) ····· 27
표 24 기동 순서 확인 ····· 27
표 25 기타 상황 발생 시 ····· 29
표 26 1차 선로 손실 측정 ····· 37
표 27 2차 선로 손실 측정 ····· 38
표 28 형식승인 단품 성능 실험 항목 ····· 38
표 29 형식승인 구성품 실험 항목 ····· 39
표 30 케이블 사양 ····· 42
표 31 평탄도 측정기 주요 사양 ····· 45
표 32 케이블 구성 ····· 47
표 33 케이블 Dimension ····· 47
표 34 급전 인버터 사양 ····· 54
표 35 시스템 전체 손실 및 효율 ····· 57
표 36 차량외부 자기장 세기 측정I ····· 62
표 37 차량외부 자기장 세기 측정 II ····· 62

표 38 플랫폼 자기장 세기 측정 ····· 62
표 39 인버터(L,M위치) 자기장세기 측정 ····· 62
표 40 EMF 측정 인증 규격 ····· 63
표 41 입력 전압에 따른 부하 변동 시험 기준표 ····· 64
표 42 구성품 시험 항목 (KTL, 18-037625-01-1) ····· 64
표 43 주차별 70 ㎾h 이상 사용한 전력량 확인 결과 ····· 106
표 44 1회 왕복거리 확인 결과 ····· 109
표 45 왕복횟수 확인 결과 ····· 112
표 46 총 운행거리 확인 결과 ····· 112
표 47 집전 시스템 사양 ····· 116
표 48 시스템 전체 손실 및 효율 ····· 121
표 49 부하변동에 따른 효율 측정 ····· 124
표 50 차량외부(A,B,C)에서의 자기장 세기 측정 결과 ····· 131
표 51 차량외부(D,E,F)에서의 자기장 세기 측정 결과 ····· 131
표 52 플랫폼(G,H,I)에서의 자기장 세기 측정 결과 ····· 131
표 53 차량외부(J,K)에서의 자기장 세기 측정 결과 ····· 132
표 54 ICNRP Guidelines EMF 규격 ····· 132
표 55 무선급전시스템(인버터, 집전장치) 시험수행 현황 ····· 136
표 56 DC/DC 컨버터 사양 ····· 149
표 57 DC/DC 컨버터 구성품시험 항목 및 결과 ····· 152
표 58 시험선 K-AGT 차량 중량검토 및 기기배치 ····· 154
표 59 하부 기기간 통신 규격 및 사양 ····· 160
표 60 에너지 저장장치 시작품 시험항목 ····· 177
표 61 국토교통부 관련, 기술기준 개정 추진 일정 ····· 197
표 62 무선급전 환경 전기화재 원인 분석에 따른 보호기술 제시(단체 표준) ····· 205
표 63 집전장치의 사고해석 시뮬레이션 조건 ····· 210
표 64 60Hz의 접촉전압, 인체임피던스 및 전류한계값 ····· 211
표 65 부하의 제원 ····· 212
표 66 IEC-62236시리즈 전체규격 내용 ····· 219
표 67 1차 심의 의견에 대한 수정 사항 ····· 223
표 68 1차 심의 의견에 대한 수정 사항 ····· 225
표 69 2차 심의 의견에 대한 수정 사항 ····· 225
표 70 무선급전 방식 관련 내용 추가 및 수정 ····· 227
표 71 무선급전시스템의 EMI 안전기준의 IEC 국제표준과의 비교 ····· 229
표 72 각국의 전자파 인체보호기준 법제화 현황 ····· 232
표 73 ICNIRP Guidelines 1998 및 ICNIRP Guidelines 2010 가이드라인의 분석 ····· 233
표 74 저주파 전자기장에의 인체 노출에 따른 건강영향 주요 결론 요약 ····· 233
표 75 인체 내부에 유도되는 전기장 세기(Dosimetry 결과 분석) ····· 234
표 76 무선급집전 경전철 시스템의 EMF 안전기준(안) ····· 234

표 77 무선급집전 경전철 시스템의 EMF 안전기준(안) ····· 236
표 78 수치해석 입력 파라미터 ····· 236
표 79 측정지점 A, B, C에서의 자기장 세기 측정결과 ····· 239
표 80 측정지점 D, E, F에서의 자기장 세기 측정결과 ····· 239
표 81 측정지점 G, H, I에서의 자기장 세기 측정결과 ····· 239
표 82 측정지점 J, K에서의 자기장 세기 측정결과 ····· 240
표 83 측정지점 L, M에서의 자기장 세기 측정결과 ····· 240
표 84 플랫폼, 차량내부, 인버터에 대한 EMF 안전성 현장검증 결과 ····· 241
표 85 플랫폼(열차 출입문 앞) 자기장 측정 결과 ····· 242
표 86 플랫폼 엣지에서의 자기장 측정 결과 ····· 242
표 87 플랫폼(열차 중간에서의 자기장 세기 측정 결과) ····· 242
표 88 열차내부(객차 연결부)에서의 자기장 측정 결과 ····· 243
표 89 열차내부(출입문 앞)에서의 자기장 측정 결과 ····· 243
표 90 인버터의 자기장 측정 결과 ····· 244
표 91 1차 단체 표준 심의 의견에 따른 조치사항 ····· 244
표 92 인버터 차폐 시 EMF 측정 결과 (단위: uT) ····· 264
표 93 반지름별 차폐코일 적용 시뮬레이션 결과 ····· 267
표 94 반지름별 차폐코일 적용 시뮬레이션 결과 ····· 268
표 95 차체가 없는 경우에 대한 EMF 측정 결과 ····· 269
표 96 차체가 있는 경우에 대한 EMF 측정 결과 ····· 270
표 97 경전철 전송 데이터 ····· 272
표 98 무선급전 인버터 전송 데이터 ····· 273
표 99 무선급전 철도시스템 도입 시 비용항목 변동 여부 ····· 283
표 100 무선급전 철도시스템 도입 시 감소되는 터널 단위공사비용 ····· 283
표 101 전력 표준공사비(세부적 기준) ····· 284
표 102 무선급전 시스템 도입 시 중량전철 전력설비, 송전선로, 변전설비 감소비용 ····· 284
표 103 무선급전 시스템 도입 시 경량전철 변전설비 감소비용 ····· 285
표 104 급전선로구축 시스템 단가 ····· 285
표 105 철도부문의 교통사고비용 원단위(2007년 기준) ····· 286
표 106 철도사고통계(감전사고) ····· 286
표 107 중량전철(일반철도) 전차선 유지보수 인원 산정 ····· 287
표 108 중량전철 유지보수 절감편익 ····· 287
표 109 경량전철 전차선 유지보수 인원 산정 ····· 288
표 110 경량전철 유지보수 절감편익 ····· 288
표 111 변수의 정의 및 표본 통계 ····· 289
표 112 공변량을 포함한 WTP모형의 추정 결과 ····· 290
표 113 WTP모형 추정 결과 ····· 290
표 114 경관개선편익을 위한 원단위 결과 ····· 290
표 115 건설비 단위절감편익 요약 ····· 291

표 116 무가선트램에 무선급전시스템 적용시 사업비 절감비용 ····· 293
표 117 타국가에 대한 정시성 가치 ····· 294
표 118 국내 경전철 및 트램 추진 상황 ····· 318
표 119 부산 용호선 트램차량 기준 하부 공간검토 ····· 321
표 120 위례트램 변전소 구성안 ····· 326
표 121 위례트램 무선급전 적용시 변전소 구성안 ····· 326
표 122 무선급전시스템 국외시스템 기술비교 ····· 332

< 목 차 >

그림 1 (a) 부하에서 소모되는 전력 프로파일(지령) (b) 인버터 입력 전력 측정 ····· 8
그림 2 정적시험을 위한 운영시스템 ····· 8
그림 3 정적시험 환경 ····· 8
그림 4 경산 시험선 구간별 제한속도 ····· 9
그림 5 시험역 설정 (a) 2개 역사 (b) n개 역사 ····· 11
그림 6 TrainLogViewer로 확인한 로그데이터 ····· 12
그림 7 무선급전시스템 동적 시험차량 및 관제 시스템 확인 ····· 13
그림 8 동적시험 시험성적서 (KTL, 20-031895-01-1) ····· 14
그림 9 KP 간격 확인 ····· 14
그림 10 급전선로길이 측정 결과 ····· 14
그림 11 차량 최고속도 및 집전 차량 충전 시작 및 충전 종료 구간 확인 ····· 15
그림 12 충전 종료 직전 속도 및 PICKUP1-1 전류값 확인 ····· 15
그림 13 경전철 무선급전 시스템 효율 측정 구성 ····· 17
그림 14 효율 시험 측정 결과 ····· 17
그림 15 B역에서 출발했을 때의 입출력 특성 (빨강: 집전장치, 속도; 검정: 인버터) ····· 20
그림 16 B-1역에서 출발했을 때의 입출력 특성 (빨강: 집전장치, 속도; 검정: 인버터) ····· 20
그림 17 셔틀운행 로그 데이터 (차량속도 및 출력전압) ····· 21
그림 12 무선급전 시험선 (1.87km, 정거장 4개소) ····· 23
그림 13 통합운영관제시스템의 구성 ····· 23
그림 14 무선급전 운영시스템 통신망 구성 방안 ····· 24
그림 15 운전모드 제어 명령 흐름도 ····· 24
그림 16 인버터 동작 상태 ····· 24
그림 17 열차위치에 따른 무선급전 운전 제어 ····· 25
그림 18 안전관리 조직도 ····· 25
그림 19 동적시험 수행 체계 ····· 25
그림 20 왕복시간 및 최대 속도 ····· 26
그림 21 무인 운행 시 구간별 최대 속도 구간 ····· 26
그림 22 셔틀 운행 구간 확인 ····· 26
그림 23 운행 시간표 설정 ····· 26
그림 24 관제실 ····· 27
그림 25 변전실계통 스크린 ····· 27
그림 26 콘솔 스크린 확인 ····· 27
그림 27 관제 스크린 ····· 27
그림 28 차상장치 구성품 확인 ····· 27
그림 29 운전실 조작부 확인 ····· 27
그림 30 광주도시철도공사 인력 조직 및 업무 내용 ····· 29
그림 31 광주도시철도공사의 무선급전 운영 참여 검증 ····· 30

그림 32 캐패시터 직렬 연결 설계 ····· 31
그림 33 조립형 캐패시터 박스 ····· 31
그림 34 압출형 함체 ····· 32
그림 35 회전형 구조물 ····· 32
그림 36 높이 조절을 위한 앵커 볼트 ····· 32
그림 37 앵커 볼트 금형 설계 ····· 32
그림 38 본선 기초 공사 ····· 33
그림 39 신축 이음부 철근 ····· 33
그림 40 철근 구조 급전선로(페라이트 코어 20 T 적용, 집전 전압 유지) ····· 34
그림 41 철근과 급전선로 간 간격에 따른 손실 실험 ····· 34
그림 42 철근 영향이 없는 상태 측정 ····· 34
그림 43 철근 및 페라이트 적용 손실 실험 결과 ····· 35
그림 44 결합 구조 캐패시터 설계 ····· 36
그림 45 캐패시터 시작품 제작 ····· 36
그림 46 결합 구조 개선 ····· 36
그림 47 케이블 포설 ····· 36
그림 48 공사 완료 점검 ····· 36
그림 49 대동콘덴서 개발품 ····· 36
그림 50 외산 캐패시터 ····· 36
그림 51 인버터 세팅 ····· 37
그림 52 500 A, 60 kHz 통전 실험 ····· 39
그림 53 전류 통전 실험 파형 ····· 39
그림 54 전류 통전 실험 파형 확대 ····· 39
그림 55 현장 적용 모식도 ····· 40
그림 56 현장 적용 예시도 ····· 40
그림 57 실리콘 패드 적용 ····· 40
그림 58 실리콘 몰딩액 적용 ····· 40
그림 59 경산 시험 선로 설치 예정 지역 계획 평면도 ····· 40
그림 60 직선 구간 시험 포설 ····· 41
그림 61 곡선 구간 시험 포설 ····· 41
그림 62 케이블 저항 측정 Set-up ····· 41
그림 63 단말 처리 케이블 측정 결과 ····· 41
그림 64 케이블 저항 측정 Set-up ····· 42
그림 65 케이블 저항 측정 결과 ····· 42
그림 66 케이블 집합 구조 ····· 42
그림 67 급전선로 케이블 제작 ····· 42
그림 68 A 역사 급전선로 설치 ····· 42
그림 69 곡선 구간 설치 ····· 42
그림 70 단위 길이 3m 측정 ····· 43

그림 71 단위 모듈 3m 실측 ····· 43
그림 72 선로 절연 내압 실험 ····· 43
그림 73 선로 정격 전류 측정 파형 ····· 43
그림 74 구성품 연계 조합 시험 ····· 43
그림 75 구성품 시험 장치 구성도 ····· 43
그림 76 전류 통전 500 Arms ····· 44
그림 77 평탄도 측정기 설계도 ····· 45
그림 78 평탄도 측정기 제작품 ····· 45
그림 79 A 역사 평탄도 측정 ····· 45
그림 80 평탄도 측정 ····· 45
그림 81 급전선로 함체 시작품 ····· 45
그림 82 급전선로 단면도 ····· 45
그림 83 PC, ASA, MC 나일론 재질 시사출 제품 ····· 46
그림 84 앙카 볼트 브라켓 제품도 ····· 46
그림 85 급전선로 모듈 구성품 상세 설계 ····· 46
그림 86 시사출 가조립 확인 ····· 46
그림 87 250 kg 이상 하중 실험 ····· 46
그림 88 케이블 Sheath 특성 ····· 47
그림 89 케이블 인증 사양 ····· 47
그림 90 케이블 실험 성적서 ····· 47
그림 91 기존 캡박스 ····· 48
그림 92 FAN 보강 신규 캡박스 ····· 48
그림 93 FRP 재질 캐패시터 박스를 위한 제작 금형 ····· 48
그림 94 케이블 포설 ····· 48
그림 95 급전선로 높이 조절 ····· 48
그림 96 집전장치 공극 조절 ····· 49
그림 97 차량 실험 주행 ····· 49
그림 98 감열선 설치 ····· 49
그림 99 2병6직 캐패시터 ····· 49
그림 100 A 역 구간 연장 ····· 49
그림 101 B역 급전선로 설치 ····· 49
그림 102 B-1 역 포설 완료 ····· 49
그림 103 C 역 공사 완료 ····· 49
그림 104 D 역 200 m 급전선로 ····· 50
그림 105 D 역 정차중 충전 급전선로 ····· 50
그림 106 난연 재질 신규 캡박스 ····· 50
그림 107 캡박스 높이 축소 (30mm) ····· 50
그림 108 A 역 신규 캡박스 교체 ····· 50
그림 109 B 역 신규 캡박스 교체 ····· 50

그림 110 기존 캐패시터 모듈 ····· 51
그림 111 보강형 캐패시터 모듈 ····· 51
그림 112 신규 개발 캐패시터 박스 ····· 52
그림 113 신규 제작 캐패시터 박스 ····· 52
그림 114 공기 유로 적용 ····· 52
그림 115 인버터 스텍 ····· 55
그림 116 인버터 패널 공진형 커패시터 ····· 55
그림 117 1.2MW 급전 인버터 시스템 회로 구성도 ····· 56
그림 118 제작된 인버터 패널 전면부(3SET) ····· 57
그림 119 제작된 집전장치 & 집전정류기 ····· 57
그림 120 전류 회생방식의 시험 구성도 ····· 57
그림 121 최대 부하시 인버터 패널 표시 전압 및 전류 ····· 58
그림 122 집전시스템 출력 전류(1~4) ····· 58
그림 123 시스템 손실분 ····· 58
그림 124 현장 인버터 설치 사진 ····· 59
그림 125 집전장치 설치 사진 ····· 59
그림 126 부하 변동 ····· 59
그림 127 부하 변동 시 입출력 전압 파형 ····· 59
그림 128 1MW 시험 파형 ····· 59
그림 129 1MW시 출력 전압전류 ····· 59
그림 130 1MW 출력 시 입력전력 ····· 60
그림 131 입력 전압 750V시 선로 주파수 ····· 60
그림 132 인버터 패널 구조 ····· 61
그림 133 실제 인버터 전면부 & 후면부 ····· 61
그림 134 수냉식 인버터 스텍 ····· 61
그림 135 동축형 케이블의 자계 ····· 61
그림 136 동축 케이블 제작1 ····· 62
그림 137 동축 케이블 제작2 ····· 62
그림 138 케이블 단면 ····· 62
그림 139 경산 시험선 EMF 측정 방법 ····· 62
그림 140 인버터 패널 방진 방수용 EMI/EMF차폐 쉴드 ····· 63
그림 141 200도 가열된 니크롬선 ····· 63
그림 142 입력전압 750V(90% -> 100%) ····· 64
그림 143 입력전압 750V(100% -> 90%) ····· 64
그림 144 인증 시험 성적서(급전인버터 & 집전시스템) ····· 65
그림 145 운행제어 시스템 구성도 ····· 65
그림 146 경산 시험선 인버터 패널 설치 및 통신 시험 진행 ····· 66
그림 147 급전선로 감열선 설치 및 동작 사례 ····· 66
그림 148 급전 인버터 신규 모델 제작 ····· 67

그림 149 트램 적용 급전 패드 설계 ····· 67
그림 150 트램 적용 집전 패드 ····· 67
그림 151 급전패드 & 집전패드 전력순환 시험 이미지 ····· 68
그림 152 전력순환방식을 이용한 급전패드 & 집전패드 신뢰성 시험 회로 구성도 ····· 68
그림 153 전력 순환 방식을 이용한 급전패드 & 집전패드 신뢰성 시험 시험 데이터 ····· 68
그림 154 전력 순환 시험 시 각부위별 파형 ····· 69
그림 155 트램용 급전패드, 집전패드를 활용한 Super Cap 충방전 시험 회로 구성 ····· 69
그림 156 Super Capacitor bank 모듈 구성(10직 16병렬) ····· 70
그림 157 CONV1,2 집전&급전패드, ACL,C-bank, 절연변압기,인버터 스텍, 시험구성 이미지 ····· 70
그림 158 슈퍼캡 모의 충전 시험 ····· 71
그림 159 200kW 슈퍼캡 충방 시험 ····· 71
그림 160 230kW 충전 시 DC-DC컨버터(CONV1) 출력부 전압 전류 ····· 71
그림 161 230kW Supper capacitor 충방 시험 ····· 71
그림 162 커패시터 소자구조 형상 설계 ····· 72
그림 163 공진용 커페시터의 최적화된 구조도 ····· 73
그림 164 개발대상 적용 커패시터의 최적화된 구조 ····· 73
그림 165 공진용 커패시터 450kvae 1000Vrms 1.34㎌ 사양서 ····· 74
그림 166 공진용 커패시터 최종품 사진 ····· 74
그림 167 캡박스내 커패시터 기본 배치 안 ····· 74
그림 168 캡박스내 커패시터 기본 배치 구조도 및 배치 ····· 75
그림 169 공진용 커패시터의 기존기술과 연구성과물 비교표 ····· 75
그림 170 급전선로와 연결된 캡박스 ····· 76
그림 171 유지점검 보수결과 ····· 76
그림 172 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서 ····· 77
그림 173 유지점검 보수결과 ····· 77
그림 174 공진용 커패시터 시험품 1000Vrms 1.34㎌ 사양서 ····· 78
그림 175 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서 ····· 78
그림 176 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험 ····· 79
그림 177 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험 ····· 79
그림 178 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험 ····· 79
그림 179 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험 ····· 80
그림 180 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험 ····· 80
그림 181 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험 ····· 80
그림 182 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험 ····· 80
그림 183 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서 ····· 81
그림 184 커패시터 시험장비 항목에 대한 공인기관 시험 ····· 81
그림 185 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서 ····· 82
그림 186 커패시터 시험 항목에 대한 공인기관 시험 ····· 82

그림 187 커패시터 시험장비 항목에 대한 공인기관 시험 ····· 83
그림 188 커패시터 시험장비 항목에 대한 공인기관 시험 ····· 83
그림 189 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서 ····· 83
그림 190 커패시터 시험 항목에 대한 공인기관 시험 ····· 84
그림 191 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서 ····· 84
그림 192 커패시터 시험 항목에 대한 공인기관 시험 ····· 84
그림 193 타 유사 시스템을 고려한 요구사항 분석 ····· 85
그림 194 무선급전 경전철시스템 표준사양(안) 초안 ····· 86
그림 195 경산에 설치된 테스트베드 구성 배치도 ····· 89
그림 196 ICNIRP Guideline 2010 ····· 89
그림 197 3점 측정법에 근거한 급전선로에서의 직업인 EMF 측정 방법 ····· 89
그림 198 IEC62236 변전소의 방출 한계값 ····· 90
그림 199 IEC62236 정지시험/저속시험의 방출 한계값 ····· 90
그림 200 저속 운행시 발생하는 방출의 한계값 ····· 93
그림 201 IEC62236-2 시험 방법 ····· 93
그림 202 3점 측정법에 근거한 인버터에서의 일반인/직업인 EMF 측정 방법 ····· 94
그림 203 3점 측정법에 근거한 플랫폼에서의 일반인 EMF 측정 방법 ····· 96
그림 204 3점 측정법에 근거한 차량 내부에서의 일반인 EMF 측정 방법 ····· 96
그림 205 3점 측정법에 근거한 차량 내부 의자에서의 일반인 EMF 측정 방법 ····· 96
그림 206 부산 4호선 2014년 7월 30일 하계피크부하 데이터 ····· 99
그림 207 부산 경전철 차량에너지 분석 데이터 ····· 100
그림 208 무선급전 전원안정화장치 시뮬레이션 블럭도 ····· 101
그림 209 무선급전 전원안정화장치 정상조건 시뮬레이션 ····· 101
그림 210 무선급전 전원안정화장치 용량별 시뮬레이션 ····· 102
그림 211 무선급전 전원안정화장치 상정사고 시뮬레이션(1개소 고장) ····· 102
그림 212 무선급전 전원안정화장치 상정사고 시뮬레이션(2개소 고장) ····· 103
그림 213 무선급전 전원안정화장치 상정사고 시뮬레이션(3개소 고장) ····· 103
그림 214 경산 시험선 전력량 시뮬레이션 (A-B역 왕복 시) ····· 104
그림 215 집전장치 및 전원안정화장치 C역사(첨단역) 정적신뢰성시험 ····· 105
그림 216 무선급전 운행제어시스템 구성 ····· 105
그림 217 부하에서 소모되는 전력 프로파일 (지령) ····· 106
그림 218 인버터 입력 전력 측정 ····· 106
그림 219 동적신뢰성 평가를 위한 신뢰성 활동 범위 분류 ····· 108
그림 220 안전관리 조직도 ····· 108
그림 221 동적시험 수행 체계 ····· 108
그림 222 왕복 소요시간 및 셔틀 운행 최대 속도 조건 ····· 109
그림 223 기존 시험선 속도제한이 무인 운행 시 구간별 최대 속도 구간 ····· 109
그림 224 셔틀 운행 구간 확인 ····· 109
그림 225 유지보수 시간표 설정 ····· 110

그림 226 무선급전시스템 시험 차량 및 관제 화면 ····· 110
그림 227 무선급전 제어 관제 스크린 ····· 110
그림 228 차량 최고속도 및 집전 차량 충전 시작 및 충전 종료 구간 확인 ····· 111
그림 229 충전 종료 직전 속도 및 PICKUP1-1 전류값 확인 ····· 111
그림 230 무선급전 경전철 동적시험 성적서 ····· 113
그림 231 집전 시스템 차량 하부 설치 이미지 ····· 114
그림 232 집전코일-집전장치 구조 ····· 116
그림 233 집전코일-집전장치 설계 구조 ····· 117
그림 234 실제 제작 완료한 집전 시스템 이미지 ····· 117
그림 235 집전 시스템 설계를 반영한 차량 하부 설치 이미지 ····· 118
그림 236 집전 시스템 1조(4SET)를 이용한 Power test 시험 구성 ····· 118
그림 237 제작된 집전장치 & 집전정류기 ····· 119
그림 238 집전패드와 집전정류기의 시스템 구성도 ····· 120
그림 239 전류 회생 방식의 시험 구성도 ····· 120
그림 240 집전 출력전압 ····· 121
그림 241 인버터 패널 표시 전압 및 전류 ····· 121
그림 242 집전시스템 출력 전류(1~4) ····· 121
그림 243 시스템 손실분 ····· 122
그림 244 경산 시험선 현장 인버터 설치 사진 ····· 122
그림 245 집전장치 설치 사진 ····· 122
그림 246 부하 변동 ····· 122
그림 247 1MW 시험 파형 ····· 123
그림 248 부하 변동 시 입출력 전압 파형 ····· 123
그림 249 1MW시 출력 전압전류 ····· 123
그림 250 부하 변화량에 따른 입출력 전압 변동률 ····· 124
그림 251 스위칭 주파수 측정 ····· 125
그림 252 인증 저울 측정 ····· 125
그림 253 실제 측정 무게 ····· 126
그림 254 집전판 가로, 세로 크기 사이즈 ····· 126
그림 255 집전판 높이 사이즈 ····· 126
그림 256 실제 측정 사이즈 ····· 127
그림 257 집전 정류기 가로 세로 사이즈 ····· 127
그림 258 집전 정류기 높이 사이즈 ····· 127
그림 259 실제 측정 사이즈 ····· 127
그림 260 무선 급전 시스템 시뮬레이션 모델 ····· 128
그림 261 무선 급전 시스템 시뮬레이션 결과 (급전트랙 500A) ····· 128
그림 262 무선 급전 시스템 시뮬레이션 결과 (급전트랙 500A 단면도) ····· 129
그림 263 무선 급전 시스템 시뮬레이션 결과 (집전코일 460A) ····· 129
그림 264 무선 급전 시스템 ····· 130

그림 265 경산 시험선 EMF측정 방법 ····· 130
그림 266 실시간 공진 튜닝 시험장치 ····· 132
그림 267 250kW 인가시 시험 파형 ····· 133
그림 268 공진 변경장치 구동 ····· 133
그림 269 단품 정류기 및 집전 시스템 이미지 ····· 134
그림 270 전압 변동 시험(750V->900V->750V) ····· 134
그림 271 전압변동 시험(750V->500V->750V) ····· 134
그림 272 집전시스템 경전철 하부 장착 모습 ····· 135
그림 273 경산 시험선 인버터 패널 설치 및 통신 시험 진행 ····· 135
그림 274 출력차단기가 추가된 집전 시스템 회로도 ····· 137
그림 275 인증 시험 성적서(급전인버터 & 집전시스템) ····· 138
그림 276 트램 적용 급전 패드 설계 ····· 139
그림 277 트램 적용 집전 패드 ····· 139
그림 278 급전패드 & 집전패드 전력순환 시험 이미지 ····· 139
그림 279 전력순환방식을 이용한 급전패드 & 집전패드 신뢰성 시험 회로 구성도 ····· 140
그림 280 전력 순환 방식을 이용한 급전패드 & 집전패드 신뢰성 시험 시험 데이터 ····· 140
그림 281 전력 순환 시험 시 각부위별 파형 ····· 140
그림 282 트램용 급전패드, 집전패드를 활용한 Super Cap 충방전 시험 회로 구성 ····· 141
그림 283 Super Capacitor bank 모듈 구성(10직 16병렬) ····· 141
그림 284 CONV1,2 집전&급전패드, ACL,C-bank, 절연변압기,인버터 스텍, 시험구성 이미지 ····· 142
그림 285 Super capacitor 모의 충전 시험 ····· 142
그림 286 200kW Supper capacitor 충방 시험 ····· 143
그림 287 230kW 충전 시 DC-DC컨버터(CONV1) 출력부 전압 전류 ····· 143
그림 288 230kW Supper capacitor 충방 시험 ····· 144
그림 289 PICK UP 출력 전압 제어방식 ····· 145
그림 290 저장매체 병렬제어 DC/DC 컨버터 제어방식 ····· 145
그림 291 저장매체 단독제어 DC/DC 컨버터 제어방식 ····· 146
그림 292 슈퍼캡 제어용 DC DC CONVERTER 시스템 회로도 ····· 146
그림 293 인터리브드 방식의 DC/DC 컨버터 회로도 ····· 147
그림 294 전류 불연속 모드 및 전류 연속 모드 ····· 147
그림 295 IGBT 스위칭시 전압과 전류의 관계 및 출력 전류 ····· 147
그림 296 시뮬레이션 결과 : 충전모드 및 방전모드 ····· 148
그림 297 전원안정화 장치 주회로 ····· 149
그림 298 DC DC 컨버터 2D 설계 ····· 149
그림 299 DC DC 컨버터 외형 ····· 150
그림 300 제어장치 보완품 ····· 150
그림 301 DC/DC 컨버터 3D 설계 ····· 150
그림 302 DC/DC 컨버터 구성 ····· 150

그림 303 DC DC 컨버터 3D 설계 및 외형(500Kw급) ····· 151
그림 304 DC/DC 컨버터 인터페이스 회로 ····· 151
그림 305 인터리브드 방식의 DC/DC 컨버터 회로도 ····· 151
그림 306 DC/DC 컨버터 및 배터리 연계시험 성적서 ····· 153
그림 307 무선급전차량의 주회로 시스템 ····· 153
그림 308 KAGT 구성 (MC1 - MC2) ····· 155
그림 309 강압쵸퍼와 승압 쵸퍼의 양방향 제어 ····· 155
그림 310 집전장치 따른 취부 검토(250kg/Unit ····· 156
그림 311 무선급전시스템 배치도 ····· 156
그림 312 안정화 장치 배치도 ····· 157
그림 313 무선급전 전용 차량의 기기배치(안) ····· 158
그림 314 무선급전용 차량인터페이스 (안) ····· 159
그림 315 K-AGT (신호시험차량) 종합제어장치 구성도 ····· 159
그림 316 개조 범위 및 기기 배치 ····· 161
그림 317 MC1 차량 배치 ····· 162
그림 318 MC2 차량 배치 ····· 162
그림 319 K-AGT 이동 및 개조 작업 ····· 162
그림 320 연계시험 구성 및 과충전 과방전 보호시험 ····· 167
그림 321 충전 시험(8.4C & 8.5C) ····· 167
그림 322 DC/DC 주회로 모델링 ····· 168
그림 323 충방전 제어 연속 동작 확인 ····· 168
그림 324 경산시험선의 동적시험 구축 ····· 168
그림 325 제어방법에 따른 흐름도 ····· 169
그림 326 DC/DC 컨버터 유지보수점검표 ····· 171
그림 327 DDC CHILLER 수 냉각기 ····· 171
그림 328 DC/DC 컨버터 CHILLER 유지보수점검표 ····· 172
그림 329 동적시험시 차량 배치 ····· 172
그림 330 차량단위의 냉각방식 ····· 173
그림 331 LTO Packing 구조 ····· 174
그림 332 배터리팩 구성도 ····· 175
그림 333 에너지 저장장치 시스템 구성 ····· 176
그림 334 에너지 저장장치 시스템 구성 ····· 176
그림 335 LTO 배터리팩 사진 ····· 176
그림 336 NSC 배터리팩 사진 ····· 176
그림 337 LTO 배터리팩 시험파형 ····· 177
그림 338 LTO 배터리팩 시험사진 ····· 177
그림 339 LTO 배터리팩 추가 2SET ····· 178
그림 340 에너지 저장장치 시험설비 ····· 178
그림 341 배터리 전압 확인 ····· 180

그림 342 에너지 저장장치 차량 배치도 ····· 180
그림 343 배터리팩 Rack 구조 ····· 181
그림 344 배터리 RACK 설치 ····· 181
그림 345 에너지 저장장치 K-AGT 차량 설치도 ····· 182
그림 346 에너지 저장장치 K-AGT 차량 설치 사진 ····· 182
그림 347 차량개조 에너지 저장장치 배치도 및 사진 ····· 183
그림 348 무선급전시스템 도입을 위한 기술기준 개정(안), 전선로 위치 관련 ····· 198
그림 349 무선급전시스템 전기안전 확보를 위한 기술기준 개정(안), 기존 제3레일을 기반으로 한 무선급전시스템 환경 전기안전 사항 업데이트 ····· 199
그림 350 무선급전시스템 전기안전 확보를 위한 기술기준 개정(안), 신 전기환경 도입에 따른 유도전위 관련 무선전도 위해성 및 보호방안 사항 제시 ····· 199
그림 351 단체표준 제정 완료 보고 ····· 200
그림 352 기술기준 제출 완료 보고 ····· 200
그림 353 현장 위해상황 발굴 모식도 ····· 201
그림 354 현장 위해상황 원인 분석도 ····· 201
그림 355 정읍실증실험장 모식도, 급전선로와 접지선의 이격에 따른 접지선의 영향분석 201
그림 356 접지선에 발생하는 노이즈성 신호 분석, 표유정전용량과 유도현상의 복합적 신호 발생 ····· 202
그림 357 전력설비와 인근전기환경의 접지 구분에 따른 접지선의 영향분석 ····· 202
그림 358 철도환경에서 쓰이는 공통접지 조건(좌)과 전력인버터와 인근 소내전력을 독립시킨 조건(중,우) 결과 ····· 203
그림 359 급전선로와 접지선이 평행하며, 평행구간이 긴 기존 접지환경 ····· 203
그림 360 급전선로와 접지선이 평행하며, 평행구간을 일정 수준으로 제어하는 접지환경 204
그림 361 집전장치를 포함한 전체계통 모델링 ····· 209
그림 362 무선전력전송시스템 집전부의 구성도 ····· 211
그림 363 정상(비고장)조건시 60kHz 주파수에서의 전압한계 ····· 212
그림 364 차폐전 실험장치 구성 ····· 213
그림 365 차폐전 실험 결과 ····· 213
그림 366 차폐후 실험결과 ····· 213
그림 367 레귤레이터 기준 전위차 발생 ····· 214
그림 368 유도순환전류 흐름도 ····· 214
그림 369 접지시스템 구성방안 ····· 215
그림 370 그룹별 접지시스템 구축방안 ····· 215
그림 371 고조파 계측지점(POE) ····· 216
그림 372 철도차량 기술기준(Part53. 고무차량 경전철)에 집전전기안전 관련 내용 추가 · 217
그림 373 집전전기안전 기술기준 제출 공문 ····· 218
그림 374 변전소의 방출 한계값 ····· 222
그림 375 개방된 경전철 경로/고속시험의 방출 한계값 ····· 222
그림 376 변전소/정지시험/저속 시험의 방출 한계값 ····· 222

그림 377. 최종 급전 EMI/EMC 안전기준 및 시험 기준(안) ····· 224
그림 378. 최종 집전 EMI/EMC 안전기준 및 시험 기준(안) ····· 226
그림 379 3.1 일반사항에 비접촉 급전방식의 집전장치 추가 ····· 227
그림 380 유도장애시험 변경 내용 ····· 228
그림 381 급집전 EMI 안전 기준 제출 공문 ····· 228
그림 382 차량외부에서의 전자파 노출량 측정위치(직업인만 적용) ····· 235
그림 383 플랫폼에서의 전자파 노출량 측정 위치 (직업인, 일반인 모두 적용) > ····· 235
그림 384 차량 내부에서의 전자파 측정위치(직업인, 일반인 모두 적용) ····· 235
그림 385 고정설비에 대한 전자파 측정위치 ····· 236
그림 386 수치해석을 위한 무선 급집전 시스템 모델링 ····· 236
그림 387 해석지점 A에서의 자기장 세기 해석 결과 ····· 237
그림 388 해석지점 B에서의 자기장 세기 해석 결과 ····· 237
그림 389 해석지점 C, D에서의 자기장 세기 해석 결과 ····· 237
그림 390 해석지점 E, F, G, H에서의 자기장 세기 해석 결과 ····· 238
그림 391 < 경산시험소 EMF 측정 위치 > ····· 238
그림 392 자기장 세기 측정 모습 ····· 238
그림 393 플랫폼에서의 자기장 세기 측정 모습 ····· 239
그림 394 인버터 자기장 세기 측정모습 ····· 240
그림 395 차량 내부의 의자에서의 전자파 측정위치 보완 ····· 241
그림 396 EMF 측정에 사용한 측정 장비 (Narda EHP-50F) ····· 241
그림 397 플랫폼(열차 출입문앞) 자기장 세기 측정모습 ····· 242
그림 398 플랫폼 엣지부분에서의 자기장 측정 모습 ····· 242
그림 399 플랫폼(열차 중간에서의) 자기장 측정 모습 ····· 243
그림 400 열차내부(객차 연결부) 에서의 자기장 측정 모습 ····· 243
그림 401 열차내부(출입문 앞) 에서의 자기장 측정 모습 ····· 243
그림 402 고정설비(인버터)에서의 자기장 측정 모습 ····· 244
그림 403 단체표준 1차 심의 후 수정통과 공문 ····· 247
그림 404 최종심의를 통과한 급집전 EMF 측정 방법 및 평가 방법단체표준 문서 표지 · 247
그림 405 도시철도-고무차륜 경전철 기술기준의 EMF 개정안 전후 비교표 ····· 249
그림 406 급집전 EMF 안전 기준 제출 공문 ····· 249
그림 407 급전 자성체 적용 시뮬레이션 모델 ····· 251
그림 408 집전코일에 대한 동일 평면 차폐코일 배치 ····· 251
그림 409 급전 인버터 EMI 현장 측정 ····· 253
그림 410 경전철 무선급전 철도 집전 EMI 측정 위치 ····· 254
그림 411 측정 안테나 배치 ····· 254
그림 412 사용한 측정 장비 ····· 255
그림 413 집전 EMI 현장 검증을 위한 측정 구성 ····· 256
그림 414 경전철 무선급전 철도 집전 EMI 측정 위치 ····· 256
그림 415 인버터 기본 환경(무부하 시) EMI 측정 결과 (1차대역 9k-150kHz) ····· 257

그림 416 급전 EMI 현장 검증을 위한 측정 구성 (1차 대역) ····· 258
그림 417 인버터 기본 환경(무부하 시) EMI 측정 결과 (2차대역 150k-30Mhz) ····· 258
그림 418 급전 EMI 현장 검증을 위한 측정 구성 (2차 대역) ····· 259
그림 419 급집전 선로 기본 환경(무부하 시) EMI 측정 결과 (1차 대역 9k-150kHz) ····· 260
그림 420 경전철 무선급전 철도 집전 EMI 대역 1 측정 결과 ····· 261
그림 421 급집전 선로 기본 환경(무부하 시) EMI 측정결과 (2차 대역 150k-30MHz) ····· 261
그림 422 급전 EMI 현장 검증을 위한 측정 구성 (2차 대역) ····· 262
그림 423 급전 코일 삽입형 차폐 코일 적용 결과 ····· 263
그림 424 교차결선 적용 시 EMF 시뮬레이션 ····· 263
그림 425 인버터 알미늄 하우징 ····· 264
그림 426 차폐코일 실험 셋업 ····· 266
그림 427 차폐 코일 적용 시뮬레이션 모델 ····· 267
그림 428 경전철 무선급전 철도 집전 EMF 측정 위치 ····· 269
그림 429 경전철 무선급전 철도 급집전 EMF 측정 위치 ····· 270
그림 430 SECC-EVCC 통신시스템 ····· 271
그림 431 무선 충전 통신 프로토콜 메시지 목록 ····· 272
그림 432 무선 충전 통신 프로토콜 XML 형식 메시지 예시 ····· 272
그림 433 인버터 및 경전철 추가 고장코드 ····· 274
그림 434 통신 프로토콜 실시간 모니터링 화면 ····· 274
그림 435 경전철 무선 급집전 통신 인터페이스 구성도 ····· 275
그림 436 실제 환경 통신 프로토콜 테스트 구성도 ····· 276
그림 437 광주2호선 노선도 ····· 318
그림 438 트램차량용 집전장치(차상장치) ····· 319
그림 439 트램차량용 급전장치(지상장치) ····· 320
그림 440 트램차량용 무선급전 전자장 해석 ····· 320
그림 441 트램차량 급집전 설치 위치도 ····· 321
그림 442 기존 트램차량용 집전장치 ····· 321
그림 443 수정된 집전장치 외형도 ····· 321
그림 444 위례트램 무선급전지상인버터 위치선정(안) ····· 322
그림 445 위례트램 무선급전 정상상태 운행 ····· 322
그림 446 위례트램 무선급전 집전장치 고장 상태 ····· 323
그림 447 위례트램 무선급전 급전인버터 고장 상태 ····· 323
그림 448 위례트램 무선급전 급전인버터 중간역 고장 상태 ····· 324
그림 449 위례트램 무선급전 기지변전소 고장 상태 ····· 324
그림 450 위례트램 무선급전 112변전소 고장 상태 ····· 325
그림 451 위례트램 변전소 구성안 ····· 326
그림 452 위례트램 무선급전 적용시 변전소 구성안 ····· 327
그림 453 세부과제 간 연계 전략 ····· 327
그림 454 Primove 차량 독일 Augsburg에서 설치된 3상 급전 라인 및 인버터 ····· 330

그림 455 CAF(스페인) Luxtram의 50kW 실증 및 인증시험 (2018년) ····· 330
그림 456 일본 철도종합연구소에서 300kW 급 무선급전 실증시험 (2016년) ····· 331

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

○ 경전철용 무선급전시스템 및 Test-Bed 구축을 통한 운영기술 개발

- 최고속도 60km/h(가·감속 3.5km/h/s)급 경전철용 무선급전시스템(효율 85%이상) 개발 및 Test-Bed 시험선(1km이상) 구축을 통한 성능검증
- 경전철용 무선급전 차상장치 개발 및 차량 시운전시험 신뢰성 확보 (동적성능시험 4만km이상)

나. 연구개발 필요성

1) 기술개발 배경

○ 철도 차량은 화물 및 여객의 대량 수송이 가능하며 승용차, 버스, 해운 등의 타 운송수단에 비해 화석 연료 소모가 적고, 이산화탄소 발생량이 현저히 작아 친환경적이고, 에너지 효율이 높아 미래 교통수단으로서 관심이 크다.

○ 대부분의 철도 시스템에는 전력 공급 방법으로 상부에 가선을 설치하고 차량의 집전장치를 가선에 접촉시키는 방법을 사용하고 있으나 아래와 같은 건설/운영상의 어려움이 발생한다.

- 가선 설치를 위한 토목공사 비용 발생 및 부지/공간 확보
- 가선 시스템을 위한 충분한 터널 공간 필요
- 고전압/고전류의 노출된 가선에 의한 전기안전사고 위험
- 팬터그래프의 마모에 따른 유지보수 비용 발생
- 가선에 의한 미세먼지 발생 및 도시미관 저해

○ 이러한 상부 가선 방식에 대한 대안 기술로서 배터리를 사용하는 무가선 트램이나 차량 하부의 측면 접촉 급전 방식인 3궤조 방식 등 다양한 방식을 개발하여 적용하고 있으나 안전, 유지보수 등의 문제를 완전히 해결하기에는 한계가 있다.

○ 따라서 기존의 접촉식 전력공급 장치나 전차선 설비가 필요 없이 유지보수비용 절감이 가능하고 단선 및 전기접촉 등에 의한 위험성이 없는 친환경적인 전기철도 시스템의 개발이 필요하다.

○ 무선급전 기술은 외부에 노출되는 가선을 제거하여 기존 가선 방식의 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 기술로서 가선 전력공급방식의 대안으로 무선급전 기술개발에 대한 필요성이 커지고 있다.

2) 무선급전기술의 필요성

○ 정부 측면

- 무선급전기술은 철도 산업과 에너지·IT가 융합된 기술이며 철도 분야 신성장동력으로서 신산업분야 일자리 창출이 가능하므로 사업화 투자가치가 높다.
- 최근 정부는 R&D 전략을 기존 추격형에서 선도형 시스템으로 전환하였는데 이에 부합하여 국내에서 보유하고 있는 세계 최대용량의 무선급전 기술에 지속적으로 투자하여 글로벌 철도산업의 First mover로써 글로벌 경쟁우위를 선점할 필요가 있다.

- 정부의 그린 뉴딜 정책에 따라 친환경·저탄소 기반의 시스템에 투자가 이뤄지고 있으며 미래 친환경 시스템인 무선급전기술에 대한 필요성도 증가하고 있다.

○ 산업 측면
- 무선급전기술 분야의 대용량 전력변환기술, 고주파 제어기술, 유도급전기술, 운영기술 등 원천기술 확보를 통한 국내 철도산업의 고부가가치 창출이 필요하다.
- 무선급전 실용화 기술개발에 따른 국내 철도산업의 글로벌 경쟁력을 강화하여 추후 선진국에 기술 종속될 위협을 제거할 필요가 있다.
- 순수 국내 기술을 이용하여 해외 의존도를 낮추고 고주파 캐패시터 등의 부품을 국산화하여 내수 경쟁력을 강화시킬 필요성이 있다.

○ 기술 측면
- 그동안 축적된 국내 무선급전 핵심 기술은 상용화 단계에 이르렀으며 실제 철도시스템에 적용하여 기술 고도화가 필요하다.
- 기존 접촉식 전력공급시스템을 대체하는 미래 대체기술로서 개발이 필요하다.
- 무선급전기술은 저용량에서는 이미 상용화를 이뤄 점차 시스템 용량이 증가하는 추세이고 국내의 대용량 분야 기술개발이 제때 이뤄지지 않으면 해외에 추격당할 우려가 있다.

○ 환경 측면
- 저탄소 녹색성장 견인을 위한 철도차량 무선급전 핵심기술 확보 필요
- 무선급전 기술의 전기철도 전자파 적합성 등 환경요인에 대한 구체적인 기준 필요
- 가선 방식의 도시 미관 저해, 미세먼지 발생 등에 대한 근본적인 해결책 필요

다. 연구개발 범위

1) 1세부 연구개발 범위

○ 무선급전 경전철 시스템 통합 및 운용기술개발
- 무선급전 경전철 시스템 시험선 설계
- 무선급전 경전철 시스템 시험선(1km 이상) 구축
- 무선급전 경전철 시스템 통합성능시험 방안
- 무선 급전 경전철 시스템 운영 적합성 평가
- 무선 급전 경전철 시스템 운영시나리오
- 경전철 인프라 인터페이스 영향성 평가 보고서
- 무선 급전 경전철 시스템 정적 신뢰성 시험
- 무선 급전 경전철 시스템 동적 신뢰성 시험

○ 철도차량 무선 급전 시스템 모듈형 급전 선로 개발
- 작업성 및 경제성을 고려한 모듈형 급전선로 연구
- 모듈형 급전선로 구성품 상세설계
- 모듈형 급전선로 시작품 제작
- 모듈형 급전선로 시작품 단품시험/조합시험
- 시험선 급전선로 구축
- 급전선로 신뢰성 시험 지원

- 급전선로 유지보수절차서
- 공진 캐패시터 배치 및 방열 방안
- 시공성 및 유지보수 향상 기술
- 급전선로 평탄도 측정 및 확보 방안
- 급전선로 부근 철근 영향 분석

○ 경전철용 무선급전시스템 인버터 개발
- 300kW급 급전 인버터 스택 개발
- 1.2MW급 급전 인버터 개발
- 급전 인버터 단품 성능시험
- 무선급전시스템 구성품 간 조합시험
- 급전 인버터 정적 신뢰성 시험
- 급전 인버터 시험선 설치
- 급전 인버터 동적 신뢰성 시험
- 급전 인버터 유지보수절차서

○ 무선급전 고주파 공진용 커패시터 개발
- 무선급전용 대전력 필름 캐패시터 설계
- 무선급전용 대전력 필름 캐패시터 제작
- 무선급전용 필름 캐패시터 통합시험
- 무선급전용 필름 캐패시터 정적 신뢰성 시험
- 무선급전용 필름 캐패시터 동적 신뢰성 시험
- 무선급전용 필름 캐패시터 특성시험 방법 및 신뢰성 평가방법

○ 무선 급전 경전철 차량 시스템 표준 사양(안) 연구
- 요구사항 분석을 위한 고려 사항 사전조사
- 기존 전기철도 시스템의 (지상, 차량) 인터페이스 분석을 통한 고려사항 제시
- 경전철 무선급전 시스템 및 하위 시스템 표준사양 프레임 도출
- 최종 테스트베드 시험결과 반영한 경전철용 무선급전 시스템 표준사양(안)

2) 2세부 연구개발 범위

○ 무선급전 경전철 차량시스템 인터페이스 기술개발
- 경전철 무선급전 시스템 표준구성안
- 무선급전 차량 구성장치 기본설계
- 무선급전 경전철 차량 인터페이스 표준사양(안)
- 무선급전 시스템 구성요소 간 인터페이스 사양서
- 무선급전 조합시험, 정적 신뢰성 시험, 동적 신뢰성 시험 절차서
- 무선급전 경전철 차량시스템 정적 신뢰성 시험
- 무선급전 경전철 차량시스템 동적 신뢰성 시험

○ 무선급전 경전철 차량집전시스템 개발
- 250kW급 차량 집전 시스템 단품 개발차량 집전 장치 개발
- 250kW급 집전시스템 시작품 제작 및 자체 시험
- 1MW 집전 시스템(정류기+집전패드) 구축

- 무선급전 구성품 간 조합시험
- 집전 시스템 정적 신뢰성 시험
- 집전 시스템 차량 장착
- 집전 시스템 동적 신뢰성 시험
- 집전 시스템 유지관리 방안 연구

○ 무선급전 경전철 차량적용 기술개발
- 무선급전 경전철 차량용 DC/DC 컨버터 기본설계
- 무선급전 경전철 차량용 DC/DC 컨버터 상세설계
- DC-DC 컨버터 시작품 제작
- 무선급전 경전철용 DC/DC 컨버터 단품 및 조합시험
- 무선급전 경전철 차량용 DC/DC 컨버터 정적 신뢰성 시험
- 집전장치(PICK UP 장치) 및 안정화 장치(DDC + 저장매체) 취부 방안
- 무선급전 시스템 완성차 시험
- 무선급전 경전철 동적 신뢰성 시험 지원 및 유지보수

○ 무선급전 전력안정화를 위한 에너지저장 인터페이스 연구
- 무선급전 경전철 차량 적용을 위한 에너지 저장장치 기본설계
- 에너지 저장장치 상세설계
- 에너지저장장치 시작품(2종) 제작
- 1MW 급전이 가능한 에너지저장장치 설계 및 제작
- 에너지 저장장치 정적 신뢰성 시험
- 에너지 저장장치 동적 신뢰성 시험
- 에너지 저장장치 유지보수절차서

3) 3세부 연구개발 범위

○ 급전전기안전
- 급전장치 전기안전 기준 연구 요구사항 분석
- 급전장치 전기안전 요구사항 분석
- 급전장치 전기안전 해결방안 제시
- 급전장치 전기안전 설계 및 분석
- 급전장치 전기안전 검증 및 개선
- 급전장치 전기안전 현장 검증 및 보완
- 급전장치 전기안전기준(안) 제출

○ 집전전기안전
- 집전장치 전기안전 요구사항 분석
- 집전장치 전기안전 시험 요구사항 분석
- 집전장치 전기안전기준 분석 및 모델링 해석
- 집전 전기안전 시험 및 개선
- 집전 전기안전기준 검증 및 개선
- 집전장치 전기안전 검증 및 개선, 현장 검증 및 보완
- 집전장치 전기안전기준(안) 제출

○ 급집전 EMI 안전기준
- 급집전 EMI 요구사항 분석
- 국내 철도의 EMI 안전기준 검토
- 국외 철도의 EMI 안전기준 검토
- 급집전 EMI/EMC 안전 시험 기준 설계 및 분석
- 급집전 EMI 안전기준 검증 및 개선
- 급집전 시스템의 EMI/EMC 안전 기준(안) 제안

○ 급집전 EMF 안전기준
- 급집전 EMF 안전 기준 요구사항 분석
- 급집전 EMF 안전기준 설계
- 급집전 EMF 안전기준 분석
- 급집전 EMF 안전 기준 검증 및 개선

○ 급집전 EMI 안전성
- 급집전 EMI 안전성 영향분석
- 급집전 EMI 후보기술 및 구조별 분석
- 급집전 EMI 감쇄 구조의 변수별 민감도 분석
- 급집전 EMI 실험결과 분석서
- 급집전 EMI 안전 해결방안 제시
- 급집전 EMI 안전방안 설계 및 분석
- 급집전 EMI 안전성 검증 및 개선
- 급집전 EMI 안전성 현장 검증 및 보완

○ 급집전 EMF 안전성
- 급집전 EMF 안전성 영향분석
- EMF 감쇄 후보기술 및 구조별 분석
- 급집전 EMF 감쇄 및 차폐 모듈 민감도 분석
- EMF 감쇄 모의실험 분석
- 급집전 EMF 안전성 검증 및 개선
- 급집전 EMF 안전성 현장 검증 및 보완

○ 실험실 안전 통합 시험
- 실험실 레벨용 소규모 안전 통합 시험

○ 전기안전지원 통신 프로토콜 검증
- SAE 표준 기반, 도시철도 무선급전에 최적화된 전기안전 통신 프로토콜 연구
- 충전 중 모니터링 기능 연구
- 장애 발생 시, 장애 처리 기능 연구
- 검증을 통한 도시철도 무선급전 안전성 확보

○ 경제성 분석
- 무선급전 사양분석
- 평가지표에 대한 국내외 조사 연구
- 평가방법에 대한 국내외 조사 연구

- 평가 지표 및 평가 방법 선정
- 경제적 효과 분석
- 법·제도적 지원 방안

2. 연구수행내용 및 성과

가. 무선급전 경전철 시스템 통합 및 운용기술개발

1) 연구개발 목표

○ 무선급전 경전철 시스템 통합 및 운용기술 개발

○ 무선급전 경전철 시스템 동적 성능 검증 및 신뢰성 평가

2) 연구개발 범위

○ 무선급전 경전철 시스템 시험선

- 1km 이상 경전철 무선급전 시험선 구축

○ 무선급전 경전철 시스템 통합 성능 시험 방안 및 성능 기준

- 통합 성능 시험 방안
- 무선 급전 경전철 시스템 성능 기준

○ 무선급전 경전철 시스템 운영 적합성 평가안 및 기준

- 동적 시험의 운영 필요사항을 최종 반영한 시나리오 작성
- 운영기관의 참여 검증

3) 상세 연구개발 내용

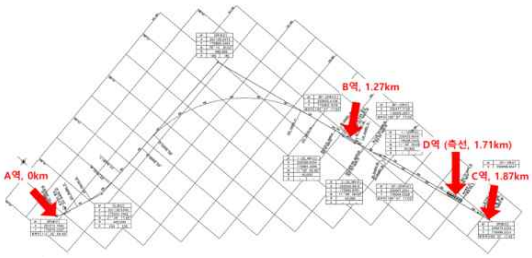
가) 1km 이상 경전철 무선급전 시험선 구축

○ 경산 경량전철시험선을 개조하여 1.87km의 무선급전 시험선을 구축하였다.

○ 지상장치로 무선급전인버터, 급전선로를 각 역사에 설치하였고 K-AGT 차량에 집전장치, 전원안정화 장치를 설치하였다.

표 1 무선급전 경전철 시험선 구축

<table>
<tr><th>항목</th><th>내용</th></tr>
<tr><td>시험선 역사</td><td>
<table>
<tr><td>- 시험선 전경 (1.87km: A역~C역)</td><td>- 무선급전 A역사</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>- 무선급전 B역사</td><td>- 무선급전 C역사</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>시험선 개요</td><td>1. 건설위치: 한국철도기술연구원 경량전철시험선 (소재지: 경북 경산시 남천면 홍산리 27)
2. 본선길이: 1.87km
3. 정 거 장: 4개소(삼성현(A), 갓바위(B), 미래(C), 첨단(D))
4. 차 종: 고무차륜 AGT 시스템 (2량 1편성)</td></tr>
</table>



나) 무선급전 경전철 시스템 통합 성능 시험 방안 및 성능 기준

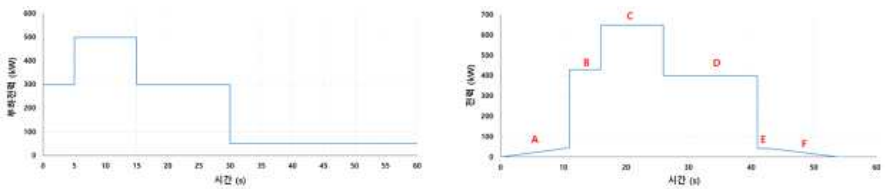
(1) 통합 성능 시험 방안

(가) 정적시험

○ 정적신뢰성 시험 방법

- 정적신뢰성 활동 운행프로파일

· 무선급전 정적 신뢰성 활동을 위해 다음 그림과 같이 무선급전 운영 시나리오를 최적화할 수 있다.



(a) (b)

그림 1 (a) 부하에서 소모되는 전력 프로파일(지령) (b) 인버터 입력 전력 측정

표 2 인버터 입력 측정의 각 구간별 전력

구간	시간 (초)	전력 (kW)	전력량 (kWs)
A	11	0 -> 48	264
B	5	430	2,150
C	10	650	6,500
D	15	400	6,000
E	2	42	84
F	11	42 -> 0	231

- 정적신뢰성 40,000km 검증을 위한 구성

· 정적신뢰성의 운행 프로파일 확인은 아래 그림과 같은 운행제어시스템을 이용하여 운행 횟수를 확인할 수 있도록 구현하였다.

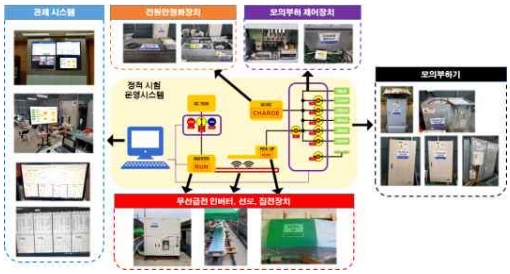


그림 2 정적시험을 위한 운영시스템



그림 3 정적시험 환경

○ 정적신뢰성 40,000km 검증 결과

- 정적신뢰성 검증은 2018년 10월 31일부터 2018년 12월 6일 오전까지 약 6주 동안 운행 프로파일 카운터를 확인한 결과 총 16,935 회를 왕복한 것으로 확인되었으며, 거리 환산 시 1회 왕복이 2.46 ㎞ 이므로, 16,935 × 2.46 ㎞ 수치를 반영하면, 주행 거리는 41,660㎞ 주행한 수치가 나온다.

표 3 주차별 70 kWh 이상 사용한 전력량 확인 결과

구분	1주차	2주차	3주차	4주차	5주차	6주차	비고
70 kWh 이상	119	437	480	610	373	239	15분 당 1회로 확인함

(나) 동적시험

① 시험 설비 및 측정장치

○ 경전철 시험선로, 경전철차량, 무선급전시스템, 관제실, 데이터 수집/기록 장치

② 동적 시험 조건

○ 무선급전시스템은 지상장치(급전인버터, 급전선로, 공진캐패시터)와 차상장치(집전장치, 전원안정화장치)로 구성되어 있어야 한다.

○ 전원안정화장치는 차량 DC link의 전원을 안정적으로 유지해주는 장치로서 다양한 구성이 있을 수 있으나 본 절차서에서는 DCDC컨버터, 배터리팩 (또는 에너지저장장치)으로 구성된 장치를 대상으로 한다.

○ 동적시험 선로는 1km 이상의 시험 구간에 2개 이상의 역사에 무선급전 설비가 설치되어 있어야 한다.

○ 관제실에는 무선급전시스템의 지상장치 및 부속설비, 차상장치 및 부속설비, 차량에 대한 제어가 가능하여야 하며 실시간으로 정보를 디스플레이 하여야 한다.

○ 운행과 무선급전시스템에 관한 기록은 기록장치에 실시간으로 기록되어야 한다.

○ 100m 이상의 급전선로를 구축한 무선급전 역사를 1개 이상 갖추어야 한다.

○ 경전철 차량은 동적 운행에 문제가 없도록 사전에 정비되어야 한다.

○ 집전장치는 운행 차량의 대차 및 차체 하부에 취부하여야 한다.

○ 차량의 TCMS를 통해 설정한 역사에 대해 무인운전을 할 수 있다.

○ 무인운전시에는 정위치 정차확인을 위한 장치와 오버런을 감지할 수 있는 장치가 마련되어야 한다.

○ 셔틀 운행시, 차량 속도는 선로의 구간별 제한 속도를 초과하지 않는다.



그림 4 경산 시험선 구간별 제한속도

표 4 측정 및 수집항목

운행정보	급전인버터 정보
누적 운행거리, 왕복횟수	운전상태 (ON/STANDBY/OFF/RUN/STOP/FAULT)
차량위치, 속도	입출력 전압/전류
셔틀운행 시작, 종료시간	인버터 고장 코드
운행방향	

차상장치 정보 (집전장치)	차상장치 정보 (전원안정화장치)
집전장치 상태 (RUN/STOP/FAULT)	DCDC컨버터 상태 (RUN/STOP/FAULT)
집전장치 출력 전압/전류	링크전압 (3궤조차량의 가선전압에 해당)
무선급전 입력 주파수	배터리 출력 전압/전류
집전장치 고장 코드	배터리 온도, SOC
	DCDC컨버터 고장코드

③ 시험 방법

○ 급전선로 길이 측정

- 시험구간의 각 무선급전 역사에서 급전선로 길이를 측정하여 기록한다.
- 도면 및 KP(Kilometer Post)를 활용하여 길이 측정이 가능하고 모듈로 이루어진 선로의 경우 단위모듈의 길이를 측정하여 전체 개수에 곱하여 계산할 수 있다.

○ 급집전 공극 측정

- 각 역사에서 급전선로-집전장치간 공극을 측정하여 기록한다.
- 차량이 급전선로 위에 정지해 있을 때 급전선로 상면과 차량 집전장치 하면과의 거리 간격을 측정한다.

○ 무선급전 차량 최고속도 측정

- 집전장치 및 전원안정화장치가 탑재된 무선급전 차량의 최고속도를 기록한다.
- 시험선에서 자동 혹은 수동으로 운전하는 차량의 최고속도를 차량 TCMS 정보 혹은 무선급전 관제 로그데이터를 확인하여 최고에 도달한 속도를 기록한다.

○ 무선급전 동적 집전 시험

- 이동 중 무선급전시스템의 집전 상태를 측정한다.
- 관제 로그데이터를 확인하여 집전장치에 수신되는 전력이 있을 때 차량의 최고속도를 확인한다.
- “무선급전 차량 최고속도 측정” 시험과 동시에 수행할 수 있으며 운행거리 측정을 위한 셔틀 운행과는 별개로 시험한다.

○ 동적시험 운행거리 측정

- 무선급전차량의 동적시험 총 운행거리를 계산하여 기록한다.
- 동적시험 운행 및 누적거리 계산에 대한 제반사항은 본 절차서를 참고한다.

○ 시험구간 설정



그림 5 시험역 설정 (a) 2개 역사 (b) n개 역사

- 무선급전 동적 시험을 위한 시험구간은 최소 2개 이상의 역사로 구성되어 왕복함을 원칙으로 한다.
- 운행 구간의 시점과 종점 사이의 거리는 1km 이상으로 설정하여야 하며 차량의 왕복운행은 구간은 2km 이상(편도 1km 이상)이 되어야 한다.
- 시험 구간의 역 중 최소 1개 이상의 역사에는 무선급전 지상설비가 갖춰져 차량에 전력을 공급할 수 있어야 한다.

○ 급전인버터 동작 상태 및 제어명령
- 급전인버터 동작은 OFF, ON, STANDBY, RUN의 상태로 구분되고 제어명령에 따라 상태가 전환된다.

④ 총 운행거리 산정 방법

○ 동적시험 차량의 총 운행거리는 아래와 같이 계산한다.

총 운행거리(km) = 누적왕복횟수 × 왕복거리(km)

○ 왕복거리는 선로 도면에 표시되어 있는 역사간 거리 혹은 KP(Kilometer Post)를 활용하여 거리를 확인할 수 있다.

○ 가상역을 설정한 경우에는 역사와 가상역 사이의 거리를 측정하여 도면상의 거리에 가감한다.

○ 차량의 센서를 이용하여 기록된 누적거리는 참고 및 비교 데이터로 활용될 수 있다.

○ 시험선의 정상 가동 여부는 로그 데이터 확인과 함께 시험선 전력사용 데이터 혹은 시험설비의 온도 데이터 등 운행과 관련된 간접자료를 활용하여 비교할 수 있다.

○ 왕복횟수는 로그 파일에 기록된 데이터를 이용하며 전용 뷰어인 TrainLogViewer를 활용해 계산할 수 있다.

⑤ 무선급전관제시스템 로그데이터

○ 무선급전관제시스템은 경산시험선의 무선급전 테스트베드에 구축된 무선급전인버터 및 무선급전경전철 차량의 동작을 원격제어하고 동작상황을 모니터하며, 각 장치간의 제어 및 감시정보를 로그데이터로 기록하고 있다. 기록된 로그데이터는 TrainLogViewer를 통하여 동작상황을 확인할 수 있으며, 로그데이터의 일부를 TrainLogViewer를 이용하여 출력함으로써 동적시험의 결과를 확인하기 위한 기본 데이터로 활용한다.

○ TCMS 로그데이터 종류 및 형식
- 차량의 TCMS로부터 무선급전 관제시스템으로 전송되는 정보와 기록된 데이터

를 TrainLogViewer로 확인한 결과는 다음과 같다.

표 5 TCMS 데이터 형식

Text No	Contents								Remark
	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	
1	차량 진행방향		선두운전실 정보		차량 운전모드				차량 상태
	MC2 FRONT	MC1 FRONT	MC2 HCR	MC1 HCR	EM	MM	AM	DM	
2	셔틀 준비 SHUTTLE READY	TCMS 고압투입 허용 NFB HVICN	전체 출입문 닫힘 상태 ADC	셔틀 운행중 SHUTTLE ON	비상 제동 동작중 EBRO	-	CHILLER 고장		
							Mc2 CHIL2F	Mc1 CHIL1F	
3	Pause	-	-	-	-	-	인버터 투입 INVON	인버터 정지 INVOFF	TCMS 지상 지령
4,5	현재역 코드 CURSTCODE, 다음역 코드 NXTSTCODE								
6,7	현재속도 SPEED, 이동거리 RUNDIST								

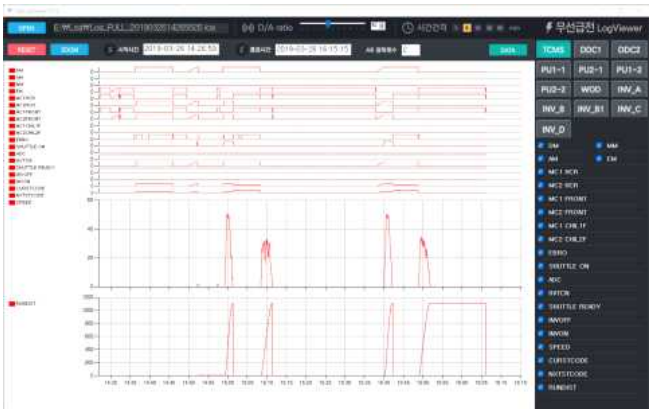


그림 6 TrainLogViewer로 확인한 로그데이터

○ 전원안정화장치(DDC1, DDC2)

표 6 전원안정화장치 데이터 형식

Text No	Contents								Remark
	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	
1	2호차				1호차				DDC 상태
		FAULT	STOP	RUN		FAULT	STOP	RUN	
2	-	-	-	-	K	CHK	DCHK	BATK	
3	DCKF	PUD	OTF	BOV	FCOV	BOC	IOC	-	DDC 고장정보
4	-	BUV	ESOV	BMSF	WCF	BAKF	KF	CHKF	
5	-	-			-	CPSF	STF	CFD	
6	-	-	-	-	-	OOC3	OOC2	OOC1	
7,8	가선 전압 (VL), 입력 전류(II)								DDC 운전정보
9,10	필터 콘덴서 전압 (VI), 출력(배터리) 전압 (VO)								
11,12	출력(배터리) 전류 (IO), 배터리 온도								
13	배터리 SOC								

○ 집전장치(PU1, PU2, PU3, PU4)

표 7 집전장치 데이터 형식

Text No	Contents								Remark
	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	
1	2호차				1호차				PICKUP1
		FAULT	STOP	RUN		FAULT	STOP	RUN	
2	2호차				1호차				PICKUP2
		FAULT	STOP	RUN		FAULT	STOP	RUN	
3	OCP	OVP	LVP	CPSF	-	-	-	-	고장코드
4	RSTS	OFS	WLS	-	-	-	-	-	
5,6	출력 전압 (VO), 출력 전류 (IO)								운전상태
7,8	입력 주파수(FO), 출력 전력 (PO)								

○ 무선급전장치(INV_A, INV_B, INV_B1, INV_C, INV_D)

표 8 무선급전장치 데이터 형식

Text No	Contents								Remark
	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	
1			FAULT	ON	OFF	-	STANDBY	RUN	운전상태
2	제어전원 오류1	DC-Link 저전압	출력과전압	DC-Link과전압	입력과전압	입력과전류	출력과전류	스택과전류	고장코드1
3	출력전압 감지에러	입력전압 감지에러	제어에러	스택전류 불균형	Door Open	E Stop	제어전원 오류3	제어전원 오류2	고장코드2
4,5	입력 전압 (VL), 입력 전류(II)								
6,7	출력 전압 (VO), 출력 전류 (IO)								
8,9	최저 온도, 최저 온도								

○ 동적신뢰성시험 주행기록

- 동적신뢰성시험 주행기록은 다음의 정보를 TrainLogViewer를 이용하여 출력하며, 출력 형식은 다음과 같다. (출력물은 동적시험 성적서에 포함)
- 차량: Shuttle ON/READY, Speed, 주행거리
- 무선급전인버터: Fault 여부, 입력전압, 출력전류
- 집전장치: Fault 여부, 출력전력
- 전원안정화장치: Fault 여부, 출력전압, 출력전류, 배터리 온도, 배터리 SOC

⑥ 공인기관 입회 성능시험 결과

○ 무선급전시스템 동적 시험은 한국산업기술시험원 입회하에 수행되었으며 시험 운행거리(42,203km)에 대한 성적서를 발급받았다.



그림 7 무선급전시스템 동적 시험차량 및 관제 시스템 확인

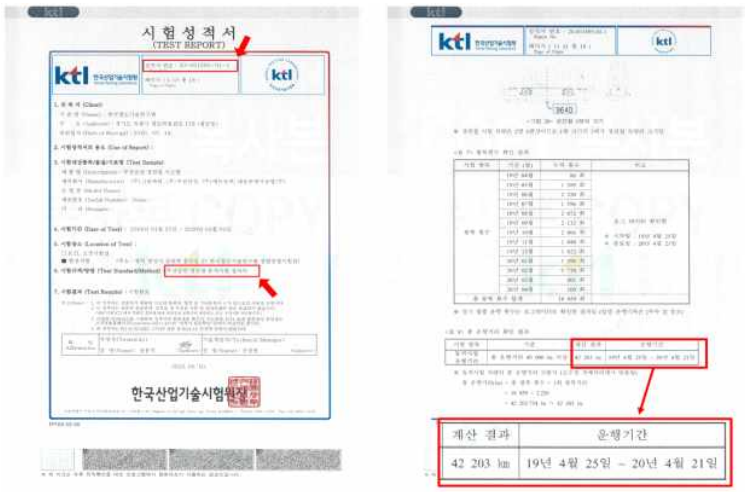


그림 8 동적시험 시험성적서 (KTL, 20-031895-01-1)

○ 급전선로길이 측정



그림 9 KP 간격 확인



그림 10 급전선로길이 측정 결과

표 9 급전선로길이 측정 결과

역사		기준	측정 결과	비고
A역사		최소 1개 이상의 역에서 100 m 이상	245 m	
B역사	플랫폼		33 m	
	가속구간 (B-1)		201 m	

○ 급집전 공극 측정

표 10 급집전 공극 측정 결과

역사		기준	측정 결과	비고
A역사		공극 30 ㎜ ~ 70 ㎜	59 ㎜	
B역사	플랫폼		53 ㎜	
	가속구간 (B-1)		59 ㎜	

○ 무선급전 차량 최고속도 시험

표 11 무선급전 차량 최고속도 결과

기준	측정 결과	비고
최고속도 60 ㎞/h 도달	1회 : 60 ㎞/h 2회 : 64 ㎞/h 3회 : 63 ㎞/h	

○ 무선급전 동적 집전 시험

표 12 무선급전 동적 집전 시험 결과

기준	측정 결과	비고
집전 시작 후 집전전류가 10 A 이상이고, 차량이 급전선로를 빠져나가 집전전류가 10 A 이하로 떨어지기 전까지의 구간에서 차량의 최고속도 50 ㎞/h 이상	① 최고속도 : 62 ㎞/h ② 전류 : 39 A	

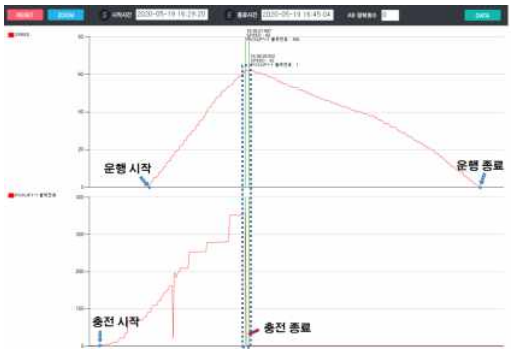


그림 11 차량 최고속도 및 집전 차량 충전 시작 및 충전 종료 구간 확인

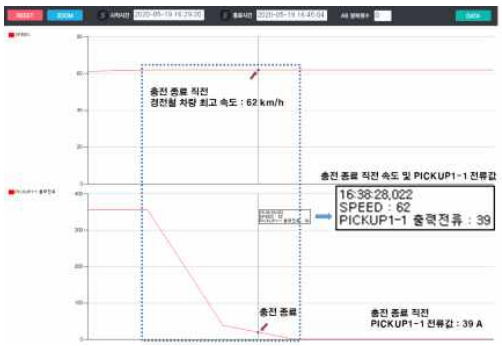


그림 12 충전 종료 직전 속도 및 PICKUP1-1 전류값 확인

○ 동적시험 운행거리 측정 (누적 왕복횟수, 1회 왕복거리, 총 운행거리)

표 13 동적시험 운행거리 결과

시험 항목	편도 이동거리 확인	1회 왕복거리	비고
1회 왕복거리	1.113 ㎞	2.226 ㎞	

표 14 왕복횟수 확인 결과

시험 항목	기간 (월)	누적 횟수	비고
왕복 횟수	19년 04월	86 회	로그 데이터 확인함 ※ 시작일 : 19년 4월 25일 ※ 종료일 : 20년 4월 21일
	19년 05월	1 589 회	
	19년 06월	2 320 회	
	19년 07월	1 596 회	
	19년 08월	2 072 회	
	19년 09월	2 132 회	
	19년 10월	2 066 회	
	19년 11월	1 040 회	
	19년 12월	1 822 회	
	20년 01월	1 596 회	
	20년 02월	1 730 회	
	20년 03월	801 회	
	20년 04월	109 회	
총 왕복 횟수 합계		18 959 회	

표 15 총 운행거리 확인 결과

시험 항목	기준	계산 결과	운행기간
동적시험 운행거리	총 운행거리 40 000 ㎞ 이상	42 203 ㎞	19년 4월 25일 ~ 20년 4월 21일

※ 동적시험 차량의 총 운행거리 산출식 (소수점 첫째자리에서 반올림)

총 운행거리(㎞) = 총 왕복 횟수 × 1회 왕복거리

= 18 959 × 2.226 **= 42 202.734 ㎞ ≒ 42 203 ㎞**

(2) 무선 급전 경전철 시스템 성능 기준

(가) 시스템 효율

① 정격 부하 시험 (KTL, 18-037625-01-2)

○ 시험 구성

- 무선급전시스템에 대한 조합시험은 다음 장비로 구성해서 시험을 실시하였다. 그림 2, 그림 3과 같은 정적시험 환경에서 1MW 정격 부하를 연결하였다.

○ 시험 방법

- 손실측정은 급전인버터 입력측, 급전인버터 출력측, 집전장치 정류기 입력, 집전장치 정류기 출력 등을 측정하여 손실을 계산한다. 단 측정이 어려울 경우 무선급전시스템 전체 효율을 측정한다.
- 이때 입출력 전압, 전류, 주파수, 공극 등 성능확인에 필요한 항목을 측정하고 무선급전시스템 전체효율 및 각 부분효율은 규정된 값을 만족하여야 한다.
- 효율시험은 500 ㎾ 이상의 부하에서 85 % 이상 효율을 확보하여야 한다.

○ 정격 부하 종합효율 결과

- 아래 결과에서 최대 효율은 90.1%를 나타내었다.
- 1MW 정격부하의 효율은 86.9%로 과제 목표인 85% 효율을 달성하였다.

표 16 정격부하 종합효율 결과

구분	부하	기준치	측정항목	측정치	비고
1	605.5 ㎾	85 % 이상	입력전력	719.6	22) 참조
			출력전력	630.5	
			효율(%)	87.6	
2	805.5 ㎾	85 % 이상	입력전력	916.0	23) 참조
			출력전력	825.0	
			효율(%)	90.1	
3	1005.5 ㎾	85 % 이상	입력전력	1 170.7	24) 참조
			출력전력	1 017.6	
			효율(%)	86.9	

② 동적 효율 측정 (KTL, PI193110)

○ 한국철도기술연구원 경량전철시험선에서 실시하는 무선급전 경전철 시스템의 설계요구사항에 따른 시스템의 효율을 확인하였다.

○ 측정 방법 및 조건

- 지상 인버터의 DC 750[V] 입력 단자의 전압, 전류 파형을 측정한다.
- 차량 집전장치의 DC 750[V] 출력 단자의 전압, 전류 파형을 측정한다.
- 차량 사용량 및 충전량을 측정하기 위해 DC-DC 컨버터 출력전류를 측정한다.
- 지상, 차량 간에는 거리가 멀고 차량이 움직이므로 2대의 측정장비를 이용하여

입, 출력을 각각 측정한다.

- 측정 과정에서의 트리거 (차량 출발하기 직전 문을 닫을 때 전류값이 튀어오르는 현상)를 이용하여 추후 입출력 결과값을 동기화해야 한다.
- 정지상태에서 충전하고 있을 때부터 출발해 선로를 빠져나갈 때까지 측정한다.

표 17 측정센서/장비 확인

입력 (인버터)	출력(집전장치)
전압 : KEYSIGHT [N2891A]	전압 : KEYSIGHT [N2891A]
전류 : HIOKI [3285]	전류 : HIOKI [9279]
	충전전류 : HIOKI [3285]
측정장비: DEWE-2600	측정장비: DEWE-43A



그림 13 경전철 무선급전 시스템 효율 측정 구성

○ 측정 결과 (효율 시험은 B역사 구간에서 실시함)

- 차량 정차 중 충전 효율은 86.1%, 차량 이동 중 효율은 최대 89%가 계산되었다.
- 정차의 경우 충전 시작 후 구간부터 출발 직전까지 평균값이며, 차량 이동의 경우 기동해서 충전종료 직전까지의 효율 데이터에 이동평균을 적용한 결과에서의 최대치를 적용하였다.

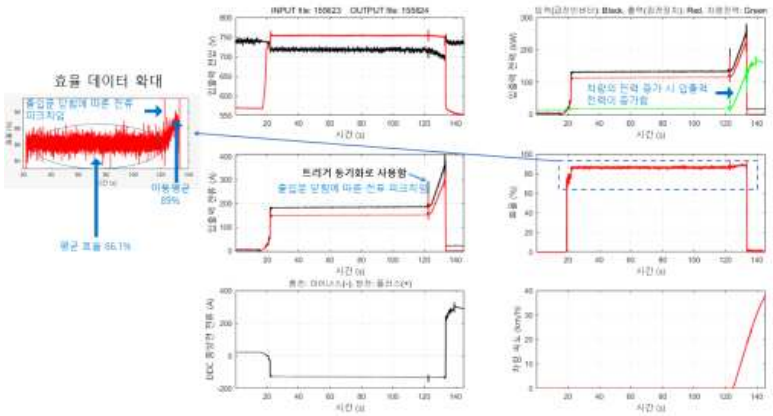


그림 14 효율 시험 측정 결과

표 18 최대 효율 데이터

측정 항목		측정값
입력 (인버터)	전압 (V)	700.4
	전류 (A)	318.8
	전력 (kW)	223.3
출력 (차량)	전압 (V)	750.9
	전류 (A)	264.8
	전력 (kW)	198.8
효율 (%)		89.0

- 위 효율 시험 측정 결과치로 확인한 결과 충전 중에 차량이 이동하여도 충전 효율은 떨어지지 않고 증가하였다.
- 차량이 이동하여도 철도 환경에서는 상하공극 및 좌우편위가 일정하게 유지되므로 전송 용량 및 효율은 감소하지 않았다.
- 차량 이동 중에 효율이 증가하는 이유는 정차 중 충전에서의 충전 전력보다 이동 중에 차량이 요구하는 전력이 증가로 기인된 것으로 급전선로에서는 전송량에 관계없이 고정손실이 발생하기 때문에 전력용량이 커질수록 효율이 증가되는 것으로 판단된다. 또한 무선급전시스템은 1㎿ 정격으로 설계되었기 때문에 정격 전력과 가까워질수록 효율적이라고 판단된다.

(나) 시스템 용량 (KTL, 18-037625-01-2)

○ 시험 구성

- 앞서 기술된 정적시험의 구성과 동일하다.

○ 시험방법

- 무선급전시스템은 무부하 상태에서 시스템을 기동하고 정지한다. 이때 입출력 전압, 전류, 주파수, 공극 등 성능확인에 필요한 항목을 측정한다.
- 무선급전시스템은 5.5 ㎾ ⇨ 55.5 ㎾ ⇨ 355.5 ㎾ ⇨ 605.5 ㎾ ⇨ 805.5 ㎾ ⇨ 1 005.5 ㎾ 부하 상태를 변경하면서 시험한다. 이때 입출력 전압, 전류, 주파수, 공극 등 성능확인에 필요한 항목을 측정한다.
- 무선급전시스템은 1분 이상 1 ㎿ 공급됨을 확인한다.
- 무선급전부하시스템의 오차율은 ± 10 % 이내로 한다.

○ 시험결과

- 무선급전 전부하 정격 특성시험

구분	시 험 항 목	판정 기준	시험결과
1	출력주파수	60 ㎑ ± 5 ㎑	60.68 ㎑
2	공극	57 ㎜ ± 5 ㎜	59 ㎜
3	무부하 출력시험	집전장치 출력 10 ㎾ 이하	6.1 ㎾
		집전장치 전압 750 V ± 5 %	760 V
		집전장치 전류 20 A 이하	8.1 A
4	전부하 출력시험	1 000 ㎾ 이상	1 019 ㎾
		집전장치 전압 750 V ± 5 %	730 V
		집전장치 전류 1 340 A ± 5 %	1 396 A

- 무선급전 부하변동 상태에서의 성능시험

구분	시 험 항 목	판정 기준	시험결과
1	출력주파수	60 ㎑ ± 5 ㎑	60.73 ㎑
2	공극	57 ㎜ ± 5 ㎜	59 ㎜
3	무부하 상태	집전장치 출력 10 ㎾ 이하	5.9 ㎾
		집전장치 전압 750 V ± 5 %	760 V
		집전장치 전류 20 A 이하	7.7 A
4	5.5 ㎾ ⇨ 55.5 ㎾ ⇨ 355.5 ㎾ ⇨ 605.5 ㎾ ⇨ 805.5 ㎾ ⇨ 1005.5 ㎾ 집전장치 출력시험	1 000 ㎾ 이상	1 018 ㎾
		집전장치 전압 750 V ± 5 %	730 V
		집전장치 전류 1340 A ± 5 %	1 395 A
5	1005.5 ㎾ → 5.5 ㎾ 집전장치 출력시험	집전장치 출력 10 ㎾ 이하	5.9 ㎾
		집전장치 전압 750 V ± 5 %	755 V
		집전장치 전류 20 A 이하	7.8 A

(다) 출력 전압 안정성

○ 무선급전 경전철 차량의 출력 전압 안정성을 검증하였다. 무선급전으로 공급되는 출력 전압은 집전장치의 출력에서 얻을 수 있으며 차량의 운행에 관계없이 아래 조건을 만족시켜야 한다.

① 철도 규격

○ 철도차량기술기준 (KRTS-VE-Part53-2018(R1))

○ 철도차량기술기준(도시철도차량(고무차륜경전철) 기술기준)의 '3.4.1.1 전압 및 주파수 범위'에 KS C IEC 60850을 참고할 수 있다고 명시되어 있다.

○ 철도 적용 - 견인 시스템의 공급 전압 (KS C IEC 60850:2014)

○ 「국토교통부고시 제2020-502호」에 2020년 7월 10일부터 표준내용이 KS C IEC 60850:2014로 개정되었다.

○ 개정된 전압 기준

표 19 공칭전압과 값 및 지속시간의 허용한계 (출처: KS C IEC 60850:2014)

전기 시스템	최저 비지속 전압 V_{min2} V	최저 지속 전압 V_{min1} V	공칭전압 V_n V	최고 지속 전압 V_{max1} V	최고 비지속 전압 V_{max2} V
직류 (평균값)	500	500	750	900	1,000
	1,000	1,000	1,500	1,800	1,950
	2,000	2,000	3,000	3,600	3,900
교류 (실효값)	11,000	12,000	15,000*a	17,250	18,000
	17,500	19,000	25,000*b	27,500	29,000
a 16.7 Hz, b 50 Hz와 60Hz					

- 위 규격에 따르면 차량에 공급되는 평균전압은 500V ~ 900V 사이여야 한다. (정상 동작 조건에서, 전압은 500V ~ 1,000V 범위 내에 놓여야 한다고 요구사항에 명시되어 있음)

② 운영기관 요구 기준

○ 아래와 같이 국내 발주된 경전철 차량의 사양서를 검토하였다.

표 20 운영기관 요구 전압

노선	가선 공칭전압 (V)	전압변동 범위 (V)	
		최소	최대
부산 4호선	DC 750	500	900
광주 2호선	DC 750	500	900
인천 2호선	DC 750	500	1900

출처: 고무차륜형식 경량전철 차량 제작구입 사양서, 부산교통공사, 2005. 5.
광주도시철도 2호선 차량시스템 일괄 제작구매 제안요청서, 광주광역시, 2017. 4.
인천도시철도 2호선 전동차 제작구매 규격서, 인천교통공사, 2018. 5.

③ 경전철 무선급전시스템의 출력 전압 안정성 확인

○ 최대가속시험 (입출력 전압 측정)

- 인버터 입력측과 차량 집전장치의 출력측에 전압, 전류 센서를 연결하여 차량의 동적 특성을 측정하였다. (그림. 13)
- 차량 운행 조건은 다음과 같다. (각각 B역과 B-1역에서 출발)

· 정차 중 인버터 STOP
· 정차 중 인버터 RUN 및 무선급전
· 차량 최대가속 (P4)
· 급전 구간 빠져 나간 후 감속
· 차량 정지

- 위 운행조건에 따른 측정 결과

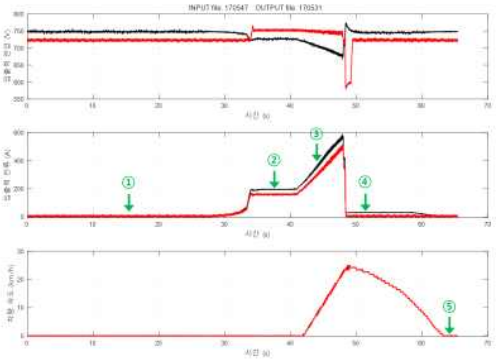


그림 15 B역에서의 입출력 특성 (빨강: 집전장치, 속도; 검정: 인버터)

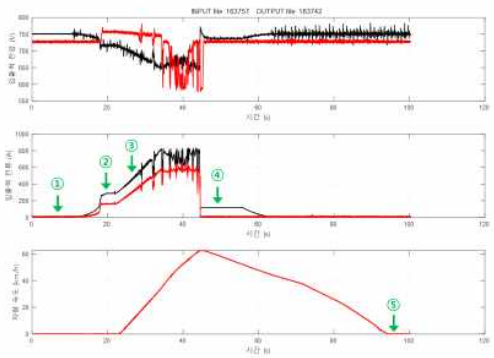


그림 16 B-1역에서의 입출력 특성 (빨강: 집전장치, 속도; 검정: 인버터)

- 위 운행조건에 따른 측정 결과 (출력 전압)

표 21 출력 전압 결과

구분	최대전압 (V)	최소전압 (V)	평균전압 (V)
B역 출발	766.3	579.2	726.8
B-1역 출발	781.3	577.1	724.3

· 최대, 최소, 평균 전압 모두 운영기관 요구 전압 (500~900V)을 만족하였다.
· 출력 전압은 정차 중 충전 상태에서 높게 유지되고 차량 가속시에는 낮게 떨어지는 특징이 있음을 알 수 있다.
· 무선급전이 없는 구간에서도 전원안정화장치를 통해 안정적인 전압을 유지할 수 있다.

○ 셔틀운행시험 (운영시스템 로그 데이터)



그림 17 셔틀운행 로그 데이터 (차량속도 및 출력전압)

- 위 그림은 무선급전 차량이 A, B역 (무선급전역사)를 무인운전으로 왕복 운행했을 때의 차량 속도와 출력 전압을 나타낸 그래프임
- 그래프의 B는 B역에서 출발한 속도 파형이고 A는 A역에서 출발한 파형을 나타냄
- 셔틀운행에서도 출력 전압은 약 600V ~ 770V 사이로 안정적으로 유지되고 있음
- 정차 중 충전 상태에서 전압이 약간 높게 나타나고 차량이 가속할 때 전압이 600V 정도로 낮아짐 (50% 출력으로 가속하여 최대 가속일 때보다 전압이 높게 유지됨)

다) 무선급전 경전철 시스템 운영 적합성 평가안 및 기준

(1) 동적 시험의 운영 필요사항을 최종 반영한 시나리오 작성

(가) 운행 시나리오

① 기본사항

- 무선급전 운행 시나리오란 기존 철도 환경에 무선 급전 시스템이 적용되었을 때 철도 차량의 운행이 정상적으로 이루어질 수 있도록 고려해야 하는 상황별 제반 사항을 의미한다.
- 운행시나리오를 수행하기 위하여, 시험설비는 동적시험 매뉴얼에 따라 전원투입 및 시동 절차를 수행하여 운행 대기 상태를 유지한다.
- 무선급전 관제시스템은 전원안정화장치의 SOC 및 충전 필요 조건에 따라 역 정차시간을 가변하여 정차중 충전시간을 조절하고, 급전인버터의 RUN/STANDBY 운전을 제어하여 급전/무급전 상태를 제어하며, 급/집전 충전 상태는 관제실에서 확인할 수 있어야 한다.
- 특히, 반복 운행 중 배터리팩의 충전율이 지속적으로 상승하여 더 이상 충전을 할 수 없거나 충전할 필요가 없는 경우에는 각 상황에서 충전을 하지 않을 수 있다.
- 운행대기 상태의 차량은 관제실의 운행 지령에 따라 출발 및 주행, 정차, 회차를 반복 수행하여야 하며, 왕복 운전 시, 정지상태 충전, 주행 중 충전, 회생 시 충전, 무급전시 배터리에 의한 에너지 공급 등 무선급전 시스템 및 전원안정화장치의 충/방전 상태를 확인할 수 있어야 한다.

○ 역 정차

- 정차가 완료된 후 차량은 다음 역으로 진행방향을 설정하여야 한다.
- 셔틀운행 이전에 정해진 정차시간을 준수하여야 한다.
- 정차시간 동안에는 무선급전으로 배터리를 충전하여야 하며 관제실의 무선급전 관리 명령을 따른다.

○ 역 출발
- 차량이 급전구간을 완전히 빠져나갈 때까지 인버터에서는 RUN 상태를 유지하여야 한다
- 차량이 급전구간을 빠져나간 후 급전인버터는 STANDBY 상태로 전환하여야 한다.
- 집전장치는 급전구간에서 차량의 에너지 소모량에 따라 소비전력(역행/보조전원) 공급 및 전원안정화장치의 충전전력을 공급하여야 한다.

○ 역 진입
- 급전인버터는 차량이 급전선로에 진입하기 전에 RUN 상태로 전환하여야 한다.
- 차량이 급전구간에 진입하면, 집전장치에서는 무선으로 전력을 받아 정차할 때까지 이동 중에 전력을 차량에 공급하여야 한다.
- 전원안정화장치는 차량 제동 중에 발생하는 회생에너지를 이용하여 충전하여야 한다.

○ 역간 운행
- 차량이 무선급전 선로 구간을 벗어난 역 간 주행구간에서 존재하는 동안 운전중인 급전인버터는 STANDBY 상태를 유지하여야 한다.
- 전원안전화장치는 차량이 역간 주행에 필요한 소비전력(역행/보조전원)을 공급하여야 하며 제동시 회생 에너지를 이용하여 충전하여야 한다.

② 운영 시스템 구성

○ 1㎿ 무선급전시스템 구성품 주요사양

표 22 구성품 주요사양

항목	주요사양	항목	주요사양
인버터 	· 입력전압: DC 750[V] · 입력전류: 1,600[A] · 출력주파수: 60[㎑] · 출력전압: 2,400[V] · 출력전류: 500[A] · 출력전력: 1.2[㎿] · 크기: 1,980 x 1,069 x 2,230㎜³	집전장치 	· 코일 공진주파수: 60[㎑] · 출력전압: DC 750[V] · 출력전류: 340[A] · 출력전력: 250㎾ /unit · 크기: 코일: 1,635 x 486 x 65 ㎜³ 정류기- 790 x 532 x 323 ㎜³
급전선로 	· 도체 단면적: 127㎟ · 리츠와이어 단면적: 0.08㎟ · 리츠와이어 도선 수: 25,200개 (우레탄 코팅) · 전체외경: 32㎜ · 정격전류: 60[㎑] 500[A] · 단위모듈길이: 3m · 평탄도: 편차 ± 5㎜ 이내	DCDC 컨버터 	· 입력전압: DC 750[V] · 정격용량: 500[㎾] /unit · 제어방식: 양방향 제어 (승압 및 강압) · 크기: 1,860 x 1,775 x 830 ㎜³
공진캐패시터 	· 캐패시턴스: 1.34[㎌] · 전압: 1,000[V] · 최대전력: 450kvar · 주파수범위: 50 ~ 72[㎑] · 크기: 85 x 85 x 34 ㎜³	배터리팩 	· 종류: LTO 배터리 · 저장에너지: 25 ㎾h /unit · 급속 충방전: 충전 8.5C, 방전 7C · 연속 충방전: 3C · 전압: 충전 650[V], 방전 570[V] · 크기: 1,570 x 420 x 940 ㎜³

○ 무선급전 시험선



그림 12 무선급전 시험선 (1.87km, 정거장 4개소)

③ 운영 인터페이스 구성

○ 자동 무인 운전시스템 구축

- 무선급전시험선은 무인운전으로 운영되는 시스템을 구성하였다. (무선급전서버, 지상운영장치, 차상운영장치)
- 종합 관제 사령실은 지상장치 및 차상장치와 데이터 통신을 수행하며 전반적인 상태 모니터링과 함께 제어도 같이 수행한다.
- 경전철 차량은 관제실의 제어 명령에 따라 셔틀 운행을 시작하고 종료하며 운행 노선은 TCMS에 셋팅된 데이터를 이용하여 주행한다.

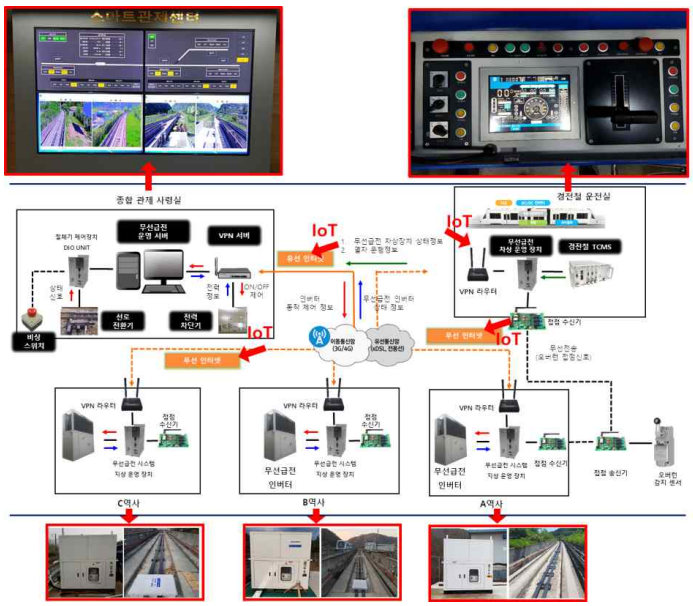


그림 13 통합운영관제시스템의 구성

○ 무선급전 운영시스템 통신망

- 무선급전 운영시스템은 운영서버 시스템(중앙사령실)과 지상 시스템(역사)과 차상시스템(차량)간의 통신은 LTE 통신을 이용하여 정보를 교환하고 인버터 장치를 제어한다.
- 중앙사령실에 설치된 VPN서버는 각 역사(4개역사)와 차량에 설치된 VPN 라우터와 연계되어 열차실시간 위치정보, 차상 무선급전장치 상태정보, 차상무선급전장치 고장정보, 인버터 상태 정보, 인버터 상태정보를 수신받아 무선급전 운영서버로 전송하고 무선급전 운영서버로부터 수신된 인버터 제어정보를 지상 장치로 전송한다.

- LTE-VPN라우터를 사용하여 보안은 물론 VPN의 1:1 교신 특성을 이용하여 역제어/원격제어에 뛰어난 효율성을 높였으며 지정된 센터와 지속적으로 통신이 가능하도록 설계하였다.

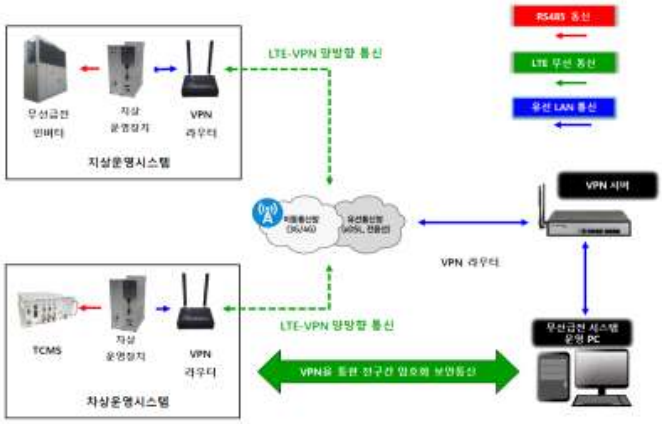


그림 14 무선급전 운영시스템 통신망 구성 방안

- 무선급전 운영서버-차상운영장치 간 통신방식
  · 통신방식: LTE VPN 무선통신
  · 전송정보: 실시간 위치정보, 차상 장치 상태정보, 차상 장치 고장정보
- 무선급전 운영서버-지상운영장치 간 통신방식
  · 통신방식: LTE VPN 무선통신
  · 전송정보: 인버터 운전모드 원격제어 정보, 인버터 상태정보, 인버터 고장정보
- 차상운영장치-TCMS 간 통신방식
  · 통신방식: RS 485 통신 또는 MVB 통신
  · 전송정보: 실시간 위치정보, 차상 상태정보, 차상 장치 고장정보
- 지상운영장치-인버터간 통신방식
  · 통신방식: RS 485 통신
  · 전송정보: 인버터 운전모드 원격제어 정보, 인버터 상태정보, 인버터 고장정보

○ 무선급전 인버터 운전모드 제어
  · 차량 내 TCMS로부터 열차 위치정보를 수신하여 열차의 위치에 따라 각 역에 설치된 급전 인버터의 운전모드를 실시간으로 제어한다.
- 운전모드 제어 명령 및 인버터 동작 상태

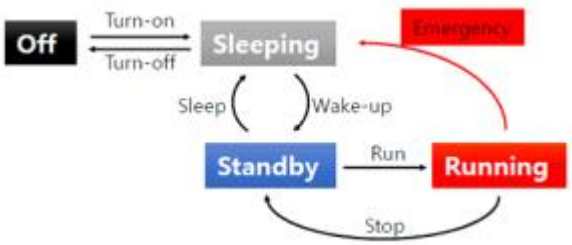


그림 15 운전모드 제어 명령 흐름도

	제어기	FC 충전	RF 출력
Off	X	X	X
Sleeping	O	X	X
Standby	O	O	X
Running	O	O	O

그림 16 인버터 동작 상태

- 열차 위치에 따른 무선급전 인버터 운전 제어

· TCMS로부터 열차 위치정보를 수신받아 열차위치에 따른 인버터 운전모드 제어 명령을 생성하고 생성된 정보를 지상운영장치를 통해 인버터 동작을 제어한다.
· 역도착 지점: 운영서버는 TCMS로부터 열차위치정보를 수신받아 열차가 역에 도착하면 Running 명령을 생성하여 지상운영장치로 전송하며 지상운영장치는 해당역의 인버터에게 Running 명령을 전달하고 인버터는 Running 명령에 따라 인버터 동작 상태를 RF 출력 상태로 전환하며 열차는 급속 무선 급전을 진행
· 열차출발 300m 지점: 열차가 출발하여 일정 구간(역으로부터 300m : 예정값)을 통과하게 되면 STOP 명령을 전송하고, 인버터의 RF 출력을 중단하고 인버터 상태로 전환하며 열차는 급속 무선 급전을 중단
· 인버터 무선충전 완료 지점: 무선급전 운영서버는 무선급전 인버터로부터 인버터 상태 정보 중 인버터 충전상태를 전송받아 충전이 완료되면 SLEEP 명령을 생성하여 전송하고 인버터는 급속충전을 중단하고 SLEEPING 상태로 전환
· 역도착 50m전 지점: 운영서버는 TCMS로부터 열차위치정보를 수신하여 열차가 역에 도착전 일정구간(도착역 50m : 예정값)에 이르면 Wake-up 명령을 전송하여 인버터의 상태가 Stand-by 상태로 전환하고 Run명령이 올 때까지 유지



그림 17 열차위치에 따른 무선급전 운전 제어

④ 운영 계획

○ 안전관리 조직도 및 동적시험 체계



그림 18 안전관리 조직도

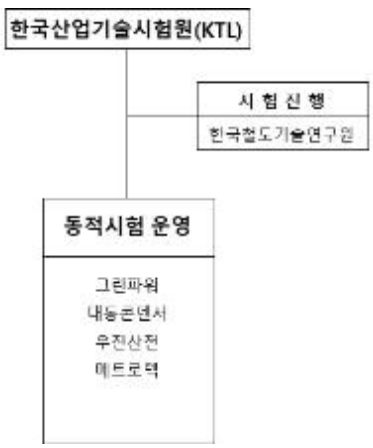


그림 19 동적시험 수행 체계

○ 무선급전 시스템 동적시험 수행 조건

· 1회 셔틀 운행 시 왕복운행시간 약 4분 30초 소요하므로 한 시간당 왕복 운행 횟수는 13.3 RT(Round Trip) 가능하다.

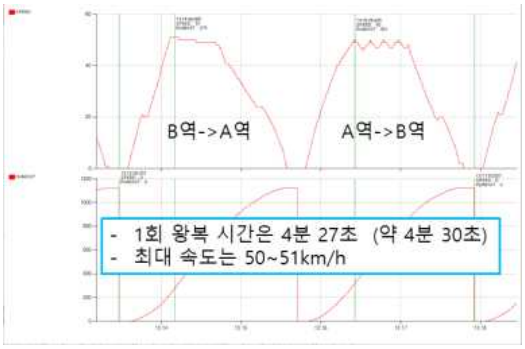


그림 20 왕복시간 및 최대 속도

○ 차량 무인운전은 속도 제한을 따르고 가속력은 P2로 진행하였다. (무선급전 시험 차량의 경우 최대가속능력은 P4 가능)



그림 21 무인 운행 시 구간별 최대 속도 구간

- 누적거리 40,000㎞ 달성 시 17,970회 이상 왕복을 수행하여야 한다. (1회 왕복거리 측정 결과 : 2.226㎞)

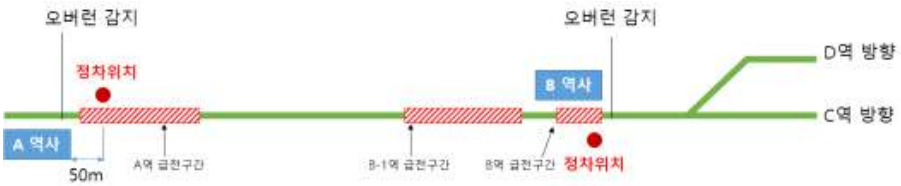


그림 22 셔틀 운행 구간 확인

○ 수행 계획 수립

시간	월	화	수	목	금	합계
08:00		운행 준비				
09:00		13.3	13.3	13.3	13.3	
10:00		13.3	13.3	13.3	13.3	
11:00	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	
12:00	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	
13:00	13.3				13.3	
14:00	13.3	13.3		13.3	13.3	
15:00	13.3	13.3		13.3	13.3	
16:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
17:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
18:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
19:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
20:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
	운행 종료					
합계	133RT	146RT	120RT	146RT	93RT	638RT

그림 23 운행 시간표 설정

- 차량의 위치는 각 역사에 도착하여 행선지를 바꾸게 되면 0으로 셋팅되며 차량

위치에 따른 인버터 동작상태는 아래 표를 따른다.

표 23 셔틀 운행 중에 각 인버터가 동작하는 차량의 위치 (단위: m)

운행구간	인버터 동작형태	인버터		
		B역	B-1역	A역
B역->A역	RUN	-	5	850
	STOP	120	430	-
A역->B역	RUN	990	730	-
	STOP	-	1100	295

○ 운영 매뉴얼

- 무선급전 경전철 시스템을 가동하기 위한 관제실/차량 간의 프로세스를 설명한다.
- 관제실 및 차량의 주요 사진



그림 24 경산 관제실

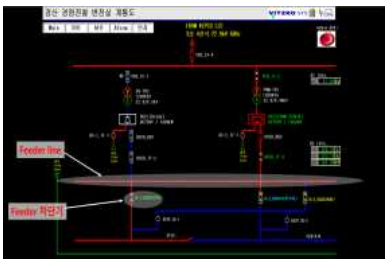


그림 25 변전실계통 스크린



그림 26 콘솔 스크린 확인



그림 27 관제 스크린



그림 28 차상장치 구성품 확인



그림 29 운전실 조작부 확인

표 24 기동 순서 확인

순서	관제실	차량
1	**전기실 투입 1** · 변전실 계통 스크린 ⇨ VCB-1C-2 클릭 · Close 선택 ⇨ 확인 · 대기 (약 2~3초)	**초기기동 1** · 운전석 비상열림 ⇨ 비상으로 레버 돌리기 · 문 수동으로 열기 · 열린 후 레버를 안전으로 돌려놓기

		· 승차 후 문 닫기 
2	**전기실 투입 2** · 변전실 계통스크린 ⇨ REC2(PWM 컨버터) 클릭 · 바뀐화면에서 Run클릭 · 기동 후 DC전압이 750V가 되는지 확인 	**초기기동 2** · 운전모드 ⇨ EM · 가감속레버 ⇨ B7 · 전후진 스위치 ⇨ F · 차량 기동되면 차량제어스크린의 가선전압 확인 (700 ~ 750V) 
3	**전기실 투입 3** · 변전실 계통 스크린 -> HSCB_1F-3 클릭 · Close 선택 -> 확인 · 대기 약 15초 후 feeder line이 붉은색으로 변하는지 확인 (붉은색 라인은 전원이 투입된 영역을 나타냄) · 상부 좌측에 '인지' 버튼 클릭 (조작했던 아이콘들이 점멸하다가 멈춤)	**차상장치 점검 (MC1,MC2 모두 점검)** · 우측열림 누르기 (혹은 좌측열림, 사람이 타고 내릴 수 있는 방향으로) · 중간문으로 들어가기 · 픽업 칠러 점검 - 압력게이지 0.6~0.7 MPa - 온도계 50°C 이하 확인 - 냉각수 게이지 확인 (H, L 중간) · DCDC칠러 점검 - 압력게이지 약 0.3~0.4 MPa - 냉각수 게이지 확인 (H, L 중간)  · 배터리 에어컨 ON 확인 (제어기 동작)
4	· 콘솔 스크린의 바탕화면 ⇨ WPT manager 실행 (실행되어 있는 경우 대기)	**차상장치 점검 2** · 운전석으로 이동 · '닫힘' 누르기 · Pickup, DDC Run 상태 확인 · SOC 확인 ⇨ 50 ~ 65% 사이 유지 (50% 이하일 때 충전필요) · 상태표시 ⇨ 정차제동만 점등 확인 (비상제동 점등 시 MC1, MC2의 비상제동 버튼이 동작 중인지 확인하고 풀림 조작) · 비상제동 버튼 ⇨ BCP 상승확인 (약 4.5 kg/cm2) · 컴프레셔 압력 확인 ⇨ MRP 6.5 kgf/cm2 이상
5	(대기)	· 차량제어스크린 ⇨ 운전화면 ⇨ 객실상태 ⇨ 반냉방클릭 · 속도 표시부 클릭 ⇨ 본 화면으로 이동

		
6	**무전 교신** (차량) “차량 기동 완료되었습니다.” (관제실) “알겠습니다. 통신 점검 후 인버터 기동하겠습니다.”	
이하 중략..		

표 25 기타 상황 발생 시

번호	상황	조치
1	· (긴급) 무인셔틀운행 중 차량을 멈추고자 할 때	· (즉시정차) ⇨ 콘솔 스크린 ⇨ 비상정지 - 급제동하며 모든 시스템 차단 (비상시 에만 사용) - 비상 상황 종료 후 비상정지 버튼을 다시 눌러 해제
2	· (일반) 무인셔틀운행 중 차량을 멈추고자 할 때	· (B 역사 정차) 관제실의 콘솔 스크린 ⇨ 셔틀운행 ⇨ STOP - 추후에 곧바로 셔틀운행 START 할 수 있다.
3	· 무인셔틀운행 중 인버터 조작이 필요할 때	· 콘솔 스크린 ⇨ 급전인버터 통합 제어 ⇨ 수동 · 무선급전 시스템 상태 확인 ⇨ 지상 ⇨ 인버터 제어 · 수동 제어가 끝난 후 자동으로 변경
4	· 무인셔틀운행 중 배터리 SOC가 50% 미만으로 떨어졌을 때	· 셔틀운행 ⇨ STOP을 통해 B역사에 정차시킨 후 (이때 인버터 RUN 및 배터리 충전) 충분히 배터리가 충전되면 셔틀운행 ⇨ START를 실행한다.
5	· 무인셔틀운행 중 배터리 SOC가 65% 이상으로 증가했을 때	· 두 대의 배터리 SOC가 모두 65% 이상이 되면 역사 인버터가 동작하지 않으므로 따로 조치할 필요가 없다. · SOC가 55% 이하가 되면 그때 다시 인버터가 동작하며 역사에서 충전이 이루어진다.

(2) 운영기관의 참여 검증

○ 경산 무선급전시험선에서는 2019년 4월부터 2020년 4월까지 무선급전 동적시험이 이뤄졌으며 운영기관인 광주도시철도공사 인력이 운영에 참여하여 운영 시나리오 및 동적 시험에 대한 검증을 완료하였다.

○ 광주도시철도공사 인력 조직 및 업무 내용 (출처: 무선급전시스템 유지보수 및 운영과업 수행보고서, 광주도시철도공사, 2020)

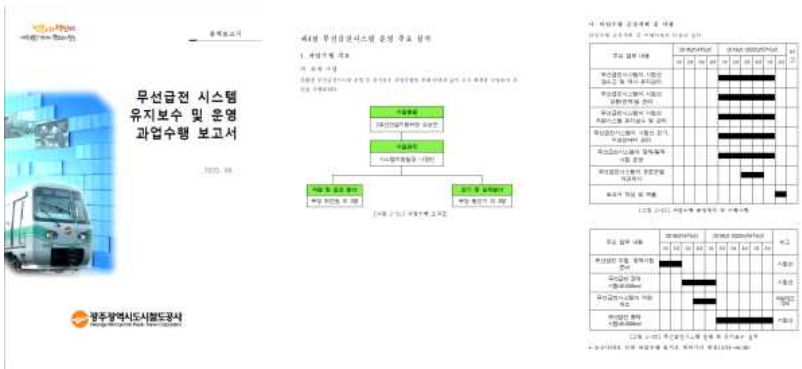


그림 30 광주도시철도공사 인력 조직 및 업무 내용



그림 31 광주도시철도공사의 무선급전 운영 참여 검증

나. 철도차량 무선 급전 시스템 모듈형 급전 선로 개발

1) 연구 개발 목표

○ 급전 선로의 효율 93 % 이상 효율 극대화를 위한 급전선로 평탄도 확보 규격 검토

○ 공진 주파수 가변이 용이한 경전철 모듈형 급전선로 구성품 상세 설계 및 시작품 제작 및 자체 실험

○ 급전선로 시공성 및 유지 보수 향상 기술 개발

2) 연구 개발 범위

가) 경전철 모듈형 급전선로 구성품 상세 설계

○ 공진 주파수 가변이 용이한 경전철 모듈형 급전선로 구성품 사양설계

○ 철도 궤도의 철근 영향 분석

○ 급전선로 캐패시터 배치

○ 캐패시터 가변이 용이한 결합방법 및 패키징 기술 개발

○ 경전철 모듈형 급전선로 구성품 상세설계, 시작품 제작 및 자체실험

○ 급전선로 효율 측정

○ 경전철 모듈형 급전선로 구성품 시제품 제작 및 단품 평가

○ 모듈형 급전선로 제작

○ 구성품 연계 동작 실험

나) 급전선로 평탄도 확보 기술 개발

○ 급전선로의 효율 93% 이상 효율 극대화를 위한 급전선로 평탄도 확보 규격 검토

○ 평탄도 측정 방법 수립

다) 급전선로 시공성 및 유지보수향상 기술 개발

○ 작업성 및 경제성을 고려한 급전 인프라 설계

○ 캐패시터 냉각 방식 보완 및 그에 따른 금형 신규 제작

○ 급전선로 캡박스 냉각 및 방수 능력 개선품 개발 및 설치

3) 연구개발의 필요성 및 기존 시스템과의 차별성

○ 철도차량용 무선 급전 선로 개발의 필요성

- 친환경 무선 급·집전 기술을 적용한 전기철도 시스템 개발을 위하여 고효율, 대용

량의 급·집전 모듈 개발 및 차량의 Energy Management System 등 총체적 기술 검토 및 개발이 필요

- 무선급전 경전철 차량집전시스템 개발 과제는 전력 공급의 핵심 장치가 되는 급전 시스템과 필수적으로 연계되어야 에너지 공급이 가능하므로 집전시스템 단독적인 개발이 아닌 무선 급전 시스템과 집전 시스템이 기술적 해석을 바탕으로 항상 상호 연계하여 개발
- 철도와 같은 고출력 무선 급·집전 시스템에서 핵심 기술 난제는 출력 증대에 따른 발열 문제이며, 열 해석 및 발열 대책은 과제의 필수적인 요소

○ 무선급전 경전철 차량시스템 의 차별성

- 무선 급·집전시스템의 경우 기존 철도차량에서 개선이 필요한 접촉식 전력 공급 시스템의 에너지 운영, 높은 건설비 및 유지보수비 등의 문제점을 해결할 수 있으며, 고속철도의 경우 현재 문제가 되고 있는 상부가선으로 인한 공기저항 및 마찰로 인한 속도의 한계점 등의 문제를 해결 할 수 있기 때문에 철도에서는 획기적인 기술이 될 수 있음
- 비접촉식 무선 급·집전 적용 시 상부 전차선 설비가 불필요하여 터널구간 다면적 감소로 터널 공사비 저감
- 지상구간 전차선 설비 구조물이 필요 없어 건설비 저감 가능
- 도심 내 거미줄과 같은 전차선 제거에 따른 도심 환경 개선
- 급·집전장치 및 전차선의 마찰이 없어 유지보수가 거의 없고, 단선에 의한 운행정지 및 감전사고 등의 위험이 없는 등 안전성 향상
- 접촉식 철도가 가지고 있는 마찰력으로 인한 속도의 한계를 해결할 수 있어 고속철도의 속도 증대 기여

4) 상세 연구 개발 내용

가) 경전철 모듈형 급전선로 구성품 설계 기술 개발

(1) 공진 주파수 가변이 용이한 경전철 모듈형 급전선로 구성품 사양설계

○ 캐패시턴스 가변이 용이한 결합방법 및 패키징 기술 개발

- 급전선로 길이 방향으로 캐패시터 직렬 연결 설계 완료, 캡박스는 유지보수 및 가변이 가능하도록 조립식 설계 완료

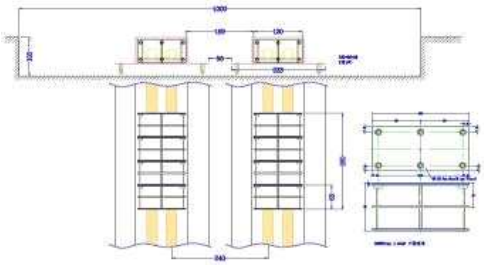


그림 32 캐패시터 직렬 연결 설계

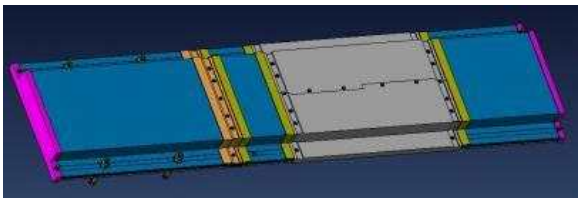


그림 33 조립형 캐패시터 박스

○ 작업성 및 경제성을 고려한 급전 인프라 설계

- 작업성을 고려하여 길이 방향의 자유도를 보장하는 압출 형태의 함체 설계 완료

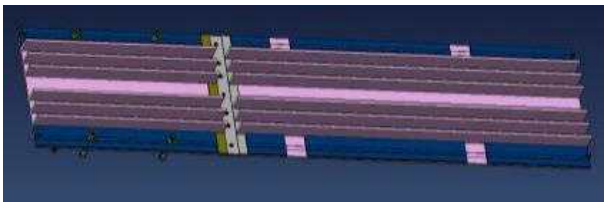


그림 34 압출형 함체

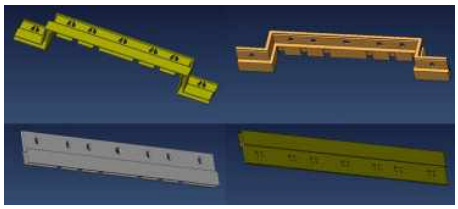


그림 35 회전형 구조물

- 함체 연결 부분 최소 곡률 반경에 적용할 회전형 설계 완료
- 높이 조절을 위한 앵커 볼트 및 금형

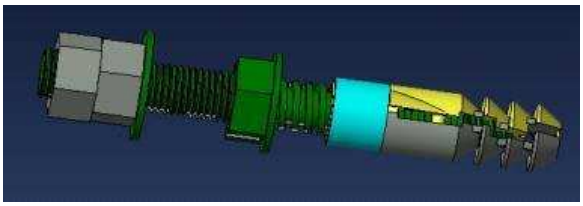


그림 36 높이 조절을 위한 앵커 볼트

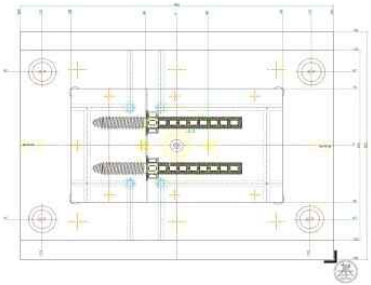


그림 37 앵커 볼트 금형 설계

- 케이블 인입부는 알미늄 관으로 연결하여 불요 전자파 차폐 개념 설계 완료
- 운행로 강도 확보를 위해 궤도에 적용된 철근이 많아 손실이 우려되나 페라이트를 적용하기에는 경제성 문제가 있어 철근 구조물에서 최대한 급전선로가 떨어지도록 설계 반영

○ 계절 변화에 따른 최소 외형 변형율을 가진 인프라 재료 선정
- 물성치 조사를 위해 ABS, PC, ASA, PP 소재에 대해 인장강도, 굴곡강도, 탄성률, 충격강도(고온,저온), 열변형 온도, 열분석(DSC) 한국화학융합실험연구원 의뢰 완료
- 물성치 및 경제성에 따라 소재 확정 후 재료에 UV 내성 소재 첨가 및 외부 도료 적용 계획 수립

○ 최소 곡률 반경을 고려한 단위 모듈 최적 길이 산정
- 경전철 최소 곡률 반경이 30 m 이므로 총 연결 모듈은 30 m 내외로 설계하며, 개별 모듈은 설치 경제성을 고려하여 최적길이 3 m 로 적용 계획 수립

○ 내구성을 고려한 구조물 바닥 설치 기술 개발
- 함체 구성품 무게와 급전선로 보수 인력이 함체 위에 올라섰을 때의 무게를 고려하여 최적 지지물 개수 설계
- 함체 상하 구조 결합 시 결합면에 보조물을 투입하여 방수향상 및 진동억제 설계
- 궤도면에 함체를 지지하는 나사형 지지물 설계 완료

○ 내압 및 절연 내구성을 가진 급전 케이블 개발
- 경제성 및 적용성 검토를 위해 78 sqmm, 95 sqmm, 120 sqmm의 케이블 실험 제작
- 온도 포화 및 손실률 계산 완료
- 전류 분배를 위해 2병렬 적용 예정이나 비상 상황 시 500 A의 급전 전류를 도통해도 무리가 없도록 120 sqmm 급 케이블 적용 예정

- Skin depth 및 근접 효과를 고려하여 소선경 0.08 mm 적용
- 내압 20 kV 확보를 위해 LDPE 또는 XLPE 재질 사용
- 외부 sheath는 작업성을 위해 PVC 적용과 절연거리를 위해 최소 3 mm 이상 두께 확보

○ 캔트 변화량에 따른 곡선 주로 설치 기술 개발
- 좌우 경사면에 대응하도록 함체 높이 조절 부분 설계 반영
- 함체 자체가 회전 구간에 설치 될 수 있도록 결합부위 조절 기능 설계 반영

○ 궤도 외부의 전력선 연결을 위한 방안 수립
- 불요 전자파 및 EMF 저감을 위해 인버터와 선로간 알미늄 관 적용 설계 반영

○ 온도 측정 결과(발열시험 온도 결과)

(가) 급전선로용 캐패시터 포화 온도

○ 급전선로 연속 동작 시 캐패시터 포화 온도 측정(5분 마다 측정)
- 캐패시터 포화 온도(초기 39 ℃, 포화 64 ℃)
- 플라스틱 함체 제작 시 허용 온도 추정 자료로 활용

(나) 급전선로용 케이블 포화 온도

○ 급전선로 연속 동작 시 120 sqmm 케이블 포화 온도 측정(5분 마다 측정)
- 케이블 포화 온도(초기 41 ℃, 포화 73.8 ℃)
- 플라스틱 함체 제작 시 허용 온도 추정 자료로 활용

(다) 급전선로 200 m 구간 효율 추정

○ Impedance Analyzer를 통한 60 kHz대의 120 sqmm 케이블 저항 성분 측정
- 60 kHz대 120 sqmm 케이블 저항 성분 10 m 당 11.24 mΩ 200 m 환산 224.8 mΩ

○ 신규 개발 Capacitor ESR 실측
- ESR 0.7 mΩ, 총 49 mΩ

○ 선로 총 손실 및 1.2 MW 통전 시 효율 추정
- 케이블+철근손실+ESR= 약 108.45 kW, 90.96 %(예상 추정치)

○ 선로 손실 개선 방안
- 케이블 소선경 축소
- 캐패시터 ESR 작게 제작

(2) 철도 궤도의 철근 영향 분석

○ 경산 실험선로 철근 배치 현황
- 주행로 강도 보강을 위해 주행 궤도면 아래 철근 배치
- 무선 급전 시 철근 위치에 따라 유도 가열 발생 가능



그림 38 본선 기초 공사



그림 39 신축 이음부 철근

○ 경산 실험선로 철근 영향 분석 시뮬레이션

- 철근 적용 전, 후 시뮬레이션 결과를 분석하여 손실분 추정
- 시뮬레이션 결과 철근 구조 시 유도 손실로 인해 약 50 % 집전 전압 감소
- 페라이트 코어(20 T) 적용 시 유도 손실 보전

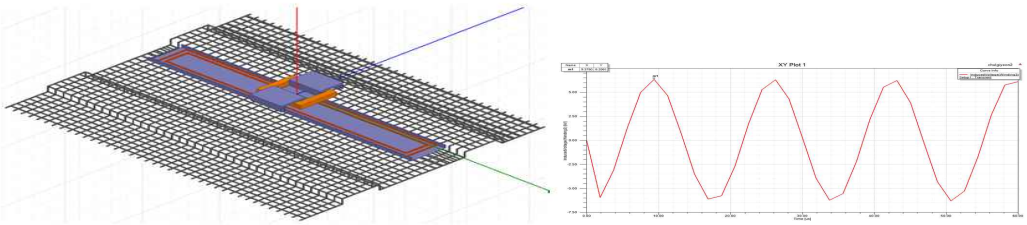


그림 40 철근 구조 급전선로(페라이트 코어 20 T 적용, 집전 전압 유지)

○ 철근 구조물과 철근 영향이 없는 곳에서 측정값 비교 분석

- 실험장소: 충북 오송 철도시설공단 (2016.01.08.)
- 실험목적: 철근의 간격에 따른 손실 측정
- 실험방법: 500 A(60 kHz) 전류 통전 후 손실 측정
- 실험 결과
- 철근 영향이 없는 곳(바닥)에서 동일 조건 측정값 5.47 kW
- 철근 영향 6 m에 1.27 kW 손실 추정(m 당 약 0.21 kW)



그림 41 철근과 급전선로 간 간격에 따른 손실 실험



그림 42 철근 영향이 없는 상태 측정

○ 손실 측정 결과 및 효율 추정

페라이트	주파수(kHz)	위치	Vdc	Idc	Pdc	Pdc_cal	Vac	Iac	Pac
좌측	64	L	157	11.6	**1.78**	1821.2	131	98.7	0.49
좌측	65	L	224	29.5	**6.51**	6608	196	248	0.45
양쪽	65	L	211	31.1	**6.49**	6562.1	185	248	0.59
양쪽	65	L	102	15	**1.51**	1530	77	98.4	0.09
양쪽	65	L	211	31.1	**6.48**	6562.1	184	248	0.56
양쪽	65	C	153	10	**1.5**	1530	128	98.7	0.02
양쪽	65	C	216	29.6	**6.29**	6393.6	192	248	0.98
양쪽	64	C	100	66.7	**6.71**	6670	74	248	1.44
양쪽	64	C	212	30.3	**6.34**	6423.6	186	248	0.38
제거	64	C	211	30.4	**6.32**	6414.4	184	247	0.4
바닥(철근x)	64		212	26.1	**5.42**	5533.2	185	249	2.54
바닥(철근x)	65		205	27.1	**5.47**	5555.5	177	249	2.42
페라이트 제거	65	L	219	31.2	**6.74**	6832.8	195	249	1.4
좌측, 일면	65	L	214	30.7	**6.45**	6569.8	189	249	2.4

그림 43 철근 및 페라이트 적용 손실 실험 결과

(3) 급전선로 캐패시터 배치

○ 선로에 적용될 L값을 추정하여 60 kHz 공진 시 필요한 C값 산출
- 선로 L값 철근영향 1.5 μH 추정
- 선로 250 m(공통선 50 m 포함) 시 약 375 μH
- 이때 $C=1/(L \cdot (\omega)^2)$= 0.0188 μF
- 케이블 내압 계산 $V=I \cdot \omega \cdot L$ (여기서 I는 급전전류)
- 급전전류 500 A, 공진 주파수 60 kHz 시 약 35.3 kV
- 캡박스 모듈은 직렬 5개의 C
- C 내압 제작 목표 1 kV
- 캡박스 모듈 내압 5 kV, 안전율 100 % 적용 시 2.5 kV

○ C 제작 시 내압 목표값에 맞춰 C 모듈 박스 설치 위치 계산
- 계산=전체/1개모듈 =35.4/2.5 즉, 최소 14개 모듈 필요, 설치 위치는 250/14= 17.8, 즉 약 18 m 마다 설치

○ 내압 고려 개별 C값 선정
- 내압을 증대 시키기 위해 캡박스 모듈은 직렬 5~6개의 C 구성
- C 1개당 내압 1 kV 예상 시 캡박스 모듈은 5 ~ 6 kV 내압 생성
- 캡박스 모듈의 내압 5 kV, 최악 조건(급전 500 A, L 375 uH, 내압 35.3 kV)
- 안전율 100 %(내압 최대 2.5 kV), 최소 14 개(=35.3/2.5)의 Cap 박스 구성
- 이때, 캡박스 모듈당 C값은 0.0188 uF * 14, 약 263 nF
- 따라서 직렬 구성의 캡박스 모듈의 개별 C 값은 263 nF * 5, 1.313 uF

(4) 캐패시턴스 가변이 용이한 결합방법 및 패키징 기술 개발

○ 급전선로 길이 방향으로 캐패시터 결합 설계 완료 및 시작품 제작

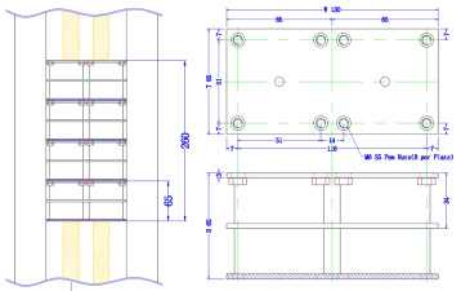


그림 44 결합 구조 캐패시터 설계

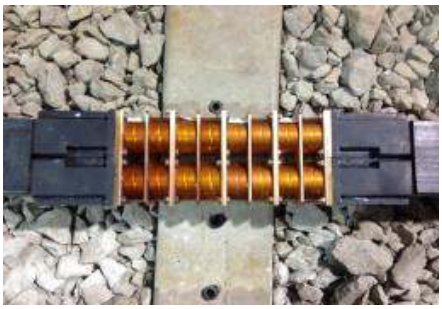


그림 45 캐패시터 시작품 제작

- 케이블과의 결합이 용이하도록 케이블 단말 처리(기존 현장 납탕 방식에서 볼트 체결 작업만으로 결합이 가능함으로써 선로 설치 시간 10분 내외로 대폭 개선)



그림 46 결합 구조 개선

(5) 경전철 모듈형 급전선로 구성품 상세설계, 시작품 제작 및 자체실험

○ 급전선로 시작품 설치

- 시작품 설치 공사

· 의왕 특동 선로에 총 연장 200 m 구간 급전선로 시작품 설치

· 통전 실험 및 캐패시터 내구성 실험에 활용 예정



그림 47 케이블 포설

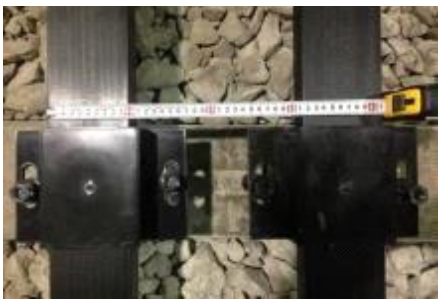


그림 48 공사 완료 점검



그림 49 대동콘덴서 개발품

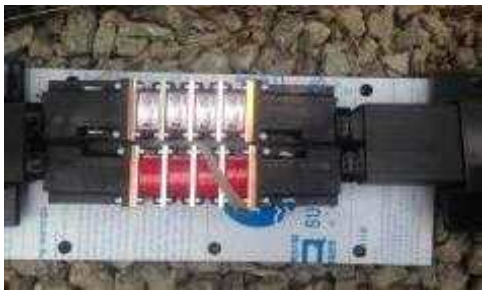


그림 50 외산 캐패시터

(6) 실험 급전선로 효율측정

○ 실험 절차 및 방법

- 급전 전류, 전압 측정

· 트랜스 출력단 전압 프로브 및 로코스키 코일 설치

· 캐패시터 변경 후 반복 측정 및 측정값 분석

- 선로 인덕턴스 측정

· 캐패시터 설치 부분을 Short 시켜서 급전선로 부분의 인덕턴스 측정

· 선로 상태(너비 등)에 따라 값이 달라지므로 현장 상태 기록 필요

- 선로 손실 측정

· 급전케이블의 손실과 케이블 캐패시터 간 접촉 저항, 캐패시터의 ESR등으로 이루어 지며, 1 m 당 저항값이 수십~ 수백 마이크로Ω 단위이므로 개별적으로 측정하기는 어렵고 출력단의 총 전력과 전압, 전류값을 측정하여 총 저항 값을 계산

· 총 저항값과 전력값의 선형성을 이용하여 출력단의 전류 변화에 따른 전력비를 계산하여 계산 저항값의 측정 오류를 검토

○ 1차 실험: 2016.02.07.



그림 51 인버터 세팅

- 급전전류: 239.57 A
- 선로 인덕턴스: 250.5 uH
- 측정 Point: 인버터 정류단, 변압기 출력단
- 측정조건: 인버터 개조가 필요하여 70 kHz, 240 A까지 실험
- 캐패시터 수량: 1.34 uF, 직렬 72 Set (2 개직렬, 2개 병렬 1Set)
- 실험 결과

표 26 1차 선로 손실 측정

전류(A)	전력(kW)	계산 저항
177	13.5	0.432
183	14.6	0.434
200	18.0	0.450
212	21.1	0.470
240	25.3	0.441

- 1차실험 효율 계산:

· 전류 증가와 출력 손실이 선형에 근사한 분포를 가지므로 500A 출력 시 값은 0.445 수준으로 추정됨

· 500A 출력시 전력: 약 111.3 kW

· 1.2 MW 최대출력 시 선로 효율: 90.7 %

○ 2차 실험: 2016.02.13.~16

- 급전전류: 498.1 A
- 선로 인덕턴스: 240.3 uH
- 측정 Point: 인버터 정류단, 변압기 출력단
- 측정조건: 56 kHz, 498 A까지 실험
- 캐패시터 수량: 1.34 uF, 80S * 2P 160개, 공진튜닝용 8개. 총 168개
- 실험 결과

표 27 2차 선로 손실 측정

전류(A)	전력(kW)	계산 저항
99	1.8	0.186
192	6.6	0.180
291	15.4	0.182
388	27.4	0.182
498	45.3	0.183

- 2차실험 효율 계산:

· 실제 498 A의 출력 전류 시 500 A 출력 시 전력은 약 45.5 kW

· 1.2 MW 최대출력 시 선로 효율: 96.2 %

○ 1, 2차 효율 차이 추정

- 1차 실험 시 야간 작업으로 캐패시터 체결 미비 부분이 많아 접촉 저항이 큼
- 1차 실험 시 주파수 세팅이 70 kHz가 되어서 스위칭 손실에 의한 출력분 손실이 큼
- 2차 실험 시 위의 인자 요인을 파악하고 2차에 걸친 체결 점검, 주파수 60 kHz 세팅 후 재측정하여 더 정확한 값을 얻음

(7) 경전철 모듈형 급전선로 구성품 시제품 제작 및 단품 평가

○ 무선 급전선로 단품 성능 실험 및 보완

- 형식승인 급전선로 실험 절차서 작성
- 적용 범위, 실험 제품, 실험항목 및 제한값 정의
- 실험 방법 및 판단 기준 정의
- 결과 기록서 항목 추가

표 28 형식승인 단품 성능 실험 항목

순번	품목	실험항목	제한값
1	통전실험	전류인가	500 Arms 이상
2		선로 손실	84 kW 이하
3		캐패시터 발열	80 ℃ 이하
4		케이블 발열	80 ℃ 이하
5		온도 포화	80 ℃ 이하
6	완성검사	평탄도 측정	표준편차 ± 5 mm 이내
7		외관 검사	

- 형식승인 구성품 실험 절차서 작성

· 적용 범위, 실험 제품, 실험항목 및 제한값 정의

· 실험 방법 및 판단 기준 정의

· 결과 기록서 항목 추가

표 29 형식승인 구성품 실험 항목

순번	품목	실험항목	적용규격
1	재료	촉진내후성실험	KS F 2274: 2002
2		인장강도	ASTM D638-14
3		굴곡강도	ASTM D790-15e2
4		굴곡탄성률	ASTM D790-15e2
5		아이조드 충격강도	ASTM D256-10e1
6		아이조드 충격강도(-10℃)	ASTM D256-10e1
7		하중변형온도(0.455 MPa)	ASTM D648-16(B법)
8		하중변형온도(1.82 MPa)	ASTM D648-16(B법)
9		열분석(DSC)	ASTM D 3418-15
10	고무	노화실험	KS M 6613:2007
11	급전함체	외관 실험	
12		저온 실험	IEC 600682-1/ KS C 0220
13		고온 실험	IEC 60068-2-2
14		온도사이클 실험	IEC 60068-2-14
15		고온고습 실험	IEC 60068-2-30
16		진동, 충격 실험	KS R9187_2003
17	급전케이블	내전압	KS C IEC 60502-1
18		절연저항	KS C IEC 60502-1
19		인장강도,신장율(상온)	KS C IEC 60811-1-1
20		인장강도,신장율(가열)	KS C IEC 60811-1-2
21		Hot-Set	KS C IEC 60811-2-1
22		수축실험	KS C IEC 60811-2-3
23		흡수실험	KS C IEC 60811-2-3
24		난연성	KS C IEC 60332-3-24

- 절차에 따라 통전 실험 실시, 500 A, 60 kHz (2017.12.11. 전기안전연구원)



그림 52 500 A, 60 kHz 통전 실험

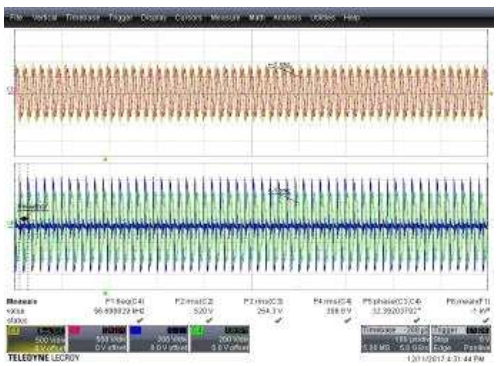


그림 53 전류 통전 실험 파형

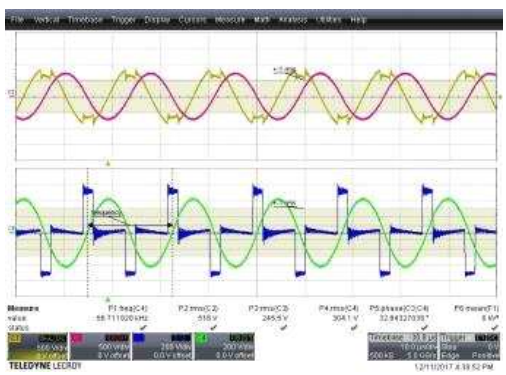


그림 54 전류 통전 실험 파형 확대

- 급전선로 시제품 상세 설계

· 캐패시터 박스 몰딩 구조 상세 설계

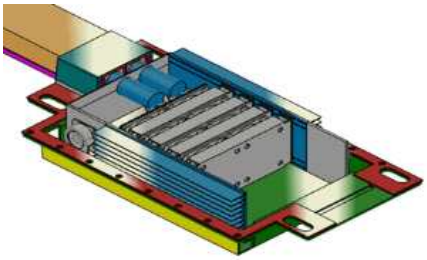


그림 55 현장 적용 모식도

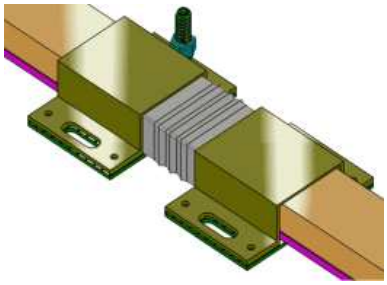


그림 56 현장 적용 예시도

- 방진 성능 향상을 위한 고무 실링 구조 적용

· 방진 성능 향상을 위한 고무 재질 브라켓 적용

- 최소 곡률 반경 적용 신축 구조

· 경전철 최소 곡률 반경 검토 후 적용 구조 개발

- 급전선로 단품 보완

· 생산성 향상 및 구조 보강을 위한 금형 수정 및 재 제작

· 캡박스 통풍 구조 및 결합 강도 향상을 위한 신규 홀 제작

· 방열판과 캐패시터 부분 절연 방열 실리콘 패드 부착해 열전도 향상

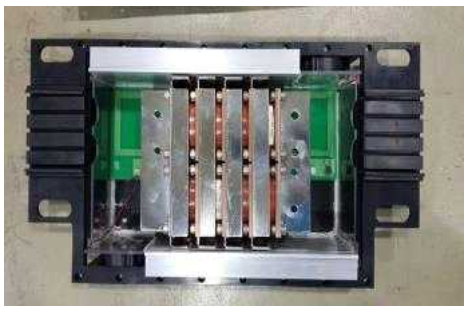


그림 57 실리콘 패드 적용



그림 58 실리콘 몰딩액 적용

· 최종 조립 후 실리콘 몰딩액 적용으로 방수 성능 및 절연 성능 보강

(가) 무선 급전선로 실험구축

○ 급전선로 구축 상세 설계

- 역사 충전 및 주행 중 충전을 고려한 급전선로 설치 위치 도면 작성

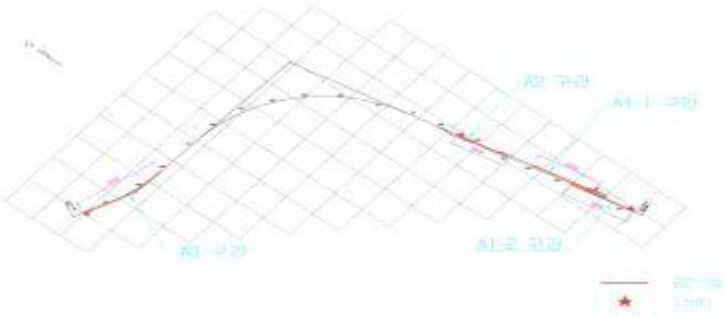


그림 59 경산 시험 선로 설치 예정 지역 계획 평면도

○ 무선 급전선로 실험 구축

- 검수고를 포함한 4개 역사 중 2개 역사에 급전선로 실험 구축을 계획하였으나, 실험 선로의 이전 과제 실험이 종료되지 못하여 부득이하게 선로 옆 부지를 활용하여 선로 200 m 구축
- 실험 선로 설치

· 직선 및 곡선 구간



그림 60 직선 구간 시험 포설



그림 61 곡선 구간 시험 포설

○ 케이블

- 개선 부분

· 2차년도에 생산된 케이블을 20 m 규격으로 절단하고 미리 양끝단의 단말 처리를 하여 현장에서 조립하는 시간은 단축되었으나, 실제 효율 향상 효과가 적었고 재단 과정에서의 손실분이 많아 현장에서 단말 처리를 하는 부분으로 변경

· 2차년도 효율 측정 결과 손실 부분 총량은 약 45.3 kW로 목표량인 84 kW 부분보다 마진이 많음

- 케이블 단말 처리 DC 저항 비교

· 단말처리 케이블: 11 uΩ

· 단말 미처리 케이블: 16 uΩ



그림 62 케이블 저항 측정 Set-up



그림 63 단말 처리 케이블 측정 결과



그림 64 케이블 저항 측정 Set-up



그림 65 케이블 저항 측정 결과

표 30 케이블 사양

항 목	사 양
도체	0.08 mm 에나멜 코팅, 25,200 가닥. 127 sqmm
Sheath	PE 계열 내압 2.0 mm, 외피 PVC 2.0 mm
PET 필름	0.038 mm
온도 범위	섭씨 105 도
외경	35 mm 이하

- 제작 도면 및 제작품

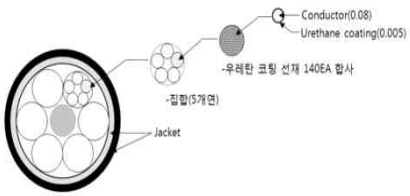


그림 66 케이블 집합 구조



그림 67 급전선로 케이블 제작

(8) 모듈형 급전선로 제작(실험선 구축)

○ A 역사 실험선로 설치



그림 68 A 역사 급전선로 설치



그림 69 곡선 구간 설치

- 단위 모듈 길이 3 m

· 급전선로 단위 모듈 길이 측정, 압출 베이스 및 커버 선로 단위 3 m 실측





그림 70 단위 길이 3m 측정 그림 71 단위 모듈 3m 실측

○ 선로 Litz 케이블 절연 내압 측정

- 공인 실험 기관 실험

· 실험조건 : 인가 전압 20kV(60Hz) 1분

· 대기조건 : 14.3 ℃, 35.6 % R.H., 1013.9 hPa

· 실험방법 : 케이블을 수중에 담근 상태에서 AC 20 kV 전압을 1분간 인가 시, 이에 견딜 것. 실험은 상온에서 실시 할 것

○ 선로 전류 정격 시험

- 공인 실험 기관 실험

· 실험조건 : 500 A(60 kHz)

· 실험방법 : 10분 간격으로 총 6회 전류 측정, 종료 후 이상 확인





그림 72 선로 절연 내압 실험 그림 73 선로 정격 전류 측정 파형

(9) 구성품 연계 동작 실험

○ 현장 실험 구성도



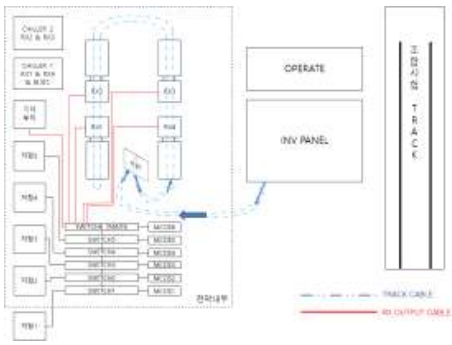


그림 74 구성품 연계 조합 시험 그림 75 구성품 시험 장치 구성도

- 무부하 출력 실험(60.75 kHz, 500 A)

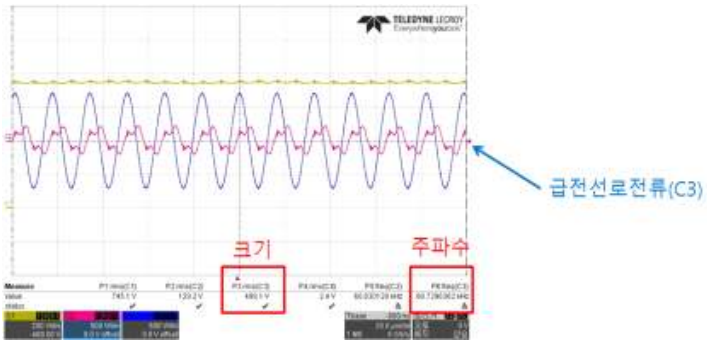


그림 76 전류 통전 500 Arms

나) 급전선로 평탄도 기술 개발

(1) 급전선로의 효율 93% 이상 효율 극대화를 위한 급전 선로 평탄도 확보 규격 검토

○ 선로 부분 평탄 규격 검토

- 급전선로 함체의 평탄도 수준을 결정하기 위해 IRI를 준용하였으며 단위 길이(3 m)당 5 mm 이내의 편차, 좌우 방향(60 cm) 3 mm 이내 목표 설정

○ 집전 출력 범위에 따른 높낮이 허용 오차 산정

- 집전에서의 최대 효율과 출력을 얻기 위해 집전 Pick-up 길이 기준 5 mm 이내가 되도록 급전선로 설치 계획 수립

○ 선로 평탄도 측정 방법 개발

- 측정 장비는 Highway Straightedge와 자동포장상태조사장비(ARIA)등이 있으나 급전선로 함체의 평탄도를 측정하기에는 성격이 맞지 않아 차년도 과제 수행 시 급전선로 평탄도 측정에 최적화 된 제품 개발 계획 수립

○ 곡선 부분 평탄 작업 기술 개발

- 곡선 주로 부분에 궤도면에 함체를 지지하는 나사형 지지물 설계로 좌우 종방향 편차를 보정할 수 있는 기술 개발 계획 수립

(2) 평탄도 측정 방법

○ 측정 방법

- 모듈 시작 지점 좌우 4곳에서 10 cm 간격으로 3 m 거리의 30개 지점 측정 후 평균
- 선로 시작 지점 및 종료 지점까지 연속 측정
- 3회 연속 측정 후 측정 값 분석
- 결과값 분석 및 주행면 요철 부분 점검

○ 측정 분석

- 모듈 단위의 접합 부분 5 mm 보정
- 주행면 요철 부분 검토
- 구배 시작 구간 및 곡선부 캔트 시작 부분 좌우 편차 검토
- 기록 및 로그 파일 보관

(3) 평탄도 측정 장비 개발

- 무선 급전 선로 설치 상태 측정에 최적화 된 평탄도 측정 장치 설계 및 제작

표 31 평탄도 측정기 주요 사양

구분	사양
측정범위	200m 선로 왕복 주행가능, 측정구 4 개소 0~250mm 0.1um분해능
주행능력	3km/h 이상의 정속 주행
제품크기	1350 * 250 * 500 이내, 중량 70kg 이내
사용환경	섭씨 - 10 ~ 60도 상대 습도 90% 이내
통신방식	내부: CAN, 외부: CAN (협의 가능)
전원 공급	외부 24V, 자체 출력으로 주행
전장품	Relay 3EA, Fuse, MCCB등을 구비
방 열	내부온도 상승으로 인한 측정범위 오차 1/1000mm이내

- 평탄도 측정기 제작 및 측정

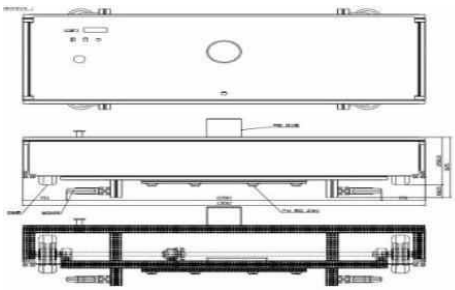


그림 77 평탄도 측정기 설계도



그림 78 평탄도 측정기 제작품

· 현장 측정



그림 79 A 역사 평탄도 측정

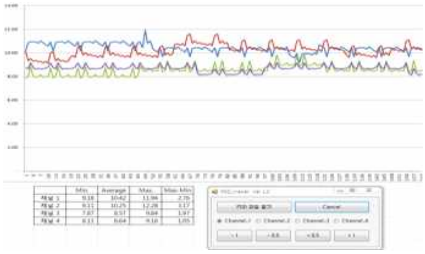


그림 80 평탄도 측정

다) 급전선로 시공성 및 유지보수향상 기술 개발

(1) 작업성 및 경제성을 고려한 급전 인프라 설계

○ 작업성을 고려하여 길이 방향의 자유도를 보장하는 압출 형태의 함체 시작품 제작

○ 함체 연결 부분에 가이드라인 형 유격을 적용하여 표준 구간의 최소 곡률 반경에 적용

○ 캔트량에 따른 높이 조절 반영 설계



그림 81 급전선로 함체 시작품

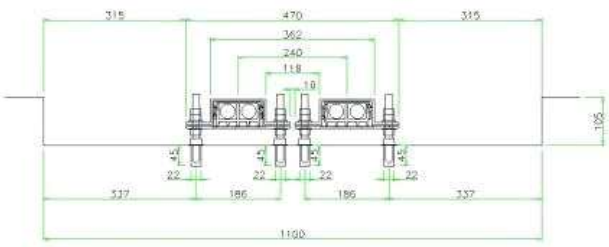


그림 82 급전선로 단면도

○ 계절 변화에 따른 최소 외형 변형율을 가진 인프라 재료 선정

- 물성치 조사를 완료하여 선정한 PC, ASA, MC계열 나일론 소재에 대해 변형률을 측정하기 위해 촉진 내후성 실험(폭로실험) 한국 화학 융합 실험 연구원 의뢰 및 실험 완료
- 현장 조사를 위해 상시 태양에 노출되고 환경변화가 있는 외부와 콘크리트 방호벽으로 둘러싸여 외부 노출이 덜한 곳에 각각 함체를 설치하여 과제 기간 내 변화 관찰
- 관련 제품 시사출



그림 83 PC, ASA, MC 나일론 재질 시사출 제품

○ 최소 곡률 반경을 고려한 단위 모듈 최적 길이 산정

- 고무차륜 경전철의 최소 곡률반경은 50 m 이며 이는 지름 약 314 m의 원 위에 위치함
- 연결 부위 작업성 및 운반성을 함께 고려시 약 3도의 길이를 가지게 되는 3 m로 선정

○ 내구성을 고려한 구조물 바닥 설치 기술 개발

- 콘크리트 면에 쐐기 구조의 앙카볼트 브라켓을 설치하여 강도 증대 및 내진동 능력 향상

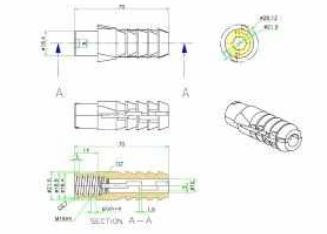


그림 84 앙카 볼트 브라켓 제품도

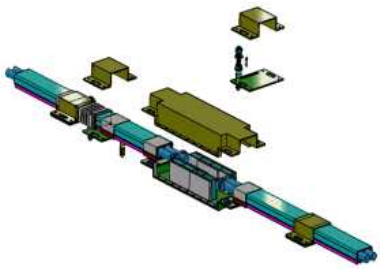


그림 85 급전선로 모듈 구성품 상세 설계



그림 86 시사출 가조립 확인

○ 단위 모듈 연결 기술 개발

- 연결 부분의 금형을 제작하고 연결부위와 선로 1 m당 1개씩 설치하여 정적 하중 250 kg 이상을 견딜 수 있도록 제작



그림 87 250 kg 이상 하중 실험

○ 내압 및 절연 내구성을 가진 급전 케이블 개발

- 케이블 구성

표 32 케이블 구성

	구분	Material	비고
1	도체	0.08 mm 에나멜 와이어	내열 구분 : 155 ℃ / Solderable
2	절연	조사용 비난연 LDPE	Color / Black
3	Sheath	105 ℃ / 난연, 연질 PVC	Color / Black

- 케이블 치수

표 33 케이블 Dimension

	구분	단위	규격	비고
1	도체(개수/소선경)	ea/mm	25200/0..08	127 sqmm
2	도체 집합 외경	mm	19 이하	
3	Taping	mm	1차 - 0.038 mm PS	
		mm	2차 - 0.1 mm 부직포	
4	절연두께	mm	4 ± 0.2	
5	Sheath 두께	mm	2 ± 0.2	
6	전체 외경(OD)	mm	32 ± 2	Max 35 이하

- 1, 2차 Sheath 소재의 구분

번 호	특 성	1,2차 절 연	3차 Sheath	비 고
1	온도 Grade		105℃	
2	난연성	비난연	난연	
3	Halogen Free 여부	Halogen Free	Halogen Free	
4	RoHS 충족 여부	RoHS 충족	RoHS 충족	
5	적용소재 구분	LDPE 계통	연질, 난연 PVC	
6	Hot-set 기능	충족-전자빔 조사	해당없음	

그림 88 케이블 Sheath 특성

- 외부 인증 기준

시험항목			평가 기준	적용시험규격
내전압			AC 10KV에서 5분간 견딜것	KS C ICE 60502-1
절연저항(90℃)			3.67MΩ(Km당) 이상	KS C ICE 60502-1
자켓	상온	인장강도	12.5N/mm² 이상	KS C ICE 60811-1-1
		신장율	200% 이상	
	가열	인장강도	상온값의 ±25% 이내	KS C ICE 60811-1-2
		신장율	상온값의 ±25% 이내	
	Hot-set	하중 시 신율	175% 이하	KS C ICE 60811-2-1
		냉각 후 신율	15% 이하	
	수축시험		4% 이하	KS C ICE 60811-2-3
	흡수시험		1mg/cm²	KS C ICE 60811-2-3
난연성			탄화된거리 2.5m 이하일 것	KS C ICE 60811-2-3

그림 89 케이블 인증 사양

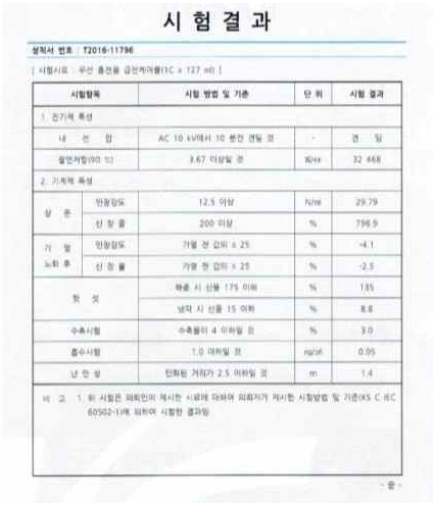

시 험 결 과

그림 90 케이블 실험 성적서

- 내전압, 절연저항, 피복 실험, 난연성 실험 공인인증기관 실험 완료

(2) 캐패시터 냉각 방식 보완 및 그에 따른 금형 신규 제작

○ 캐패시터 냉각 방식 보완

- 캡박스 내 발열 부위를 고려한 팬 설치

· 통기 성능 개선을 위한 최적 FAN 위치 선정

· 발열 부위 FAN 보강으로 냉각성능 향상



그림 91 기존 캡박스



그림 92 FAN 보강 신규 캡박스

○ 신규 FRP 캐패시터 박스 금형 제작



그림 93 FRP 재질 캐패시터 박스를 위한 제작 금형

○ 역사별(A, B, B-1, C, D) 신규 케이블 포설 및 신규 캐패시터 박스 설치

- 신규 케이블 포설



그림 94 케이블 포설



그림 95 급전선로 높이 조절

- 급전선로 높이 조절

- 차량 집전 장치 간섭 확인 및 공극 간격 확인 및 차량 시험 주행



그림 96 집전장치 공극 조절



그림 97 차량 실험 주행

- 화재 검출을 위한 감열선 설치
- 내압 분배를 위한 2병 6직 구조 캐패시터 뱅크 사용



그림 98 감열선 설치



그림 99 2병6직 캐패시터

- A역사 선로 총 길이 230 m로 연장, B역사 플랫폼 구간 내 급전선로 설치



그림 100 A 역 구간 연장



그림 101 B역 급전선로 설치

- B-1 역사 총 길이 200 m 표준 선로 설치, C역사 공사 완료



그림 102 B-1 역 포설 완료



그림 103 C 역 공사 완료

- D 역사 200 m 표준 선로 설치



그림 104 D 역 200 m 급전선로



그림 105 D 역 정차중 충전 급전선로

○ 캡박스 신규 제작

- 난연 및 통기성능 개선 캡박스 신규 제작



그림 106 난연 재질 신규 캡박스

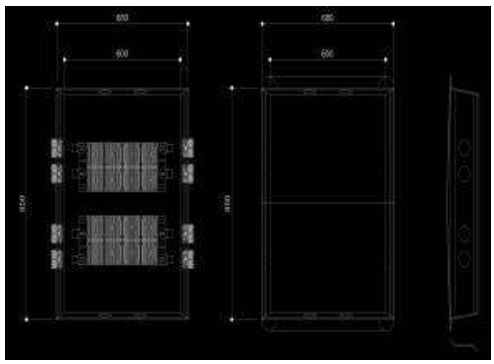


그림 107 캡박스 높이 축소 (30mm)

- 최적 통기 성능을 위한 박스 높이 축소
- 비틀림 강도 향상 및 수분 침투 방지용 칸막이 설치
- 발열 감지용 감열선 설치
- 정비 및 점검 용이성을 위한 덮개 분리 용이 설계
- 케이블 인입 위치 변경
- 케이블 연결부 직각 설계
- 주행 실험 구간 전수 신규 캡박스 교체



그림 108 A 역 신규 캡박스 교체



그림 109 B 역 신규 캡박스 교체

- 구조 보강 신규 캐패시터 모듈 적용



그림 110 기존 캐패시터 모듈



그림 111 보강형 캐패시터 모듈

(3) 신뢰성 개선을 위한 향후 계획

- 5차년도 4만km 동적 시운전 진행 시
- 추후 위의 인버터 패널 동특성 운전 시 발생한 Fault는 첫 번째 외부 빗물유입에 의한 커패시터 소손 발생 건, 그리고 내부 커패시터 발열로 인한 커패시터 박스 및 선로의 소손이 있다.
- 외부 빗물유입에 의한 문제점은 캡박스를 신규 제작 하였다. 난연 재질 및 통기성능을 개선한 신규 커패시터 박스를 각선로에 재설치 하여 빗물이 유입되는 사고는 해결하였음.
- 두 번째로 커패시터 발열에 의한 급전선로 케이블 소손 및 캡박스 소손 부분은 발열 발생 시 감열선이 동작하여 급전인버터를 정지 할 수 있는 기능을 추가함. 화재 발생 시 커패시터에 의해 선로 및 커패시터 박스가 소손 되는 것을 막을 수 있음
- 추후 커패시터 박스 및 급전 선로 제작 시 5차년도 동적 시험시 발생한 신뢰성 문제를 반영하여 제작하도록 하겠음.

(4) 급전선로 캡박스 냉각 및 방수 능력 개선품 개발 및 설치

○ 신규 직립형 냉각 구조 캐패시터 박스 개발 필요성

- 기존 캐패시터 박스는 U-type 수로 구조의 선로 하부에 위치하여 폭우나 장마에 의한 침수 시 완벽한 방수가 어렵고, 캐패시터의 방열판에 직접적으로 공기 유로가 형성되어 있지 않아 냉각 효율이 상대적으로 떨어짐
- 직립형 구조를 적용하여 선로 외부에 캐패시터 박스를 설치하여 침수에 대한 방수 문제를 해결하고, 냉각 공기 유로와 개선된 방열판 구조를 적용하여 냉각 효율 문제를 해결하는 신규 캐패시터 박스 개발 필요
- 캐패시터 박스 설계 도면

· 캐패시터 방열판 구조 개선, 냉각 공기 유로 공기 유입을 위한 최적 팬 위치 반영

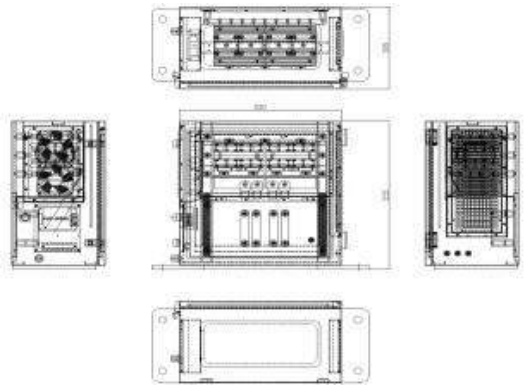


그림 112 신규 개발 캐패시터 박스

- 제작품



그림 113 신규 제작 캐패시터 박스



그림 114 공기 유로 적용

다. 경전철용 무선급전시스템 인버터 개발

1) 연구개발 목표

○ 능동제어가 가능한 용량 1MW 효율 96% 8m3 사이즈 무선급전 인버터 개발
○ 무선급전 인버터 최적 유지보수기술 개발
○ 경전철용 무선급전 시스템 시운전 시험 신뢰성 확보(동적성능시험 4만km이상)

2) 연구개발 범위

○ 1.2MW급 고주파 인버터 단품 개발
○ 급전 인버터 스텍 상세설계
○ 급전 인버터 시스템 함체 구성안
○ 조합 및 정적 신뢰성 시험
○ 급전 인버터 시스템의 신뢰성 확보를 위한 시험
○ 급전 인버터의 유지보수 설차서 작성

3) 연구개발의 필요성 및 기존 시스템과의 차별성

○ 철도차량용 무선 급전 시스템 기술 개발의 필요성
- 현재의 철도 차량은 화물 및 여객의 대량 수송이 가능하며 승용차, 버스, 해운 등의 타 운송수단에 비해 화석 연료 소모가 작고, 이산화탄소 발생량이 현저히 작아 친환경적이고, 에너지 효율이 높아 미래 교통수단으로써 관심을 많이 받는다. 하지만

현재 사용 중인 상부 가선이 설치된 철도 시스템의 경우 상부 가선 설치에 필요한 추가 공간 확보 및 충분한 터널 공간으로 인한 높은 구축비용과 고전압/전류의 가선이 노출되어 있어 발생할 수 있는 안전 문제, 가선과 판토그래프의 마모에 따른 관리를 위한 유지 보수비용 발생 등의 문제가 있다. 따라서 기존 철도 시스템의 장점인 정시성과 안정성을 보장하면서, 안전성을 확보하는 동시에 상부 가선에 대한 유지 보수비용을 절감할 수 있는 새로운 급/집전 시스템 기술이 필요하다.

- 이러한 상부 가선 방식에 대한 대안 기술로써 배터리를 사용하는 무가선 트램이나 접촉식 지면 급전 방식인 3궤조 방식 등 다양한 방식을 개발하여 적용하고 있으나 안전, 유지 보수 등의 문제를 완전히 해결하기에는 한계가 있다. 따라서 기존의 접촉식 전력 공급 장치나 전차선 설비가 필요 없어 유지 보수비용 절감이 가능하고 단선 및 전기 접촉 등에 의한 위험성이 없는 친환경적인 전기 철도 시스템의 개발이 필요하다. 이에 따라서 기존 철도 시스템의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 무선 급전 기술 개발에 대한 필요성이 커지고 있다.

○ 무선급전 경전철용 무선급전시스템 인버터의 차별성

- 대용량 고주파 인버터 기술을 활용한 급전시스템 구축
- 무선급전 경전철 표준화 기준에 적극 활용
- 트램, 도시철도 및 일반철도, 고속철도의 급전방식 전환을 통한 실용화 추진
- 무선급전시스템 연구를 통한 대국민 서비스에 보다 안전한 철도시스템 구축에 기여
- 경전철용 무선급전 시스템에 최적화된 고효율 최소 사이즈 인버터의 개발로 안정적인 전원공급 및 유지보수 최소화 달성
- 무선급전 실용화를 위한 기존 해외제품을 국내개발로 가격 경쟁력 확보
- 세계 최대용량 무선급전 기술은 전기자동차, 전기버스, 등에 다양하게 활용
- 대용량 무선전력 전반에 걸쳐서 성능향상, 원가절감, 등의 효과
- 무선전력 산업 전반에 걸쳐서 경쟁력 제고
- 전차선이 필요없는 무선급전시스템의 도입으로 철도 초기 공사비 및 유지보수비 절감
- 전차선 방식의 도시철도의 경우 18억/km이나 무선급전 건설 시 7.5억/km로 절감 (연간 유지보수비 3.5억/km 절감)
- 전차선 제거로 터널단면 약 7.5% 축소가 가능하여 지하구간이 많은 도시철도 건설비 저감 가능
- 무가선 방식으로 인해 팬터그라프의 마모 보수 불필요, 낙뢰로부터 시스템 보호 가능
- 판토그래프 제거를 통해 공기저항 및 소음 감소로 고속철도 속도증속에 유리
- 무선급전 철도차량은 특성상 적은 공사비로 건설이 가능하고 지리적, 공간적 제약이 적어 규모가 작은 중·소도시에서부터 대도시의 지선교통까지 각각의 수요에 맞게 대응할 수 있는 장점을 가지고 있다.

4) 상세 연구 개발 내용

가) 인버터 사양 설정

○ 부하에 따라 능동제어가 가능한 용량 1MW 효율 96% 이상 무선급전 인버터 개발

- 무선급전 급전인버터 시스템은 집전장치 1MW 공급을 위해 급전선로 및 급전인버터 손실을 고려하여 1.2MW 이상 급으로 제작하여야 한다.
- 무선급전 급전인버터 시스템은 다중의 경전철 차량 충전을 고려하여 1시간 정격으로 설계하여야 한다.
- 무선급전 급전인버터 시스템의 운전주파수는 60kHz ±10kHz 이내로 가변 가능해야 한다.
- 무선급전 급전인버터 시스템의 총 부피는 8m^3 이내여야 한다.
- 무선급전 급전인버터는 집전장치에 1MW 공급을 위해 급전 선로에서 필요로 하는 전류 (500 Arms 이내) 를 정격 시간 동안 공급할 수 있어야 한다.
- 무선급전 급전인버터의 EMI 필터 입력 측에서 측정한 입력전력과 급전 선로 측에서 측정한 인버터 출력 전력을 비교한 인버터의 총 효율은 96% 이상 (정격 운전시 손실 50kW 이내) 이어야 한다.

○ 무선급전 인버터 최적 유지보수기술 개발
- 급전인버터의 실제 적용시를 기준으로 유지보수 방안검토서 작성
- 유지보수는 인버터 패널에 고장상태에 따른 유형별 조치 방법 기술 그리고 정상적인 운영을 위한 정기적인 운영점검방안 제시
- 인버터 패널 고장에 따른 유형별 조치 방법 기술은 고장정보 에 따른 고장 상태 파악, 고장 원인 파악 그리고 고장 처리방안을 기술
- 정기적인 운영점검 방안은 기간 및 계절에 따른 유지보수 방법, 고장 예방, 그리고 예방정비를 통한 안정적인 인버터패널의 운영을 위한 운영점검 방안을 기술

○ 경전철용 무선급전 시스템 시운전 시험 신뢰성 확보(동적성능시험 4만km이상)
- 동적 신뢰성(4만km이상)을 실시하여 제품의 내구성 및 안전성의 성능검증
- 급전인버터 운전방안 데이터 수집 및 검토(경전철 진출입에 따른 운전방안등), 보완사항 발생 시 제품 안정화를 위해 보완 반영한다.
- 동적 시험 시 발생되는 고장정보를 바탕으로 운전 시 발생하는 고장정보에 대한 대응 및 상황을 조치한다.
- 안정성을 고려한 고장정보 및 동작 시퀀스 반영한다.

표 34 급전 인버터 사양

항목	사양
입력 전압 범위	500~900V
입력 최대 전류	1850A@-10% 입력 전압
성능 보장 입력 전압	750Vdc ±10%
정격 출력 전력	1.2MW
출력 주파수	60kHz ±10kHz
정격 출력 전류	500A
정격 출력 전압	2400V
효율	96% 이상
외함 크기	8㎥ 이하
외기 온도	-25도 이상 40도 이하
냉각	수냉 방식
IP등급	IP54

나) 급전 인버터 시스템 상세 설계 및 제작

○ 무선급전 급전인버터 시스템은 집전장치 1MW 공급을 위해 급전선로 및 급전인버터 손실을 고려하여 1.2MW 이상 급으로 제작

- 300kW 급전 인버터 스택 4병으로 급전 인버터 시스템 제작
- 정격 출력 전류: 500A
- 정격 출력 전압: 2400V

○ 단품 급전 인버터 스택 개발

- 단위 모듈 전력용량: 300kW
- 동작 주파수: 60kHz
- 스위칭 소자 선정 및 방열 설계
- 300A SIC MOSFET을 이용하여 4병렬로 구성
- 전류 불균형율(115%)을 고려하여 500A 정격으로 제작

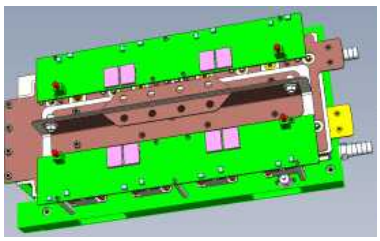


그림 115 인버터 스택

○ 인버터 직렬 인덕터 설계

- 총 4개의 인버터 스택이 사용되며 4*3.534uH = 14.1uH로 설계
- 인덕터 전압: 2.4kV
- 인덕터 전류: 500A (전류 불평형률 15%)
- 동작 주파수: 60kHz

○ 병렬 커패시터 설계

- 목표 커패시터 값: 1.939uF
- 4.3uF을 4직 2병으로 구성: 3.59uF/4*2 = 1.939uF
- 커패시터 전압: 3.6kV(2.4kV의 146%)
- 커패시터 전류: 5.0kA(2.06kA의 200%)
- 추후 트랙과의 공진주파수를 맞추기 위한 커패시터 추가 공간 확보

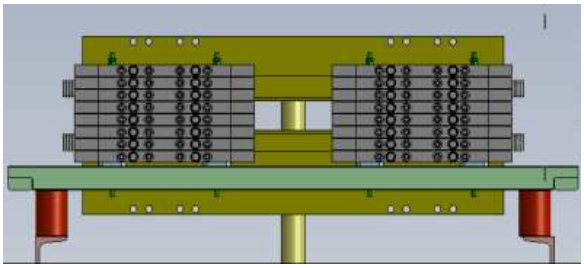


그림 116 인버터 패널 공진형 커패시터

○ 급전 인버터 시스템 함체 구성안
- 설계 사항을 기준(크기, 무게 등)반영하여 설계
- IP54등급에 부합하도록 제작
○ 빠른 방전을 위한 방전회로 연구 및 개발
- 입력 전압이 기준 전압 이상 시 안전하게 회로를 보호함과 동시에 DC Link단의 에너지를 순간적으로 흡수하기 위한 방전 회로를 연구 개발한다.
- 순간 방전 시간 및 전류를 계산 하여 다이오드, 방전저항, 그리고 고속스위치를 연구개발
○ 정적 신뢰성 시험
- 정적 신뢰성(4만km이상)을 실시하여 제품의 내구성 및 안전성의 성능검증
- 급전 인버터 급전 트랙, 집전장치, 집전 컨버터 및 베터리 그리고 부하장치를 서로 연동하여 경산 시험선 주행 부하 조건으로 시험
○ 통합 성능 시험
- 인버터 패널(1,2MW급) 및 실제 트랙에 전류를 흘려 집전시스템과의 조합시험 진행
- 시험을 통해 시험 사양서 작성 및 공인인증 기관 성적서 발행
○ 동적인 상황에서의 급전 인버터 시스템 시험
- 동적 신뢰성(4만km이상)을 실시하여 제품의 내구성 및 안전성의 성능검증을 완료
- 급전 인버터 급전 트랙, 집전장치, 집전 컨버터 및 안정화 장치, 배터리 그리고 부하장치를 서로 연동하여 경산 시험선 주행 조건으로 시험
○ 급전 인버터 시스템의 유지보수 설차서 작성
- 인버터 패널 고장상태 에 따른 유형별 조치 방법 기술 작성
- 인버터 패널 정상적인 운영을 위한 운영점검방안 기술 작성
- 동적시험(4만km)시 발생하는 급전 인버터 고장정보를 반영하여 유지보수 절차서 작성
○ 급전 인버터 시스템의 신뢰성 확보를 위한 시험 진행
- 인버터 성능향상을 위한 동적 부하시험용 Test Bed구축
- 동적 신뢰성 시험 시 나타나는 여러 문제점들을 분석 및 자료 수집
- 인버터 알고리즘 개선
- 인버터 보호회로 보완
- 상용화를 위한 인버터 제품 부분 보완 설계 및 부분 제작 검증
○ 전력용량 (목표치 : 1.2 MW) 및 시스템 통합 효율(급전인버터+집전시스템)

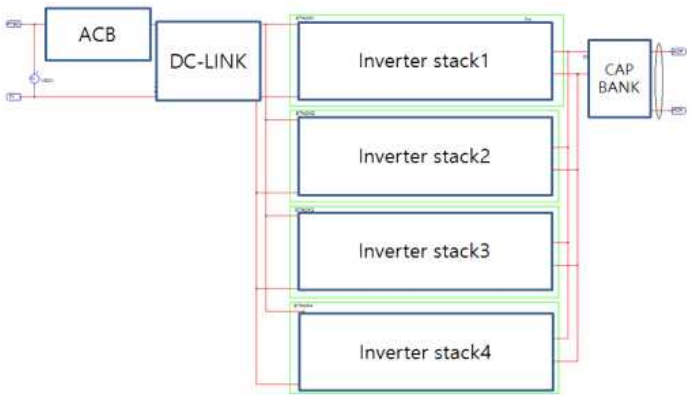


그림 117 1.2MW 급전 인버터 시스템 회로 구성도

- 인버터는 총 1.2[MW]로 설계 되었으며 입력전압은 DC 전압을 기준으로 500[Vdc] ~ 900[Vdc], 입력전류는 1850[A]이고, 입력 정격 전압은 750[Vdc]이다. 주파수 조건은 54~66[kHz]이고, 출력 전압 전류는 각각 500[Arms], 2400[Vrms]이다.



그림 118 제작된 인버터 패널 전면부(3SET)

- 집전장치를 추가한 Test bed를 구성하여 전력용량 및 효율 시험(구성품시험)을 진행하였다. 인버터의 스위치 주파수는 60kHz이며 전력용량은 최대 1000kW를 출력할 수 있고 트랙에 500A의 전류를 흐르게 할 수 있다.

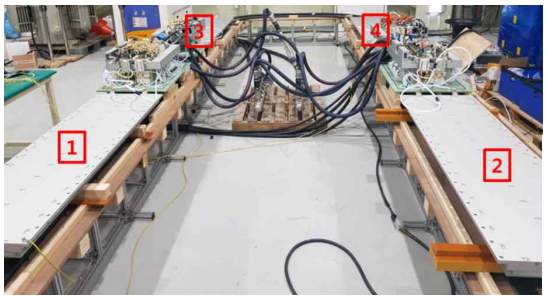


그림 119 제작된 집전장치 & 집전정류기

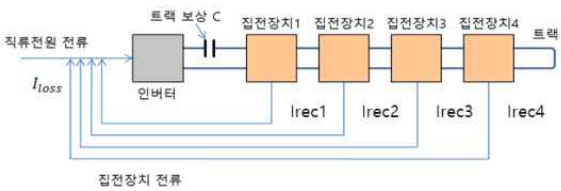


그림 120 전류 회생방식의 시험 구성도

- 전류 순환 방식을 이용하여 시스템에 발생되는 손실은 입력 전원에서 공급하도록 하였다. 이러한 방식은 대전력 시험에서 소모되는 전력 손실을 최소화할 수 있다. 온도가 포화 되었을 때 효율(인버터, 집전장치 조합효율)을 측정한 결과 93.7% 였으며 이는 인증기관을 통해 인증을 완료하였다.

표 35 시스템 전체 손실 및 효율

Vin	750V	Irec1	325.3Adc
Pin	1.07MW	Irec2	304.1Adc
Pout	995kW	Irec3	336.9Adc
트랙 손실	6.5kW	Irec4	296.7Adc
트랙 손실 포함	93.2%	Iloss	100Adc
트랙 손실 제외	93.7%		



그림 121 최대 부하시 인버터 패널 표시 전압 및 전류



그림 122 집전시스템 출력 전류(1~4)

- 위 사진은 집전시스템 각 파트별 출력 전류를 측정한 것이다. 집전장치 1번부터 출력전류는 325.3A, 304A, 336.9A, 296.7A로 확인 할 수 있다.



그림 123 시스템 손실분

- 위 그림은 전체 시스템의 손실분을 나타내고 있다. 100A로 대략 76kW로 확인된다.
- 아래 그림은 경산 시험선에서 실제 급전선로를 이용하여 급전 인버터, 집전시스템을 연동하여 전력용량 시험을 진행하였다.



그림 124 현장 인버터 설치 사진



그림 125 집전장치 설치 사진

- 출력 부하를 아래 그림과 같이 5단계로 나누어 투입하여 전격 전력(출력 1MW)을 확인하였다.

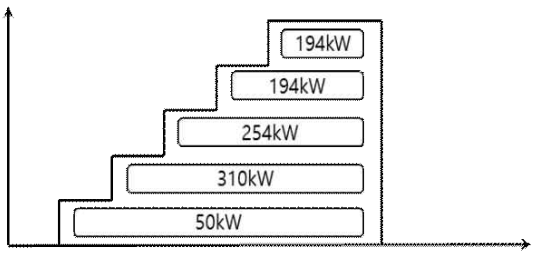


그림 126 부하 변동

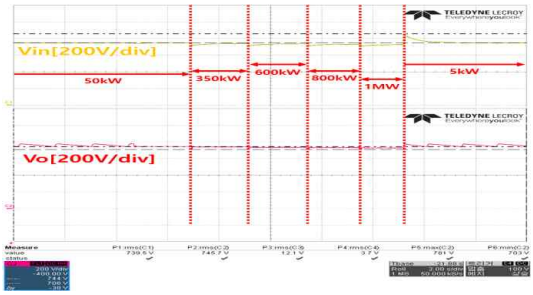


그림 127 부하 변동 시 입출력 전압 파형

- 1MW에서 무부하로 급변할 때 입력전압은 최대 108V증가하고 출력전압은 30V 증가로 안정적인 것을 확인할 수 있다.

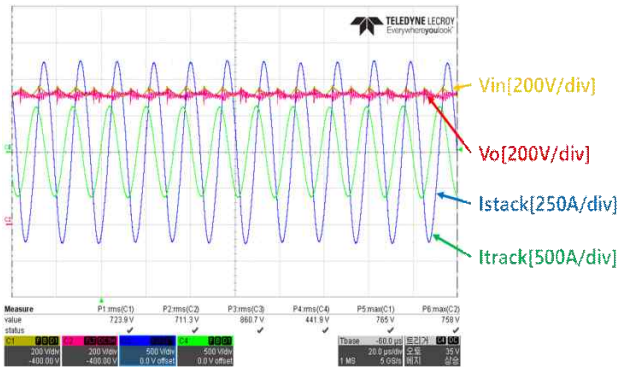


그림 128 1MW 시험 파형



그림 129 1MW시 출력 전압전류

- 위 그림은 전부하 시 집전 출력전압(C2), 인버터 입력전압(C1), 인버터 스텍 전류(C3), 그리고 트랙 전류를 나타낸다. 전부하 시험 시 인버터 입력전류, 그리고 입력전압으로 그 계산값은 1MW이상임을 확인할 수 있다.



그림 130 1MW 출력 시 입력전력

- 1MW 출력 시 입력전력은 1160kW이고 출력은 1003kW으로 인버터가 실재 트랙과 조합하여 1MW출력을하는 것을 확인하였다.

○ 동작주파수 (목표치 : 60kHz) 및 트랙전류

- 동작 주파수의 경우 인버터에서 스위칭 되어 흐르는 출력전류를 오실로스코프로 측정하여 스위칭 주파수를 검증하였다. 다음 그림은 입력 전압 초기 충전 파형이다. 파형측정기를 통하여 주파수는 60.75[kHz]임을 확인하였다.

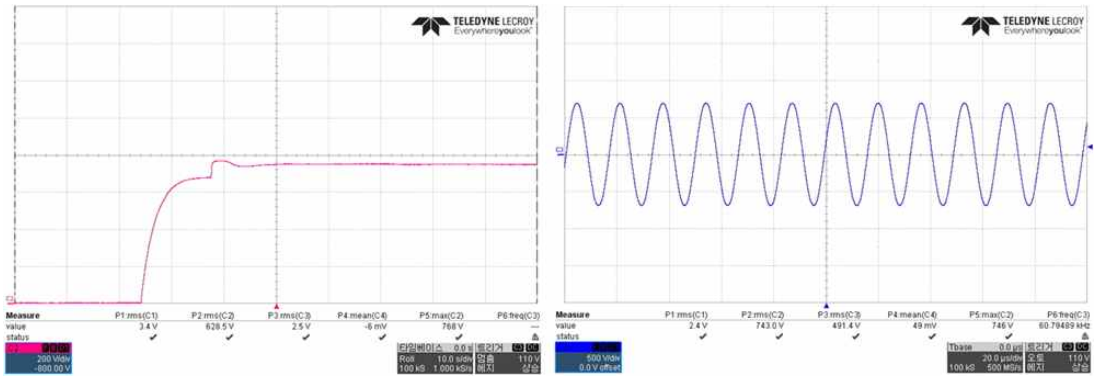


그림 131 입력 전압 750V시 선로 주파수

○ 냉각방식

- 인버터 출력이 60khz, 2000A로 대전류 고주파라 공랭식으로 구현할 경우에 인버터 스택의 배치가 넓어지게 되고 이를 경우에 상당한 고주파 flux가 형성이 되어 주변 장치의 발열이나 노이즈를 발생시켜서 정상적인 동작이 매우 어렵게 된다. 수냉식으로 구현할 경우에는 냉각 효율이 공랭식에 비해서 월등히 좋기 때문에 인버터 스택을 기구적으로 콤팩트하게 배치할 수 있고 따라서 flux 발생을 최소화 할 수 있기 때문에 본 과제에서는 수냉식을 선택하였다.

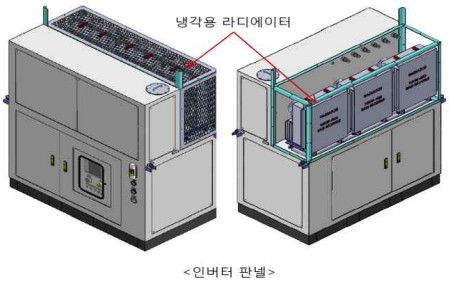


그림 132 인버터 패널 구조



그림 133 실제 인버터 전면부 & 후면부

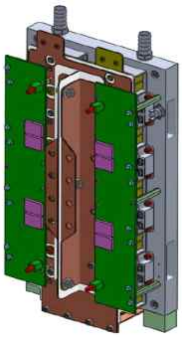


그림 134 수냉식
인버터 스텍

○ 인버터크기

- 치수는 1980[mm] * 2230[mm] * 1116[mm]이고 부피는 4.92 m^3으로 정량적 목표인 8 m^3에 만족하는 크기이다.

○ EMF/EMI/EMC 저감기술 (목표치 : 동축케이블 적용)

- 무선급전 급전인버터는 인버터의 EMF/EMI/EMC 저감을 위해 동축형 케이블을 사용하여 인버터에서 발생하는 철도 설비용 EMF/EMI/EMC 기준을 만족해야 한다.
- 1.2[MW]대용량 무선급전 충전을 위해 급전 트랙에 흐르는 전류는 최대 500[A]이상이고, 이로 인해 발생되는 EMF/EMI/EMC 는 철도뿐만 아니라 주변의 통신 시스템에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 급전 트랙에 흐르는 전류는 최대 500[A]를 유지하면서 EMF/EMI/EMC를 최소로 줄일 수 있는 기술을 적용 하였고, 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 하였다.

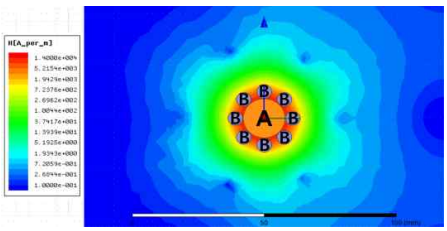


그림 135 동축형 케이블의 자계

- 중앙의 굵은 LIZ WIRE 하나(A방향)와, 트랙에서 인버터로 전류가 들어오는 8가닥의 LIZ WIRE(B방향)로 구성되어 있다. 시뮬레이션 결과, 외부의 자기장 밀도가 케

이블 중심으로부터 100mm 지점까지 0.7[H] 이하의 전류 밀도가 형성되었다. 중앙 LIZ WIRE(A방향)에서 발생하는 자속과 그것을 둘러싸고 있는 8가닥의 LIZ WIRE에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되기 때문에 외부 자기장을 최소화할 수 있다.



그림 136 동축 케이블 제작1



그림 137 동축 케이블 제작2



그림 138 케이블 단면

- 위 그림은 제작된 동축 케이블의 단면이다. 동축케이블은 AC 커패시터 뱅크 출력단에 설치 되어 자기장을 최대한 상쇄 시킬 수 있도록 출력단에 설치 되었다.

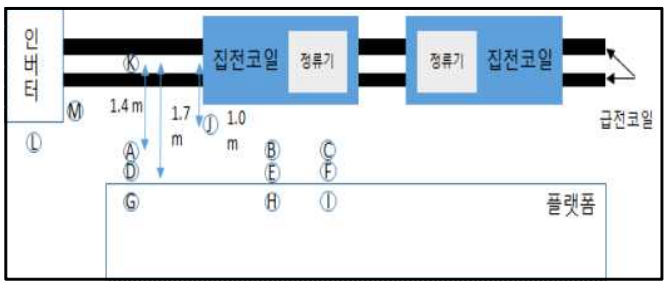


그림 139 경산 시험선 EMF 측정 방법

- 위 사진은 실제 경산 시험선상에서 EMF를 측정한 위치를 표시 하고 있다.
- 아래는 경산 시험선에서 1MW, 500Arms인가 시 실제 측정한 데이터이다.

표 36 차량외부 자기장 세기 측정I

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
급전코일 만 있는 지점의 중심으로부터 1.4 m 떨어진 지점 (A)	7.186	5.212	3.019	5.139
집전코일 중심으로부터 1.4 m 떨어진 지점 (B)	12.593	9.361	4.736	8.897
정류기 중심으로부터 1.4 m 떨어진지점 (C)	11.915	9.599	5.058	8.857

차량외부(측정지점 A, B, C)에서의 자기장 세기 측정결과

표 37 차량외부 자기장 세기 측정 II

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
급전코일 만 있는 지점의 중심으로부터 1.7 m 떨어진 지점 (D)	5.670	4.206	2.371	4.083
집전코일 중심으로부터 1.7 m 떨어진 지점 (E)	11.681	9.095	3.144	7.973
정류기 중심으로부터 1.7 m 떨어진지점 (F)	10.302	9.301	3.738	7.780

차량외부(측정지점 D, E, F)에서의 자기장 세기 측정결과

표 38 플랫폼 자기장 세기 측정

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
급전코일만 위치한 지점의 플랫폼 에지로부터 0.2 m 떨어진 지점(G)	1.911	1.492	1.142	1.515
정류기가위치한 지점의 플랫폼 에지로 부터 0.2 m 떨어진 지점 (H)	3.216	2.433	1.036	2.228
집전코일이 위치한 지점의 플랫폼 에지로부터 0.2 m 떨어진지점 (I)	2.724	1.997	1.537	2.086

플랫폼(측정지점 G, H, I)에서의 자기장 세기 측정결과

표 39 인버터(L,M위치) 자기장세기 측정

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
인버터 우측 (L)	14.934	11.130	4.062	10.042
인버터 뒷면 (M)	0.013	15.455	11.434	8.967

인버터(측정지점 L, M)에서의 자기장 세기 측정결과

- 차량 외부에서 일반기준치(ICNIRP 1998 Guidelines)를 초과하나 직업인 기준치는 만족하는 것을 확인 할 수 있다.
- L,M의 자기장 세기는 아래 규격에서 요구하는 기준보다 낮음을 확인할 수 있다.

표 40 EMF 측정 인증 규격

시험 방법	판정기준
Non-Uniform Magnetic Field 3점 측정에 의한 산술 평균값이 Reference Level을 초과하지 않아야 함 (인버터 패널에서 에서 200mm 떨어진 후 인버터 패널부터 500mm,1000mm,1500mm에서 측정) B-field [μT] 27 H-field [A/m] 21 E-field [V/m] 83	ICNIRP Guidelines 2010

- 방진 방수를 위한 고무 패킹을 특수 제작하여 사용하였고 이는 아래 그림과 같다.

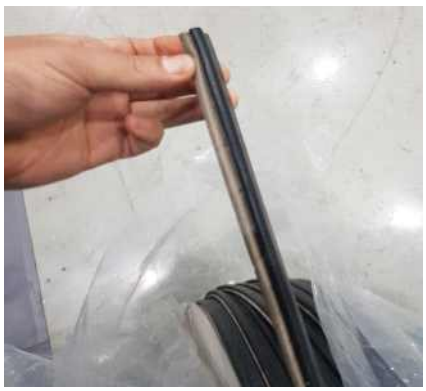


그림 140 인버터 패널 방진
방수용 EMI/EMF차폐 쉴드

- 이는 방수 방진 뿐만 아니라 EMI/EMF을 개선하기 위해 제작된 제품으로 급전인버터 전기 자기장 차폐에 많은 도움을 준다.

○ 케이블 발열 감지 (목표치 : 기준온도에서 40초 이내)

- 감열선 발열 감지 실험은 그림과 같이 직경이 8mm인 니크롬 선다발에 수축튜브를 씌운 후 감열선과 접촉되게 설치했다. 그리고 감열선 양단을 DMM으로 저항 값을 측정하여 니크롬선의 온도를 200도로 상승시키고 이때 40초 이내에 저항 값이 0으로 변하는지 확인하였다.

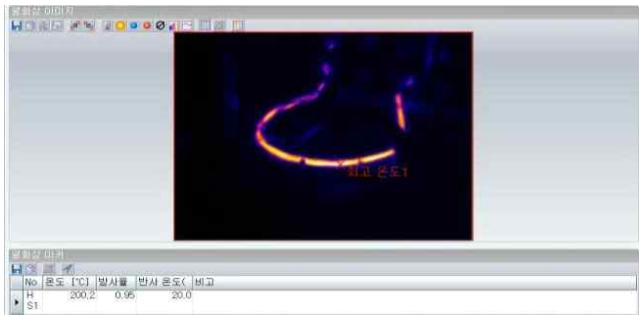


그림 141 200도 가열된 니크롬선

○ 전압제어 오차 (목표치 : 5% 이내)

- 전압제어 오차의 경우 입력전압이 500V, 750V, 900V로 나누어 시험을 진행하였다.
- 또한 아래 표와 같이 8가지 항목을 선정하여 시험하였다. 이는 이는 인증기관인 KTL을 통해 인증 완료 하였다. 아래는 그 일부 중 750V에서 90% <-> 100%제어 시 전압제어 오차를 나타내고 있다.

표 41 입력 전압에 따른 부하 변동 시험 기준표

입력전압	시험항목(부하변동)
500V	무부하 <-> 10%
	60% <-> 70%
750V	무부하 <-> 10%
	50% <-> 60%
	90% <-> 100%
900V	무부하 <-> 10%
	50% <-> 60%
	900% <-> 100%

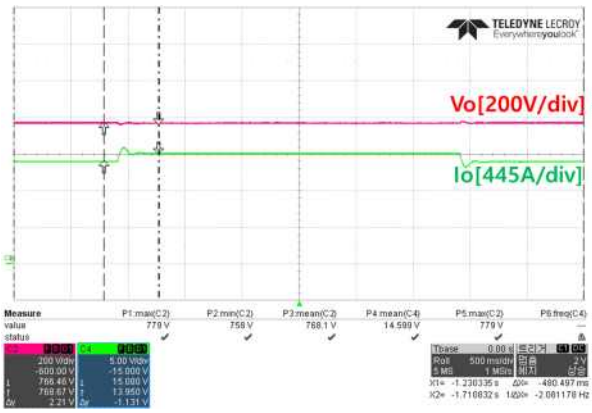


그림 142 입력전압 750V(90% -> 100%)

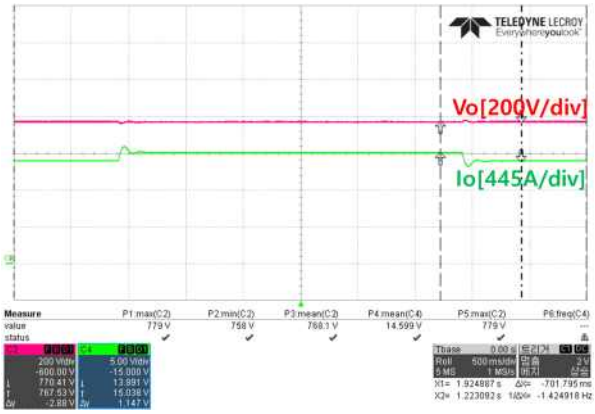


그림 143 입력전압 750V(100% -> 90%)

· 입력전압 750V일 때 부하 변동(90% -> 100%)에 따른 전압 변화량은 2.2V, 2.9V로 5%를 만족하는 것을 확인했다.

○ 구성품 시험 진행

표 42 구성품 시험 항목 (KTL, 18-037625-01-1)

번호	검사항목	번호	검사항목
3.1	구조검사	3.16	출력단락, 출력개방시험
3.2	절연저항시험	3.17	전력용량 및 인버터-집전장치 종합효율시험
3.3	내전압시험	3.18	온도상승시험
3.4	배관 누기시험	3.19	정전압 제어 특성시험
3.5	방열기 풍속시험	3.20	부하 급변시험
3.6	냉각장치 부분 고장 시 비상운전 시험	3.21	전부하 입력 전압 변동시험
3.7	보호검출 기능시험	3.22	소음시험
3.8	게이트 구동시험	3.23	전자파 적합성 시험
3.9	반도체 소자 구동시험	3.24	감열선 발열감지 시간측정 시험
3.10	기동 정지& 동작주파수 & 트랙전류 시험	3.25	보호등급시험
3.11	방전시험	3.26	환경시험
3.12	제어전원(220V)차단시험	3.27	진동시험
3.13	380V 전원 차단시험	3.28	충격시험
3.14	센서 배율시험	3.29	EMF 측정 시험
3.15	입력전원 중단시험		

- 4차년도 인증 시험 시험성적서는 아래 그림과 같다.



시 험 성 적 서
(TEST REPORT)

ktl 한국산업기술시험원

1. 의 뢰 자 (Client)
2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) :
3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)
4. 시험기간 (Date of Test) : 2018년 06월 18일 ~ 2018년 11월 16일
5. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) :
6. 시험환경 (Testing Environment)
7. 시험결과 (Test Results) : 별첨결과 참조 (Refer to the attached results)

확인 Affirmation	작성자(Tested by)	기술책임자(Technical Manager)
	성 명(Name): 양동석	성 명(Name): 김동균

2018. 12. 07.

한국산업기술시험원장

그림 144 인증 시험 성적서(급전인버터 & 집전시스템)

○ 정적신뢰성(4만km이상) 시험 보고서

- 정적신뢰성 시험을 위한 운행 시퀀스는 아래 그림과 같은 운행제어시스템으로 구성되어 있으며 이는 정확한 운행 횟수를 파악 할 수 있도록 구성하였다.

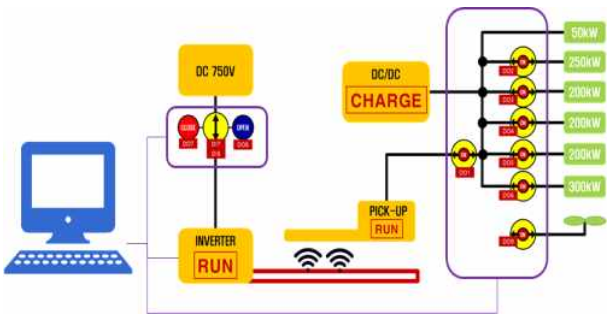


그림 145 운행제어 시스템 구성도

- 정적 신뢰성 검증은 운전 시작일인 2018년 10월 31일을 시작으로 2018년 12월 06일 오전까지 중간 누적시간으로 검증하였으며 운행 프로파일 카운터 확인 시 총 16,935회를 왕복한것으로 확인 되었으며 환산 시 1회 왕복 2.46km 이므로 16,935 * 2.46km를 수치로 반영하면 41,660km 주행시간이 환산된다.

○ 동적시험 준비 및 시험

- 인버터 패널 현장 설치 및 통신 작업



<인버터 5호 A역 설치> <A역사 통신 설정 작업> <인버터 1호 B역 설치><집전시스템 충전 시험>

그림 146 경산 시험선 인버터 패널 설치 및 통신 시험 진행

- 5차년도의 정량적 목표를 달성하기 위하여 경산 시험선 역사(A역, B역, C역, B-1역)에 급전 인버터 패널을 설치 완료하였음
- 각 역사별 인버터 패널을 설치 후 급전 선로 무부하 Test를 실시 하여 급전 인버터의 성능 및 급전선로의 신뢰성 시험을 진행하였고 동적시험 준비를 완료하였음
- 공인기관입회 동적시험을 통해 4만 km 운전을 완료하였음
- 아래 그림은 급전인버터 패널에 설치된 커패시터의 과열을 감지하는 감열선으로 급전 커패시터 과열동작시 감지하여 인버터를 조기에 차단하는 장치임



그림 147 급전선로 감열선 설치 및 동작 사례

○ 신뢰성 개선을 위한 향후 계획

- 5차년도 4만km 동적 시운전 진행 시 전체 인버터 패널 중 2가지 항목의 Fault가 발생 하였음
- 횟수는 총 5회로 2회는 냉각수 부족 Fault 발생, 2회는 외부에서 빗물 누수 발생, 1회는 인버터 Stack 이상 고장이 발생하였다.
- 냉각수 부족 Fault 2회중 1회는 냉각수가 누수되어 Fault가 발생한 경우로 이는 누수되는 부위를 확인하여 유지보수를 진행하였고 1회는 실제로 냉각수가 부족하여 발생하였으며 이는 냉각수를 보충하여 유지보수를 진행 하였다.
- 외부 빗물에 의한 누수 발생은 2회로 1회는 빗물 누수에 의해 커패시터 뱅크 부가 소손 되었고 1회는 빗물 누수에 의해 인버터 Stack이 소손되어 유지보수를 진행하였다.
- 인버터 Stack 이상 고장은 선로와의 공진 튜닝 중 선로 커패시터 이상에 따른 인버터 Stack의 hard - Switch 발생으로 인한 소손이 예상 된다.
- 냉각수 부족 Fault는 정기적인 유지보수 시 냉각수량을 확인하여 상시 보충하도록

하겠음

- 외부 빗물에 의한 누수는 인버터 패널 제작 시 방수 검수를 진행 하여 인버터 제작 상태를 검사하도록 하고 방수 처리를 하여 외부의 누수를 차단하도록 하겠음
- 인버터 stack 고장은 인버터와 급전 선로간의 공진을 모의 전원장치로 입력을 공급하여 공진상태를 확인하고 이후 인버터 패널에 입력 상전을 공급하여 안전하게 튜닝하도록 하겠음.
- 추후 위의 인버터 패널 동특성 운전 시 발생 한 문제들은 인버터 패널의 추가 제작 시 반영하여 보완, 개선하도록 하겠음.

○ 급전인버터 스텍 신규 모델 제작

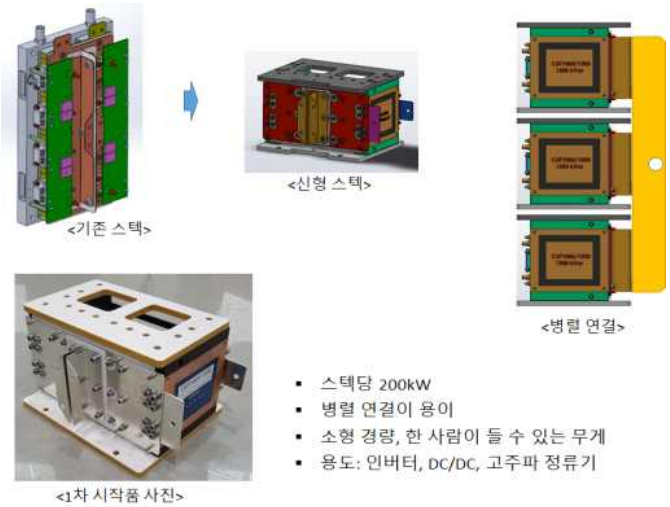


그림 148 급전 인버터 신규 모델 제작

- 위 그림은 신규제작된 급전 인버터 스텍 모델이다. 이는 기존 스텍보다 무게가 가벼워 지고 인버터 패널 설계 시 적층 할 수 있는 구조이기 때문에 구조적으로 공간을 활용 할 수 있는 구조로 인버터 패널의 설계가 가능해진다.
- 병렬 구성이 용이하기 때문에 인버터 스텍을 병렬로 연결하여 용량을 증가 시킬 수 있고 유지 보수 시 슬라이딩 방식으로 착탈이 가능한 구조로 설계 할 수 있다. 이는 현장 상황을 고려 할 때 빠른 A/S가 가능하다.

○ 신규 트램 적용용 급전패드, 집전 패드 개발

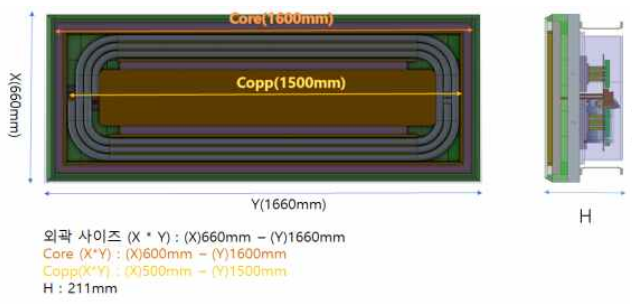


그림 149 트램 적용 급전 패드 설계

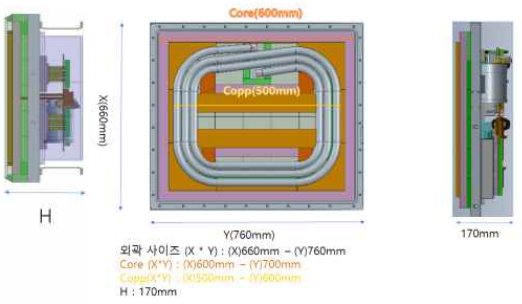


그림 150 트램 적용 집전 패드

- 위 그림은 트램 적용용 급전 패드 설계 이미지이다. 외곽 사이즈는 660mm *

1666mm*211mm 이다. 공진 커패시터, 그리고 급전 선로로 구성되어 있으며 급전 선로 케이블은 수냉방식으로 구성되어 있다. 동작 주파수는 60kHz이다.

- 트램 적용 집전 패드의 외곽사이즈는 660mm*770mm*170mm 이고 공진커패시터, 집전케이블로 구성되어 있으며 출력에 정류부가 있어 DC출력을 공급할 수 있다.

○ 트램 적용용 급전& 집전 패드 신뢰성 시험(300kW 전력순환방식)

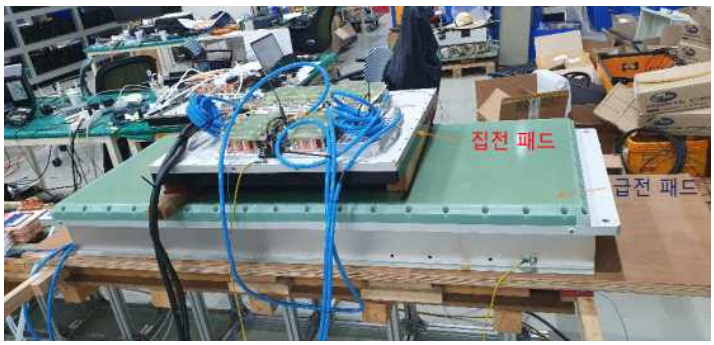


그림 151 급전패드 & 집전패드 전력순환 시험 이미지

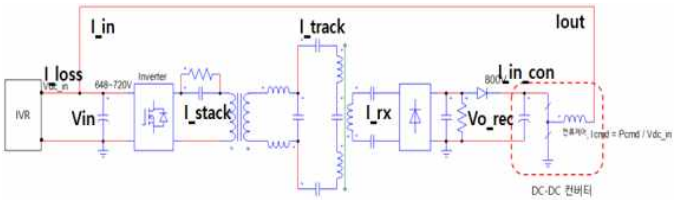


그림 152 전력순환방식을 이용한 급전 신뢰성 시험 구성도





Vin(dc)	I track(Arms)	Vo_rec(Vdc)	Irx(Arms)	I_inv (Arms)	I_loss(dc)	I_in(dc)	eff	I_in_con	Pin(W)
160	75	170	80	89	5.4	70.4	0.9288	72	12,128
212	100	227	122	119	8.8	117	0.93	109.8	266,69
309	150	333	182	207	10	176	0.9462	160	57,474
424	200	460	242	279	13	235	0.9476	215	105,152
528	250	567	299	345	17	295	0.9454	270	164,472
628	300	676	332	380	19	324	0.9438	298.8	215,592
737	350	794	333	380	20	324	0.9418	299.7	253,159
742	**350**	**794**	**389.1**	**442.5**	**24**	**381**	**0.9407**	**350**	**300,510**

그림 153 전력 순환 방식을 이용한 급전 신뢰성 시험 데이터

- AC 3상 입력을 이용, 정류기로 정류시켜 급전 인버터, 그리고 신규제작 한 급전패드, 집전패드, DC-DC 컨버터등을 이용하여 전력순환방식으로 시험을 진행한 결과이다. 집전패드 정류기 출력부에 DC-DC 컨버터를 이용하여 정류기 출력전압을 강압시켜(794Vdc->742Vdc) 전력회생 방식으로 300kW Power Test를 진행하였다.
- 정류부 출력전압은 742Vdc, 전류는 404.5Adc로 입력 기준 전력은 300kW이다.

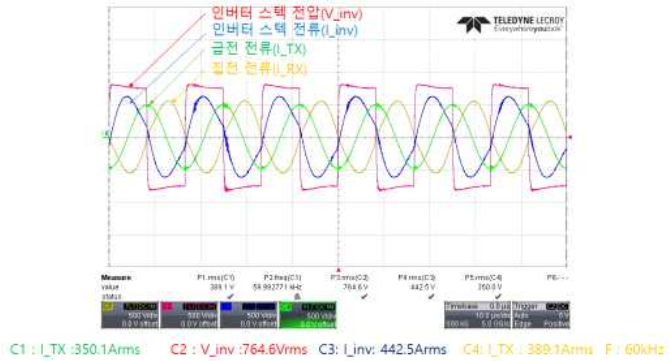


그림 154 전력 순환 시험 시 각부위별 파형

- 위 그림은 전력 순환방식으로 300kW 시험 시 각 부위별 파형이다. 인버터 스텍 출력 전압(V_inv, I_inv)은 746Vrms, 전류(I_Inv)는 442.5Arms, 급전 전류(I_TX)350.1Arms, 집전전류(I_RX) 389.1Arms이고 이 때 동작 주파수는 60kHz임을 파형으로 확인 할 수 있다.

○ 트램 적용용 급전&집전 패드를 이용한 Super Capacitor 충방전 시퀀스 Test

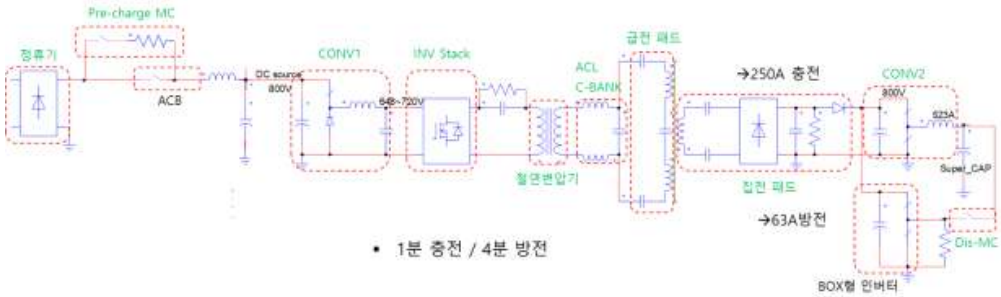


그림 155 트램용 시스템을 활용한 Super Cap 충방전 시험 회로 구성

- 위 그림은 트램 적용용 급전&집전 패드를 이용한 Super Capacitor 충방전 시퀀스 Test 회로 구성도 이다. 신규 제작된 급전패드, 집전패드를 이용하여 Super capacitor의 충방전 시험을 위해 그림과 같이 구성하였다. 입력부는 3상 전원을 받아 정류해 주는 정류부, 인버터 스텍(INV Stack)의 입력전압을 제어해 주기 위한 DC-DC 컨버터(CONV1), 급전을 위한 급전패드, 집전을 위한 집전패드, 그리고 집전패드 출력부 전압제어를 위한 DC-DC 컨버터(CONV2), 부하로 사용되는 Super Capacitor(Super_CAP)와 방전을 위한 BOX형 인버터, 그리고 저항부하로 구성된다.



그림 156 Super Capacitor bank 모듈 구성(10직 16병렬)

- Super Capacitor를 실제 부하조건으로 구성하여 설계, 제작하였다. 커패시터 모듈은 3000F Super capacitor를 36직렬로 제작되었으며 이 커패시터 모듈을 이용하여 10직 16병렬을 구성하였다. 최대 전압은 900V를 충전할 수 있는 전압으로 구성하였으며 커패시턴스는 134F로 제작 하였다.

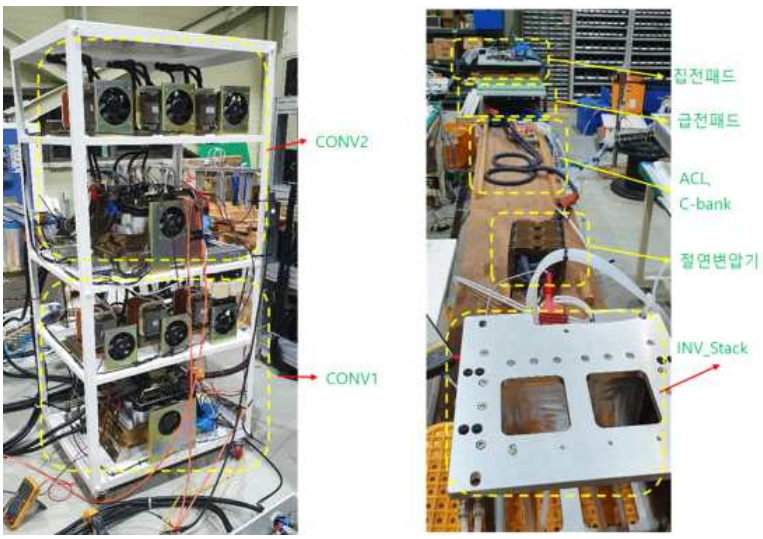


그림 157 CONV1,2 집전&급전패드 시험구성 이미지

- 위 그림 좌측은 인버터 스텍(INV_Stack)입력부 DC-DC컨버터(CONV1)와 집전패드 출력부의 DC-DC컨버터(CONV2)의 시험 구성 이미지다. 위 그림 우측은 인버터 스텍(INV_Stack)과 절연변압기 그리고 그 뒤로 AC리엑터(ACL) 그리고 병렬로 커패시터 뱅크(C_bank)가 연결되어 있으며 커패시터 뱅크(C_bank)와 병렬로 급전패드 그리고 위 우측사진은 급전패드 그리고 그 위에 집전패드가 설치되어 있는 시험 구성 사진이다. 집전패드의 출력은 DC-DC컨버터(CONV2)의 입력과 연결되어 있고 DC-DC컨버터(CONV2)의 출력은 Super Capacitor와 연결되어 충전, 그리고 방전을 하도록 구성 되어 있다. DC-DC컨버터(CONV2)의 입력부에는 BOX형 인버터가 저항(200kW급) 과 연결되어 방전 시 사용된다.

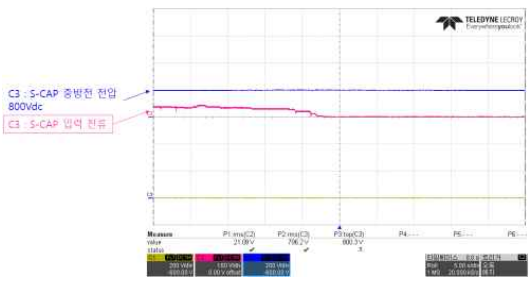


그림 158 슈퍼캡 모의 충전 시험

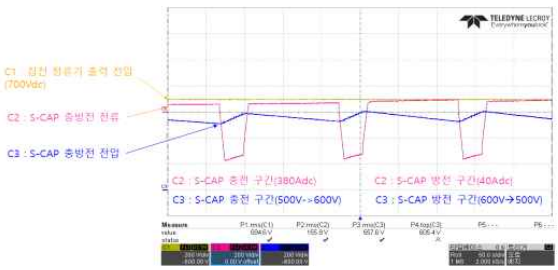


그림 159 200kW 슈퍼캡 충방 시험

- 위 그림은 슈퍼 커패시터의 안전성을 확인 하기 위해 800V충전 시험을 진행하였다, 800V 충전 시 이상이 없음을 확인하였다.
- 200kW로 Super capacitor를 30초 충전 2분 방전 시퀀스로 test를 진행하였는데 충전 시 전류는 380Adc으로 충전하였고 방전 시 대략 40Adc로 방전을 진행하였다. 이때 Super capacitor 충방전 전압은 500V->600V 그리고 600V->500V로 변화하는

것을 파형을 통해 확인 할 수 있다.



그림 160 230kW 충전 시
DC-DC컨버터(CONV1) 출력부 전압 전류

- 230kW로 충방전 시험 시 DC-DC컨버터(CONV1)의 출력 전압/전류를 측정한 사진이다. 이미 앞에서 전력순환 시험으로 300kW영역에서 급전& 집전 패드의 성능 시험을 완료 하였고 회사 수전용량과 입력 변압기의 용량(250kVA)의 제한으로 230kW영역에서 충방전 시험(1분 충전, 4분 방전)을 진행하였다.

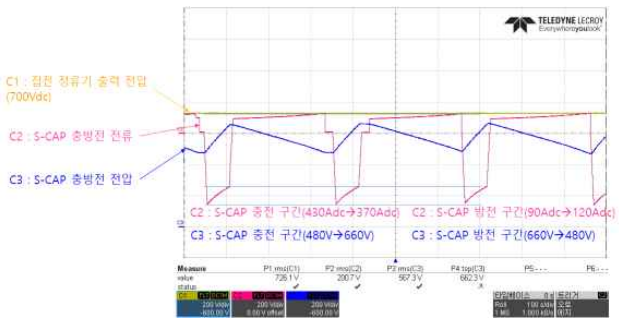


그림 161 230kW Supper capacitor 충방 시험

- 위 그림은 230kW로 Super capacitor를 1분 충전 4분 방전 시퀀스로 test를 진행한 파형이다. 충전 시 전류는 430Adc->370Adc로 충전하였고 방전 시 대략 90Adc->120Adc로 방전을 진행하였다. 이때 Super capacitor 충방전 전압은 480V->660V 그리고 660V->480V로 변화하는 것을 파형을 통해 확인 할 수 있다.
- 급전 및 집전패드를 이용한 충방전 시퀀스 테스트를 통해 실제 무선급전집전 시스템에서 베터리로 정차 시 충전(1분)을 하고 역사간 이동 시(4분) 베터리의 에너지를 소모(방전)하는 것을 모의 시운전 할 수 있었다. 이를 바탕으로 급전패드 및 집전패드의 설계 및 제어 그리고 제품의 성능을 검증 할 수 있었고, 충방전 시 전체 시스템의 제어 알고리즘을 적용, 분석 할 수 있었다.

라. 무선급전 고주파 공진용 커패시터 개발

1) 무선급전 커패시터 최적화 기술 개발

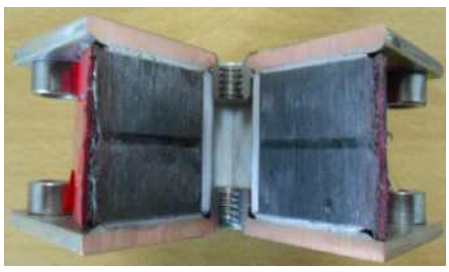
○ 선행연구 사례조사
○ 무선급전 경전철 시스템의 급전선로시스템 사전 검토
○ 커패시터용 적용 재료 및 자재 검토 및 선정
○ 커패시터 제작용 장비 검토 및 구축
○ 급전선로 구조 및 인버터와 급전선로상의 연결되는 커패시터 설계

○ 대전력 무선급전용 필름커패시터 적용 검토
○ 무선급전 경전철 차량 운행을 위한 캡박스내의 커패시터 기본설계
○ 공진용 커패시터의 개발품 제작 기본설계안
- 출력용량 : 450kvar
- 주파수 : 60KHz
- 전압 : 1000Vrms
- 전류 : 500Arms
- 커패시턴스 : 1.34μF
- 치수(mm) : W*T*H=85*85*34mm
○ 공진용 커패시터 최적화 기술 개발을 위한 공진용 커패시터에 대한 요구사항 분석을 통한 요구사항에 대해 정의
- 캡박스내 커패시터 기본 설치수량 : 16EA/BOX
- 결선방식 : 커패시터 모듈당 8EA의 커패시터를 2병 4직결선(2개병렬로 4개의 직렬결선) 방식으로 부스바로 결선하여 캡박스내에 설치한다
- 캡박스내의 모듈구조의 커패시터와 선로의 단자와 연결하여 전압을 인가하는구조
- 커패시터의 단자부위는 방열을 좋게하시 위하여 방열핀을 설치하는 구조로 한다
- 공진용 커패시터의 단자구조를 모듈화 하기위하여 단자에 펨너트를 설치한다
- 소자구조 형상 아래표 참조

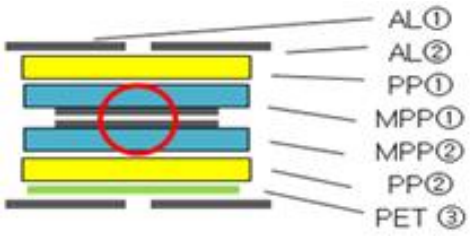
소자1개 배치구조	소자2개 배치 구조

그림 162 커패시터 소자구조 형상 설계

- 공진용 커페시터의 최적화된 구조도



개발대상 커패시터 단면구조



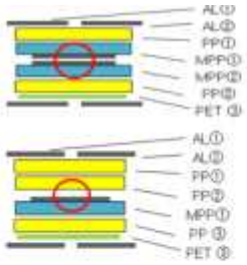
개발대상 커패시터 소자구조

그림 163 공진용 커페시터의 최적화된 구조도

- 공진용 커페시터의 최적화된 구조도 및 적용 재료



개발대상 커패시터 단면구조1





개발대상 커패시터 단면구조2

NO	항 목	재질	사양	비 고
1	단자	동	99%이상	
2	유전체 필름	PP	4~12㎛	
3	금속증착 필름	알루미늄 증착	4~12㎛, 0.5~1.5Ω/□	AL증착
4	전극	AL FOIL	4~12㎛,99%이상	동박(Cu Foil)
5	코아필름	PET	38~50㎛	
6	함침오일	함침제(S-OIL)	브랜드	저밀도 함침제격용(C-OIL)
7	용사선재	동	1.6Φ, 99%이상	
8	부착탭	저온탭	150이하	100℃~135℃
9	후퀸(보호)필름	PP	18~25㎛	소자보호용

그림 164 개발대상 적용 커패시터의 최적화된 구조

- 공진용 커패시터 450kvar 1000Vrms 1.34㎌ 사양서 아래표 참조

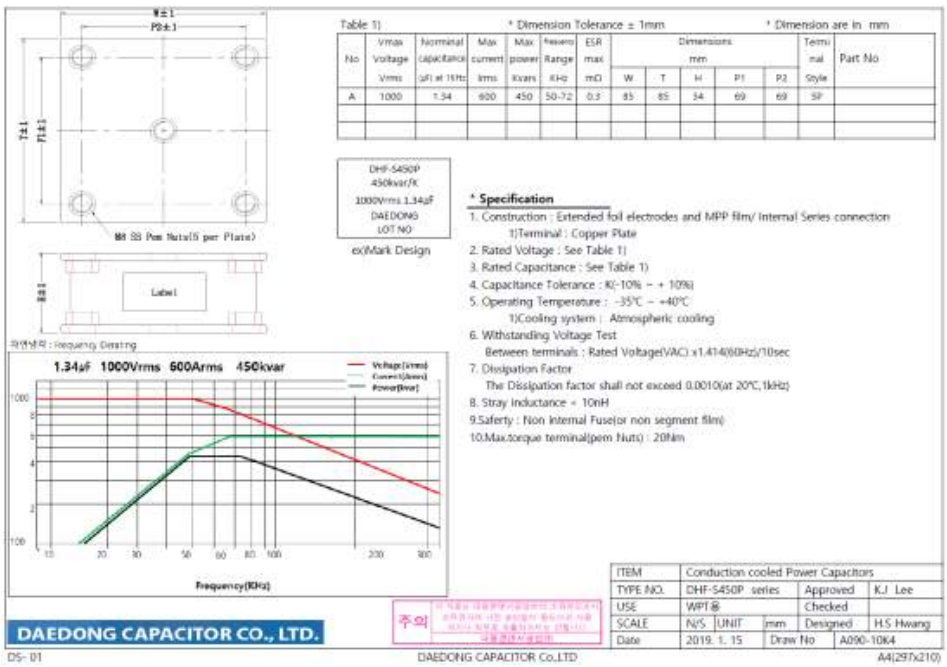


그림 165 공진용 커패시터 450kvar 1000Vrms 1.34㎌ 사양서

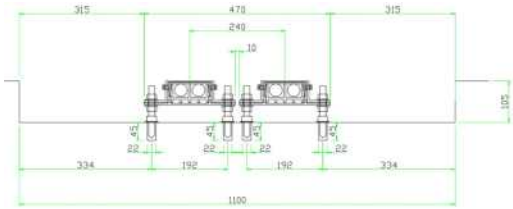
- 공진용 커패시터 450kvar 1000Vrms 1.34㎌ 아래 그림 참조

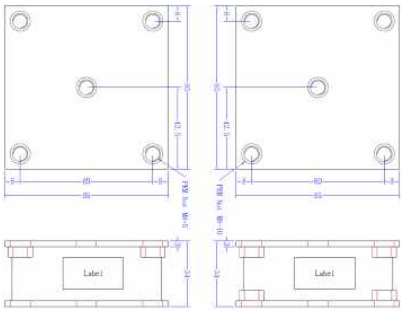


그림 166 공진용
커패시터 최종품 사진

○ 공진용 커패시터 최적화 요구사항에 대한 최적화 설계 방안

- 캡캡박스내 무선급전선로에서 전력전송 효율 향상을 위한 음영(전송단절) 구간을 줄이기 위하여 커패시터의 치수,구조 배치와 결선방법, 발생열 감소 또는 방열에 대한 최적화된 커패시터 분석커패시터 기본 배치
- 캡박스내 커패시터 기본 배치 안

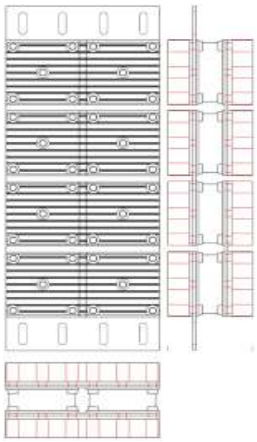




급전 선로 배치 구조 개발대상 커패시터 구조

그림 167 캡박스내 커패시터 기본 배치 안

- 캡박스내 커패시터 기본 배치 구조도 및 배치-5차년 사양,길이(지그재그)배치용)





급전 선로 배치 구조 커패시터 실장 사진

그림 168 캡박스내 커패시터 기본 배치 구조도 및 배치

○ 무선급전용 공진용 커패시터의 기존 기술(타사)과 본 연구 성과물의 구체적인 차별성

- 기존(타사)는 전세계적으로 생산 공급하는 회사가 이스라엘 셀렘(Celem)사, 인도 알

콘(Alcon)사 미국 하이에너지(Hige Energy)사로 무선급전용으로는 셀렘사와 알콘사가 국내외에 공급함으로 비교 대상으로 선전함. 현재 장착하는 동단자 즉 얇은 동판을 적용하는 회사는 셀렘사는 공급 안하는 관계로 인도 알콘사와 비교 검토함

- 기존기술(타사)와 연구성과물(대동콘덴서공업)의 아래 그림과 같이 무선급전용 커패시터 적용기술중 특히 소자 설계부문에서 금속증착 필름2매 적용으로 저저항 설계로 통전전류 최적화 실현. 커패시터 용량(Power) 450kvar, 60KHz, 1000Vrms, 1.34㎌기술을 적용함

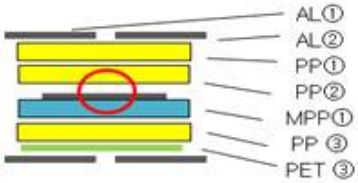
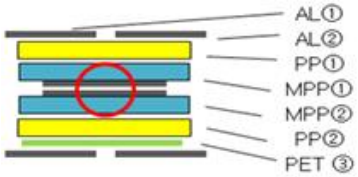
인도알콘(ALCON)사	대동콘덴서공업	비 고
		외형 형상 동일
		소자구조 대동금속증착2매사용 으로 대전류 인가우수
금속증착필름 1매사용 W*T*Hmm=78*78*34mm 400kvar 900Vrms 1.32㎌ 표준품	금속증착필름 2매사용 W*T*Hmm=85*85*34mm 450kvar 1000Vrms 1.34㎌ 비표준품(주문사양)	대동 대전류우수 대동 용량 우수 대동 전압우수 기준치 이내

그림 169 공진용 커패시터의 기존기술과 연구성과물 비교표

2) 정적 신뢰성 시험

○ 정적 신뢰성 시험 환경 구축

- 커패시터 정적 신뢰성 시험(4Km 이상)
- 정적신뢰성 시험 테스트 베드(test bed) 구축 및 시험
- 지상장치에 설치된 인버터와 급전선로와 커패시터를 조합하여 안정된 4Km 정적 신뢰성 시험실시.




그림 170 급전선로와 연결된 캡박스

○ 정적 시험 결과에 따른 유지보수 보완

- 커패시터 유지보수 점검기록
- 커패시터 신뢰성 시험 보완사항 확인

- 유지점검 보수결과는 아래표 참조.



유지점검 점검표 및 결과



커패시터 고장 분석 보고서

그림 171 유지점검 보수결과

3) 동적 신뢰성 시험

○ 동적 신뢰성 시험 환경 구축

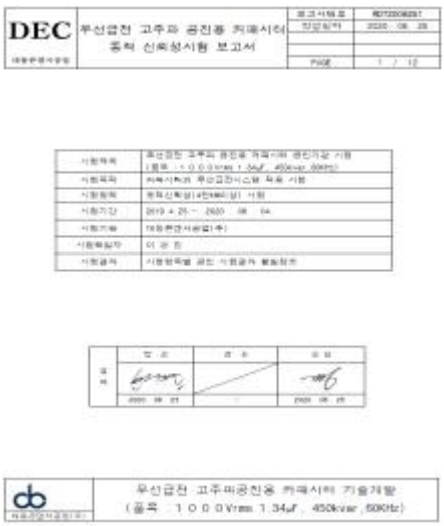
- 커패시터 동적 신뢰성 시험(4Km 이상)
- 동적신뢰성 시험 테스트 베드(test bed) 구축
- 차상/지상장치에 설치된 인버터와 급전선로와 커패시터를 조합하여 안정된 4Km 정적 신뢰성 시험실시.
- 공인기관 시험 : 시험결과 기준치이내 세부 내용은 아래 표 내용을 참조



시 험 성 적 서
(TEST REPORT)

한국산업기술시험원장

공인시험성적서 확인1(KTL)
보고서 번호 : 20-031895-01-1



DEC 무선급전 고주파 공진용 커패시터 동적 신뢰성시험 보고서

정적신뢰성 시험보고서

그림 172 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서

○ 동적 시험 결과에 따른 유지보수 보완

- 커패시터 유지보수 점검기록
- 커패시터 신뢰성 시험 보완사항 확인

- 유지점검 보수결과는 아래표 참조.



유지점검 점검표 및 결과



커패시터 고장 분석 보고서

그림 173 유지점검 보수결과

4) 무선급전용 필름커패시터 특성시험 방법 및 신뢰성 평가방법 및 기준

○ 선행시험 사례조사

○ 무선급전 경전철 시스템의 급전선로시스템 적용 시험기준 사전 검토

○ 대전력 무선급전용 필름커패시터 시험기준 신뢰성 평가 방법 검토

○ 무선급전용 공진용 커패시터 시험 및 신뢰성 시험기준 작성

○ 시험 및 신뢰성 시험 테스트 베드(test bed) 구축

○ 공인기관 시험 및 자체 시험을 통한 커패시터 시험 및 신뢰성 시험기준안 작성

○ 공진용 커패시터 시험품의 기본 사양

- 출력용량 : 450kvar
- 주파수 : 60KHz
- 전압 : 1000Vrms
- 전류 : 500Arms
- 커패시턴스 : 1.34㎌
- 치수(mm) : W*T*H=85*85*34mm

○ 공진용 커패시터 시험품의 아래 그림과 같은 기본 사양서 작성

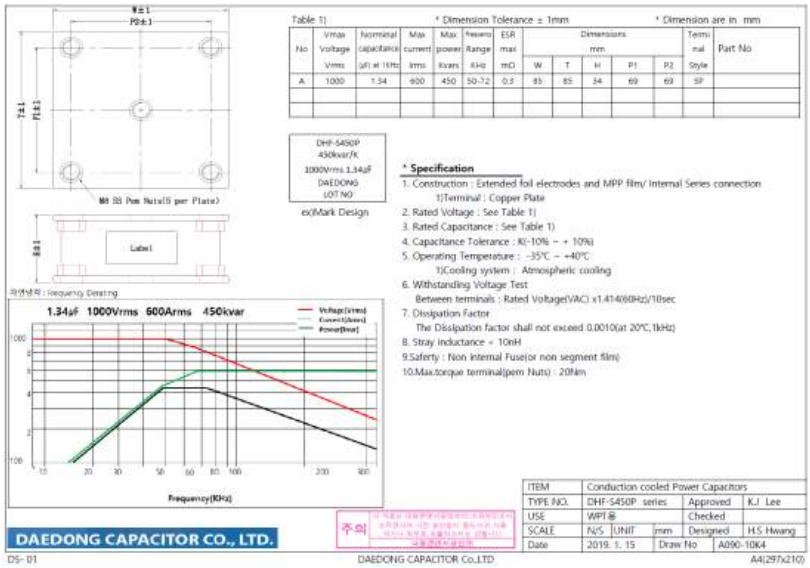
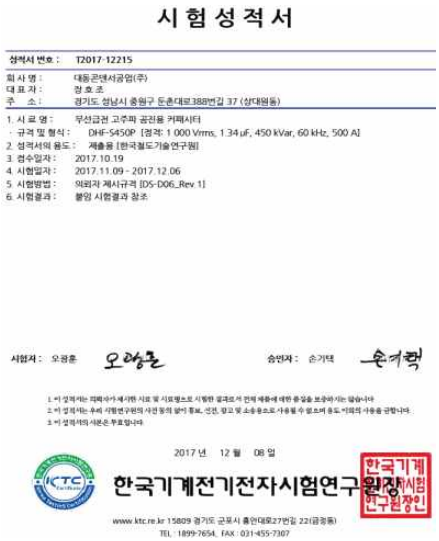


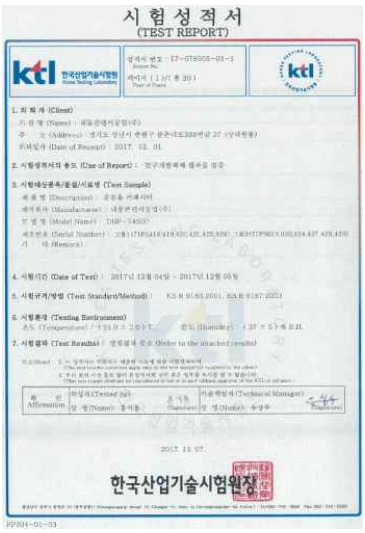
그림 174 공진용 커패시터 시험품 1000Vrms 1.34μF 사양서

○ 무선급전 커패시터 전기적 및 기계적 신뢰성 시험 평가기준

- 전기적 시험 :
- 공인기관 시험 : 시험결과 기준치이내 세부 내용은 아래 표 내용을 참조



공인시험성적서 확인1(KTC)
성적서 번호 :T2017-1225



공인시험성적서 확인2(KTL)
성적서 번호 : 17-078505-01-1

그림 175 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서

- 공인기관 전기적 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조



정격전압(1000Vrms) 시험



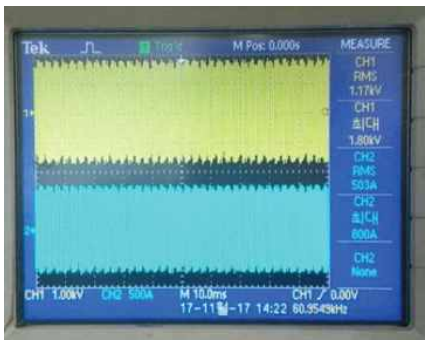
정격운전 주파수(60KHz) 시험

그림 176 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 전기적 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조



정격 전류시험(500Arms) 시험



정격 전류시험(500Arms) 시험

그림 177 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 전기적 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조



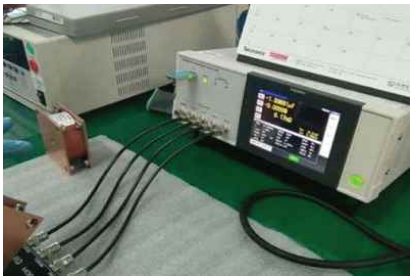
절연내압(피크전압) 시험



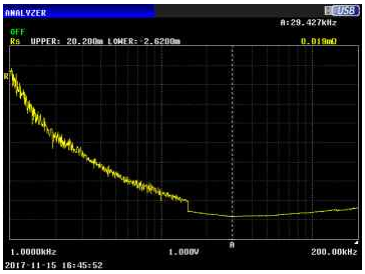
커패시턴스 시험

그림 178 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 전기적 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조



기생저항(ESR)1 시험



기생저항(ESR)2 시험

그림 179 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 전기적 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조



기생인덕턴스(ESL)1 시험



기생인덕턴스(ESL)2 시험

그림 180 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 환경 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조



온도변화 시험



온습도 정상시험 시험

그림 181 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 환경시험 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조



내충격 시험



내진동 시험

그림 182 커패시터 시험항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 기계적시험 : 시험결과 기준치이내 세부 내용은 아래 표 내용을 참조


시 험 성 적 서
(TEST REPORT)
ktl
한국산업기술시험원장

공인시험성적서 확인1(KTL)
성적서 번호 :18-074204-01-1

그림 183 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서

- 공인기관 전기적 신뢰성 시험장비 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조


시험가능 주파수 50kHz-70kHz 시험1


시험가능 주파수 50kHz-70kHz 시험2

그림 184 커패시터 시험장비 항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 기계적시험 : 시험결과 기준치이내 세부 내용은 아래 표 내용을 참조


시 험 성 적 서
(TEST REPORT)

KTL, 20-009429-01-1


DEC
무선급전용 필름커패시터 전기적 및 기계적 신뢰성 시험및 평가기준 보고서

시험 및 평가기준 보고서

그림 185 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서

- 공인기관 신뢰성 시험 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조, 동적신뢰성 40,000km 시험 중 발생한 커패시터 단자박리현상 2건발생(2019.7.4.일, 2019.7.22.일)에 대하여 단자땜 개선품에 대한 시험으로, 단자강도 시험조건 온도 135± 5℃에서 시험 추 3kg를 달아 60분간 방치 시험(시험운전시 열에 의한 땜온도 개선품에 대한 단자강도(박리시험)을 실시한 결과 합격 : 한국산업기술 시험원 보고서 번호 20-009429-01-1 (2020.04.29.)), 향후 다량 양산시 작업방법 추가개선 및 안정화실시 예정임.

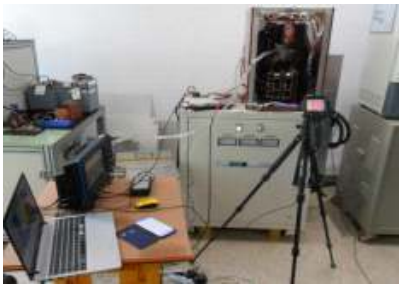

단자강도 시험1



단자 강도 시험2

그림 186 커패시터 시험 항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 전기적 신뢰성 시험장비 시험



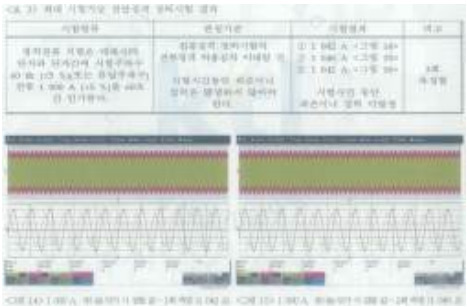


최대 시험가능 전압정격 1600Vrms 시험1 최대 시험가능 전압정격 1600Vrms 시험2

그림 187 커패시터 시험장비 항목에 대한 공인기관 시험

- 공인기관 전기적 신뢰성 시험장비 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조





최대 시험가능 전류정격 1000Arms 시험1 최대 시험가능 전류정격 1000Arms 시험2

그림 188 커패시터 시험장비 항목에 대한 공인기관 시험

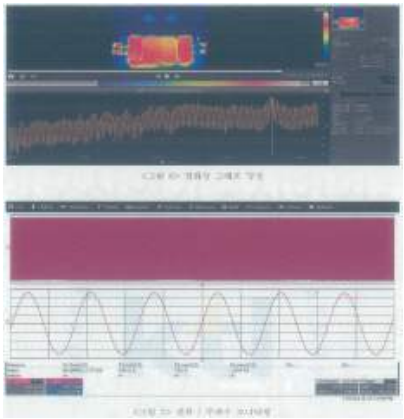
- 공인기관 자체 열안정시험 : 시험결과 기준치이내 세부 내용은 아래 표 내용을 참조


시 험 성 적 서
(TEST REPORT)
ktl
한국산업기술시험원장

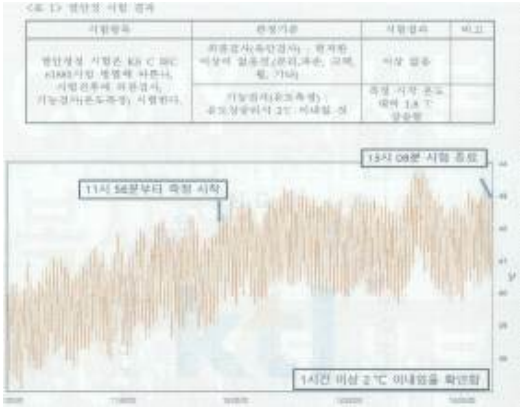
KTL, 18-074204-01-2

그림 189 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서

- 공인기관 자체 열안정 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조



자체 열안정성 시험시험1



자체 열안정성 시험시험2

그림 190 커패시터 시험 항목에 대한 공인기관 시험

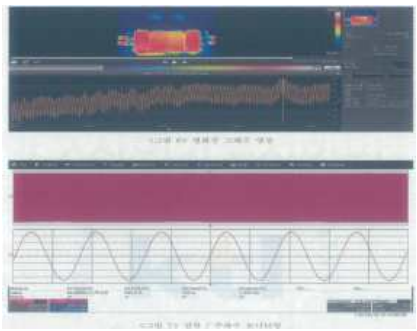
- 공인기관 자체 열안정시험 : 시험결과 기준치이내 세부 내용은 아래 표 내용을 참조



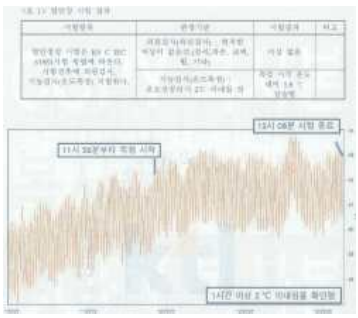
KTL, 18-074204-01-2

그림 191 커패시터 시험결과에 대한 공인기관 시험성적서

- 공인기관 자체 열안정 시험 : 시험내용은 아래 표 내용을 참조



자체 열안정성 시험시험1



자체 열안정성 시험시험2

그림 192 커패시터 시험 항목에 대한 공인기관 시험

마. 무선 급전 경전철 차량 시스템 표준 사양(안) 연구

1) 요구사항 분석을 위한 고려 사항 사전조사

○ 타 유사 시스템(무선 급전 버스, 자기 부상 열차 등) 요구사항 및 표준사양 사례 조사

○ 표준사례 조사(무선충전전기버스, 고무차륜 경전철 등)

- 요구사항 분석을 위한 고려사항 사전 조사

○ 시스템설계에 근거한 표준사양(안) 작성

- 요구사항 분석



그림 193 타 유사 시스템을 고려한 요구사항 분석

2) 기존 전기철도 시스템의 (지상, 차량) 인터페이스 분석을 통한 고려사항 제시

가) 기존 전기철도 시스템의 구성품별 인터페이스 분석을 통한 고려 사항 제시

○ 경전철 차량의 경우 전력 계통, 통신 및 신호 제어, 차상제어정보 관리장치, 열차 무선장치 인터페이스 고려사항을 제시하였음

○ 집전장치의 전력 계통, 통신 및 신호 제어 인터페이스 고려사항을 제시하였음

○ 전원안정화장치의 전력 계통, 통신 및 신호 제어 인터페이스 고려사항을 제시하였음

○ 급전인버터의 전력 계통, 통신 및 신호 제어 인터페이스 고려사항을 제시하였음

○ 급전선로의 경우 전력 계통 인터페이스 고려사항을 제시하였음

○ 급전커패시터의 경우 전력 계통 인터페이스 고려사항을 제시하였음

나) 기존 무선 급전 전기 버스 표준 사양 분석 통한 무선 급전 시스템 적용 시 구성품별 고려 사항 제시

○ 기존 무선 급전 전기버스 표준 사양 분석 및 주관/참여기관과의 협의를 통하여 무선 급전 경전철시스템 표준 사양을 시스템, 철도차량, 철도시설의 3가지로 분류하였으며, 각각의 구성품별 고려사항을 아래와 분류하고 제시하였음

- 시스템

· 일반사항

- 철도차량

· 일반사항, 경전철 차량, 집전장치, 전원안정화장치

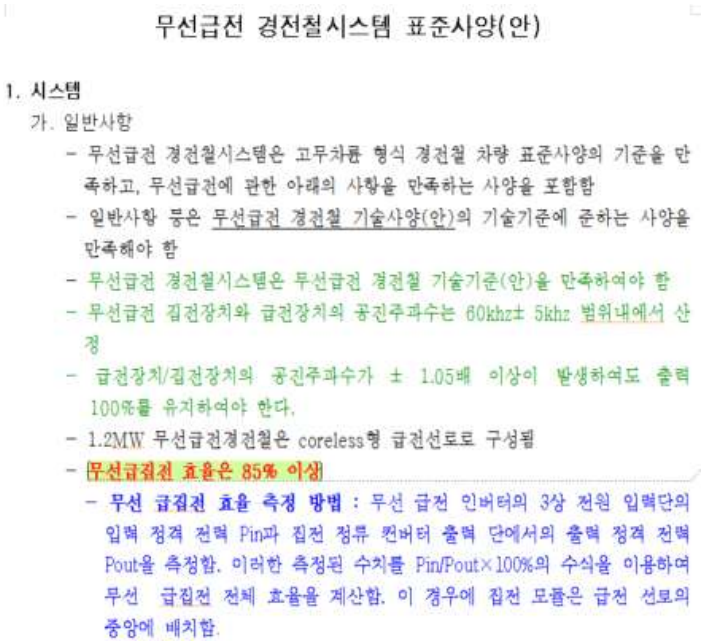
- 철도시설

· 일반사항, 급전인버터, 급전선로, 급전커패시터

다) 운영/유지 보수 시 필요한 요소 및 고려 사항 제시

○ 구성품별 운영/유지 보수 시 필요한 요소 및 고려사항을 점검방법(정기점검, 수시점

검), 점검기간(정기점검, 수시점검), 수리방법, 부품관리로 분류하여 제시하였음



무선급전 경전철시스템 표준사양(안)

1. 시스템

가. 일반사항

- 무선급전 경전철시스템은 고무차륜 형식 경전철 차량 표준사양의 기준을 만족하고, 무선급전에 관한 아래의 사항을 만족하는 사양을 포함함
- 일반사항 등은 무선급전 경전철 기술사양(안)의 기술기준에 준하는 사양을 만족해야 함
- 무선급전 경전철시스템은 무선급전 경전철 기술기준(안)을 만족하여야 함
- 무선급전 집전장치와 급전장치의 공진주파수는 60khz± 5khz 범위내에서 산정
- 급전장치/집전장치의 공진주파수가 ± 1.05배 이상이 발생하여도 출력 100%를 유지하여야 한다.
- 1.2MW 무선급전경전철은 coreless형 급전선로로 구성됨
- 무선급집전 효율은 85% 이상
- **무선 급집전 효율 측정 방법 :** 무선 급전 인버터의 3상 전원 입력단의 입력 정격 전력 Pin과 집전 정류 컨버터 출력 단에서의 출력 정격 전력 Pout을 측정함. 이러한 측정된 수치를 Pin/Pout×100%의 수식을 이용하여 무선 급집전 전체 효율을 계산함. 이 경우에 집전 모듈은 급전 선로의 중앙에 배치함.

그림 194 무선급전 경전철시스템 표준사양(안) 초안

3) 시험 결과 반영한 경전철 무선 급전 시스템 및 하위 시스템 표준 사양 프레임 도출

가) 경전철 무선 급전 시스템 및 하위 시스템 표준 사양 프레임 초안 도출

(1) 지상/차량 등 구성요소별 표준 사양 프레임 초안 도출

○ 기존 무선 급전 전기버스 표준 사양 분석 및 주관/참여기관과의 협의를 진행하였음

○ 무선급전 경전철시스템 표준 사양을 시스템, 철도차량, 지상시설의 3가지로 분류하였으며, 각각의 구성품별 고려사항을 아래와 분류하고 제시하였음

- 시스템
  · 일반사항
- 철도차량
  · 일반사항
  · 경전철 차량(기능, 구조, 조건, 인터페이스, 운영 및 유지보수)
  · 집전장치(기능, 구조, 조건, 인터페이스, 운영 및 유지보수)
  · 전원안정화장치(기능, 구조, 조건, 인터페이스, 운영 및 유지보수)
- 지상시설
  · 일반사항
  · 급전인버터(기능, 구조, 조건, 인터페이스, 운영 및 유지보수)
  · 급전선로(기능, 구조, 조건, 인터페이스, 운영 및 유지보수)
  · 급전커패시터(기능, 구조, 조건, 인터페이스, 운영 및 유지보수)

(2) 운영/유지 보수 고려한 표준 사양 프레임 초안 도출

○ 구성품별 운영/유지 보수 시 필요한 요소 및 고려사항을 점검방법(정기점검, 수시

점검), 점검기간(정기점검, 수시점검), 수리방법, 부품관리로 분류하여 제시하였음

나) 실제 시험 결과 반영하여 경전철 무선 급전 시스템 및 하위 시스템 표준 사양 프레임 수정

(1) 실제 시험 결과 반영하여 지상/차량 등 구성요소별 표준 사양 프레임 수정

○ 지상구성요소 중의 급전 인버터에서 발생하는 60 kHz 자기장 인체 보호 기준치와 측정 시험 방법을 아래와 같이 제시하였음

- 60 kHz 자기장 인체 보호 기준치는 ICNIRP guideline 2010를 따르며 일반인은 27 uT이하, 직업인은 100 uT이하이어야 함
- 측정 방법은 3점 측정 방법에 의하며, 산술 평균값이 기준치 이하이어야 함.
- 일반인의 경우 급전 인버터 외부의 안전펜스로부터 0.2 m 떨어진 곳에서 0.5 m 높이 간격으로 측정하여 산술평균값이 기준치인 27 uT이하이어야 함.

○ 경전철 차량으로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 기준 및 측정 시험 방법을 제시하였음

- 경전철 차량으로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 시험 방법은 아래의 IEC62236-2를 따르며, 안테나 경전철 차량으로부터 10m 떨어진 거리에 설치하고 안테나 높이는 1~2m임

○ 실제 시험 결과 반영하여 운영/유지 보수 고려한 표준 사양 프레임 수정

- 지상 시설 중의 급전 인버터, 차량 내의 집전장치 및 전원안정화장치의 경우 운영/유지보수는 아래와 같이 진행함.
  · 정기 점검은 6개월에 1회를 진행하며, 정기점검 시는 인덕턴스 체크, 공진 커패시터의 커패시턴스 체크, 다양한 보드(제어 보드, gate drive 보드, 전원 보드, 통신 보드)를 정상 동작 유무를 체크함.
  · 또한 수시점검은 1개월에 1회를 진행하며, 수시점검 시는 열화상 카메라를 이용하여 장착된 주요 부품의 온도를 점검하며 통전 부위 55도 이내로 관리함. 또한, 측정계를 이용하여 주요 부품의 전압, 전류 등을 체크하여 부품의 정상 동작 범위 이내에서 동작함을 확인함.
  · 수리방법은 고장 부품의 일대일 교체를 진행함.
  · 부품의 수명을 관리하며 SMPS는 7년, 팬은 5년, PCB류는 10년, 공진 커패시터는 10년, 램프 7년마다 교체함

다) 실제 시험 결과 반영한 최종 경전철 무선 급전 시스템 및 하위 시스템 표준 사양 프레임 도출

(1) 실제 시험 결과 반영한 최종 지상/차량 등 구성요소별 표준 사양 프레임 도출

○ 지상구성요소 중의 급전선로에 인접한 플랫폼에서 발생하는 60 kHz 자기장 인체 보호 기준치와 측정 시험 방법을 시뮬레이션 및 실제 시험 결과를 기반으로 제시하였음

- 60 kHz 자기장 인체 보호 기준치는 ICNIRP guideline 2010를 따르며 일반인은 27 uT이하, 직업인은 100 uT이하이어야 함.
- 측정 방법은 3점 측정 방법에 의하며, 산술 평균값이 기준치 이하이어야 함
- 일반인의 경우 플랫폼 엣지로부터 0.2 떨어진 거리에서 플랫폼 위에서 0.5 m 높

이 간격으로 측정하여 산술평균값이 기준치인 27 uT이하이어야 함.

- EMF 측정은 차량이 정차 상태일 때, 차량이 플랫폼 진입 시와 플랫폼에서 출발 시의 3가지 상태에서 측정함.

○ 차량 내부의 급전선로부터 발생하는 60 kHz 자기장 인체 보호 기준치와 측정 시험 방법을 시뮬레이션 및 실제 시험 결과를 기반으로 제시하였음

- 차량 의자의 경우 의자 하단 바닥, 의자 위 및 의자 상단의 3가지 지점의 EMF를 측정하며 산술평균값이 기준치인 27uT 이하이어야 함

(2) 실제 시험 결과 반영한 최종 운영/유지 보수 고려한 표준 사양 프레임 도출

○ 정기 점검은 6개월에 1회를 진행하며, 정기점검 시는 케이블의 인덕턴스 체크, 커패시터의 커패시턴스 체크 등을 진행함.

4) 테스트베드 시험 결과 반영한 경전철 무선 급전 시스템 및 하위 시스템 표준 사양 프레임 도출

가) 테스트베드 시험 결과 반영하여 경전철 무선 급전 시스템 및 하위 시스템 표준 사양 프레임 수정

(1) 테스트베드 시험 결과 반영하여 지상/차량 등 구성요소별 표준 사양 프레임 수정

○ 주관/참여기관과의 협의를 통하여 표준 사양 프레임 도출함.

○ 무선급전 경전철시스템 표준 사양을 시스템, 지상시설, 철도차량 및 해설서의 4가지로 분류하였으며, 각각의 구성품별 고려사항을 아래와 분류하고 제시하였음

- 시스템
  · 일반사항
- 지상시설
  · 일반사항
  · 급전선로(요구사항, 기능, 규격, 측정방법, 운영 및 유지보수)
  · 급전인버터(요구사항, 기능, 규격, 측정방법, 운영 및 유지보수)
- 철도차량
  · 일반사항
  · 경전철 차량(요구사항, 기능, 규격, 측정 방법, 운영 및 유지보수)
  · 집전장치(요구사항, 기능, 규격, 측정 방법, 운영 및 유지보수)
  · 전원안정화장치(요구사항, 기능, 규격, 측정 방법, 운영 및 유지보수)

(2) 테스트베드 시험 결과 반영하여 운영/유지 보수 고려한 표준 사양 프레임 수정

○ 구성품별 운영/유지 보수 시 필요한 요소 및 고려사항을 점검방법(정기점검, 수시점검), 점검기간(정기점검, 수시점검), 수리방법, 부품관리로 분류하여 제시하였음

나) 테스트베드 시험 결과 반영한 최종 경전철 무선 급전 시스템 및 하위 시스템 표준 사양 프레임 도출

(1) 테스트베드 시험 결과 반영한 최종 지상/차량 등 구성요소별 표준 사양 프레임 도출

○ 아래의 그림과 같이 경산의 C역에 1MW 급집전 시스템을 설치하였으며, 1MW 동작 시 효율, EMI, EMF 등의 측정을 진행하였음.

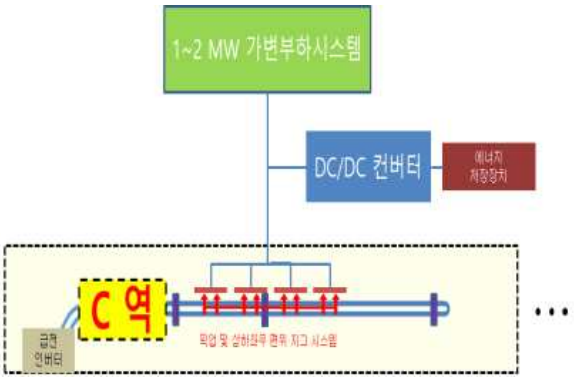


그림 195 경산에 설치된 테스트베드 구성 배치도

○ 지상구성요소 중의 급전 인버터에서 발생하는 60 kHz 자기장 인체 보호 기준치와 측정 시험방법을 시뮬레이션 및 시험 결과를 기반으로 아래와 같이 제시하였음

- 60 kHz 자기장 인체 보호 기준치는 ICNIRP guideline 2010를 따르며 일반인은 27 uT이하, 직업인은 100 uT이하이어야 함.

		Reference Level		
		B-field [μT]	H-field [A/m]	E-field [V/m]
ICNIRP Guidelines 2010	일반인	27	21	83
	직업인	100	80	170

그림 196 ICNIRP Guideline 2010

- 측정 방법은 3점 측정 방법에 의하며, 산술 평균값이 기준치 이하이어야 함.
- 일반인의 경우 급전 인버터 외부의 안전펜스로부터 0.2 m 떨어진 곳에서 0.5 m 높이 간격으로 측정하여 산술평균값이 기준치인 27 uT이하이어야 함.
- 일반인의 경우 경전철 플랫폼 엣지로부터 0.2m 떨어진 곳에서 0.5 m 높이 간격으로 측정하여 산술평균값이 기준치인 27uT 이어야 함.

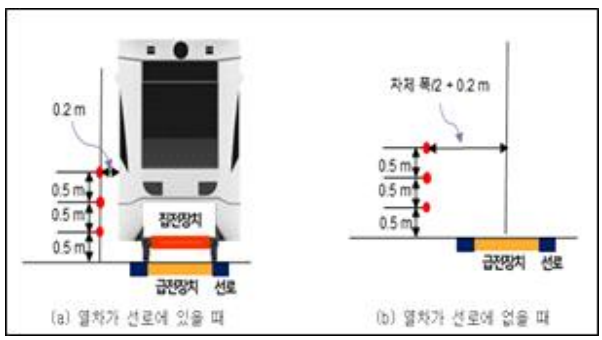


그림 197 3점 측정법에 근거한
급전선로에서의 직업인 EMF 측정 방법

○ 급전인프라 및 차량으로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 기준 및 측정 시험 방법을 시뮬레이션과 테스트베드 측정결과를 기반으로 아래와 같이 제시하였음

- 급전인버터/급전선로로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 기준은 아래의 IEC62236의 기준(변전소의 방출 한계값)을 따름.
- 경전철 차량/집전장치/전원안정화 장치로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 기준은 아래의 IEC62236의 기준(정지시험/저속시험의 방출 한계값)을 따름.

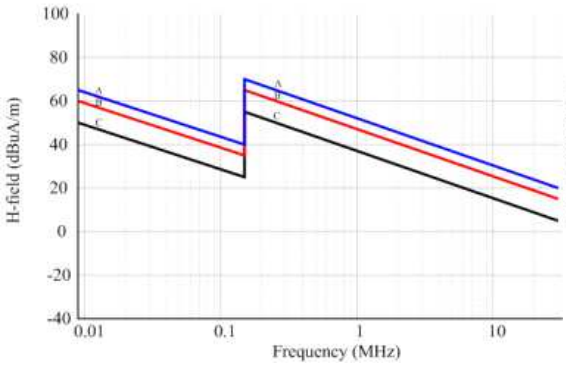


그림 198 IEC62236 변전소의 방출 한계값

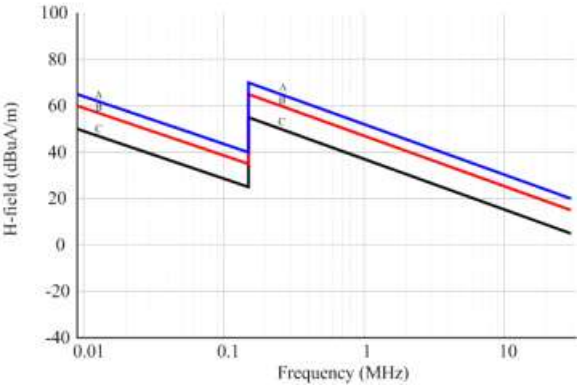


그림 199 IEC62236 정지시험/저속시험의 방출 한계값

(2) 테스트베드 시험 결과 반영한 최종 운영/유지 보수 고려한 표준 사양 프레임 도출

○ 운영/유지보수는 아래와 같이 진행함

- 정기 점검은 6개월에 1회를 진행하며, 정기점검 시는 케이블의 인덕턴스 체크, 커패시터의 커패시턴스 체크 등을 진행함

○ 정적 시험을 위해 설치된 급집전 시스템에서 측정한 무선 급집전 효율은 89% 이상이며, 이로부터 85% 급집전 효율 기준을 만족함

5) 최종 테스트베드 시험 결과 반영한 최종 경전철 무선급전 시스템 표준 사양(안) 제안 및 보고서 (5차년도)

가) 최종 테스트베드 시험 결과 반영한 최종 경전철 무선 급전 시스템 표준 사양(안) 제안

○ 최종 테스트베드 시험 결과 반영하여 주관/참여기관과의 협의 후 최종 표준 사양(안) 제안

○ 무선급전 경전철시스템 표준 사양을 시스템, 지상시설, 철도차량 및 해설서의 4가지로 분류하였으며, 각각의 구성품별 고려사항을 아래와 분류하고 제시하였음

○ 시스템

- 일반사항

○ 지상시설

- 일반사항
- 급전선로

· 요구사항, 기능, 규격, 측정방법, 운영 및 유지보수

- 급전인버터

· 요구사항, 기능, 규격, 측정방법, 운영 및 유지보수

○ 철도차량

- 일반사항

- 경전철 차량
· 요구사항, 기능, 규격, 측정방법, 운영 및 유지보수
- 집전장치
· 요구사항, 기능, 규격, 측정방법, 운영 및 유지보수
- 전원안정화장치
· 요구사항, 기능, 규격, 측정방법, 운영 및 유지보수

나) 최종 테스트베드 시험 결과 반영한 최종 경전철 무선 급전 시스템 표준 사양(안) 보고서

(1) 시스템

○ 일반사항

- 무선급전 경전철시스템은 고무차륜 형식 경전철 차량 표준사양의 기준을 만족하고, 무선급전에 관한 아래의 사항을 만족하는 사양을 포함한다.
- 일반사항 등은 무선급전 경전철 기술 사양(안)의 기술기준에 준하는 사양을 만족해야 한다.
- 무선급전 경전철시스템은 무선급전 경전철 기술기준(안)을 만족하여야 한다.
- 무선급전 집전장치와 급전장치의 공진주파수는 60kHz± 5kHz 범위내에서 산정한다.
- 무선급집전 효율은 85% 이상이어야 한다.
- 타이어 바닥면과 집전장치 간 공극 간격은 50mm·±5mm이어야 한다.
- 철도 차량과 지상설비의 EMI/EMF 기준을 만족해야 한다.
- 무선급전시스템은 차량에 전력을 공급할 때 한 섹션내에서 차량이 요구하는 전력의 90%~110% 사이에서 공급될 수 있도록 설계되어야 한다.
- 무선급전시스템은 차량에 전력을 공급할 때 전체 운행거리 및 시간 기준 0.1% 이내의 전력품질 저하를 허용한다.
- 무선급전시스템은 전력품질이상 발생시(과전압/저전압 과전류 등) 즉시 주회로 차단기를 개폐하여야 하며, 자기보호 회로를 동작하여 한다.
- 무선급전시스템은 급전선로 1 섹션 안에서 다중의 경전철 차량이 주행 중 및 정차중 충전이 가능한 구조로 설계 제작되어야 한다.
- 제작된 무선급전시스템은 40,000km 이상의 동적성능시험 후 차상장치 및 차량 시운전 시험 신뢰성을 확보해야 한다.
- 종합관제사령실은 각 역사로부터 무선인터넷(3G, 4G 등) 혹은 유선 인터넷(xDSL, 전용선)을 이용하여 각 급전 인버터의 동작 제어 및 상태 정보, 무선 급전 차상장치 상태정보 및 열차 운행 정보를 입수하여야 한다.
- 열차의 최대 속도는 60km/h 이하(가감속 3.5km/h/s)로 주행하며, 분기기에서는 20km 이하로 주행한다.
- 차량의 중대 고장(화재, 전력차단 등) 경우 즉시 선로에 정차한다

(2) 지상시설

(가) 일반사항

○ 기존 경전철 선로내에 무선급전이 가능한 선로를 설치하여, 무선으로 경전철 차량에 전력을 공급해야 한다.

○ 무선급전장치는 열차 주행중 차량 및 인프라설비에 간섭이 없어야 한다.
○ 운전자는 운전데스크에 있는 비상차단스위치는 이용하여 이상상태 즉시 무선급전 집전장치와 차량을 전기적으로 분리할 수 있어야 한다.
○ 경전철차량에 적용되는 무선급전시스템은 이중화 구조로 설계하여야 하며, 또한 1/4 시스템이 고장 발생할 경우 3/4 시스템이 동작하여 경전철 시스템 운행에 문제가 없어야 한다.
○ 무선급전시스템은 열차제어진단장치와 연계하여 차상 자기진단 기능 및 고장감시 기능 등을 위한 모니터링 기능을 가져야 한다.
○ 무선급전시스템 동작시 통신, 신호 및 차량내 다른 장치와의 상호 동작장애가 미치지 않도록 전자기 유도장애를 최소한으로 억제하여야 한다.
○ 무선급전시스템의 발생 소음은 상하 좌우 1m 거리에서 70dB 이하이여야 한다.
○ 무선급전시스템은 유도장애, 변전소 전압변동 및 사고시 단락전류와 같은 제반 문제점을 충분히 고려하여 제작하여야 한다.
○ 무선급전시스템은 경전철 차량이 초기 기동시(주차단기 투입전) 급전상태를 확인할 수 있는 구조로 설계 되어야 한다.

(나) 급전선로

○ 요구사항
- 급전 선로의 출력 주파수는 60kHz ± 5kHz 이어야 한다.
- 철도 설비의 EMI/EMF 기준을 만족해야 한다.
- 무선급전 급전선로는 집전장치에서 1MW 출력을 내는데 필요한 급전선로 전류를 (500Arms 이내) 정격 시간 (1시간) 동안 도통시킬 수 있어야 한다.

○ 기능
- 급전 선로는 고주파 60 kHz 전류를 고주파 자기장으로 변환하여 경전철 하부에 장착된 픽업에 전달하는 역할을 한다.
- 열차 주행로에 설치되어 무선급전 인버터로부터 공급되는 고주파수의 전원을 차량의 집전장치와 상호 작용하여 전력을 전달하는 선로의 시설물이다.

○ 규격
- 입력 전력용량 : 1.2MW 이상
- 입력 주파수 : 60kHz ± 5kHz
- 정격 입력전류 : 500Arms 이내
- 단위모듈별 평탄도 : ±5mm 이내
- 기계적 내구 연한 : 10년 이내
- 정격 전류 도통 연속 정격 시간 : 1시간
- EMI/EMC/EMF : 철도 설비의 EMI/EMC/EMF 기준 만족
- 동작 온도 : -25 ~ 40℃
- 인덕턴스 : m 당 1 μH ~ 2 μH

○ 측정방법
- EMI
· 급전선로로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 기준은 아래의

IEC62236-3-1의 기준(저속 운행시 발생하는 방출의 한계값)을 따른다.

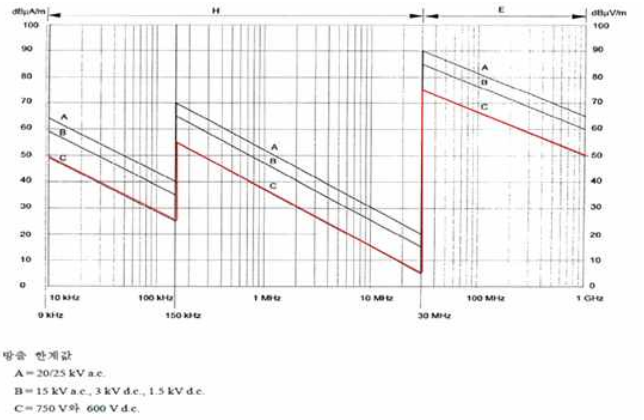


그림 200 저속 운행시 발생하는 방출의 한계값

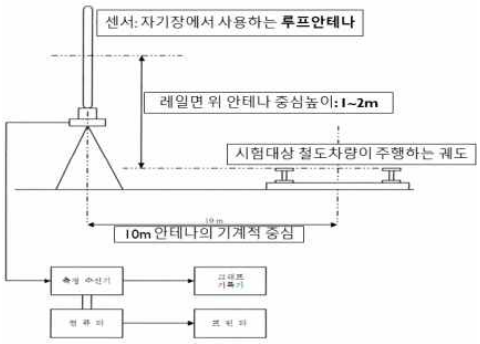


그림 201 IEC62236-2 시험 방법

· 급전선로로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 시험 방법은 아래의 IEC62236-2를 따르며, 안테나 높이는 1~2m이며, 안테나 거리는 급전 선로로부터 10m 떨어진 거리에 설치한다.

- EMF

· 60kHz 자기장 인체보호기준치는 아래의 ICNIRP Guideline 2010를 따르며, 직업인은 100uT 이하이어야 한다.

· 측정 방법은 3점 측정 방법에 의하며, 산술 평균값이 기준치 이하이어야 한다.

○ 운영 및 유지보수

- 점검방법, 점검기간, 수리방법, 부품관리

(다) 급전인버터

○ 요구사항

- 급전 인버터의 입출력 정격 전력 효율은 95% 이어야 한다.
- 급전 인버터의 출력 주파수는 60kHz ±5kHz 이어야 한다.
- 철도 설비의 EMI/EMF 기준을 만족해야 한다.
- 섹션전환이 필요할 경우 섹션전환에 필요한 입력신호 처리부/스위치 및 섹션전환용 제어 알고리즘을 포함하여야 한다.
- 1개 차량에 취부되어 있는 집전장치가 급전선로에 진입하였을 경우 집전장치 최대용량을 급전할 수 있어야 한다.

○ 기능

- 급전 인버터는 저주파 60Hz 전원을 고주파 60 kHz 전류로 변환하여 경전철 무선충전을 위한 고주파 자기장을 발생하는 역할을 한다.

○ 규격

- 입력 전력용량 : 1.2MW 이상
- 입력전압 : 750 ~ 950 V
- 성능보장 입력전압 : 750VDC ±10%
- 입력최대 전류 : 1,850A, -10%입력전압
- 출력 주파수 : 60kH ±5kHz

- 정격 출력전류 : 500A 이내
- 중량 : 3.5 톤 이하
- 외함 크기 : 8㎥ 이하
- IP 등급 : IP54
- EMI/EMF : 철도 설비의 EMI/EMF 기준 만족
- 동작 온도 : -25 ~ 40℃

○ 측정방법

- EMI

· 급전 인버터부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 기준은 IEC62236-3-1의 기준(저속 운행시 발생하는 방출의 한계값)을 따른다.

· 급전 인버터로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 시험 방법은 IEC62236-2를 따르며, 안테나 높이는 1~2m이며, 안테나 거리는 급전 선로로부터 10m 떨어진 거리에 설치한다.

- EMF

· 60kHz 자기장 인체보호기준치는 아래의 ICNIRP Guideline 2010를 따르며, 직업인은 100uT 이하이어야 한다.

· 측정 방법은 3점 측정 방법에 의하며, 산술 평균값이 기준치 이하이어야 한다.

· 일반인의 경우 급전 인버터 외부의 안전펜스로부터 0.2m 떨어진 곳에서 0.5 m 높이 간격으로 측정하여 산술평균값이 기준치인 27uT 이어야 한다.

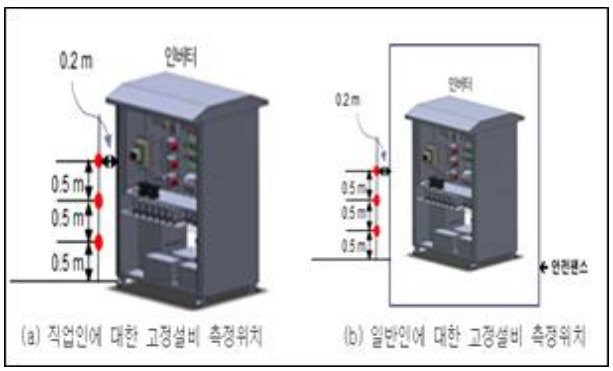


그림 202 3점 측정법에 근거한 인버터에서의
일반인/직업인 EMF 측정 방법

○ 운영 및 유지보수

- 점검방법, 점검기간, 수리방법, 부품관리

(3) 철도차량

(가) 일반사항

○ 무선급전 철도차량은 집전장치 및 양방향 DC/DC 컨버터와 전원안전화장치를 설치하여 무선급전에 의한 전력공급에 따라 운행 가능해야 함

○ 무선집전장치는 열차가 완전히 정차시 급전선로가 있는 구간에 대해 차량이 요구하는 전력 1MW를 100% 공급할 수 있어야 한다.

○ 무선집전장치가 전력을 공급할 경우와 무선집전장치가 전력공급을 할 수 없는

경우에도 DC-BUS 상에 정격전압(750V)을 공급할 수 있도록 집전장치와 전원안정화장치는 전력제어를 한다

○ 경전철 차량은 무선급전시스템에 전력이 공급되고 차단기가 OFF 일 경우 전기적으로 완전히 차량과 무선급전 집전장치는 분리되어야 한다.

(나) 경전철 차량

○ 요구사항

- 무선급전 철도차량은 집전장치 및 양방향 DC/DC 컨버터와 전원안정화장치를 설치하여 무선급전에 의한 전력공급에 따라 운행 가능해야 한다.
- 섹션전환을 위해서 차량 급전선로 진입 감지용 센서를 차량 하부 또는 집전장치의 적절한 위치에 설치 할 수 있어야 한다
- 차량의 정위치 정차는 ±20cm 이내로 운행한다
- 차량 내의 고압회로(DC750V)-접지, 저압회로(AC380V)-접지, 저압회로(DC100V)-접지간 절연저항은 30MΩ 이상이어야 한다.

○ 기능

- 집전장치에서 공급된 전력을 DC/DC 컨버터를 통해 500~700VDC를 공급하는 역할을 한다.

○ 규격

- 차체 길이 : 9,140 mm (1량기준)
- 최대 차체폭 : 2,400 mm
- 대차 중심간 거리 : 5,300 mm
- 지붕높이 : 3,500 mm(주행면 기준)
- 연결기 높이 : 880 mm(주행면 기준)
- 궤간 : 1,700 mm
- 차륜경 : 940 mm
- 주행륜 : 가스주입 고무타이어
- 차량의 정위치 정차 : ±20cm 이내
- 차량 내의 배터리 주위 온도 : -10℃ ~ 35℃
- 차량 내의 고압회로(DC750V)-접지, 저압회로(AC380V)-접지, 저압회로(DC100V)-접지간 절연저항 : 30MΩ 이상
- 철도 차량의 EMI/EMC/EMF 기준을 만족해야 함.

○ 측정방법

- EMI

· 경전철 차량으로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 기준은 IEC62236-3-1의 기준(저속 운행시 발생하는 방출의 한계값)을 따른다.

· 경전철 차량으로부터 발생하는 9kHz ~ 30MHz 대역의 EMI 측정 시험 방법은 IEC62236-2를 따르며, 안테나 높이는 1~2m이며, 안테나 거리는 경전철 차량으로부터 10m 떨어진 거리에 설치한다.

- EMF

· 60kHz 자기장 인체보호기준치는 ICNIRP Guideline 2010를 따르며, 일반인은

27uT 이하, 직업인은 100uT 이하이어야 한다.

· 측정 방법은 3점 측정 방법에 의하며, 산술 평균값이 기준치 이하이어야 한다.

· 일반인의 경우 경전철 플랫폼 엣지로부터 0.2m 떨어진 곳에서 0.5 m 높이 간격으로 측정하여 산술평균값이 기준치인 27uT 이어야 하며, 차량 정차 상태, 차량 플랫폼 진입시 및 차량 플랫폼 출발시의 3가지 경우를 측정한다.

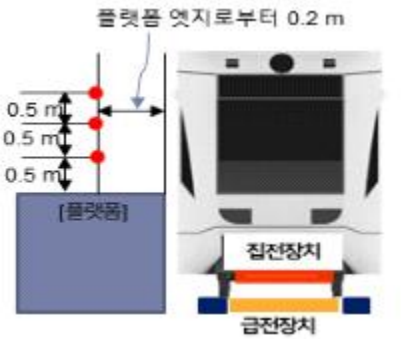


그림 203 3점 측정법에 근거한 플랫폼에서의 일반인 EMF 측정 방법

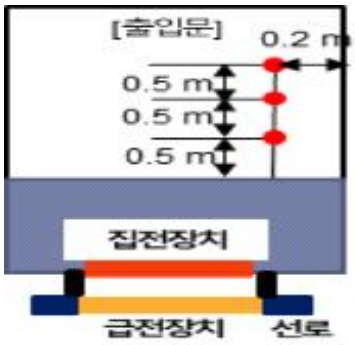


그림 204 3점 측정법에 근거한 차량 내부에서의 일반인 EMF 측정 방법



그림 205 3점 측정법에 근거한 차량 내부 의자에서의 일반인 EMF 측정 방법

· 일반인의 경우 경전철 차량 내부로부터 0.2m 떨어진 곳에서 0.5 m 높이 간격으로 측정하여 산술평균값이 기준치인 27uT 이어야 하며, 차량 정차 상태, 차량 운행 시의 2가지 경우를 측정한다.

· 일반인의 경우 경전철 차량 내부의 의자의 하부, 중간, 상부의 3부분을 측정하여 산술평균값이 기준치인 27uT 이어야 하며, 차량 정차 상태, 차량 운행 시의 2가지 경우를 측정한다.

○ 운영 및 유지보수

- 점검방법, 점검기간, 수리방법, 부품관리

(다) 집전장치

○ 요구사항

- 무선급전장치는 차량의 동력 및 보조부하의 부하변동(0%↔100%)에도 전력 공급에 문제가 없어야 한다.
- 무선급전 집전장치는 차량이 역에 진입하거나 차량이 무선급전 선로를 벗어나는 경우에도 집전 가능한 집전장치는 집전을 하여 차량에 전력을 공급하여야 한다.
- 집전시스템은 외함과-차체간 방전아크가 발생하지 않아야 한다.
- 집전장치의 출력 주파수는 60kHz ±5kHz 이어야 한다.
- 철도 설비의 EMI/EMC/EMF 기준을 만족해야 한다.

○ 기능

- 급전선로에서 자기유도에 의해 공급된 자기장을 수집하여, 직류 전압으로 변환하는 역할을 한다.

○ 규격

- 정격 출력 전압 : 750 VDC (500 ~ 900VDC)

- 총 집전용량 : 1MW이상 (모듈당 250kW 이상, 총 4개 모듈)
- 총 정격 출력 : 1.0 MW(모듈당 정격 출력 250kW, 총 4개 모듈)
- 정격 동작 주파수 : 60 kHz
- 모듈당 정격 출력전류 : 340A
- 실시간 공진튜닝 : 15% 출력 보상 가능
- 사용 주파수 : 60kHz
- 집전모듈 총 크기 : 0.65㎥ 이하
- 정류기 모듈 총 크기 : 0.16㎥ 이하
- 집전모듈 인덕턴스 : 50uH(±10% 이내)
- IP등급 : IP54
- 철도 차량의 EMI/EMC/EMF 기준을 만족해야 함.

○ 운영 및 유지보수
- 점검방법, 점검기간, 수리방법, 부품관리

(라) 전원안정화장치

○ 요구사항
- 차량의 언더프레임 또는 대차, 차량지붕에 취부 가능해야 한다.
- 경전철 차량에 취부를 위해 시험규정에 의해 진동, 방수 방진 시험 규격을 획득해야 한다
- 유지보수 편의성을 위해 탈부착 쉽고, 모듈구조로 제작되어야 한다.
- 전원안정화 장치는 급속 충전시 SOC 95% 이내를 유지하고 방전시 SOC 40% 이상을 유지하여야 한다.
- 전원안정화장치는 DOD 20% 수준에서 동작될 수 있도록 제어하여야 한다.
- 전원안정화 장치는 DC-BUS 상에 있는 전압을 모니터링하여 720V 이상이면 충전을 수행하고, 700V 이하이면 방전을 수행하여야 한다. 단 무선급전 급전장치가 부설되지 않는 구간은 충전하지 아니한다.
- 전원안정화장치는 차량이 회생제동을 수행하면 회생에너지를 충전할 수 있도록 제어하여야한다.
- 무선급전이 부설되지 않은 구간에서 차량의 1MW 이상의 전력을 요구할 경우 전원안정화장치는 1MW 만 공급하고, 차량과 통신을 통해 부하반감제어를 수행 할 수 있도록 한다.
- 전원안정화장치는 열차가 역에 진입하는 경우 회생제동에너지와 무선급전 전력을 동시에 충전할 수 있도록 제어하여야 한다.

○ 기능
- 집전 전압의 출력 전압이 720 V 이상이면 배터리에 충전을 수행을 하고, 700V 이하이면 방전을 수행하는 양방향 DC/DC 변환장치 역할을 수행한다.

○ 규격
· 정격 용량: 1MW
· 입력 DC LINK 전압: 750 V (500 ~900V)
· 소모전력량: 50kWh 이상

· 충전시간(회생포함): 180초 내외
· 설치: 차량 언더프레임, 대차, 차량 지붕 등에 설치 가능
· 철도 차량의 EMI/EMC/EMF 기준을 만족해야 함.

○ 운영 및 유지보수
- 점검방법, 점검기간, 수리방법, 부품관리

(마) 공진주파수(fr)

○ 직렬 공진 회로의 경우 측정된 급전 선로 혹은 집전모듈의 내부 인덕턴스 L 값과 사용된 급집전 공진 커패시터 C 값을 이용하여 $fr = 1/\sqrt{(2\times\pi\times L\times C)}$의 공식에 적용하여 공진 주파수 fr를 계산함.

(바) 무선 급집전 효율

○ 무선 급전 인버터의 3상 전원 입력단의 입력 정격 전력 Pin과 집전 정류 컨버터 출력단에서의 출력 정격 전력 Pout을 측정함. 이러한 측정된 수치를 Pin/Pout×100%의 수식을 이용하여 무선 급집전 전체 효율을 계산함. 이 경우에 집전 모듈은 급전선로의 중앙에 배치함.

(사) EMI

○ Electro-Magnetic Interference의 약자. 전자파 간섭 또는 전자파 장애로 해석되며 법규에 의하여 “방사 또는 전도되는 전자파가 다른 기기의 기능에 장애를 주는 것”이라 정의되어 있음.

(아) EMF

○ Electro-Magnetic Field의 약자. 전기장과 자기장의 합성어이며 전기장(혹은 전계)은 전기적 성질을 가진 물체 및 전자(電子) 등에 힘을 작용시키는 장(場)을 말하며, 이의 주된 발생원은 전압임. 전기장은 나무, 건물, 사람의 피부 등에 의하여 쉽게 제거되거나 약해지나, 자기장(혹은 자계)는 어떤 물체나 재료 등에 의해 쉽게 제거 혹은 약해지지 않는 특성이 있음. 자기장의 주된 발생원은 전류임.

바. 무선급전 경전철 차량시스템 인터페이스 기술개발

1) 무선급전시스템 차량에너지 용량산정 기술검토

○ 경전철 차량 무선급전 적용시 무선급전 용량산정을 위해 국내 경전철 차량의 운행노선 중 가장 용량이 큰 부산4호선 고무차륜 경전철 기준으로 소비에너지 분석을 실시함

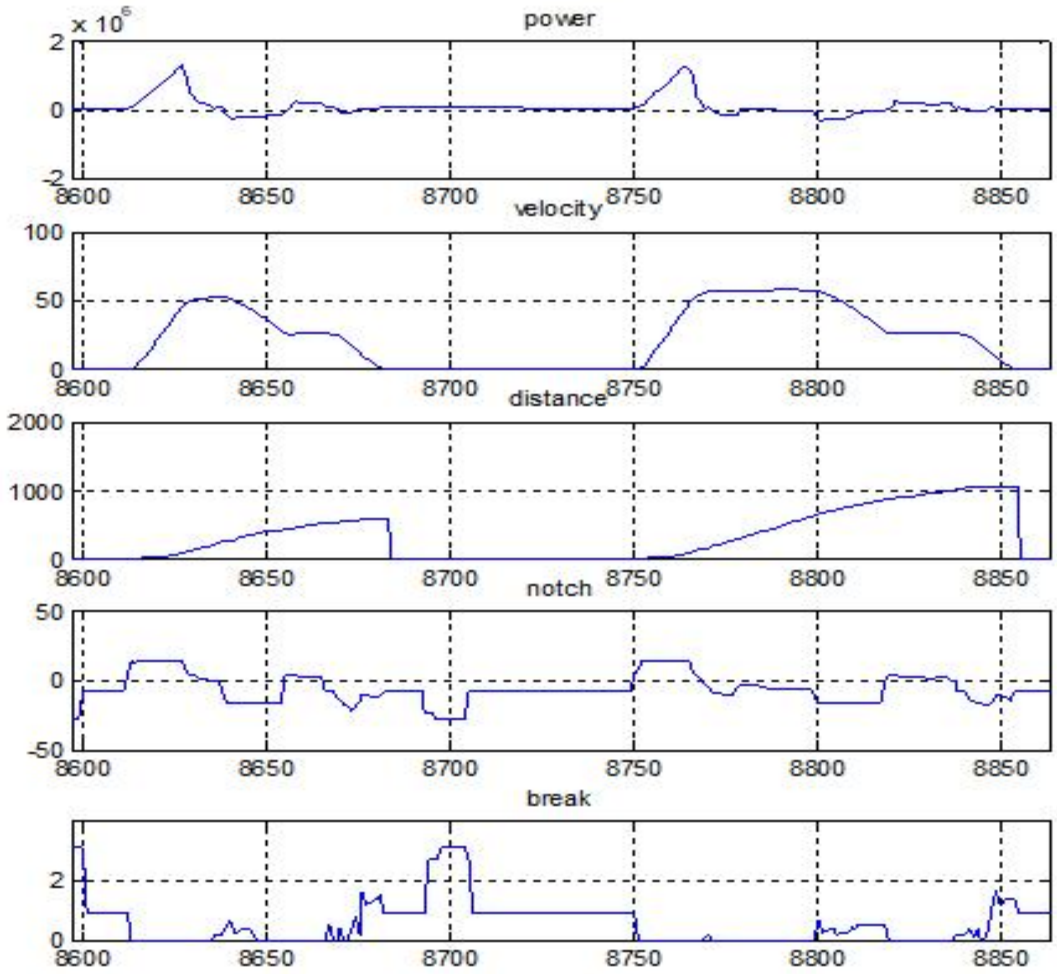


그림 206 부산 4호선 2014년 7월 30일 하계피크부하 데이터

○ 부산 4호선 2014년 7월 31일(여름철 peak 기간) 중 하루 주행 데이터
○ 순시 최대 파워가 1.4MW 정도로 매우 큼(전동기 110kW X 6EA)
○ 한 구간 소비 적산전력량은 최대 13kWh 정도 임
○ 회생 전력은 최대 3.6kWh 임. 평균 0.85kwh 임.
○ 회생 효율은 평균 15% 정도임
○ 동계 피크소비전력은 하계 피크 부하의 약 90% 정도임.

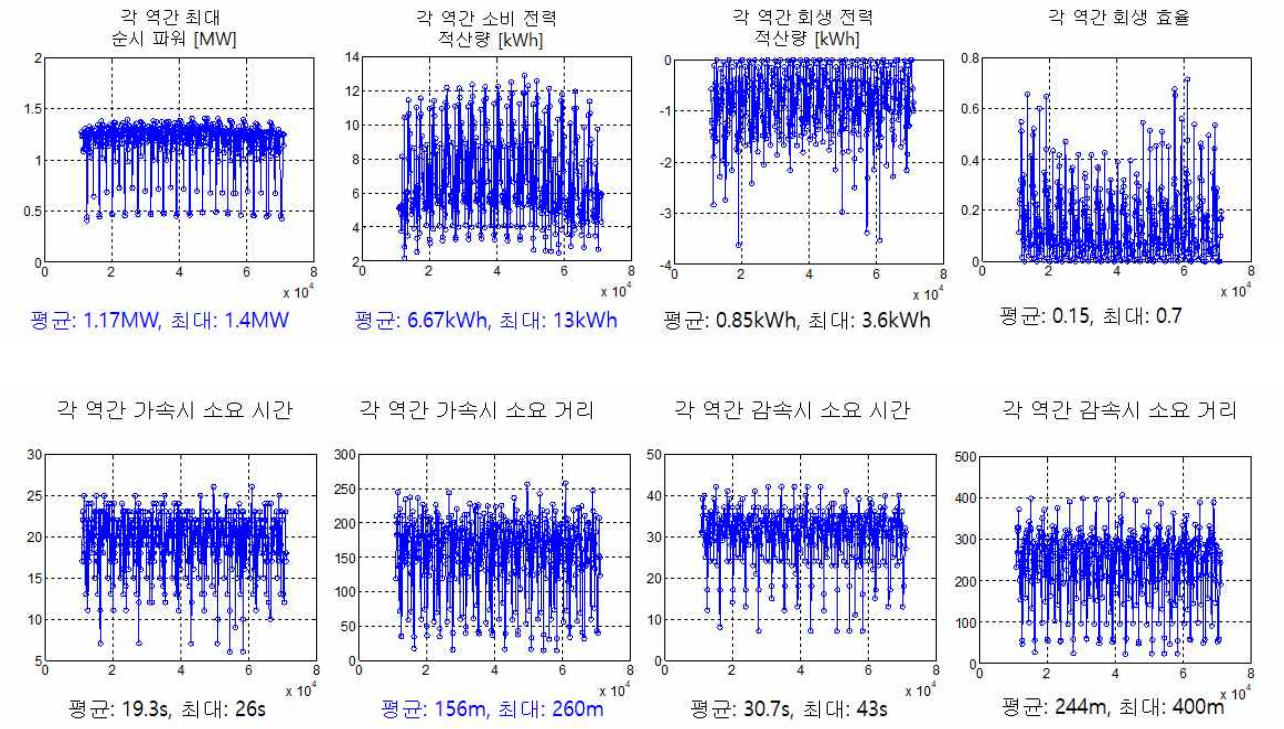


그림 207 부산 경전철 차량에너지 분석 데이터

○ 부산 4호선 2014년 7월 31일(여름철 peak 기간) 중 하루 주행 데이터
○ 가속소요 시간은 평균 19초, 최대 26초
○ 가속시 소요 거리는 평균 156m 최대 260m 까지 운행함.
○ 차량 측면에서는 가속구간까지는 무선급전으로 전력을 전달 받을 수 있게 설계요청.
○ 평균 소비 전력은 작으나 가속 시 25초 정도 최대 1.4MW (800V, 1750A)까지 전력 소비, 이 시간 동안의 소비 전력량은 약 4.8kWh 임
○ 전구간 무선급전 설치시 비용이 많이 소요되고 피크부하에 대응하기위해서는 고가의 대용량 무선급전 시스템이 필요함.
○ 무선급전 최적화를 위해 에너지가 가장 많이 소비하는 추진구간에 무선급전 설치
○ 무선급전선로 길이를 역사에서부터 150m, 200m, 250m 로 추진구간필요에 따라 설치
○ 무선급전 용량을 1MW로 설계하고(급전인버터 1.2MW, 집전장치 1MW) 회생제동 및 피크부하를 위해 전원안정화장치(전력제어기 및 고입출력밧데리) 50kWh 이상 용량 산정필요

2) 무선급전 전원안정화장치 용량산정 기술검토

○ 무선급전 전원안정화장치 시뮬레이션 목적
- 무선급전 경전철 전원안정화장치시뮬레이션을 통한 전원안정화장치 최적 용량 산정
- 무선급전 경전철 전원안정화장치시뮬레이션을 통한 급전선로 길이 최적화
- 경전철 전원안정화장치시뮬레이션을 통한 급전 인버터 위치 최적화
- 경전철 전원안정화장치시뮬레이션을 통한 집전장치 용량 최적화

○ 무선급전 전원안정화장치 시뮬레이션 방법
- 부산 4호선 경전철차량 운행데이터를 활용한 급집전 및 시뮬레이션

- Matlab Simulink를 이용한 운행데이터 및 무선급전 시뮬레이션
- 운행특성에 따른 데이터 분석

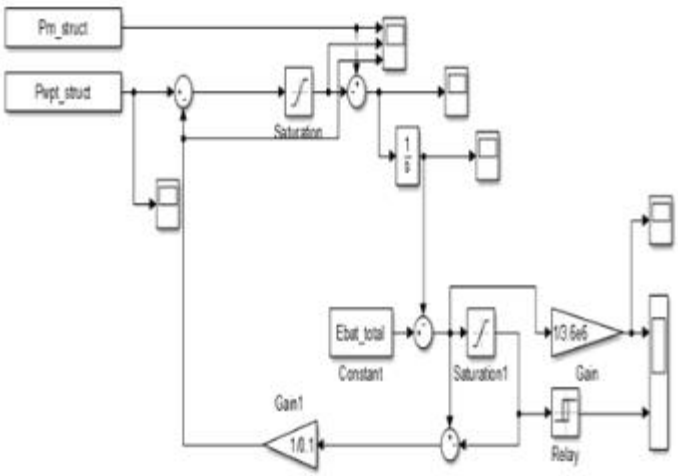


그림 208 무선급전 전원안정화장치 시뮬레이션 블럭도

○ 무선급전 전원안정화장치 시뮬레이션 결과 (정상조건)
- 무선급전 급전선로 : 200m 전원안정화장치 : 50kWh
- 아래그래프 중 붉은색은 무선급전시스템이 에너지를 충전하는구간으로 부산 4호선무선급전 주행을 수행할 경우 차량 전원안정화장치의 에너지는 DOD 20% 이내를 유지할 수 있음.

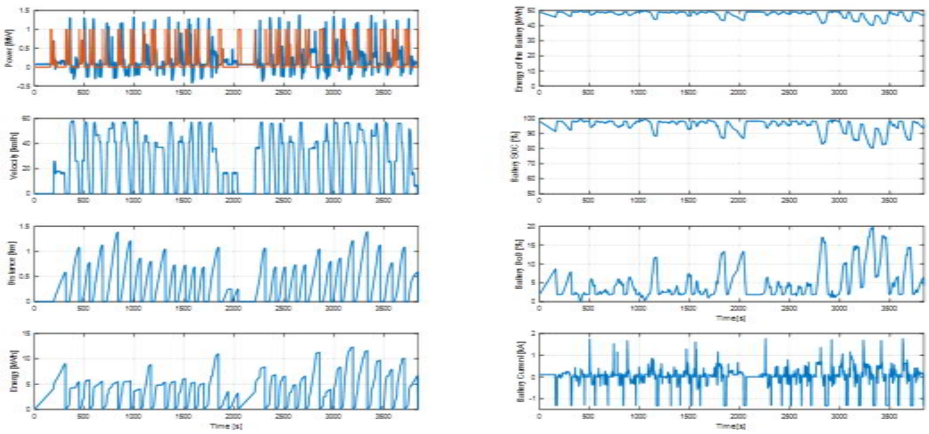


그림 209 무선급전 전원안정화장치 정상조건 시뮬레이션

- 무선급전 급전선로 (평균 175m) : 10 kWh 이상 에너지 구간에는 250m, 8 kWh 이상 에너지 구간에는 200m, 나머지 150m), 전원안정화장치 : 50kWh, 70kWh
- 무선급전 급전선로 최적화를 수행할 경우 에너지 저장장치 방전심도 DOD(Depth of Discharge) 10~15% 유지가능

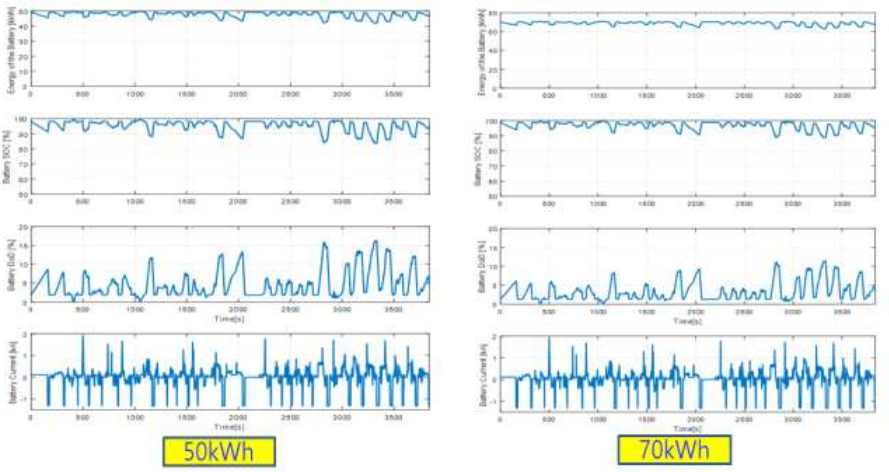


그림 210 무선급전 전원안정화장치 용량별 시뮬레이션

○ 무선급전 차량 전력 시뮬레이션 결과 (상정고장 조건)

- 무선급전 급전선로 : 150m ~ 250m 전원안정화장치 : 50kWh
- 고장조건 : 2역당 1개소 고장
- 상행 구간은 2역당 1개역 고장에 크게 문제가 없으나 하행구간은 최종 종착역에서 약 SOC 20% 떨어짐. 이는 하행구간이 오르막 언덕으로 에너지가 주행에너지가 많이 소요됨

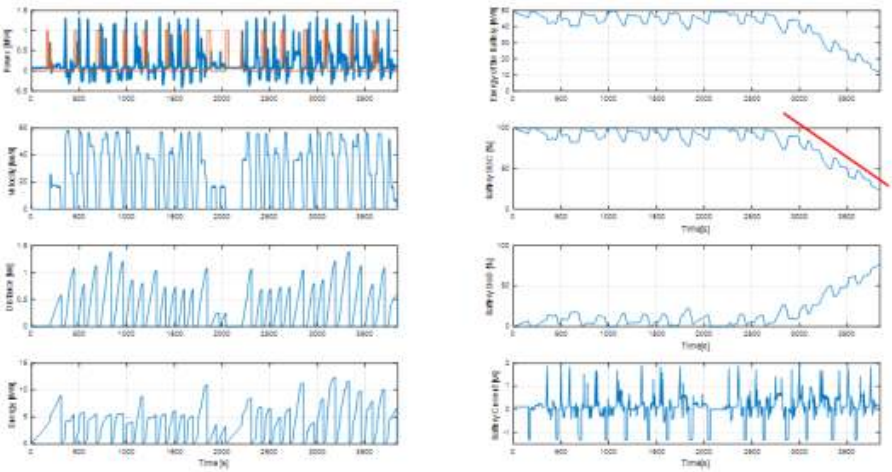


그림 211 무선급전 전원안정화장치 상정사고 시뮬레이션(1개소 고장)

- 무선급전 급전선로 : 150m ~ 250m 전원안정화장치 : 50kWh
- 고장조건 : 2역 연속 고장
- 상행 구간은 2개역 고장에 크게 문제가 없으나 하행구간은 최소 SOC 45% 까지 떨어짐. 이 경우 차량은 10분 정도 차량에너지를 보충한 후에 승객서비스를 하여야함.

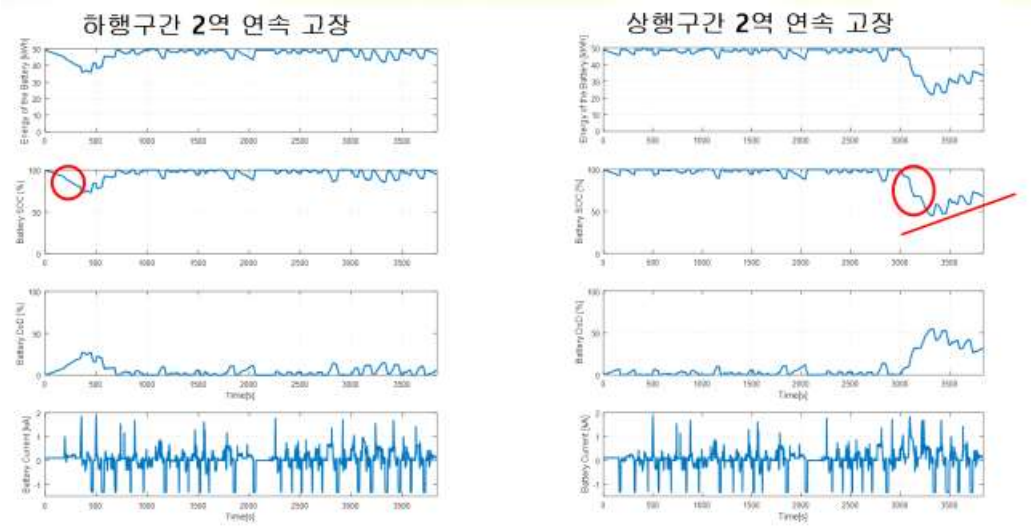


그림 212 무선급전 전원안정화장치 상정사고 시뮬레이션(2개소 고장)

- 무선급전 급전선로 : 150m ~ 250m 전원안정화장치 : 50kWh
- 고장조건 : 3역 연속 고장
- 상행 구간은 3개역 고장시 최소 SOC 62% 떨어짐. 하행구간은 최소 SOC 26% 까지 떨어짐. 이 경우 밧데리의 상태에 따라 주행이 어려울 수 있기 때문에 SOC 40% 이내일 경우 정거장에서 2분정도 충전후 SOC 60% 이상일 경우 출발하면 주행에는 문제 없음.

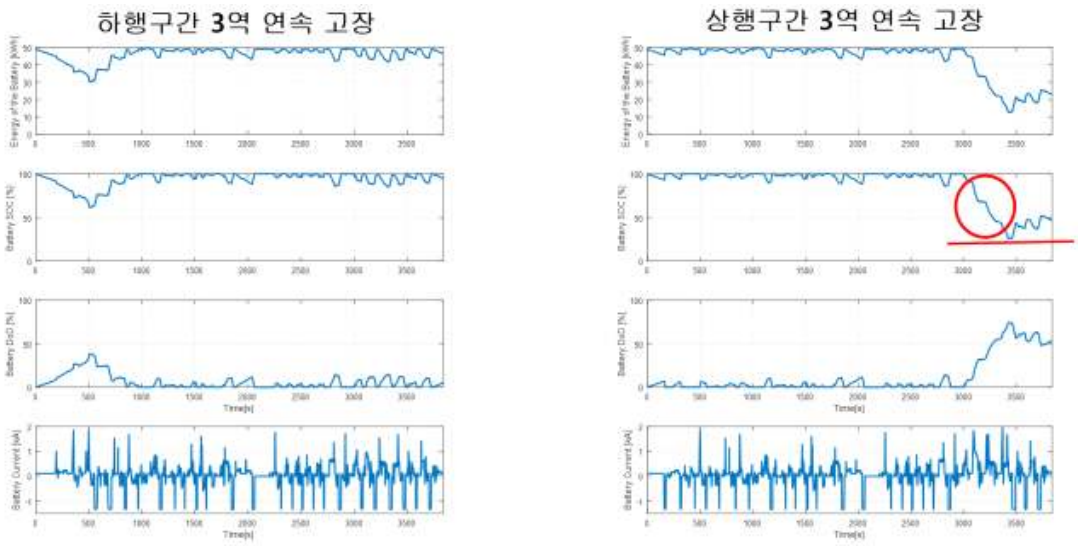


그림 213 무선급전 전원안정화장치 상정사고 시뮬레이션(3개소 고장)

3) 무선급전시스템 차량 정적신뢰성 시험

○ 정적신뢰성시험 목표 및 범위

- “경전철용 무선급전시스템 적용기술개발”의 개발 산출물의 정적 성능 검증지원을 위해 통합 성능 시험, 운영시나리오 시험, 정적 신뢰성 평가를 위한 신뢰성 활동 지원으로 경전철 차량에 무선급전시스템을 적용하기 위한 사전검증을 위한 방안으로 급

전인버터, 집전장치, 급전선로, 전원안정화장치의 성능을 확인하고, 차량 모의부하를 이용하여 무선급전시스템의 작동책무에 대한 적정성을 확인하기 위함

○ 평가 방법

- 지상 또는 차량에 설치되는 인버터, 급전선로, 집전장치, 전원안정화장치, 견인인버터, 저항부하 등 관련 기기를 조합하여 시험한다.
- 신뢰성시험 무선급전 운행프로파일은 경전철 경산시험노선 중 A-B 역사이의 1.23 ㎞ 기준으로 시험한다.
- 신뢰성시험의 운전패턴은 운행노선의 운행프로파일과 유사하게 부하조건을 가변하여 시험한다. 또한 대용량 가변 저항부하로 모의가 불가능할 경우 2-3단계의 스텝형 등가부하로 대체할 수 있다.
- 정적신뢰성 시험 시 부하패턴을 고려하여 계산된 운행프로파일 보다 전력밀도 향상 혹은 가혹조건을 부여하기 위해 시간을 단축하여 부하모의시험을 수행할 수 있다.
- 각 장치는 운행부하 모의장치를 통해 각각 동작되어야 하며 장치별로 별도의 모니터링 장비를 이용하여 상태를 확인 할 수 있다.
- 차량의 부하를 모의할 경우 전원이 중단 없이 공급됨을 확인할 수 있는 DC-Link 전압을 표시하여 한다.

○ 무선급전 정적신뢰성 활동 운행프로파일

- 정적신뢰성 활동을 위한 운행프로파일을 시뮬레이션한 결과 경산시험선 전체용량의 최대부하조건은 약 400 ㎾ 정도로 최고속도까지 도달하기 위해 초기에 대전력을 사용한다.

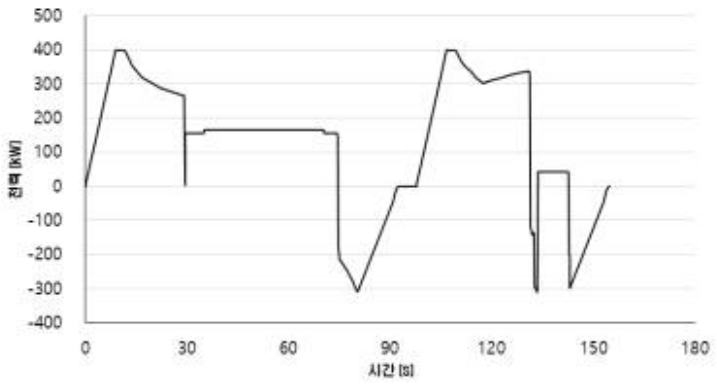


그림 214 경산 시험선 전력량 시뮬레이션 (A-B역 왕복 시)

- 무선급전 정적신뢰성 활동을 위해 다음 표와 같이 무선급전 운영 시나리오를 최적화 할 수 있으며, 무선 급/집전 설비의 가혹조건시험을 위하여 인버터 OFF 시간을 단축하여 수행할 수 있다.

○ 무선급전 신뢰성 평가를 위한 C역사(첨단역)에 설치 및 시험준비완료



그림 215 집전장치 및 전원안정화장치 C역사(첨단역) 정적신뢰성시험

○ 무선급전 정적신뢰성 40,000km 검증방안

- 40,000 ㎞ 이동 시 필요한 부하를 전기적으로 구현하여 무선급전 인버터, 집전장치, 급전선로, 전원안정화장치의 역할을 확인하는 것으로 무선급전 정적신뢰성의 운행거리는 1회 운행이 경산시험선 A역에서 B역까지를 왕복 운행하는 기준으로 A-B역간 거리 1.23 ㎞ × 2 = 2.46 ㎞ 가 되며, 정적신뢰성측면에서는 1회 운행 시 2.46 ㎞ 로 주행한 것으로 환산하였다.
- 정적신뢰성의 운행 프로파일 확인은 아래 그림과 같은 운행제어시스템을 이용하여 운행 횟수를 확인할 수 있도록 구현하였다.

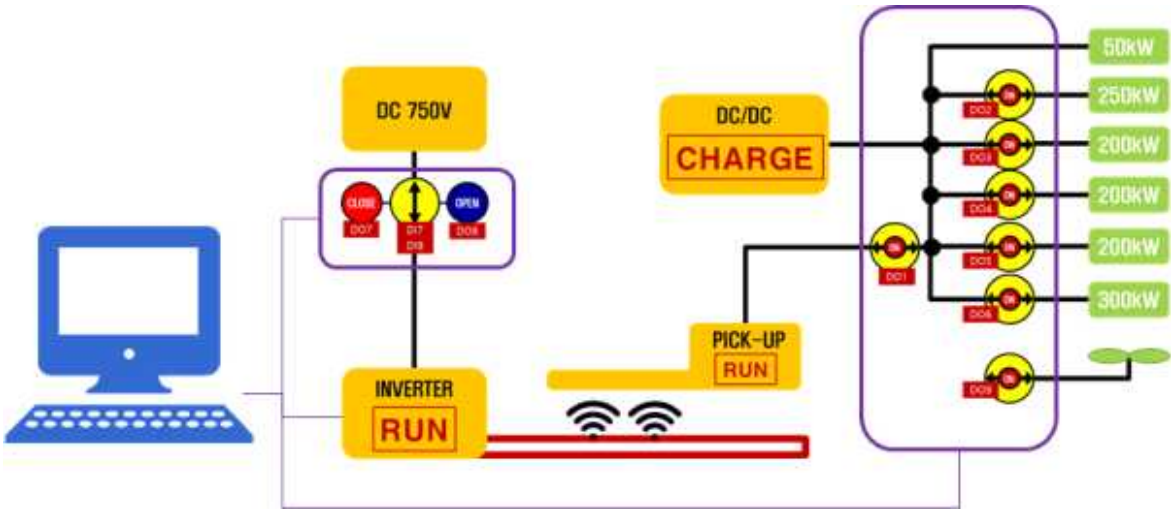


그림 216 무선급전 운행제어시스템 구성

- 운행 프로파일에 대한 시나리오는 지령 (2분)이 순서대로 전달되었는지 DO를 체크하여 확인하고 시나리오 count를 1씩 증가하여 증가한 횟수만큼에 2.46 ㎞ 를 대입하여 운행 ㎞를 확인하고자 한다.

○ 무선급전 정적신뢰성 40,000km 검증 결과

- 정적신뢰성 검증은 2018년 10월 31일부터 2018년 12월 6일 오전까지 약 6주차동안 운행 프로파일 카운터를 확인한 결과 총 16,935 회를 왕복한 것으로 확인되었으며, 거리 환산 시 1회 왕복이 2.46 ㎞ 이므로, 16,935 × 2.46 ㎞ 수치를 반영하면, 주행거리는 41,660㎞ 주행한 수치가 나온다.

· 1주차 : 2018년 10월 31일 ~ 2018년 11월 04일
· 2주차 : 2018년 11월 05일 ~ 2018년 11월 11일
· 3주차 : 2018년 11월 12일 ~ 2018년 11월 18일
· 4주차 : 2018년 11월 19일 ~ 2018년 11월 25일
· 5주차 : 2018년 11월 26일 ~ 2018년 11월 30일
· 6주차 : 2018년 10월 31일 ~ 2018년 11월 06일

- 1주차부터 6주차까지 경산 시험선의 전력량으로 70 ㎾h 이상 사용한 전력량을 확인한 결과 다음표와 같다.

표 43 주차별 70 ㎾h 이상 사용한 전력량 확인 결과

구분	1주차	2주차	3주차	4주차	5주차	6주차	비고
70 ㎾h 이상	119	437	480	610	373	239	15분 당 1회로 확인함

- <표 4>와 같이 각각의 횟수에 A-B역간 1회 운행 시 2.46 ㎞ 로 주행한 것으로 환산하면 (15분 총 횟수 × 15분) / 1회 왕복 2분으로 계산하면 총 161,935 회 왕복한 것으로 계산되며, 총 왕복한 횟수에 운행 거리 2.46 ㎞을 곱하게 되면 총 41,660 ㎞를 주행한 것으로 계산된다. (전력량은 한국전력의 I-smart 전기사용량 모니터링 시스템 통계 자료를 참고함)
- 정적신뢰성의 운행 프로파일에 따른 전력량은

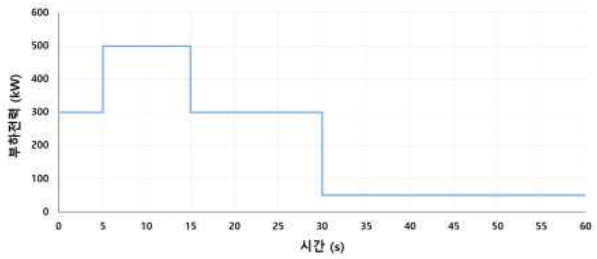


그림 217 부하에서 소모되는 전력 프로파일 (지령)

- 실제 인버터에 입력되는 전력은

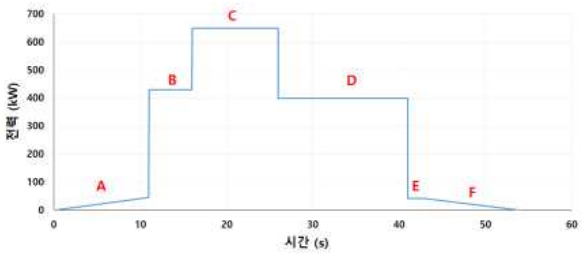


그림 218 인버터 입력 전력 측정

- 위 인버터 입력 전력 측정의 각 구간별 전력은 다음 표와 같다.

구간	시간 (초)	전력 (kW)	전력량 (kWs)	디스플레이
A	11	0 -> 48	264	
B	5	430	2,150	
C	10	650	6,500	
D	15	400	6,000	
E	2	42	84	
F	11	42 -> 0	231	

- 위 표의 전력량 합계는 15,229 kWs 이며, 1분 당 전력량은 4.23 kWh, 15분당 전력량은 63.45 kWh 가 된다.
- 따라서 정적 신뢰성 운행 프로파일의 정상 운영 중일 때 시험선 소모전력량은 76 kWh, 무선급전시스템 기동을 멈췄을 때 소모전력량은 9 kWh, 무선급전시스템에서 사용하는 전력량은 63.45 kWh, 기타 전력량은 3.55 kWh를 확인하였다.
- 기타 전력량은 무선급전시스템이 기동할 때 외부 환경에서 추가로 소모되는 전력량 및 측정 오차를 의미하며, 변전실 전력변환손실, 변전선-인버터 연결구간의 전력선 손실 등이 포함되었음.
- 이에 2018년 10월 31일부터 11월 28일까지 전력량을 확인한 결과 2018년 12월 06일까지 주행거리는 41,660㎞를 초과하였으며, 2018년 12월 중순까지 최소 45,000㎞를 달성하였음.

4) 무선급전시스템 차량 동적신뢰성 시험

가) 동적신뢰성시험 목표 및 범위

○ “경전철용 무선급전시스템 적용기술개발”의 개발 산출물의 무선 급전 시험선에서 무선급전 차량의 동적 성능 검증 활동 지원으로 경전철 차량에 무선급전시스템을 적

용하기 위한 검증을 위한 방안으로 다음의 항목을 수행함.

나) 무선급전 40,000㎞ 동적시험 절차서

○ 동적시험(4만㎞ 이상)을 실시하여 차량 운행/무선 급전, 신호 체계, 비상 운영 등을 고려한 평가 방안 도출



그림 219 동적신뢰성 평가를 위한 신뢰성 활동 범위 분류

- 차량 운행/무선 급전

· 정상적인 운영 상황에서 열차가 운행할 때 역 정차, 역 출발, 역 진입, 역간 운행 시 운행 정보 등의 절차서 검토 및 평가 방안 제안

- 신호 체계

· 무선급전 시스템의 오류를 최소화하기 위해 신뢰성 있는 차량 검증 시스템의 절차서 검토 및 평가 방안 제안

- 비상 운영

· 무선급전 시스템에 오류가 발생하여 비정상적인 운영 상황 발생 시 비상 운영 조건에 따른 시스템의 안전 및 운영 측면의 기능 확인 절차서 검토 및 평가 방안 제안

○ 동적시험을 위한 안전관리 조직도 및 동적시험 체계



그림 220 안전관리 조직도

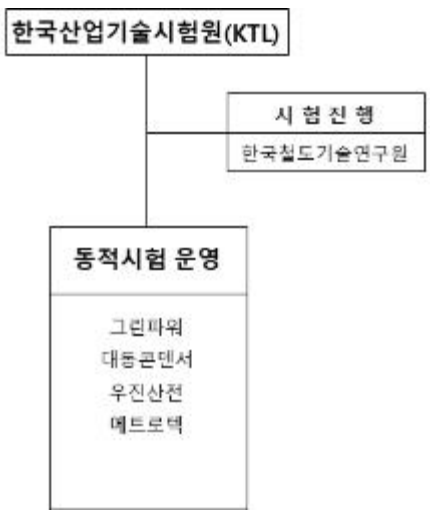


그림 221 동적시험 수행 체계

다) 무선급전시스템 동적시험 수행

○ 무선급전 시스템 동적시험 수행 조건

- 무선급전 시스템 동적시험 진행은 다음과 같은 조건으로 수행함.

- 매주 월요일 10시부터 수행 시작
- 1회 셔틀 운행 시 왕복운행시간 약 4분 30초 소요하므로 한시간당 왕복 운행 횟수 13.3 RT(Round Trip) 가능

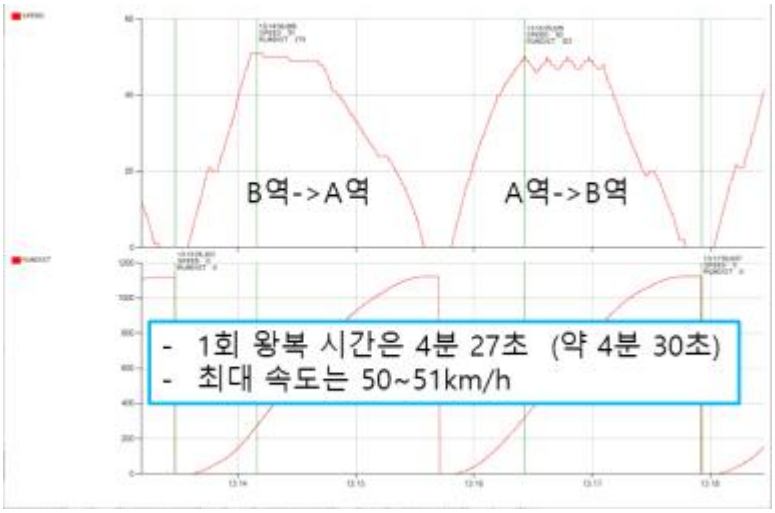


그림 222 왕복 소요시간 및 셔틀 운행 최대 속도 조건

- 차량 무인운전은 속도 제한을 따르고 가속력은 P2로 진행(무선급전 시험 차량의 경우 최대가속능력은 P4 가능)



그림 223 기존 시험선 속도제한이 무인 운행 시 구간별 최대 속도 구간

- 누적거리 40,000㎞ 달성 시 17,970회 이상 왕복을 수행하여야 함
(1회 왕복거리 측정 결과 : 2.226㎞)

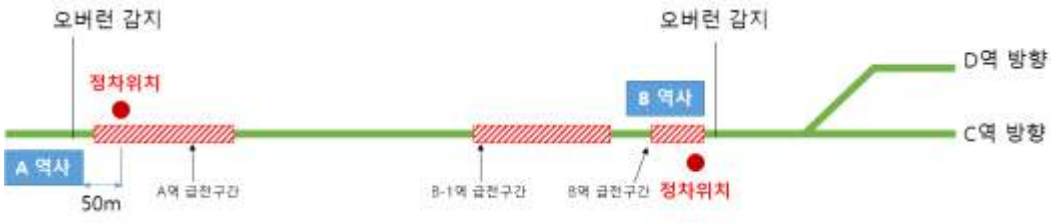


그림 224 셔틀 운행 구간 확인

표 44 1회 왕복거리 확인 결과

시험 항목	편도 이동거리 확인	1회 왕복거리	비고
1회 왕복거리	1.113 ㎞	2.226 ㎞	

- 주행구간 측정은 차량의 정차지점간 거리를 KP를 활용하여 측정하였음
- 주행구간 측정 결과: 1132 m = 1.132 ㎞

- 측정된 주행구간 중 경전철 차량의 크기를 제외하면 실제 편도 이동거리가 됨.
  = 1132 - (9.640 + 9.640)
  = 1 112.72 m ≒ 1.113 ㎞
- 주행구간 : 차량 정차지점 양 끝을 측정한 거리
- 편도 이동거리 : 차량 길이를 뺀 실제 이동거리
- 40,000㎞ 달성을 위해 물리적인 최소 시험기간은 약 29주 소요 예상
- 개발품에 대한 점검 및 유지보수 점검 시간은 다음 그림과 같이 파란색 음영표시된 비어있는 시간대에서 수행 계획을 수립함.

시간	월	화	수	목	금	합계
08:00		운행 준비				
09:00		13.3	13.3	13.3	13.3	
10:00		13.3	13.3	13.3	13.3	
11:00	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	
12:00	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	
13:00	13.3				13.3	
14:00	13.3	13.3		13.3	13.3	
15:00	13.3	13.3		13.3	13.3	
16:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
17:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
18:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
19:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
20:00	13.3	13.3	13.3	13.3		
	운행 종료					
합계	133RT	146RT	120RT	146RT	93RT	638RT

그림 225 유지보수 시간표 설정

- 경전철용 무선급전시스템 동적시험 매뉴얼(관제실, 차량) 확인하여 동적시험에 대한 진행 상황을 확인함.



그림 226 무선급전시스템 시험 차량 및 관제 화면



그림 227 무선급전 제어 관제 스크린

라) 시험 결과

○ 무선급전 동적 집전 시험

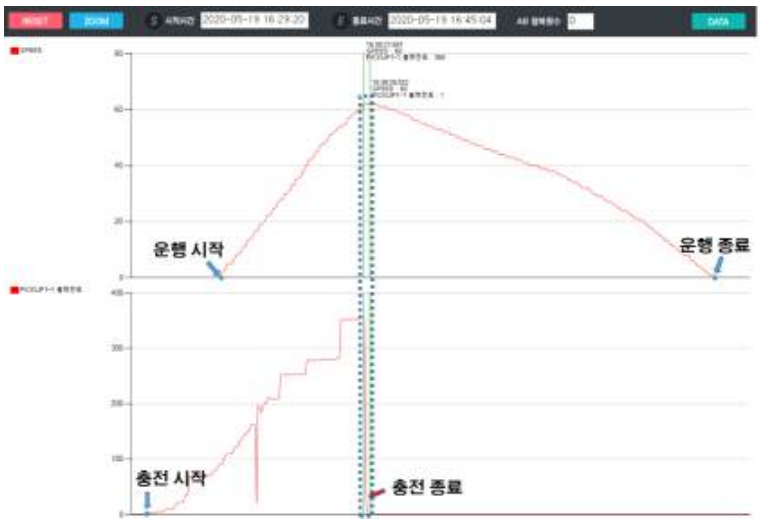


그림 228 차량 최고속도 및 집전 차량 충전 시작 및 충전 종료 구간 확인

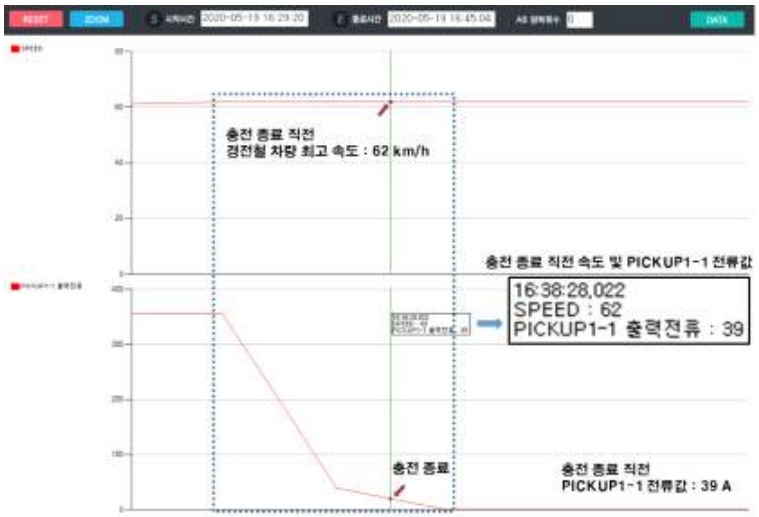


그림 229 충전 종료 직전 속도 및 PICKUP1-1 전류값 확인

○ 동적시험 운행거리 측정 (누적 왕복횟수, 1회 왕복거리, 총 운행거리)

시험 항목	편도 이동거리 확인	1회 왕복거리	비고
1회 왕복거리	1.113 ㎞	2.226 ㎞	

- 주행구간 측정은 차량의 정차지점간 거리를 KP를 활용하여 측정하였음
- 주행구간 측정 결과: 1132 m = 1.132 ㎞
- 측정된 주행구간 중 경전철 차량의 크기를 제외하면 실제 편도 이동거리가 됨
  = 1132 - (9.640 + 9.640)
  = 1112.72 m ≒ 1.113 ㎞
- 주행구간 : 차량 정차지점 양 끝을 측정한 거리
- 편도 이동거리 : 차량 길이를 뺀 실제 이동거리

- 경전철 시험 차량은 2량 1편성이므로 1량 크기의 2배가 경전철 차량의 크기임.

표 45 왕복횟수 확인 결과

시험 항목	기간 (월)	누적 횟수	비고
왕복 횟수	19년 04월	86 회	로그 데이터 확인함 ※ 시작일 : 19년 4월 25일 ※ 종료일 : 20년 4월 21일
	19년 05월	1 589 회	
	19년 06월	2 320 회	
	19년 07월	1 596 회	
	19년 08월	2 072 회	
	19년 09월	2 132 회	
	19년 10월	2 066 회	
	19년 11월	1 040 회	
	19년 12월	1 822 회	
	20년 01월	1 596 회	
	20년 02월	1 730 회	
	20년 03월	801 회	
	20년 04월	109 회	
총 왕복 횟수 합계		18 959 회	

- 상기 월별 운행 횟수는 로그데이터로 확인한 결과임.

표 46 총 운행거리 확인 결과

시험 항목	기준	계산 결과	운행기간
동적시험 운행거리	총 운행거리 40 000 ㎞ 이상	42 203 ㎞	19년 4월 25일 ~ 20년 4월 21일

- 동적시험 차량의 총 운행거리 산출식 (소수점 첫째자리에서 반올림)

  총 운행거리(㎞) = 총 왕복 횟수 × 1회 왕복거리

  = 18 959 × 2.226

  = 42 202.734 ㎞ ≒ 42 203 ㎞

○ 경전철 무선급전시스템 효율 확인

- 한국철도기술연구원 경량전철시험선에서 실시하는 무선급전 경전철 시스템의 설계 요구사항에 따른 시스템의 효율을 확인하였음.

- 측정 방법 및 조건

· 지상 인버터의 DC 750[V] 입력 단자의 전압, 전류 파형을 측정

· 차량 집전장치의 DC 750[V] 출력 단자의 전압, 전류 파형을 측정

· 차량 내부 사용량 및 충전량을 측정하기 위해 DC-DC 컨버터 출력 전류 측정

· 지상, 차량간에는 거리가 멀고 차량이 움직이므로 2대의 측정장비를 이용하여 입, 출력을 각각 측정

· 측정과정에서의 트리거 (차량 출발하기 직전에 문을 닫을 때 전류값이 튀어오름)

를 이용하여 추후 입출력 결과값을 동기화 할 것

· 차량이 정지상태에서 충전하고 있을 때부터 출발하여 선로를 빠져나갈 때까지 측정

- 측정 결과 (효율 시험은 B역사 구간에서 실시함)

· 차량 정차 중 충전 효율은 86.1%, 차량 이동 중 효율은 최대 89%가 계산됨.

· 정차의 경우 충전 시작 후 구간부터 출발 직전까지 평균값이며, 차량 이동의 경우 기동해서 충전종료 직전까지의 효율 데이터에 이동평균을 적용한 결과에서의 최대치를 적용함.



시 험 성 적 서
(TEST REPORT)

ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 20-031895-01-1
Report No.
페이지 (1)/(총 18)
Page of Pages

1. 의 뢰 자 (Client)
기 관 명 (Name) : 한국철도기술연구원
주 소 (Address) : 경기도 의왕시 철도박물관로 176 (월암동)
의뢰일자 (Date of Receipt) : 2020. 05. 18.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) :

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)
제 품 명 (Description) : 무선급전 경전철 시스템
제 작 회 사 (Manufacturer) : (주)그린파워, (주)우진산전, (주)에프로텍, 대동콘넨서공업(주)
모 델 명 (Model Name) :
제조번호 (Serial Number) : None
기 타 (Remark) :

4. 시험기간 (Date of Test) : 2019년 04월 25일 ~ 2020년 06월 04일

5. 시험장소 (Location of Test) :
□ KTL 교정시험실
■ 현장시험 (주소 : 경북 경산시 남천면 흥산길 27 한국철도기술연구원 경량전철시험장)

6. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 무선급전 경전철 동적시험 절차서

7. 시험결과 (Test Results) : 시험완료

비고(Note) : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제출한 시료에 한하며, 법적 및 기타분쟁의 근거 등으로의 사용을 금합니다.
2. 이 성적서는 원본만 유효하며, 일부도 제 3자에 의한 복사 및 전자파일 등은 유효하지 않습니다.
(원본이면 KTL에서 정해진 절차에 따라 보안성을 포함시켜 제공하는 모든 성적서를 의미합니다.)
3. 사용된 2D바코드를 스캔하여 성적서의 원본내용 확인이 가능하며, KTL 보관 원본과의 동일성은 고객전용홈페이지(customer.ktl.re.kr)의 "성적서 위조확인"항에서 비교하실 수 있습니다.
4. 본 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 표준 및 KOLAS 인정기관 관련이 없습니다.

확 인 Affirmation	작성자(Tested by) 성 명(Name) : 장홍석 (Signature)	기술책임자(Technical Manager) 성 명(Name) : 조정원 (Signature)

2020. 06. 10.

한국산업기술시험원장

FP104-05-00

※ 위 마크는 추후 전자확인을 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 2D코드입니다.

그림 230 무선급전 경전철 동적시험 성적서

사. 무선급전 경전철 차량집전시스템 개발

1) 연구 개발 목표

○ 용량 1000kW 효율 97% 정전압 제어가 가능한 무선급전 집전시스템 개발
○ 무선급전 집전장치 차량 부착기술 및 최적 유지보수기술 개발
○ 경전철용 무선급전 차상장치 개발 및 차량 시운전시험 신뢰성 확보(동적성능시험 4만 km이상)

2) 연구 개발 범위

○ 250kW급 차량 집전 시스템 단품 개발차량 집전 장치 개발(그린파워)
○ 250kW급 집전시스템 시작품 제작 및 자체 시험
○ 집전시스템(정류기+집전패드)의 전력용량(1MW이상) 신뢰성 시험
○ 무게측정(집전패드 250kW * 4SET,1200kg 이내, 집전정류기 250kW * 4SET,800kg 이내) 및 사항에 맞게 제작 완료
○ 크기(4SET기준, 집전패드 1.08m^3이내, 집전정류기 0.65m^3이내)에 맞게 제작 완료
○ 통합효율(인버터+집전장치+집전정류기 93%이상)개발
○ 집전장치 정적 시험 진행
- 경산 시험선로에 집전장치 설치 및 시험
- 실제 현장에서 집전장치 시험과 보완점을 찾아 보완 설계
- 설치면 불균형에 의한 자화 인덕턴스 불균형 문제 해결 방안 검토
- 집정장치 냉각수에 관한 데이터를 기반으로 부동액 검토
○ 집전시스템 차량 장착 및 시험 진행(우진산전)
- 집전패드/집전정류기 차량 장착
- 전원 안정화 장치와 연동시험
- 무선급전 전체 시스템 연동 시험

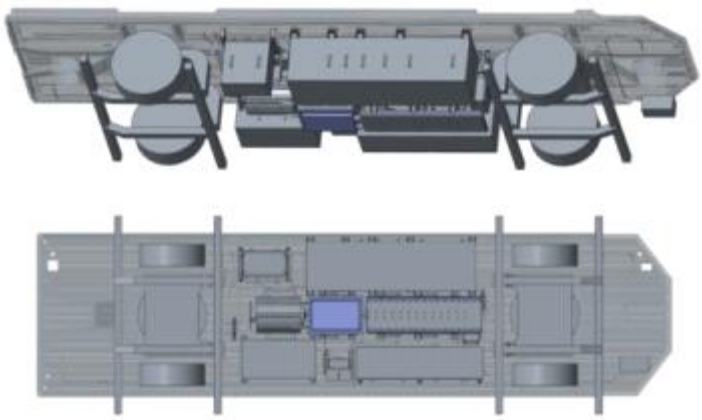


그림 231 집전 시스템 차량 하부 설치 이미지

○ 집전장치 유지 관리 및 장비와의 인터페이스 확보
- 시스템 설계 단계 시 주기별 점검을 위한 방안 검토 완료
- 소자 고장 시, 편리한 유지보수 환경 구축 방안 검토 완료
- 집전장치간의 데이터 송/수신 방안 검토 완료

○ 실제와 비슷한 테스트 환경 구축
- 실제 차량 주변 온도 변화에 따른 파라미터 추출 시험 완료
- 고장/오류 시 집전판 자가 진단 및 알람 계획 수립 완료
○ 고압, 대전류, 고주파용 정류기 보완 개발 완료
- 사이즈 경량화 및 발열 문제 최소화 완료
- 회생형 전자부하를 이용한 부하시험 및 성능시험 완료
○ 무선급전경전철 에너지저장장치 개발 시험(메트로텍)
- 무선급전 경전철 차량에 적합한 에너지저장장치 개발
- 무선급전 4만km 동적성능시험 및 데이터 계측
○ 동적인 상황에서의 집전 시스템 시험(한국철도기술연구원)
- 차량 장착 동적 신뢰성(4만km)시험을 실시하여 제품의 내구성 및 안전성의 성능 검증
- 집전 시스템 운전방안 데이터 수집 및 검토(경전철 진출입에 따른 운전방안등), 보완사항 발생 시 제품 안정화를 위해 보완 반영
- 동적 시험 시 발생되는 고장정보를 바탕으로 운전 시 발생하는 고장정보에 대한 대응 및 상황 조치
- 안정성을 고려한 고장정보 및 동작 시퀀스 반영
○ 집전 시스템의 유지보수 설차서 작성
- 집전 시스템 고장상태 에 따른 유형별 조치 방법 기술 작성
- 집전 시스템 정상적인 운영을 위한 운영점검방안 기술 작성
- 동적시험(4만km)시 발생하는 집전시스템 고장정보를 반영하여 유지보수 절차서 작성

3) 상세 연구 개발 내용

가) 집전 시스템 사양 설정

○ 용량 1000kW, 효율 97%, 정전압 제어가 가능한 집전 시스템을 개발한다.
- 용량 : 경전철 추진 전동기 구동을 위해서는 인버터와 모터 효율을 감안해서 1000kW 정도가 필요하다.
- 효율 : 기존 집전시스템의 효율이 집전패드 + 정류기 + 레귤레이터의 효율은 합해서 95% 정도가 한계인데 본 과제에서는 새로운 기술을 적용해서 97%로 정하였다.

○ 무선급전 집전장치 차량 부착기술 및 최적 유지보수기술 개발
- 집전 시스템 고장상태 에 따른 유형별 조치 방법 기술을 작성하여 최적 유지보수 기술에 적용 하도록한다.
- 집전 시스템 정상적인 운영을 위한 운영점검방안 기술을 작성하여 최적 유지보수 기술에 반영하도록한다.
- 동적시험(4만km)시 발생하는 집전시스템 고장정보를 반영하여 유지보수 절차서 작성하도록 한다.

○ 경전철용 무선급전 차상장치 개발 및 차량 시운전시험 신뢰성 확보(동적성능시험 4만km이상)
- 차량 장착 동적 신뢰성(4만km)시험을 실시하여 제품의 내구성 및 안전성의 성능

검증

- 집전 시스템 운전방안 데이터 수집 및 검토(경전철 진출입에 따른 운전방안등), 보완사항 발생 시 제품 안정화를 위해 보완 반영한다.
- 동적 시험 시 발생되는 고장정보를 바탕으로 운전 시 발생하는 고장정보에 대한 대응 및 상황을 조치한다.
- 안정성을 고려한 고장정보 및 동작 시퀀스 반영한다.

표 47 집전 시스템 사양

항목	사양
출력 전압 범위	638~900V
총 최대 출력	1.0MW
총 모듈 수	4
모듈 당 최대 전력	250kW
모듈 당 출력 전류	392A
효율	97% 이상
외함 크기	0.65㎥ 이하
외기 온도	-25도 이상 40도 이하
냉각	수냉
IP등급	IP54

나) 무선급전 경전철 집전시스템 시스템 상세설계 및 제작 시험완료

○ 집전코일-집전장치 구조

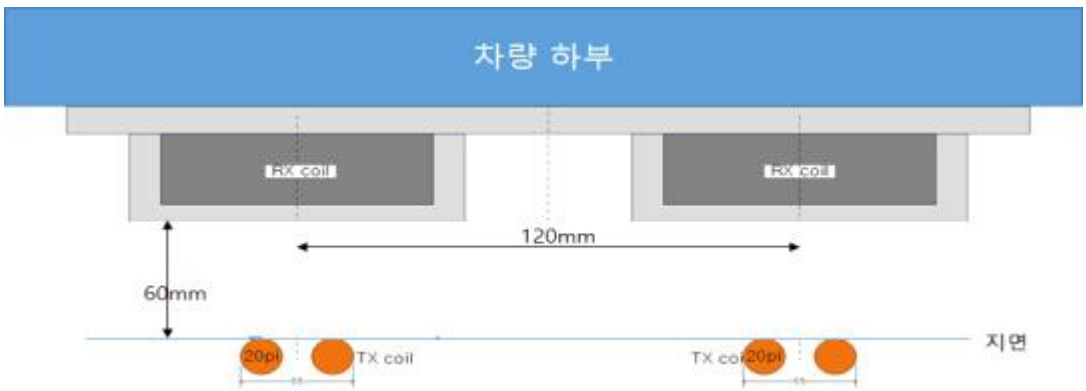


그림 232 집전코일-집전장치 구조

- 위 그림은 무선급전 경전철 차량 하부에 설치되는 집전시스템의 이미지다. 집전 패드의 코일과 코일 간 센터 거리는 120mm 이고 급전 선로 케이블과의 공극은 대략 60mm로 설계 되었으며 이 때의 공극을 기준으로 Power Test를 진행 하였다.

○ 250kW급 집전장치 모듈 상세설계 및 제작, 자체시험, 인증시험

- 대용량 커패시터 뱅크 개발
  · 총 전압 내량은 전압 정격의 150%인 11.2kV
  · 총 전류 내량은 전류 정격의 150%인 750A

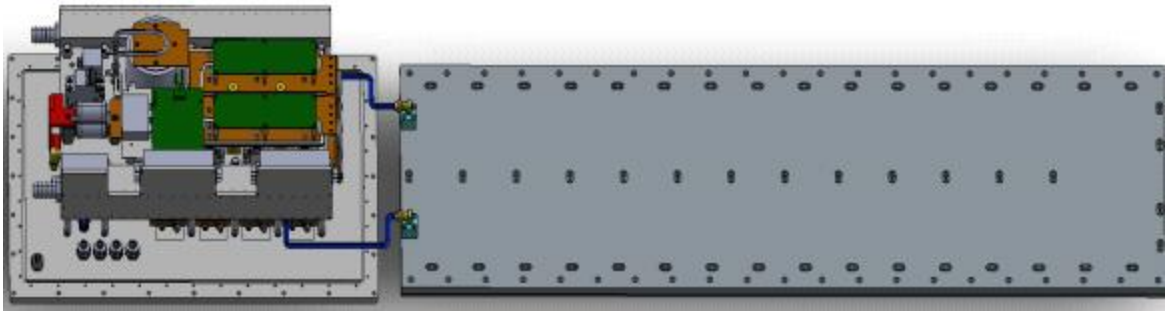


그림 233 집전코일-집전장치 설계 구조

- 집전코일, 정류기 일체형 레귤레이터, 공진 콘덴서 뱅크 모두 포함한 집전장치 제작 완료
- 집전 커패시터, 집전코일 및 집전판 수냉 적용 완료
- 고성능 수축튜브를 이용한 코일 자체 방수 및 절연물로 보호 완료
- 공진콘덴서, SIC MOSFET 스텍은 IP54 등급에 부합되도록 보호커버 설치 완료
- 방수보호 등급 시험 완료
- 코일 권선 부분은 실리콘 처리하여 방수 및 방진 만족하도록 설계 완료
- 집전 시스템 내구성 시뮬레이션 및 테스트완료
- 진동 및 충격 시험 완료

○ 집전코일-집전장치의 구성



그림 234 실제 제작 완료한 집전 시스템 이미지

- 위 사진은 모델링 완료한 집전시스템을 제작한 이미지이다. 설계된 자료를 바탕으로 제품을 구현하였으며 냉각수 순환은 설계 의도대로 구현되었다.

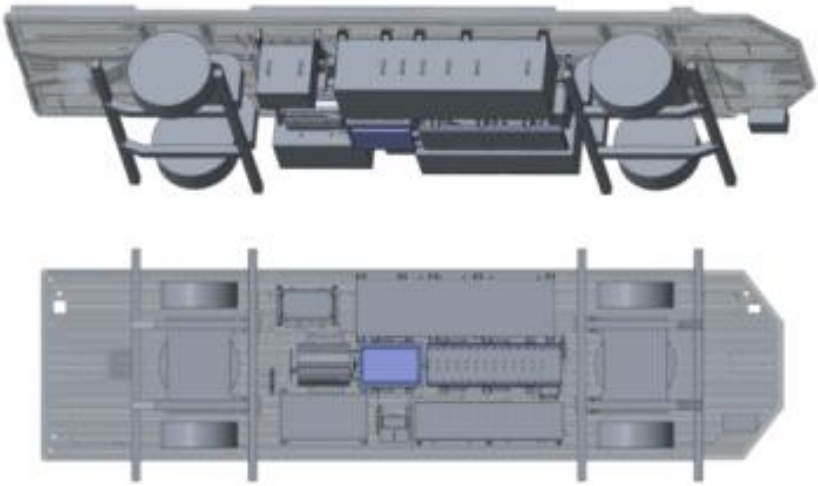


그림 235 집전 시스템 설계를 반영한 차량 하부 설치 이미지

- 위 사진은 집전시스템이 차량하부에 배치된 모습을 나타내었다. 실제로 집전 시스템은 위 사진과 같이 차량 하부에 배치 되었으며 이는 시험을 통해 성능을 확인하였다.



그림 236 집전 시스템 1조(4SET)를 이용한 Power test 시험 구성

○ 집전코일 보완 설계 검토

- 경산 시험선로에서 테스트 할 차량의 설치성을 고려하여 상세 설계 진행
- 실제 현장에서 보완 및 수정점을 고려하여 제품 설계
- 뒤틀림과 설치면의 불균일성에 의해 단차 발생이 우려되는 부분 고려 설계
- 집전 케이블과 캐패시터의 외형 사이즈가 달라질 수 있으므로 장착 설계 변경 검토
- 집전판 및 집전장치의 발열에 대한 데이터를 바탕으로 열에 내성이 있는 재료 선정
- 1년 내내 외부 환경에 노출되는 특성이 있으므로 내 환경시험 계획 수립

○ 집전장치 유지 관리 및 장비와의 인터페이스 확보
- 시스템 설계 단계 시 주기별 점검을 위한 방안 검토
- 소자 고장 시, 편리한 유지보수 환경 구축 방안 검토
- 차량과의 데이터 송/수신 방안 검토

○ 실제와 비슷한 테스트 환경 구축
- 집전코일 Misalignment에 대한 테스트 시험 완료
- 실제 차량 주변 온도 변화에 따른 파라미터 추출 시험 완료
- 고장/오류 시 집전판 자가 진단 및 Fault 발생 완료

○ 고압, 대전류, 고주파용 정류기 보완 개발
- Auto-tuning 회로 보완 설계 및 테스트 완료
- 사이즈 경량화 및 발열 문제 최소화 완료
- 회생형 전자부하를 이용한 부하시험 및 성능시험 완료
- 관련 인증 시험 완료(KTL 입회)

다) 무선급전 경전철 집전시스템 성능 시험 검증

○ 단위 모듈 전력 용량 및 시스템 통합 효율(급전인버터+집전시스템 효율)

- 실험에 사용된 인버터는 1세부 인버터 판넬에 이용되는 인버터 스텍을 이용하였고 Test bed를 구성하여 시험을 진행 하였다. 인버터의 스위치 주파수는 60kHz이며 전력용량은 최대 1000kW를 출력할 수 있고 트랙에 500A의 전류를 흐르게 할 수 있다. 아래 그림은 그린파워 사내에서 전력 용량 시험을 위해 시스템을 구성한 모습이다.

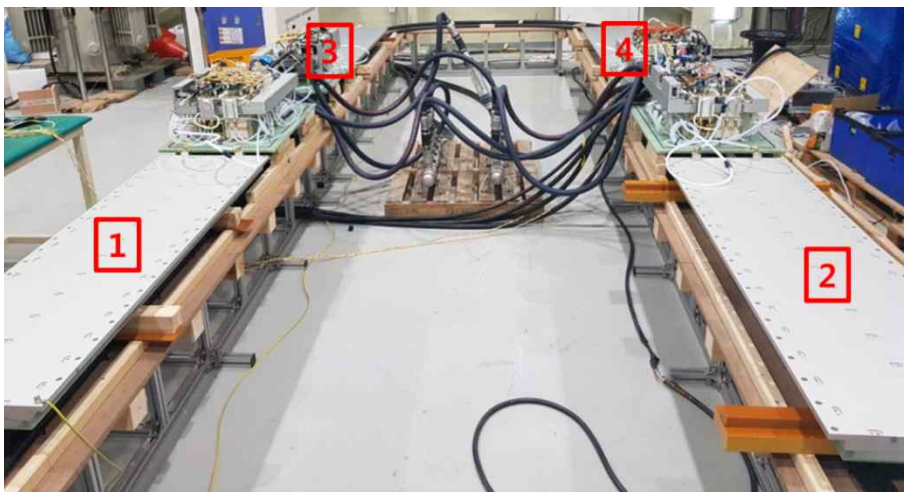


그림 237 제작된 집전장치 & 집전정류기

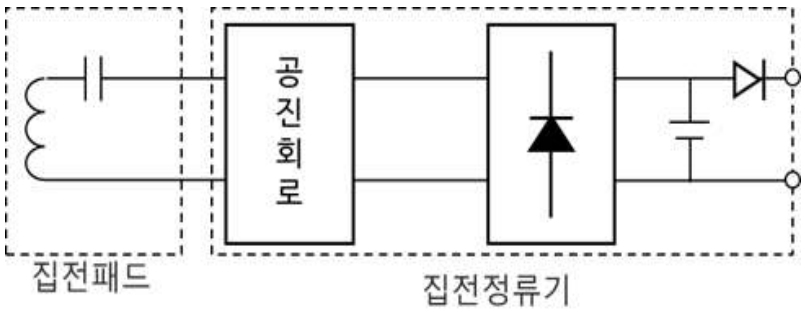


그림 238 집전패드와 집전정류기의 시스템 구성도

- 위 그림은 집전시스템(집전패드 & 집전정류기)의 시스템 구성도 이다. 집전시스템은 크게 집전패드와 집전정류기로 나뉘어져 있다. 용량은 250kW 로 설계 되었으며 이는 경전철 하부에 4SET(1조)가 설치된다.

- 집전시스템 전력 용량 시험을 위한 시험의 구성은 공냉형 인버터 스텍, 캐패시터 뱅크, 집전 정류기와 집전 캐패시터, 그리고 손실분 Power를 보상하기 위한 정류기, IVR등으로 구성 되어 있으며 전기적인 시험 개요 이미지는 아래 그림과 같다.

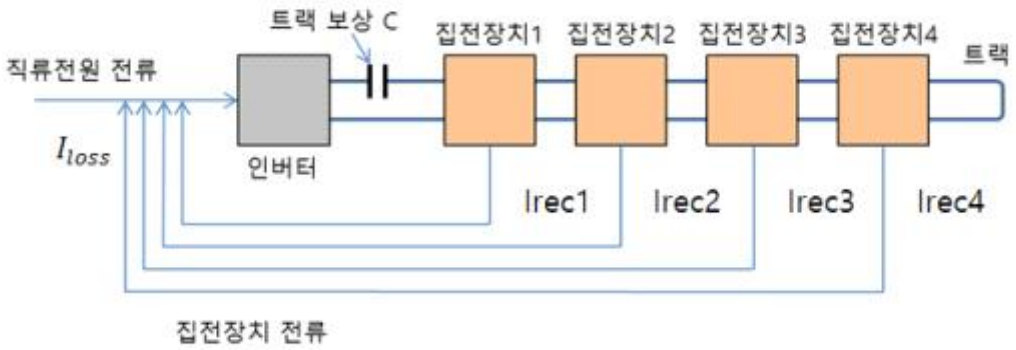


그림 239 전류 회생 방식의 시험 구성도

- 실험은 급전인버터와 집전시스템의 통합효율을 실측하기 위해 시스템을 구성하였고 위 그림에 구성된 회로와 같이 순환 방식으로 진행하여 전체 시스템에 이용되는 전력은 순환하게 되고 시스템에서 발생되는 손실은 입력 전원에서 공급하게 된다. 이러한 방식을 통하여 대전력 시험에서 소모되는 전력 손실을 최소화 하여 테스트를 진행하였다. 전류 순환방법을 바탕으로 시험을 진행 하였으며 온도상승 시험, 누수시험을 같이 진행하였다. 온도가 포화 되었을 때 효율을 측정한 결과 93.7% 였으며 이는 인증기관을 통해 인증을 완료 하였다. 온도 포화 시험과 같이 진행하였을 때 1MW이상으로 1시간 반 정도 시험을 진행하였을 때 온도 포화를 확인할 수 있었다. 이는 KTL인증을 통해 정격 Power 인증을 완료 하였고 더불어 시스템 효율도 인증 완료 하였다.

표 48 시스템 전체 손실 및 효율

Vin	750V	Irec1	325.3Adc
Pin	1.07MW	Irec2	304.1Adc
Pout	995kW	Irec3	336.9Adc
트랙 손실	6.5kW	Irec4	296.7Adc
트랙 손실 포함	93.2%	Iloss	100Adc
트랙 손실 제외	93.7%		



그림 240 집전
출력전압

- 위 사진은 만 부하 시험 시 집전출력 전압을 나타내고 있다.





그림 241 인버터 패널 표시 전압 및 전류

- 위 사진은 만부하 시 인버터 패널의 전력량을 표시하고 있다. 입력 전압은 급전 정류기의 출력전압과 동일한 762V, 그리고 입력 전류를 확인할 수 있다.



그림 242 집전시스템 출력 전류(1~4)

- 위 사진은 집전시스템 각 파트별 출력 전류를 측정한 것이다. 집전장치 1번부터 출

력전류는 325.3A, 304A, 336.9A, 296.7A로 확인 할 수 있다



그림 243 시스템
손실분

- 그림은 전체 시스템의 손실분을 나타내고 있다. 100A로 대략 76kW로 확인된다.
- 아래 그림은 경산 시험선에서 실제 급전 선로를 이용하여 급전 인버터, 집전시스템을 연동하여 전력 용량 시험을 진행하였다.



그림 244 경산 시험선 현장 인버터 설치 사진



그림 245 집전장치 설치 사진

- 출력 부하를 아래 그림과 같이 5단계로 나누어 투입하여 전격 전력(출력 1MW)을 확인하였다.

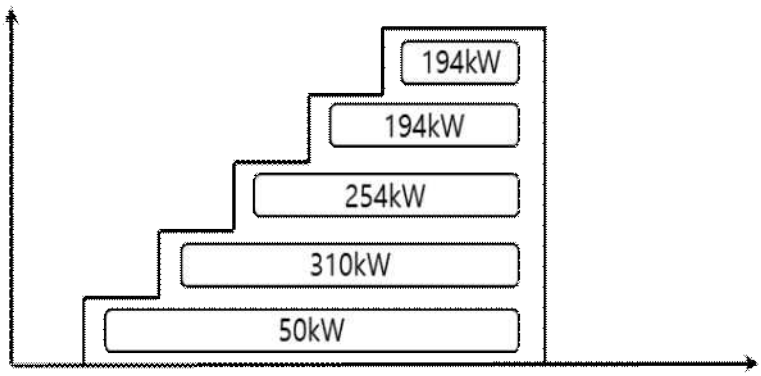


그림 246 부하 변동

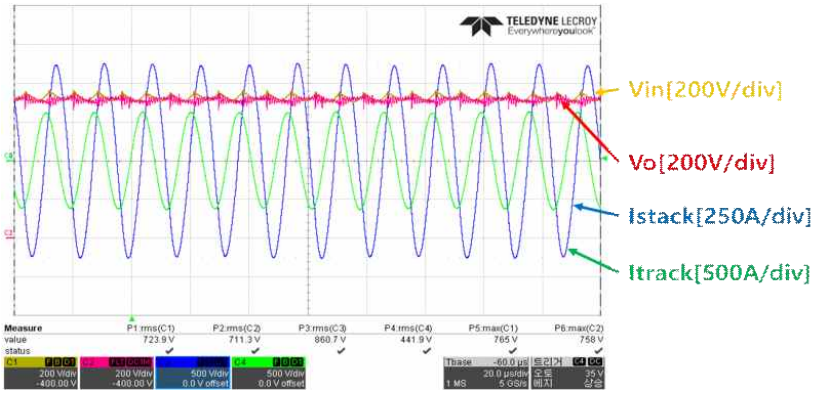


그림 247 1MW 시험 파형

- 위 그림은 전부하 시 집전 출력전압(C2), 인버터 입력전압(C1), 인버터 스텍 전류(C3), 그리고 트랙 전류를 나타낸다.

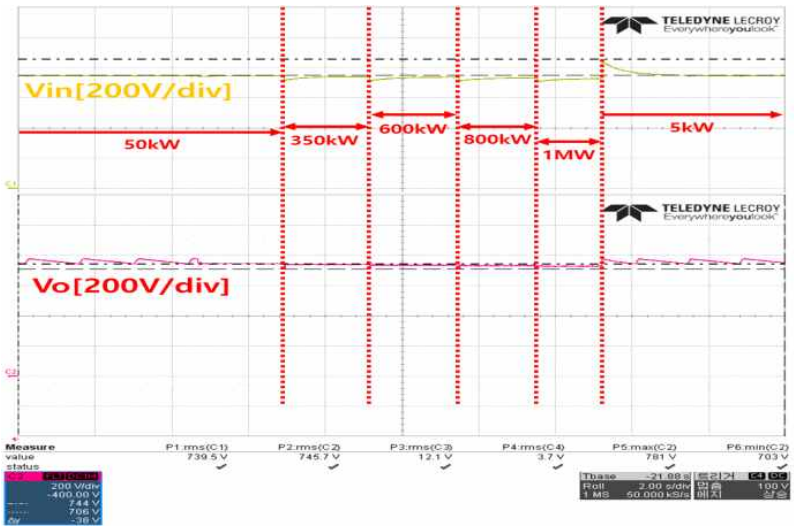


그림 248 부하 변동 시 입출력 전압 파형

- 1MW에서 무부하로 급변할 때 입력전압은 최대 108V증가하고 출력전압은 30V 증가로 안정적인 것을 확인할 수 있다.



그림 249 1MW시 출력 전압전류

- 위 그림은 전부하 시험 시 인버터 입력전류, 그리고 입력 전압으로 그 계산값은

1MW이상임을 확인할 수 있다.

○ 효율시험(경산 시험선 통합 효율)

- KTL인증 시험을 통해 효율 측정을 하였고 (급전인버터 + 집전시스템) 이는 위 단위 모듈 전력용량 시험을 참고 하기 바람.
- 아래 그림은 효율 시험의 경우 전력을 6단계로 나누어 각 전력의 효율을 측정하였다.
- 아래 그림은 효율 시험 시 전력 변경 별 입출력 전압 파형이다. 이는 인증기관인 KTL을 통해 인증을 완료 하였다.

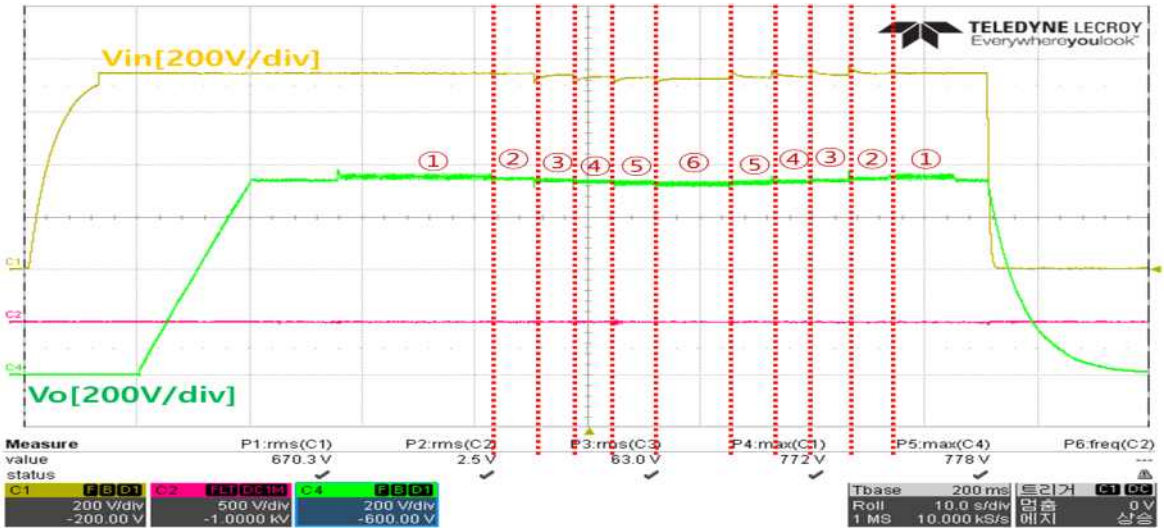


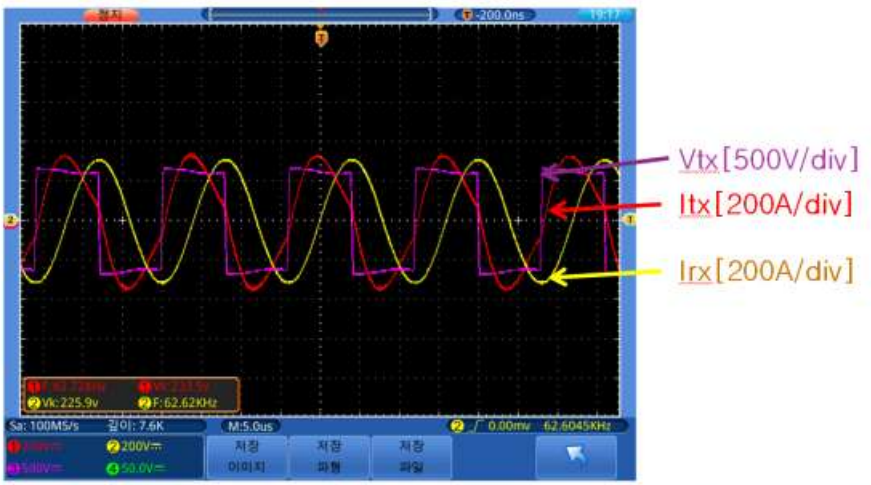
그림 250 부하 변화량에 따른 입출력 전압 변동률

표 49 부하변동에 따른 효율 측정

구분	부하	측정항목	측정치
①	5.5kW	입력전력[kW]	72.814
		출력전력 [kW]	6.14
		효율[%]	8.4
②	55.5kW	입력전력[kW]	122.43
		출력전력 [kW]	55.799
		효율[%]	45.6
③	355.5kW	입력전력[kW]	439.989
		출력전력 [kW]	367.627
		효율[%]	83.6
④	605.5kW	입력전력[kW]	719.556
		출력전력 [kW]	630.48
		효율[%]	87.6
⑤	805.5kW	입력전력[kW]	916.020
		출력전력 [kW]	825.016
		효율[%]	90.1
⑥	1005.5kW	입력전력[kW]	1,170.708
		출력전력 [kW]	1,017.620
		효율[%]	86.9

○ 동작 주파수

- 동작 주파수의 경우 실제 집전판에 흐르는 전류를 측정하여 파형 측정기를 통하여 집전파에 흐르는 전류의 주파수를 통하여 검증하였다. 다음 그림은 실제 집전판의 전류 파형이다. 파형측정기를 통하여 주파수는 62.6kHz임을 확인하였다.



Fsw	Itx_rms	Irx_rms	Vdc_out	P_out
62.625 [kHz]	450 [A]	467 [A]	621 [V]	251.5 [kW]

그림 251 스위칭 주파수 측정

- 그림과 같이 집전판의 흐르는 전류의 1주기는 16.4us임으로 주파수는 62.6kHz로 동작하는 것을 확인하였다.

○ 단위 모듈 무게

- 집전코일의 무게는 실제 무게를 측정하였다.



그림 252 인증 저울 측정

- 위 그림은 인증기관에서 실제 측정한 무게로 109.2kg을 확인 할 수 있으며 이는 인증기관을 통해 확인 되었다. 정량적 목표인 300kg이내 에 만족하는 것을 확인 할 수 있다.
- 정류기의 무게를 실제 측정을 하였다. 측정된 무게는 94kg으로 정량적 목표인

200kg이내 에 만족하는 것을 확인 할 수 있다.



그림 253 실제 측정 무게

- 이는 실제 인증기관을 통해 그 값을 확인하여 정량적 목표에 만족 함을 확인하였다

○ 크기

- 집전판의 크기는 아래 그림과 같다.

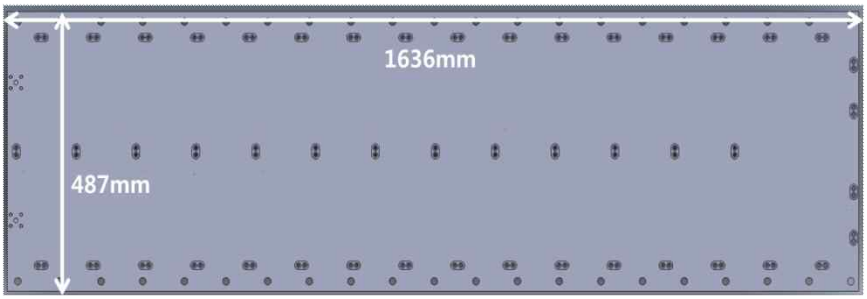


그림 254 집전판 가로, 세로 크기 사이즈



그림 255 집전판 높이 사이즈

- 가로 사이즈는 487mm, 높이 65mm, 세로는 1636mm이다.
- 크기는 도면상의 크기와 그림과 같이 실제 측정하여 확인을 하였다. 먼저 도면을 보면 실제 크기는 가로 *세로 * 높이로 전체 면적은 0.05m^3으로 목표치 0.3m^3에 만족하는 것을 확인할 수 있다.



그림 256 실제 측정 사이즈

- 크기는 KTL 인증을 진행 하여 인증 완료 하였음.\
- 무선 집전 시스템의 정류기 사이즈는 아래 그림과 같다.

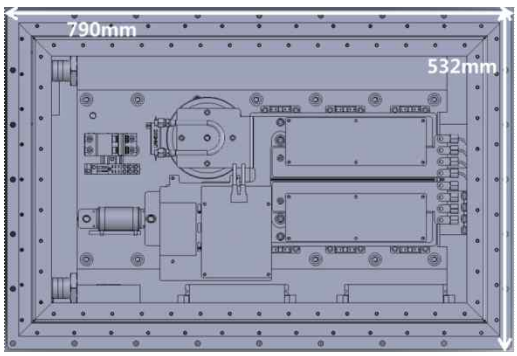


그림 257 집전 정류기 가로 세로 사이즈



그림 258 집전 정류기 높이 사이즈

- 무전 급전 정류기의 크기는 가로 532mm, 높이 343.5mm, 길이 790mm이다. 그리하여 면적은 0.144m^3으로 성과 점검기준인 0.65m^3을 만족한다.



그림 259 실제 측정 사이즈

- 위 사진은 실제 인증기관을 통해 그 크기를 확인한 사진이다. 실제 측정하여 정량적 목표에 그 크기가 만족 함을 알 수 있었다.

○ EMF

- 무선급전 집전장치 구성 및 시험은 국내 철도기준 EMF수치를 만족해야 한다. 1.2MW 대용량 무선급전 충전을 위해 급전 트랙에 흐르는 전류는 최대 500A이상이고, 집전판에 흐르는 전류는 약 460A정도 된다. 이 상황에서 발생하는 EMF는 철

도뿐만 아니라 주변의 통신 시스템 그리고 사람에게도 큰 영향을 미칠 수 있다. 다음 시뮬레이션 결과는 급전 트랙에 흐르는 전류가 500A일 때와 집전판에 흐르는 전류는 460A일 때를 나누어서 시뮬레이션 하였다. EMF 시뮬레이션 측정을 위해 ANSYS MAXWELL 툴을 사용하였다.

- 아래 그림은 실제 급전 트랙과 집전판을 시뮬레이션으로 구현해 놓은 것이다. EMF의 크기는 트랙에 흐르는 전류에 의해서 결정 되기 때문에 실제 크기가 아닌 비율 축소하여 아래 그림과 같이 구현하였으며, 트랙에 흐르는 전류는 실제 시스템과 같이 급전 트랙 500A, 집전판 460A로 설정하였다. 아래 그림은 모델링된 무선 급전 시스템의 시뮬레이션 결과이다. 트랙전류를 500A로 설정하고 집전판은 0A로 설정하여 트랙에서 집전판으로 파워가 넘어갈 때의 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 급전 트랙과 집전판을 기준으로 원형으로 자속이 형성되는 것을 확인 할 수 있다.

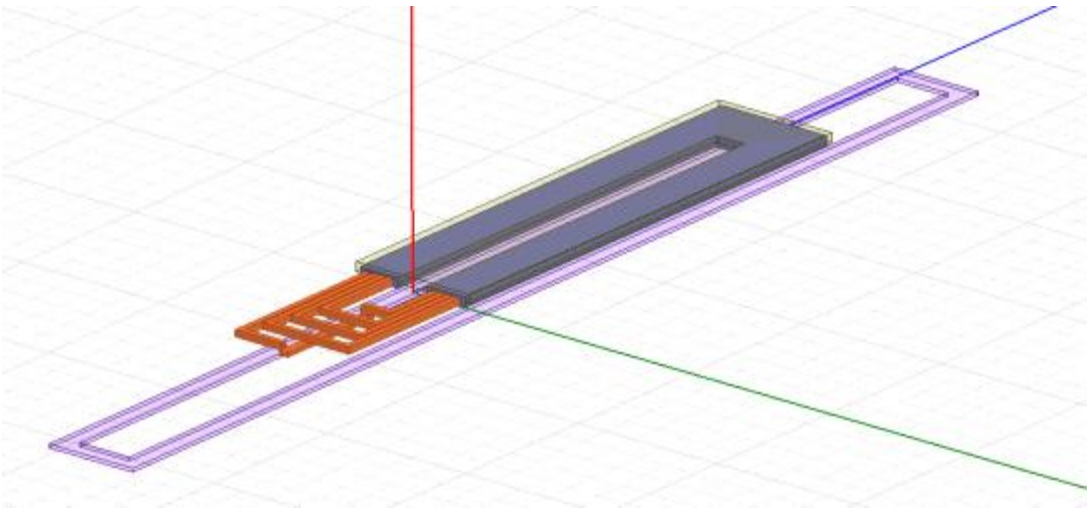


그림 260 무선 급전 시스템 시뮬레이션 모델

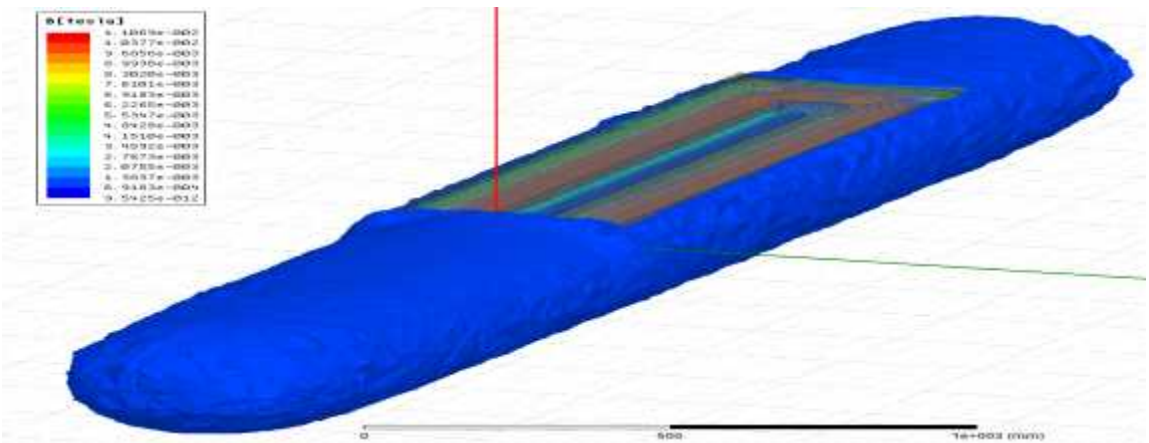


그림 261 무선 급전 시스템 시뮬레이션 결과 (급전트랙 500A)

- 위 그림은 시뮬레이션 결과를 단면으로 나타낸 그림이다. 작은 네모 하나당 20mm를 나타내고 급전 트랙을 기준으로 큰 원형의 자속이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 급전 트랙의 중심점을 기준으로 9 nTesla까지의 거리는 약 280mm이고 트랙 끝부분에서 9 nTesla까지의 거리는 120mm이다. 또한 급전 트랙에 500A의 전류가

흐를 때, 급전 트랙 끝부분을 기준으로 약 70mm까지는 4.15 uTesla로 상당히 높은 자속이 형성 되는 것을 확인 할 수 있다.
집전판의 경우에 급전 트랙에 의해서 유도된 파워가 집전 코일에 전류를 흐르게 하고, 그로 인해 생기는 자속의 범위가 9 nTesla까지 약 60mm이다.

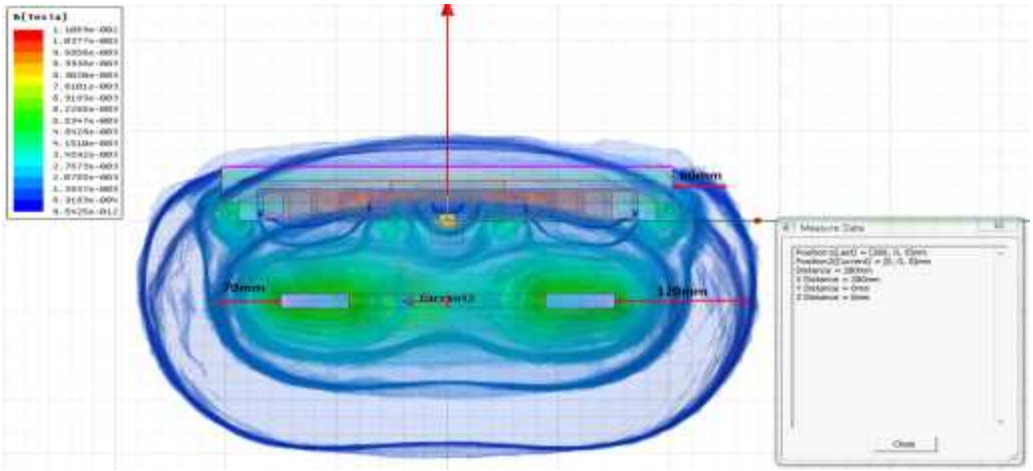


그림 262 무선 급전 시스템 시뮬레이션 결과 (급전트랙 500A 단면도)

- 아래 그름은 모델링 된 무선 급전 시스템의 시뮬레이션 결과이다. 급전 트랙전류를 0A로 설정하고 집전판은 460A로 설정하여 트랙에서 집전판으로 파워가 넘어갈 때의 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 집전코일에만 전류를 흐르게 한 이유는 급전에 의해서 발생하는 자속의 영향을 제외하고 집전판이 차량에 장착되었을 때의 시뮬레이션 결과만 나타내기 위한 것이다. 사실상 경전철 무전급전 시스템의 경우 사람에게 미치는 EMF의 영향은 급전 트랙보다는 집전에 의해서 더 영향을 받는다. 그 이유는 집전판이 차량에 붙어 있기 때문에 Platform에 서있는 사람과 수평 구조로 되어 있고, 차량 바로 아래에 장착되어 있기 때문이다.

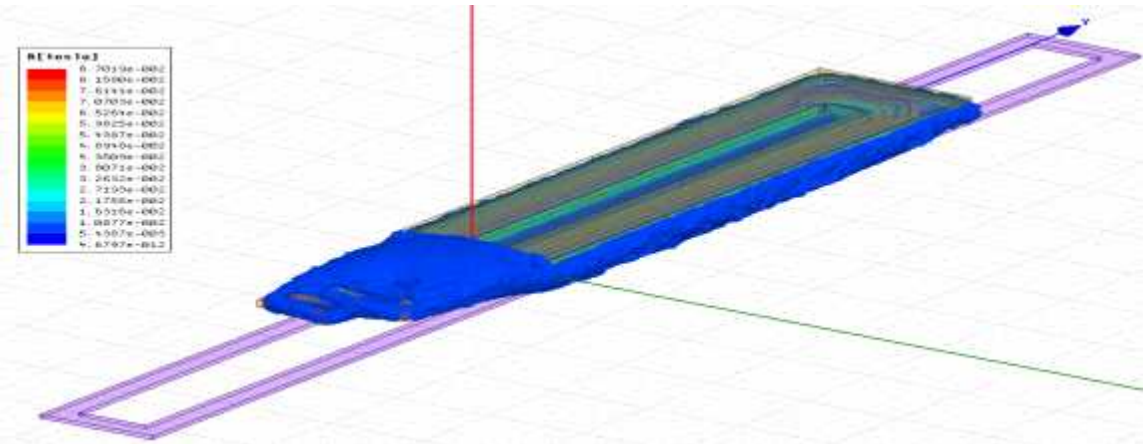


그림 263 무선 급전 시스템 시뮬레이션 결과 (집전코일 460A)

- 아래 그림은 시뮬레이션 결과를 단면으로 나타낸 그림이다. 작은 네모 하나당 20mm를 나타내고 집전판을 기준으로 큰 원형의 자속이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 급전 트랙의 중심점을 기준으로 4.57 nTesla까지의 거리는 약 240mm이고 집

전판 양쪽 끝부분에서 4.57 nTesla 까지의 거리는 40mm이다. 또한, 집전코일에 460A의 전류가 흐를 때, 집전판 위로 약 50mm의 구간은 거의 자속이 없는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 집전 코일 위에 알루미늄으로 차폐가 되어 있기 때문에 집전판 위는 자속의 영향을 거의 받지 않고, 또한 차량 장착 시에도 탑승자에게 EMF영향을 거의 미치지 않는 것을 확인 할 수 있다. 집전판의 경우에 자속의 영향이 가장 큰 부분은 집전코일이 집전판에서 나오는 부분에서 가장 크게 발생한다. 경전철은 EMF 규정이 정해지지 않아 버스 규정(200mm 거리에서 6.25uTesla)을 기준으로 한다면 무선 급전 시스템의 EMF는 급전 트랙 500A, 집전 코일 0A 시 70mm 거리에서 4.15uTesla, 급전 트랙 0A, 집전 코일 460A 시 40m 거리에서 4.57nTesla 이기 때문에 버스 규정 기준으로는 문제 없음을 확인 할 수 있다.

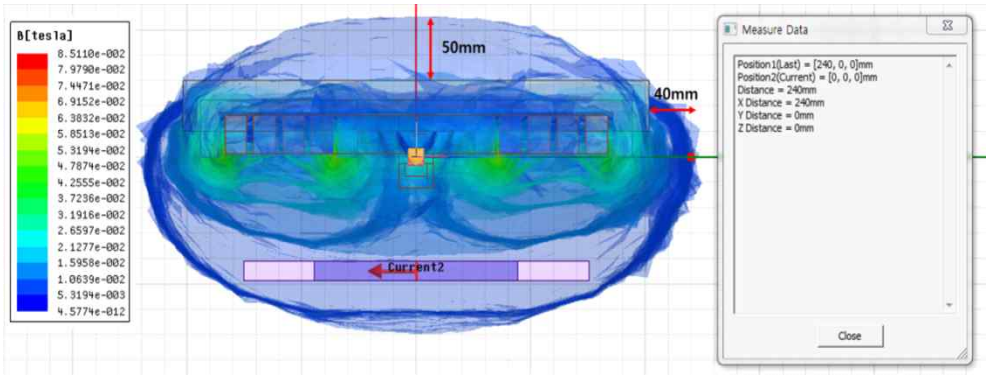


그림 264 무선 급전 시스템

- 아래 그림은 실제 경산 시험선상에서 EMF를 측정한 위치를 표시 하고 있다.

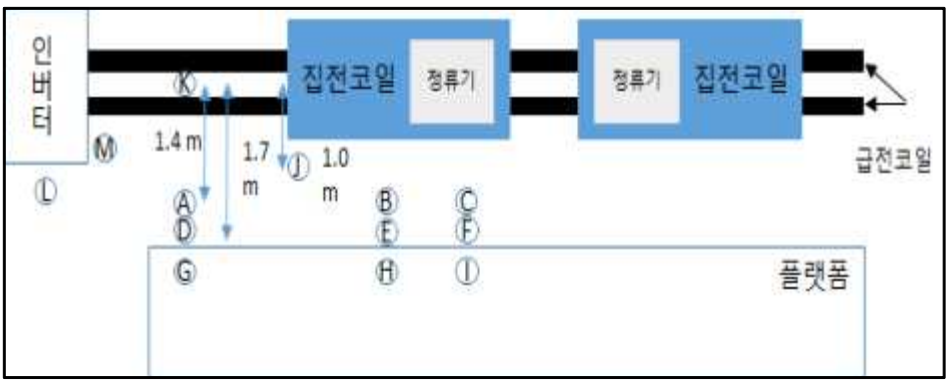


그림 265 경산 시험선 EMF측정 방법

- 아래 표는 실제 경산 시험선에서 1MW, 급전선로 500Arms인가 시 실제로 측정한 자료 이다.

표 50 차량외부(A,B,C)에서의 자기장 세기 측정 결과

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
급전코일 만 있는 지점의 중심으로부터 1.4 m 떨어진 지점 (A)	7.186	5.212	3.019	5.139
집전코일 중심으로부터 1.4 m 떨어진 지점 (B)	12.593	9.361	4.736	8.897
정류기 중심으로부터 1.4 m 떨어진지점 (C)	11.915	9.599	5.058	8.857

차량외부(측정지점 A, B, C)에서의 자기장 세기 측정결과

표 51 차량외부(D,E,F)에서의 자기장 세기 측정 결과

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
급전코일 만 있는 지점의 중심으로부터 1.7 m 떨어진 지점 (D)	5.670	4.206	2.371	4.083
집전코일 중심으로부터 1.7 m 떨어진 지점 (E)	11.681	9.095	3.144	7.973
정류기 중심으로부터 1.7 m 떨어진지점 (F)	10.302	9.301	3.738	7.780

차량외부(측정지점 D, E, F)에서의 자기장 세기 측정결과

표 52 플랫폼(G,H,I)에서의 자기장 세기 측정 결과

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
급전코일만 위치한 지점의 플랫폼 에지로부터 0.2 m 떨어진 지점(G)	1.911	1.492	1.142	1.515
정류기가위치한 지점의 플랫폼 에지로 부터 0.2 m 떨어진 지점 (H)	3.216	2.433	1.036	2.228
집전코일이 위치한 지점의 플랫폼 에지로부터 0.2 m 떨어진지점 (I)	2.724	1.997	1.537	2.086

플랫폼(측정지점 G, H, I)에서의 자기장 세기 측정결과

- 차량 외부에서 일반인 기준치(ICNIRP 1998 Guidelines)를 초과하나 직업인 기준치

를 만족함

표 53 차량외부(J,K)에서의 자기장 세기 측정 결과

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
차량 내부 출입문 지점으로부터 0.2 m 안쪽 떨어진 지점 (J)	5.871	3.171	2.006	3.683
전철 통로 예상지점 (K)	4.555	2.206	1.402	2.721

차량내부(측정지점 J, K)에서의 자기장 세기 측정결과

- 위 계측된 값들은 성과지표 단품 형식 시험상의 규격인 B-field 27 [uT]보다 그 값이 현저히 낮음을 확인할 수 있다.

표 54 ICNRP Guidelines EMF 규격

참고 규격	시험 방법	판정기준
-	Non-Uniform Magnetic Field 3점 측정에 의한 산술 평균값이 Reference Level을 초과하지 않아야 함 (인버터 패널에서 에서 200mm 떨어진 후 인버터 패널부터 500mm,1000mm,1500mm에서 측정) B-field [μT] 27 H-field [A/m] 21 E-field [V/m] 83	ICNIRP Guidelines 2010

○ 실시간 공진 튜닝

- 실시간 공진 튜닝 시험의 경우 아래 그림과 같이 집전장치의 공진주파수를 변경시킬 스위치와 변경된 공진 주파수를 보상해주는 보상용 스위치로 구성되어있다.



그림 266 실시간 공진 튜닝 시험장치

- 먼저 아래 그림과 같이 집전장치에 250kW를 인가한다.

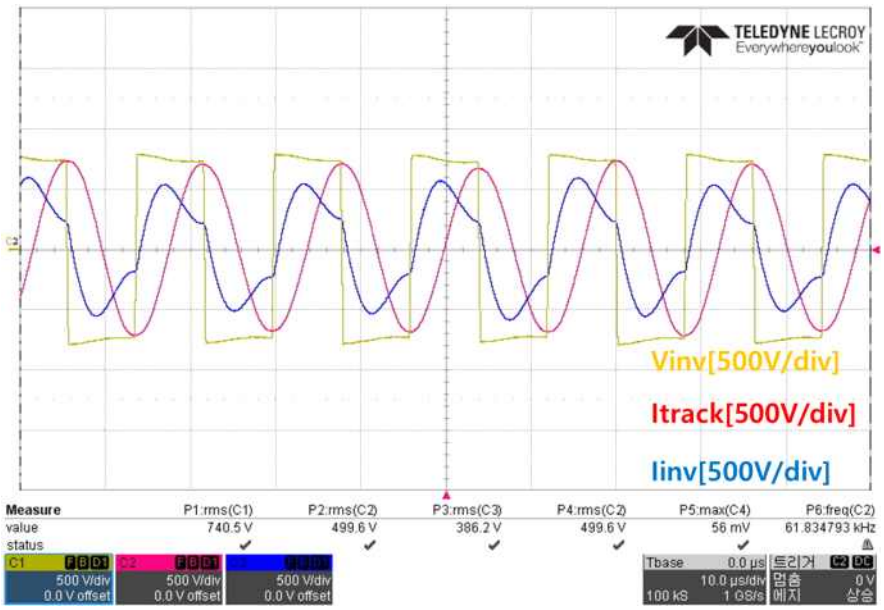


그림 267 250kW 인가시 시험 파형

- 250kW를 투입 후 공진 주파수 변경 스위치를 통하여 집전 시스템의 공진 주파수를 변경시켜 전력인 감소되는 것을 확인한다.

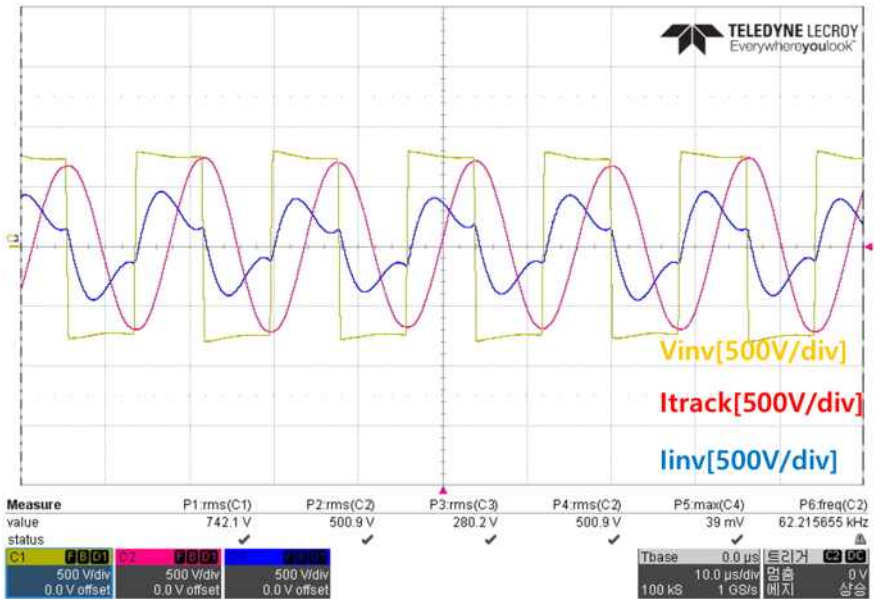


그림 268 공진 변경장치 구동

- 마지막으로 실시간 공진 튜닝 장치를 활용하여 다시 250kW가 인가되는 것을 확인한다.
- 실시간 공진 튜닝은 KTL 인증을 완료 했다.

○ 정전압제어 장치 제작

- 단품 모듈 정류기 제작은 아래 그림과 같이 제작 되었다.



그림 269 단품 정류기 및 집전 시스템 이미지

- 구성으로는 집전 정류기가 있으며, 하단부에는 집전 공진 커패시터가 있다. 수냉 방식으로 구성 되어 있으며, 정류기 방열판과 공진커패시터는 수냉구조로 설계 제작 되었다.

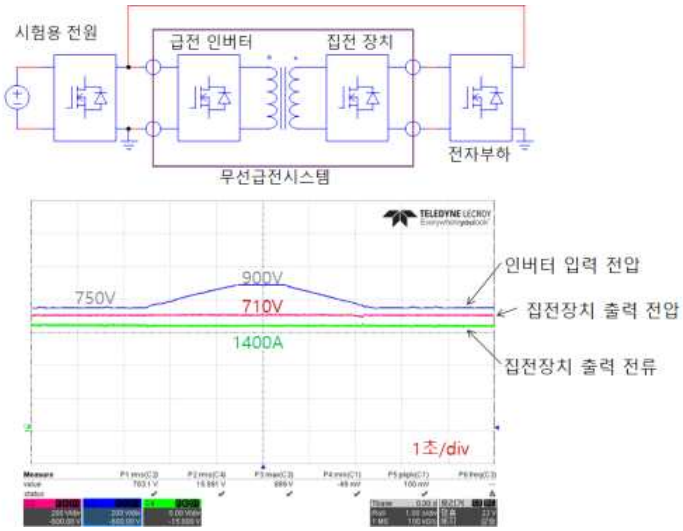


그림 270 전압 변동 시험(750V->900V->750V)

- 위 그림은 전압 변동 시험의 회로 구성도 및 시험시 파형을 나타내고 있다. 인버터 패널의 입력 전압 변동(750V->900V->750V) 시 집전장치의 출력 전압은 정전압 제어 되고 전류는 1400A로 제어 되는 것을 확인 할 수 있다.

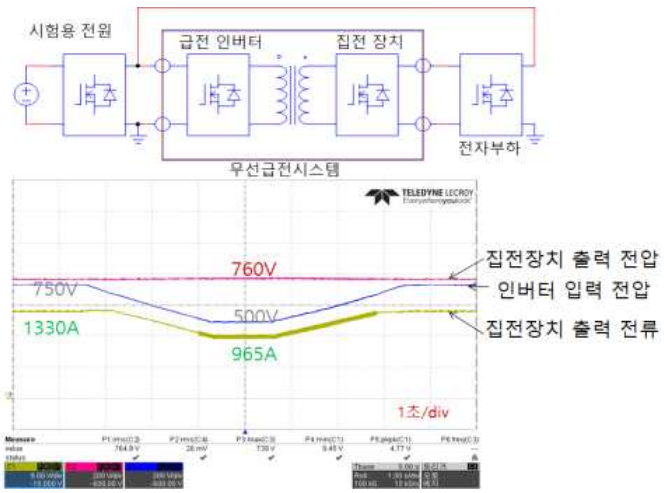


그림 271 전압변동 시험(750V->500V->750V)

- 위 그림은 전압 변동 시험의 회로 구성도 및 시험시 파형을 나타내고 있다. 인버터 패널의 입력 전압 변동(750V->500V->750V) 시 집전장치의 출력 전압이 760V로 정전압 제어 되는 것을 확인 할 수 있다.

라) 무선급전 경전철 집전시스템 신뢰성시험

○ 정적신뢰성(4만km이상) 시험 보고서

- 정적 신뢰성 검증은 운전 시작일인 2018년 10월 31일을 시작으로 2018년 12월 06일 오전까지 중간 누적시간으로 검증하였으며 운행 프로파일 카운터 확인 시 총 16,935회를 왕복한것으로 확인 되었으며 환산 시 1회 왕복 2.46km 이므로 16,935 * 2.46km를 수치로 반영하면 41,660km 주행시간이 환산된다.

○ 집전시스템 경전철 하부 설치

- 5차년도 시작 시 4차년도에 진행되었던 정특성 시험 현장(경산시험선)을 분해하고 집전시스템을 재 정비 후 우진산전(오창)에서 무선급전경전철 하부에 집전 시스템을 설치 하였다. 설치 완료 후 통신 Test, 냉각수 순환 Test, 제어전원 확인 및 통신 다운로드 가능 여부등을 확인하여 제품 신뢰성 확인을 진행 하였다.



그림 272 집전시스템 경전철 하부 장착 모습

○ 5차년도 동적 신뢰성 시험 완료(4만km)

- 인버터 패널 현장 설치 및 통신 작업



<인버터 5호 A역 설치> <A역사 통신 설정 작업> <인버터 1호 B역 설치><집전시스템 충전 시험>

그림 273 경산 시험선 인버터 패널 설치 및 통신 시험 진행

- 5차년도의 정량적 목표를 달성하기 위하여 경산 시험선 역사(A역, B역, C역, B-1역)에 급전 인버터 패널을 설치 완료 하였다.
- 각 역사별 인버터 패널을 설치 후 급전 선로 무부하 Test를 실시 하여 급전 인버

터의 성능 및 급전 선로의 신뢰성 시험을 진행 하였고 동적 특성 시험 준비를 시작 하였음.

- 4만 km 운전은 완료 되었으며 이 때 발생 되었던 유지 보수 결과를 토대로 집전 시스템에 적용 예정임.
- 위 그림은 실제 운전중인 무선급전 경전철 이미지다.

○ 신뢰성 개선을 위한 향후 계획

- 5차년도 4만km 동적시운전 진행 시 전체 집전 시스템 중 1가지 항목의 Fault가 발생 하였음
- 횟수는 총 5회로 집전 정류기 내부에 설치 되어 있는 냉각수 누수감지 센서가 동작함.
- 실제로 냉각수가 누수된 경우는 2회고 나머지 3회는 기온차에 따른 결로 발생에 의한 응축수에 의해 발생한 것으로 확인됨.
- 추후 시스템 제작 시 정량적 목표의 사이즈 이내(최대한 작은 사이즈로)에 만족하는 동시에 내부에 온도에 따라 동작하는 Space-heater, 혹은 내부 순환 냉각팬을 설치하여 결로에 의한 냉각수 누수감지 센서의 동작을 미연에 방지 할 수 있도록 개선 할 예정임.
- 집전시스템의 공간확보는 추후 경전철 설계 시 반영하여 설계토록 한다.
- 1MW 급 무선급전시스템은 차량에 4개의 픽업모듈로 구성되어 있어 1개 고장시 나머지 3개 시스템이 4개의 용량이 구성되도록 설계가 가능함.
- 향후 무선급전시스템은 효율 92% 이상, 공극 10mm 이상으로 시스템을 고도화 하여 실용화시 차량 인터페이스에 문제가 없도록 추진예정임.

○ 인증 시험 진행

- 3차년도 공인 인증 시험은 한국산업기술 시험원에서 아래와 같이 진행 되었다.

표 55 무선급전시스템(인버터, 집전장치) 시험수행 현황

번호	검사항목	현황	비고
3.1	구조 검사	수행완료(06/18)	
3.2	절연저항 시험	수행완료(06/21)	
3.3	내전압 시험	수행완료(06/21)	
3.4	집전코일 특성 시험	수행완료(06/18)	
3.5	보호검출 기능 시험	수행완료(06/21)	
3.6	반도체소자 구동 시험	수행완료(06/20)	
3.7	입력 전원 중단 시험	수행완료(08/14)	
3.8	기동 정지& 동작주파수, 트랙전류시험	수행완료(06/20)	
3.9	센서배율 시험	수행완료(06/19)	
3.10	전력용량 및 인버터-집전장치 종합 효율 시험	수행완료(06/19)	
3.11	온도상승 및 누수 시험	수행완료(06/28)	
3.12	실시간 공진 튜닝 시험	수행완료(06/28)	
3.13	EMF 측정 시험	(외주)	
3.14	전자파 적합성 시험	(외주)	
3.15	보호 등급 시험	(외주)	
3.16	진동 및 충격시험	(외주)	
3.17	환경 시험	(외주)	
3.18	소음 시험	수행완료(06/21)	
3.19	부하급변시험	수행완료(08/22)	

◎ 수행완료 : 사내시험으로 진행하여 완료된 시험을 말함

◎ 외주 : 공인시험기관으로 시험품을 반입하여 수행하는 시험을 말함

○ 부하 고장 시 안정화 방안

- 시스템의 고장 시 안정화를 위하여 집전 시스템을 기존 4set에서 1set를 추가적으로 설치 한다. 시스템의 출력은 차단기를 설치하여 출력단 이후의 연결을 차단한다.
- 추가로 설치된 1set의 출력 차단기를 부하와 연결하여 고장 난 집전시스템의 대체로 사용한다.
- 유지보수 기간에 고장 난 집전시스템 1set를 수리 완료하여 추후 Spare part로 활용한다.
- 집전시스템의 공간확보는 추후 경전철 설계 시 반영하여 설계토록 한다.

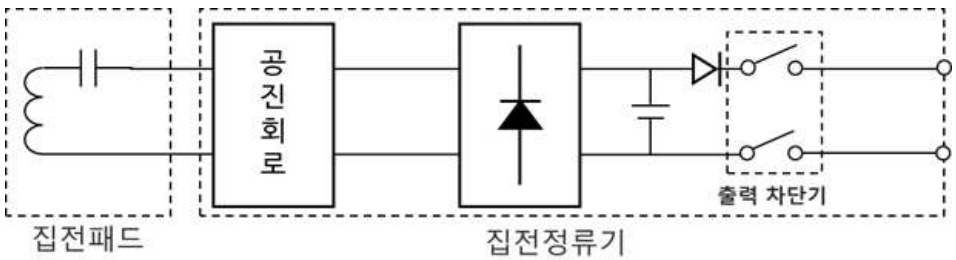
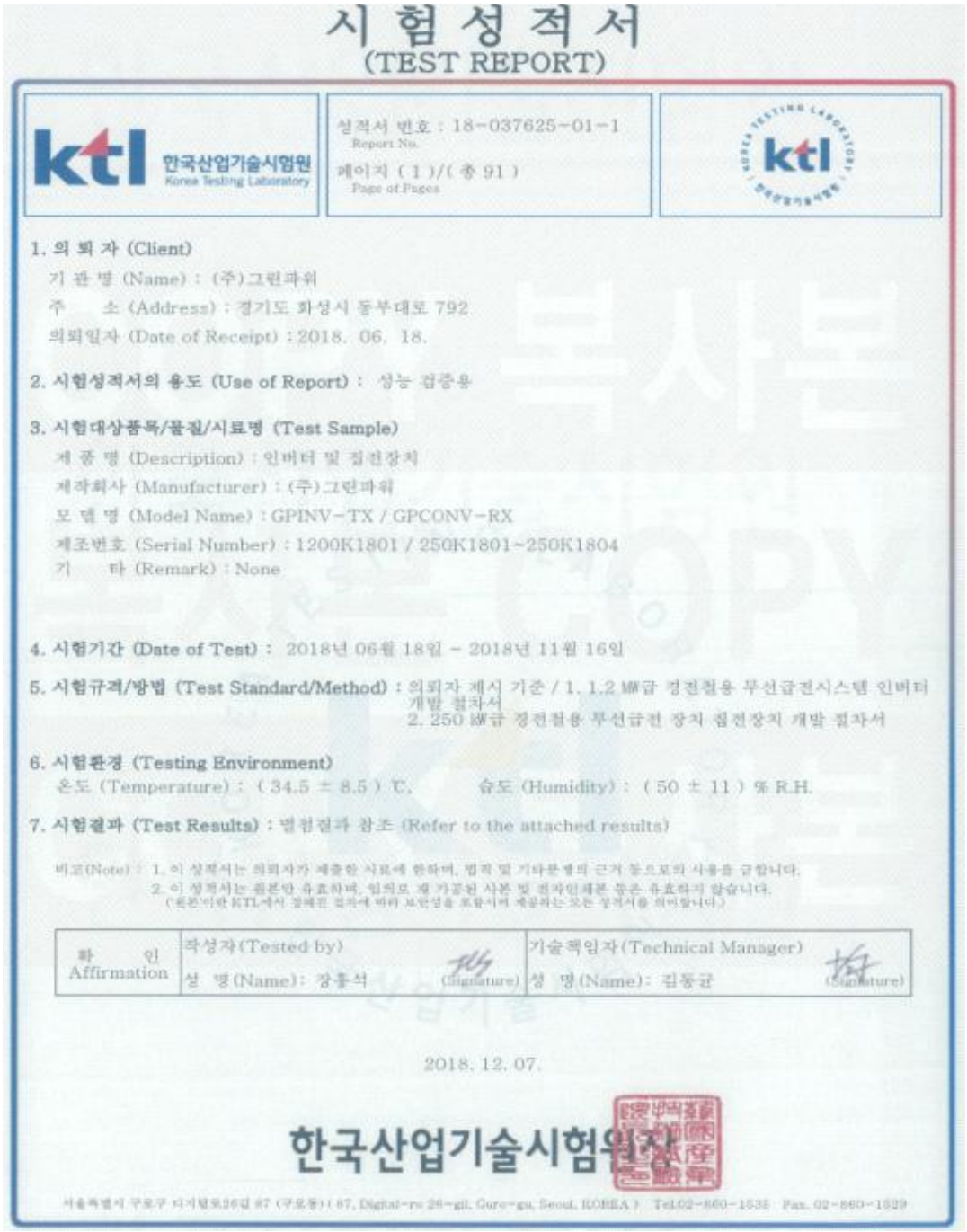


그림 274 출력차단기가 추가된 집전 시스템 회로도



시 험 성 적 서
(TEST REPORT)

ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 18-037625-01-1
Report No.
페이지 (1)/(총 91)
Page of Pages

KOREA TESTING LABORATORY ktl

1. 의 뢰 자 (Client)

기 관 명 (Name) : (주)그린파워
주 소 (Address) : 경기도 화성시 동부대로 792
의뢰일자 (Date of Receipt) : 2018. 06. 18.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : 성능 검증용

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)

제 품 명 (Description) : 인버터 및 집전장치
제작회사 (Manufacturer) : (주)그린파워
모 델 명 (Model Name) : GPINV-TX / GPCONV-RX
제조번호 (Serial Number) : 1200K1801 / 250K1801~250K1804
기 타 (Remark) : None

4. 시험기간 (Date of Test) : 2018년 06월 18일 ~ 2018년 11월 16일

5. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 의뢰자 제시 기준 / 1. 1.2 ㎿급 경전철용 무선급전시스템 인버터 개발 절차서
2. 250 ㎾급 경전철용 무선급전 장치 집전장치 개발 절차서

6. 시험환경 (Testing Environment)

온도 (Temperature) : (34.5 ± 8.5) ℃, 습도 (Humidity) : (50 ± 11) % R.H.

7. 시험결과 (Test Results) : 별첨결과 참조 (Refer to the attached results)

비고(Note) : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제출한 시료에 한하며, 법적 및 기타분쟁의 근거 등으로의 사용을 금합니다.
2. 이 성적서는 원본만 유효하며, 임의로 재 가공된 사본 및 전자인쇄본 등은 유효하지 않습니다.
(원본이란 KTL에서 발행된 성적에 따라 보안성을 포함시켜 제공하는 모든 성적서를 의미합니다.)

확 인 Affirmation	작성자(Tested by)	기술책임자(Technical Manager)
	성 명(Name): 장홍석 (Signature)	성 명(Name): 김동균 (Signature)

2018. 12. 07.

한국산업기술시험원장

서울특별시 구로구 디지털로26길 87 (구로동) (87, Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul, KOREA) Tel.02-860-1535 Fax. 02-860-1529

그림 275 인증 시험 성적서(급전인버터 & 집전시스템)

마) 트램 적용용 급전패드, 집전 패드 개발

○ 신규 트램 적용용 급전패드, 집전 패드 개발

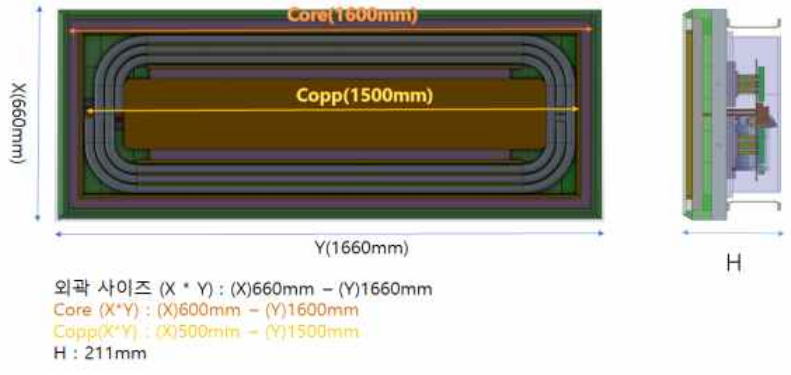


그림 276 트램 적용 급전 패드 설계

- 위 그림은 트램 적용용 급전 패드 설계 이미지이다. 외곽 사이즈는 660mm*1666mm*211mm 이다. 공진 커패시터, 그리고 급전 선로로 구성되어 있으며 급전 선로 케이블은 수냉방식으로 구성되어 있다. 동작 주파수는 60kHz이다.

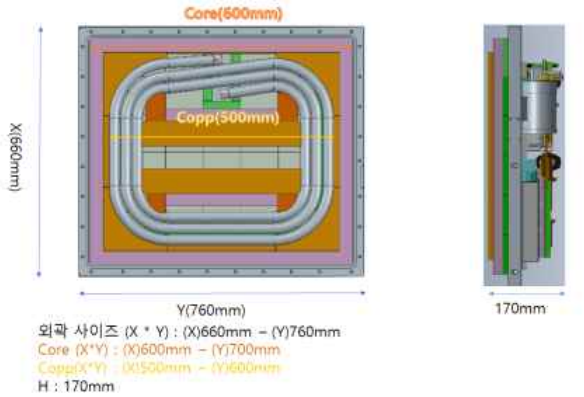


그림 277 트램 적용 집전 패드

- 위 그림은 트램 적용용 집전패드 설계 이미지이다, 외곽 사이즈는 660mm*770mm*170mm 이다. 공진커패시터, 집전케이블로 구성되어 있으며 출력에는 정류부가 있어 DC로 전력을 공급할 수 있다.

○ 트램 적용용 급전& 집전 패드 신뢰성 시험(300kW 전력순환방식)

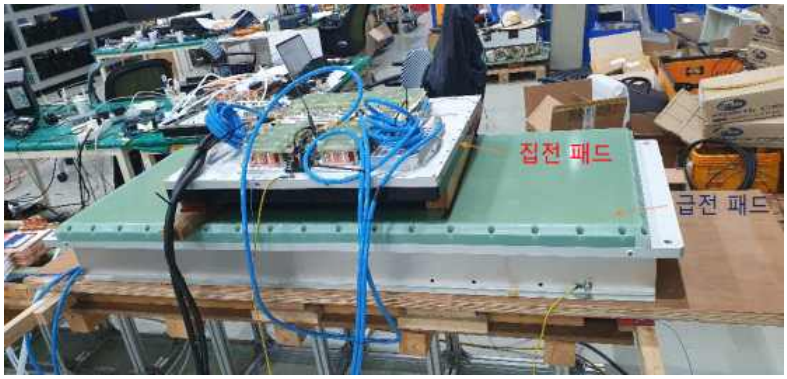


그림 278 급전패드 & 집전패드 전력순환 시험 이미지

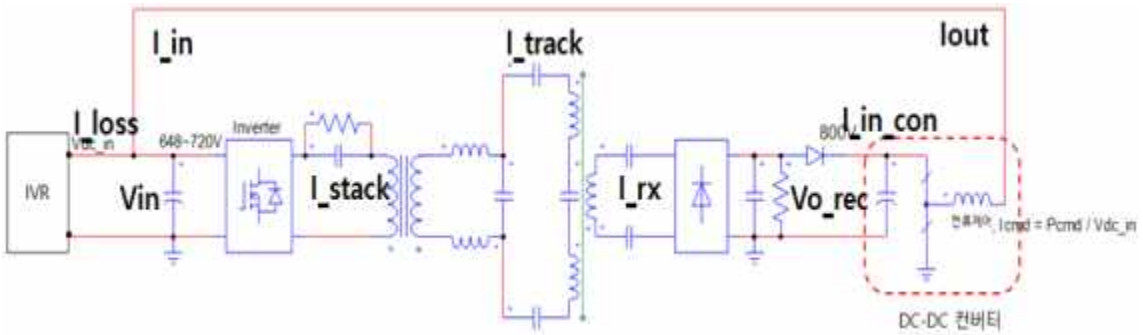


그림 279 전력순환방식을 이용한 집전시스템 신뢰성 시험 회로 구성도



I_in+I_loss
(404.5Adc)



Vin
(742Vdc)

Vin(dc)	I track(Arms)	Vo_rec(Vdc)	Irx(Arms)	I_inv (Arms)	I_loss(dc)	I_in(dc)	eff	I_in_con	Pin(W)
160	75	170	80	89	5.4	70.4	0.9288	72	12,128
212	100	227	122	119	8.8	117	0.93	109.8	266,69
309	150	333	182	207	10	176	0.9462	160	57,474
424	200	460	242	279	13	235	0.9476	215	105,152
528	250	567	299	345	17	295	0.9454	270	164,472
628	300	676	332	380	19	324	0.9438	298.8	215,592
737	350	794	333	380	20	324	0.9418	299.7	253,159
742	**350**	**794**	**389.1**	**442.5**	**24**	**381**	**0.9407**	**350**	**300,510**

그림 280 전력 순환 방식을 이용한 집전시스템 신뢰성 시험 데이터

- 위 그림은 AC 3상 입력을 이용, 정류기로 정류시켜 급전 인버터, 그리고 신규제작한 급전패드, 집전패드, DC-DC 컨버터등을 이용하여 전력순환방식으로 시험을 진행한 결과이다. 집전패드 정류기 출력부에 DC-DC 컨버터를 이용하여 정류기 출력전압을 강압시켜(794Vdc->742Vdc) 전력회생 방식으로 300kW Power Test를 진행하였다.
- 정류부 출력전압은 742Vdc, 전류는 404.5Adc로 입력 기준 전력은 300kW이다.

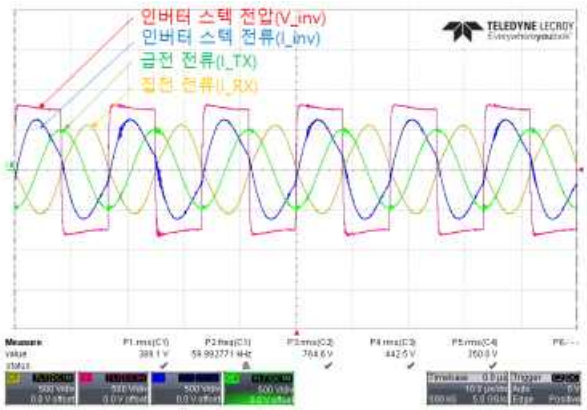


그림 281 전력 순환 시험 시 각부위별 파형

- 위 그림은 전력 순환방식으로 300kW 시험 시 각 부위별 파형이다. 인버터 스텍 출력 전압(V_inv, I_inv)은 746Vrms, 전류(I_Inv)는 442.5Arms, 급전 전류(I_TX)350.1Arms, 집전전류(I_RX) 389.1Arms이고 이 때 동작 주파수는 60kHz임을

파형으로 확인 할 수 있다.

○ 트램 적용용 급전&집전 패드를 이용한 Super Capacitor 충방전 시퀀스 Test

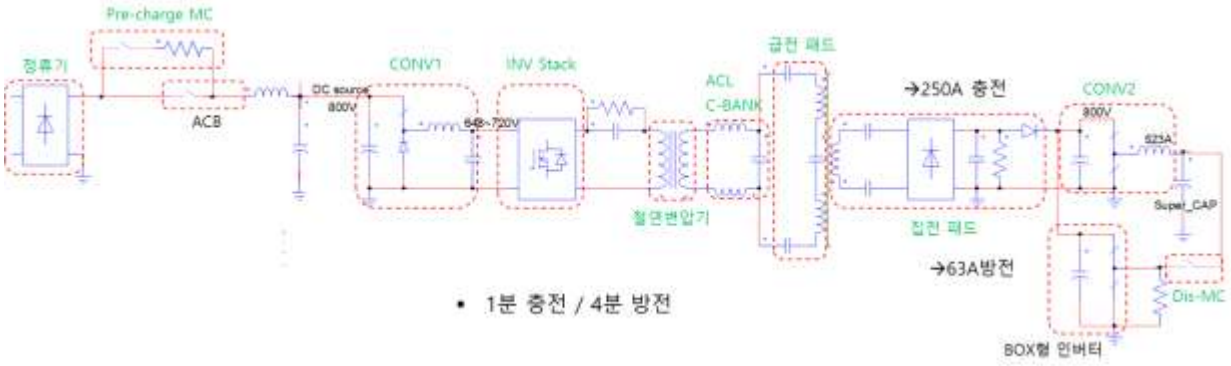


그림 282 트램용 무선급전을 활용한 Super Cap 충방전 시험 회로 구성

- 위 그림은 트램 적용용 급전&집전 패드를 이용한 Super Capacitor 충방전 시퀀스 Test 회로 구성도 이다. 신규 제작된 급전패드, 집전패드를 이용하여 Super capacitor의 충방전 시험을 위해 위 그림과 같이 구성하였다. 입력부는 3상을 인가받아 정류해 주는 정류부, 인버터 스택(INV Stack)의 입력전압을 제어해 주기 위한 DC-DC 컨버터(CONV1), 급전을 위한 급전패드, 집전을 위한 집전패드, 그리고 집전패드 출력부의 전압제어를 위한 DC-DC 컨버터(CONV2), 부하로 사용되는 Super Capacitor(Super_CAP)과 방전을 위한 BOX형 인버터, 그리고 저항 부하로 구성되어 있다.



그림 283 Super Capacitor bank 모듈 구성(10직 16병렬)

- 위 그림은 Super Capacitor를 실제 부하조건으로 구성하여 설계, 제작 하였다. 커패시터 모듈은 3000F Super capacitor를 36직렬로 제작 되었으며 이 커패시터 모듈을 이용하여 10직 16병렬을 구성하였다. 최대 전압은 900V를 충전할 수 있는 전압으로 구성하였으며 커패시턴스는 134F로 제작 하였다.

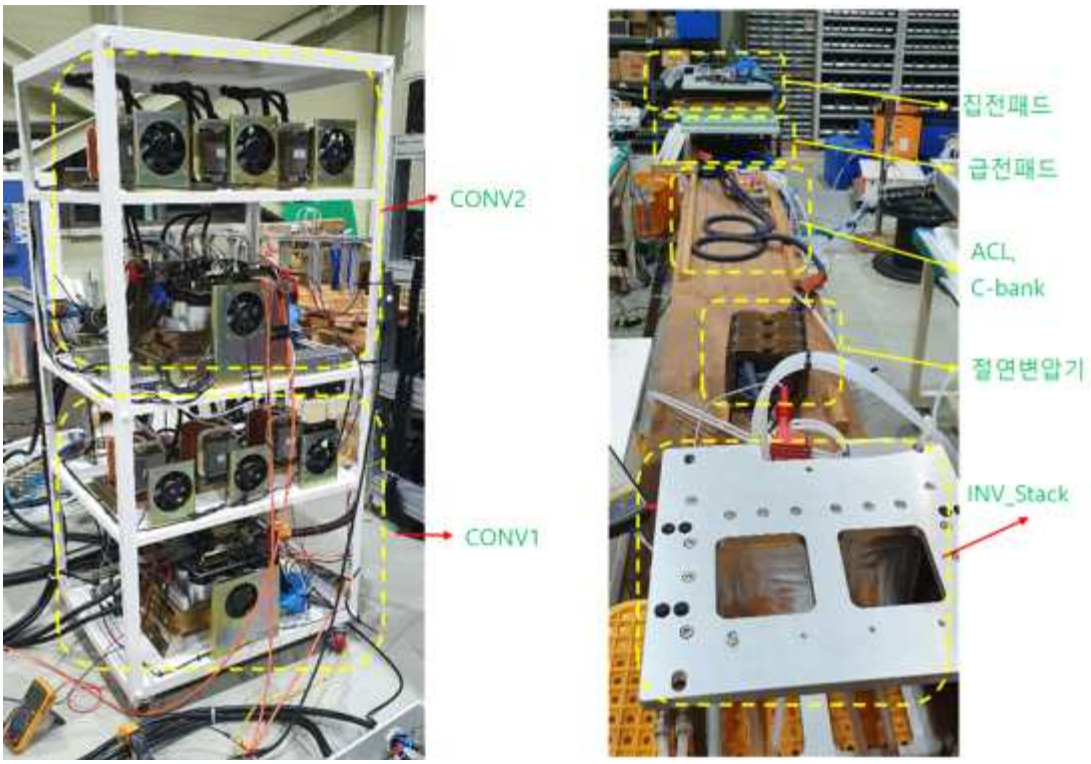


그림 284 CONV1,2 집전&급전패드 시험구성 이미지

- 위 그림 좌측은 인버터 스텍(INV_Stack)입력부 DC-DC컨버터(CONV1)와 집전패드 출력부의 DC-DC컨버터(CONV2)의 시험 구성 이미지다. 위 그림 우측은 인버터 스텍(INV_Stack)과 절연변압기 그리고 그 뒤로 AC리엑터(ACL) 그리고 병렬로 커패시터 뱅크(C_bank)가 연결되어 있으며 커패시터 뱅크(C_bank)와 병렬로 급전패드 그리고 위 우측사진은 급전패드 그리고 그 위에 집전패드가 설치되어 있는 시험 구성 사진이다. 집전패드의 출력은 DC-DC컨버터(CONV2)의 입력과 연결되어 있고 DC-DC컨버터(CONV2)의 출력은 Super Capacitor와 연결되어 충전, 그리고 방전을 하도록 구성 되어 있다. DC-DC컨버터(CONV2)의 입력부에는 BOX형 인버터가 저항(200kW급) 과 연결되어 방전 시 사용된다.

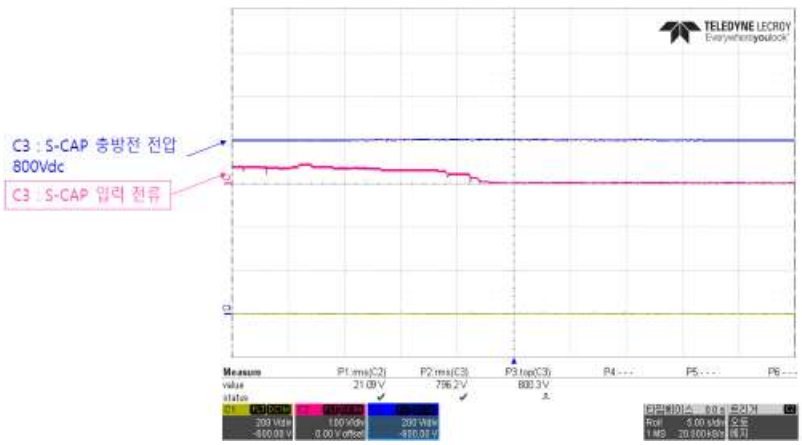


그림 285 Super capacitor 모의 충전 시험

- 위 그림은 슈퍼 커패시터의 안전성을 확인 하기 위해 800V충전 시험을 진행하였다, 800V 충전 시 이상이 없음을 확인하였다.

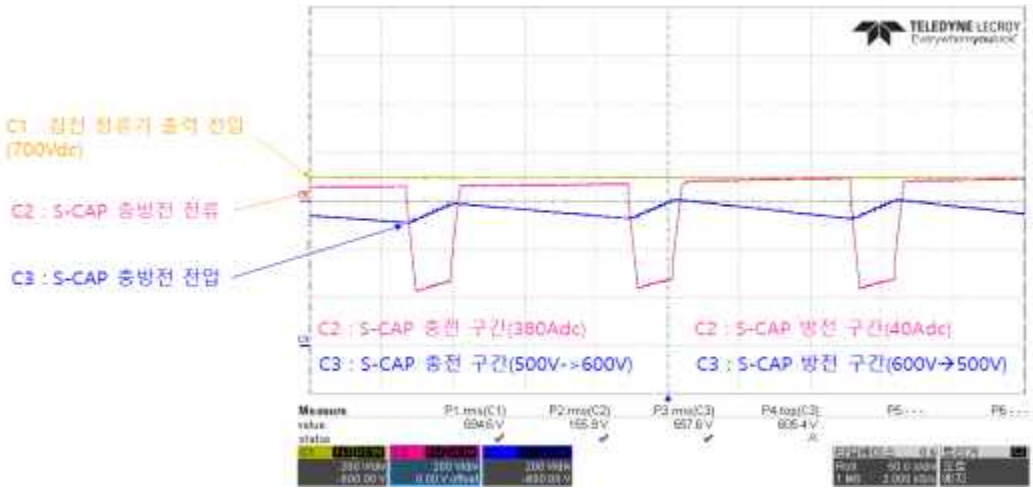


그림 286 200kW Supper capacitor 충방 시험

- 위 그림은 200kW로 Super capacitor를 30초 충전 2분 방전 시퀀스로 test를 진행한 파형이다. 충전 시 전류는 380Adc으로 충전하였고 방전 시 대략 40Adc로 방전을 진행하였다. 이때 Super capacitor 충방전 전압은 500V->600V 그리고 600V->500V로 변화하는 것을 파형을 통해 확인 할 수 있다.



그림 287 230kW 충전 시 DC-DC컨버터(CONV1) 출력부 전압 전류

- 위 그림은 230kW로 충방전 시험 시 DC-DC컨버터(CONV1)의 출력부 전압 전류를 측정한 사진이다. 이를 확인하여 전력을 확인 할 수 있다. 이미 앞에서 전력순환 시험으로 300kW영역에서 급전& 집전 패드의 성능 시험을 완료 하였고 회사 수전용량과 입력 변압기의 용량(250kVA)의 제한으로 230kW영역에서 충방전 시험(1분 충전, 4분 방전)을 진행 하였다.

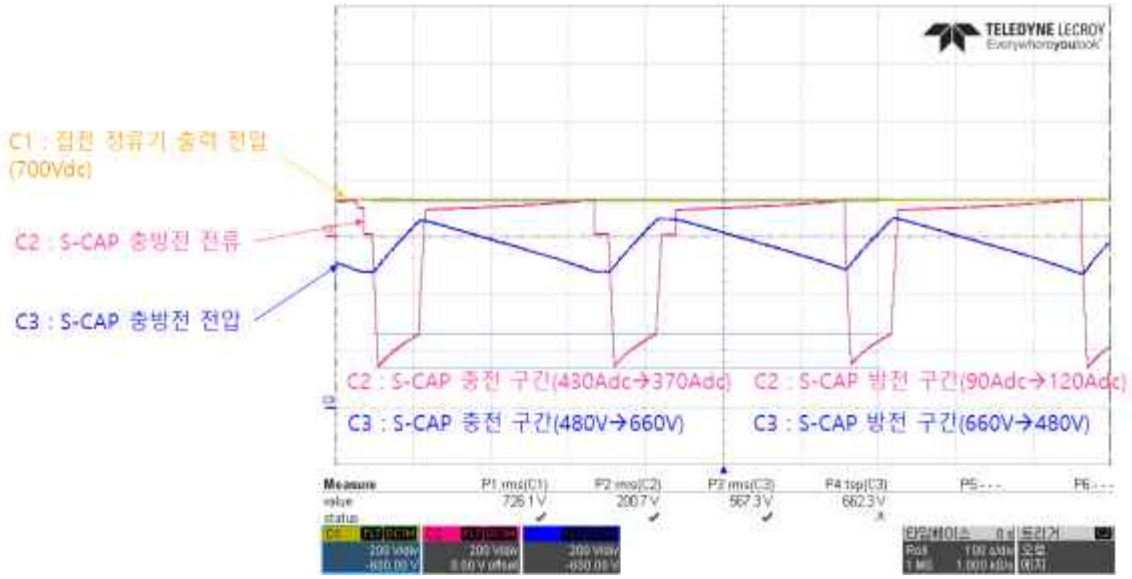


그림 288 230kW Supper capacitor 충방 시험

- 위 그림은 230kW로 Super capacitor를 1분 충전 4분 방전 시퀀스로 test를 진행한 파형이다. 충전 시 전류는 430Adc->370Adc로 충전하였고 방전 시 대략 90Adc->120Adc로 방전을 진행하였다. 이때 Super capacitor 충방전 전압은 480V->660V 그리고 660V->480V로 변화하는 것을 파형을 통해 확인할 수 있다.
- 급전 및 집전패드를 이용한 충방전 시퀀스 테스트를 통해 실제 무선급전집전 시스템에서 베터리로 정차 시 충전(1분)을 하고 역사간 이동 시(4분) 베터리의 에너지를 소모(방전)하는 것을 모의 시운전 할 수 있었다. 이를 바탕으로 급전패드 및 집전패드의 설계 및 제어 그리고 제품의 성능을 검증 할 수 있었고, 충방전 시 전체 시스템의 제어 알고리즘을 적용, 분석 할 수 있었다.

아. 무선급전 경전철 차량적용 기술개발

1) 무선급전 경전철용 DC/DC 컨버터 및 에너지 저장매체 설계

가) 무선급전 시스템의 차량 주회로 검토

(1) K-AGT 주회로 구성 (1안: 배터리 + 슈퍼캐패시터 구성)

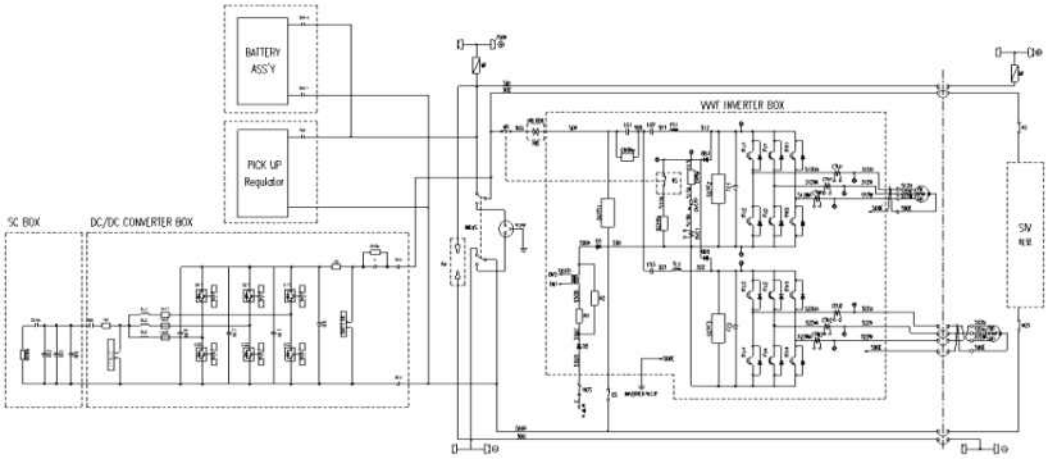


그림 289 PICK UP 출력 전압 제어방식

○ 차량 시스템으로 간단하게 구현할 수 있으나, PICK UP 장치 특성에 따라 운행시를 고려하여 차량 주회로 전압 안정성 관련 검토 필요

- 차량 주회로 전압 : DC 750V (500V ~ 900V)
- 무선급전용 PICK UP장치는 GAP 크기에 따라 레귤레이터 전압 변동이 큼
- 슈퍼캐패시터와 DC/DC 컨버터로 구성

(2) K-AGT 주회로 구성 (2안: 배터리 + 슈퍼캐패시터 병렬제어)

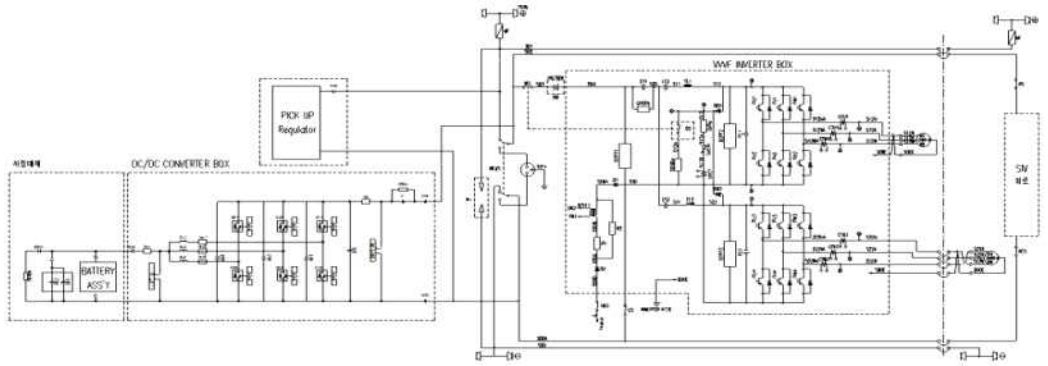


그림 290 저장매체 병렬제어 DC/DC 컨버터 제어방식

○ 상이한 저장 매체(슈퍼캐패시터 + 배터리)를 병렬 제어 방식으로 단독의 DC/DC 컨버터 사용하여 시스템의 간략화 될 수 있으나 저장매체의 상이한 특성으로 안정된 주회로 전압 공급에 어려움이 예상됨

- 저장매체의 충방전 응답속도 상이에 따른 저장매체 수명 고려됨
- 무선급전시 주회로 기동/정지 시퀀스에 따른 전압 불안정 및 속응성 추가 고려

(3) K-AGT 주회로 구성 (3안:배터리 + 슈퍼캐패시터 개별 구성)

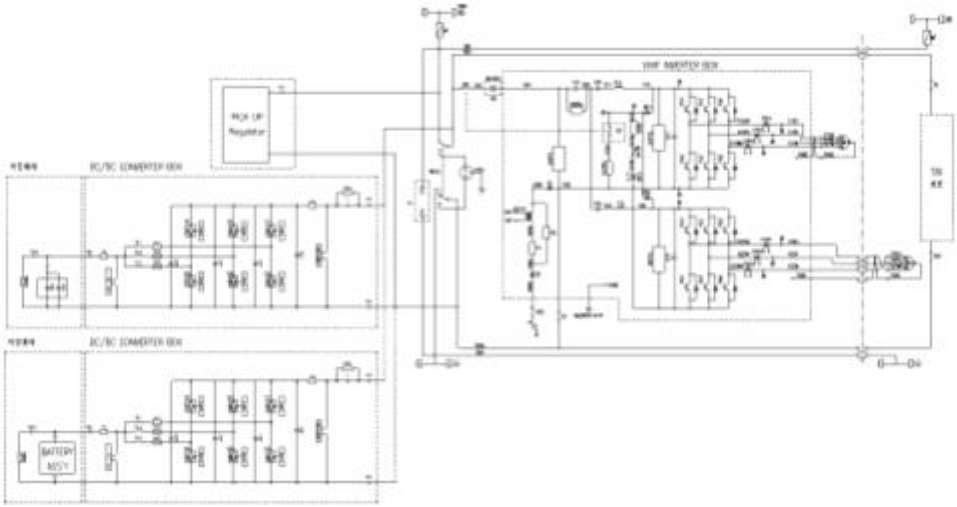


그림 291 저장매체 단독제어 DC/DC 컨버터 제어방식

○ 저장 매체(슈퍼캡 + 밧테리)별 단독제어 방식으로 주회로 전압 및 기동/정지 시퀀스 안정화 구현이 용이하나 차량 공간 및 중량 가중 우려되나 시제차량에서는 단독 제어 방식으로 구성 검토

- DC/DC 컨버터 수량 증가에 따른 기기배치 및 중량 검토

나) 무선급전 시스템용 DC/DC 컨버터 기본 설계

○ 슈퍼캡 제어를 위한 DC/ DC 컨버터는 무선급전 차량시스템에서 제동시 발생되는 회생에너지와 PICK UP REGULATOR로부터 전력을 저장하고, 무가선 구간에서 저장된 에너지를 추진제어시스템에 공급하는 기능을 수행하도록 설계

- 입력전압 : DC 750 [V]
- 전력변환방식 : 인터리브드 방식의 양방향 DC/DC CONVERTER
- 설치조건 : 차상 설치
- 주요기능 : 회생에너지 저장 및 재공급, 비상전력 공급
- 주위온도 : -25℃ ~ +40℃

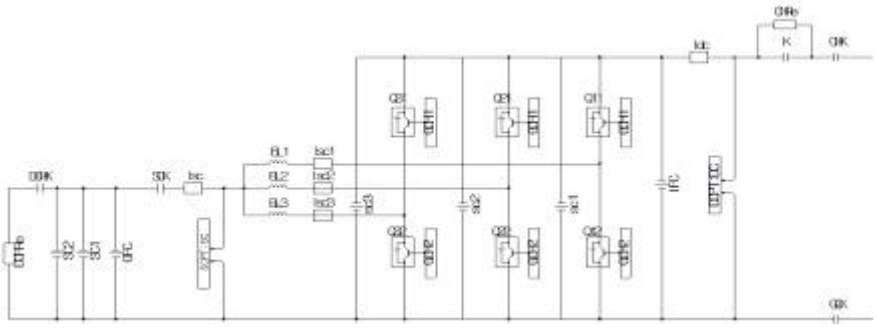


그림 292 슈퍼캡 제어용 DC DC CONVERTER 시스템 회로도

다) 무선급전 시스템용 DC/DC 컨버터 제어 알고리즘

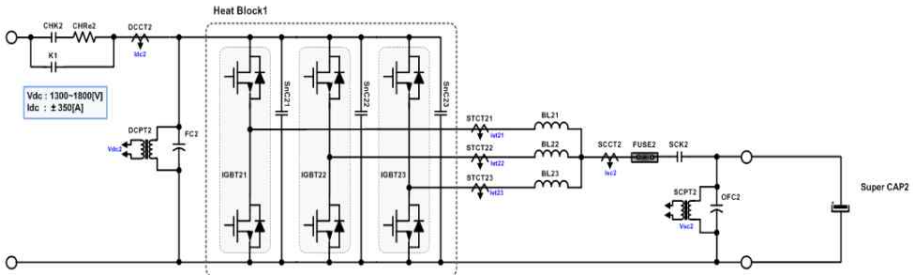


그림 293 인터리브드 방식의 DC/DC 컨버터 회로도

○ DC/DC 부스트 컨버터의 출력리플성분을 감소시키기 위해서는 커패시터의 용량을 크게 하거나 주파수를 증가시켜 주기를 작게 하는 방법이 있지만 커패시터의 용량을 무조건 크게 할 경우 시정수 증가로 인한 속응성이 현저하게 줄어들 우려가 있다는 단점과 컨버터의 크기가 커지는 단점이 있음

○ 커패시턴스를 줄이기 위해 주파수를 증가시키는 방법을 많이 사용하고 있지만 주파수를 높이면 높일수록 스위칭 손실과 스트레스가 커지는 단점이 있음

○ 단일 인덕터를 사용하는 컨버터는 인덕터 하나에 출력 전류를 모두 감당해야 함으로 인덕터의 크기가 증가하게 되고 따라서 시스템의 부피와 비용이 증가하는 단점이 있음

○ 시스템의 효율, 가격, 부피, 무게 등 제약조건에 따라 인터리브드 방식을 사용

· Zero Voltage Switching

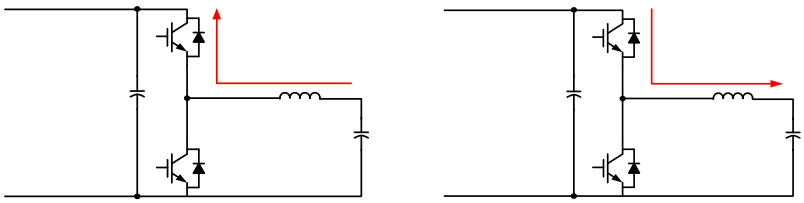


그림 294 전류 불연속 모드 및 전류 연속 모드

○ ZVS는 전류 불연속 모드에서 Switching을 함으로써 Switching Loss를 0으로 하는 모드는 아래의 그림과 같이 IGBT가 프리휠링 다이오드로 전류가 흐름으로써 전압이 0[V]가 되고 이때 Gate Pulse가 들어가 Switching 함으로써 Switching 로스가 0이 됨

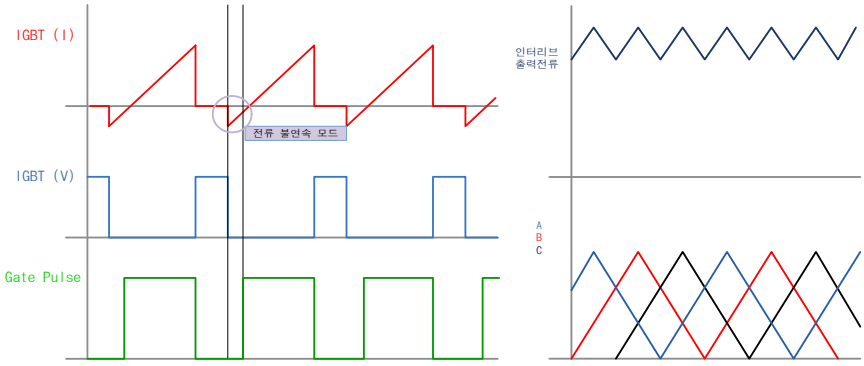


그림 295 IGBT 스위칭시 전압과 전류의 관계 및 출력 전류

○ 인터리브 방식은 출력 전류를 3개의 스위치로 쉬프트 하여 스위칭 함으로써 인덕터의 용량을 줄일수 있으며 3개의 출력의 합성 전류는 3배의 전류 맥동율을 줄일 수 있다는 장점이 있음

○ 리엑터의 설계는 만약에 인덕터의 리엑턴스를 높이면 전류의 리플을 줄일 수 있지만 ZVS 영역이 줄어들기 때문에 설계시 주의해야 함

○ 만약 ZVS 영역을 넓히기 위하여 리엑턴스를 작게 설계를 한다면 전류의 맥동율이 증가를 하기 때문에 두 가지를 동시에 생각을 하여 설계 검토를 진행함

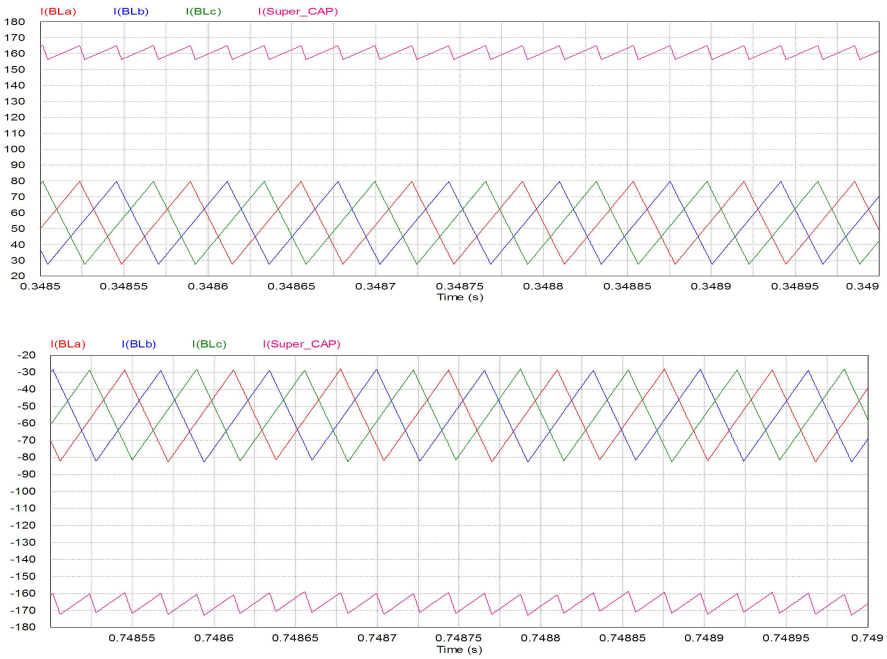


그림 296 시뮬레이션 결과 : 충전모드 및 방전모드

○ 인터리브드 방식의 DC-DC 컨버터에서 부스트 동작에서는 인덕터의 흐르는 전류가 단일 인덕터 부스트 컨버터에 비해 반으로 줄일 수 있어 인덕터의 크기를 감소시켜 단일 인덕터 부스트 컨버터보다 시스템의 크기와 부피를 많이 줄일 수 있는 장점을 가짐

○ 인터리브드 방식의 컨버터 장점으로는 입력전류 및 출력전압의 리플을 저감할 수 있다는 것이다. 입력전류가 분배됨에 따라 전류가 작아지므로 인덕터의 크기를 줄일 수 있다는 점과 출력전압의 리플이 줄어듦에 따라 출력 커패시터의 크기를 줄일 수 있는 효과가 있다.

2) 무선급전 경전철용 DC/DC 컨버터 상세설계 및 제작

가) DC/DC 컨버터 사양

표 56 DC/DC 컨버터 사양

항목		사양
입력 사양	정격 입력전압	DC 750V
	입력전압 변동 범위	DC 500 ~ 900V
출력 사양	제어방식	양방향 제어 (승압 및 강압 방식)
	정격 용량	500kW / Unit
일반 사양	냉각 방식	수냉각 방식
	소음	85dB 이하 (1m 주위)
	주위온도	-25℃ ~ +40℃

나) DC/DC 컨버터 상세설계

○ 경산 시험선에 위치한 K-AGT 차량 시스템 2량 1편성(Mc1-Mc2)로 구성되어 있으므로 공간 최소화를 위하여 용량 1MW급의 DC-DC 컨버터 용량을 500kW 2대를 설치하는 것으로 용량을 결정

○ 효율 및 공간 최소화를 위하여 인터리브드 방식의 컨버터를 적용하였으며, 기존 차량 시스템과 주회로도 설계, 저장매체도 2군으로 분리하여 량당 설치하는 것으로 결정

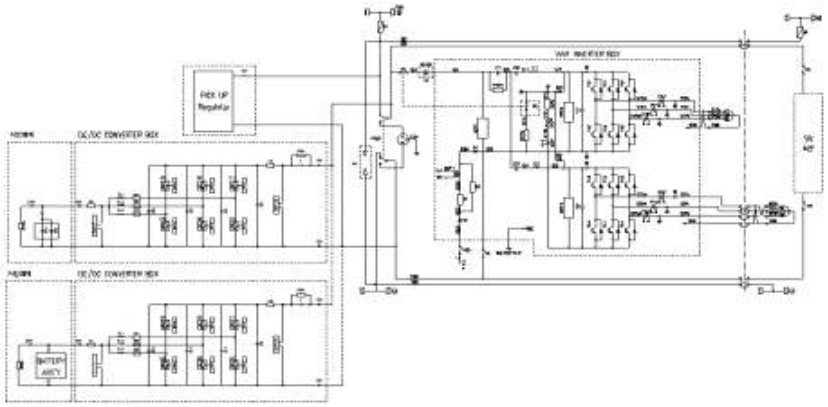


그림 297 전원안정화 장치 주회로

○ 차상에 설치는 구조로 좌측에는 주회로 및 제어회로용 캐논을 배치하였고, 우측에는 수냉각용 호스를 연결할 수 있는 구조이며, 커버는 상하 열림 구조로 설계

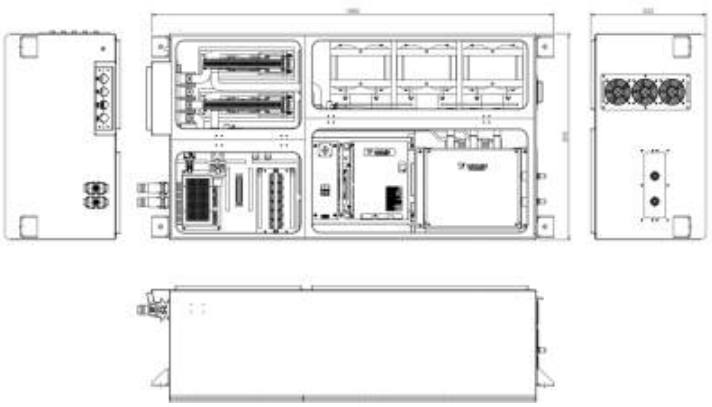


그림 298 DC DC 컨버터 2D 설계

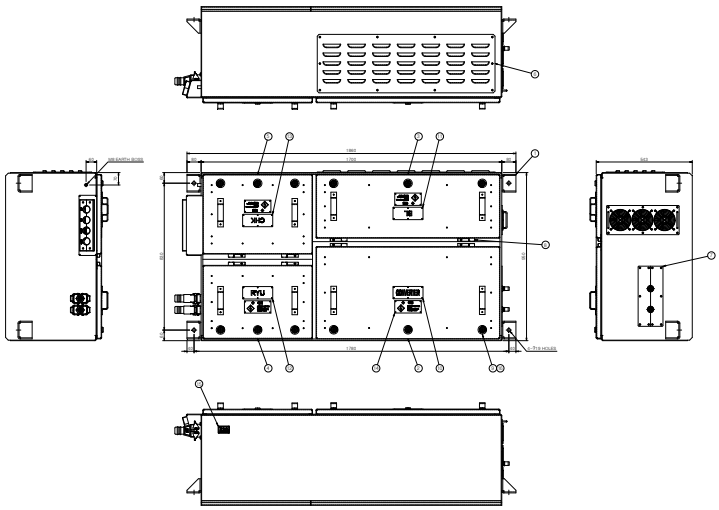


그림 299 DC DC 컨버터 외형

다) DC/DC 컨버터 제어장치설계

○ 통신 채널 확보를 위하여 제어장치를 One 보드에서 Rack형으로 보완 설계를 진행하였고. 하부기기의 배터리 BMS와 CAN 통신으로 구성하고, 예비 입출력 채널 확보를 위해 제어기 보완 설계 및 제작



그림 300 제어장치 보완품

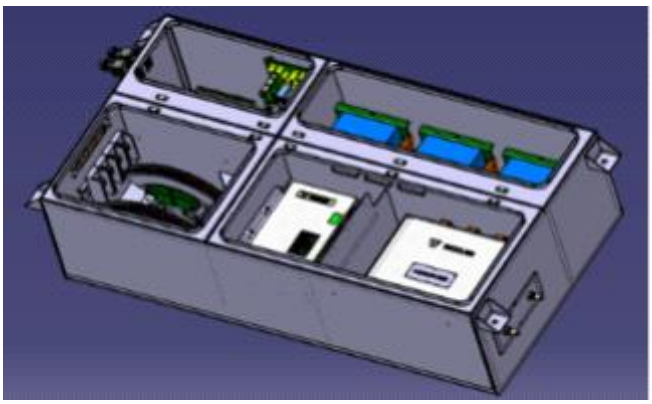


그림 301 DC/DC 컨버터 3D 설계

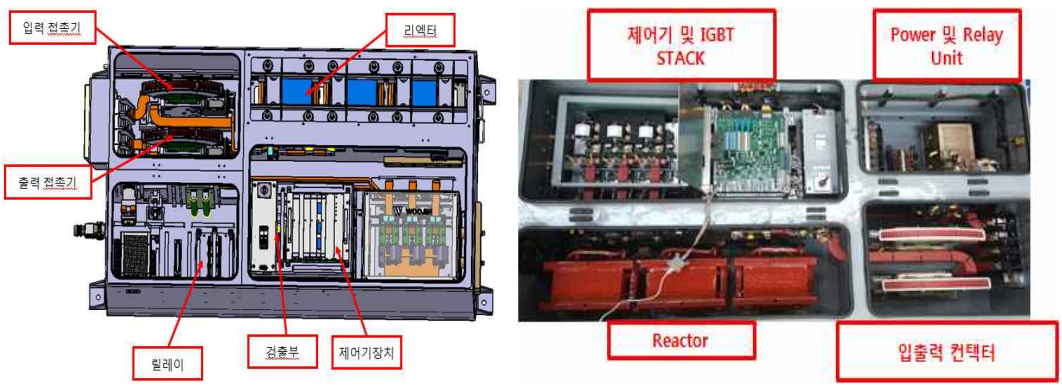


그림 302 DC/DC 컨버터 구성

라) DC-DC 컨버터 시작품 제작

○ 차량 하부에 설치 공간 부족 차상 설치용으로 설계함. 냉각시스템은 Pick up 장치와 공용 사용을 위하여 수냉각방식(20 kW/unit)을 적용



그림 303 DC DC 컨버터 3D 설계 및 외형(500Kw급)

○ 기존 차량에 추가 탑재되어야 하는 어려움이 있어 공간 최소화 및 경량화를 고려한 DC-DC 컨버터 상세 설계 및 차량 인터페이스를 구성

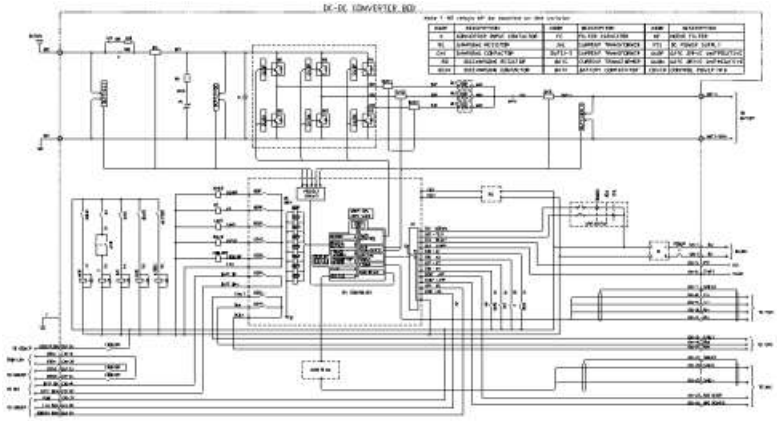


그림 304 DC/DC 컨버터 인터페이스 회로

○ 제작 후 시험 항목은 철도차량 기술 기준(안)을 고려하여 시험항목을 선정하였으며, 시작품에 대한 시험은 기능 위주의 시험을 진행하였다.

마) 무선급전 시스템용 DC/DC 컨버터 제어 알고리즘 개발

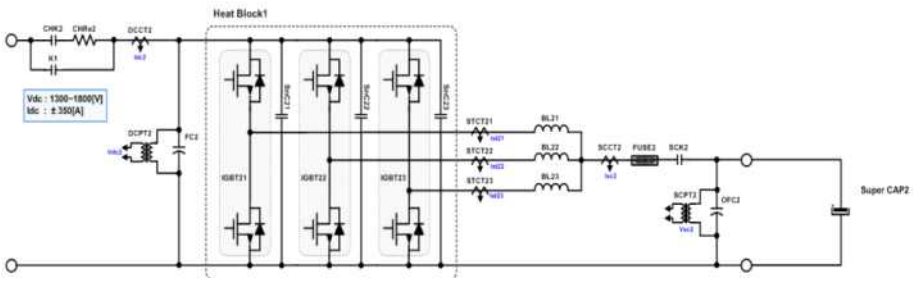


그림 305 인터리브드 방식의 DC/DC 컨버터 회로도

○ DC/DC 부스트 컨버터의 출력리플성분을 감소시키기 위해서는 커패시터의 용량을

크게 하거나 주파수를 증가시켜 주기를 작게 하는 방법이 있지만 커패시터의 용량을 무조건 크게 할 경우 시정수 증가로 인한 속응성이 현저하게 줄어들 우려가 있다는 단점과 컨버터의 크기가 커지는 단점이 있음

○ 커패시턴스를 줄이기 위해 주파수를 증가시키는 방법을 많이 사용하고 있지만 주파수를 높이면 높일수록 스위칭 손실과 스트레스가 커지는 단점이 있음

○ 단일 인덕터를 사용하는 컨버터는 인덕터 하나에 출력 전류를 모두 감당해야 함으로 인덕터의 크기가 증가하게 되고 따라서 시스템의 부피와 비용이 증가하는 단점이 있음

○ 시스템의 효율, 가격, 부피, 무게 등 제약조건에 따라 인터리브드 방식을 사용

○ 인터리브 방식은 출력 전류를 3개의 스위치로 쉬프트 하여 스위칭 함으로써 인덕터의 용량을 줄일수 있으며 3개의 출력의 합성 전류는 3배의 전류 맥동율을 줄일 수 있다는 장점이 있음

○ 입력전류가 분배됨에 따라 전류가 작아지므로 인덕터의 크기를 줄이고 출력전압의 리플이 줄어듦에 따라 출력 커패시터의 크기를 줄일 수 있음

3) 무선급전 경전철용 DC/DC 컨버터 구성품시험

가) DC/DC 컨버터 구성품시험

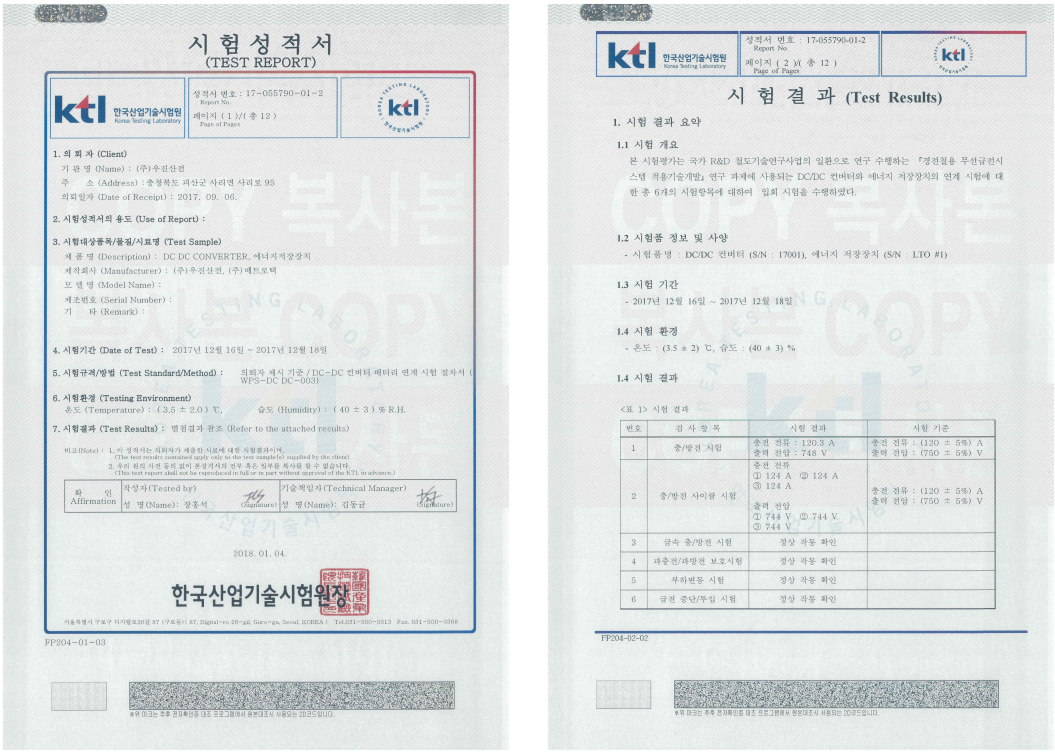
○ 무선급전 경전철용 DC/DC 컨버터의 전기적 성능과 제품의 품질 및 안전성을 보증하기 위하여 철도안전법, 도시철도차량(고무차륜경전철) 기술기준(KRTS-VE-Part53)에 의거하여 아래의 표와 같이 시험 및 검사항목으로 나누어 제3자 철도차량 전문시험기관 입회하에 구성품 시험을 실시

표 57 DC/DC 컨버터 구성품시험 항목 및 결과

No.	검 사 항 목		실시방안	시험결과	비고
1	외관 구조 검사		◎	이상없음	-
2	측정 시험	치수측정	◎	기준이내	-
		중량측정	◎	기준이내	-
3	진동 시험		◎	이상없음	외부공인시험
4	소음 시험		◎	67.3[dB]	기준 80[dB] 이하
5	냉각 시험		◎	기준이내	기준 2.0[Bar] 이상
6	제어 기능 시험		◎	정상작동확인	
7	보호회로 동작 시험		◎	정상작동확인	
8	경부하 시험		◎	정상작동확인	
9	부하 급변 시험		◎	정상작동확인	
10	효율 시험		◎	99.7%	기준 90% 이상
11	전압 변동 시험		◎	정상작동확인	
12	전자파 적합성 시험		◎	이상없음	외부공인시험
13	온도 상승 시험		◎	기준이내	2시간 측정
14	절연 저항 시험		◎	기준만족	
15	내전압 시험		◎	정상작동확인	
16	방수 시험		◎	이상없음	외부공인시험
17	환경 시험		◎	이상없음	외부공인시험

나) DC/DC 컨버터 및 배터리 연계시험

○ DC/DC Converter는 입력전원에 따라 배터리를 충/방전하여 입력 전원을 일정하게 유지하기 위한 기능을 수행하며, DC/DC 컨버터 및 배터리 연계시험을 통해 성능검증을 수행



시 험 성 적 서
(TEST REPORT)

ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 17-055790-01-2 Report No.
페이지 (1)/(총 12) Page of Pages

1. 의 뢰 자 (Client)
기 관 명 (Name) : (주)우진산전
주 소 (Address) : 충청북도 괴산군 사리면 사리로 95
의뢰일자 (Date of Receipt) : 2017. 09. 06.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) :

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)
제 품 명 (Description) : DC DC CONVERTER, 에너지저장장치
제작회사 (Manufacturer) : (주)우진산전, (주)메트로텍
모 델 명 (Model Name) :
제조번호 (Serial Number) :
기 타 (Remark) :

4. 시험기간 (Date of Test) : 2017년 12월 16일 ~ 2017년 12월 18일

5. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 의뢰자 제시 기준 / DC-DC 컨버터 배터리 연계 시험 절차서 (WPS-DC DC-003)

6. 시험환경 (Testing Environment)
온도 (Temperature) : (3.5 ± 2.0) ℃, 습도 (Humidity) : (40 ± 3) %R.H.

7. 시험결과 (Test Results) : 별첨결과 참조 (Refer to the attached results)

비고(Note) : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제출한 시료에 대한 시험결과이며, (The test results contained apply only to the test samples supplied by the client)
2. 우리 원의 사전 동의 없이 본 성적서의 전부 혹은 일부를 복사를 할 수 없습니다. (This test report shall not be reproduced in full or in part without approval of the KTL in advance.)

확 인 Affirmation	작성자(Tested by) 성 명(Name): 장홍석 (Signature)	기술책임자(Technical Manager) 성 명(Name): 김동근 (Signature)

2018. 01. 04.

한국산업기술시험원장

FP204-01-03

ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 17-055790-01-2 Report No.
페이지 (2)/(총 12) Page of Pages

시 험 결 과 (Test Results)

1. 시험 결과 요약

1.1 시험 개요
본 시험평가는 국가 R&D 철도기술연구사업의 일환으로 연구 수행하는 「경전철용 무선급전시스템 적용기술개발」 연구 과제에 사용되는 DC/DC 컨버터와 에너지 저장장치의 연계 시험에 대한 총 6개의 시험항목에 대하여 입회 시험을 수행하였다.

1.2 시험품 정보 및 사양
- 시험품명 : DC/DC 컨버터 (S/N : 17001), 에너지 저장장치 (S/N : LTO #1)

1.3 시험 기간
- 2017년 12월 16일 ~ 2017년 12월 18일

1.4 시험 환경
- 온도 : (3.5 ± 2) ℃, 습도 : (40 ± 3) %

1.4 시험 결과

<표 1> 시험 결과

번호	검 사 항 목	시험 결과	시험 기준
1	충/방전 시험	충전 전류 : 120.3 A 출력 전압 : 748 V	충전 전류 : (120 ± 5%) A 출력 전압 : (750 ± 5%) V
2	충/방전 사이클 시험	충전 전류 ① 124 A ② 124 A ③ 124 A 출력 전압 ① 744 V ② 744 V ③ 744 V	충전 전류 : (120 ± 5%) A 출력 전압 : (750 ± 5%) V
3	급속 충/방전 시험	정상 작동 확인	
4	과충전/과방전 보호시험	정상 작동 확인	
5	부하변동 시험	정상 작동 확인	
6	급전 중단/투입 시험	정상 작동 확인	

FP204-02-02

그림 306 DC/DC 컨버터 및 배터리 연계시험 성적서

다) 주요장치별 효율 검토

○ 기존 경량전철 시스템에 무선급전 차량에 추가되어야 하는 품목은 전원 소스인 픽업장치와 저장매체를 충/방전 역할을 하는 DC DC 컨버터로 구성되어야 하면 신규 전장품은 적색으로 표시하였다.

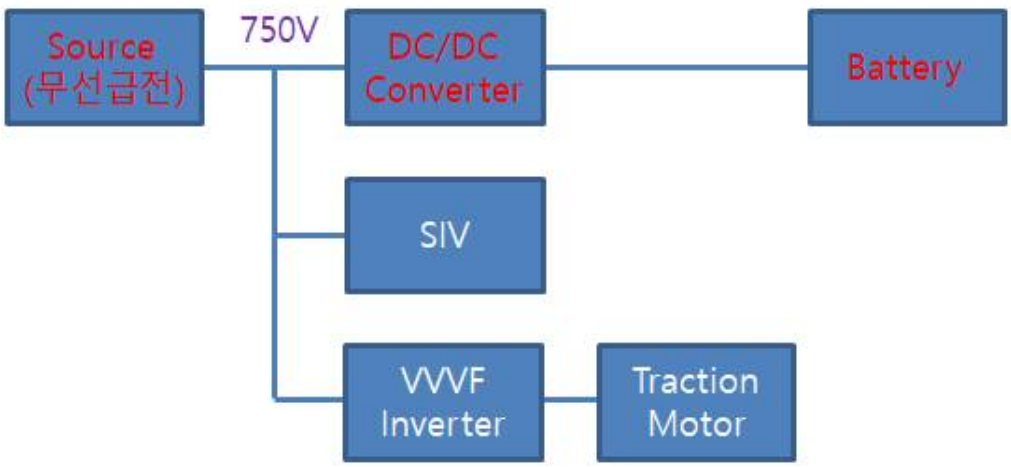


그림 307 무선급전차량의 주회로 시스템

○ 차량에 탑재된 주요 장치의 효율은 다음과 같으며 무선급전용품의 효율 목표값과 실측한 효율, 구성품의 효율 제시안을 표기하였으며, 장치별 효율은 시스템 구성에 따라 상이하며, 최근에는 에너지 저감 측면에서 고효율의 전장품 사용을 권장하는

추세이다.

기 기 명	기준 (실측)	효율 제시	비고
픽업장치(집전장치)	-	92% 이상	무선급전
DC DC 컨버터	90% 이상 (99.7%)	92% 이상	무선급전
배터리 (저장매체)	-	-	무선급전
추진제어장치	92% 이상 (96%)	92% 이상	도시철도
견인전동기	92% 이상 (97%)	92% 이상	“
보조전원장치	90% 이상 (92%)	90% 이상	“

4) 무선급전 경전철용 DC-DC 컨버터 차량 설치 및 취부 검토

가) K-AGT의 중량 검토 및 기기 배치

표 58 시험선 K-AGT 차량 중량검토 및 기기배치

항목			6량 1편성(부산 4호선)	2량 1편성 (K-AGT)	비고
최대 축중			18톤 (1량 기준)	좌동	
공차 중량			12톤 (1량기준)	좌동	
필요 전력량			1MW	350kW (1/3)	
역간 필요 전력량			10kWh	10kWh	최대역간:1.3Km
추가용품	Pick Up Coil, Regulator		2000(L)x600(W)x50(H) x 4EA 중량:300kg/1MW	추가 설치	대차하부 취부 (지상: 50 mm) (차량한계 조정)
추가용품	DC/DC 컨버터		용량:1MW (SC + 밧테리) 중량:약 1,500kg/1MW	추가 설치	K-AGT:차량 차상 설치
추가용품	저장매체	밧테리	용량:50kWh (5개역 주행가능) 1032(W)x1702(L)x450(H)x5 EA 중량:약 2,400kg/50kWh	추가 설치	모듈:40[Ah] 27.6[V] K-AGT:차량 바닥 설치
추가용품	저장매체	EDLC	용량:1.5MJ(150kW 10초충전) 중량:약 400kg/1.5MJ	추가 설치	K-AGT:차량 차상 설치
추가용품	냉각장치		냉각용량 : 20K (10kW x 2 EA) 중량: 30kg x 2 EA	추가 설치	K-AGT:차량 차상 설치
추가용품	기타		약 200kg (전선 및 브라켓류)	추가 설치	
중 량 검 토			중량: 5,860 kg/6량 (중량증가분: 1톤 /량당)		차상 설치 불가시 별도 차량 탑재 검토

○ 무선급전 시스템은 K-AGT을 이용하여 시스템을 구축하여야 하므로 기존 K-AGT의 중량 및 기기배치를 아래와 같이 검토하였으며 량당 약 1톤 증가가 예상됨

○ 1MW 급의 무선 급전용량 시험시에는 차량 공간(K-AGT)협소가 예상되므로 별도 차량 구성을 검토함

○ K AGT 기기 배치 검토

- K AGT의 주회로 추진 시스템은 2개의 병렬 연결된 TRACTION MOTOR에 가변 전압과 가변주파수로 제어하며 차량의 전원은 차량 측방향에서(제 3궤조) DC 750V로 공급되며 열차의 차량 편성은 아래의 그림과 같음

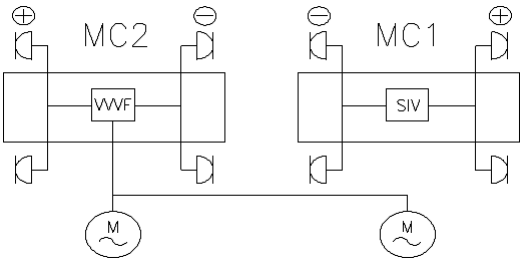


그림 308 KAGT 구성 (MC1 - MC2)

나) 전원 안정화 장치 구성 및 제어방식 검토

○ DDC는 집전장치와 저장매체와 연결되어 무선급전 구간에서 충전 모드와 비구간에서는 방전모드로 동작하도록 하였고 충전모드 및 방전전압 레벨은 구성품 시험 및 조합시험을 진행하여 설정하도록 한다. 기본적인 충전 전압 750V로 설정

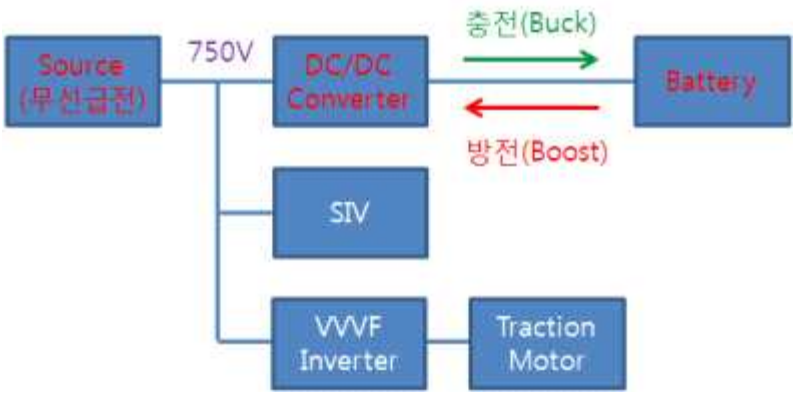


그림 309 강압쵸퍼와 승압 쵸퍼의 양방향 제어

다) 기존차량에 추가용품에 대한 취부 검토

○ 기존 경량전철에 집전장치와 저장매체와 연결되어 무선급전 구간에서 충전 모드와 비구간에서는 방전모드로 동작하도록 하였고 충전모드 및 방전전압 레벨은 구성품 시험 및 조합시험을 진행하여 설정

○ 기본적인 충전 전압 750V로 설정

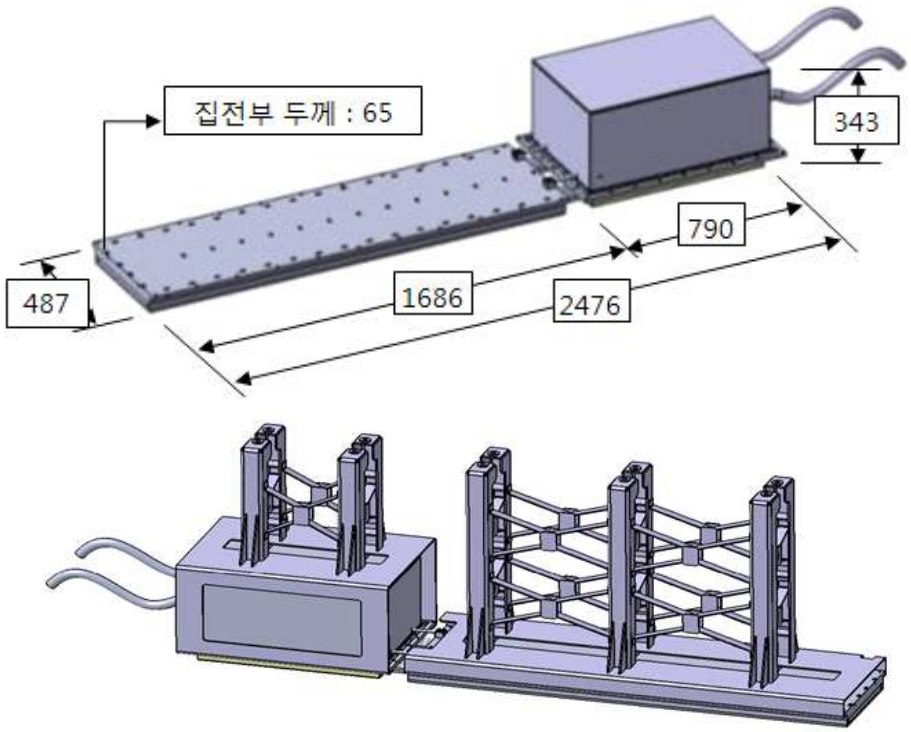


그림 310 집전장치 따른 취부 검토(250kg/Unit

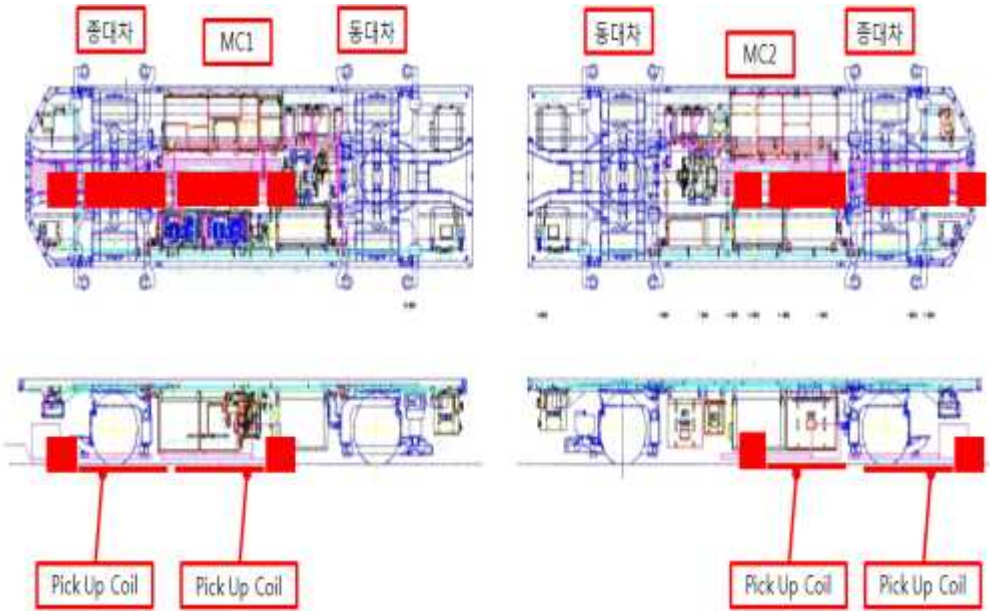


그림 311 무선급전시스템 배치도

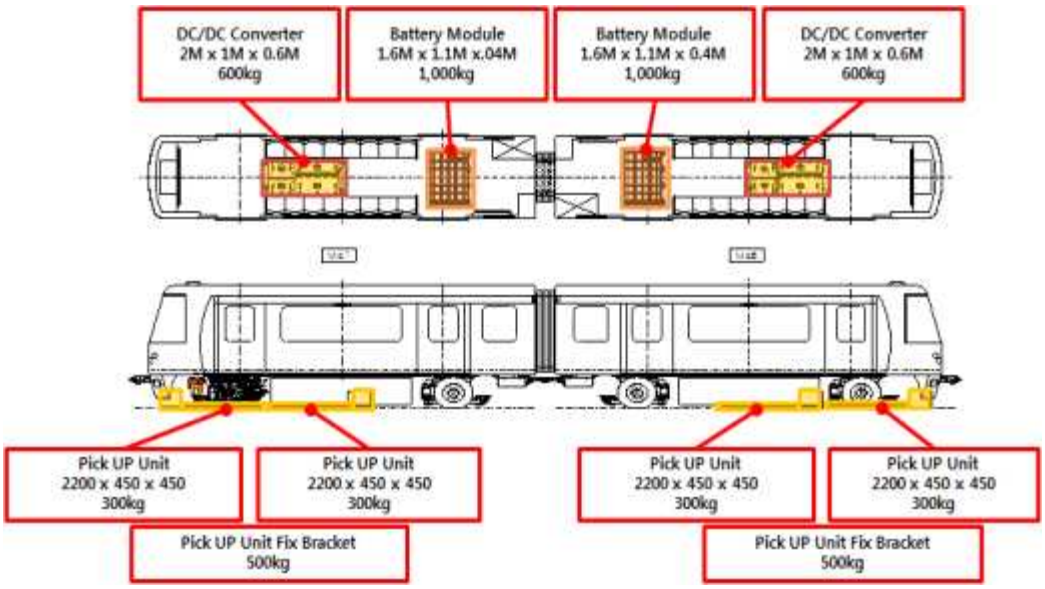


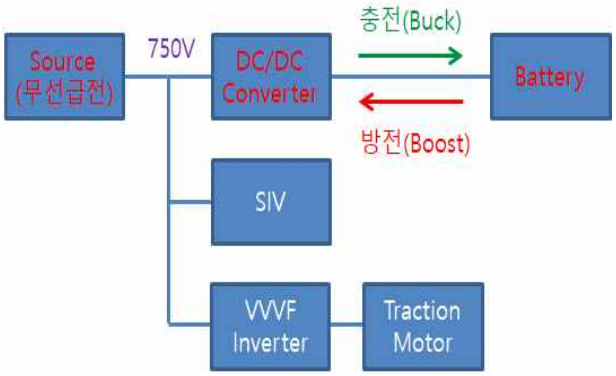
그림 312 안정화 장치 배치도

○ 기존 고무차륜형 K AGT에 무선급전용품을 설치하기 위하여 기존제품을 이동배치 및 배관등을 이동하여 전원안정화장치를 취부

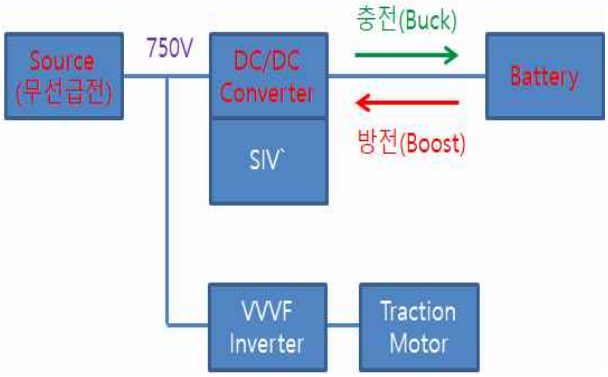
항목	추가 사항	예상 변경 사항	차량한계 검토 사항
MC1 종대차	무선급전 집전장치 설치 브라켓 추가	추가 브라켓 설치를 위한 시트 용접 및 Hole 가공 필요	차량 하부 방향으로 40mm 벗어남
MC1 차체	무선급전 집전장치 설치 브라켓 추가	SIV : 차량 측면 방향으로 150mm 이동 MR : 차량 진행 방향으로 220mm 이동 SR : 차량 진행 방향으로 360mm 이동 AIR 배관 : 경로 변경 배선 및 덕트 : 경로 변경	차량 하부 방향으로 40mm 벗어남 차량 측면 방향으로 130mm 벗어남
MC2 종대차	무선급전 집전장치 설치 브라켓 추가	추가 브라켓 설치를 위한 시트 용접 및 Hole 가공 필요 피뢰기 : 차량 측면방향으로 50mm 이동 배선 및 배관 : 경로 변경	차량 하부 방향으로 40mm 벗어남
MC2 차체	무선급전 집전장치 설치 브라켓 추가	VVVF : 차량 측면 방향으로 200mm 이동 AIR 배관 : 경로 변경 배선 및 덕트 : 경로 변경	차량 하부 방향으로 40mm 벗어남 차량 측면 방향으로 180mm 벗어남

라) 경전철용 무선급전장치 최적화 검토

○ 무선급전 차량 설계 검토 항목으로는 차량 하중을 최소화하여 무선급전용품의 소형 경량화가 필요하며 또한 기능별로 통합하는 과정이 필요하다. 아래 그림은 DC DC 컨버터와 보조전원장치를 통합하여 차량에 탑재된 전장품을 축소시키는 효과를 가질수 있도록 구상하였다.



K-AGT의 개조된 주회로 블록도



무선급전 전용 차량의 개선된 주회로 블록도

○ 기기배치부분은 현재 차상의 승객실에 탑재된 저장매체는 옥상측으로 이동 배치하고 양방향 DC DC 컨버터와 보조전원장치를 1 BOX로 설계하여 통합함으로써 공간 및 중량을 감소시키는 효과가 있으므로 언더프레임에 탑재 가능하다.

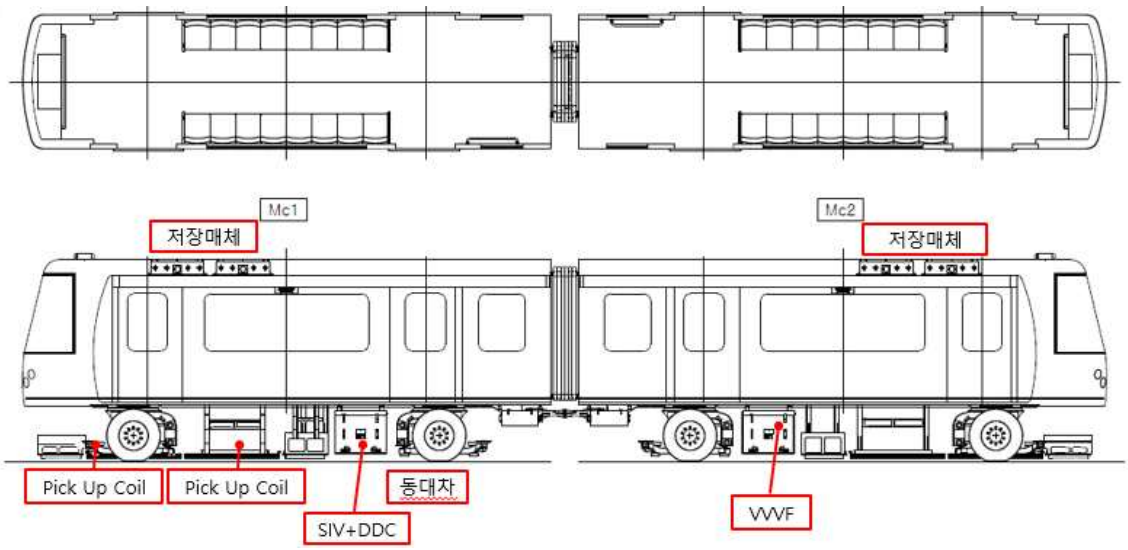


그림 313 무선급전 전용 차량의 기기배치(안)

○ 차량 인터페이스 부분에서는 2량 1편성일 경우 집중하여 설치 하도록하고, 저장매체는 차량 하중 분포에 따라 분산배치 또는 집중배치하여 종합제어장치와 차량인터페이스를 구성하도록 함. 무선급전시스템에서 전원안정화장치는 모두 2조 이상으로 구성하여 1조 시스템이 고장인 경우 나머지 시스템이 용량 백업이 가능하도록 설계함. 또한 전원안정화장치에 대한 시스템 효율향상 및 경량화를 통한 고도화가 필요함.

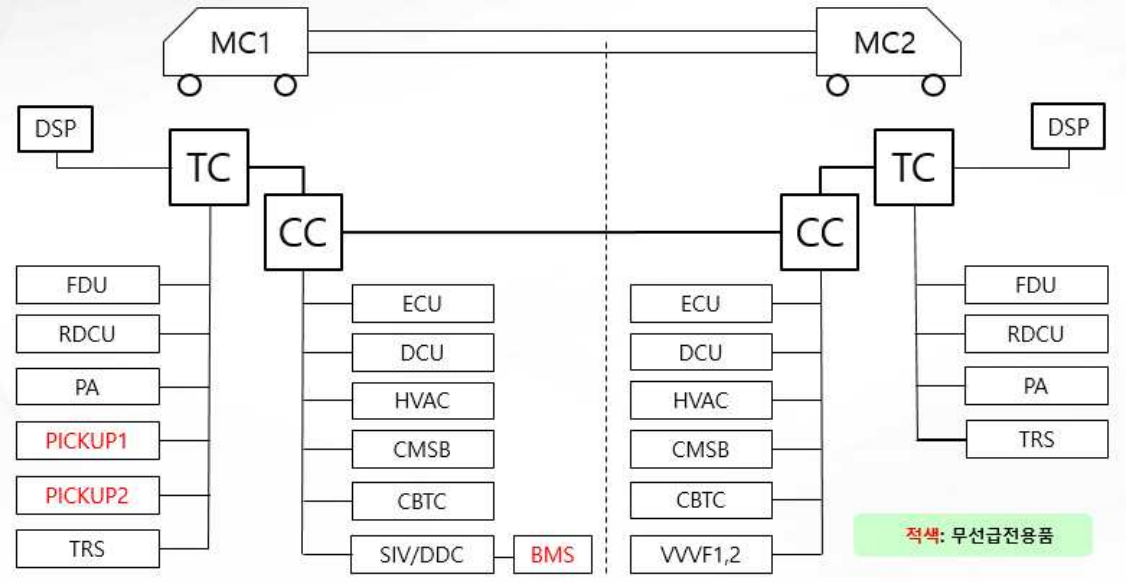


그림 314 무선급전용 차량인터페이스 (안)

5) 무선급전 경전철용 DC/DC 컨버터 통신조합시험

가) DC/DC 컨버터 및 열차종합제어장치(TCMS) 통신 인터페이스 시험

○ TCMS의 기능/조합시험에 대하여 적용하며 TCMS는 중앙장치 (TC), 단말장치(CC), 화면장치(DU)로 구성되며 2량1편성 단위의 구성

(1) TCMS 시뮬레이터의 구성 및 기능

○ 현 차량과 동일하게 TCMS의 감시 대상이 되는 DDC등의 추가 되는 주변기기의 기능을 구현

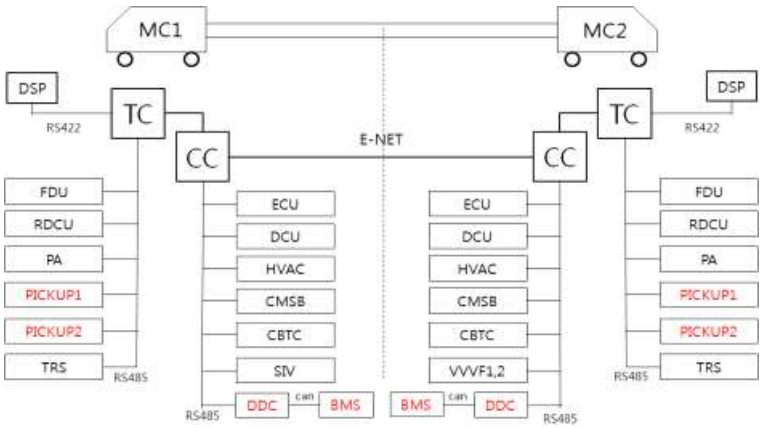


그림 315 K-AGT (신호시험차량) 종합제어장치 구성도

(2) 하부 기기간 통신 규격

표 59 하부 기기간 통신 규격 및 사양

장치명	전기적 인터페이스	속도 (bps)	전송주기
CBTC	RS485	19.2K	200ms
ADU	RS485	19.2K	200ms
PIS	RS485	96k	200ms
PA	RS485	4800	200ms
TRS	RS485	2400	200ms
VVVF	RS485	96k	40ms
ECU	RS485	19.2K	50ms
SIV	RS485	19.2K	200ms
DDC	RS485	19.2K	200ms
집전장치	RS485	19.2K	200ms

(3) TCMS 시스템 일반 확인 시험

○ 현재 편성 구성된 열차상태, 각 호차별 TCMS 상태 인식을 확인

○ 초기 조건 : 열차 정상적인 기동 상태

절차	시 험	시험결과
1. CAR ID(Strapping) 및 편성 인식상태 확인	차량번호 설정에 따라 DU상 차량구성, 차량번호현시 정상여부 확인	정상동작확인
	조성 후 편성 현시상태 확인 DU 일반화면(초기화면)상부의 2량 차량구성 및 호차/편성 현시를 확인	정상동작확인
2. TC/CC Software Version 체크	TC/CC Software Version 현시	정상동작확인
	DU Software Version 현시	
3. 통신 상태 현시	통신데이터 화면 확인 여부 및 수신데이터 상태 확인	정상동작확인

(4) 운전자 화면 확인 시험

○ 초기 조건 : 열차 정상적인 기동 상태

절차	시험	비고
1. 시간 현시 확인	화면상단에 연월일시분초의 시간이 변경되는지 확인	정상동작확인

(5) DC DC CONVERTER 제어(DDC) 확인 시험

○ 초기 조건 : 열차 기동 상태, 가선 전압은 600V 이상 설정, 주간제어기 중립상태

절차	시 험	비고
1. DDC 상태	DDC 동작 상태가 화면에 현시됨을 확인	정상동작확인
	DDC 고장정보를 화면에 현시됨을 확인	정상동작확인

6) 무선급전시스템 현차 성능검증 (완성차시험/정적시험)

가) 무선급전시스템 현차 성능검증을 위한 차량 개조

○ 무선급전용 경전철을 조성하기 위하여 기기배치를 아래 그림과 같이 구성

○ 기존차량을 이용하는 개조작업이기 때문에 차상에는 저장매체, DC DC 컨버터, 냉각장치인 칠러는 설치하고, 차량 하부에는 대차 프레임에 Pick up 장치 1대, 언더프레임에 Pick up 장치 1대를 량당 설치하여 전체 용량을 1MW급을 구성

○ 또한 집전장치는 차량의 중앙에 설치하여야 하기 때문에 기존에 설치된 공기탱크 및 배관 이동작업을 수행

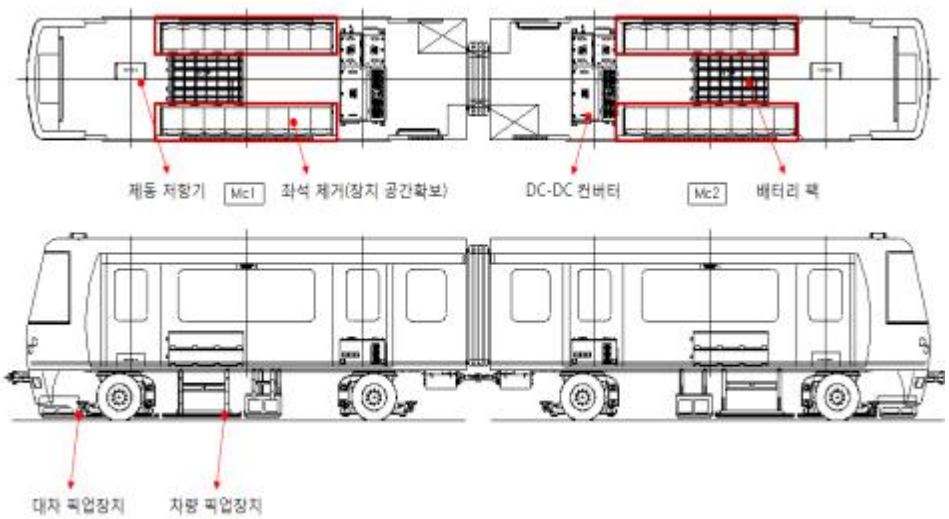


그림 316 개조 범위 및 기기 배치

(1) MC1/ MC2 차량 개조 작업

○ 기존장치 이동 설치 (SIV, VVVF) 및 좌석 제거

○ DC-DC 컨버터 객차 내부 설치 및 배선

○ 배터리 팩 객차 내부 설치 및 배선

○ 냉각기 객차 내부 설치 및 배선

○ 제동 저항기 객차 내부 설치 및 배선

○ K-AGT의 간선 여부 확인 (좌석 의자 제거) 및 차상과 하부간의 배선경로 작업

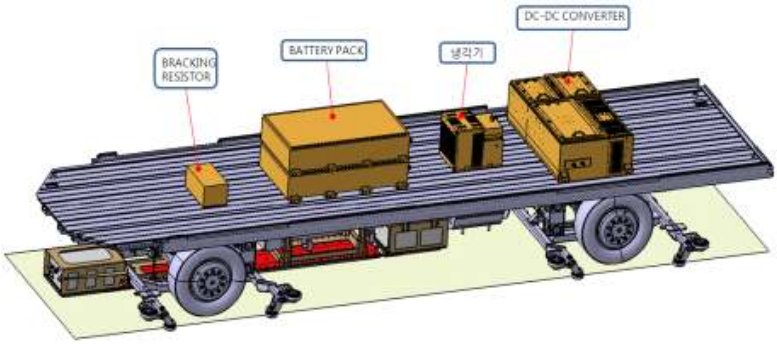


그림 317 MC1 차량 배치

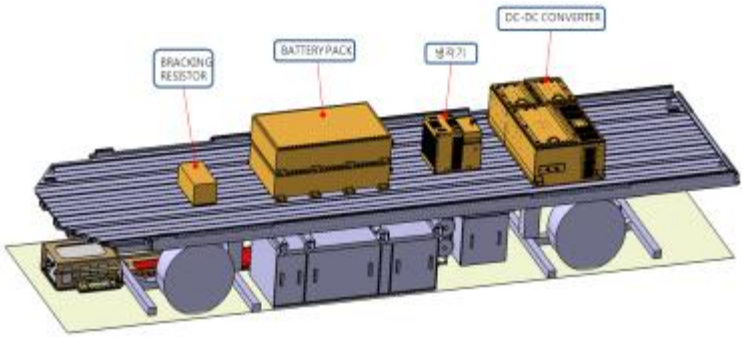


그림 318 MC2 차량 배치



그림 319 K-AGT 이동 및 개조 작업

나) 무선급전시스템의 완성차 시험

○ 기존 K-AGT 차량에 추가되는 무선급전용품(집전장치, DDC, 저장장치) 및 기존차량과의 인터페이스 성능검증 실시

(1) 차량 기본 및 일반사항

구분		일반 사항	비고
기후 조건	외기온도	-25℃ ~ +40℃	
	기타	먼지, 노면결빙, 비, 염분	
선로 조건	차륜형식	고무차륜형식	
	궤간	1,700㎜	
	최대구배	58‰	
	최소곡선반경	본선: 40m, 측선: 30m	
	최대축중	9ton	
	플랫폼 높이	1,080㎜	
전기 방식	가선전압	DC 750V	
	급전방식	무선급전 방식	

(2) K-AGT 차량 사양

구분		일반 사항	비고
차종		Mc1-Mc2 : 동력을 가진 제어차	
열차편성		2량 편성 : Mc1-Mc2	
차중		Mc1: 18ton, Mc2: 18ton	
승객정원		Mc: 57명(좌석 : 14명, 입석 : 43명) 2량편성: 114명(좌석: 28명, 입석: 86명)	
하중조건(성능계산기준)		6ton	
주요 성능	성능최고속도	70㎞/h	
	최고운행속도	60㎞/h	
	가속도	3.5㎞/h/s	
	감속도	상용: 3.5㎞/h/s, 비상: 4.5㎞/h/s	
	표정속도	30㎞/h 이상	
	져크한계	0.8m/sec^3	
속도제어방식		직류회생제동, 가변전압가변주파수 (VVVF) 인버터에 의한 가.감속제어	
제동방식		직류회생제동, 아나로그 전기지령식 공기제동 (응하중부)	
제어회로전압		직류: DC100V(변동범위: DC70V~110V)	
제어공기압력		5㎏/㎠(변동범위: 4~6㎏/㎠)	

(3) 완성차 시험 항목

순번	시험항목		비고
1	중량측정 시험	축중측정	주1
		동일축 윤중차이	
		동일차량 좌우윤중차이	
		차량중량, 편성중량	
2	차량한계 측정		주1, 이동설치품
3	절연저항 측정		주1, 신규배선
4	내전압 시험		구성품시험
5	누수시험		주1, 집전장치/DDC
6	추진제어 장치시험	기능 확인 시험	주1
		기동 확인 시험	주2
7	보조전원 장치시험	무부하 운전시의 출력전압시험	주1
		동작시험	주1
		축전지/충전기 기능확인시험	주1
8	종합제어 장치시험	운전실 모니터시험	주1
		종합제어장치 전원동작시험	주1
		운전반 연계동작 시험	주1
		고전압장치 연계동작	주1
		제동장치 및 압축기장치 연계동작	주1
		출입문장치 연계동작	
		실내조명 연계동작	
		냉/난방장치 연계동작	주1
		환기장치 연계동작	
		승객경보장치 연계동작	
		신호장치 연계동작	
		방송/표시기장치 연계동작	
		연계장치와의통신 및 입출력확인시험	주1, 집전장치/DDC/VOD
9	기능 및 동작시험	기능 및 동작 시험	
		시동,정지 및 운전실교환역행시험	
		객실/운전실기기시험	
		비상정지설비시험	
		기관사경계장치시험	
		속도연산장치시험	
		고장기록확인시험	
		출입문동작	
		집전장치 충방전 시험	주2
		급전선로 진출입시험	주2
		전원안정화장치 시험 (750v)	주1
		급전선로 추진/제동 시험	주2
		전원안정화장치 추진/제동시험	주2
10	집전장치 공극 측정		주1
11	전원안정화 장치시험	기능/기동 확인 시험	주1
12	집전장치시험	기능/기동 확인 시험	주1

* 주1 : 공장에서 실시한다.

* 주2 : 경산시험선에서 실시하며, 결과는 무선급전차량 항목만 서술하였다.

(4) 완성차 시험 결과

○ 중량측정시험 (공장)

NO	검사 항목	판정기준		측정치	비고
1	중량 측정	Mc1	14.50±1.4 톤	15.2	
		Mc2	14.50±1.4 톤	15.3	
		Mc1-Mc2	29.00±2.8 톤	30.5	MC1, 2 합계

○ 차량 한계 시험 (공장)

- 차량 한계 측정

NO	검사 항목	판정기준	측정치	비고
1	차량 한계 측정	차체에서 VVVF 외함 측정 (350mm 이내)	322	MC2
		차체에서 SIV 외함 측정 (150mm 이내)	145	MC1

○ 절연저항 측정 (공장)

NO	검사 항목	판정기준	측정치	비고
1	고압회로(DC 750V)-접지	30MΩ 이상	200MΩ	500,501 Line
2	저압회로(AC 380V)-접지	30MΩ 이상	200MΩ	냉각기송풍기 전원
3	저압회로(DC 100V)-접지	30MΩ 이상	200MΩ	DDC, pick용 제어 캐논

○ 누수시험 (공장)

NO	검사 항목	판정기준	시험결과	비고
MC1	집전장치 (대차)	수압 또는 유량변화가 없을것	양호	
	집전장치 (차체)		양호	
	DC/DC CONVERTER (차상)		양호	
MC2	집전장치 (대차)		양호	
	집전장치 (차체)		양호	
	DC/DC CONVERTER (차상)		양호	

○ 기능 및 동작시험 (공장/시험선)

- 집전장치 충방전 시험

NO	검사 항목	판정기준	측정치				비고
			MC1		MC2		
			대차	차체	대차	차제	
1	집전장치 출력전압	공극 40~ 50mm 시 출력전압 DC 750V ~ 900V 범위이내	정상 동작	정상 동작	정상 동작	정상 동작	시험선

- 집전장치 충방전 시험

NO	검사 항목	판정기준	검사결과	비고
1	충전시험 (MC1)	주회로 전압 800V 이상시 충전 (1C)	양호	시험선
	방전시험(MC1)	주회로 전압 730V 이하시 방전 (1C)	양호	
	충전시험(MC2)	주회로 전압 800V 이상시 충전 (1C)	양호	
	방전시험(MC2)	주회로 전압 730V 이하시 방전 (1C)	양호	

- 급전선로 진입시험

NO	검사 항목	판정기준	검사결과	비고
1	급전구간에 상태 확인	무선급전구간 진입시 차량이 정상적으로 동작되는지 확인	양호	시험선

- 전원안정화 장치 시험

NO	검사 항목	판정기준	검사결과	비고
1	방전모드 시험	무가압상태에서 방전모드 동작하여 차량이 기동되는지 확인한다.	양호	

- 전원안정화장치 추진/제동 시험

NO	검사 항목	판정기준	검사결과	비고
1	역행/제동 시험	무급전 시험선 구간에서 역해/ 제동 정상적으로 동작되는지 확인.	양호	시험선

○ 집전장치 공극 측정 (공장)

NO	검사 항목	판정기준	측정치				비고
			MC1		MC2		
			대차	차체	대차	차체	
1	타이어 바닥면 집전장치 간격을 측정	50mm±5mm	52	49	50	50	

○ 전원안정화 장치 시험 (공장)

- 제어전원 ON/OFF 시험

NO	검사 항목	검사내용	판정기준	시험결과	비고
1	제어기 동작 상태	제어전원을 ON/OFF 할 때 정상동작 확인	이상이 없을것	양호	

- 통신 인터페이스 시험

NO	검사 항목	검사내용	판정기준	시험결과	비고
1	통신 인터페이스 확인	TCMS-DDC 인터페이스 확인	이상이 없을것	양호	

(5) DC/DC 컨버터, 배터리 및 BMS 연계시험

○ DDC 컨버터와 배터리 및 BMS와의 연계시험을 구성하여 충방전 시험을 진행하였고, BMS와 보호동작확인 및 SOC 상태를 확인

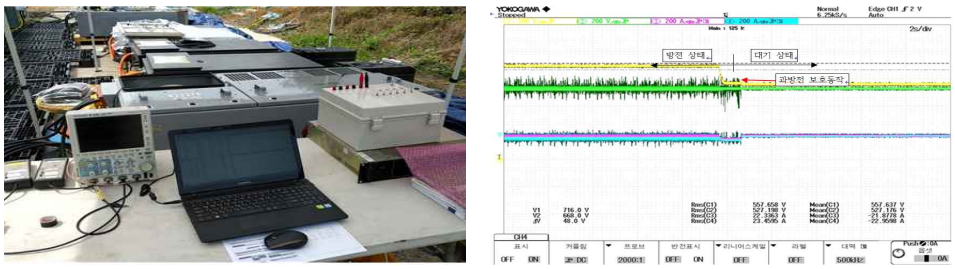


그림 320 연계시험 구성 및 과충전 과방전 보호시험

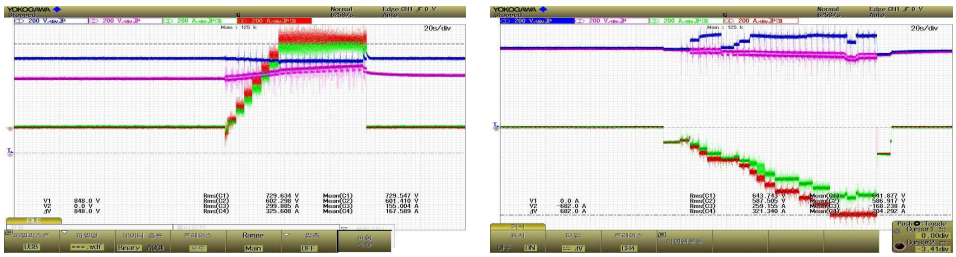


그림 321 충전 시험(8.4C & 8.5C)

(6) 양방향 컨버터 제어 알고리즘 구현

○ 정적 신뢰성 시험을 위하여 충/방전 전압을 설정하고, 배터리의 SOC 상태를 감시 및 제어하여 저장매체의 수명을 보증할 수 있도록 양방향 컨버터 제어 알고리즘 구현

- 입력 전압 720V 이하시 충전 개시
- 입력 전압 720V 이상시 방전 개시
- 배터리SOC 50% 미만시 GDU OFF (과방전 방지)
- 정상동작시 SOC 80% 유지 (과충전 방지)

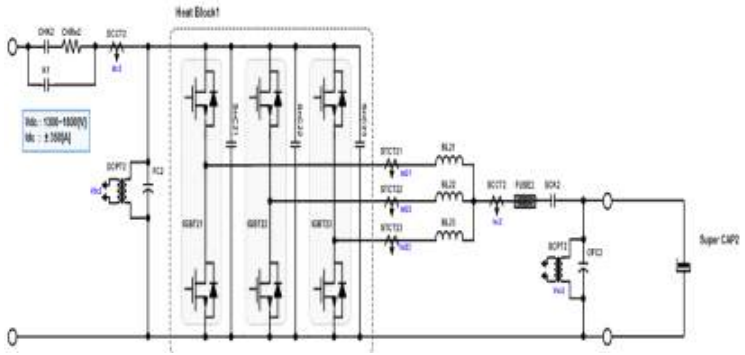


그림 322 DC/DC 주회로 모델링

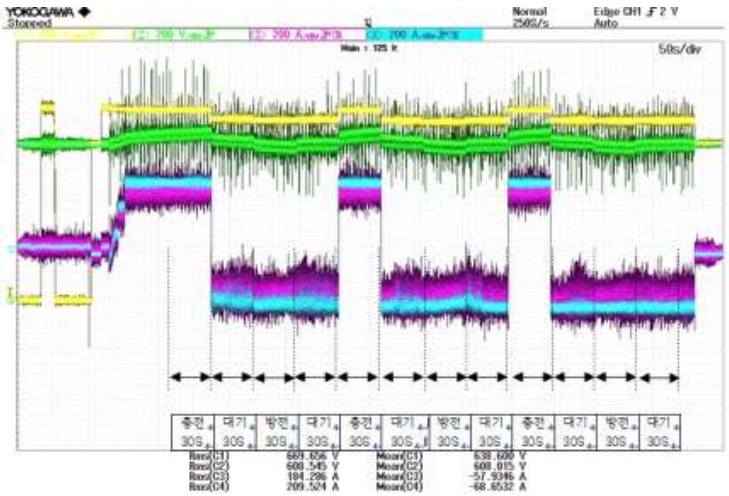


그림 323 충방전 제어 연속 동작 확인

7) 무선급전 경전철 동적 신뢰성 시험 지원 및 유지보수

가) 동적 신뢰성 시험 환경 구축

○ 경산시험선의 무선급전용 경량전철 차량에 대하여 동적시험을 진행하기 위하여 차량에서 무인패턴운전을 위하여 TCMS 소프트웨어를 수정하여 운행에 지장이 없도록 조치하였으며, 과주 방지를 위하여 지상에 마커와 연계동작하여 충돌방지를 예방

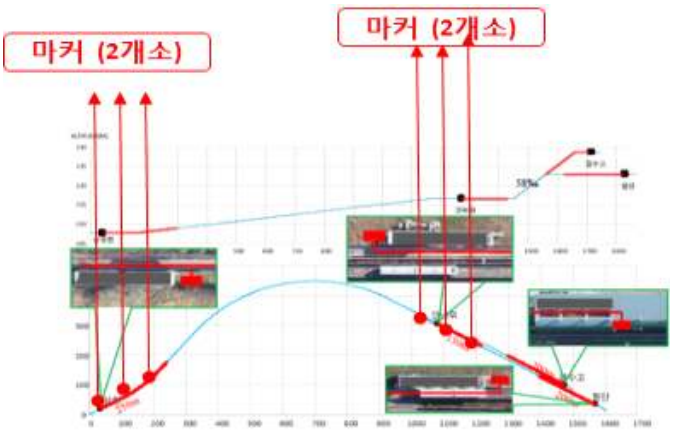


그림 324 경산시험선의 동적시험 구축

(1) TCMS를 이용한 무인운전 구현 방법

(가) 주행제어 소프트웨어 모듈

○ TCMS 내부에 별도 동작하는 ATO 소프트웨어 동작 모듈을 추가한다. TCMS의 기본기능은 그대로 두고, 별도의 출력채널을 제어하여 주행할 수 있도록 부여

- ATO 소프트웨어 모듈 (ATOSM)
  · 상용 역행 및 상용 제동을 이용하여 무인운전 주행을 수행하는 모듈이다. 무인운전 체결 후 최초는 START 버튼을 눌러 동작, 무인운전이 깨지면 ATO 소프트웨어 모듈은 정지
  · 설정된 목표속도에 따라 역행 및 제동을 수행
  · 주행 노치는 P4 노치만을 이용하며, 정지는 B7 노치만을 이용
  · 목표속도 +1km/h 까지는 역행(POWERING)이 이루어지며, -1km/h 까지는 타행(COASTING)을 수행
  · 현재속도대비 정지제동거리를 실시간 계산하여, 남은거리이하일 경우 정지제동(FSB)를 체결하여 정지
- ATO 속도/거리 감시 보호모듈 소프트웨어 모듈 (ATPSM)
  · FSB 체결 모듈: 속도감시 보호 모듈로 FSB 체결속도 이상 감지된 경우 FSB를 체결, FSB 체결속도 이하로 내려오면 FSB 는 해제되고 ATO 소프트웨어 모듈에 의해 주행
  · EB 체결 모듈: 2가지로 체결되며, 첫 번째는 EB 체결 속도 이상 감지된 경우 EB를 체결, 두 번째로 주행거리가 일정거리 이상 초과하였을 경우 체결, 무인운전은 중지되며, 해제는 사용자에 의해 해제
  · ATO 속도/거리 감시 모듈은 내부 소프트웨어적인 문제가 있을 경우를 위한 것으로 하드웨어적 이상이 있는 경우에는 보호모듈은 의미가 없음. 즉, TCMS의 속도 센서가 고장인 경우 실제차량은 P4 노치로 주행하고 있지만, 두 가지 소프트웨어 모듈 둘 다 속도 센싱 및 거리증가가 이루어지지 않음

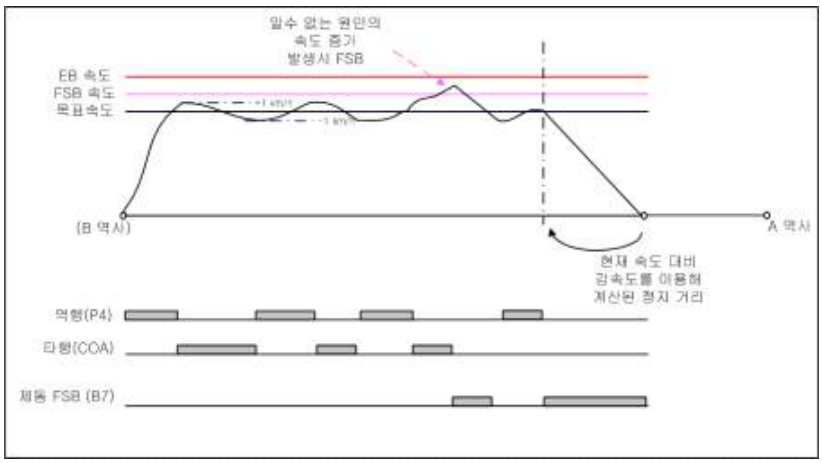


그림 325 제어방법에 따른 흐름도

(나) 출발제어 및 방향전환제어

○ 양측 운전실이 무인운전 모드로 체결되면, TCMS 화면은 강제적으로 START 버튼이 있는 화면으로 자동 전환

○ 사고의 위험을 방지하기 위하여, START 버튼은 반듯이 'B 역사'에서만 출발
○ 차량이 A 역사에 있는 경우에는, 수동으로 B 역사까지 이동
○ 또한 선두운전실의 TCMS는 주행을 완료하면, 방향전환 신호를 주어 운전실을 반대방향으로 바꾸며, 이때 시간 간격 등은 현차에서 튜닝
- ATOSM 주행 완료 후 대기 시간 (약 3초)
- ATOSM 출입문 개방 (옵션)
- TCMS의 방향 전환
- 방향전환 후 ATOSM 대기 시간 (약 3초)
- ATOSM 출입문 닫힘 신호 출력 및 닫힘 확인.
- 출발 전 ATOSM 대기 시간 (약 3초)

나) 유지보수 절차서 및 점검

(1) DC DC 컨버터용 유지보수 절차서

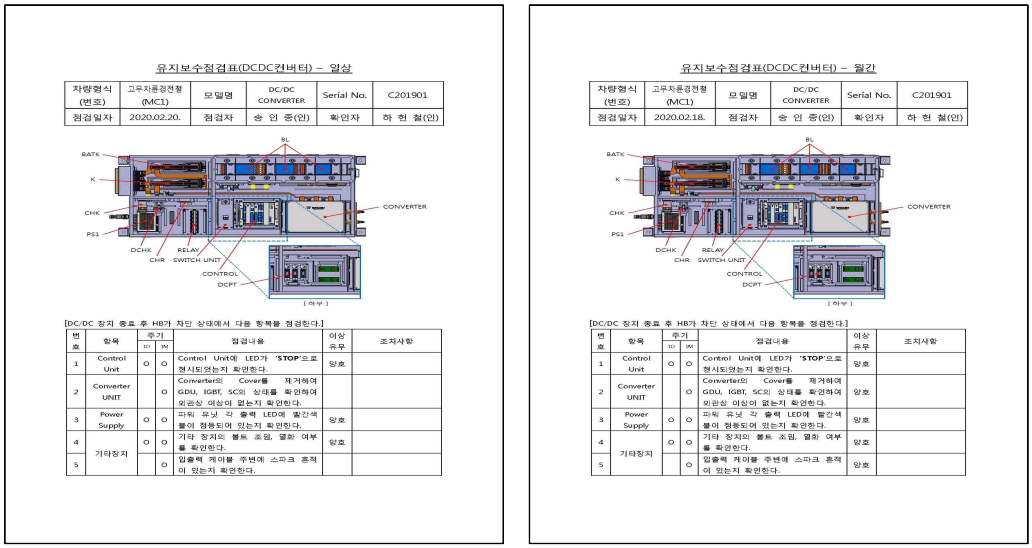
○ 무선급전 차량에 장착된 DC DC(이하 DDC) 컨버터 장치의 유지보수를 시행하는 유지보수 요원이 이를 활용하여 시행할 수 있도록 DDC대한 규격, 사양, 검사, 수선, 분해, 성능시험 시행 및 분해검수 방법에 대해 기술
○ 이 문서를 이해한 유지보수 요원은 관련제품에 대한 정비를 시행할 수 있는 능력을 갖출 수 있게 하기 위함

(2) DC DC 컨버터 주요 부품의 사용 기한과 교환기준

○ 지금까지의 실적으로 판단하여, 차량 제어장치 주요부품의 사용한계는 다음과 같음. 단, 내구년수는 기준치이며, 사용조건에 따라 달라짐

No.	부 품 명	판 정 방 법	내구년수 (기준치)
1	방진 패킹	외관에 의한 열화(내구변형, 균열 등)점검시에 청소 실시	8년
2	권선류	외관에 의한 절연열화(변색, 균열) 점검시에 청소 실시, 열화진단의 실시	8~16년
3	Capacitor	CASE의 볼록함 및 기름 유출	16~20년
4	프린트 기판	절연 열화, Solder열화 및 패턴박리 등	8~16년
7	Power Module	특성확인	16~20년
8	전자접촉기	작동상태 · 접점마모 (동작 빈도에 의함)	8~16년
9	전류센서	특성확인	16년
10	커버 관련	용접부의 부식, 점검시에 청소 실시	8~12년
11	주회로 전선	절연피복의 열화(변색, 균열)	8~16년
12	제어회로 전선	절연피복의 열화(변색, 균열)	16~20년
13	절연판	외관에 의한 절연 열화 (변색, 균열)	16~20년
14	저항기	외관에 의한 변색, 변형	16~20년

(3) DC/DC 컨버터 유지보수점검표



유지보수점검표(DCDC컨버터) – 일상

차량형식 (번호)	고무차륜경전철 (MC1)	모델명	DC/DC CONVERTER	Serial No.	C201901
점검일자	2020.02.20.	점검자	승 인 증(인)	확인자	하 현 철(인)

[DC/DC 장치 종료 후 HB가 차단 상태에서 다음 항목을 점검한다.]

번호	항목	주기 1D	주기 3M	점검내용	이상 유무	조치사항
1	Control Unit	O	O	Control Unit에 LED가 'STOP'으로 형시되었는지 확인한다.	양호	
2	Converter UNIT		O	Converter의 Cover를 제거하여 GDU, IGBT, SCR 상태를 확인하여 외관상 이상이 없는지 확인한다.	양호	
3	Power Supply	O	O	파워 유닛 각 출력 LED에 빨간색 불이 점등되어 있는지 확인한다.	양호	
4	기타장치	O	O	기타 장치의 볼트 조임, 결화 여부를 확인한다.	양호	
5			O	입출력 케이블 주변에 스파크 흔적이 있는지 확인한다.	양호	

유지보수점검표(DCDC컨버터) – 월간

차량형식 (번호)	고무차륜경전철 (MC1)	모델명	DC/DC CONVERTER	Serial No.	C201901
점검일자	2020.02.18.	점검자	승 인 증(인)	확인자	하 현 철(인)

[DC/DC 장치 종료 후 HB가 차단 상태에서 다음 항목을 점검한다.]

번호	항목	주기 1D	주기 3M	점검내용	이상 유무	조치사항
1	Control Unit	O	O	Control Unit에 LED가 'STOP'으로 형시되었는지 확인한다.	양호	
2	Converter UNIT		O	Converter의 Cover를 제거하여 GDU, IGBT, SCR 상태를 확인하여 외관상 이상이 없는지 확인한다.	양호	
3	Power Supply	O	O	파워 유닛 각 출력 LED에 빨간색 불이 점등되어 있는지 확인한다.	양호	
4	기타장치	O	O	기타 장치의 볼트 조임, 결화 여부를 확인한다.	양호	
5			O	입출력 케이블 주변에 스파크 흔적이 있는지 확인한다.	양호	

그림 326 DC/DC 컨버터 유지보수점검표

(4) DC/DC 컨버터용 CHILLER 유지보수 절차서 개요

○ 무선급전 차량에 장착된 DC/DC 컨버터용 CHILLER 수냉각기 장치의 유지보수를 시행하는 유지보수 요원이 이를 활용하여 시행할 수 있도록 CHILLER 수 냉각기 규격, 사양, 검사, 수선, 분해, 성능시험 시행 및 분해검수 방법에 대해 기술

○ 이 문서를 이해한 유지보수 요원은 관련제품에 대한 정비를 시행할 수 있는 능력을 갖출 수 있게 하기 위함에 목적이 있음

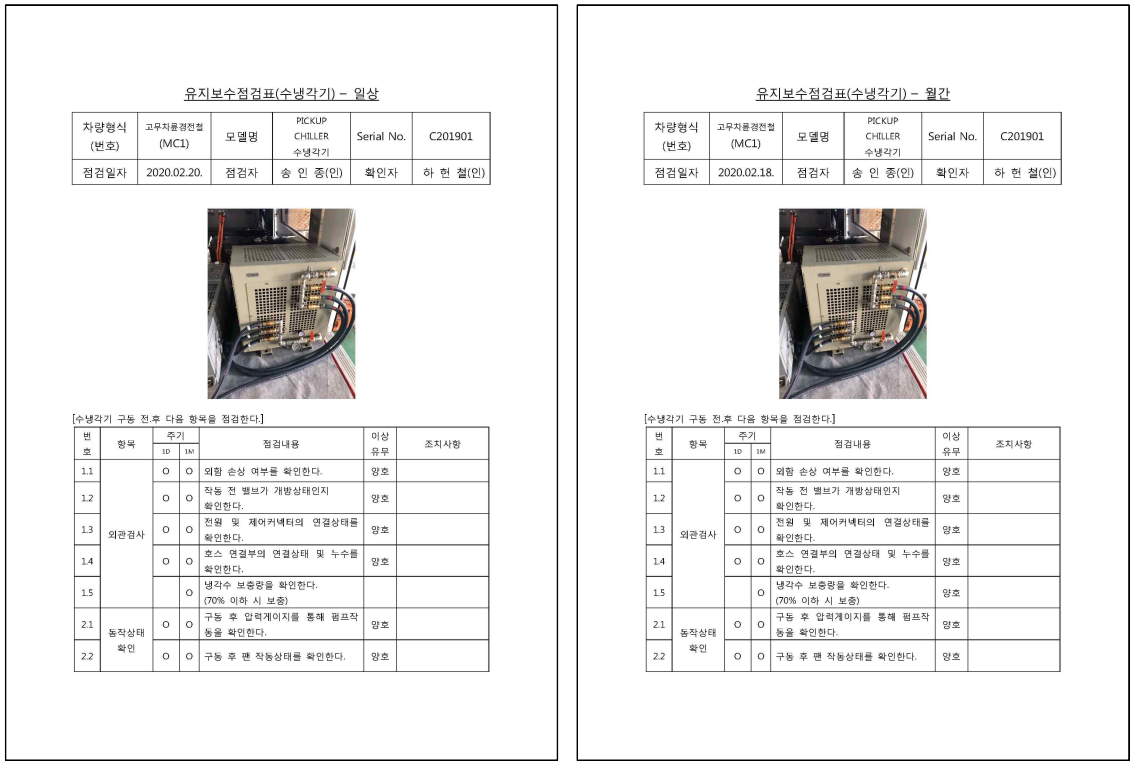
(5) DC/DC 컨버터용 CHILLER 유지보수 절차서 적용 범위

○ DC/DC 컨버터용 CHILLER 수 냉각기 장치의 유지보수 절차서 대하여 적용



그림 327 DDC CHILLER 수 냉각기

(6) DC DC 컨버터 CHILLER 유지보수점검표



유지보수점검표(수냉각기) - 일상

차량형식 (번호)	고무차륜경전철 (MC1)	모델명	PICKUP CHILLER 수냉각기	Serial No.	C201901
점검일자	2020.02.20.	점검자	송 인 종(인)	확인자	하 헌 철(인)

[수냉각기 구동 전.후 다음 항목을 점검한다.]

번호	항목	주기 1D	주기 1M	점검내용	이상유무	조치사항
1.1	외관검사	O	O	외함 손상 여부를 확인한다.	양호	
1.2		O	O	작동 전 밸브가 개방상태인지 확인한다.	양호	
1.3		O	O	전원 및 제어커넥터의 연결상태를 확인한다.	양호	
1.4		O	O	호스 연결부의 연결상태 및 누수를 확인한다.	양호	
1.5			O	냉각수 보충량을 확인한다. (70% 이하 시 보충)		
2.1	동작상태 확인	O	O	구동 후 압력게이지를 통해 펌프작동을 확인한다.	양호	
2.2		O	O	구동 후 팬 작동상태를 확인한다.	양호	

유지보수점검표(수냉각기) - 월간

차량형식 (번호)	고무차륜경전철 (MC1)	모델명	PICKUP CHILLER 수냉각기	Serial No.	C201901
점검일자	2020.02.18.	점검자	송 인 종(인)	확인자	하 헌 철(인)

[수냉각기 구동 전.후 다음 항목을 점검한다.]

번호	항목	주기 1D	주기 1M	점검내용	이상유무	조치사항
1.1	외관검사	O	O	외함 손상 여부를 확인한다.	양호	
1.2		O	O	작동 전 밸브가 개방상태인지 확인한다.	양호	
1.3		O	O	전원 및 제어커넥터의 연결상태를 확인한다.	양호	
1.4		O	O	호스 연결부의 연결상태 및 누수를 확인한다.	양호	
1.5			O	냉각수 보충량을 확인한다. (70% 이하 시 보충)	양호	
2.1	동작상태 확인	O	O	구동 후 압력게이지를 통해 펌프작동을 확인한다.	양호	
2.2		O	O	구동 후 팬 작동상태를 확인한다.	양호	

그림 328 DC/DC 컨버터 CHILLER 유지보수점검표

다) 동적시험을 통한 개선 사항

○ 기존 K-AGT 차량을 무선급전차량으로 아래와 같이 기기배치 재구성하였으며, 공간 협소로 인하여 신규로 차량에 탑재된 전력변환장치(DC DC 컨버터, 픽업장치)의 냉각방식을 수냉식으로 구현하였다.

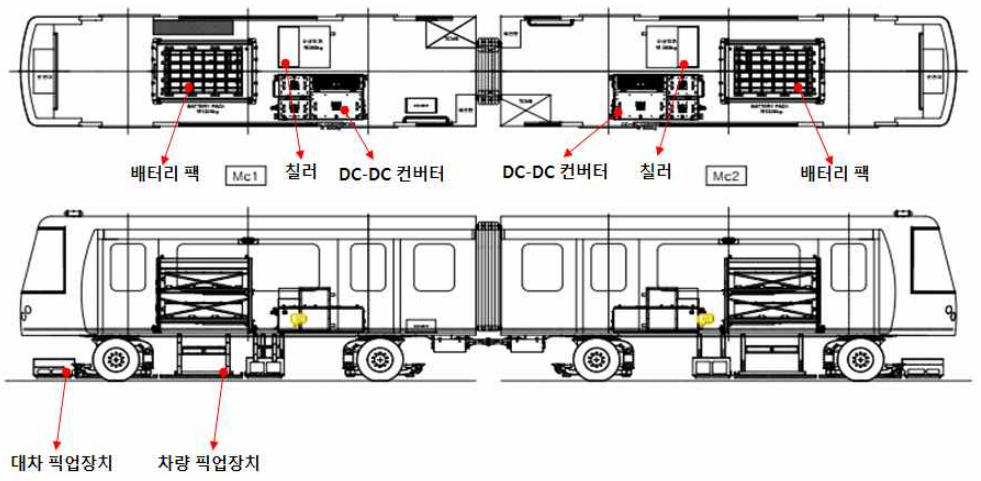


그림 329 동적시험시 차량 배치

○ 1개의 수냉각기로 유로를 직렬로 연결하여 차량 단위별 냉각방식을 적용하였으나, 유로 길이가 커져서 냉각효과가 떨어지는 상태를 확인하여 장치별 냉각기를 별도로 구성하였다.

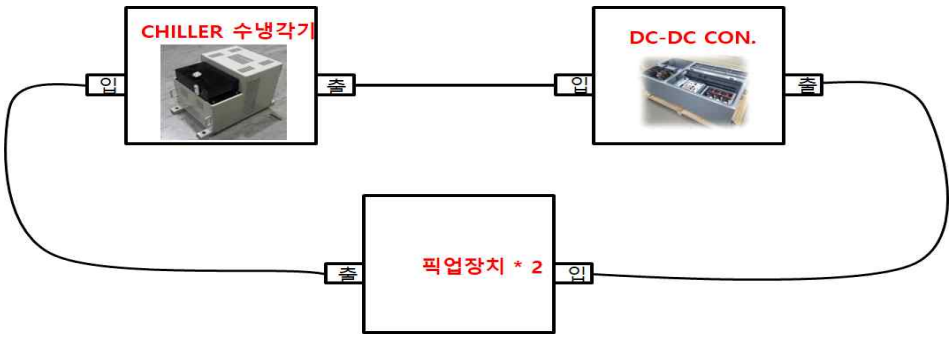


그림 330 차량단위의 냉각방식

○ 동적시험 중에 수냉각기의 연결부가 압력을 초과하여 커플러의 유동을 확인하여 재작업을 실시하여 보완하였다. 수냉각기의 유로 형성이 안되면 전력변환장치 내의 소자의 과열로 인하여 소손 우려가 있는 상태이며, 전력변환장치내의 열감지 센서를 취부하여 보호동작하여 시스템을 보호하는 형태로 구성하였다.

○ 커플러와 호스 연결부 분리로 인해 DC/DC CONVERTER로 냉각수 유입으로 소자 소손 발생 (2019. 08. 08)



○ 향후 무선급전용 차량제작시에는 차량 구성시스템에 적합하도록 무선급전 부품 용량 계산하여 최적의 시스템을 적용하여야 한다. 현재는 6량 1편성의 무선급전용량을 2량 1편성에 탑재하여 시험을 진행하였기에 부품 용량 최적화가 필요하다. 냉각방식에서는 공간적인 사항을 고려하여 수냉각방식을 적용하였으나, 송풍 방식을 별도로 검토가 필요하다.

자. 무선급전 전력안정화를 위한 에너지저장 인터페이스 연구

1) 무선급전 경전철 차량 적용을 위한 에너지 저장장치 기본설계

○ 선행연구 사례조사
○ 경전철 차량시스템 사전 검토
○ 전동차 구조 및 초소형 DC-DC 컨버터와 인터페이스 설계
○ BMS 인터페이스 회로 검토
○ 에너지 저장장치 기본설계안
- 모듈 용량 : 40[Ah] 27.6[V]
- 모듈 수량 : 27 [직렬]
- 1시간 소요 전류량 : 66.67[Ah]
- 120초 충전시 전류량 : 2,000[Ah]
- 모듈 중량 : 14[kg]
- 모듈 크기 : 124(H) X 187(W) X 359(L) [mm]
- 총 중량 : 1,902[kg]

○ 직렬 수량: DC LINK 요구 전압 = 750V 이며, 셀 전지의 전압은 DC 2.4V 이므로, 셀 수량은 750V / 2.4V = 312 EA 를 직렬로 구성해야 한다.
○ 병렬 수량: 배터리가 차량 출발 전 완전 충전된 상태(SOC 95% 이상)라고 하고, 1구간 실제 소모 전력량이 10kWh 이며, 여유율과 손실을 고려한 5개 역 구간에서 총 전력 소모량이 50kWh가 된다.
○ 중량 계산: 총중량은 2,400kg이다.
○ 배터리 모듈 및 단위 Packing 구조 (예)

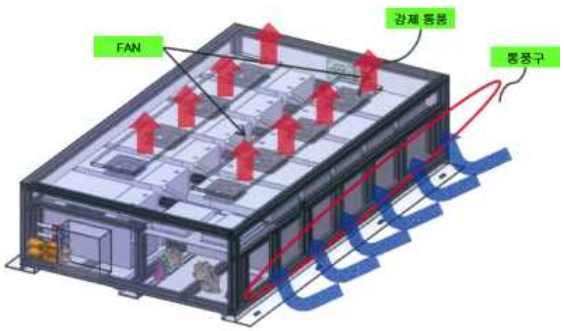


그림 331 LTO Packing 구조

2) 에너지 저장장치 상세설계

○ 무선급전 1MW를 급속으로 충방전이 가능한 에너지 저장장치 용량을 50kWh로 결정함.
○ 50kWh의 전력을 역사 정지시간 등 짧은 시간에 공급이 가능하도록 급속 충방전이 가능한 저장매체 선정
○ 에너지저장장치와 DC-DC 컨버터 간의 인터페이스를 위하여 저장매체의 BMS 시스템을 검토함.

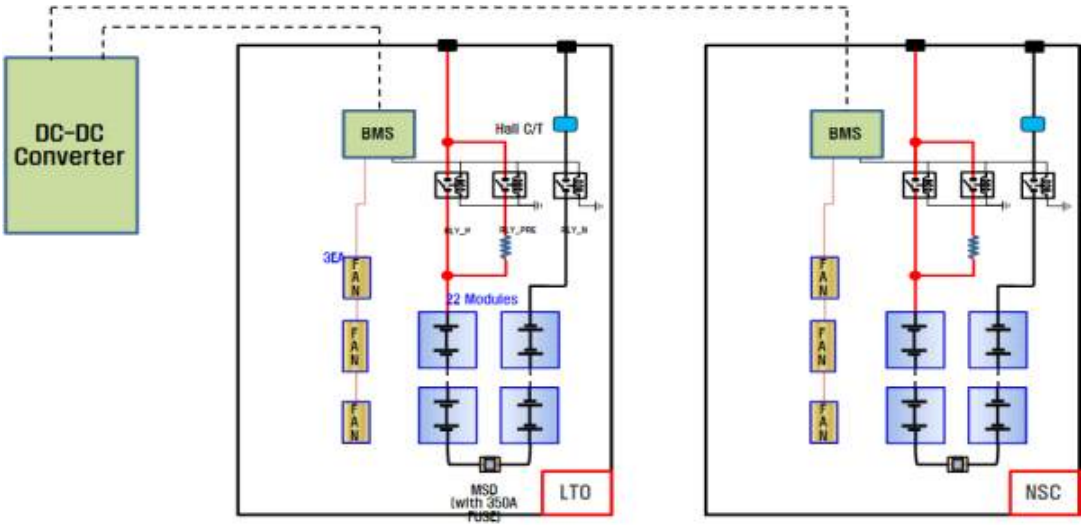


그림 332 배터리팩 구성도

3) 에너지저장장치 시작품(2종) 설계 및 제작

○ LTO 배터리 팩 시작품 설계 및 제작

- 공칭전압 : 607V
- 최대충전전류 : 300A(10초 이내)
- 최대방전전류 : 300A(10초 이내)

○ NSC 배터리 팩 시작품 설계 및 제작

- 공칭전압 : 600V
- 최대충전전류 : 900A(10초 이내)
- 최대방전전류 : 1,200A(10초 이내)

○ 에너지저장장치 시작품(2종) 기능 및 급속 충방전 시험

- 에너지저장장치 LTO 배터리 팩 - 기능시험, High-speed 충방전 시험
- 에너지저장장치 NSC 배터리 팩 - 기능시험, High-speed 충방전 시험

○ 배터리팩 선정 검토

- 무선급전 시스템에 적합한 저장매체를 검토하고, 저장매체를 Set로 구성하여 10C 이상되는 매체 선정 검토
- 무선급전에 적합하도록 30초 이내의 급속 충방전이 가능한 LTO 배터리와 NSC 배터리를 검토

○ 에너지저장장치와 DC-DC 컨버터간의 전력 인터페이스 검토

- 에너지저장장치와 DC-DC 컨버터와의 인터페이스를 위하여 저장매체의 BMS와 통신방식 검토.

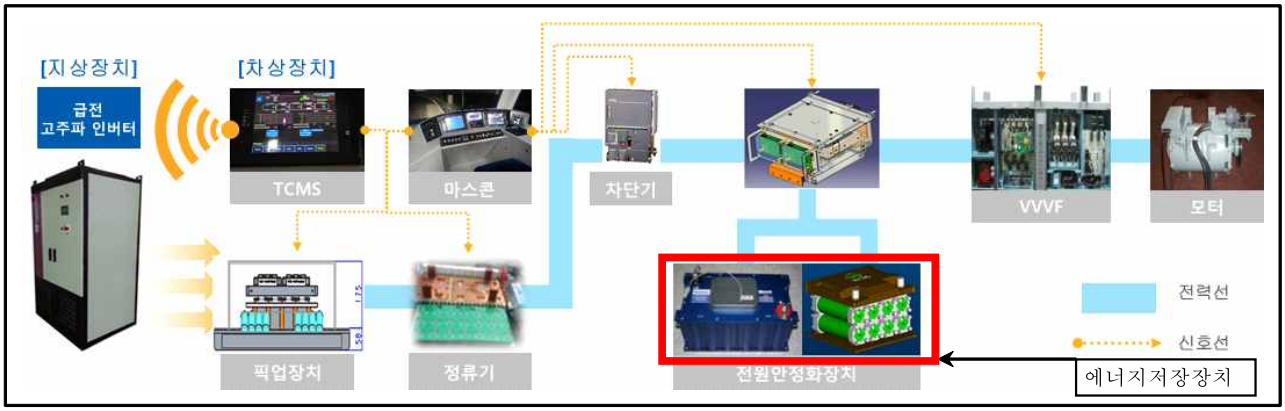


그림 333 에너지 저장장치 시스템 구성

4) 1MW 급전이 가능한 에너지저장장치 설계 및 제작

가) 1MW급 에너지저장장치 상세설계

- 경량전철의 운행이 가능하도록 1MW급전이 가능한 에너지저장장치 설계
- 에너지저장장치와 DC-DC 컨버터간의 인터페이스를 통하여 1MW 출력이 가능하도록 시스템 구성.

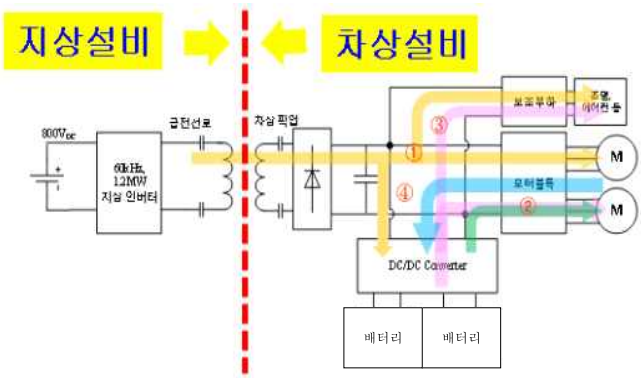


그림 334 에너지 저장장치 시스템 구성

나) 에너지저장장치 제작



그림 335 LTO 배터리팩 사진



그림 336 NSC 배터리팩 사진

다) 에너지저장장치 & 배터리팩 시작품 시험

○ 에너지저장장치 단품시험

- LTO 배터리 팩 크기/무게 검사

- 크기 1.56m X 0.93m X 0.418m = 0.6㎥ - 양호
- 무게 1,792 kg - 양호

○ LTO 배터리 팩 성능시험

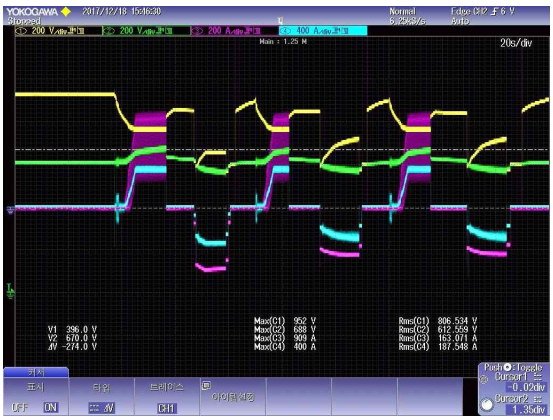


그림 337 LTO 배터리팩 시험파형

표 60 에너지 저장장치 시작품 시험항목

순번	시 험 항 목	형식승인	완성검사	결과
1	외관구조검사	○	○	양호
2	치수검사	○	○	양호
3	과충전 안전시험	○		양호
4	과방전 안전시험	○		양호
5	기능확인 시험	○		양호
6	급속 충전 및 급속 방전시험	○		양호
7	충격 및 진동시험	○		양호
8	액중투입 안전시험	○		양호

주1) 3~6 은 공인기관 입회하에 현장시험 진행.

주2) 7~8 은 공인기관에서 시험 진행.

주3) 8 시험은 액중투입시험으로 IPX7 등급 이상임.

○ 에너지저장장치와 DC-DC컨버터 간의 조합시험



그림 338 LTO 배터리팩 시험사진

5) 에너지 저장장치 정적 신뢰성 시험

○ 정적 신뢰성 시험 환경 구축



그림 339 LTO 배터리팩 추가 2SET



그림 340 에너지 저장장치 시험설비

○ 에너지 저장장치 정적 신뢰성 시험
- 에너지 저장장치 정적 신뢰성 시험(4Km 이상)
- DC/DC 컨버터와 에너지 저장장치를 조합하여 안정된 4Km 정적 신뢰성 시험실시

○ 정적 시험 결과에 따른 시스템 보완
- 에너지 저장장치 유지보수 점검기록
- 에너지 저장장치 정적 신뢰성 시험 보완사항 확인

○ LTO 배터리팩 냉각장치 추가 제작 설치
- 배터리셀 온도상승 억제를 위한 냉각장치 추가설치

○ BMS 종단저항 값 수정으로 CAN 통신 개선

○ 배터리팩 팩 식별 명판 제작

○ 에너지 저장장치 운영관리 소프트웨어 개발
- 에너지 저장장치 상태 정보 모니터링 및 제어 소프트웨어 개발
- 배터리 셀 전압, 전류, 온도 등의 상태 정보를 CAN 통신으로 PC 전송 이상현상(과전압, 고온 등) 발생시 보호회로 동작으로 배터리를 보호
- 에너지 저장장치 운영관리 소프트웨어로 배터리팩 제어 및 상태값(전압, 온도, 전류 등)측정하여 안전한 운영관리

○ 에너지 저장장치 조합시험
- 전원 안정화장치 조합 시험 - 온도측정 시험
- 전원 안정화장치 연계동작 시험
- 과충전 과방전 보호 시험

○ 에너지 저장장치 정적신뢰성 시험 수행결과
- 성능개선 에너지 저장장치 시스템 구축
- 에너지 저장장치 정적 신뢰성 시험

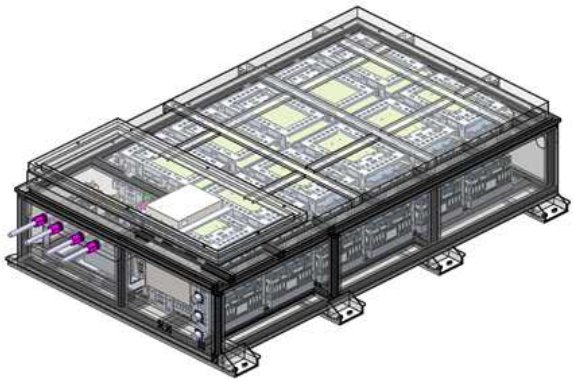
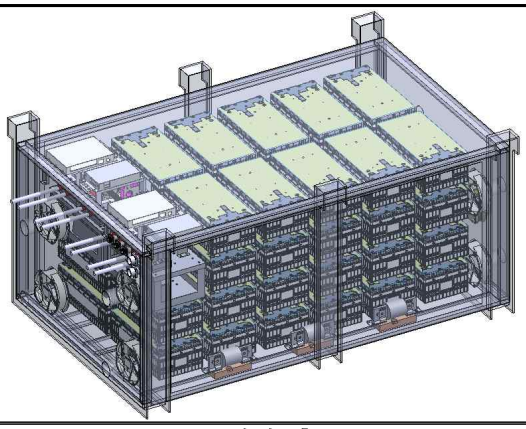
○ 동적신뢰성 시험 진행계획
- 동적 신뢰성 시험 에너지 저장장치 시스템 구축
- 무선급전 시스템과의 동적 신뢰성 시험

○ 에너지 저장장치 정적 신뢰성 시험 고장분석

○ 에너지 저장장치 운영관리 소프트웨어

○ 무선급전차량 에너지저장 장치 축전지팩 개발

○ 무선급전차량에 적용 가능한 고전력 에너지저장 장치 배터리팩 개발

	
개선 전	개선 후
- 기존의 배터리팩의 용량은 40 Ah로 고전력 충/방전에 한계를 갖고 있음. - 무선급전차량 취부시 차량의 하부 언더 프레임 설치가 불가능한 구조로 되어 있음. - (차량 하부에 전장부품이 취부되는 철도차량에 적용이 어려움.) - 편측(한쪽면)에서 차가운 공기와 더운 공기가 순환 되어 냉각억제 효과가 떨어짐.	- 배터리팩의 용량을 80 Ah로 향상하여 고용량의 전력이 충/방전 가능하도록 개발 - 무선급전차량에 적합한 하부 언더 프레임에 설치가 가능한 구조로 개발 - 배터리팩의 양방향에서 차가운 공기를 공급하며, 더운 공기를 양방향에 배출하여 냉각효과를 극대화 함. - 알루미늄 프레임을 적용하여 배터리팩의 무게를 최소화 함.

6) 에너지 저장장치 동적 신뢰성 시험

○ 동적 신뢰성 시험 환경 구축

- 동적 신뢰성 시험을 위한 에너지 저장장치 K-AGT 차량 설치 및 안정된 충/방전 시스템 구축
- 배터리 Cell 온도상승 억제 방안 검토 및 적용으로 배터리 성능이 향상된 에너지 저장장치 시스템 구축
- 배터리팩 이상 발생시 즉각 대응이 가능한 배터리 모듈을 확보하여 안정적인 시험환경 구축

○ 에너지 저장장치 동적신뢰성 시험

- DC-DC 컨버터와 인터페이스 실시하여 동적 신뢰성 시험 진행
- 안정된 배터리팩 BMS 통신 시스템을 구축하여 정확한 배터리 상태정보 모니터링
- 내구성 갖은 배터리팩 RACK을 설계 제작하여 성공적인 4Km 동적 신뢰성 시험 달성

○ 유지보수를 위한 방안 검토

- 배터리팩 운영시 안전사고를 예방 할 수 있는 유지보수 체계 구축
- 배터리팩 및 배터리 예비 모듈을 확보하여 모듈 고장시 신속한 교체 실시
- 정기적 장비 검사를 실시로 안전한 전원 안정화장치 운용

○ 에너지 저장장치 유지보수 절차서

- 각 부품별 점검 항목을 설정하여 체계적인 유지보수 절차서 작성
- 점검 중요도에 따라 일일, 주간, 월간 항목을 설정하여 작성

○ 동적신뢰성 시험 환경 구축

- 동적시험 준비

· 동적 신뢰성 시험을 위한 차량배치 전 에너지 저장장치 상태점검 실시

- 점검항목 및 결과

· 점검목적 : 5차년도 동적 신뢰성 시험을 위한 배터리팩 이상 유/무 확인.

점검항목	기준	결과	비고
배터리 셀 전압	2.1Vdc ~ 2.5Vdc	2.35Vdc	사용전압 기준
배터리팩 전압	554Vdc ~ 660Vdc	621Vdc	사용전압 기준
배터리 온도	-10℃ ~ 35℃	2℃	보존온도 기준
배터리 SOC상태	60% 이상	68.9%	
릴레이 동작 상태	릴레이 전압 확인	이상없음	

- LTO 배터리팩 상태 점검 결과 4SET 모두 기준값을 만족하는 결과를 나타냄.



그림 341 배터리 전압 확인

- 차량배치설계

· DC/DC 컨버터 인터페이스를 통한 차량 설치

· DC/DC 컨버터와 전원, 통신 케이블 연결을 고려한 배터리팩 배치

· 에너지 저장장치 1UNIT 기준 1.3톤+DC/DC 컨버터 1톤-칠러 배선포함

· 차량의 무게 중심을 고려한 설치

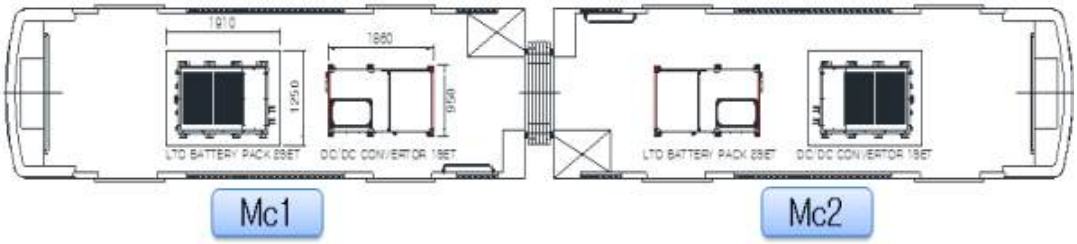


그림 342 에너지 저장장치 차량 배치도

- 배터리팩 Rack 설계

· 안정적인 장착이 가능한 배터리팩 Rack 설계 제작

· 슬라이딩 방식 2단 복층 구조로 배터리팩 점검이 가능한 구조로 제작

· 복층구조의 배터리팩 RACK을 적용하여 차량내부 공간 확보.

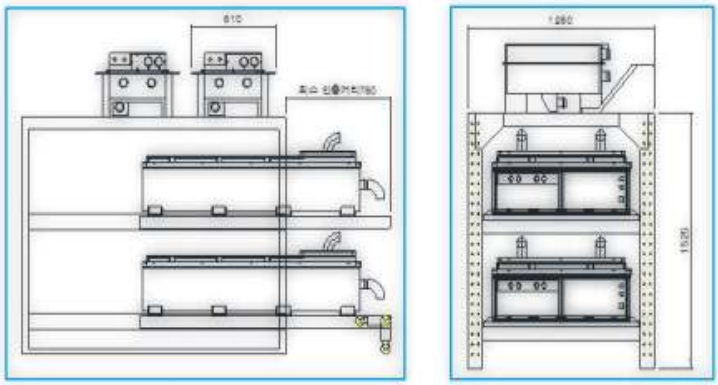


그림 343 배터리팩 Rack 구조

- 에너지 저장창치 Rack 설치

· 차량 운행중의 진동에 견딜 수 있는 내구성을 갖은 RACK 제작 설치

· 배터리팩 Rack 차량 설치 순서

· 배터리팩 RACK 차량 반입 → 배터리 RACK 조립 → 냉각장치 설치→전원 케이블, 통신선 연결 → 에너지 저장장치 배터리 상태 확인



그림 344 배터리 RACK 설치

○ 동적신뢰성 시험 실행

- 에너지 저장장치 차량 배치

· 복층구조의 배터리팩 RACK을 적용하여 차량내부 공간 확보.

· 차량 운행중의 진동에 견딜 수 있는 내구성을 갖은 RACK 제작 설치

· 경량전철 Mc1 → 에너지 저장장치 1호기 탑재(LTO PACK 2SET + DC/DC CONVERTOR 1SET)

· 경량전철 Mc2 → 에너지 저장장치 2호기 탑재(LTO PACK 2SET + DC/DC CONVERTOR 1SET)

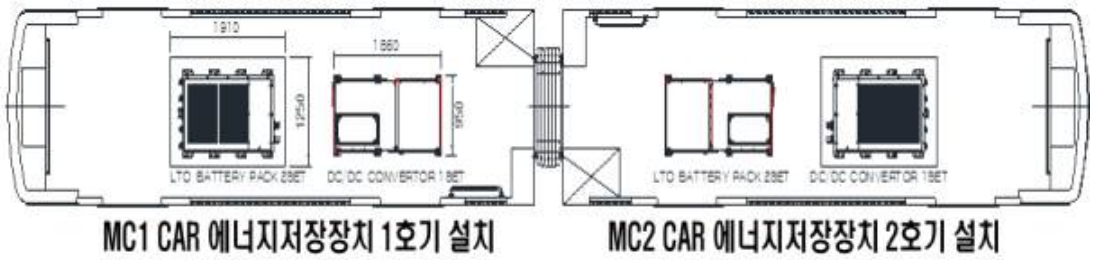


그림 345 에너지 저장장치 K-AGT 차량 설치도



그림 346 에너지 저장장치 K-AGT 차량 설치 사진

○ 차량운행 시험

- 배터리 부하 전력을 이용하여 A역 ~ B역 왕복(2KM) 차량운행 시험 진행
- 기동시 배터리팩 부하전류 ≒ 180A (30km 운행시)
- 1회 왕복 SOC 변화량 약 5~6% 감소
- 배터리 CELL 전압 2.4Vdc, 온도 12℃측정
- 차량운행 운행 시험시 배터리팩 확인사항.
  · 기동시 최대 부하전류 확인
  · 배터리팩 셀 온도 변화 확인
  · 배터리 SOC 변화량 확인
  · DC/DC 컨버터와 유기적인 인터페이스 관리

○ 동적신뢰성 시험 차량개조

- 실용화시 효율적인 공간활용 및 무선급전 차량 시연회를 위하여 에너지 저장장치 설치공간 축소
- 공간활용 방안으로 Mc1 Car에 설치된 에너지 저장장치 1호기 제거
- Mc2 Car에 설치된 에너지 저장장치 2호기만으로 동적신뢰성 시험 진행

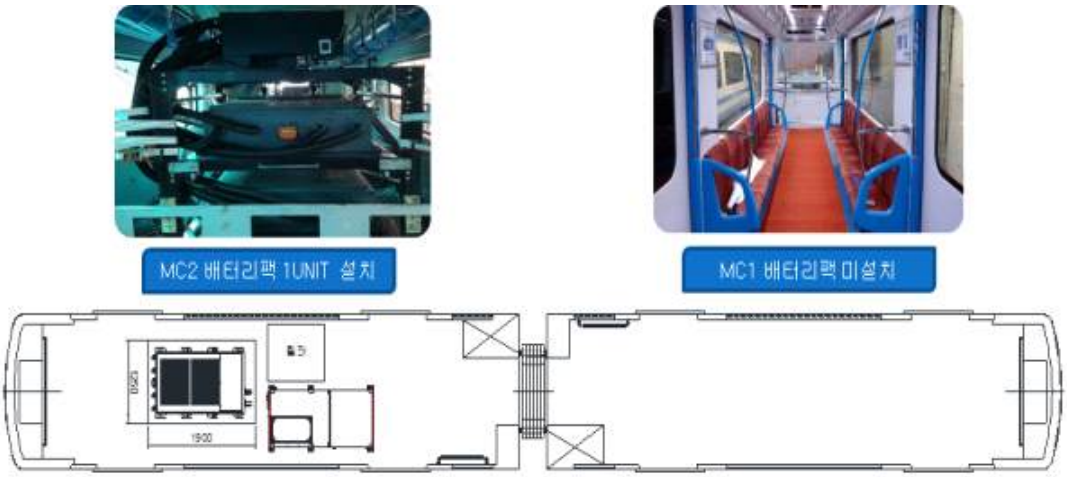


그림 347 차량개조 에너지 저장장치 배치도 및 사진

7) 동적신뢰성 시험 차량운행 결과

○ 에너지 저장장치 차량운행 실적

- 배터리팩 운영현황 : 기존 2 UNIT -> 1UNIT 변경하여 배터리팩 성능을 최적화하여 동적신뢰성 차량운행 시험을 진행함
- 배터리팩 2set 구성 차량운행

○ 배터리팩 운영현황

- 파워링 구간 1 unit 약 3.75C(80A X 3.75) 300A
- 방전회생 구간 1 unit 약 1.25C(80A X 1.25) 100A 충전

○ 동적신뢰성 시험운행 실적

- 19년 4월 ~ 20년 3월 동적신뢰성 시험 실시함
- 20년 3월 4만km 동적신뢰성 시험 목표 달성 예정

○ 신규 LTO 배터리팩 시험

- 현재 운영 중인 LTO 배터리 보다 성능이 우수한 배터리팩 구현 위한 LTO 신규 배터리 시험 검토
- 향후 실용화 연구사업에 보다 우수한 배터리를 적용하기 위함.
- 20년 5월 차량 설치 운행시험 예정

8) 에너지 저장장치 유지보수 절차서

○ 유지보수 절차에 따라 배터리를 최적의 상태로 유지하기 위함.

○ 점검항목에 따른 일상점검, 주간점검, 분기점검으로 분리하여 유지보수 점검 실시

○ 체계적인 점검을 실시하여 안전한 에너지 저장장치 운영이 되도록 함.

○ 유의사항

- 경량전철 차량에 설치하여 안정된 전력을 공급하는 배터리팩을 정비하기 전 반드시 본 지침서를 숙지하여 작업에 임하도록 하고 특히 고전압을 사용하는 배터리팩 이므로 안전을 위하여 고전압 취급에 대한 안전수칙을 반드시 숙지하여야 한다.
- 점검 전

· 점검 장비(각종 계측기)를 확인하여 준비한다.

· 안전장비(안전화, 절연장갑, 안전모, 조명기구 등)를 준비한다.
· 각종 무선급전 장비 주변에 위험 요소를 제거한다.
· 배터리팩과 DC/DC 컨버터간 연결된 전원선이 분리되어 있는지 확인 한다.

- 점검 중

· 육안으로 배터리팩 외함의 손상이 없는지 확인한다.
· 배터리팩 주변에 관련자외 사람이 접근하지 못하도록 안전펜스 설치 및 위험 경고 문구를 부착 한다
· 가선 전압이 완전히 차단되어 있는지 확인한다.
· 안전모, 절연장갑, 절연화를 착용한 후 배터리 점검을 실시한다.

- 점검 후

· 배터리 충/방전을 실시하여 배터리 BMS SOC를 80% 이상의 상태로 유지 시킨다.
· 점검 사항을 빠짐없이 기록한다. 특이 사항이 있는 경우 자세히 적는다.
· 점검한 장치가 사용 가능한 상태인지 한 번 더 체크한다.
· 사용한 공구와 부품은 정리정돈하고 작업현장을 깨끗하게 청소한다.

○ 항목별 유지보수

- 기본 사항

· 정의:배터리팩 외관상태 확인
· 점검 목적:차량 운행 중 배터리팩이 진동이나 외력에 의하여 손상 여부 확인.
· 작업인원:2명
· 작업물품:고조도 LED 작업등 2EA, 토크렌치-M8, M10, M13

○ 점검 내용 및 방법

번호	점검내용	점검방법	필요물품
1	외관 검사 (일상)	1. 배터리팩 외관상태 배터리팩 차량 취부 상태를 확인한다. 2. 배터리팩 외함을 M8 토크렌치를 이용하여 배터리 커버를 개방시킨 후 CELL 부풀림 유/무를 확인하며, 내부 배선 연결 상태, 취부 볼트 조임 상태 등이 완전하게 체결 되었는지 확인한다. 3. DC/DC 컨버터와 고압 입/출력 단자의 볼트가 풀리지 않았는지 M13 토크를 이용하여 확인한다.	토크렌치(M8, M13) 고조도 LED 작업등
2	전압 측정 (월간)	1. 배터리 고압 전원 연결 케이블(+측, -측)를 분리 시킨다. 2. 멀티테스터기를 이용하여 릴레이 접점의 + 측, - 측 양단을 접촉하여 전압이 607.2V 이상인지 확인한다. 3. 검측 기록지에 측정 전압을 기입한다.	안전모 절연장갑 절연화 멀티테스터기
3	온도 측정 (월간)	1. 배터리 고압 전원 연결 케이블(+측, -측)를 분리 시킨다. 2. 온도계측기를 이용하여 배터리 모듈의 온도가 25℃ 이하 인지를 체크한다. 3. 검측 기록지에 측정 온도를 기입한다.	안전모 온도측정 계측기
4	BMS 상태확인 (월간)	1. DC/DC 컨버터와 연계하여 BMS정보를 전달 받을 수 있는 통신선을 연결 한다. 2. 배터리 BMS 전원을 공급한 후 통신이 원활하게 되는지 확인(모니터링) 한다. 3. BMS 센서로 측정된 배터리 전압, 전류, 온도 측정값을 기록지에 기록한다. 4. BMS 상태 모니터링을 통하여 SOC 충전상태가 50% 이상 되는지 확인한다. 5. 배터리팩 릴레이 수동 ON/OFF 동작을 실시하여 정상적으로 릴레이가 제어되는지 확인한다.	노트북, CAN 통신선, CAN 통신 커넥터

○ 이상 발생 시 조치

번호	점검내용	유형별 조치사항		
		유형	조치사항	필요물품
1	외관 검사	볼트나 커넥터 접속 상태가 불량한경우	-볼트 체크 마크 부위가 일치하지 않는 경우 토크렌치를 이용하여 단단히 조인 후 볼트체크를 실시한다. - 커넥터 접속이 불량 하거나 손상이 발생된 경우 커넥터 완전 체결 또는 교체를 실시한다.	토크렌치(M8, M13) 고조도 LED 작업등
2	전압측정	전압 측정값이 607.2V 이하로 측정된 경우	배터리팩 내부 배선 및 커넥터가 이탈 되어 있는지 확인하여 다음과 같이 조치한다. - CELL 모듈 고장시 : 교체(모듈단위) - CELL 고장시 : 교체(모듈단위)	안전모 절연장갑 절연화 멀티테스터기
3	온도측정	배터리팩 내부 측정 온도가 30℃ 이상으로 측정된 경우	- 배터리 전용 에어콘 상태를 확인하여 작동이 되지 않을 경우 에너콘 교체를 실시한다. - 배터리팩 전용 에어콘을 가동하여 배터리팩 내부 온도를 25℃ 이하의 상태가 되도록 한다.	안전모 온도측정계측기
4	BMS 상태확인	SOC 충전상태 확인시 50% 이하 일경우	CELL의 온도가 상온(0℃ 이상)에서 80%이상 충전을 진행하며, 충전이 되지 않을 경우 모듈 단위의 전압을 측정하여 불량 모듈을 교체한다.	노트북, CAN 통신선, CAN 통신 커넥터
		배터리팩 릴레이 수동 ON/OFF 동작 실행시 BMS를 통한 제어가 되지 않을 경우	릴레이 +, -측 접점 상태를 확인하여 불량 접점이 확인 될 경우 교체를 실시한다.	노트북, CAN 통신선, CAN 통신 커넥터

○ 관련 서식 (기록지)

- 점검 항목별로 점검한 결과를 기록할 수 있게 자유롭게 양식을 작성
- 점검 방법에 적은 내용이 잘 연계되도록 작성
- 유지보수표

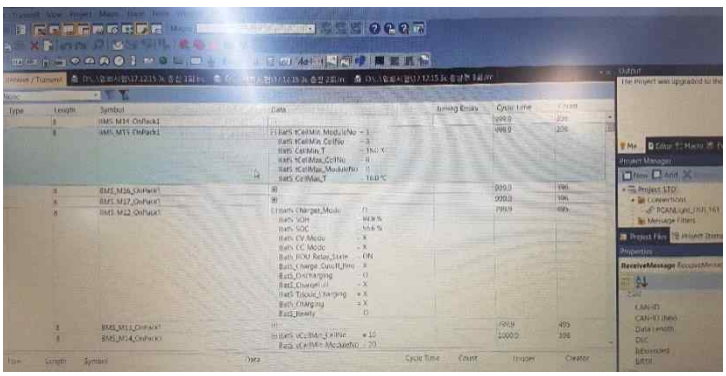
<table>
<tr><td colspan="5">배터리팩 점검 결과</td></tr>
<tr><td>항목:</td><td colspan="2">배터리팩</td><td>점검유형:
(동그라미 체크)</td><td>일상, 정기
(분기, 반기, 1년, 3년)</td></tr>
<tr><td>날짜:</td><td colspan="2"></td><td>점검자:</td><td>(인)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">번호</td><td colspan="2">점검내용</td><td rowspan="2">결과 (양호/교체/
불량)</td><td rowspan="2">조치사항</td></tr>
<tr><td>항목</td><td>기준</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1</td><td rowspan="3">외관검사</td><td>외함검사 : 외함 손상이 없을 것.</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>배선검사 : 각종 케이블이 완전하게 연결 되어 있을 것.</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>볼트체결 상태 : 각 부위의 볼트가 완전하게 체결되어 있을 것.</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>전압측정</td><td>측정 전압이 607.2V 이상일 것.</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td>온도측정</td><td>배터리 모듈 온도가 25℃ 이하 일 것.</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">BMS
상태확인</td><td>SOC 상태 : SOC 충전 상태가 50% 이상일 것.</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>릴레이 동작 상태 : 수동으로 ON/OFF 제어를 실시하여 정상동작 할 것.</td><td></td><td></td></tr>
</table>

○ 유지보수 고장보고서

정밀고장보고서(에너지 저장장치)-고장번호(1)

고장 발생 시 고장내용 및 조치내용을 상세히 기술한다..

설치역	A역사 ~ B역사	적용차량	MC1
모델명	LTO Battery Pack	Serial No.	LTO Battery Pack No. 1.3
고장일	2019.05.02/10.01/11.20/12.13	고장시간	5:22 ~ 10:04
고장확인자	이수길(철도연)	고장내용	배터리 BMS FAULT

고장모드	부품손상 / 기능저하 / 이상동작 / 보호정지 / 기타
고장검지방법	육안확인 / LED 지시 / 시스템 고장검출 / 계측 시스템 분석
고장유형	□ A : 안전사고발생 □ B : 운행정지 또는 기관차에 의한 입환 □ C : 운행지연(10분 이상 1시간 이내) ■ D : 운행지연(10분 이내) □ E : 고장무시 차량운행
고장설명	- MC1 에너지 저장장치 BMS에서 FAULT 현상이 나타남 - BMS FAULT 현상 감지로 DDC컨버터 동작 정지됨(보호동작 실행)
고장원인	- 배터리 순간적인 과전류 및 온도상승 및 저하로 인하여 발생한것으로 추정됨.
조치내용	- BMS FAULT 현상을 DDC컨버터에서 감지 후 보호동작이 실행되어 차량운행이 일시적으로 중지되었음. - DDC 컨버터를 RESET 시켜 정상동작 상태를 확인후 차량운행을 재게함.  <배터리 BMS FAULT>
수리소요시간	측시처리
향후계획	- 차량운행 초기 운생상태 모니터링을 주시하여 BMS FAULT 현상발생시 측각적인 DDC RESET 실시 - DDC 컨버터 차단기에 와이파이 무선 플러그를 설치하여 원격으로 DDC RESET이 가능하도록 개선함.

정밀고장보고서(에너지 저장장치)-고장번호(2)

고장 발생 시 고장내용 및 조치내용을 상세히 기술한다.

설치역	A역사 ~ B역사	적용차량	MC1
모델명	LTO Battery Pack	Serial No.	LTO Battery Aircon No. 1.2
고장일	2019.06.18/09.26(2회 발생)	고장시간	15:20/15:25
고장확인자	이수길(철도연)	고장내용	배터리 냉각장치 고장

고장모드	부품손상 / 기능저하 / 이상동작 / 보호정지 / 기타
고장검지방법	육안확인 / LED 지시 / 시스템 고장검출 / 계측 시스템 분석
고장유형	□ A : 안전사고발생 □ B : 운행정지 또는 기관차에 의한 입환 ■ C : 운행지연(10분 이상 1시간 이내) □ D : 운행지연(10분 이내) □ E : 고장무시 차량운행
고장설명	- MC1 에너지 저장장치 2번 냉각기 동작이상 발생으로 3번 배터리팩 온도 상승됨을 감지.(2019.6.) - MC1 에너지 저장장치 1번 냉각기 동작이상 발생으로 1번 배터리팩 온도 상승됨을 감지.(2019.9.)
고장원인	- 배터리 냉각기 제조사 확인결과 냉각기 콤프레셔 고장으로 확인되어 수리함.
조치내용	- 배터리팩 예비 냉각기를 구매하여 2019.6.18 현장 교체를 실시.(MC1 2번 냉각기 교체) - 현장보유 중인 배터리팩 예비 냉각기로 2019.09.26 현장 교체를 실시.(MC1 1번 냉각기 교체) - 19.6.18 1회, 19.9.26 1회 총 2회 냉각기 교체를 실시하여 차량운행을 재게함.  <배터리 냉각기 교체>
수리소요시간	1시간
향후계획	- 배터리팩 냉각기 예비품을 현장에 비치하여 고장 발생시 즉각적인 교체가 가능하도록 초치함.

정밀고장보고서(에너지 저장장치)-고장번호(3)

고장 발생 시 고장내용 및 조치내용을 상세히 기술한다.

설치역	A역사 ~ B역사	적용차량	MC1, MC2
모델명	LTO Battery Pack	Serial No.	LTO Pack No. 1,2,3,4
고장일	2019.07.05 ~ 2020.01.09 (25회 발생)	고장시간	05:02 ~ 15:02
고장확인자	이수길(철도연)	고장내용	배터리 셀 온도 상승

고장모드	부품손상 / 기능저하 / 이상동작 / 보호정지 / 기타
고장검지방법	육안확인 / LED 지시 / 시스템 고장검출 / 계측 시스템 분석
고장유형	□ A : 안전사고발생 □ B : 운행정지 또는 기관차에 의한 입환 ■ C : 운행지연(10분 이상 1시간 이내) □ D : 운행지연(10분 이내) □ E : 고장무시 차량운행
고장설명	- 7월 ~ 9월 여름철 주위온도 상승으로 배터리 셀 온도가 약 48℃ 까지 상승되어 배터리 안전을 위하여 차량 운행을 멈춤.
고장원인	- 동적 신뢰성 시험 차상장비의 차량설치 운영상 객차 내부의 밀폐된 공간에 다수의 발열 장비가 구성되어 배터리 냉각에 어려움 있었으며, 여름철 무더위로 인한 주위온도 상승으로 배터리 온도가 상승한 것으로 사료됨.
조치내용	- 배터리 셀 온도가 44℃ ~ 48℃ 온도 분포에서 배터리 가동을 멈추고 약 1시간 가량 냉각기만 가동시켜 배터리 셀 온도를 낮춘 후 차량운행을 재게함.  <배터리 온도상승 냉각>
수리소요시간	1시간
향후계획	- 향후 실용화 적용시 배터리 냉각 기능이 강화된 배터리팩 설계 및 배터리 설치 여유공간을 확보하여 주위온도를 낮추어 설계함.

차. 도시철도용 무선충전 전력설비 및 인체 안전 기준 개발

1) 표준 및 논문 등에 대한 사전 연구 자료 검토 확인 (1차년도)

가) 급전장치 전기 안전 기준 요구 사항 분석

(1) 급전장치 전기 안전 기준 요구 사항 분석

○ 무선충전 철도용 전력설비 안전 운영 요구사항 분석

○ 플랫폼 등 불특정 다수 이용구간 감전보호 요구사항 분석

나) 급전장치 전기안전 요구사항 분석

(1) 급전장치 전기안전 요구사항 분석

○ 전력시스템 및 설비별 전기안전 요구사항 도출

(2) 철도용 전력시스템 전기안전 요구사항 분석

○ 무선충전 철도용 전력시스템 주요 설비 요구사항 분석

○ 무선충전 전기철도 관련 각 설비별 요구사항 분석

2) 사전 연구 자료 검토를 통한 기준(안) 확인 (2차년도)

가) 기준(안) 요구사항 초안 도출

(1) 무선충전 철도용 전력설비 영향 기준 해결방안 제시

○ 전력인버터, 수배전반 등의 차단기류 오작동 현상과 안전기준 및 케이블류의 유도영향 도출

○ 전력설비 유해현상인 유도현상으로 인한 안전공간, 차폐 방안 제시 및 이상전류 유입으로 인한 TN 기반 접지시스템 제시

(2) 플랫폼 등 불특정 다수 이용구간 감전 위험성 기준 해결방안 제시

○ 노출 도전부의 전자기장 내 유도현상 발생 및 사고발생시 이상전류 유입시 인체 및 설비 전기안전 확보 필요

○ 전기적 위해현상 보호를 위하여 기존 접지 시스템의 개선 방안 제시

(3) 심실세동, 심정지 등 인체 위해 조건 방지를 위한 방안 제시

○ 무선전력전송 손실분으로 인한 전자기장 환경에 노출 시 유도현상으로 인한 감전 및 신체 내부 전기기기의 교란으로 인한 위해현상 발생 가능

○ 60 kHz 영역의 주파수의 경우 전기적 위해현상과 열적 위해현상이 동반되어 발생함

○ 전자기장 영향으로부터 보호할 수 있는 안전공간 확보 및 차폐 유효성 증가와 더불어 이상전류 발생 시 보호도체를 이용한 TN 접지 시스템을 통한 안전 확보 방안 제시

나) 2차년도에 기준(안) 초안 도출, 5차년도에 최종 급전구간전기안전성 평가(안) 개발 계획

○ 기준(안) 개발에 있어서 설비보호와 인체보호를 구분, 각각의 국내·외 표준 및 단체 표준들에 의거하여 기준 제시

○ 전기안전 확보 기준은 철도안전법, 한국공업규격(KS), 국제전기기술위원회규격(IEC), 유럽규격(EN) 등에 의거하여 기준 제시

다) 최종 전기안전 기준(안)의 안정성 확보를 위하여 3,4차년도 현장 검증 및 기준 신뢰성 검증 계획

○ 도시철도용 무선충전 전력설비 및 인체 전기안전 기준(안) 안전성 확보 및 신뢰도 검증을 위한 실증실험 설계

○ 기존의 변압기, 수배전반 기반의 전력설비에 무선전력전송 환경을 위한 전력인버터 급전선로가 추가되어, 이에 따른 장비구축 설계를 통한 전기안전 확보 기술 제시

라) 급전 전기안전 기준 해결방안 제시를 통한 기준(안) 요구사항 초안 도출

(1) 국내 기술 초안 취합 및 전문가 자문을 통한 전력설비 및 인체 보호를 위한 전기 안전 기준(안) 요구사항 초안 도출

○ 무선급전 시스템을 적용하는 도시철도의 전력설비 및 인체의 전기안전을 확보할 수 있는 시설기준 및 성능기준 개발

○ 기존 기준의 개정(안) 형태의 기준(안) 개발

(2) 무선충전 시스템의 구체적인 분류를 통한 초안 도출

○ 전력설비 분류를 통한 수배전반, 전력인버터, 급전케이블에 영향을 미치는 차단기, 유도현상 도출

○ 인체 위해 현상의 접촉에 의한 감전과 유도영향으로 인한 인체 내부 전기기기 교란, 화상 등의 영향으로 분류

(3) 플랫폼 등 불특정 다수 이용구간 감전 위험성 기준 해결방안

○ KS C IEC 60364, KS C IEC 61009-1 기반의 전기설비 보호관련 기준 확보

○ KS C IEC 60479 기반의 인체 보호관련 기준 확보

○ 접촉 한계전류의 시간에 따른 영향 분석 / Dalzeil 모델

$$I = \frac{116}{\sqrt{t}}[mA]$$ (I=접촉한계전류, t=시간[초], 116 : 무게 상수)

(4) 플랫폼 등 불특정 다수 이용구간 감전 위험성 기준 설계 및 분석

○ 전자기장 영향 등 일상조건에서의 감전 위험성 기준 분석 및 안전기술 검증 방안 설계

○ 단락, 침수 등 사고조건에서의 위해루프 검토를 바탕으로 위험성 검증 및 안전기술 유효성 확인 방안 설계

마) 장비구축설계(해결방안 제시)

(1) 유도현상 억제를 위한 방안으로 최적의 접지 시스템 설계 (TN 접지, mesh 접지)

○ 환경구성(토목부, 전력부, 인근 도전부)와 시스템구성(급전부, 집전부)으로 구분하여 설계

(2) 무선충전 효율 향상 및 오동작 등의 문제를 해결하기 위한 차폐 방안 설계 (페라이트 코어 등)

○ 도시철도용 무선충전 전력설비 및 인체 전기안전 기준(안) 안전성 확보 및 신뢰도 검증을 위한 실증실험 설계

바) 급전 전기안전 해결방안 설계 (기준 요구사항 실증실험)

(1) 무선충전 철도용 전력설비 및 인근 비충전 도전부 유도 영향 실증

○ 접지 및 차폐로 인한 전력품질 향상 및 이상 유도현상 감쇄 여부 실증

(2) 상정 전기재해 상황 (지락 및 단락, 침수 등) 에서의 위해 영향 실증

○ 최적 접지시스템 구축을 통한 전력설비 및 인체 전기안전 위해요소 상쇄 여부 실증

3) 현장 검증 시험 결과 확인 (3차년도)

가) 급전장치 전기안전 해결방안 제시

(1) 무선충전 철도용 전력시스템 전기안전 해결방안 제시

○ 급전장치 전기안전 위해상황 분석

○ 급전장치 전기안전 해결방안 제시를 위한 실험 설계
○ 급전장치 전기안전 해결방안 실증을 위한 환경 설계
○ 물리·화학적 특성을 기반으로 한 실험 설계
○ 실제 무선전력전송 환경과 유사한 조건을 설계하여 실증 실험 수행

(2) 무선충전 전기철도 관련 각 설비별 세부 운전 안전 해결방안 제시
○ 급전장치 위해상황 보호방안 제시
○ 차폐막 물질에 따른 영향 분석
○ 차폐막 두께에 따른 영향 분석
○ 방열 구조에 따른 영향 분석
○ 수직구조 차폐막 이격거리에 따른 영향 분석
○ 수평구조 차폐막 이격거리에 따른 영향 분석

나) 급전장치 전기안전 설계 및 분석
(1) 무선충전 철도용 전력시스템 전기안전 방안 설계 및 분석
(2) 무선충전 전기철도 관련 각 설비별 세부 운전 안전 방안 설계 및 분석
○ 급전장치 전기안전 실증 실험장 설계
○ 급전장치 전기안전 실증 실험 설계 및 분석
○ 전자기적 특성에 입각한 무선전력전송 환경 실험 설계
○ 급전장치 전기안전 확보를 위한 실험장 설계
○ 급전장치 전기안전 확보 실증실험 설계 및 분석 완료

4) 전력설비 시설 기준 개정(안) 검증 (4차년도)

가) 급전 전기안전 기준 검증 및 개선
(1) 급전장치 전기안전기준 검증 및 개선
○ 플랫폼 등 불특정 다수 이용구간 감전 보호 안전 기준 검증 및 개선
- 급전부, 인근 도전성부(플랫폼 등) 의 전기안전 기준(안) 개발을 위한 표준화된 문서인 단체표준 개발 수행을 통한 기준 검증 및 개선 수행
- 전기안전 필수 요구사항 개발을 통한 전기안전 기준(안) 제시 항목, 내용, 근거 등 확보
· 일반적인 사용환경과 전기적인 전기환경으로 구분하여 개발
· 급전부의 안전성 요구사항
①급전부 안전성은 전력변환장치, 급전케이블, 공진형 캐패시터로 구분하여 개발
②전력변환장치는 DC → 60 kHz 변환하는 주전원부와 제어부등을 포함한 보호장치부로 구분하여 개발 / 전기안전을 위하여, 주전원부는 외관검사, 절연저항, 절연내력의 확보가 필요하며, 절연내력의 경우 설비의 운영상 문제에 기반하여 시험성적서로 대체할 수 있음 / 보호장치 검사는 다양한 환경에 대한 동작상태 등을 확인할 수 있도록 함
③급전케이블은 kHz 주파수 환경에 적합하도록 리쯔와이어 케이블 등 표피효과 등을 효율적으로 적용할 수 있는 대상으로 설치되어야 하며, 내압 등의 문제를 해결하기 위하여, KS C IEC 60502-1 정격 전압 1kV~30kV 압축 성형 절연 전력 케이블 및 그 부속품 등에 의해 시험되어야 함 / 관련된 내용은 육안검사,

절연저항, 절연내력 등이 포함되며, 추가적으로 이격거리, 지중약전류전선 및 토목 구조물의 적합 여부 등이 고려되어야 함.

④공진형 캐패시터는 무선전력전송을 위한 60 kHz 주파수를 만드는데 필요하며, 케이블 전압을 분산시키는데 필요하고 적절한 위치와 값을 결정하는 것이 전기안전 확보를 위해 중요한 사항이며, 철도환경에 적용을 위하여, KS R 9197 철도 신호 보안 부품사용

⑤ 충격 시험 방법을 수행하여야 하며, 필요할 경우 KS R 9193 철도 신호 보안 부품의 절연 저항 및 내전압 시험 방법 등도 추가.

· 인근 도전부의 안전성 요구사항

① 약전류전선에서의 유도장해 보호는 케이블은 기설 약전류 전선로에 대하여 누설전류 또는 유도작용에 의하여 통신상의 장해를 주지 않도록 기설 약전류 전선로로부터 충분히 이격 시키거나 기타 적당한 방법으로 시설하여야 하므로 이를 확인

② 인체 및 설비보호는 비접촉 전기차 충전설비에서 부하상태 및 무부하상태에서 발생할 수 있는 유도현상에 의해 유도전류로 인한 전기적 위해와 유도가열로 인한 열적 위해상황을 고려. 유도전류에 관련된 인체 직간접적인 규격은 적용규격은 인체의 임피던스를 규정하는 KS C 60479-1, IEC Report 479-1 Appendix A, ANSI/IEEE Std 80 규격과 접촉허용전류를 규정하는 KS C 60479-2에 따름

③ 인체 전기 위해성의 기준인 심실세동은 KS C IEC 60479-2, ICNIRP GUIDELINES, 철도 단체표준, KR E-04050 접지, Dalziel 모델 등에 따르며 심실세동 영향은 직류보다 교류에서 크며, 높은 고주파보다는 저주파에서 더 큼.

④ 열적 위해상황의 경우 분진이 많은 장소에서 화재, 가연성 가스가 존재하는 장소에서 폭발 등의 위해상황을 발생시킬 수 있음.

⑤ 접촉 한계전류의 경우 KS C IEC 61201 규약 접촉전압 한계의 이용에 따라 기존 상용주파수(60 Hz) 환경에서 기준값인 15 mA를 유지(ICNIRP 1998, 60 kHz에서 제시한 224 mA 보다 엄격) / 세부사항 참고 : 단체표준 SPS-C KESCO-EV-1-7395 : 2020, 전기수송설비용 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항

○ 산업적용 및 정부 규제를 고려한 무선충전 전력설비 기준 초안 개선

- 전기안전 기준 검증 및 개선을 위한 단체표준 기술자문단 운영 및 자문단 회의 개최

· 단체표준 원안 작성에 산·학·연 전문가로 구성된 13인의 기술자문단 운영

· IEC TC 120 convener 경험이 있는 한국기술교육대학교 노대석 교수 위원장 추대

· 기존 전기버스, 전기철도 개발 및 표준화 경험이 있는 한국과학기술원, 한국철도기술연구원 연구진 위원선정

· 시험인증 및 향후 운영 적용 관련 관련 한국산업기술시험원, 광주광역시도시철도공사 위원선정

· 급전부와 집전부 개발업체인 그린파워, 전기버스 참여업체인 WEE, 전기차관련 배터리업체인 세방전기, 전기안전 관련업체인 EMF safety 등 관련업체 포함을 통한 산업계 의견수렴

- 전기안전 기준 검증 및 개선을 위한 기술자문단 회의 개최 / 계획보고-결과보고 수행
  · 의견수렴을 통하여, 포괄적이고 활용도 높은 '전기수송설비 무선전력전송시스템 관리지침' 제목 선정
  · 적용범위 개발에 있어서 일반사항, 급전부, 집전부, 인근도전부로 구분
  · 급전부는 전력변환장치, 급전케이블, 공진형 캐패시터로 범위 제한, 이에대한 전기안전 요구사항 및 이를 위한 시험 및 측정방법 제시 (제작업체인 그린파워, 동원건설, 대동콘덴서 등과 협의하여 산업발전에 저해되지 않으면서 전기안전을 확보할 수 있는 수준으로 기준제시)
  · 집전부는 집전코일, 공진형 캐패시터, 정류기부 등으로 구성
  · 인근도전부는 무선전력전송이 일어나는 인근 공간으로 도전율을 가지고 유도현상이 일어나는 대상이 위치하는 곳으로 통상적으로 사람들이 있는 정류장과 전력설비가 이에 포함

나) 급전장치 전기안전 검증 및 개선

(1) 급전장치 전기안전 검증 및 개선

○ 사고(지락, 단락 등) 발생시 특성 검증 및 개선

- 사고(지락, 단락 등) 발생시, 접지를 통한 제거 때 특성 검증을 위한 무선충전 철도용 접지시스템 구축(안) 제안 수행
- 사고(지락, 단락 등) 발생시, 효율-손실 관계에 입각한 급전전기안전 상태 감시 알고리즘 개발에 기반하여 급전환경 특성 검증 및 개선 수행

○ 무선충전 철도용 접지시스템 구축(안)제안

- 전기적 위해성의 경우 현장 적용 방안에 따라 차이점이 발생, 열적 위해성의 경우 에너지가 넓은 공간에 분산되어, 수 ℃ 범위 이내로 위해도 낮다고 판단
- 전기적 위해성의 경우 현장에 따른 차이가 발생할 수 있어, 이에 대한 실험 수행
- 단위 면적당 mesh 구성에 따른 영향 확인을 위하여 기본이 되는 유도현상 조건 / 35 kW 급의 500 A 급전 전류 조건, 집전부 중심 기준 (x축, y축) = (0.0 m, 1.0 m) 위치에서 측정, 기준폐루프는 22d 단면적, 1m 길이 철근 두개를 1m 이격거리를 갖는 구조로 설계
- mesh 구성에 따른 유도전류 크기를 측정
- 100 A, 200 A, 500 A 조건에서 1 × 1 구조의 메쉬구조를 갖는 인근 도전부에 흐르는 유도전류 측정
- 접지시스템 구축시, 적정 메쉬구조 필요, 500 A 급전케이블 중심으로부터 1 m 이격거리시, 유도전류 최대 20.3 A 발생하며, 이는 접지등을 통하여 인근 인체 및 전력설비 임피던스 상태에 따라서 위해성 발생 가능 / (인체 유도전류 30 mA(60 Hz) / KS C IEC 60497, 인체 유도전류 200 mA(60 kHz) / ICNIRP 1998)
- 이격거리에 따른 유도전류의 반비례 특성
- 차폐에 대한 특성은 Al 5T 의 경우 0.7 m 지점 37% 감쇄 특성

○ Test bed 시험 환경 기반의 급전전기안전 기술 모의실험실시

- 유도전압의 경우 급전케이블과 평행한 구간의 거리 제한 필요
- 인근 도전부의 경우 전기설비기술기준에 의해 접지저항을 100 Ω 이하로 유지하여

야 하며, 상시 유도종전압인 60 V 이상 발생시 평행구간을 제한할 필요가 있음
- 하부 철근구조의 경우 500 A 기준에서, mesh 구조를 단위면적 (1 m × 1 m)에서 2 × 2 이하로 제한 필요

○ 선로 및 신호시스템, 차종에 대한 급전장치 안전성 검증 및 개선
- 무선전력전송의 현장적용을 고려하여 적정 기준 검토
- 인근도전부의 가장 큰 영향은 하부의 철근구조로 전기적 열적 위해성을 감안한 적정 수준제시필요
- 무선전력전송 환경에서 발생하는 유도현상이 인근 도전부로 미치는 영향을 분석
- 급전부가 위치하는 콘크리트 하부에 존재하는 메쉬형태의 철근구조를 인근 도전부로 가정
- 메쉬형태의 철근구조는 구조적 안정성 향상에 도움이 되지만, 폐루프 형태로 유도전류를 발생시켜 전기적 위해상황을 발생시킬 수 있음
- 특히, 밀집된 구조일수록 단위면적당 투자율을 갖는 비율이 높아져서 유도현상 발생이 가속
- 적정 수준의 mesh 구조 제시 필요

(2) 급전전기안전 상태 감시 알고리즘 개발

○ 이상상태 발생시 상태분석 및 대응방안 도출용 알고리즘 개발
- 알고리즘 개발 필요성
  · 유선전력전송의 경우 도전체를 통하여 전력이 전달되므로 100 % 에 가까운 효율을 보이나, 무선전력전송의 경우 공기를 매개체로하는 공간을 통하여 전력이 전송되어 손실이 발생
  · 급·집전부 사이의 상태에 따라 효율이 달라지며, 통상 운영상태에서 80~90 %의 효율을 보이며, 10~20 %의 손실이 발생함, 손실의 형태는 유도현상으로 발생하며 이에 대한 검토가 필요
  · 1 MW 상황에서 100 kW~200 kW의 손실이 발생하며, 해당 안전 대책이 필수적
  · 급전전기안전 상태 감시 알고리즘 개발을 위한 모식도 및 수식 개발
  · 급전전기안전 확보를 위하여, 효율-손실 과 유도전압에 대한 알고리즘 개발/등가회로에 기반한 계산식 도출
- 효율 변화에 기반한 이상상태 발생 검출
- 고장 파급을 사전에 검출하기 위한 유도현상 기반 전기안전 확보 알고리즘 개발

5) 전력설비 시설 기준 개정(안) 제출 공문 확인 (5차년도)

가) 급전장치 전기안전기준(안) 제출

(1) 전문가 자문 등을 통하여 급전장치 전기 안전 기준 제출

○ 단체표준 관련
- 공청회, 심사위원회, 심의회 등을 통한 검증을 통해 단체표준 개발 완료 / SPS-C KESCO-EV-1-7395 : 2020, 전기수송설비용 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항
- 활용범위는 제한적이나 구체적인 내용을 포함하고 있는 단체표준은 표준화된 문서로서 기술기준 제안의 기반이 됨

○ 기술기준 관련
- 경량전철용 무선급전시스템 적용기술 개발과 관련하여, 전기설비 관련 사항은

산업부를 대상으로, 경량전철 관련 사항은 국토교통부를 대상으로 기술기준 개정(안) 제출 검토

- 국토교통부 관련 사항은 주관기관과 총괄기관의 협조를 통하여, 철도시설의 기술기준, 도시철도건설규칙, 철도차량의 기술기준(part53 도시철도차량(고무차륜경전철) 검토(대도시권교통과역위원회 시설운영과, 국토교통부 철도국 철도시설안전과, 국토교통부 철도국 철도투자개발과, 국토교통부 철도국 철도운행안전과 등과 협의)

○ 국제표준 관련

- IEC 61980 등 관련 PT63242 분야 전기안전 반영을 위한 NP 제출 (6.1 Electrical safety in dynamic wireless power transfer)

표 61 국토교통부 관련, 기술기준 개정 추진 일정

구분	날짜	Version	개발 대상	주요내용
1	19.08.13.	Version1	단체 표준 개발	- 단체표준 명 : 전기수송설비 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항 (20.05.06. 제정 완료) - 비접촉급전방식 전기안전 관련 최초의 전기안전 기준 *무선충전 일반사항 관련 표준 : KS R IEC 61980—1
2	19.11.30.	Version2	철도 시설의 기술 기준 개정(안) 검토	- **내용 : 5개 항목, 22개조 개정(안) 개발** * 5개 항목 : 구성, 절연, 접지, 유도, 유지관리 - **적용범위 개정 불가**로 도시철도건설규칙으로 변경 (국토교통부 철도국 철도시설안전과 검토 / 20.04.27.)
3	20.04.29.	Version3	도시 철도 건설 규칙 개정(안) 검토	- **내용 : 4개 항목 1개조 제정(안) 10개조 개정(안) 개발** * 4개 항목 : 구성, 유도, 전기안전(절연, 접지), 유지관리 - 필수 요구사항으로 수정 (대도시권광역교통위원회 광역시설운영과 검토 / 20.05.08.)
4	20.06.11.	Version4	도시철도건 규칙 개정(안) 수정·보완	- **2개 항목 3개조 개정(안) 개발** * 2개 항목 : 구성, 전기안전 - 20.05.13. 진흥원 협의, 20.05.21. 철기연 협의 등 - 20.06.18. 대광위 의견수렴 / 비접촉급전방식, 급전장치 - 경량전철 6개 타입 (모노레일형식, 노면전차형식, 철제차륜형식, 고무차륜형식, 선형유도전동기형식, 자기부상추진형식 등) 모두에서 적용 가능성 검증 필요 (국토교통부 철도국 철도투자개발과 협의 / 20.07.11.)
5	20.07.12.	Version5	철도 차량의 기술 기준 (part53 도시철도차량	- 3.4 인터페이스의 3.4.1 차량-전력 부분에 차량에 전력을 공급하는 전력설비 구성과 특징, 전기안전 사항 개정(안) 제안 - 철도차량 관점의 전력 부분으로 **인프라 관련 전력설비 언급 무리** (국토교통부 철도운행안전과 검토 / 20.07.12.)

			(고무차 륜경전 철))	

- 산업통상자원부 관련 사항으로, 전기설비기술기준, 전기설비기술기준의 판단기준 개정(안) 검토
- 전기설비의 효율적 안전관리와 공공의 전기안전 강화를 위하여 전기설비기술기준과 전기설비기술기준의 판단기준에 대한 제·개정 의견 수렴 후 개정(안) 제출
- 신기술·신공법에 대한 반영이 필요한 사항인 무선급전시스템의 전기환경에 필요한 전선로 위치 및 주파수 증가에 따른 절연 관련 사항 제안

현 행	개정(안)
제147조(지상에 시설하는 전선로) ① 지상에 시설하는 저압 또는 고압의 전선로는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우 이외에는 시설하여서는 아니 된다. 1. 1구내에만 시설하는 전선로의 전부 또는 일부로 시설하는 경우 2. 1구내 전용의 전선로 중 그 구내에 시설하는 부분의 전부 또는 일부로 시설하는 경우 3. 지중전선로와 교량에 시설하는 전선로 또는 전선로 전용교 등에 시설하는 전선로와의 사이에서 취급자 이외의 자가 출입하지 않도록 조치한 장소에 시설하는 경우	**제147조(지상에 시설하는 전선로)** ① 지상에 시설하는 저압 또는 고압의 전선로는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우 이외에는 시설하여서는 아니 된다. 1. 1구내에만 시설하는 전선로의 전부 또는 일부로 시설하는 경우 2. 1구내 전용의 전선로 중 그 구내에 시설하는 부분의 전부 또는 일부로 시설하는 경우 3. 지중전선로와 교량에 시설하는 전선로 또는 전선로 전용교 등에 시설하는 전선로와의 사이에서 취급자 이외의 자가 출입하지 않도록 조치한 장소에 시설하는 경우 4. 전기철도 등 전기수송설비의 무선급전방식에서 급전전류를 공급하기 위하여 급전선로를 시설하는 경우

그림 348 무선급전시스템 도입을 위한 기술기준 개정(안), 전선로 위치 관련

(2) 무선충전 철도용 감전보호 기준 (60 kHz-1 MW 이상) 제정(안) 제안

○ 전기설비기술기준의 판단기준 제252 조와 관련하여 인체 및 전력설비 보호를 위한 개정안 제안

○ 기존 제3레일의 구성을 활용하여 비접촉 전력전송을 위한 무선급전시스템에 있어 무선 전도 등을 통한 감전 보호에 대한 보호 기준 제시

제252조(직류 전차선로의 시설 제한) ① 직류 전차선은 열차의 속도, 노반의 형태, 부하전류 특성에 따라 적합한 방식으로 하며, 가공방식(전차선을 터널·갱도 기타 이와 유사한 장소내의 윗면에 시설하는 방식을 포함한다. 이하 같다)·강체방식(剛體方式) 또는 제3레일 방식에 의하여 시설하여야 한다. ② 가공 방식에 의하여 시설하는 직류식 전기철도용 전차 선로(이하 "가공 직류 전차선로"라 한다)로서 사용전압이 직류 고압인 것은 전기철도의 전용 부지 안에 시설하여야 한다. ③ 제3레일 방식에 의하여 시설하는 직류식 전기 철도용 전차 선로는 지하철도·고가철도 기타 사람이 쉽게 출입할 수 없는 전기철도의 전용 부지 안에 시설하여야 한다.	**제252조(직류 전차선로의 시설 제한)** ① 직류 전차선은 열차의 속도, 노반의 형태, 부하전류 특성에 따라 적합한 방식으로 하며, 가공방식(전차선을 터널·갱도 기타 이와 유사한 장소내의 윗면에 시설하는 방식을 포함한다. 이하 같다)·강체방식(剛體方式) 또는 제3레일 방식에 의하여 시설하여야 한다. ② 가공 방식에 의하여 시설하는 직류식 전기철도용 전차 선로(이하 "가공 직류 전차선로"라 한다)로서 사용전압이 직류 고압인 것은 전기철도의 전용 부지 안에 시설하여야 한다. ③ 제3레일 방식에 의하여 시설하는 직류식 전기 철도용 전차 선로는 지하철도·고가철도 기타 사람이 쉽게 출입할 수 없는 전기철도의 전용 부지 안에 시설하여야 한다. 다만 제3레일을 이용하여 비접촉으로 전력을 공급하는 무선급전 방식의 경우는 다음 각 호에 따라야 한다. 1. 무선급전방식의 급전선로는 제147조에 따라 지상에 시설하며, 차량의 하중을 받지 않고 사람이 쉽게 출입할 수 없는 전용 부지 안에 시설할 것 2. 무선급전방식의 급전선로가 위치하는 콘크리트는 무선 전도의 영향을 막기 위하여 하부에 철근 구조물을 설치하지 않는다.

그림 349 무선급전시스템 환경 전기안전 사항 업데이트

(3) 비충전 도전부 유도전위 억제를 위한 시설 방안 제안

○ 전기설비기술기준의 판단기준 제46 조와 관련하여 위해항목인 유도전위에 대한 언급 및 보호 방안에 대한 제시를 포함 한 개정(안) 제시

○ 기존 사용하고 있는 무선전도를 활용하여 유도현상에 대한 위해성 및 보호방안 제시

현 행	개정(안)
제46조 (전차선로의 시설) ① 직류 전차선로의 사용전압은 저압 또는 고압으로 하여야 한다. ② 교류 전차선로의 공칭전압은 25 kV 이하로 하여야 한다. ③ 전차선로는 전기철도의 전용부지 안에 시설하여야 한다. 다만, 감전의 우려가 없는 경우에는 그러하지 아니하다. ④ 제3항의 전용부지는 전차선로가 제3레일 방식인 경우 등 사람이 그 부지 안에 들어갔을 경우에 감전의 우려가 있는 경우에는 고가철도 등 사람이 쉽게 들어갈 수 없는 것이어야 한다.	**제46조 (전차선로의 시설)** ① 직류 전차선로의 사용전압은 저압 또는 고압으로 하여야 한다. ② 교류 전차선로의 공칭전압은 25 kV 이하로 하여야 한다. ③ 전차선로는 전기철도의 전용부지 안에 시설하여야 한다. 다만, 감전의 우려가 없는 경우에는 그러하지 아니하다. ④ 제3항의 전용부지는 전차선로가 제3레일 방식인 경우 등 사람이 그 부지 안에 들어갔을 경우에 감전의 우려가 있는 경우에는 고가철도 등 사람이 쉽게 들어갈 수 없는 것이어야 한다. ⑤ 무선급전방식은 전차선로가 생략되고 무선형태로 전력이 공급하는 방식으로, 제3항의 전용부지와 주변의 도전성부 등 무선 전도 및 전파의 우려가 있는 경우에는 차폐 및 접지 등의 보호장치가 적절히 설치되어야 한다.

그림 350 전기환경 도입시 유도전위 관련 무선전도 위해성 및 보호방안 사항 제시

(4) 무선충전 철도 전력설비 시설 및 시험 기준(안) 제출

○ 무선전력 관련 유관기관과의 유기적인 의견수렴을 통한 전기안전 기준(안) 개발

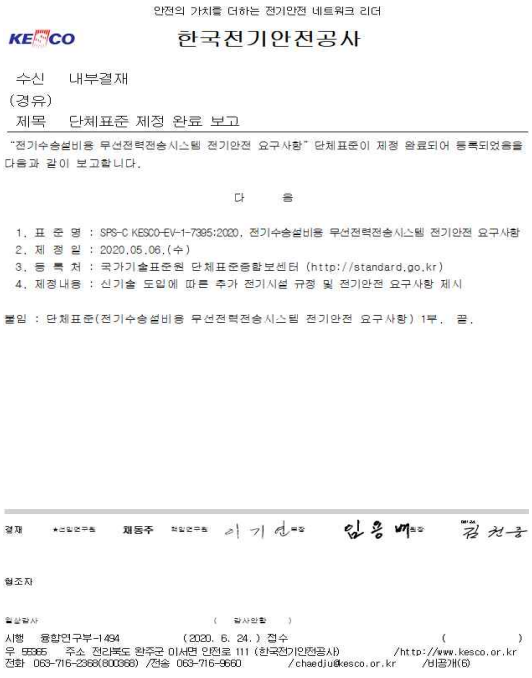
○ 최신 국내외 표준 및 기준을 기반으로 하여 전기안전 확보에 적합한 내용으로 업그레이드하여 전기안전 기준(안) 개발

○ 급전 전기안전 기준 검증 및 개선

- 전기안전 기준(안)의 유효성 확보를 위해 유관기관과의 유기적인 의견수렴/검증
- 기준(안)의 지속적인 검토를 통하여 최신 국내외 표준 및 기준 반영을 통한 개선

○ 급전 전기안전 기준 개정(안) 제출

- 단체표준 형식성 평가를 위한 재심의 요청 공문 발송
- 전기설비 기술기준, 전기설비 기술기준의 판단기준 제출 공문 발송 / 산업부 위탁을 받은 전기협회 제출(한국전기안전공사 기획혁신처, 정책총괄부에서 취합 제출)



안전의 가치를 더하는 전기안전 네트워크 리더

KESCO 한국전기안전공사

수신 내부결재

(경유)

제목 단체표준 제정 완료 보고

"전기수송설비용 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항" 단체표준이 제정 완료되어 등록되었음을 다음과 같이 보고합니다.

다 음

1. 표 준 명 : SPS-C KESCO-EV-1-7395:2020, 전기수송설비용 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항
2. 제 정 일 : 2020.05.06.(수)
3. 등 록 처 : 국가기술표준원 단체표준종합보센터 (http://standard.go.kr)
4. 제정내용 : 신기술 도입에 따른 추가 전기시설 규정 및 전기안전 요구사항 제시

붙임 : 단체표준(전기수송설비용 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항) 1부. 끝.

결재 ★선임연구원 채동주 책임연구원 이기선 실장 임용배 원장 김천곤

협조자

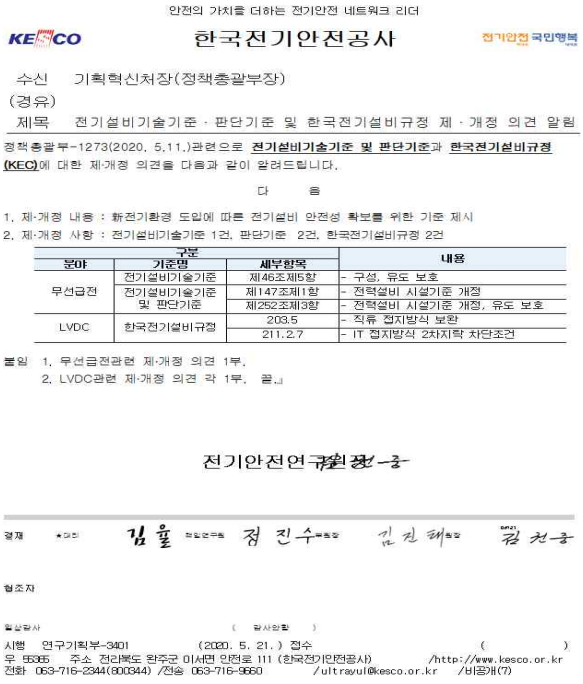
협실감사 (감사업무)

시행 융합연구부-1494 (2020. 6. 24.) 접수 ( )

우 58365 주소 전라북도 완주군 이서면 안전로 111 (한국전기안전공사) /http://www.kesco.or.kr

전화 063-716-2368(800368) /전송 063-716-9660 /chaedju@kesco.or.kr /비공개(6)

그림 351 단체표준 제정 완료 보고



안전의 가치를 더하는 전기안전 네트워크 리더

KESCO 한국전기안전공사 전기안전 국민행복

수신 기획혁신처장(정책총괄부장)

(경유)

제목 전기설비기술기준 · 판단기준 및 한국전기설비규정 제 · 개정 의견 알림

정책총괄부-1273(2020. 5.11.)관련으로 **전기설비기술기준 및 판단기준**과 **한국전기설비규정(KEC)**에 대한 제·개정 의견을 다음과 같이 알려드립니다.

다 음

1. 제·개정 내용 : 신전기환경 도입에 따른 전기설비 안전성 확보를 위한 기준 제시
2. 제·개정 사항 : 전기설비기술기준 1건, 판단기준 2건, 한국전기설비규정 2건

구분			내용
분야	기준명	세부항목	
무선급전	전기설비기술기준	제46조제5항	- 구성, 유도 보호
	전기설비기술기준 및 판단기준	제147조제1항	- 전력설비 시설기준 개정
		제252조제3항	- 전력설비 시설기준 개정, 유도 보호
LVDC	한국전기설비규정	203.5	- 직류 접지방식 보완
		211.2.7	- IT 접지방식 2차지락 차단조건

붙임 1. 무선급전관련 제·개정 의견 1부.
2. LVDC관련 제·개정 의견 각 1부. 끝.

전기안전연구원장

결재 ★이사 김 율 책임연구원 정 진수 실장 김천태 원장 김천곤

협조자

협실감사 (감사업무)

시행 연구기획부-3401 (2020. 5. 21.) 접수 ( )

우 58365 주소 전라북도 완주군 이서면 안전로 111 (한국전기안전공사) /http://www.kesco.or.kr

전화 063-716-2344(800344) /전송 063-716-9650 /ultravul@kesco.or.kr /비공개(7)

그림 352 기술기준 제출 완료 보고

나) 급전장치 전기안전 현장 검증 및 보완

(1) 급전장치 전기안전성 현장 검증 및 보완

○ 철도 운영 환경을 반영하는 테스트 베드에서의 급전 전기안전 방안 현장 검증 및 보완

- 무선전력전송 환경 전기안전 확보를 위한 접지방식 제시
  · 유도현상으로 도전성을 갖고 인근에 위치한 접지선으로 60 kHz 성분의 노이즈 성분 발생시킴
  · 직류 교류 전환 및 주파수 변환을 위한 전력변환장치의 다양한 주파수(10 kHz 전후) 들이 기생커패시턴스 성분을 통하여 접지선으로 모이고 계통접지 성분이 기기접지를 통해 접지선으로 모임
- 무선전력전송 시스템 전기환경 분석 및 접지를 통한 개선방안 확보
  · 계통접지 : 변압기 2차측 접지 / Y 결선 중성점접지, delta 결선 비접지
  · 기기접지 : 독립접지, 공통접지, 통합접지 / 1종, 2종, 3종 접지로 구분
- 무선전력전송 인근 접지선과 유도현상의 영향으로 기기에 영향 발생

· 공진주파수 : kHz 영역 / 유도전류 : 수백 A 수준 급전전류 / 평행거리 : 수백 m ~수 km / 접지선에 높은 수준의 전력 유도발생 인근설비 영향

· 직류, 교류(60 Hz), 교류(60 kHz) 가 접지선을 통해 혼재하는 상황

$V = \sum (j \cdot \omega \cdot M \cdot l \cdot I \cdot K)$ (V : 유도전압 / w : 각주파수, M : 상호인덕턴스, l : 전력선의 평행거리, I : 유도전류, K : 차폐계수 / ref : KSX3238)

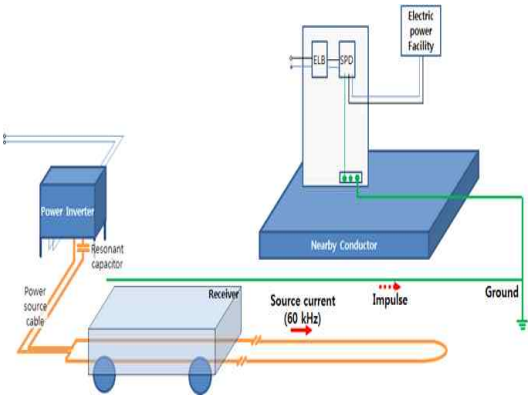


그림 353 현장 위해상황 발굴 모식도

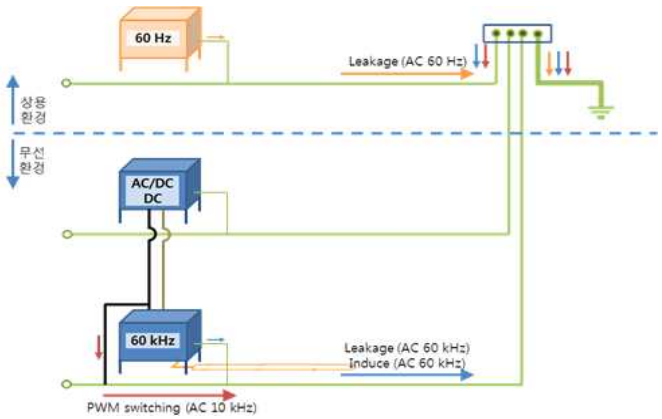


그림 354 현장 위해상황 원인 분석도

- 무선전력전송 환경 유도현상 및 표유정전용량으로 인한 위해성 분석

· 이격거리에 따른 실험 수행(3차년도 기 수행 내용 현장 상황 도입)

· 인근전기환경 위해상황에 대한 문제인식에 기반하여 접지선을 통한 위해영향 분석

· 전력설비 내부의 표유정전용량으로 인한 60 Hz 와 60 kHz의 복합적인 노이즈성 신호 발생

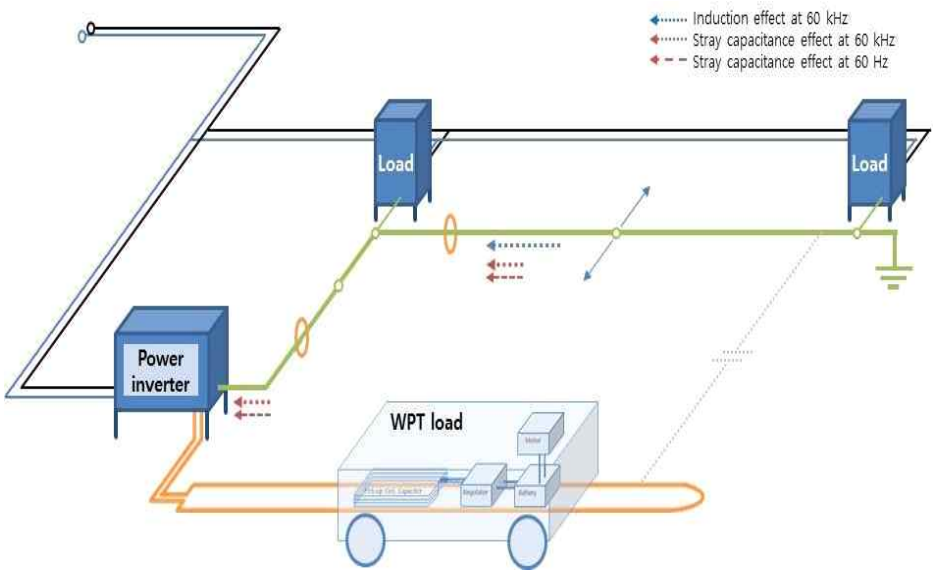


그림 355 급전선로와 접지선의 이격에 따른 접지선의 영향분석

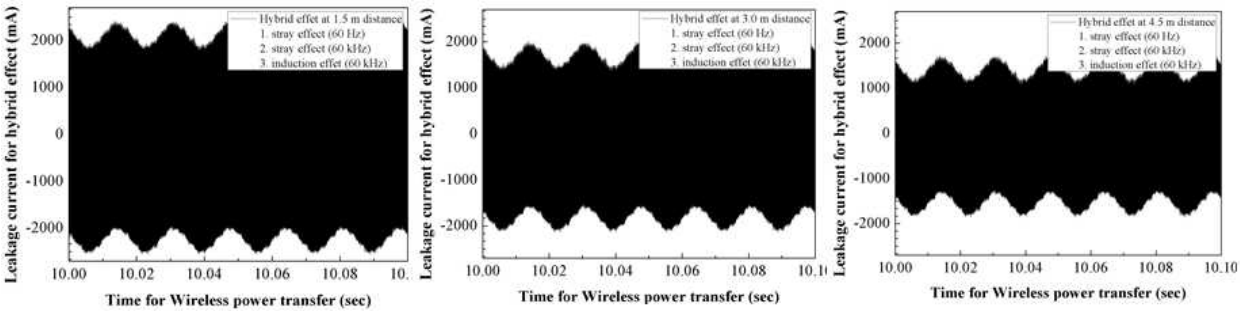


그림 356 접지선에 발생하는 표유정전용량과 유도현상의 복합적 신호 발생

- 전력설비 내부의 표유정전용량이 대지등을 통하여 인근전기환경 접지에 영향을 미침
- 접지 구간을 제한함으로써 인근전기환경의 위해성을 감소시킴 / 대지전위차를 안전전압 이하로 제한 필요
- 독립 접지 후, 전력설비측 접지에는 표유정전용량으로 인하여 60 Hz 와 60 kHz 가 혼합된 swing 하는 형태의 신호 발생, 인근전기환경은 유도현상에 대한 영향만 존재하여 적절한 이격거리 확보 및 차폐를 통하여 안전 확보 가능

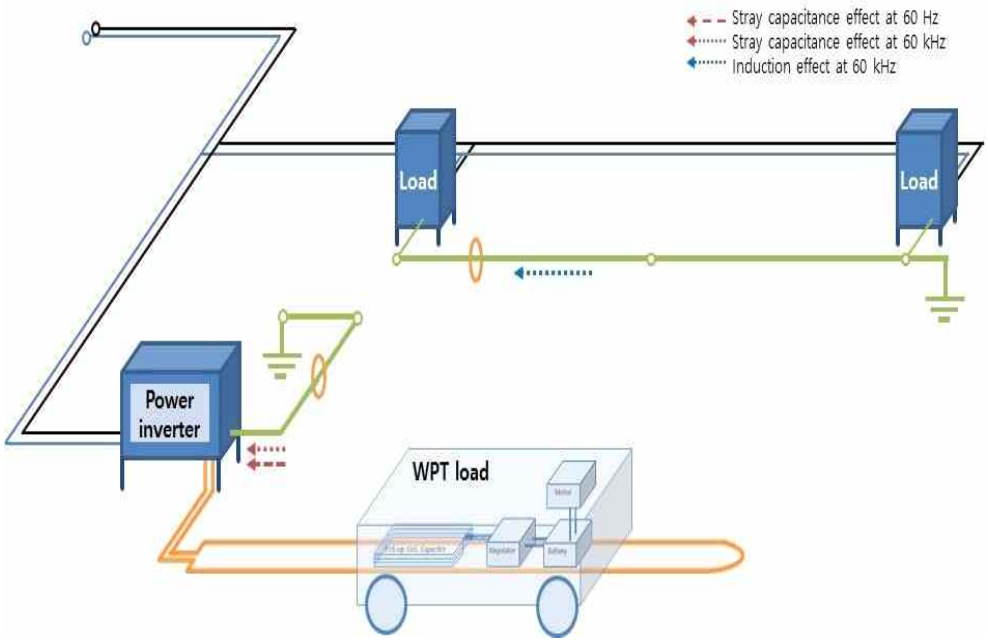


그림 357 전력설비와 인근전기환경의 접지 구분에 따른 접지선의 영향분석

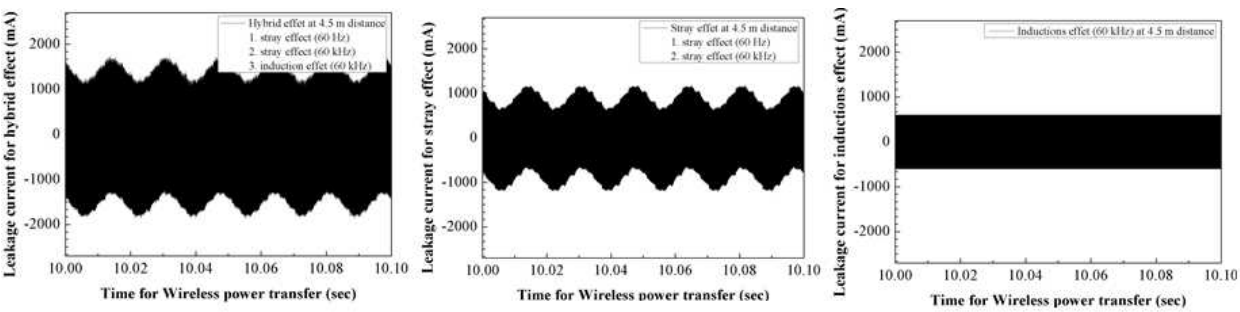


그림 358 전력인버터와 인근 소내전력을 독립시킨 조건(중,우) 결과

○ 무선충전 철도용 전력설비 안전운영 방안 도출

- 전력유도전압 계산식 중 각주파수, 평행거리, 유도전류 가 주요 인자
  · 공진주파수 : kHz 영역 / 유도전류 : 수백 A 수준 급전전류 / 평행거리 : 수백 m~수 km / 접지선에 높은 수준의 전력 유도발생 인근설비 영향

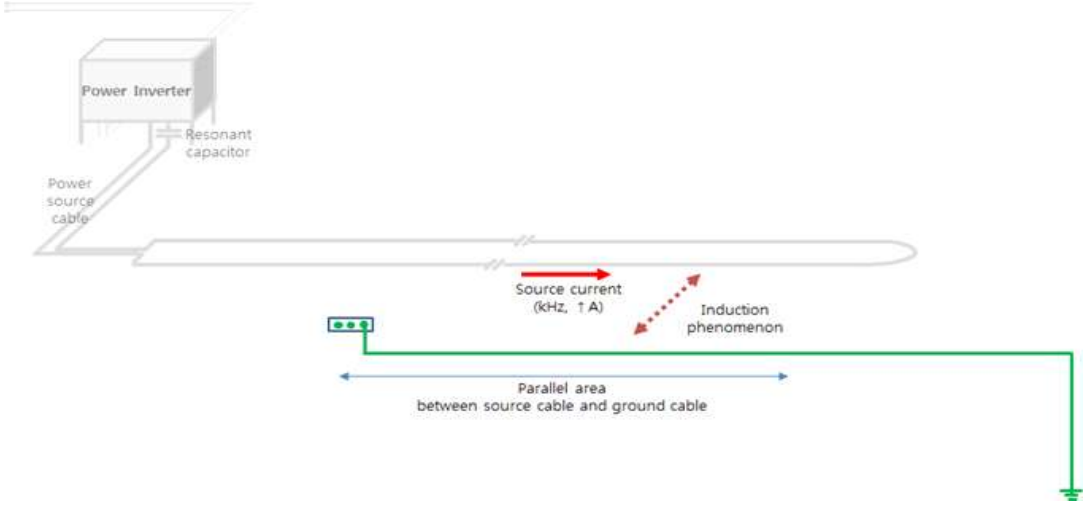


그림 359 급전선로와 접지선이 평행하며, 평행구간이 긴 기존 접지환경

- 각주파수와 유도전류는 무선전력전송 효율과 용량의 관계
- 접지케이블의 평행구간을 감소시켜 유도현상으로 인한 영향 감소 가능
- 통신부하등 노이즈에 민감한 부하는 단독접지함으로써 유도영향을 최소화 가능
- 무선전력전송 경량전철용 전력설비의 안전운영을 위하여 접지환경에 대한 검토 필요
- 접지선로의 급전선로와의 이격거리 확보 및 평행구간 제어를 통한 안전운영 방안 제시

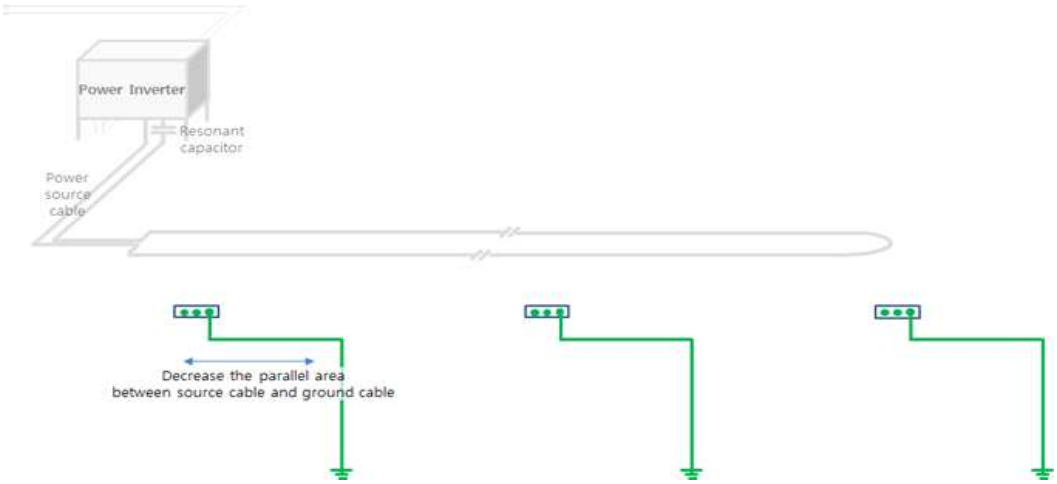


그림 360 급전선로 평행구간을 일정 수준으로 제어하는 접지환경

○ 급전장치 전기안전 확보를 위하여, 전기환경을 저항, 인덕턴스, 커패시턴스로 구분하고 이중 주파수에 따라 변하는 인덕턴스와 커패시턴스 성분에 대한 분석 수행
- 인덕턴스 성분은 주파수 증가에 따라 임피던스가 증가하여, 60 kHz 정전류 환경에서 60 Hz 의 상용전기환경 대비 1000 배 높은 임피던스 발생. 특히 급전인버터와 급전케이블의 접속부가 근접해 있어서 이에 대한 내압에 관한 전기안전 확보 필요
- 커패시턴스 성분은 주파수 증가에 따라 임피던스가 감소하여, 도전성을 갖는 전원케

이블과 도전성을 갖는 설비 외함 사이에 표유정전용량을 감소시킴. 전원케이블에서 외함으로의 누설이 용이한 상황이 되어 전력변환장치인 급전인버터 스위칭 누설 성분, 전원부 누설 성분 등이 외함을 통해 접지선으로의 유입량이 증가할 수 있음. 현재 접지선을 공유하는 공통접지 환경에서는 각 설비들로 이와 같은 위해 성분이 유입되어 장비 오작동, 화재 등의 원인이 되며, 전기안전 확보를 위해 적절한 접지 설계 방안을 제시함

○ 누전(화재)에 관하여 내압과 누설(누전) 이슈 분석

- 내압과 관련하여, 절연파괴에 따른 과전류 등으로 화재 발생 가능, 주파수 증가에 따른 인덕턴스 성분의 임피던스 증가와 급전케이블 단말의 절연거리 확보 등의 위해상황으로 인한 전기안전 확보를 위하여 검사항목 제시 (5차년도 표 61 국토교통부 관련, 기술기준 개정 추진 일정 / 주요항목 / 절연)
- 누설(누전)과 관련하여, 무선전력전송 환경 상 높은 주파수의 누설 성분들이 접지선을 통해 인근 전력 설비들에게 전격(電擊)을 가해 설비 오작동 발생 가능. 이에 대한 전기안전 확보방안을 적절한 수준의 접지 환경을 제시함 (4차년도 현장측정(SPD 화재), 5차년도 접지를 통한 보호)
- 단체표준에 전기화재와 관련한 보호기술로 내압 관련(5.2.3 절연저항, 5.2.4 내전압)사항과 누설 관련(5.2.2 접지저항, 5.4.2 접지 시설 방법) 사항을 포함하였음.

표 62 무선급전 환경 전기화재 원인 분석에 따른 보호기술 제시(단체 표준)

구분		주요내용
전기화재 보호방안 (절연확보)	5.2.3 절연저항 (기기 및 전로)	전기수송설비용 무선전력전송시스템 1차측 장치의 경우 전력변환장치와 전력변환장치 2차측인 급전케이블이 이에 해당한다. 전력변환장치 절연저항 측정 시험하고자하는 구간의 입력측과 출력측의 개폐기를 개방시킨 상태에서 측정 피시험부 외는 모두 접지에 연결하고, 전자회로 스위칭 소자는 탈거 시험부의 전로들을 단락시킨후, 단락된 전로와 접지를 메가 테스터기로 측정 측정 결과는 KS R 9193, 표 3에 따름 급전케이블은 도체와 대지 사이에 100 V 의 직류전압을 1분간 가한 후에 측정한 절연체의 절연저항이 KECS 1501-2009, 표 A2-8에 의하여 표 4에 규정하는 값 이상이어야 한다. cont. (관련사항 SPS-C KESCO-EV-1-7395:2020 참고)
	5.2.4 내전압	절연내력시험을 하기 전에 1 000 V 이상의 메가로 절연저항을 측정하여 측정치가 3 MΩ 이상 일 때 시험한다. cont. / 관련사항 SPS-C KESCO-EV-1-7395:2020 참고
전기화재 보호방안 (누설감소, 접지)	5.2.2 접지저항	전력변환장치의 금속제 외함(금속관공사의 금속관, 금속제 분전반의 외함을 포함)에는 제3종 접지공사 혹은 관련규정을 따라야 하므로 접지저항이 100 W 이하인지를 확인한다. **비고** 저압용 기계기구의 금속제 외함에는 제3종 접지공사 혹은 관련규정을 따라야 한다.
	5.4.2 접지 시설 방법	전기적으로 명확히 대지에 접속되도록 한다. 대지 접속을 명확히 하기 위하여 측정 전용의 접지 전극을 매설하도록 한다. 접지 전극으로서는 상용의 접지 봉을 규격과는 상관없이 사용하여도 충분하다. 회선의 종단 측 접지선의 연결 길이와 측정기와 회선의 접속을 연결하는 추가적인 도체의 길이는 최단 거리로 하여야 하고 측정 환경 여건에 따라 길이가 길어지더라도 회선의 길이 방향에 대하여 수직 방향으로 연장되도록 하여야 한다. 만일 수평 방향으로 연장한다면 그 각 접속 연장 길이만큼의 추가적인 유도 전압이 길이에 비례하여 측정됨을 감안하여야 한다.

(2) 전기안전 상태감시 알고리즘 수정 보완

○ 이상상태 발생시 상태분석 및 대응방안 도출용 알고리즘 수정보완

- 4차년도에 개발한 효율-손실관계 기반 손실분에 관한 전기안전 상태 감시 알고리즘 활용
- 상호인덕턴스 기반 이격거리와 대지저항률 관련 항목을 수식에 기반하여 보완
- 무선전력전송은 전기장과 자기장을 통과하므로 투자율 등의 물성에 따라 에너지가 주변으로 분산될 가능성이 있고 이로 인한 손실이 발생하며 효율이 아래 식과 같이 나타남.

$$\eta = \frac{1}{1+\left(\frac{R_1+R_L}{\omega M}\right)^2 \frac{R_1}{R_L}+\frac{R_2}{R_L}}$$

- 부하로의 효율을 높이기 위해서는 상호인덕턴스 값이 커야 하며, 인근도전성부로의 손실을 줄이기 위해서는 즉 인근도전성부와의 효율을 낮추기 위해서는 인근도전성부와의 상호인덕턴스 값이 작아져야 함.
- 인근도전성부로의 효율을 낮추기 위해서는 상호인덕턴스 값이 작아야 하며, 아래 식과 같이 상호인덕턴스는 매개변수와 이격 거리와 관계가 있음.

$$M = \left[4.6\log_{10}\frac{2}{kd} - j\frac{\pi}{2}\right] \times 10^{-4} \ [H/km]$$

- 상호인덕턴스를 줄이기 위해서는 매개변수와 이격거리를 늘려야 함.
- 매개변수를 아래 식과 같고 이를 늘리기 위해서는 대지 저항률을 낮추어야 함.

$$k = 2\pi\sqrt{\frac{w_0}{5\rho}} \times 10^{-3} \ [m^{-1}]$$

- 전기안전에 위해영향을 미치는 손실분을 적정수준으로 제어하기 위해서는, 이격거리와 대지 저항률을 고려하여야 함. / 이격 거리 증가, 대지 저항률 감소

· 기 개발된 효율-손실관계 기반 전기안전 상태 감시 알고리즘의 수식적 분석
· 상호인덕턴스 기반 이격거리와 대지저항률 관련 항목을 수식에 기반하여 보완 수행

카. 집전장치 전기안전기준 설계 및 분석

1) 집전장치 전기안전 기준 요구사항 및 영향분석 (1차년도)

가) 집전장치 전기 안전 기준 요구 사항 분석

(1) 집전장치 전기안전 기준 요구사항

○ 집전픽업, 정류기 및 레귤레이터로 구성된 집전장치에 대한 요구사항 분석

나) 집전장치 전기안전 영향 분석

(1) 집전장치 전기안전 영향

○ 집전픽업, 정류기 및 레귤레이터로 구성된 집전장치에 대한 전기안전 영향 분석

2) 집전장치 전기안전기준 분석 및 모델링 해석 (4차년도)

가) 집전장치 전기안전기준 분석 및 모델링 해석

(1) 집전장치 전기안전기술기준 분석

○ 국내기준(KS, KSA) 분석

- 주요내용

· 도시철도 차량의 안전, 성능, 인터페이스, 운영 및 유지관리, 운용한계 등의 요구사항들을 기술함.
· 도시철도 차량의 차체 및 설비, 주행장치, 제동장치, 추진장치, 보조전원장치, 차상신호장치, 종합제어장치, 연결장치 등 주요장치별 설계 및 구조에 대한 요구사항들을 기술함.
· 도시철도 차량의 부품, 구성품, 완성차에 대한 설계적합성을 시험으로 입증할 경우 사용되는 시험규격들을 기술함.

- 전기안전설계

· 철도차량 내에 설치되는 전기배선 및 전기장치는 승객과 직접 접촉이 되지 아니하도록 설치되어야 하며, 접촉이 불가피한 경우는 잠금 기능을 갖춘 별도의 장치로 보호되어야 함.

- 절연거리 확보

· 철도차량에 설치된 전기장치 및 전기기구는 그 설치된 위치의 환경 및 사용전압을 고려하여 충전부 상호 간 또는 충전부분과 접지된 부분만 절연에 적합한 이격거리 및 절연 거리를 확보하여야 함.

· 철도차량의 절연은 KS C IEC 60077-1 또는 동등 이상의 기준에 따라 입증함

- 전기차단

· 철도차량에는 운전 및 유지보수시 안전을 확보하기 위하여 전원을 차단하거나 분리시킬 수 있는 장치를 갖추어야 함.

· 전기장치는 내부회로 또는 외부회로의 합선 및 다른 전기장치의 고장 등이 발생한 경우에 대비하여 회로차단기능 또는 회로보호기능 등을 갖추어야 함.

· 회로차단 또는 분리를 위하여 동작되는 장치는 그 동작상태를 알 수 있는 지시 또는 경보기능을 갖추어야 함.

· 주 회로 차단기의 설치위치는 차량 간 모든 고압 연결부를 포함하여, 차내 고압회로들을 보호할 수 있어야 하고 집전장치, 주 회로 차단기, 그리고 이들 간의 고압 연결부는 동일한 차량에 배치되어야 함.

- 전류귀환 및 접지

· 차체와는 절연된 접지 기구에 모든 회로가 개별적으로 접속되고 노출된 도체를 통하여 접지 장치(차체브러쉬 또는 전류복귀 슈)에 접속되거나 또는 접지 장치에 접속된 차체에 모든 전력 회로가 직접 접속됨으로써 전원 전류는 귀환될 수 있어야 함.

· 전원 전류 귀환 회로는 차량에 고장이 발생한 경우 단락회로 차단시스템의 성능에 영향을 미치지 않아야 함.

· 차체와 대차 프레임은 전류 귀환 모선에 연결되거나 접지장치에 직접 연결되어야 하며 또는 (낮은 전류로 인하여 베어링이 손상될 위험이 없어서) 적절한 경우에는 차축 베어링에 연결될 수 있어야 함.

· 전기차량의 동력차에는 모든 차축에, 그 밖의 철도차량에는 필요시 주행장치의 1축 이상에 접지기구가 설치되어야 하나, 단, 고무차륜을 사용하거나 자기부상형의 경량전철 차량에는 적용하지 아니할 수 있음.

· 인체에 접촉하여 감전 등 상해를 줄 수 있는 장치나 기기 표면에는 보호접지가 되어 있어야 하며 보호접지는 고장이 발생한 경우 노출된 도체 부분이 전기 충격을 일으키지 않도록 하기 위해 적절한 강도와 통전능력을 제공할 수 있는 크기이어야 함.

· 철도차량에 설치된 집전장치 및 그 밖의 고압기기는 절연되어야 하고 비상시에 대비하여 차체와 접지(接地)되어야 함.

· 직류 50볼트, 교류 24볼트 이상의 전기기기는 안전하게 접지되어야 함. 다만, 절연이 유지되는 전기기기는 그러하지 아니함.

· 접지 회로의 전기적 저항은 고장이 발생한 경우, 동시 접근 가능한 두 개의 금속 부분 간의 전압이 120Vdc 또는 50Vac이하로 유지될 수 있어야 함.

- 오조작방지

· 오조작에 의하여 위험을 초래할 수 있는 전기장치는 그 위험으로부터 보호될 수 있는 장소에 설치되어야 하며, 오조작을 방지할 수 있는 잠금장치를 갖추어야 함.

- 배선 및 전기기기의 배치

· 철도차량의 배선은 적절하게 지지되고 마모 또는 손상으로부터 보호될 수 있는 곳에 설치되어야 함.

· 철도 차량간에 연결되는 각종 전선은 예상 최대변위에서의 비틀림·진동 및 충격 등에 견딜 수 있도록 충분한 여유를 가져야 하며, 유지보수가 용이한 구조로 설치되어야 함.

· 전선의 단자는 운행중 발생하는 기계적 충격 및 진동에 의한 풀림을 방지할 수 있는 구조이어야 함.

· 철도차량의 배선은 유도장애를 고려하여 전선관 및 전선덕트(Duct) 안에 사용전압 및 기능별로 분리하여 수용되어야 함.

○ 국제기준(IEC, IEEE) 분석

- IEC61980시리즈 기술기준 분석

· IEC61980 시리즈의 Part I은 전기자동차의 무선전력전송장치에 대한 일반적인 요구조건을 다루는데, 일반적인 배경과 정의 등을 포함하며, Part II는 전기자동차와 무선전력전송장치 사이의 통신에 대한 상세 요구사항을 다룸. 한편, Part III는 전기자동차의 무선전력전송장치에 대한 상세 요구조건을 다루는데, 일반적인 배경과 정의 등을 포함하며 Part I의 양식과 동일

· Part I에서 제시한 요구조건은 일반적인 것으로 다양한 무선전력전송(WPT) 기술별로 기술적인 요구사항이 매우 다른데, IEC61980 시리즈의 기술 상세 부분에 제시되어 있음.

(2) PSCAD/EMTDC에 의한 집전장치 모델링 및 해석

○ 급전부(계통) 모델링

- 집전 픽업, 정류기 및 DC/DC 컨버터부를 포함하는 집전장치 모델링을 진행하였음.

○ 집전장치의 전기적 특성(과전압, 과전류, 감전, 접지, 사고전류) 해석

- 급전계통(AC측) 사고해석 : 계통측에서 약 22.5KA, 전지측에서 약 15.5KA의 사고전류가 발생하여 총 38KA의 사고전류가 발생

- 집전계통(DC측) 사고해석 : 계통측에서 약 21.7KA, 전지측에서 약 17.4KA의 사고전류가 발생하여 총 39 kA의 사고전류가 발생

나) 집전 전기 안전 시험 및 개선

(1) 집전모듈 설비안전 기술 실험실 시험 및 개선

○ 차폐전 실험장치 구성

- 전기안전연구원 및 경산의 시험장치를 대상으로 가압시 발생되는 모듈부의 집전 위험성 분석

- 측정대상인 피측정 유도 금속단자는 인체와 유사한 모델로 구성하여 완전 노출된 구조에서 데이터 분석

○ 결과분석

· 차폐전 실험결과

· 실험결과 전기안전연구원 및 경산의 실험장에서는 7(V), 60kHz 대역에서 측정

- 차폐후 실험결과

· 전기안전연구원 및 경산의 시험장치를 대상으로 가압시 발생되는 모듈부의 집전 위험성 분석

(2) 집전모듈 시스템 상호간섭 및 접지안전 실험실 시험 및 개선

○ 급전부 및 차량내부 고장발생시 전위차 발생, 접지간의 전위차나 유도 루프에 의한 유도 전압은 크게 전원선, 신호선 및 접지의 3가지로 나누어짐

(3) 집전모듈 접지 전기안전 기술 시험 및 개선

○ 집전시스템의 내부에서 장치 사이를 고주파케이실드케이블용 접지선으로 접속하여 전원선과 통신선을 따라 배선함으로써 유도 루프의 영향을 줄이고, 장치간에 발생하는 전위차 억제

3) 집전장치 전기안전기준과 장치의 검증 및 개선, 기준(안) 제출(5차년도)

가) 집전 전기안전 기준 검증 및 개선

(1) 전력계통 모델링 및 전기적 특성 해석

○ 레귤레이터부 모델링

- 집전장치용 전력변환장치를 모델링하기 위하여, d-q좌표변환을 통한 상태방정식 유도, 충·방전 전류제어와 위상고정 회로방식의 알고리즘 제시

- 알고리즘을 바탕으로 배전계통의 상용소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링 수행

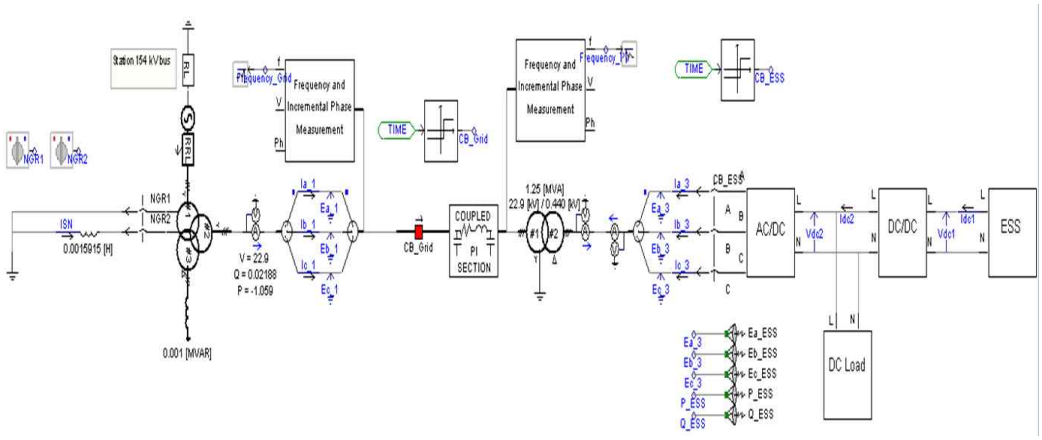


그림 361 집전장치를 포함한 전체계통 모델링

(2) 경산 시험장치(하드웨어)의 시험결과에 의한 전기적 특성해석

○ 시뮬레이션 조건

- 제시한 모델링을 바탕으로, 집전장치의 사고특성을 분석하기 위하여, 아래 표와 같이 시뮬레이션 조건을 상정함

- 배터리 랙 단락사고는 1번 배터리랙에서 단락이 발생한 경우이며, 사고전류에 의하여 0.32[ms] 이후에 퓨즈가 용융되는 것으로 상정하고, 단락 시 임피던스는 0.1[mΩ]임
- 레귤레이터 내부 암 단락사고는 8번 레귤레이터부의 DC측에서 암 단락이 발생한 경우이며, 사고전류에 의하여 0.18[ms] 이후에 퓨즈가 용융되는 것으로 상정하고, 단락 임피던스는 배터리 랙 단락사고의 경우와 같음
- SPD가 설치된 경우의 단락사고는 배터리측과 레귤레이터측에 각각 SPD를 설치한 경우임

표 63 집전장치의 사고해석 시뮬레이션 조건

조 건	사고 위치	퓨즈 용융시간	단락 임피던스
Case 1	1번 배터리랙 단락	0.32[ms]	0.1[mΩ]
Case 2	레귤레이터부 PCS DC측 Arm 단락	0.18[ms]	
Case 3	SPD가 설치된 경우	Case 1 & 2와 동일	

(3) 집전장치의 구성부품 및 전체장치에 대한 전기안전 기준안 제시

○ 일반 요구사항

- 개요

· 무선전력전송시스템의 집전부는 아래 그림과 같이, 집전코일, 공진형 커패시터, 레귤레이터부로 구성되며, 전송된 전력을 저장하기 위한 배터리부, BMS부, 보호장치부가 있음.

· 집전코일과 공진형 커패시터는 AC계통이며, 레귤레이터부는 AC를 DC로 변환하고 배터리의 충•방전을 수행하는 계통이고, 배터리부와 BMS부, 보호장치부는 DC 계통

· 집전코일과 공진형 커패시터는 공진을 통하여 집전기능을 수행하며, 레귤레이터부에서는 정류기를 통하여 AC를 DC로 변환하여, DC/DC컨버터에 의하여 배터리부의 충•방전기능 수행

· 전기를 저장하는 배터리부와 BMS를 통하여 직•병렬로 연결된 다수의 배터리를 관리하고 있으며, 보호장치부에서는 차단기나 퓨즈 등에 의하여 DC 선로부분의 사고를 차단하는 기능 수행

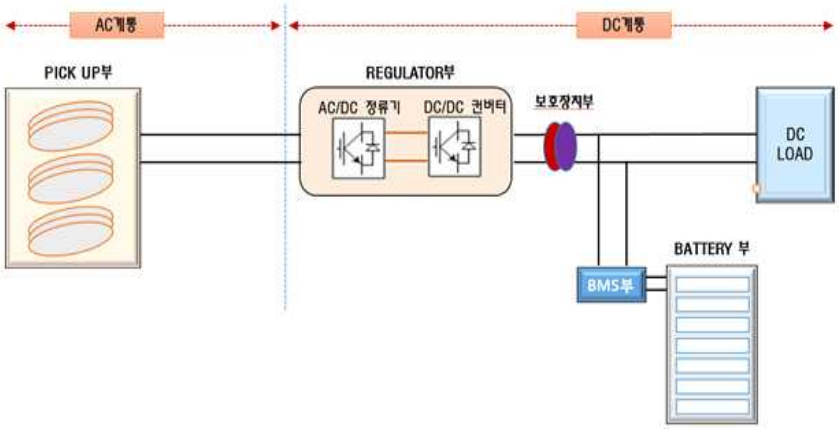


그림 362 무선전력전송시스템 집전부의 구성도

○ 시험방법 및 판정기준

- 절연저항시험

· 집전장치 각 부분의 절연상태를 모두 확인을 하고, 그 측정값을 기록하여 보관해 두고, 정기점검 시 측정값과 비교하면서 관리하는 것이 바람직함.

나) 집전장치 전기안전 검증 및 개선, 현장 검증 및 보완

(1) 집전장치 전기안전성 확보기술 제시

○ 주파수에 따른 전기안전성 분석

- 집전장치 전기안전성 확보를 위하여, 60kHz에서의 인체감전 특성에 대한 분석을 요구하며, IEC 61200, IEC 60479-1 및 IEC 60364-4-41에서는 주파수에 따른 접촉전류 계산결과 접촉전압의 한계 선정 시 인구의 95%가 그 값을 상회하는 최저 임피던스 값을 고려하여야 한다고 정의함

표 64 60Hz의 접촉전압, 인체임피던스 및 전류한계값

추정 접촉전압(V)	≤ 50	75	100	125	220	300	400	500
인체임피던스(Ω)	1,725	1,625	1,600	1,562	1,500	1,460	1,425	1,400
전류한계값(A)	29	46	62	80	147	205	280	350

- 아래의 그림은 IEC의 주파수에 따른 접촉전압 변화추이이며, 0Hz~100Hz까지는 접촉전압이 주파수에 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났음. 그러나 100Hz~1kHz까지 지속적으로 접촉전압이 감소를 하게 되며, 1kHz~5kHz까지 다시 접촉전압의 변화가 미미하게 나타남. 여기서 60kHz대역이 포함된 5kHz~60kHz까지는 다시 접촉전압이 증가하게 되며, 60kHz에서 접촉전압은 대략 35V정도인 것을 확인함.

- 결과적으로 주파수가 증가함에 따라 인체임피던스는 감소하여 점근값 575Ω까지 감소하는 것으로 나타났음. 접촉전압의 경우 초기 1kHz까지는 감소하는 패턴을 보이다 5kHz부터 다시 증가하는 것으로 나타남. 이를 근거로 하여 60kHz에서의 인체 임피던스 575Ω과 20kHz에서의 접촉전압 35V를 기반으로 인체 통전전류를 계산한 결과 손-손 구간의 경우 61mA, 손-발 구간은 76mA로 나타남. 이로부터 60kHz 전력설비의 누설전류 제한값은 60mA로 정의하는 것이 좋을 것으로 판단됨

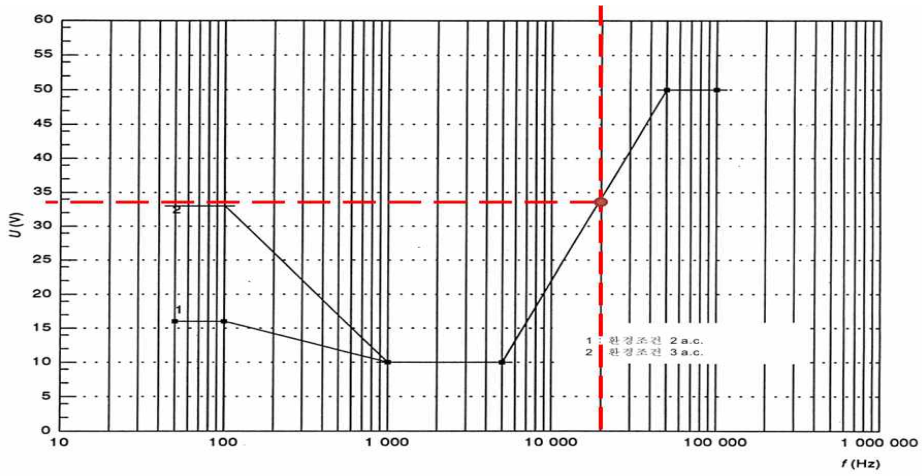


그림 363 정상(비고장)조건시 60kHz 주파수에서의 전압한계

- 고주파 집전부 현장 오동작 메커니즘 기술 분석

· 60kHz 대역의 고주파 설비로 인한 집전부 현장에서의 오동작은 MC 선정시 용량을 제대로 고려하지 않아 오동작하거나 MC의 파손의 원인과 고주파에 따른 선로의 전도열발생으로 인한 오동작원인으로 분류할 수 있음.

- MC 선정시 용량의 미 고려

· 집전부 현장에서의 오동작 원인 중 하나인 MC의 오동작 원인을 분석해보면 MC 동작시 지속적인 아크에 의해 MC의 기계적 결함으로 접점을 개방하려는 시점에 개방이 안 되는 현상과 용량을 초과하여 MC가 파손되는 사례들 들 수 있음. 이에 차단기 용량 선정시 차량의 모터부하 및 배터리의 용량을 고려하고 각종 제원들을 기준으로 차단기를 산정함.

표 65 부하의 제원

항 목	내 역	항 목	내 역
모터부하	100HP=74600W	모터부하전류	149.2A
배터리용량	50kW	배터리전류	100A
AC전압/주파수	500VAC/20kHz	부하전류 총합	249.2A

(2) 집전모듈 설비안전 기술 현장 검증 및 보완

○ 집전모듈 전기안전 시험

- 차폐전 실험장치 구성

· 전기안전연구원 및 경산의 시험장치를 대상으로 가압시 발생되는 모듈부의 급전 위험성 분석

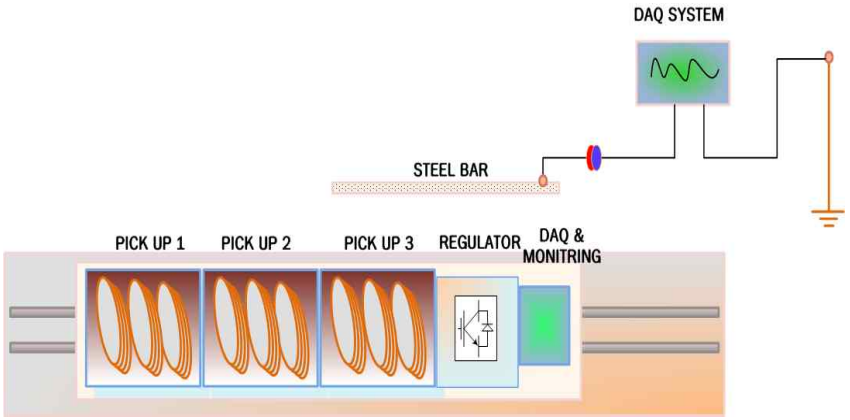


그림 364 차폐전 실험장치 구성

· 측정대상인 피측정 유도 금속단자는 인체와 유사한 모델로 구성하여 완전 노출된 구조에서 데이터 분석

- 차폐전실험결과

· 실험결과 전기안전연구원의 실험장에서는 7(V), 60kHz 대역에서 측정되었으며, 경산의 실험장에서는 7(V), 60kHz 대역에서 측정

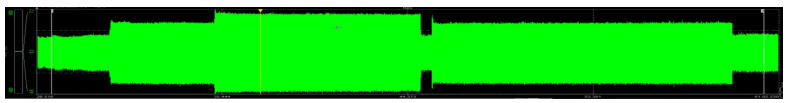


그림 365 차폐전 실험 결과

- 차폐후 실험결과

· 전기안전연구원 및 경산의 시험장치를 대상으로 가압시 발생되는 모듈부의 집전 위험성 분석

· 측정대상인 피측정 유도 금속단자는 인체와 유사한 모델로 구성하여 알루미늄 플레이트를 이용하여 완전 차단된 구조에서 데이터 분석

· 실험결과 전기안전연구원의 실험장에서는 5.2(V), 60kHz 대역에서 측정되었으며, 경산의 실험장에서는 4.3(V), 60kHz 대역에서 측정

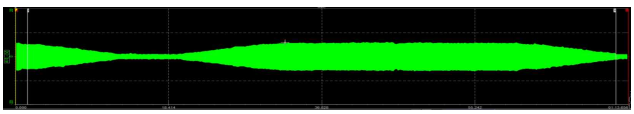


그림 366 차폐후 실험결과

· 유도전압 전안연 5.2 (V)

· 유도전압 경산실험장 4.3 (V)

○ 집전모듈 시스템 상호간섭 및 접지안전 시험 및 개선

- 급전부 및 차량내부 고장발생시 전위차 발생, 접지간의 전위차나 유도 루프에 의한 유도 전압은 크게 전원선(AC/DC), 신호선 및 접지의 3가지로 나누어짐

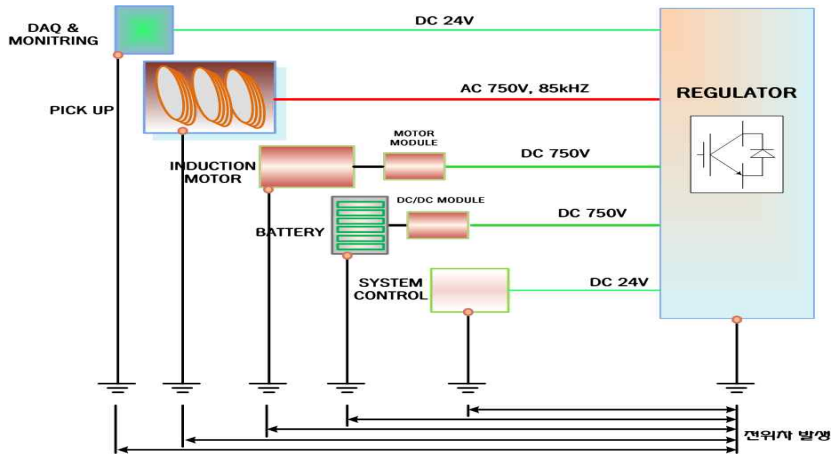


그림 367 레귤레이터 기준 전위차 발생

○ 시스템 내부 순환유도 전류 발생

- 유도전압은 내부·외부 시스템간 상호 공간에서 전자계 변화가 발생하고 전원선·통신선·접지선으로 구성되는 루프 회로를 통과하여 전자계 변화의 영향으로 인해 발생함
- 무선충전시스템은 집전시스템의 전기전자 시스템에 비해 각 장치나 배선으로 인해 전자계 변화의 영향을 강하게 받으며, 유도 루프에 의해 발생된 과전압이 각 장치에 가해져 시스템 오동작 및 파손의 위험성이 있음

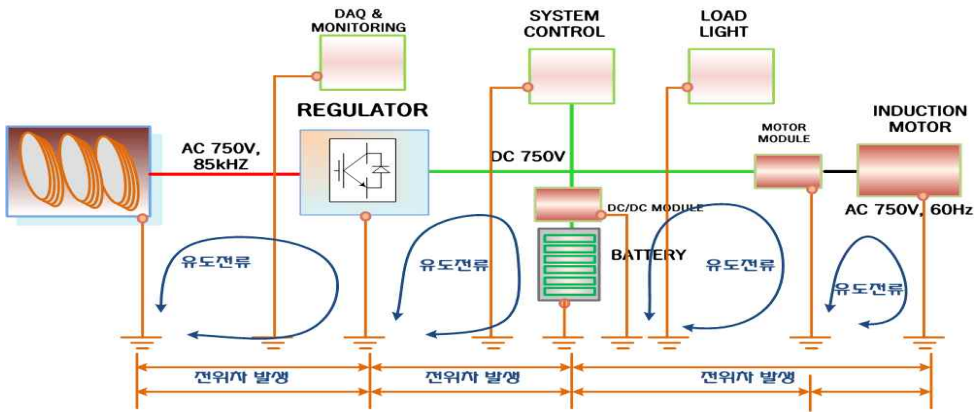


그림 368 유도순환전류 흐름도

(3) 집전모듈 시스템 상호간섭 및 접지안전 현장 검증 및 보완

○ 누설전류 시험

- 1차 급집전부 누설전류 시험의 경우, 무선충전 시 약 5A의 누설전류를 나타냄
- 2차 급집전부 누설전류 시험의 경우, 일정시간 후에 약 7.6A의 값을 나타냄

○ 역률 시험

- 1차 급집전부 접지안전성 역률 시험은 무선충전 중 역률 값이 약 91%를 나타냄

(4) 집전모듈 접지 전기안전 기술 현장검증 및 보완

○ 시스템 접지안전 구성방안

- 집전시스템의 내부에서 장치 사이를 고주파케이실드케이블용 접지선으로 접속하여 전원선과 통신선을 따라 배선함으로써 유도 루프의 영향을 줄이고, 장치간에 발생하는 전위차를 억제해야 함
- 아래 그림에서 나타내는 바와 같이 제어시스템, 모니터링, 전력선간에는 사고 발생시의 지락 전류를 고려해 접지간 본딩을 해야 함

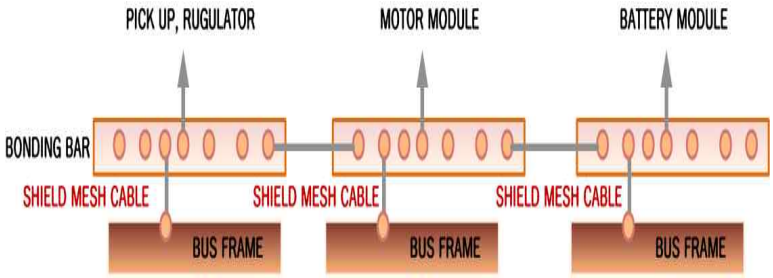


그림 369 접지시스템 구성방안

○ GROUP 유형별 접지안전 구성방안
- 집전시스템 내부와 경전철 내부에서는 다음의 기본 접지시스템을 구축하여야 함
  · 전원선(AC 60kHz)의 픽업은 각각 접지
  · 제어시스템, 모니터링은 등전위화
  · DC 전원의 접지는 통합한 등전위화
  · 접지 그룹간에 쉴드 메쉬와이어 케이블 사용 본딩

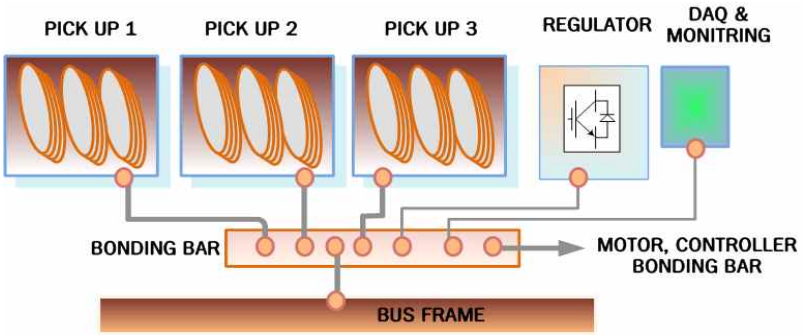


그림 370 그룹별 접지시스템 구축방안

(5) 통합 전기안전의 현장검증 및 보완

○ 집전시스템 통합 전기안전의 전력품질 측정 방안
- 측정 위치
  · 무선전력전송시스템에 의해 발생되는 고조파 및 고주파수 왜곡요소는 집전시스템 내부의 사용주파수(60Hz) 계통에 영향을 미치게 됨. 특히 고조파 계측은 계측위치에 따라 크기 및 고조파 비율이 상이함. 따라서 고조파 측정위치에 대한 명확한 기준이 있어야 함.

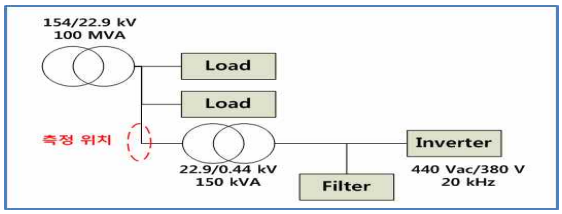


그림 371 고조파 계측지점(POE)

- 고주파수 범위

· 본 보고서에서 제안하는 60kHz 무선전력전송시스템이 연계된 집전시스템은 고주파수 범위에 관한 내용임.

- 측정 데이터 산출 방법

· 200 msec 실효값

· KS C IEC 61000-4-30규정에서는 A급과 B급 성능으로 구분하고 있으며 정밀 측정이 필요한 경우(예를 들어 규격에 대한 준수를 검증하고 분쟁등을 해결하는 계약적 용도의 경우에 사용)를 A급 성능 등급으로 정의하고 있음.

· A급 성능의 경우 파라미터 크기(공급 전압, 고조파, 중간 고조파, 불평형)에 대한 기본적인 측정 시간 간격은 50Hz 전력 시스템의 경우 10사이클 시간 간격, 60 Hz 전력 시스템의 경우 12사이클(200ms) 시간 간격이어야 함.

다) 집전장치 전기안전기준(안) 제출

(1) 산학연 전문가 자문 등을 통하여 제시한 집전장치 전기 안전 기준 제출

○ 전기수송설비 무선전력전송시스템 관리 지침

- 단체표준 제정목적

· 대용량 (kW 급 이상) 무선전력전송과 관련된 전기설비로서, 전자기장을 이용하여 전력을 전송하는 설비와 수전하는 설비 및 영향을 받는 인근 도전부를 포함하며, 전기안전 확보를 위하여 필요한 기술적 사항을 규정함

· 집전장치의 시험 항목 및 방법 등 기술적 사항을 변경 및 개정함

○ 도시철도-고무차륜 경전철 기술 기준 개정안 제안

- 도시철도 철도차량 기술기준(Part53. 고무차량 경전철)에, 무선집전시스템의 집전부 전기안전에 필요한 사항을 추가한 개정안을 제안함.

· “1.3 주요내용” : 도시철도차량(경전철)의 경우 무선급전방식의 집전장치에 대한 기준이 미 포함되어, 집전장치가 추가됨에 따라 주요 설비 조항이 고시되어야함. 여기서, 무선급전방식의 집전장치는 집전코일, 공진형 커패시터, 레귤레이터부로 구성되며, 전송된 전력을 저장하기 위한 배터리부, BMS부, 보호장치부가 추가됨.

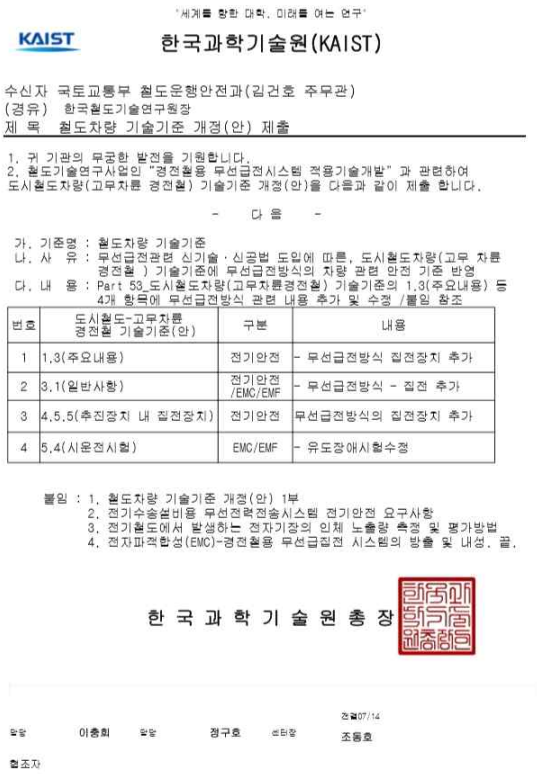
· “3.1 일반사항” : 도시철도 차량(경전철)의 경우 무선급전방식의 집전장치가 추가됨에 따라 무선 급전과 집전 사이에 대한 일반사항 인터페이스 조항에 고시되어야함

· “4.5.5 집전장치” : 무선급전방식 집전장치의 픽업부(집전 코일 및 공진형 커패시터)(KS C IEC 60502-1), 레귤레이터(KSC IEC60146), 배터리부(KS IEC62619), BMS부(KS IEC62619) 보호장치부(전기설비기술기준의 295조)는 각 설비의 관련

된 전기설비기술기준 및 IEC 기준을 만족해야 함

철도차량 기술기준 (Part 53. 도시철도 차량 (고무차륜 경전철) 기술기준	**1.3 주요내용** 본 기술기준은 다음과 같은 내용을 포함하고 있다. 4) 도시철도차량(고무차륜경전철)의 차체 및 설비, 주행장치, 제동장치, 추진장치, 보조전원장치, 차상신호장치, 종합제어장치, 연결장치, 비접촉급전방식의 집전장치 등 주요장치별 설계 및 구조에 대한 요구사항들을 기술한다. (제4장)	비접촉급전방식 집전장치 추가 ※ "비접촉급전방식"이란 제3레일에 해당하는 급전코일을 이용하여 비접촉으로 차량에 전기를 공급하는 방식을 말한다./도시철도건설규칙 개정(안) 협의 중
	3.1 일반사항 1) 제3장에서는 도시철도차량(고무차륜경전철)의 설계에 대한 필수 요구사항을 다음과 같이 기술한다. (1) 3.2의 차량한계, 주행안전, 충돌안전, 화재안전, 전기안전, 위험도분석, 철도소프트웨어 등 안전요구사항 관련 조항들 (2) 3.3의 운행조건, 운행성능 등 성능 요구사항 관련 조항들 (3) 3.4의 차량-전력계통, 차량-신호제어, 차량-통신, 차량-궤도, 차량-기관사, 비접촉급전방식-집전 등 인터페이스 관련 조항들	비접촉급전방식-집전 추가
	4.5.5 집전장치 10) 그 밖에 집전장치의 설계 및 입증에 관한 사항은 KS C IEC 60494-2, IEC 62486, IEC 62499, KS R 9248 등을 참고할 수 있다. 11) 비접촉급전방식의 집전장치는 집전코일, 공진형 커패시터, 레귤레이터부로 구성되며, 전송된 전력을 저장하기 위한 배터리부, BMS부, 보호장치부가 추가된다.	비접촉급전방식의 집전장치 관련 내용 추가

그림 372 철도차량 기술기준에 집전전기안전 관련 내용 추가



"세계를 향한 대학, 미래를 여는 연구"

KAIST 한국과학기술원(KAIST)

수신자 국토교통부 철도운행안전과(김건호 주무관)
(경유) 한국철도기술연구원장
제 목 철도차량 기술기준 개정(안) 제출

1. 귀 기관의 무궁한 발전을 기원합니다.
2. 철도기술연구사업인 "경전철용 무선급전시스템 적용기술개발" 과 관련하여 도시철도차량(고무차륜 경전철) 기술기준 개정(안)을 다음과 같이 제출 합니다.

- 다 음 -

가. 기준명 : 철도차량 기술기준
나. 사 유 : 무선급전관련 신기술·신공법 도입에 따른, 도시철도차량(고무 차륜 경전철) 기술기준에 무선급전방식의 차량 관련 안전 기준 반영
다. 내 용 : Part 53_도시철도차량(고무차륜경전철) 기술기준의 1.3(주요내용) 등 4개 항목에 무선급전방식 관련 내용 추가 및 수정 /붙임 참조

번호	도시철도-고무차륜 경전철 기술기준(안)	구분	내용
1	1.3(주요내용)	전기안전	- 무선급전방식 집전장치 추가
2	3.1(일반사항)	전기안전 /EMC/EMF	- 무선급전방식 - 집전 추가
3	4.5.5(추진장치 내 집전장치)	전기안전	무선급전방식의 집전장치 추가
4	5.4(시운전시험)	EMC/EMF	- 유도장애시험수정

붙임 : 1. 철도차량 기술기준 개정(안) 1부
2. 전기수송분비용 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항
3. 전기철도에서 발생하는 전자기장의 인체 노출량 측정 및 평가방법
4. 전자파적합성(EMC)-경전철용 무선급집전 시스템의 방출 및 내성. 끝.

한 국 과 학 기 술 원 총 장

전결07/14
담당 이충희 담당 정구호 센터장 조동호
협조자

그림 373 집전전기안전 기술기준 제출 공문

타. 급집전 EMI 안전 기준 설계 및 분석

1) 급집전 EMI 안전기준 (1차년도)

가) 급집전 EMI 요구사항 분석

(1) 급전 EMI/EMC 요구사항 분석

○ 국내외 급전 EMI/EMC 평가 기준, 최신 동향 및 기술정보 수집
- 철도시스템 EMI 법적 근거 및 국제표준 분석
- 철도시스템 EMI 기준 분석
- 철도시스템 EMI 측정 관련 표준 수집

(2) 집전 EMI/EMC 요구사항 분석

○ 국내외 집전 EMI/EMC 평가 기준, 최신 동향 및 기술정보 수집
- 철도시스템 EMI 법적 근거 및 국제표준 분석
- 무선급전철도에 대한 현행 철도 EMI 기준 적용의 타당성 검토

2) 급집전 EMI 안전기준(안) (2차년도)

가) 국내 철도의 EMI 안전기준 검토

(1) 현재 고속철도 기준 국내 규격인 KN50을 검토

○ 현재 국내 철도 EMC의 경우 KN50을 따르고 있으며, EN50121, IEC62236시리즈를 참조한 규격임

○ IEC 62236시리즈는 현재 철도에 적용하는 EMI/EMC 표준으로서 일반사항과 전체

철도 시스템에서 외부로 나가는 방사, 열차 및 공차, 철도 차량-장치, 신호처리 및 통신장치의 방사 및 내성, 고정 전력공급 설비와 장치의 방사 및 내성에 대한 EMC 표준을 제공하고 있으며 아래 표와 같음

표 66 IEC-62236시리즈 전체규격 내용

IEC 표준	표준내용
IEC 62236-1	일반사항
IEC 62236-2	전체 철도 시스템에서 외부로 나가는 방사
IEC 62236-3-1	열차 및 공차
IEC 62236-3-2	철도차량- 장치
IEC 62236-4	신호처리 및 통신장치의 방사 및 내성
IEC 62236-5	고정 전력공급 설비와 장치의 방사 및 내성

(2) 60 kHz의 무선충전시스템에서의 EMI 레벨에 맞추어 설계된 규격이 아니므로, 고안하는 철도 시스템에 적절한 EMI 규제 수준을 가지는 것인지 검토 필요

○ 60kHz 무선충전시스템의 지상 급전시스템에는 IEC62236-2에서 규정하는 지상의 변전소의 한계값이 적용됨

○ 차량의 집전시스템은 IEC62236-3-1에서 규정하는 차량시스템의 한계값 적용 검토함

(3) 기존 전기철도기기류의 국내외 EMI 안전기준을 검토하고, 제시한 EMI 저감기술을 적용하여 현재 기준의 타당성을 검토

○ 전기철도기기류의 국외 기준(EN50121)과 국내 기준은 IEC62236 시리즈를 번역한 것으로 동일함

○ 국외 무선급전자동차의 EMI기준인 SAE J2954와 EMI 저감기술을 적용한 측정결과를 아래 그림과 같이 비교 하였으며, 측정 시 주파수 범위별로 사용되는 안테나와 대역폭은 IEC62236-2에서 규정하고 있음

(4) 기존 20 kHz EMI 안전기준 도출에 대한 사례 검토

○ 무선전력전송 전기 버스 사례 검토 및 관련 EMI 기준 및 무선충전차량의 EMI 측정방법에 대한 문서를 검토함

(5) 시뮬레이션 상의 20 kHz~80 kHz의 주파수에 따른 EMI 분석 결과 검토 추가

○ 시뮬레이션 상의 20 kHz~80 kHz 주파수에 따른 EMI분석 결과를 IEC62236-2의 변전소 EMI 기준에 적용하여 검토함

○ 집전시스템에 IEC62236-3-1의 EMI 기준을 적용하여 검토함

○ 검토결과, 60 kHz의 fundamental frequency부분과 홀수차고조파에서 EMI기준을 초과하는 것을 확인하였으며, 홀수차 고조파 부분에서의 타당성 있는 한계값 설정 검토

(6) 국제표준 및 KS표준 등을 수립하기 위한 무선전력전송 분야 전문가 및 국가 기술 기준 담당자로 구성된 자문단 운영(국가연구소, 공공기관 등)

나) 국외 철도의 EMI 안전기준 검토

(1) 현재 국내 철도의 EMI 안전기준은 국외 철도의 EMI 안전기준과 동일 (EN50121)

○ 현재 국내철도의 EMI 안전기준과 국외철도의 EMI안전기준이 동일하므로 국내규격 검토를 통해 국외 안전기준도 검토완료

다) 안전기준 설계

(1) 현재 국내외 EMI 안전 기준대비, 현재 후보기술들이(Meta material & Reactive shielding) 기준보다 현저히 낮게 EMI를 저감한다면 타당성 있는 새로운 안전기준 설계

○ 현재 후보기술을 적용한 모의실험 결과에서 3차, 7차 고조파의 경우 국내 안전기준인 IEC62236-2 변전소 한계값을 초과하는 것을 확인

(2) 60 kHz의 철도무선충전 시스템에서 현재 특정 범위의 주파수 안전기준이 과도하게 낮은 EMI 수준을 요구하는지 여부 검토

○ 현재 60kHz대역에서의 EMI안전기준이 정립되어있지 않으므로 현행 철도표준에서는 낮은 규제수준을 요구하는 것으로 판단됨

(3) 현재 후보기술들을 적용했을 때의 모의실험 결과로, 특정 주파수 범위(ex 60 kHz의 고조파 성분 주파수)에서 EMI 규격을 완화하는 안전기준 설계

○ EMI 저감기술을 적용하여 철도시스템, 철도 차량, 인프라, 차량 내부 전자 기기의 EMI표준을 모두 검토하여 가장 엄격한 기준을 참고하여 안전기준 설계

라) 모의실험 및 분석

(1) 안전기준 설계 후, 기준에 따른 모의실험 및 분석

○ 설계된 안전 기준을 기반으로 주파수별 EMI 규격을 만족하는지 모의실험 진행

○ 제안된 EMI 감쇄 기술들을 적용한 실험과 EMI 감쇄 기술들이 적용되지 않았을 때, 모의실험에서의 EMI 레벨을 비교분석하고 규격의 정당성 분석

○ 모의실험 결과, 설계한 안전기준의 보완이 필요하여 결과기반의 적합한 안전기준으로 수정

○ 플랫폼과 차량내의 다양한 장소에서의 EMI 레벨을 모의실험으로 분석

3) 급집전 EMI 안전기준(안) (3차년도)

가) 급전 EMI/EMC 안전 시험 기준 설계 및 분석

(1) 경전철 급전 EMI/EMC 안전 시험 기준 설계 및 분석

○ 국내외 EMI 안전기준 분석을 통하여 아래와 같은 한계값 설정

- 현행 국내외 철도 EMI안전기준 분석을 통한 EMI 방출 한계값 설정
- CISPR 11 B의 High power(7.7kW)의 한계값 적용

○ 무선전력 시스템의 급전모듈 EMI시험 기준 설계

- 아래 그림과 같이 현행 철도기준과 동일하게 적용된 20kHz 무선 전력전송 버스의 10m 측정법 사례를 적용하여 EMI 시험기준 설계함

나) 집전 EMI/EMC 안전 시험 기준 설계 및 분석

(1) 경전철 집전 EMI/EMC 안전 시험 기준 설계 및 분석

○ 철도차량의 저속 시험 기준은 그래프 B를 적용하였음

- 그래프 B = 15kV ac, 3kV dc, 1.5kV dc의 EMI 방출 한계값임.

○ 측정방법은 IEC 62236-2의 주파수 별 안테나 종류와 거리, 측정 주파수별 대역폭, 지속시간, 10m 측정법을 적용함

4) 급집전 EMI 안전기준(안) (4차년도)

가) 급전 EMI 안전기준 검증 및 개선

(1) 선행 개발된 급전 시스템에 대한 EMI/EMC 안전 기준(안)에 대한 검증 및 분석

○ 급전 EMI 안전 기준 검증 및 분석

- 급전 시스템 EMI 안전기준으로 국외 무선충전시스템의 기준 CISPR 11 그룹B의 High power(7.7 kW)의 한계값 적용 검토
- CISPR 11 그룹B의 High power(7.7kW)의 한계값 3차, 5차 고조파에 10 dB relaxed 적용 검토 및 CISPR 11 측정 세부사항 분석
- 철도 시스템 급전 EMI 안전기준으로 국내 철도기준 KS C IEC62236 시리즈 한계값 적용 검토

○ 급전 EMS 안전 기준 검증 및 분석

- 아래 표와 같이 국내 철도기준인 KS C IEC 62236 시리즈를 참고한 철도시스템 EMS 안전기준 설계분석
- 장치에 따라 KC C IEC 62236 각 파트별 내성시험 방법 및 기준 적용하는 것을 검토
  · KS C IEC 62236-3-2를 참고한 경전철 시스템 장치에 대한 내성시험 방법 및 측정 한계값 포함
  · KS C IEC 62236-4를 참고한 경전철 시스템 의 신호처리 및 통신장치에 대한 내성시험 방법 및 측정 한계값 포함
  · KS C IEC 62236-5를 참고한 경전철 시스템 의 고정 전력 공급 설비와 장치에 대한 내성시험 방법 및 측정 한계값 포함

(2) 분석 데이터를 토대로 급전 EMI/EMC 안전 기준 및 평가 방법 개선(안) 도출

○ 급전 EMI/EMC 안전 기준 및 평가 방법 개선(안) 도출

- EMI/EMC 산학연 전문가 자문회의를 통해 기존의 국내외 EMI/EMC 안전기준에 대한 논의
- EMI 안전기준 논의 결과
  · 철도 시스템에는 시스템별로 각각 KS C IEC62236 시리즈 시험 방법 및 방사 한계값을 적용하는 것을 검토

○ 국내 철도 기준인 KS C IEC 62236 시리즈, 61000-6-2 및 자문회의논의 결과를 참고한 급전 EMI/EMC 안전기준 설계

○ 급전 EMI 안전기준

- 측정방법은 9 kHz ~ 30 MHz, 30 MHz ~ 300 MHz, 300 MHz ~ 1 GHz로 나뉘어짐
  · 9 kHz ~ 30 MHz의 경우, 루프 또는 프레임 안테나를 사용하여 자기장을 측정
  · 30 MHz ~ 300 MHz의 경우, 바이코니컬 안테나를 사용하여 전기장을 측정
  · 300 MHz ~ 1.0 GHz의 경우, 대수 주기 안테나를 사용하여 전기장을 측정
- 기준에 따른 급전 EMI 안전기준 시험방법과 방출 한계값은 아래 그림과 같음
  · 150 kHz 이하 주파수 대역폭: 200 Hz
  · 150 kHz ~ 30 MHz 주파수 대역폭: 9 kHz
  · 30 MHz 초과 주파수 대역폭: 120 kHz

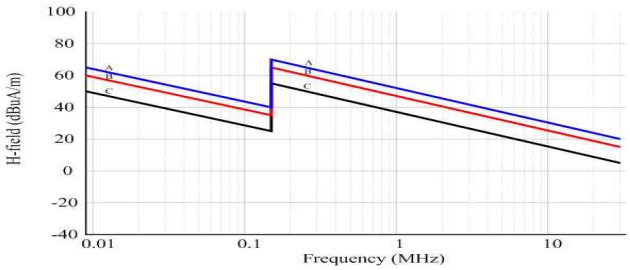


그림 374 변전소의 방출 한계값

나) 집전 EMI 안전기준 검증 및 개선

(1) 선행 개발된 집전 시스템에 대한 EMI/EMC 안전 기준(안)에 대한 검증 및 분석

○ 집전 EMI 안전 기준 검증 및 분석

- 철도 집전 EMI 안전기준으로 국내 철도기준 KS C IEC62236 한계값 적용 검토
- KS C IEC62236 각 문서에 해당하는 시험방법 및 한계값 적용하여 검토 완료

○ 집전 EMI/EMC 안전 기준 및 평가 방법 개선(안) 도출

- EMI/EMC 산학연 전문가 자문회의를 통해 기존의 국내외 EMI/EMC 안전기준에 대한 논의
- 철도 시스템에는 시스템별로 각각 KS C IEC62236 시리즈 시험 방법 및 방사 한계값을 적용하는 것을 검토

(2) 분석 데이터를 토대로 집전 EMI/EMC 안전 기준 및 평가 방법 개선(안) 도출

○ 집전 EMI 안전기준

- 집전 EMI 안전기준의 측정방법은 급전안전기준과 동일하며 기준에 따른 급전 EMI 안전기준 시험방법과 방출 한계값은 개방된 경전철 경로/고속 시험 방출 한계값 및 정지시험/저속시험으로 나누어 수록하였음

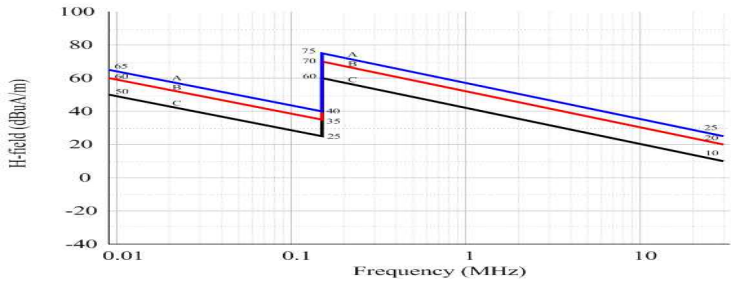


그림 375 개방된 경전철 경로/고속시험의 방출 한계값

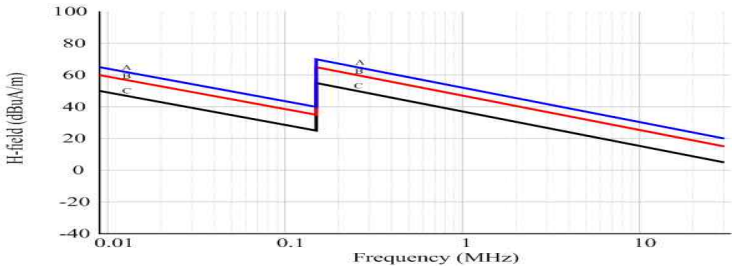


그림 376 변전소/정지시험/저속 시험의 방출 한계값

○ 2차년도, 3차년도에서 검토된 경전철 시스템 및 급집전 시스템 관련 국내외 기준조사 및 EMC 안전기준(안), EMC 전문가로 구성된 자문회의 논의 결과를 기반으로 급집전 시스템과 철도시스템에 대한 '경전철용 전자파 적합성(EMC) - 전체 경전철 시스템 및 급집전 시스템의 방출 및 내성' 안전기준(안) 작성 완료

5) 급집전 EMI 안전기준(안) 제출 (5차년도)

가) 급전 시스템의 EMI/EMC 안전 기준(안) 제안

(1) EMI/EMC 관련 산학연 전문가 자문을 통한 개발된 무선급전 시스템에 대한 안전기준(안) 논의 및 보완

○ 4차년도까지 작성된 경전철용 급전시스템의 EMI/EMC 안전기준(안)을 보완하기 위해 한국철도차량산업협회 단체표준 제정안으로 제출하였음

○ 제출된 초안은 EMI/EMC 관련 산학연 전문가로 구성된 위원회의 1차, 2차의 심의를 거쳐 급전 시스템의 EMI/EMC 안전 기준(안)을 제안하였으며, 경전철용 급전시스템에 대한 EMI/EMC 안전 기준(안)의 해당 의견은 1차 심의에서만 논의되었으며, 2차 심의에서 수정 여부를 확인 받음

○ 1차 심의 의견

- 의견 1) 개정된 2018년도 IEC 62236 버전을 확인하고 수정사항 반영 여부 검토
- 의견 2) 그림2,3,4 고화질로 수정

○ 1차 심의 의견을 반영한 수정안은 아래 표와 같음

표 67 1차 심의 의견에 대한 수정 사항

순번	심의 의견	심의 의견 조치사항
1	개정된 2018년도 IEC 62236 버전을 확인하고 수정사항 반영 여부 검토	• 현재 IEC 62236:2018의 경우에는 9 kHz - 150 kHz의 주파수 범위를 방출 한계값으로 설정해 놓고 있지 않음 • 그러나, 경전철의 경우 철도와는 다르게 무선 급·집전을 이용하여 운행이 되고 있어 150 kHz 이하의 주파수 범위에서도 방출 한계값에 따른 검증이 필요함 • 때문에, 국외 표준대신 국내 규격 KS C IEC62236의 표준을 참고하여 본 기준안의 작성함
2	그림2,3,4 고화질로 수정	• 그림2,3,4 고화질로 수정하였음

(2) 최종 철도용 무선급전 EMI 안전 기준(안) 제출

○ 1차 심의에서 나온 의견에 대하여 수정 및 보완한 최종 철도용 급전 EMI/EMC 안전기준 및 시험기준(안)을 아래 그림과 같이 마련함



그림 377. 최종 급전 EMI/EMC 안전기준 및 시험
기준(안)

○ 본 급전 EMI/.EMC 안전기준(안)은 9 kHz ~ 1 GHz의 철도용 무선급전 시스템에서 발생하는 방출과 내성에 대한 시험방법과 기준을 제공하고 있음
○ 본 기준(안)은 무선급전과 관련된 고정전력 공급 설비와 장치, 무선 주파수에서 공급 선로, 신호 처리 및 통신 장치와 같은 고정전력 공급 설비와 장치에 대한 방출과, 급전시스템, 신호 처리 및 통신장치, 고정 전력 공급 설비와 장치에 대한 내성 시험방법을 기술하고 있음
○ 본 기준(안)의 참고된 규격은 항목별로 다음과 같음
- 변전소에서 발생하는 무선 주파수 방출: KS C IEC 62236-2
- 1 000 V r.m.s. a.c.에서 동작하는 장치에 대한 방출 : KS C IEC 62236-5
- 무선 주파수에서 공급 선로에 대한 방출: KS C IEC 62236-2
- 신호 처리 및 통신 장치에서 발생하는 방출: KS C IEC 62236-4
- 급전시스템의 내성: KS C IEC 61000-6-2
- 신호 처리 및 통신장치에 대한 내성시험 방법: KS C IEC 62236-4
- 고정 전력 공급 설비와 장치에 대한 내성시험 방법: KS C IEC 62236-5

나) 집전 시스템의 EMI/EMC 안전 기준(안) 제안
(1) EMI/EMC 관련 산학연 전문가 자문을 통한 개발된 무선집전 시스템에 대한 안전 기준(안) 논의 및 보완
○ 4차년도까지 작성된 경전철용 집전시스템의 EMI/EMC 안전기준(안)을 보완하기 위해 한국철도차량산업협회 단체표준 제정안으로 제출하였음
○ 제출된 초안은 EMI/EMC 관련 산학연 전문가로 구성된 위원회의 1차, 2차의 심의를 거쳐 집전 시스템의 EMI/EMC 안전 기준(안)을 제안하였으며, 2차 심의에서 수정 여부를 확인 받음
○ 1차 심의 의견
- 의견 1) 경전철 운행상태 조건(정지상태, 저속운행, 고속운행)에 대한 속도기준 명시 여부 검토
- 의견 2) 그림 7,8 방출 한계값 그래프 비고부분 경전철에 해당되지 않는 무관한 항목 삭제
○ 1차 심의 의견을 반영한 수정은 아래 표와 같이 수정을 통하여 '19년 9월 30일 수

정통과로 의결됨

표 68 1차 심의 의견에 대한 수정 사항

순번	심의 의견	심의 의견 조치사항
1	경전철 운행상태 조건(정지상태, 저속운행, 고속운행)에 대한 속도기준 명시 여부 검토	• 주관기관과의 논의결정에 따라 경전철 운행상태 조건을 정지상태만 수록하고 '정지상태'에 대해서만 언급하였음 (저속운행, 고속운행 상태 방사한계값 삭제)
2	그림 7,8 방출 한계값 그래프 비고부분 경전철에 해당되지 않는 무관한 항목 삭제	• 그림 7,8 방출 한계값 그래프 비고부분 경전철에 해당되지 않는 무관한 항목 삭제완료

○ 2차 심의 의견

- 의견 1) 개정된 단체표준규격에 이미 무선 급진전 시스템의 방출한계값이 있는데 차량 정차 중 시험에 포함하여야 되는지에 대한 의문임
- 의견 2) 저속, 고속운행 방사제한치가 삭제된 명확한 사유가 필요. 해당 단체표준은 "경전철시스템과 무선급집전시스템"의 방출 및 내성에 대한 규격으로 차량의 운행 중 시험도 포함되어야 된다고 판단됨
- 의견 3) 작년 협의 당시 차량의 방출 및 내성시험항목도 (5.2.6절 6.2.3절) 개정된 최신규격의 적용이 필요함을 언급 했으나 금번 개정안에 반영되지 않음

○ 2차 심의 의견을 반영한 수정안은 아래 표와 같음

표 69 2차 심의 의견에 대한 수정 사항

순번	심의 의견	심의 의견 조치사항
1	개정된 단체표준규격에 이미 무선 급진전 시스템의 방출한계값이 있는데 차량 정차 중 시험에 포함하여야 되는지에 대한 의문임	• 9 kHz - 1 GHz 방출 한계값(9 kHz - 150 kHz 포함)이 반드시 필요하기 때문에 현재 기존주파수 범위가 포함되어 있는 국내 규격 KS C IEC62236의 표준을 참고하여 본 기준안을 작성함 • 또한 현재 개정된 CISPR 11 문서에 포함된 무선 급집전 시스템의 방출 한계값은 1 MW급의 대용량 철도시스템에 적용하기 어려움이 있기 때문에 본 기준안에서 제외 되었으며, 기존의 철도 시스템 기준(KS C IEC 62236)을 적용하여 한계값을 측정할 필요성이 있음.
2	저속, 고속운행 방사제한치가 삭제된 명확한	• 기존의 가선식 경전철 시스템에서는 저속운행 및 고속운행시 생성되는 EMI 가 상이 할 수 있으나 무선전

	사유가 필요. 해당 단체 표준은 “경전철시스템과 무선급집전시스템”의 방출 및 내성에 대한 규격으로 차량의 운행 중 시험도 포함되어야 된다고 판단됨	력전송 경전철 시스템에서는 운행 상태에서의 EMI 생성이 정지 상태와 다르지 않을 것으로 사료 되기 때문에 본 기준안에서는 철도 방출 한계값의 가장 낮은 조건인 ‘정지상태’만을 방출 한계값으로 수록하였음. • 또한, 현 기준안에서는 경전철 운행상태 여러조건 중 정지상태만 수록하고 ‘정지상태’ 을 명시하였음 (저속운행, 고속운행 상태 방사한계값 삭제)
3	작년 협의 당시 차량의 방출 및 내성시험항목도 (5.2.6절 6.2.3절) 개정된 최신규격의 적용이 필요함을 언급 했으나 금번 개정안에 반영되지 않았습니다.	• 관련표준안이 개정되었을 때, 추후 수정 작업이 필요할 것으로 보임

(2) 최종 철도용 무선집전 EMI 안전 기준(안) 제출

○ 1차, 2차 심의에서 나온 의견에 대하여 논의 및 보완한 최종 경전철용 집전 EMI/EMC 안전기준 및 시험기준(안)을 아래 그림과 같이 마련함

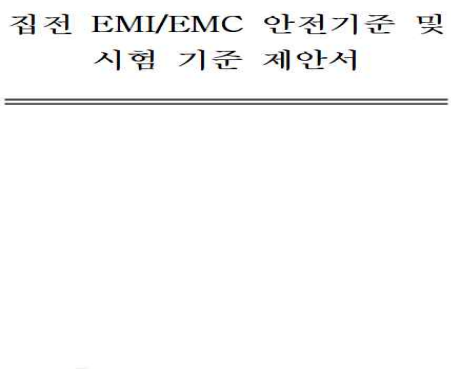


그림 378. 최종 집전 EMI/EMC 안전기준 및 시험 기준(안)

○ 본 집전 EMI/.EMC 안전기준(안)은 9 kHz ~ 1 GHz의 경전철용 무선집전 시스템에서 발생하는 방출과 내성에 대한 시험방법과 기준을 제공하고 있음

○ 본 기준(안)은 무선집전과 관련된 경전철 시스템 및 장치에 대한 방출과, 집전시스템에 대한 내성 시험방법을 기술하고 있음

○ 본 기준(안)의 참고된 규격은 항목별로 다음과 같음

- 경전철 시스템에 대한 방출: KS C IEC 62236-3-1
- 경전철시스템 장치에 대한 방출 : KS C IEC 62236-3-2
- 집전시스템에 대한 내성: KS C IEC 61000-3-2

다) 전자파 영향에 대한 안전기준에 대한 개정

(1) 도시철도-고무차륜 경전철 기술기준 개정(안) 마련

○ 국토교통부에서 관리하고 있는 도시철도-고무차륜 경전철 기술기준 개정(안) 마련을 위하여 카이스트, 단국대학교, 위에너지와의 협의 하에 EMI/EMI 무선급집전과 관련된 항목을 아래 표와 같이 추가하였음

표 70 무선급전 방식 관련 내용 추가 및 수정

번호	조	구분	내용
1	1.3(주요내용)	전기안전	- 무선급전방식 집전장치 추가
2	3.1(일반사항)	전기안전/EMC/EMF	- 무선급전방식 - 집전 추가
3	4.5.5(추진장치 내 집전장치)	전기안전	- 무선급전방식의 집전장치 추가
4	5.4(시운전시험)	EMC/EMF	- 유도장애시험수정

○ 「도시철도-고무차륜 경전철 기술기준」 개정(안)

- 「도시철도-고무차륜 경전철 기술기준」 중 5.2.14.5 전자기 적합성 시험의 경우 국립전파연구원 '정보통신부야 국가표준'의 폐지표준에 대한 일부 대체표준 적용으로 인하여 아래 그림과 같이 개정

도시철도-고무차륜 경전철 기술기준(안)	변경(안)	사유
3.1 일반사항 1) 제3장에서는 도시철도차량(고무차륜경전철)의 설계에 대한 필수 요구사항을 다음과 같이 기술한다. (1) 3.2의 차량한계, 주행안전, 충돌안전, 화재안전, 전기안전, 위험도분석, 철도소프트웨어 등 안전요구사항 관련 조항들 (2) 3.3의 운행조건, 운행성능 등 성능 요구사항 관련 조항들 (3) 3.4의 차량-전력계통, 차량-신호제어, 차량-통신, 차량-궤도, 차량-기관사 등 인터페이스 관련 조항들 (4) 3.5의 운영 및 유지관리 요구사항 관련 조항들 (5) 3.6의 안전운행, 보건, 소음, 구원운전 등 운용한계 요구사항 조항들 2) 본 기술기준의 제3장에서 기술된 핵심적인 필수요구사항과 제4장에서 기술된 주요장치별 기준들은 다음의 핵심사항들을 기반으로 한다. (1) 안전 (2) 최소성능 (3) 인터페이스 (4) 운용 및 유지관리 (5) 신뢰성 및 가용성	**3.1 일반사항** 1) 제3장에서는 도시철도차량(고무차륜경전철)의 설계에 대한 필수 요구사항을 다음과 같이 기술한다. (1) 3.2의 차량한계, 주행안전, 충돌안전, 화재안전, 전기안전, 위험도분석, 철도소프트웨어 등 안전요구사항 관련 조항들 (2) 3.3의 운행조건, 운행성능 등 성능 요구사항 관련 조항들 (3) 3.4의 차량-전력계통, 차량-신호제어, 차량-통신, 차량-궤도, 차량-기관사, 비접촉급전방식의 집전 등 인터페이스 관련 조항들 (4) 3.5의 운영 및 유지관리 요구사항 관련 조항들 (5) 3.6의 안전운행, 보건, 소음, 구원운전 등 운용한계 요구사항 조항들 2) 본 기술기준의 제3장에서 기술된 핵심적인 필수요구사항과 제4장에서 기술된 주요장치별 기준들은 다음의 핵심사항들을 기반으로 한다. (1) 안전 (2) 최소성능 (3) 인터페이스	-비접촉 급전방식의 집전 추가 - 본 도시철도 차량(경전철)의 경우 비접촉급전 방식의 집전장치가 추가됨에 따라 비접촉 급전과 집전 사이에 대한 일반사항 인터페이스 조항에

그림 379 3.1 일반사항에 비접촉 급전방식의 집전장치 추가

- 「도시철도-고무차륜 경전철 기술기준」 중 5.4.5 유도장해시험의 경우 단체표준인 경전철 시스템 및 무선 급집전 시스템의 방출 및 내성 규격을 아래 그림과 같이 추가하였음

도시철도-고무차륜 경전철 기술기준(안)	변경(안)	사유
5.4.5 유도장애시험 1) 적용범위 해당 철도차량의 유도장애에 대한 설계적합성 또는 형식동등성을 시험으로 입증하는 경우에 적용된다. 2) 참고규격 (1) IEC/TS 62597 : 인체의 노출되는 철도 환경의 전기, 전자 장치에서 방사되는 자기장의 측정 절차 (2) KS C IEC 62236-1, IEC 62236-1:철도용 전기자기적합성 - 제1부 : 일반사항 (3) KS C IEC 62236-2, IEC 62236-2 :철도용 전기자기적합성 - 제2부 : 전체 철도 시스템에서 외부로 나가는 방출 (4) KS C IEC 62236-3-1, IEC 62236-3-1:철도용 전기자기적합성 - 제3-1부 : 철도차량 - 열차 및 공차 3) 시험 방법 및 기준 분 | 정 | 시험방법 | 참고규격 및 기준 | 비고 추진 장치 대기 | KS C IEC | 측정속	**5.4.5 유도장애시험** 1) 적용범위 해당 철도차량의 유도장애에 대한 설계적합성 또는 형식동등성을 시험으로 입증하는 경우에 적용된다. 2) 참고규격 (1) IEC/TS 62597 : 인체의 노출되는 철도 환경의 전기, 전자 장치에서 방사되는 자기장의 측정 절차 (2) KS C IEC 62236-1, IEC 62236-1 :철도용 전기자기적합성 - 제1부 : 일반사항 (3) KS C IEC 62236-2, IEC 62236-2 :철도용 전기자기적합성 - 제2부 : 전체 철도 시스템에서 외부로 나가는 방출 (4) KS C IEC 62236-3-1, IEC 62236-3-1 :철도용 전기자기적합성 - 제3-1부 : 철도차량 - 열차 및 공차 3) 시험 방법 및 기준 분 | 정 | 시험방법 | 참고규격 및 기준 | 비고 추진 장치 대기 | KS C IEC | 측정속	- 3.1 일반사항에 비접촉 급전방식의 집전장치가 추가되어 있으므로 5.4.5의 유도장애시험을 그대로 적용한다. - 급집전 충전기술을 위해 60 kHz의 주파수를 이용하므로, 전자파 인체 안전성 평가를 위한 주파수

그림 380 유도장애시험 변경 내용



"세계를 향한 대학, 미래를 여는 연구"

KAIST 한국과학기술원(KAIST)

수신자 국토교통부 철도운행안전과(김건호 주무관)
(경유) 한국철도기술연구원장
제 목 철도차량 기술기준 개정(안) 제출

1. 귀 기관의 무궁한 발전을 기원합니다.
2. 철도기술연구사업의 "경전철용 무선급전시스템 적용기술개발" 과 관련하여 도시철도차량(고무차륜 경전철) 기술기준 개정(안)을 다음과 같이 제출 합니다.

- 다 음 -

가. 기준명 : 철도차량 기술기준
나. 사 유 : 무선급전관련 신기술·신공법 도입에 따른, 도시철도차량(고무 차륜 경전철) 기술기준에 무선급전방식의 차량 관련 안전 기준 반영
다. 내 용 : Part 53_도시철도차량(고무차륜경전철) 기술기준의 1.3(주요내용) 등 4개 항목에 무선급전방식 관련 내용 추가 및 수정 /붙임 참조

번호	도시철도-고무차륜 경전철 기술기준(안)	구분	내용
1	1.3(주요내용)	전기안전	- 무선급전방식 집전장치 추가
2	3.1(일반사항)	전기안전 /EMC/EMF	- 무선급전방식 - 집전 추가
3	4.5.5(추진장치 내 집전장치)	전기안전	무선급전방식의 집전장치 추가
4	5.4(시운전시험)	EMC/EMF	- 유도장애시험수정

붙임 : 1. 철도차량 기술기준 개정(안) 1부
2. 전기수송설비용 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항
3. 전기철도에서 발생하는 전자기장의 인체 노출량 측정 및 평가방법
4. 전자파적합성(EMC)-경전철용 무선급집전 시스템의 방출 및 내성. 끝.

한 국 과 학 기 술 원 총 장

전결07/14
담당 이충희 담당 정구호 센터장 조동호
협조자

그림 381 급집전 EMI 안전 기준 제출 공문

○ 무선급전시스템의 EMI 안전기준의 IEC 국제표준과의 비교

- 단체표준의 EMI 안전기준의 경우, KS C IEC62236 문서를 참고하여 만들었으며, KS C IEC 62236의 경우 IEC 62236:2006의 내용과 동일함
- 2018년에 IEC 62236 문서에서 9 - 150 kHz의 주파수가 삭제 되었으나, 무선

급전 경전철의 경우 철도와는 다르게 무선 급·집전을 이용하여 운행이 되고 있으며, 150 kHz 이하의 주파수 범위에서도 방출 한계값에 따른 검증이 필요하기 때문에 9 - 150kHz 대역 포함 여부는 향후 법제화 단계에서 전문가 의견 수렴 후 추가적인 검토가 필요함

표 71 무선급전시스템의 EMI 안전기준의 IEC 국제표준과의 비교

순번	항목	KS	신청표준	차이점
1	4.1 EMC의 관리	EMC 관리를 위해서는 공식적인 계획에서 모든 경우를 고려해야 한다. 이러한 계획은 가능한 한 프로젝트의 초기 단계에서 수립되어야 하며, 부속서 B에서 이러한 관리 계획을 자세하게 설명하고 있다. 비고 부속서 B는 적용 범위가 제한된 규정이다. 단, 이 적용 범위를 벗어난 동작시 관리 계획의 사용이 유익한지를 고려해야 한다.	EMC 관리를 위해서는 공식적인 계획에서 모든 경우를 고려해야 한다. 이러한 계획은 가능한 한 프로젝트의 초기 단계에서 수립되어야 하며, KS C IEC 62236-1 에서 이러한 관리 계획을 자세하게 설명하고 있다.	KS - 부속서 B참고, 비고 신청표준 - KS C IEC 62236 - 1 참고
2	5.2 전자파 장애 (EMC) 시험 방법 및 측정 한계값 5.2.2 경전철 운행 중에 발생하는 방출 5.2 방출 시험 방법 및 측정 한계값 5.2.3 고정 전력 공급설비와 장치에서 발생하는 방출	-	각 절 '비고'에 '예외적으로 면허주파수에 한해 Ambient level을 제외한다.' 항목 추가	
3	5.2.4 무선 주파수에서 공급 선로에서 발생하는 방출 5.2.5 신호처리 및 통신장치에서 발생하는 방출	-	각 항의 시험 방법 및 측정 한계 값은 KS C IEC 62236 문서를 따르도록 명시함	

순번	항목	KS	신청표준	차이점
	5.2.6 경전철 차량 장치에 대한 방출 6.1 전자파 내성 (EMS) 시험 성능기준 6.2.1 무선 급집전 시스템에 대한 내성 6.2.2 고정 전력 공급 설비와 장치에 대한 내성시험 방법 6.2.3 경전철 차량 장치에 대한 내성 6.2.4 신호 처리 및 통신장치에 대한 내성시험 방법			

○ 전자파 적합성 부적합 사례 검토

- 철도 환경에서 GPS 수신기를 사용할 때의 주요 문제 중 하나는 기관차, 전원 공급 장치, 캐터너리, 전기 장치, 신호 및 통신 장비와 같은 수많은 요인에 의한 다중 전자기 간섭(EMI)임. 하지만 철도 장비가 기관차 객실에 위치한 GPS 수신기의 성능에 미치는 간섭 효과는 거의 분석되지 않음
- 2011년 국립전파연구원 기술협의회에서 GPS를 무선 수신기능으로 판단하여 무선기기 전자파적합성 공통기준(KN 301 489-1)을 적용하기로 하였으며, 다른 기기에 장착될 때에는 GPS 수신기가 수신기능만 있어 전자파가 적게 발생하므로 장착된 제품의 전자파적합성 기준을 적용함
- EMC 문제로 인하여 발생하는 사고 사례는 미국·유럽의 철도 시스템에서 자동 차량 제어 시스템 내 선로 감시 회로의 기생 발진 때문에 발생한 선례가 있음
- 이동통신 전화로 인한 철도 시스템의 신호 및 발권기 방해 현상이 일어난 사례로는, 2005년 덴마크에서 GSM 휴대전화의 전자기 간섭으로 인해 철도의 신호시스템의 녹색 신호가 적색 신호로 바뀌고, 사용하는 발권 시스템에도 간섭이 발생하였음
- 국내에서는 2010년에 KTX-산천 열차가 시운전 할 때에 열차가 없는 상행선 구간에서 궤도점유현상이 발생하였으며, 궤도점유구간에 열차가 진입할 때에 비상제동이 작동하여 열차정지 장애가 발생함. KTX산천 차량이 운행하면서 발생하는 고조파와 AF궤도 회로에서 사용하는 주파수가 일치하여 궤도점유를 감지하는 궤도계전기가 부정확하게 동작한 것이 원인
- 그 외 전자파 적합성으로 인하여 차량 전장시스템이나 의료기기 등에서 부적합 사례가 발생하였음

- 차량의 에어백 제어 시스템이나 선박 제어 시스템 고장으로 인한 기능 오동작 또는 충돌사고의 조사결과 유도성 노이즈, 증폭기의 차폐 불량이 이유로 보고되었음
- 의료 기기 및 시스템에서 발생하는 EMC 문제로 환자 모니터링 기기와 제세동기 오동작으로 인하여 환자가 사망한 사고가 발생하였음

파. 급집전 EMF 안전 기준 설계 및 분석

1) 급집전 EMF 안전기준 (1차년도)

가) 급집전 EMF 안전 기준 요구사항 분석

(1) 급집전 EMF 안전 기준 요구사항 분석

○ 기존 국내·외 EMF 평가 기준, 최신 동향 및 기술정보 수집

○ 국내·외 급집전 EMF 평가 기준 검토

2) 급집전 EMF 안전기준(안) (3차년도)

가) 급집전 EMF 안전기준 설계

(1) 국내외 급집전 EMF 안전기준 검토

○ WHO산하의 IARC에서 2002년에 저주파 자기장을 발암물질 등급 2B로 분류

○ ICNIRP Guidelines 1998, ICNIRP Guidelines 2010, IEEE C95.1(2005), 전자파인체보호기준(과학기술정통부 고시 제2019-4호) 등 국내외 전자파 인체보호기준 검토

○ 국외 주요국의 전자파 인체보호기준 조사 및 분석

표 72 각국의 전자파 인체보호기준 법제화 현황

	나라	전자파 인체보호기준				비고
아시아	대한민국	일반인	ICNIRP(1998)	전기장 [V/m]	87	법적 규제
		직업인	ICNIRP(1998)	자속밀도[uT]	6.25	
유럽	영국, 프랑스, 스웨덴, 핀란드, 스페인	일반인	ICNIRP(1998)	전기장 [V/m]	87	권고 사항
				자속밀도[uT]	6.25	
		직업인	ICNRIP(2010)	전기장 [V/m]	82	법적 규제
				자속밀도[uT]	27	
	독일	일반인	ICNRIP(2010)	전기장 [V/m]	83	법적 규제
				자속밀도 [uT]	27	
		직업인	Electromagnetic fields Accident prevention regulation (BGV B11)	전기장 [V/m]	1,066	법적 규제
				자속밀도 [uT]	67.9	
	덴마크, 네덜란드, 오스트리아	일반인	ICNIRP(1998)	전기장 [V/m]	87	권고 사항
				자속밀도[uT]	6.25	
		직업인	ICNRIP(2010)	전기장 [V/m]	82	권고 사항
				자속밀도[uT]	27	
북미	미국	일반인	IEEE	전기장 [V/m]	614	법적 규제
				자속밀도[uT]	205	
		직업인	IEEE	전기장 [V/m]	1,842	
				자속밀도[uT]	615	

○ 급집전 EMF 안전기준 분석

표 73 ICNIRP Guidelines 1998 및 ICNIRP Guidelines 2010 의 분석

항목	가이드 라인	주요 차이점
기본 제한치	1998년도 가이드라인	- 내부 유도전류: 대부분의 실험 데이터가 이 값을 기반으로 하였음.
	2010년도 가이드라인	- 내부 유도전기장: 내부 유도전기장을 근거로 한 충분한 정보 이용 가능.
고려된 인체 영향	1998년도 가이드라인	- 신경계 기능에 대한 영향 방지. - 중추신경계 조직에서만의 유도 전류 밀도 제한 안내 섬광은 고려하지 않음.
	2010년도 가이드라인	- 뇌에서의 영향 모델로 망막에 미치는 영향 고려. - 안내 섬광 문턱치가 노출 제한에 대한 근거 제공. - 말초유수신경조직과 중추유수신경조직에 미치는 자극 영향들이 포함됨. - 인체의 어떠한 조직에 대해서도 노출 제한이 가해짐. - 제한치들은 현재의 과학적 근거를 기반으로 하고 있음. - 조직 전도도를 근거로 해서 유도전류밀도에 대한 이전지침으로부터 단순히 변화시킨 것이 아님.
노출 기준치	1998년도 가이드라인	- 단순한 기하학적 모델 기반의 Dosimetry이용.
	2010년도 가이드라인	- 해부학적으로 상세한 인체 모델 기반의 Dosimetry모델과 개정된 기본 제한치 적용 . 자기장 노출 기준치: 덜 보수적인 경향을 띰. . 전기장 노출 기준치: 약간의 예외는 있으나, 기본적으로는 불변임.
접촉 전류	1998년도 가이드라인	- 감전과 화상 위험 회피. - 일반인에 대한 접촉전류 노출 기준치는 직업인에 대한 값의 절반 적용(생물학적 반응을 나타내는 접촉전류 문턱치가 어린이의 경우, 성인의 반임을 감안하였음.) - 인지를 방지하는 것이 목적이 아니고 고통스러운 감전을 방지하는 것이 목적임.
	2010년도 가이드라인	- 1998년도 가이드라인과 동일.

표 74 저주파 전자기장에의 인체 노출에 따른 건강영향 주요 결론 요약

과학적 근거	건강 영향
신경 인지 행동 과학	• 피부 또는 피하지방에서 말초신경자극이 발생했다고 가정했을 때, 최소 문턱치(추정치): 4-6V/m • 1-3kHz보다 큰 주파수들에서 상승 • 10Hz보다 작은 주파수들에서 상승 • 중추신경자극 최소 문턱치(이론치): ~ 10 V/m peak • 1-3kHz보다 큰 주파수들에서 상승 • 10Hz보다 작은 주파수들에서 상승 • 안내섬광 유도전계강도문턱치: • 50-100 mV/m at 10-20Hz • 10-20Hz 보다 더 크거나 더 작은 주파수들에서 상승(상당한 불확실성은 존재함).
신경 내분 비계	• 증거 없음.
퇴행성 뇌질환	• 증거가 결정적이 아님.
심혈관계 질환	• 연관 관계를 제시하는 증거 없음.
생식 및 발생	• 증거 미약.
암	• 소아 백혈병과 50/60Hz 자기장 장기 노출 간의 생태학적 증거 미약. • 동물 실험에서 증거 없음. • 조직 실험에서는 모호한 측면이 있을지라도 증거 없음.

표 75 인체 내부에 유도되는 전기장 세기(Dosimetry 결과 분석)

	최대 유도되는 인체 내부 전기장	일반인에 대한 Basic Restriction	Basic Restriction을 만족시키기 위한 자속밀도 및 전기장 세기	Reference Level
50 Hz, 1 mT의 자속밀도에 노출된 뇌	23 ~ 33 mv/m	24 mV/m	0.72 mT	0.2 mT
50 Hz, 1 mT의 자속밀도에 노출된 피부	20 ~ 60 mV/m	400 mv/m	6.66 mT	0.2 mT
50 Hz, 1 kV/m의 전기장에 노출된 뇌	1.7 ~ 2.6 mV/m	24 mV/m	9.2 kV/m	5 kV/m
50 Hz, 1 kV/m의 전기장에 노출된 피부	12 ~ 33 mV/m	400 mV/m	12.12 kV/m	5 kV/m

[Reference : Dimbylow 2005; Bahr et al. 2007; Hirata et al. 2009; Nagaoka et al. 2004]

(2) 급집전 EMF 안전기준 설계

○ 도시 철도형 무선 급집전 시스템

- 60 kHz 주파수를 이용하여 자기 공진에 의한 전력을 전달
- 급전 및 집전 코일에 의하여 철도 내부 및 외부에 높은 자기장을 형성함
- 도시 철도형 무선 급집전 시스템의 인체 안전성 평가를 위한 평가기준, 평가 방법, 측정 방법에 대한 기준이 필요함

나) 급집전 EMF 안전기준 분석

(1) 급집전 EMF 모의실험

○ 무선 급전시스템을 모델링하여 수치해석을 통한 EMF 모의 분석 수행

- 집전코일 위에 알루미늄 차폐판 유무에 따른 전자파 차폐 성능 분석

○ 수치해석 결과

- 알루미늄 차폐판에 의하여 자기장 세기가 약 85 % 이상 감소함

(2) 급집전 EMF 안전기준 분석

○ 도시철도형 급집전 시스템 EMF 안전 기준(안)

표 76 무선급집전 경전철 시스템의 EMF 안전기준(안)

		Reference Level		
		B-field [μT]	H-field [A/m]	E-field [V/m]
ICNIRP Guidelines 2010	일반인	27	21	83
	직업인	100	80	170

3) 급집전 EMF 안전기준(안) (4차년도)

가) 급집전 EMF 안전 기준 검증 및 개선

(1) 60 kHz 무선전력전달 EMF 인체노출 안전기준 검증 및 개선

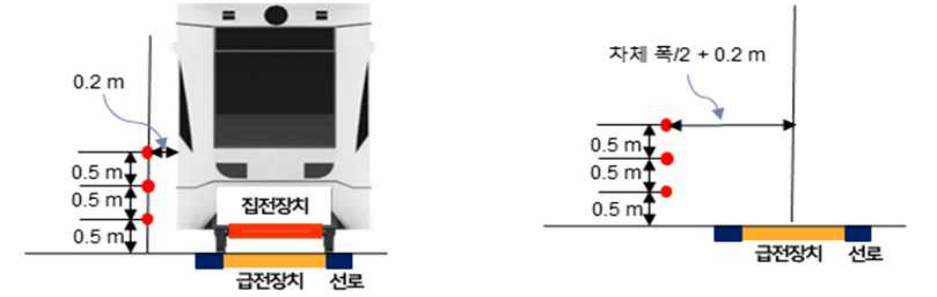
○ 무선급집전 시스템에 대한 EMF 시험기준(안) 및 안전기준(안)을 도출함

○ 무선급집전 시스템에서 발생하는 EMF에 대한 시험 방법은 차량 외부와 차량

내부, 플랫폼, 고정설비에 대한 시험 기준(안)을 제시하였음

- 시험기준(안)

· 차량 외부 측정 위치



(a) 열차가 선로에 있을 때 (b) 열차가 선로에 없을 때

그림 382 차량외부에서의 전자파 노출량 측정위치(직업인만 적용)

· 플랫폼 측정 위치

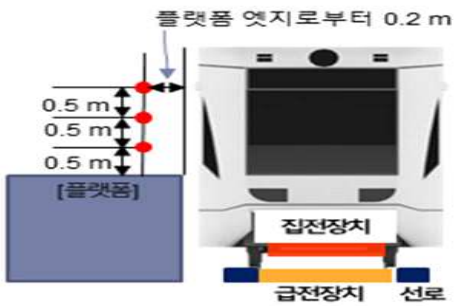


그림 383 플랫폼에서의 전자파 노출량 측정 위치 (직업인, 일반인 모두 적용) >

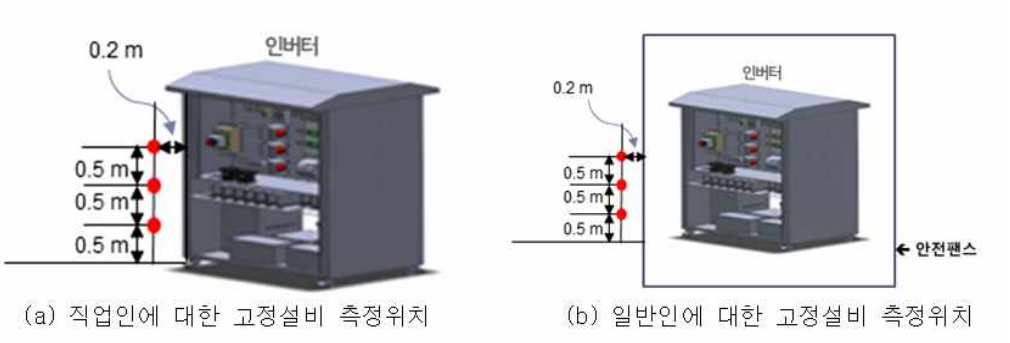
· 차량 내부 측정 위치



(a) 출입문 또는 열차의 연결통로의 측정위치 (b) 의자의 측정 위치

그림 384 차량 내부에서의 전자파 측정위치(직업인, 일반인 적용)

· 고정 설비 측정 위치



(a) 직업인에 대한 고정설비 측정위치 (b) 일반인에 대한 고정설비 측정위치

그림 385 고정설비에 대한 전자파 측정위치

- 안전기준(안) : ICNIRP Guidelines 2010을 적용함.

표 77 무선급집전 경전철 시스템의 EMF 안전기준(안)

		Reference Level		
		B-field [μT]	H-field [A/m]	E-field [V/m]
ICNIRP Guidelines 2010	일반인	27	21	83
	직업인	100	80	170

(2) 60 kHz 무선전력전달 EMF 인체노출 시험기준 검증 및 개선

○ 무선급집전 시스템에 대한 EMF 수치해석

○ 무선급집전 시스템에서 발생하는 EMF에 대한 시험 방법은 차량 외부와 차량 내부, 플랫폼에 대한 EMF 수치해석 수행

- 경산시험선에 대한 모델링 및 수치해석 입력 파라미터

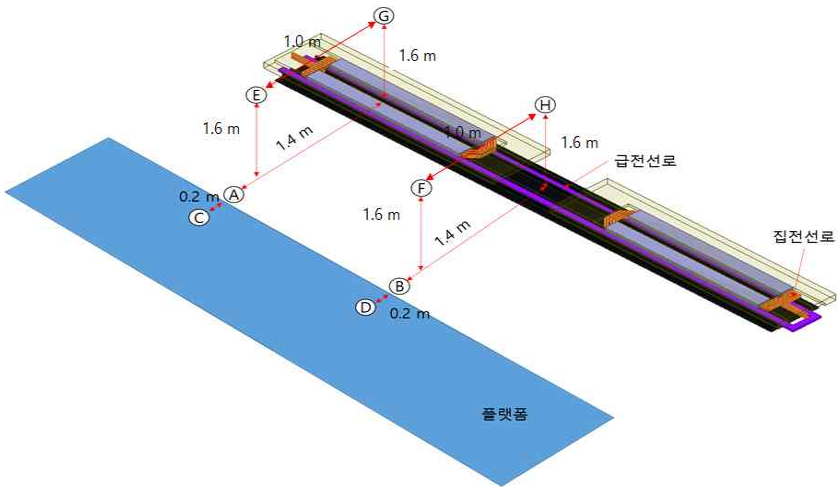


그림 386 수치해석을 위한 무선 급집전 시스템 모델링

표 78 수치해석 입력 파라미터

Parameters	사양
동작 주파수	60 kHz
급전 입력전류	500 [A]
집전 출력전류	420 [A]

- 차량 외부 수치해석 결과

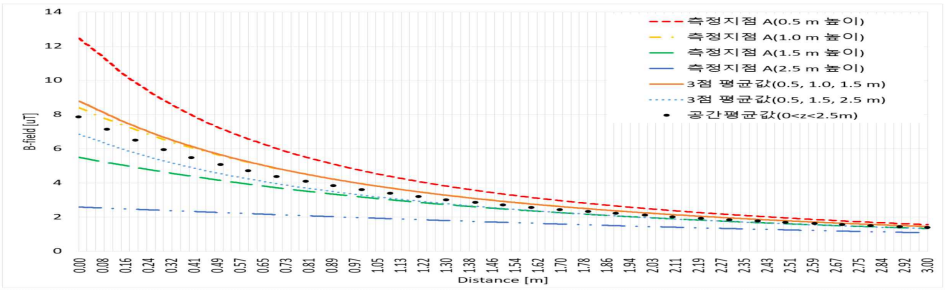


그림 387 해석지점 A에서의 자기장 세기 해석 결과

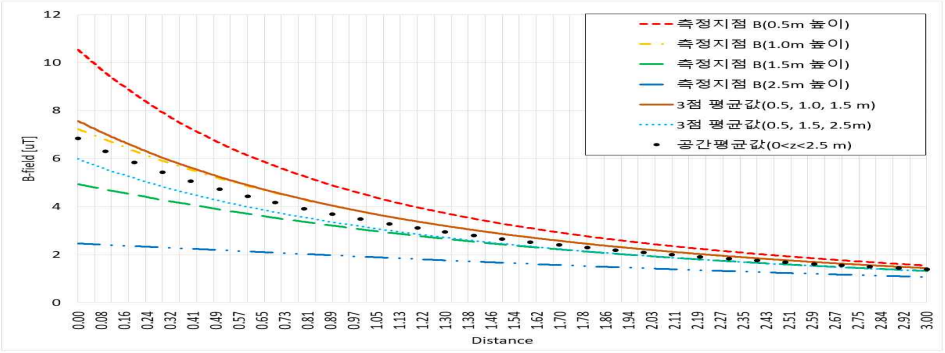


그림 388 해석지점 B에서의 자기장 세기 해석 결과

· 차량외부 해석 결과 0.5 m 지점과 1.0 m 지점에서 일반인 기준(6.25 μT)를 초과하지만 직업인 기준(30.7μT)은 만족함 => 차량 외부에서의 측정은 직업인에게만 적용됨.

- 플랫폼 수치해석 결과

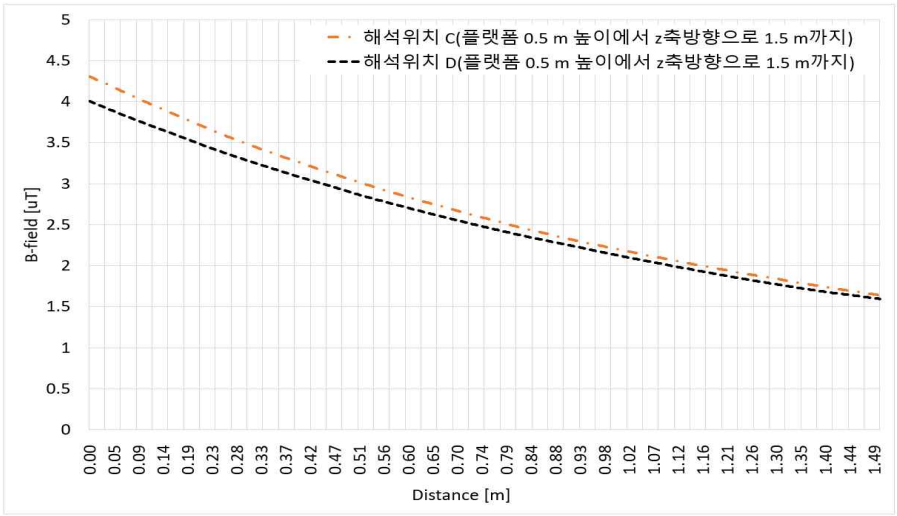


그림 389 해석지점 C, D에서의 자기장 세기 해석 결과

· 플랫폼에서의 자기장 해석결과 일반인기준(6.25 μT) 이하임

- 차량 내부 수치해석 결과

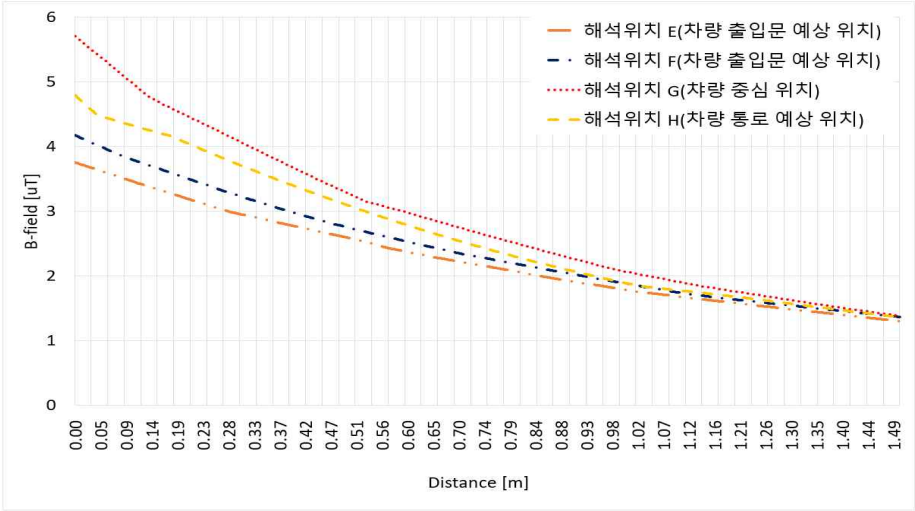


그림 390 해석지점 E, F, G, H에서의 자기장 세기 해석 결과

· 차량 내부에서의 자기장 해석결과 일반인기준(6.25 μT) 이하임

(3) 저주파 전자계 인체노출 안전기준 및 시험기준의 검증

○ 무선급집전 시스템에 대한 EMF 시험 및 분석

- 무선급집전 시스템에서 발생하는 EMF에 대한 시험 방법(안)을 이용하여 경산 시험선에서 EMF 측정

· 경산시험선에서 EMF 시험기준(안)에 따른 Test

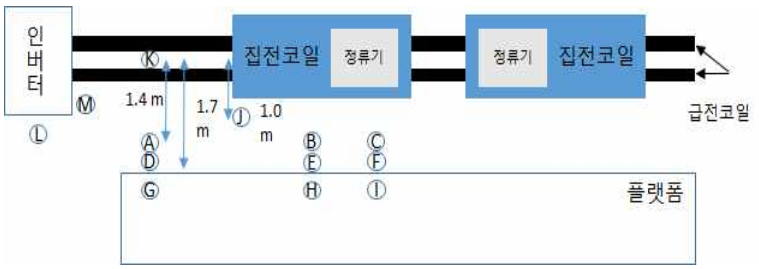


그림 391 < 경산시험소 EMF 측정 위치 >

· 측정장비 : Narda Inc. EHP-50F

· 측정시 출력전력 : 1 MW

· 플랫폼 높이 : 1.1 m

· 차량 외부 측정 결과



그림 392 자기장 세기 측정 모습

표 79 측정지점 A, B, C에서의 자기장 세기 측정결과

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
급전코일 만 있는 지점의 중심으로부터 1.4 m 떨어진 지점 (A)	7.186	5.212	3.019	5.139
집전코일 중심으로부터 1.4 m 떨어진 지점 (B)	12.593	9.361	4.736	8.897
정류기 중심으로부터 1.4 m 떨어진 지점 (C)	11.915	9.599	5.058	8.857

표 80 측정지점 D, E, F에서의 자기장 세기 측정결과

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
급전코일 만 있는 지점의 중심으로부터 1.7 m 떨어진 지점 (D)	5.670	4.206	2.371	4.083
집전코일 중심으로부터 1.7 m 떨어진 지점 (E)	11.681	9.095	3.144	7.973
정류기 중심으로부터 1.7 m 떨어진 지점 (F)	10.302	9.301	3.738	7.780

* 차량 외부에서 일반인기준(6.26 μT)를 초과하지만 직업인기준(30.7μT) 보다 낮음

· 플랫폼 측정 결과

표 81 측정지점 G, H, I에서의 자기장 세기 측정결과

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
급전코일만 위치한 지점의 플랫폼 에지로부터0.2 m 떨어진 지점(G)	1.911	1.492	1.142	1.515
정류기가위치한 지점의 플랫폼 에지로 부터 0.2 m 떨어진 지점 (H)	3.216	2.433	1.036	2.228
집전코일이 위치한 지점의 플랫폼 에지로부터0.2 m 떨어진 지점 (I)	2.724	1.997	1.537	2.086



그림 393 플랫폼에서의 자기장 세기 측정 모습

* 플랫폼에서 일반인기준(6.25 μT)보다 낮음

· 차량 내부 측정 결과

표 82 측정지점 J, K에서의 자기장 세기 측정결과

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
차량 내부 출입문 지점으로부터 0.2 m 안쪽 떨어진 지점 (J)	5.871	3.171	2.006	3.683
전철 통로 예상지점 (K)	4.555	2.206	1.402	2.721

* 차량 내부에서 일반인기준(6.25 μT)보다 낮음

· 고정설비(인버터) 측정 결과

표 83 측정지점 L, M에서의 자기장 세기 측정결과

측정지점	자기장 세기 [μT]			
	높이 0.5 m	높이 1 m	높이 1.5 m	3점 평균값
인버터 우측 (L)	14.934	11.130	4.062	10.042
인버터 뒷면 (M)	0.013	15.455	11.434	8.967



그림 394 인버터 자기장 세기 측정모습

* 일반인기준(6.25 μT)를 초과 하지만 직업인기준(30.7 μT)보다 낮음

4) 급집전 EMF 안전성 현장 검증 및 보완 (5차년도)

가) 급집전 EMF 안전성 현장 검증 및 보완

(1) 급집전 EMF 안전성 현장 검증

○ 차량 외부의 EMF 측정 환경 검증

- 경전철의 선로의 구조와 EMF 측정 환경 검증 : 한국형 고무차륜 K-AGT 경전철 선로은 급전부가 차량의 하부에 위치하고 있으며, 선로의 폭이 차량의 폭과 거의 일치하여 차량 운행 중 전자파 센서를 위치하고 측정하는 것이 어려움이 있음.
- 경전철의 선로 구조상 일반인의 출입이 엄격히 통제되고 있으며, 응급 상황이외의 경우 선로에 일반인이 접근하는 것이 불가능하여, 차량 외부에 대한 EMF 평가는 직업인으로 한정함.

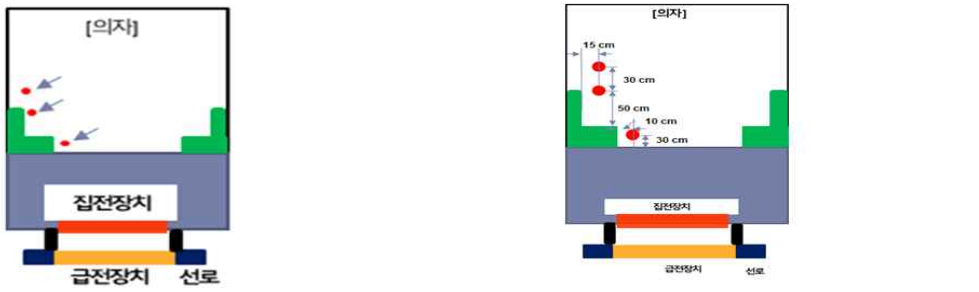
표 84 플랫폼, 차량내부, 인버터에 대한 EMF 안전성 현장검증 결과

		3점평균값	인체보호기준 만족여부
플랫폼(출입문 앞)	열차 정차시	1.0817	만족
	열차 정차 중	0.8567	만족
	열차 출발시	1.1426	만족
플랫폼(플랫폼 엣지)	열차 정차시	1.2857	만족
	열차 정차 중	1.0775	만족
	열차 출발시	1.3120	만족
플랫폼(객차 중간)	열차 정차시	0.9192	만족
	열차 정차 중	0.5691	만족
	열차 출발시	0.9004	만족
차량내부(객차 연결부)	열차 정차시	1.3210	만족
	열차 정차 중	1.0432	만족
	열차 출발시	1.0824	만족
차량내부(출입문 앞)	열차 정차시	0.1532	만족
	열차 정차 중	0.0499	만족
	열차 출발시	0.1420	만족
인버터		1.2142	만족

(2) 급집전 EMF 안전성 보완

○ 차량 내부의 의자에서의 측정 위치에 대한 측정방법을 보완 수정하였음

- 차량 내부의 의자에서의 측정위치를 수치로 명확하게 하였음



(a) 처음 제안된 의자에서의 EMF 측정 위치 (b) 수정 제안된 의자에서의 EMF 측정 위치

그림 395 차량 내부의 의자에서의 전자파 측정위치 보완

(3) 철도 운영환경을 반영하는 테스트베드에서의 EMF 안전 방안 현장 검증 및 보완

○ 경전철 경산시험소에서 동적 및 정적 운행상태에서의 전자파 노출량 측정 및 EMF 안전성 현장 검증을 수행하였음

- 측정 장비 : Narda EHP-50F



그림 396 EMF 측정에 사용한 측정 장비 (Narda EHP-50F)

- 측정 일시 : 2019년 7월 30일 ~ 8월 1일
- 측정 장소 : 경산시 경전철 시험소
- 측정 결과

· 플랫폼(열차 출입문 앞) 자기장 측정 결과

표 85 플랫폼(열차 출입문 앞) 자기장 측정 결과

측정높이	열차 입차[uT]	열차 정차[uT]	열차 출발[uT]
0.5 m	1.4598	1.1624	1.5134
1.0 m	0.9190	0.7973	0.9122
1.5 m	0.8662	0.6105	1.0021
평균값	1.0817	0.8567	1.1426



그림 397 플랫폼(열차 출입문앞) 자기장 세기 측정모습

· 플랫폼 엣지에서의 자기장 측정 결과

표 86 플랫폼 엣지에서의 자기장 측정 결과

측정높이	열차 입차[uT]	열차 정차[uT]	열차 출발[uT]
0.5 m	1.4068	1.2611	1.4140
1.0 m	1.3497	1.2071	1.4073
1.5 m	1.1006	0.7643	1.1146
평균값	1.2857	1.0775	1.3120



그림 398 플랫폼 엣지부분에서의 자기장 측정 모습

· 플랫폼(열차 중간에서의) 자기장 측정 결과

표 87 플랫폼(열차 중간에서의 자기장 세기 측정 결과)

측정높이	열차 입차[uT]	열차 정차[uT]	열차 출발[uT]
0.5 m	1.3708	0.6570	1.1918
1.0 m	0.9301	0.5935	1.0050
1.5 m	0.4568	0.4568	0.5043
평균값	0.9192	0.5691	0.9004



그림 399 플랫폼(열차 중간에서의) 자기장 측정 모습

· 열차내부(객차 연결부)에서의 자기장 측정 결과

표 88 열차내부(객차 연결부)에서의 자기장 측정 결과

측정높이	열차 입차[uT]	열차 정차[uT]	열차 출발[uT]
0.5 m	1.7008	1.3590	1.4616
1.0 m	1.0838	0.8446	0.8336
1.5 m	1.1783	0.9260	0.9519
평균값	1.3210	1.0432	1.0824



그림 400 열차내부(객차 연결부) 에서의 자기장 측정 모습

· 열차내부(출입문 앞)에서의 자기장 측정 결과

표 89 열차내부(출입문 앞)에서의 자기장 측정 결과

측정높이	열차 입차[uT]	열차 정차[uT]	열차 출발[uT]
0.5 m	0.1729	0.0485	0.1327
1.0 m	0.1570	0.0373	0.1612
1.5 m	0.1298	0.0640	0.1320
평균값	0.1532	0.0499	0.1420



그림 401 열차내부(출입문 앞) 에서의 자기장 측정 모습

· 고정설비(인버터)에서의 자기장 측정 결과

표 90 인버터의 자기장 측정 결과

측정높이	인버터[uT]
0.5 m	1.7816
1.0 m	1.1509
1.5 m	0.7101
평균값	1.2142



그림 402 고정설비(인버터)에서의 자기장 측정 모습

○ 경전철 외부(플랫폼), 경전철 내부(출입문 및 열차통로), 고정설비(인버터)에 대한 전자파 인체노출량 측정 결과 국내 전자파 인체 노출기준(6.25uT)를 만족하는 것으로 측정되었음.

(4) 급집전 경전철 EMF 안전 기준(안) 제출

○ 전문가 자문회의와 실제 운행하는 철도 환경에서의 EMF 현장 평가 검증을 통한 측정 방법(안) 보완

○ 4차년도까지 작성되었던 '무선급집전으로 구동되는 전기철도의 EMF 측정 방법 및 평가 방법(안)을 토대로 한국철도차량 산업협회 단체표준 제정안으로 제출하였음

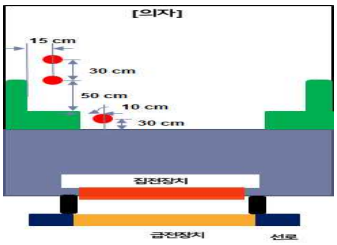
- 단체표준 심의

· 1, 2차 단체 표준 심의 개최

· 단체표준 제정목적 : 현재 IEC 62597 기준을 무선급집전 전기철도에 그대로 적용하는 것은 공급 전력 형태나 전자파 노출량, 사용 주파수 등의 차이가 있어 적합하지 않으므로, 무선급집전 전기철도의 전자기장 측정 표준 마련을 위한 연구와 적합한 표준이 정립되어야함.

표 91 1차 단체 표준 심의 의견에 따른 조치사항

순번	심의 의견	심의 의견 조치사항
1	선로 길이 방향의 측정 위치도 선정할 필요가 있음(열차 내부 및 외부)	- 차량 외부 측정시 급전선로와 차량 하부의 집전 코일이 겹치는 부분과 객차와 객차가 연결되는 통부부분 위치에서 측정한다로 측정 위치를 명확하게 함. - 차량 내부는 출입문, 객차와 객차 연결부분, 의자 부분으로 나누어서 측정위치를 명확하

		게 함
2	그림 5-1, 차량의 Noised원 취부 위치(Under Frame, Proof)에 따라 차량 내 측정 위치(높이)를 달리하여야 할 것 같음	- 본 표준은 무선 급집전 시스템에서 발생하는 전자파에 대한 인체노출량 평가 방법임 - 무선 급집전 장치가 열차의 차량 하부 위치
3	전체적으로 측정 위치(특히 플랫폼 길이 방향)에 대한 추가 검토가 요망됨)	- 플랫폼의 측정 위치는 열차 정차시에 객차와 객차의 연결 통로로가 위치하는 부분, 열차의 집전부와 급전부가 함께 위치하는 부분에서 측정하는 것으로 측정 위치를 세분화함
4	그림5-1(b) 인체 표준 치수를 기준으로 머리, 가슴, 다리부 치수 명기 필요(측정 위치 명기)	- 그림 5.1(b)의 인체표준 치수를 기준으로 머리, 가슴 다리 부 치수를 명기함(국가기술원 표준, 2015년, 25~29세 표준인체사이즈 사용) - 머리 : 의자 표면으로 부터 80 cm 높이, 열차 의자 등받이로 부터 15 cm - 가슴 : 의자 표면으로 부터 50 cm 높이, 열차 의자 등받이로 부터 15 cm - 다리 : 열차 바닥면으로 부터 30 cm 높이, 의자로 부터 10 cm 이격 
5	4.2 측정 주파수 범위에 DC-30MHz 포함 여부 검토	- 4.2의 측정주파수 범위는 4.3의 계측기 측정 주파수 대역인 1 Hz - 400 kHz로 변경함
6	차량하부 집전장치에서 노출되는 전자파 측정방법과 차량 자체(상부집전장치, 각종 전장품)에서 노출되는 전자파를 측정하는 방법이 구분되어서 좀 더 세밀한 측정 방법이 제시되어야 할 것으로 보입니다.	- 본 표준은 무선 급집전 시스템에서 발생하는 전자파에 대한 인체노출량 평가 방법임 - 무선 급집전 장치가 열차의 차량 하부에 위치함. - 차량 자체(각종 전장품)에서 발생하는 전자파 측정은 본 표준 대상이 아님
7	차량 평가 방법과 무선급집전 평가	- 본 표준은 무선급집전 시스템에 대한 평가 방

	방법의 분리 검토	법임.
8	차량 측정시 측정 위치 재검토(ex. 철도차량 입증시 : 실내 30, 90, 150, 실외 : 50, 150, 250)	- 차량 내외부 측정시 측정 높이는 사람의 신장을 기준으로 한 것으로 타당함.
9	각종 규정 및 근거에 대한 재검토 필요	-
10	각종 수치에 대한 명확한 이유제시	- 측정 위치에 대하여 명확한 수치값을 제시함
11	4.1, 4.2, 4.3 항의 주파수 범위가 상이하여 일관된 원칙 필요하며, 샘플링 주파수 제시	4.1의 무선 급집전 전기철도 시스템에서 방출하는 전자파의 주파수 범위, 4.2의 측정주파수 범위는 4.3의 계측기 측정 주파수 대역인 1 Hz - 400 KHz로 변경함
12	6.1.1, 6.1.2, 6.2의 노출량 평가방법에서 3점 측정값에 대한 평균값을 언급하지 않고 ICNRIP가이드라인만 언급하면 안되는지?	- 인체보호기준이 전신에 노출되는 전자파 세기에 대한 기준이므로 3점 평균에 의한 노출량 평가가 합리적임
13	인체노출 국가 기준 적용 검토 필요	- 최신연구 결과가 반영된 ICNIRP Guidelines 2010을 적용하였음.
14	측정 보고서 양식 보완 검토 요망	- “측정 결과 기재사항이 많을 경우 별도의 양식을 만들어서 사용할 수 있습니다.“를 표기함.
15	5.2.3.1 플랫폼 측정 위치 검토요망	- 위 3번에서 답변함
16	그림 5.1(b) 측정 위치 명시요망	- 위 4번에서 답변함

- 2차 단체 표준 심의

· 1차 단체 표준 심의에 대한 답변서로 서면심의함

· 2차 심의 의견 수정을 통하여 ‘19년 9월 30일 아래와 같이 수정통과로 의결됨

한국철도차량산업협회

우16105 / 경기도 의왕시 철도박물관로 176, 2동 303호 / 전화(031)461-1744 / 전송(031)461-1722 정원철

문서번호 철차협(기획)-30
시행일자 2019. 9. 30

수신 수신처 참조
참조

제목 단체표준규격 제정(안) 2종 수정여부 확인 요청

1. 위원님의 건승을 빕니다.

2. 2018년 12월 27일 단체표준심사위원회 심의에서 "전자파적합성-경전철 시스템 및 무선급집전 시스템의 방출 및 내성", "무선 급집전 시스템으로 구동되는 전기철도의 전자기파 측정 및 평가 방법"에 대한 제정(안)이 수정통과로 의결되어 위원님들의 심사평과 같이 수정하여 송부하오니 확인하시고 의견서를 10월 10일(목)까지 우리 협회 이메일(korsia@hanmail.net)로 송부하여 주시기 바랍니다.

- 아 래 -

□ 수정여부 확인(2종)
○ 전자파적합성-경전철 시스템 및 무선급집전 시스템의 방출 및 내성
○ 무선 급집전 시스템으로 구동되는 전기철도의 전자기파 측정 및 평가 방법

붙임 : 수정(안) 2종 및 수정여부 확인 의견서 1부. 끝.

한국철도차량산업협회장

수신처 : 한국철도기술연구원 함영삼 수석연구원, 한국전기연구원 이병윤 팀장, 한국교통대 송문석 교수, 아주대 박용배 교수, 한국철도공사 정진태 처장, 한국철도공사 김경호 센터장, 현대로템 윤용진 선임연구원, 인터큐시스템스 김국진 전무, 한국철도차량산업협회 정홍섭 사무국장

그림 403 단체표준 1차 심의 후 수정통과 공문

- 급집전 EMF 측정 방법 및 안전 기준 마련

· 최종심의를 거친 급집전 EMI 안전기준은 "전자파적합성(EMC) - 경전철 시스템 및 무선 급집전 시스템의 방출 및 내성"이라는 단체표준으로 제정되었으며 표준번호는 SPS-KORA C 0035 : 2019로 부여받아 아래와 같이 표준문서로 제정됨



그림 404 최종심의를 통과한 급집전 EMF 측정
단체표준 문서 표지

(5) 안전 기준(안) 제출

- 철도시설 기술기준 및 도시철도-고무차륜 경전철 기술기준 개정(안) 마련

· 국토교통부에서 관리하고 있는 철도시설 기술기준 및 도시철도-고무차륜 경전철 기술기준 개정(안) 마련을 위하여 카이스트, 충북대학교, 위에너지가 협의 하에

EMF 무선 급집전과 관련된 항목을 추가하였음

· 도시철도-고무차륜 경전철 기술기준」중 5.4.5 유도장해시험의 경우 단체표준을 반영하여 무선급집전 EMF 측정 주파수의 범위를 180 kHz까지 확대하는 것을 제안하였음

<table>
<tr><th>도시철도-고무차륜
경전철 기술기준(안)</th><th>변경(안)</th><th>사유</th></tr>
<tr>
<td>

5.4.5 유도장애시험

1) 적용범위
해당 철도차량의 유도장애에 대한 설계적합성 또는 형식동등성을 시험으로 입증하는 경우에 적용된다.

2) 참고규격
(1) IEC/TS 62597 : 인체의 노출되는 철도 환경의 전기, 전자 장치에서 방사되는 자기장의 측정 절차
(2) KS C IEC 62236-1, IEC 62236-1:철도용 전기자기적합성 – 제1부 : 일반사항
(3) KS C IEC 62236-2, IEC 62236-2:철도용 전기자기적합성 – 제2부 : 전체 철도 시스템에서 외부로 나가는 방출
(4) KS C IEC 62236-3-1, IEC 62236-3-1:철도용 전기자기적합성 – 제3-1부 : 철도차량 – 열차 및 공차

3) 시험 방법 및 기준

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">시험방법</th><th>참고규격 및 기준</th><th>비고</th></tr>
<tr><td rowspan="3">복사성 간섭시험</td><td rowspan="2">정차</td><td>추진 장치 대기 상태
보조전원장치 및 서비스기기동작</td><td rowspan="2">KS C IEC 62236-3-1 정차 허용기준</td><td rowspan="3">측정점 또는 안테나를 통과하는 지점기</td></tr>
<tr><td>최대견인력의 1/3 속도역행</td></tr>
<tr><td>서속운</td><td>최대 전기제동력의</td><td>KS C IEC 62236-3-1 서행 허용기준</td></tr>
</table>

</td>
<td>

5.4.5 유도장애시험

1) 적용범위
해당 철도차량의 유도장애에 대한 설계적합성 또는 형식동등성을 시험으로 입증하는 경우에 적용된다.

2) 참고규격
(1) IEC/TS 62597 : 인체의 노출되는 철도 환경의 전기, 전자 장치에서 방사되는 자기장의 측정 절차
(2) KS C IEC 62236-1, IEC 62236-1 :철도용 전기자기적합성 – 제1부 : 일반사항
(3) KS C IEC 62236-2, IEC 62236-2 :철도용 전기자기적합성 – 제2부 : 전체 철도 시스템에서 외부로 나가는 방출
(4) KS C IEC 62236-3-1, IEC 62236-3-1 :철도용 전기자기적합성 – 제3-1부 : 철도차량 – 열차 및 공차

3) 시험 방법 및 기준

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">시험방법</th><th>참고규격 및 기준</th><th>비고</th></tr>
<tr><td rowspan="3">복사성 간섭시험</td><td rowspan="2">정차</td><td>추진 장치 대기 상태
보조전원장치 및 서비스기기동작</td><td rowspan="2">KS C IEC 62236-3-1 정차 허용기준</td><td rowspan="3">측정점 또는 안테나를 통과하는 지점기</td></tr>
<tr><td>최대견인력의 1/3 속도역행</td></tr>
<tr><td>서속운</td><td>최대 전기제동력의</td><td>KS C IEC 62236-3-1 서행 허용기준</td></tr>
</table>

</td>
<td>

- 3.1 일반사항에 비접촉 급전방식의 집전장치가 추가되어 있으므로 5.4.5의 유도장애시험을 그대로 적용한다.
- 급집전 충전기술을 위해 60 kHz의 주파수를 이용하므로, 전자파 인체 안전성 평가를 위한 주파수 범위가 기존 20kHz에서 60kHz의 3고조파인 180kHz로

</td>
</tr>
</table>

<table>
<tr><th>도시철도-고무차륜
경전철 기술기준(안)</th><th>변경(안)</th><th>사유</th></tr>
<tr><td>
<table>
<tr><th>주파수 범위</th><th>자속밀도
(μT)</th><th>주파수 범위</th><th>자속밀도
(μT)</th></tr>
<tr><td>1Hz 이하</td><td>4×104</td><td>1Hz 이상 ~ 8Hz 미만</td><td>4×104/f2</td></tr>
<tr><td>8Hz 이상 ~ 25Hz 미만</td><td>5.000/f</td><td>0.025㎑ 이상 ~ 0.8㎑ 미만</td><td>5/f</td></tr>
<tr><td>0.8㎑ 이상 ~ 20㎑ 미만</td><td>6.25</td><td></td><td></td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><th>주파수 범위</th><th>자속밀도
(μT)</th><th>주파수 범위</th><th>자속밀도
(μT)</th></tr>
<tr><td>1Hz 이하</td><td>4×104</td><td>1Hz 이상 ~ 8Hz 미만</td><td>4×104/f2</td></tr>
<tr><td>8Hz 이상 ~ 25Hz 미만</td><td>5.000/f</td><td>0.025㎑ 이상 ~ 0.8㎑ 미만</td><td>5/f</td></tr>
<tr><td>0.8㎑ 이상 ~ 20㎑ 미만</td><td>6.25</td><td></td><td></td></tr>
</table>
(3) 비접촉 급집전시스템의 경우 전자파 인체 노출량 측정 주파수는 1Hz에서 180 kHz까지 평가한다.
<table>
<tr><th>주파수 범위</th><th>자속밀도
(μT)</th><th>주파수 범위</th><th>자속밀도
(μT)</th></tr>
<tr><td>20㎑ 이상 ~ 150㎑ 미만</td><td>6.25</td><td>0.15㎒ ~0.13㎒</td><td>0.75/f</td></tr>
</table>
</td><td></td></tr>
</table>

그림 405 도시철도-고무차륜 경전철 기술기준의 EMF 개정안 전후 비교표

"세계를 향한 대학, 미래를 여는 연구"

KAIST 한국과학기술원(KAIST)

수신자 국토교통부 철도운행안전과(김건호 주무관)
(경유) 한국철도기술연구원장
제 목 철도차량 기술기준 개정(안) 제출

1. 귀 기관의 무궁한 발전을 기원합니다.
2. 철도기술연구사업인 "경전철용 무선급전시스템 적용기술개발" 과 관련하여 도시철도차량(고무차륜 경전철) 기술기준 개정(안)을 다음과 같이 제출 합니다.

- 다 음 -

가. 기준명 : 철도차량 기술기준
나. 사 유 : 무선급전관련 신기술·신공법 도입에 따른, 도시철도차량(고무 차륜 경전철) 기술기준에 무선급전방식의 차량 관련 안전 기준 반영
다. 내 용 : Part 53 도시철도차량(고무차륜경전철) 기술기준의 1.3(주요내용) 등 4개 항목에 무선급전방식 관련 내용 추가 및 수정 /붙임 참조

번호	도시철도-고무차륜 경전철 기술기준(안)	구분	내용
1	1.3(주요내용)	전기안전	- 무선급전방식 집전장치 추가
2	3.1(일반사항)	전기안전 /EMC/EMF	- 무선급전방식 - 집전 추가
3	4.5.5(추진장치 내 집전장치)	전기안전	무선급전방식의 집전장치 추가
4	5.4(시운전시험)	EMC/EMF	- 유도장애시험수정

붙임 : 1. 철도차량 기술기준 개정(안) 1부
2. 전기수송설비용 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항
3. 전기철도에서 발생하는 전자기장의 인체 노출량 측정 및 평가방법
4. 전자파적합성(EMC)-경전철용 무선급집전 시스템의 방출 및 내성. 끝.

한 국 과 학 기 술 원 총 장

전결07/14

담당 이충희 담당 정구호 센터장 조동호

협조자

그림 406 급집전 EMF 안전 기준 제출 공문

하. 급집전 EMI 안전성

1) 급집전 EMI 안전성 (1차년도)

가) 급집전 EMI 안전성 영향분석

(1) 무선급전 EMI : 레일, 지반, 플랫폼 등 주변 시설에 대한 전기장의 영향 분석

○ EMI 감쇄 인버터 스위칭 패턴 변경 검토

○ EMI 감쇄 급전선로 및 모듈 검토

○ 급전 EMI 차폐 영향분석

(2) 무선집전 EMI : 전자기장이 차량에 미치는 영향 분석

○ EMI 감쇄 집전 구조 및 형상 검토

○ 집전 EMI 차폐 영향분석

2) 급집전 EMI 안전성 (2차년도)

가) 급전 EMI 후보기술 및 구조별 분석

(1) Meta material을 활용한 EMI 저감

○ 60 kHz 체배수의 고조파 성분의 선택적 저감을 위한 Meta material 적용

나) 급전 EMI 감쇄 구조의 변수별 민감도 분석

(1) Meta material 구조변수의 민감도 분석을 통한 최적화

○ Meta material 구조별 민감도 분석

다) 급전 EMI 실험결과 분석서

(1) Meta material을 이용한 EMI 저감 모의실험 결과 분석

○ 설계한 Meta material의 총 EMI 개선 정도 분석

라) 집전 EMI 후보기술 및 구조별 분석

(1) Reactive shielding을 활용한 EMI 저감

마) 집전 EMI 감쇄 구조의 변수별 민감도 분석

(1) Reactive shielding 구조변수의 민감도 분석을 통한 최적화

○ Reactive shield 설계 변수 분석

○ 코일의 형태에 따른 자기장 감소율 변화

○ 코일의 반지름에 따른 자기장 감소율 변화

○ Reactive shield의 인덕턴스 결정

○ 주 급집전 자기장의 저감 영향 분석

바) 집전 EMI 실험결과 분석서

(1) Reactive shielding을 이용한 EMI 저감 모의실험 결과 분석

○ 선택적 고조파 저감에 대한 Reactive shield 저감

3) 급집전 EMI 안전성 (3차년도)

가) 급전 EMI 안전 해결방안 제시

(1) EMI 감쇄 인버터 스위칭 패턴 변경 방안 제시

○ 고조파 전류 상쇄 기반 EMI 저감 방법

- 외부파형 인가를 통한 인버터 EMI 감쇄

(2) EMI 감쇄 급전 선로 제시

○ 급전부 삽입형 차폐코일 적용을 통한 EMI 저감

- 급전부 삽입형 차폐코일 적용 구조

○ 급전부 자성체 적용을 통한 EMI 저감

- 페라이트 적용 구조

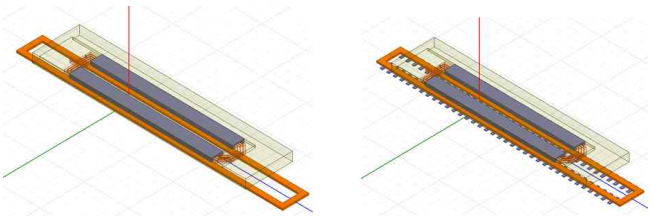


그림 407 급전 자성체 적용 시뮬레이션 모델

나) 집전 EMI 안전 해결방안 제시

(1) EMI 감쇄 집전 구조 및 형상 방안 제시

○ 집전부 설계 파라메터 분석

- 알미늄 하우징과 코일 사양 변화

(2) EMI 감쇄 집전 변수 조절 방안 제시

○ 집전부 사양 변화에 따른 EMI 변화 분석

- 집전부 사양 변화에 따른 EMI 및 전력 변화

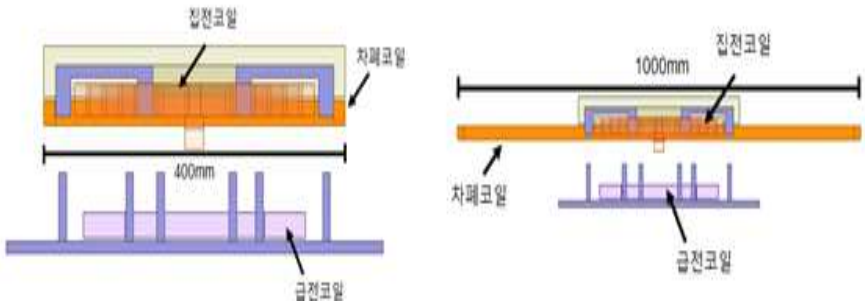


그림 408 집전코일에 대한 동일 평면 차폐코일 배치

다) 급전 EMI 안전방안 설계 및 분석

(1) EMI 감쇄 급전 기술 설계 및 분석

○ 테스트 모듈에 대한 EMI 측정

- EMI 강도 예측을 위한 테스트 모듈 측정

(2) 급전 모듈 EMI 안전방안 설계 및 분석

○ 외부 파형을 인가하여 EMI 저감 성능을 확인한 결과 3차 고조파가 약 21dB 감쇄하는 것을 확인하였음

라) 집전 EMI 안전방안 설계 및 분석

(1) EMI 감쇄 집전 기술 설계 및 분석

○ 반응형 차폐 코일 모듈 적용 실험

- 테스트 모듈 제작 및 Reactive shield 적용 실험

- 그린파워와 집전시스템과 유사한 실험 모듈을 제작하여 Reactive shield 모듈 적용

시 EMI 저감 성능을 실험하였음.

(2) 집전 모듈 EMI 안전방안 설계 및 분석

○ 집전 EMI에 대해 알미늄 하우징 사양 변경과 반응형 차폐 코일의 적용을 통해 EMI 저감이 발생함을 확인하였음.

○ 반응형 차폐 적용 시 수직 모드 측정에서 약 3dB의 EMI 저감 효과가 있는 것을 측정을 통해 확인하였음.

○ 측정을 통해 Reactive shield 공진주파수에 따라 EMI 저감 성능 및 집전전력에 대한 영향이 차이가 있음을 확인하였음.

4) 급집전 EMI 안전성 (4차년도)

가) 급전 EMI 안전성 검증 및 개선

(1) EMI 감쇄 급전 기술 검증 및 개선

○ 능동형 차폐 장치를 활용한 급전 EMI 저감

- 능동형 차폐 장치 EMI 저감 실험

· 고조파를 상쇄할 수 있는 상쇄자기장을 발생시키는 능동형 차폐 장치를 통한 급전 EMI 저감 방안 검토

· 능동형 차폐 시스템을 제작하여 실제 시스템보다 작은 무선전력전송시스템에 적용하여 그 효과를 시험 및 분석진행

· 능동형 차폐 시스템을 통해 동작주파수에서 약 21dB의 차폐효과가 발생함을 확인

· 또한 전류 강도와 위상을 변경해가며 자기장 세기의 변화를 관찰하였으며, 능동형 차폐 시스템의 전류 및 위상에 따라 차폐 성능이 변화하는 것을 확인할 수 있음.

(2) 급전 EMI 감쇄 모듈 기술 검증 및 개선

○ 급전부 EMI 차폐 방법

- 급전부 삽입형 차폐코일을 통한 EMI 저감

· 급전 코일과 동일한 높이에 3차 고조파를 차단하기 위해 급전 코일과 나란하게 코일을 설치하는 방안을 고안하였음.

· 기존의 두개의 코일을 사용했다면 하나의 긴 코일로 변경하여 시뮬레이션 진행

· 차폐 코일의 공진주파수는 90 kHz, 120 kHz, 150 kHz 총 3종류로 나누어서 시뮬레이션을 진행

· 급전 코일과 안쪽에 차폐 코일을 놓는 방식을 시뮬레이션을 통해 공진주파수의 변화에 따른 차폐 정도는 3차 고조파에 가까이 갈수록 높은 차폐 효과를 보였지만, 3차 고조파에 가까운 150 kHz에서는 약 4.4 %의 효율 감소도 보였음.

· 차폐 코일이 3차 고조파 주파수인 180 kHz에 가까운 공진을 가질수록 EMI 저감 효과는 커졌지만, 시스템 효율 저하로 이어짐

· 반면 90 kHz의 공진주파수를 가지는 차폐 코일을 배치하였을 때는 약 2.3 dB의 3차 고조파 저감효과를 볼 수 있었고 적은 양의 시스템 효율 증가 또한 시뮬레이션을 통해 보았음

나) 집전 EMI 안전성 검증 및 개선

(1) EMI 감쇄 집전 기술 검증 및 개선

○ EMI 방출 수준 검토

- 경산 시험선 EMI 검증

· 집전 EMI의 억제 사양을 경산 시험소의 방사성 EMI 측정치를 기준으로 분석함.

· 2 MHz이하의 고조파는 인버터 출력과 레귤레이터 입력에 각각 필터를 삽입하여 약 10 dB이상의 감쇄 특성을 확보해야 함.

· 급전 필터 적용만으로는 집전의 고조파가 감쇄되지 않음으로 집전 필터 적용이 필요함.

(2) 선로 및 신호시스템, 차량에 대한 집전 EMI 차폐검증 및 개선

○ 측정결과 분석 및 대안 검토

- 집전 EMI 저감 방안

· 집전 코일의 턴 수를 늘리면 집전 인덕턴스가 늘어나 집전에 같은 전압을 유기하기 위해 필요한 급전 전류가 줄어듦

· 이에 따라 급전 전류가 줄어들어 집전 코일의 턴수가 6턴 일 때 약 2 dB의 EMI의 저감 효과를 보이는 것을 확인하였음

· 집전 턴 수가 6 턴보다 더 늘어나게 되면 집전 A·turn 값이 급전의 A·turn 값보다 커지게 되어 집전 전류가 EMI의 주된 발생 원인으로 작용하여 시스템의 EMI가 증가되는 것을 확인

5) 급집전 EMI 안전성 현장 검증 및 보완 (5차년도)

가) 급집전 EMI 안전성 현장 검증 및 보완

(1) 급전 EMI 안전 방안 현장 검증 및 보완

○ 경산 시험선 급전부 EMI 측정

- 급전인버터 EMI 수준 측정

· 무선급전 철도의 EMI 안전성 검증을 위해 경산 시험선에서 EMI 방사 측정 수행.

· EMI 측정 대상은 급전 선로에 전력을 공급하는 인버터이며, 10 m 이격거리에서 인버터로부터 발생하는 EMI 수준을 측정.

· EMI 측정을 통해 무선급전 철도에서 방출되는 EMI의 안전기준 부합여부 검토.



그림 409 급전 인버터 EMI 현장 측정

· 급전 EMI 측정을 위해 인버터로부터 10m 이격거리에 안테나를 설치 및 측정

· 측정은 집전 부하가 250 kW일 때를 기준으로 하여 측정을 수행하였음.

· 측정 주파수 대역은 9 kHz에서 150 kHz까지의 주파수를 1차 대역으로 설정하여 측정하고, 150 kHz에서 30MHz까지의 주파수를 2차 대역으로 설정하여 측정을

수행하였음.

· 측정에 있어 전파의 방향별 EMI 강도를 파악하기 위해, 측정 안테나의 방향을 전면을 바라보는 방향(X축), 측면을 바라보는 방향(Y축), 그리고 지면을 바라보는 방향(Z축) 등 총 3개의 안테나 배치를 적용하여 각각 측정을 수행하였음.

·



그림 410 경전철 무선급전 철도 집전 EMI 측정 위치

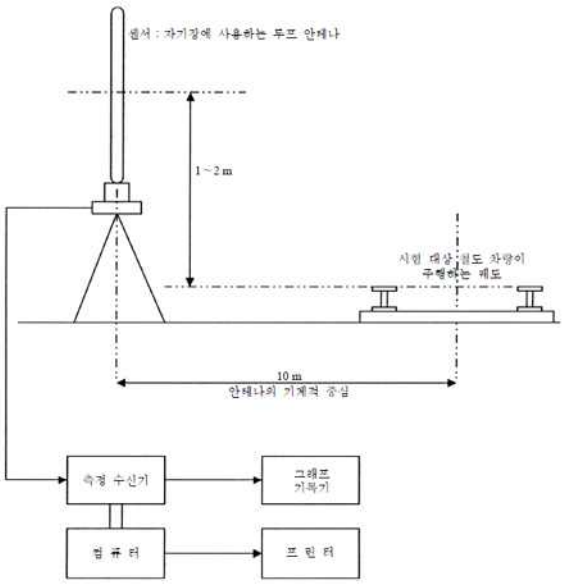


그림 411 측정 안테나 배치

· 안테나는 지면으로부터 1.5m 높이를 가지도록 설치하였으며, 측정 주파수 대역폭은 1차 대역인 9k-150kHz에 대해 200 Hz를 설정하였고, 2차 대역인 150k-30MHz에 대해 9 kHz를 설정하여 측정을 수행하였음.

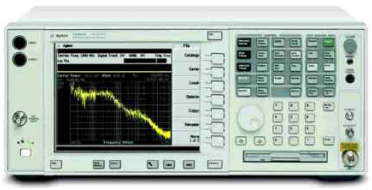
· 측정에 사용된 안테나는 Rohde &schwarz HFH2-Z2 Loop Antenna 였으며, 감쇠기는 Agilent 8496A, 그리고 스펙트럼 분석기는 Agilent E4440A를 사용하였음.

□ 안테나 (Antenna)

◦ 모델명 : Rohde & Schwarz HFH2-Z2 Loop Antenna



Brand : Rohde & Schwarz
Model : HFH2-Z2
Type : Loop Antenna
Frequency range : 9 kHz ~ 30MHz
Max. output voltage into 50Ω : 1V
Dimension(loop dia) : 590mm



□ 감쇠기 (Attenuator)

◦ 모델명 : Agilent 8496A Attenuator



Brand : Agilent Keysight
Model : 8496A
Analyze type : Step Attenuator
(0 ~ 110 dB in 10 dB steps)
Frequency range : DC ~ 4GHz
Insertion Loss at 0 dB : 0.96 dB
Maximum RF input power : 1W(average), 100W(peak)

□ EMC 분석기 측정 설정

측정 주파수 범위	RBW(Resolution BandWidth)	VBW(Video BandWidth)
9 kHz ~ 30 kHz	30 Hz	30 Hz
30 kHz ~ 100 kHz	300 Hz	300 Hz
100 kHz ~ 300 kHz	300 Hz	300 Hz
300 kHz ~ 30MHz	1kHz	1kHz

	9 kHz ~ 150 kHz		150 kHz ~ 30 MHz	
	Atten.	Max. Ref	Atten.	Max. Ref
Ambient Mode	0 dB	96.99 $dB\mu V$	0 dB	96.99 $dB\mu V$
Charging Mode	10 dB	106.99 $dB\mu V$	10 dB	106.99 $dB\mu V$

Charging Mode는 현장 기준 EMC analyzer default 셋팅값 사용함. (현장에서 바뀔 수 있음)

그림 412 사용한 측정 장비

○ 급전 EMI 안전성 검증 종합 의견

- 경산 시험선 무선급전 철도의 급전 EMI에 대한 측정을 수행하였으며, 측정 결과 인버터에서 발생하는 EMI 수준이 기준을 초과할 가능성이 있는 것으로 나타났음.
- 급전부의 EMI 기준에 대해 과제의 당초 목표인 43.5 dBuA/m의 기준에는 만족하였지만, 일부 구간에서는 안전 기준에 부합하지 못할 가능성이 존재함.
- 이러한 사항에 대해 인버터에 대한 알미늄 하우징 등을 적용할 경우 약 8dB의 EMI 저감이 발생하였다는 것을 실험을 통해 확인한 바 있음.
- 이에 따라 인버터에 대해 알미늄 하우징을 적용할 경우 현재 안전기준을 초과하는 주파수 대역에서 EMI 저감 효과가 발생하여 안전 기준에 부합이 가능할 것으로 판단
- 또한 수 MHz 대역의 급전 EMI 저감을 위하여 급전 인버터의 DC 입력단과 출력 고주파 단에 동상 페라이트 코어를 적용하였음.

(2) 집전 EMI 안전 방안 현장 검증 및 보완

○ 경산 시험선에서의 EMI 측정

- 집전 모듈 EMI 수준 측정

· 무선급전 철도의 EMI 안전성 검증을 위한 경산 시험선에서의 EMI 방사 측정

· EMI 측정 대상은 급전 선로에 집전부가 위치한 경우 발생하는 EMI 수준 측정.

· EMI 측정을 통해 무선급전 철도에서 방출되는 EMI의 안전기준 부합여부 검토.



그림 413 집전 EMI 현장 검증을 위한 측정 구성

· 집전 EMI 측정을 위해 집전부를 중심으로 하여 10m 이격거리에 안테나를 설치하여 측정 수행
· 측정은 집전 부하가 250 kW일 때를 기준으로 하여 측정을 수행하였음.
· 측정 주파수 대역은 9 kHz에서 150 kHz까지의 주파수를 1차 대역으로 측정하고, 150 kHz에서 30MHz까지의 주파수를 2차 대역으로 설정하여 측정을 수행하였음.
· 측정에 있어 전파의 방향별 EMI 강도를 파악하기 위해, 측정 안테나의 방향을 전면을 바라보는 방향(X축), 측면을 바라보는 방향(Y축), 그리고 지면을 바라보는 방향(Z축) 등 총 3개의 안테나 배치를 적용하여 각각 측정을 수행하였음.



그림 414 경전철 무선급전 철도 집전 EMI 측정 위치

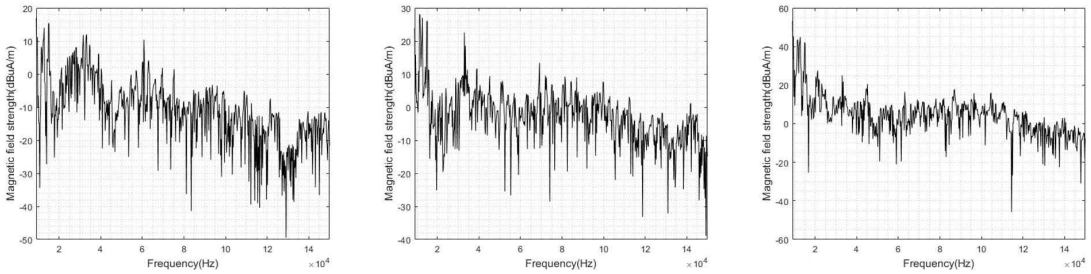
(3) 철도 운영환경을 반영하는 테스트베드에서의 EMI 안전 방안 현장 검증 및 보완

○ 경산 시험선 EMI 측정 결과 분석

- 경산 시험선 급전 인버터 EMI 결과 분석

< 1차 대역 >

· 아래의 그림은 9 kHz 대역에서 150 kHz까지의 1차 대역 주파수에 대한 기본 환경에서의 각 안테나 배치별 측정 결과를 보여주고 있음.
· 1차 대역에서의 인버터 기본 환경 EMI는 기준을 초과하는 수준으로 발생하는 EMI가 없었으며, Y 축과 X축 측정 시 10kHz의 주파수 대역, 그리고 Y축 측정 시 35 kHz 대역에서 약간의 EMI가 기본적으로 발생함을 확인할 수 있음.



안테나 X축 측정 안테나 Y축 측정 안테나 Z축 측정

그림 415 인버터 기본 환경(무부하 시) EMI 측정 결과 (1차대역 9k-150kHz)

- 아래의 그림은 9 kHz 대역에서 150 kHz까지의 1차 대역 주파수에 대한 각 안테나 배치별 측정 결과를 보여주고 있음.
- X축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 기본 주파수의 2차 고조파에 해당하는 120 kHz 주파수의 EMI가 발생하지만, 기준을 만족하고 있음을 확인함.
- 75 kHz 및 90 kHz 주파수에서도 EMI가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, EMI 강도는 EMI 기준을 만족하고 있음을 확인함.
- Y축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 기본 주파수의 2차 고조파에 해당하는 120 kHz 주파수의 EMI 강도가 X축 안테나 배치 방향에서의 측정 결과 대비 감소한 것을 확인할 수 있음.
- 하지만, 75 kHz와 90 kHz 주파수에서의 EMI가 X축 안테나 방향 시의 측정 결과 대비 상승된 것을 확인할 수 있지만, X축 측정결과와 마찬가지로 EMI 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있음.
- 앞선 X축 안테나 측정 시에는 부각되지 않았던 15 kHz에 대한 7차 고조파인 105 kHz에서의 EMI 강도가 높아진 것을 확인할 수 있으며, 9차 고조파인 135 kHz에서의 고조파가 발생하는 것을 확인할 수 있음.
- 앞선 X축 안테나 배치에서의 EMI 측정 결과에서는 보이지 않았던 7차 고조파와 9차 고조파가 측정되었지만, 두 EMI 모두 EMI 기준을 만족하는 것을 확인함.
- Z축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 기본주파수의 2차 고조파에 해당하는 120 kHz 주파수의 EMI가 X축 및 Y축 안테나 배치 측정 결과 대비 급격하게 증가한 것을 확인할 수 있지만, EMI 강도는 기준치를 만족하고 있음을 확인할 수 있음.
- 하지만 Z축 안테나 배치 측정 시의 120 kHz EMI 강도는 EMI 기준치와의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있음.
- 또한, 15 kHz 주파수에서의 EMI 앞선 X축과 Y축의 EMI 측정 결과 대비 급격하게 상승한 것을 확인할 수 있으며, 강도 또한 EMI 기준에 거의 근접하는 것을 확인할 수 있음.
- 해당 주파수의 EMI는 정류기에서 발생하는 것으로 추정되는데, 인버터 EMI 측정 시 해당 주파수가 측정된 이유는 인버터로부터 안테나를 10m 이격 거리에 배치함에 있어 안테나를 인버터의 대각선으로 배치하는 과정에서 무선급전 철도의

급전과 상대적으로 거리가 가까워져 인버터의 15 kHz 주파수의 EMI가 측정된 것으로 판단됨.

· 이러한 결과를 바탕으로 인버터에 대한 EMI는 모든 1차 대역에서 모두 EMI 기준을 만족하는 것으로 측정되었음을 확인함.

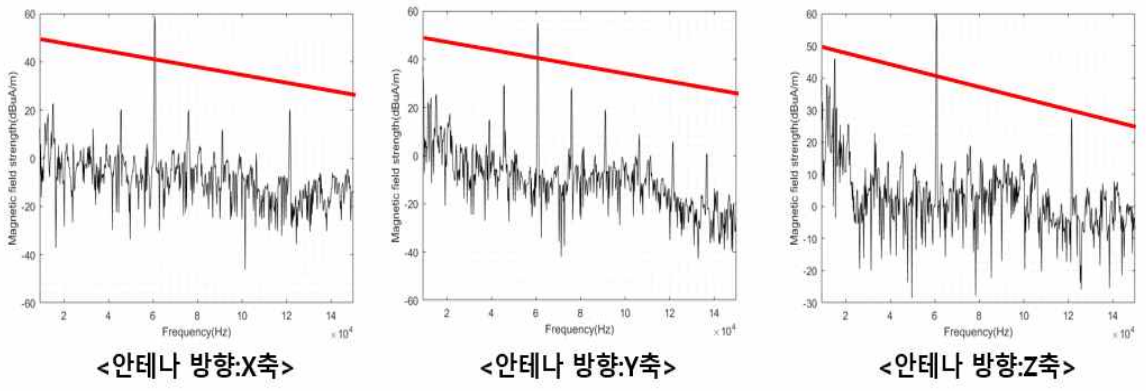


그림 416 급전 EMI 현장 검증을 위한 측정 구성 (1차 대역)

< 2차 대역>

· 아래의 그림은 150 kHz 대역에서 30 MHz까지의 2차 대역 주파수에 대한 인버터 측정 기본 무부하 환경에서의 각 안테나 배치별 측정 결과를 보여주고 있음.

· 2차 대역에서의 인버터 기본 무부하 환경 EMI는 기준을 초과하는 수준으로 발생하는 EMI가 없었지만, Y 축 측정 시 27 MHz의 주파수 대역에서 무선급전 시스템과는 무관한 EMI가 EMI 기준치에 근접한 수준으로 발생하는 것을 확인할 수 있음.

· 이러한 기본 무부하 환경에서의 측정 결과를 바탕으로 상기 측정 EMI는 무선급전 시스템에 의한 영향이 아닌 것으로 판단할 수 있음.

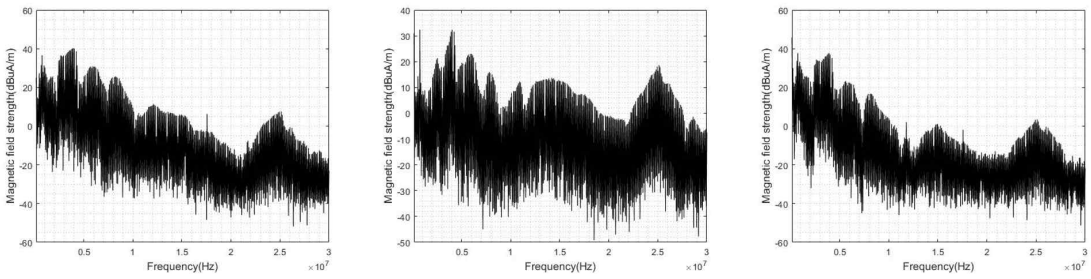


그림 417 인버터 기본 환경(무부하 시) EMI 측정 결과 (2차대역 150k-30Mhz)

· 아래 그림은 인버터에 대한 150 kHz 대역에서 30 MHz까지의 주파수에 대한 2차 대역에 대한 각 안테나 배치별 측정 결과를 보여주고 있음.

· X축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 2차 주파수 대역에서 EMI 기준에 모두 만족하는 것으로 측정되었음.

· 하지만 기본주파수의 3차 고조파인 180 kHz에서 EMI 기준에 매우 근접해 있는 것을 확인할 수 있음.

· Y축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, X축 측정 결과에서 높은 수준으로 측정되었던 기본 주파수의 3차 고조파인 180 kHz 주파수의 EMI는 비교적 낮게 측정되었음.
· 하지만 26 MHz 주파수의 EMI가 EMI 기준치에 매우 근접해 있음을 확인할 수 있음.
· Z축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 기본주파수의 3차 고조파에 해당하는 180 kHz 주파수가 높게 나타나는 것으로 측정되었으며, EMI 강도가 기준치를 초과하는 것으로 측정되었음.
· 180 kHz를 제외한 다른 주파수 대역에서는 EMI 기준을 안정적으로 만족하는 것으로 측정되었음.
· 이러한 결과를 바탕으로 2차 주파수 대역에서 급전 인버터에 대한 EMI 수준은 180 kHz에서 기준을 만족하지 못할 가능성이 높은 것으로 판단됨.

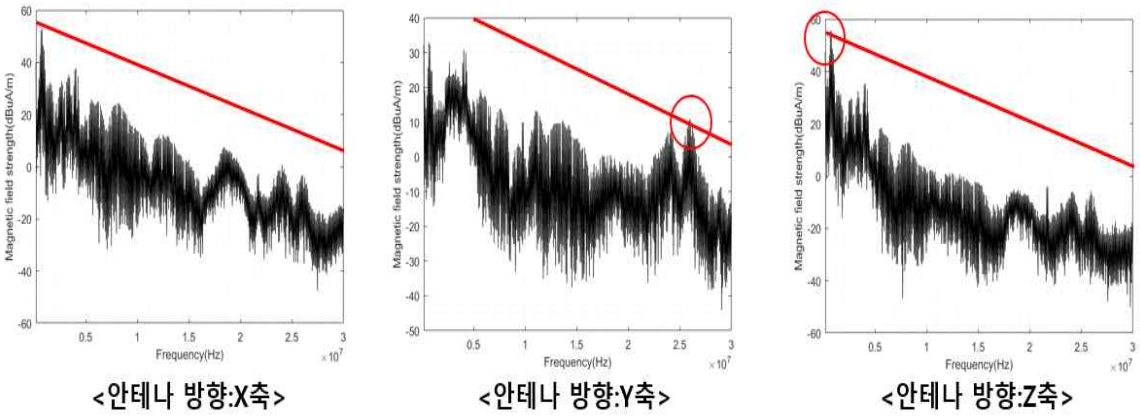
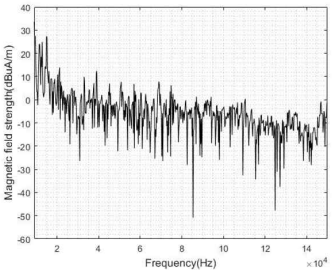


그림 418 급전 EMI 현장 검증을 위한 측정 구성 (2차 대역)

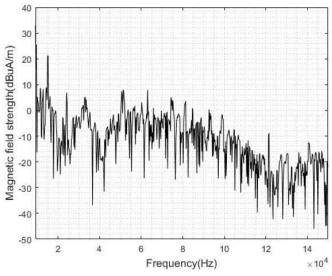
- 경산 시험선 집전부 EMI 결과 분석

< 1차 대역 >

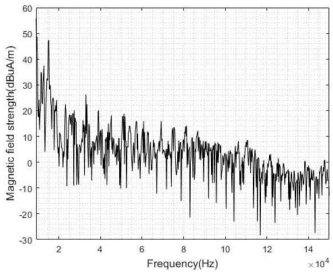
· 아래의 그림은 9 kHz 대역에서 150 kHz까지의 1차 대역 주파수에 대한 급집전선로 기본 환경에서의 각 안테나 배치별 EMI 측정 결과를 보여주고 있음.
· 기본 환경에 대한 측정에서 Z축 안테나 배치 측정 시 약 15 kHz 대역에서 기준치에 근접한 수준의 EMI가 기본적으로 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 사항을 참고하여 급집전 선로 측정 시 해당 주파수의 EMI 결과와 비교하여 변동에 대한 사항을 검토하였음.
· 이외의 주파수 대역에서는 특별한 EMI 가 발생하지 않음을 확인할 수 있음.



안테나 X축 측정



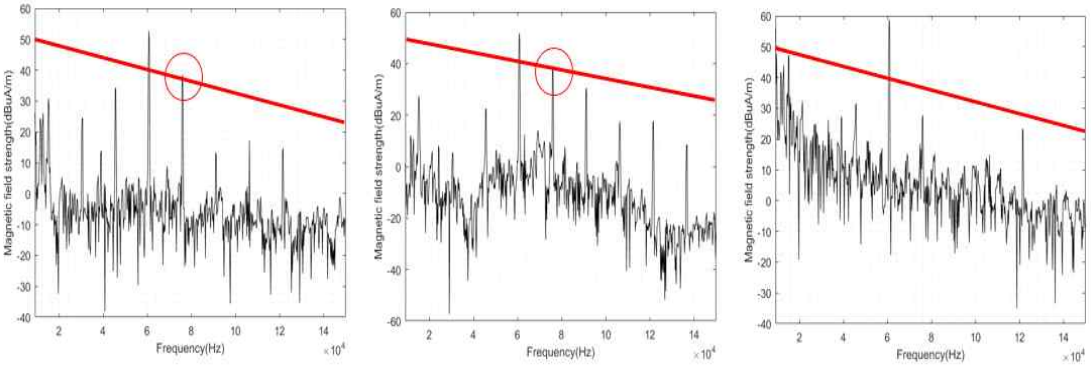
안테나 Y축 측정



안테나 Z축 측정

그림 419 급집전 선로 기본 환경 EMI 측정 결과 (1차 대역 9k-150kHz)

· 아래의 그림은 9 kHz 대역에서 150 kHz까지의 주파수에 대한 1차 대역에 대한 각 안테나 배치별 측정 결과를 보여주고 있음.
· X축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 기본 주파수의 2차 고조파에 해당하는 120 kHz 주파수의 EMI는 기준을 안정적으로 만족하고 있음을 확인함.
· 하지만, 75 kHz 주파수의 EMI 강도가 EMI 기준선에 매우 근접해 있음을 확인함.
· Y축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 기본 주파수의 2차 고조파에 해당하는 120 kHz 주파수의 EMI는 기준을 만족하지만, X축 방향에서의 EMI 강도보다는 강하게 발생하는 것을 확인할 수 있음.
· 또한, 75 kHz 주파수 대역에 대한 EMI가 X축 안테나 배치에서의 EMI 결과와 마찬가지로 EMI 기준에 매우 근접해 있음을 확인할 수 있으며, 이와 더불어 90 kHz 주파수 대역에 대한 EMI가 X축 대비 증가하였음을 확인할 수 있음.
· Z축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 기본주파수의 2차 고조파에 해당하는 120 kHz 주파수의 EMI는 기준치를 만족하지만, X축과 Y축 안테나 배치에서의 EMI 측정 결과보다 더욱 상승해 있음을 확인할 수 있음.
· 또한, 75 kHz 및 90 kHz 주파수의 앞선 X축과 Y축 안테나 배치 측정결과 대비 작은 것을 확인할 수 있으며, 앞선 측정에서는 낮은 강도였던 15kHz 대역에서 증가했음을 확인할 수 있음.
· 이러한 결과를 바탕으로 75 kHz와 90 kHz의 고조파는 15 kHz에 대한 5차 고조파 및 6차 고조파일 것으로 추정하였으며, 해당 주파수의 EMI는 정류기에서 발생하는 것으로 판단됨.
· 결과적으로, 측정 대역 1에서는 기본주파수에 대한 고조파는 기준을 만족하지만, 15 kHz 및 이에 대한 5차 고조파와 6차 고조파가 EMI 기준에 매우 근접함을 확인할 수 있음.



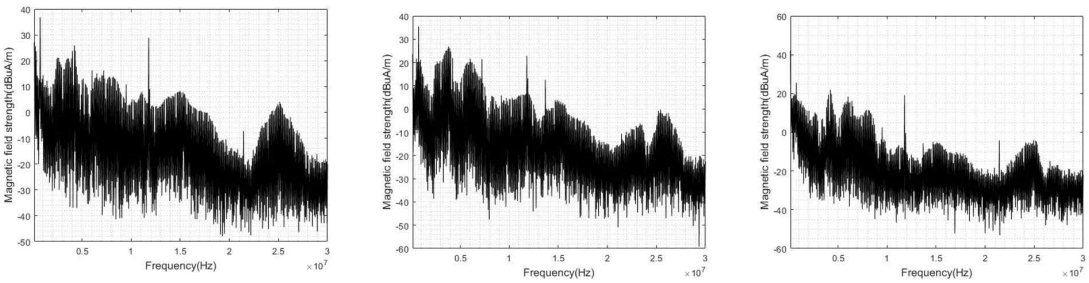
<안테나 방향:X축> <안테나 방향:Y축> <안테나 방향:Z축>

그림 420 경전철 무선급전 철도 집전 EMI 대역 1 측정 결과

< 2차 대역>

· 아래의 그림은 150 kHz 대역에서 30 MHz까지의 주파수에 대한 2차 대역에 대한 급집전 선로 기본 환경에서의 EMI 측정 결과를 보여주고 있음.

· 기본환경에 대한 측정 결과 X,Y,Z축 모두에서 12 MHz의 주파수에서 기본적으로 EMI 가 일정 수준 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 기본환경에서의 EMI를 바탕으로 급집전 선로 측정 시 해당 주파수의 EMI 변동을 확인하여 급집전 선로에 의한 EMI 발생 영향 여부를 판단하였음.



안테나 X축 측정 안테나 Y축 측정 안테나 Z축 측정

그림 421 급집전 선로 기본 환경 EMI 측정결과 (2차 대역 150k-30MHz)

· 아래의 그림은 150 kHz 대역에서 30 MHz까지의 주파수에 대한 2차 대역에 대한 각 안테나 배치별 측정 결과를 보여주고 있음.

· X축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 2차 주파수 대역에서는 EMI 기준에 대해 안정적으로 만족하는 것을 확인할 수 있음.

· Y축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 기본 주파수의 3차 고조파에 해당하는 180 kHz 주파수의 EMI가 X축 안테나 배치 시의 EMI 측정 결과보다 상승하였지만, X축 방향에서의 EMI 강도와 마찬가지로 EMI 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있음.

· 또한, 18 MHz 주파수 대역에 대한 EMI가 X축 안테나 배치에서의 EMI 결과 대비 증가하였으며, X축 안테나 배치의 결과 대비 전반적으로 EMI가 높게 측정되는 것을 확인할 수 있음.

· Z축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과를 살펴보면, 기본주파수의 3차 고조파에 해당하는 180 kHz 주파수의 EMI가 Y축 안테나 배치 방향의 EMI 측정결과와 유사한 강도로 측정되는 것을 확인할 수 있으며, 18 MHz 대역의 EMI는 Y축 안테나 배치 시의 측정 결과 대비 약하게 측정되는 것을 확인할 수 있음.

· Z축 안테나 배치 방향의 EMI 측정 결과 2차 대역에서는 안테나의 배치에 따라 증감이 발생하더라도, EMI 기준에 대해서는 만족하는 것을 확인할 수 있음.

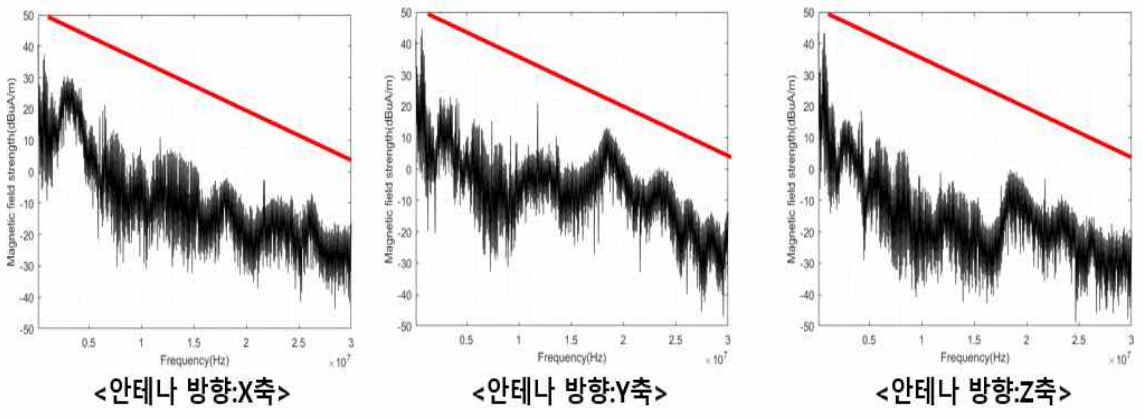


그림 422 급전 EMI 현장 검증을 위한 측정 구성 (2차 대역)

○ 집전 EMI 기준 부합 여부 검토

- 집전 EMI에 대해 경산 시험선에서의 급전선로에 위치한 집전부로부터 방출되는 EMI 수준을 측정하였음.
- 측정결과 기본 주파수를 제외한 3고조파 이상에서의 고조파에서 40 dBuA/m 미만의 EMI가 방출되는 것을 확인하였음.
- 이는 과제 당초 목표인 95 dBuV/m에 대해 51.5의 보정 계산을 적용하여 dBuA/m로 약식 환산이 가능하며, 이 경우 기준치 43.5 dBuA/m의 값으로 환산됨.
- 즉 당초 과제 목표인 43.5 dBuA/m에 대해 3고조파 이상의 대역에서 기준치를 모두 만족하는 것을 검증하였음.
- 또한 수 MHz 대역의 집전 EMI 저감을 위하여 집전 픽업 모듈 후단과 레귤레이터 사이에 동상 페라이트 코어를 적용하였음.

거. 급집전 EMF 안전성

1) 급집전 EMF 안전성 (1차년도)

가) 급집전 EMF 안전성 영향분석

(1) 급집전 EMF 안전성 영향 분석

○ EMF 감쇄 급전 구조

○ Reactive shielding coil을 활용한 경전철 급/집전 모듈 EMF 차폐 기술 검토

○ 급/집전 시스템 EMF 차폐를 위한 대안 후보 기술 검토

2) 급집전 EMF 안전성 (3차년도)

가) EMF 감쇄 후보기술 및 구조별 분석

(1) 교차결선 급전구조를 통한 EMF 저감

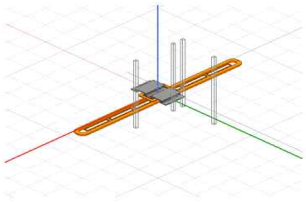
○ 교차 결선 구조 설계

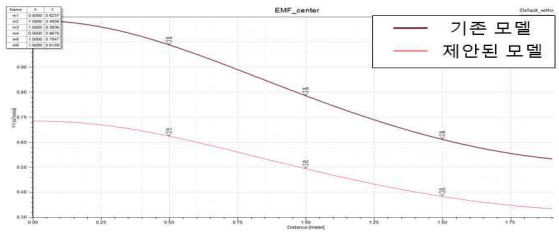
- 설계 변수 분석

(2) 삽입형 차폐 급전구조를 통한 EMF 저감

○ 삽입형 코일 구조 설계

- 설계 변수 분석





< 180 kHz EMF 레벨>

	기존 코일	2번 제안 모델
0.5 m	0.99uT	0.62uT
1.0 m	0.78uT	0.49uT
1.5 m	0.61uT	0.38uT
평균값	0.79uT	0.50uT

<EMF center(uT) @ 180 kHz>

그림 423 급전 코일 삽입형 차폐 코일 적용 결과

(3) 알미늄 하우징 사양변경과 Reactive shield 적용에 따른 EMF 저감

○ 알미늄 하우징의 넓이와 높이 변화에 따른 영향 분석

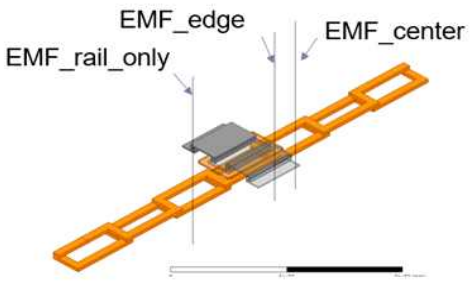
- 설계 변수 분석

나) 급집전 EMF 감쇄 및 차폐 모듈 민감도 분석

(1) 교차결선 급전구조 민감도 분석

○ 교차결선 적용에 따른 EMF 저감 분석

- 민감도 분석



<EMF center(uT)>

	기존 코일	교차 결선 코일
0.5 m	71.0	65.1
1.0 m	22.9	18.9
1.5 m	9.4	6.8
평균값	34.4	30.3

<EMF edge(uT)>

	기존 코일	교차 결선 코일
0.5 m	62.5	56.0
1.0 m	21.9	17.6
1.5 m	9.3	6.6
평균값	31.2	26.7

<EMF rail only(uT)>

	기존 코일	교차 결선 코일
0.5 m	27.9	8.4
1.0 m	13.9	6.0
1.5 m	7.7	4.2
평균값	16.5	6.2

그림 424 교차결선 적용 시 EMF 시뮬레이션

(2) Reactive shield 민감도 분석

○ Reactive shield 적용에 따른 EMF 저감 분석

- 민감도 분석

다) EMF 감쇄 모의실험 분석

(1) 민감도 분석 결과를 바탕으로 설계한 페라이트 EMF 저감 모의실험

○ 삽입형 코일 EMF 저감 실험

- 실험환경 구축 및 측정

(2) 민감도 분석 결과 기반 Reactive shield 코일 EMF 저감 모의 실험

○ Reactive shield EMF 저감 실험

- 실험환경 구축 및 측정

(3) 민감도 분석 결과 기반 인버터 알미늄 차폐 EMF 저감 모의 실험

○ 인버터 알미늄 차폐에 따른 EMF 저감

- 실험환경 구축 및 측정



그림 425 인버터 알미늄 하우징

표 92 인버터 차폐 시 EMF 측정 결과 (단위: uT)

측정모드	EMF(uT)			
	0.5m	1m	1.5m	평균
차폐미적용_알미늄	5.52	3.33	2.67	3.84
40k_집전동일_알미늄	3.96	2.27	1.54	2.59
30k_집전동일_알미늄	4.33	2.4	1.82	2.85
50k_집전동일_알미늄	2.66	1.5	1.22	1.79333

3) 급집전 EMF 안전성 (4차년도)

가) 급집전 EMF 안전성 검증 및 개선

(1) 급집전 EMF 안전성 검증 : 급집전 EMF 감쇄 모듈 개발, 시험 및 검증

○ 철도 환경 반영 Reactive shield 적용

- 플랫폼에 대한 reactive shield 적용

· Reactive shield의 설치 위치는 기존과 달리 플랫폼 높이와 동일한 곳에 설치하도록 설정.

· 플랫폼은 기존 무선충전시스템에 직접적으로 달리는 것이 아니기 때문에 구현 가능성이 높고 비교적 설치가 간편한 편이라는 장점도 지님

· 경산 시험선 구축 환경을 반영하여 Reactive shield의 설치 위치를 플랫폼 높이와 동일하게 설정하는 적용 방법을 고안

· 두 개의 픽업이 인접하게 설치된 상태에서 하나의 픽업에 대해 Reactive shield를 적용하는 시뮬레이션 모델 설계

· 시뮬레이션 결과, 플랫폼 위치에서는 약 36%, 출입문 위치에서는 약 46%의 EMF 저감효과가 있는 것으로 나타났음.

(2) 급집전 EMF 안전성 개선 : 시험 평가 후 시험 결과 분석을 통한 안전성 개선

○ 철도 환경에서의 Reactive shield 시험 평가

- 플랫폼에서의 EMF 저감 실증

· 경산시험선에서 측정을 진행하기 위해 플랫폼에 설치할 차폐 코일을 제작하였음

· 제작한 차폐 코일은 아래 그림과 같이 1턴의 1.9m x 1.5m의 크기를 가짐

· 시뮬레이션 모델을 통해 검토한 Reactive shield 적용 방안을 실제 경산 시험선에 적용하여 측정 실험을 수행

- Reactive shield에 따른 EMF 저감 실증

· Reactive shield 설치 높이는 바닥으로부터 0.85m이며, 코일의 넓이는 160×200mm로 설치하였음.

· 측정실험 결과, 플랫폼 위치에서는 약 11%, 출입문 위치에서는 약 17%의 EMF 저감효과가 있는 것으로 나타났음.

· 플랫폼으로부터 0.5 m에서 떨어진 거리에서 측정한 결과, 약 0.1 μT정도의 감쇄 효과를 보였음

· 이는 매우 작은 값이지만, 차폐 코일의 특성상 중앙부의 차폐효과가 강하고 가장자리 부근은 차폐가 덜하거나 자기장을 증폭시킬 수 있음

· 실제로 0.5m 지점에서는 0.2 μT 감쇄로 약 11%의 EMF 감쇄효과를 볼 수 있었음

(3) 선로 및 신호시스템, 차량에 대한 급집전 EMF 차폐 검증 및 개선

○ 차량구조를 반영한 테스트베드에서의 EMF 저감 실험

- 차체 모사 및 위치별 EMF 저감 수준 검토

· 제안한 Reactive shield의 EMF 저감 효과와 다양한 위치에서의 EMF 측정 및 차폐에 변화를 주어가며 측정하기위해 위 그림과 같이 실험실 레벨의 실험 환경을 구축하였음

· 승객이 위치할 수 있는 철도 환경에서의 위치를 반영하여 EMF 측정 위치 선정

· 차량 내부의 좌석에 승객이 앉았을 경우를 생각하여 다리와 허리 머리 부분의 위치를 위 그림의 좌석과 같이 설정하였음

· 플랫폼과 선로 출입문의 경우, 차량 시스템보다 높이 존재하므로 높이를 이격하여 측정 진행

· 실험실 레벨 측정은 차체를 알루미늄이라고 가정하고 차체가 있을 때와 없을 때, 제안한 reactive shield가 적용되었을 때와 적용되지 않았을 때로 나누어서 실험환경을 구축하고 측정을 진행하였음

· 실험실 레벨은 실제 시스템보다 낮은 파워로 진행하였기에 실제 Full-load로 가동되었을 때 예상되는 EMF 값도 시뮬레이션으로 구현하였음

· 실험을 통해 실제 승객의 위치 및 차체를 고려한 환경에서의 EMF는 6.25 uT의 국내 EMF 기준에 만족할 수 있음을 확인하였음.

- 열차 내 EMF 취약지점에 대한 차폐

· 알루미늄 차체가 존재하지 않는 차량 연결부에서의 EMF 증가 가능성 검토

· 플랫폼에 적용 가능한 차폐 코일을 적용할 경우의 EMF 저감 수준 검토

· 측정 결과를 시뮬레이션과 비교

· 차량의 연결부 부분이 상대적으로 높은 EMF 수치를 보일 것이라 추측되어 차량의 연결부에 차폐코일을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대해서 시뮬레이션을 진행하였음

· 차량의 연결부에 설치된 차폐 코일의 효과는 미비하거나 효과가 없는 것을 실험을 통해 알 수 있었음

· 하지만 알루미늄(차체)의 존재로 EMF가 어느 정도 차폐되어 차폐코일 유무에 관계없이 6.25 uT보다 낮은 값을 가지는 것을 확인하였음
· 차량과 차량 사이 이음새 부분의 재질이 알루미늄인 경우와 철인 경우로 나누어서 시뮬레이션을 진행하였음
· 이음새 부분은 모두 6.25 uT를 초과하는 EMF 레벨을 가지는 것을 확인하였음
· 이는 발판의 위치에 대한 정확한 위치 정보가 없어 급전 선로로부터 z축으로 50cm, 100cm 떨어졌다고 가정하고 진행한 시뮬레이션 결과로서 급전 선로나 집전 모듈로부터 발판의 위치를 정확하게 알 수 있다면 보다 정확한 시뮬레이션이 가능
· 주어진 시험선 환경에 대해. 적용이 용이한 형태로 Reactive shield를 적용하는 방안을 도출하고 이에 대한 측정 실험을 수행
· 기존의 Reactive shield 적용 방법은 픽업 모듈과 동일한 높이에 위치하는 방법으로 고안되었음
· 금번 측정에서는 기존에 제안된 위치와 다른 플랫폼 높이에 위치할 경우 EMF 저감을 검토하여 적용 방법의 유연성을 검토하였음.
· 시뮬레이션 상에서는 약 30%정도의 EMF 저감 성능을 보였지만, 실제 측정에서는 약 15%의 EMF 저감 성능이 나타났음.

4) 급집전 EMF 안전성 현장 검증 및 보완 (5차년도)

가) 급집전 EMF 안전성 현장 검증 및 보완

(1) 급집전 EMF 안전성 현장 검증

○ Test-bed에서의 차폐코일 EMF 저감 성능 현장 검증

- Reactive shield 적용 모의실험

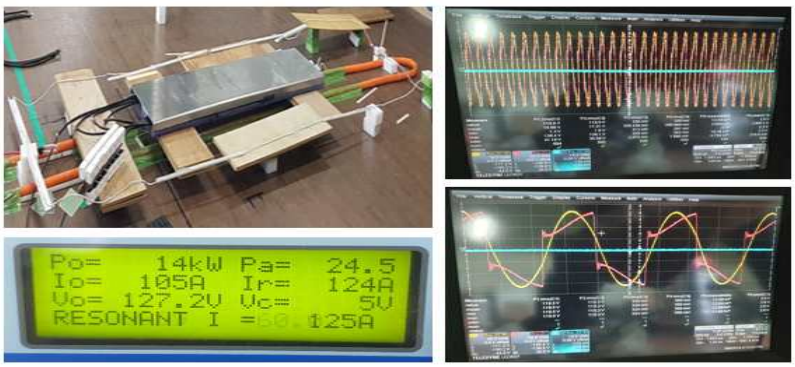


그림 426 차폐코일 실험 셋업

· 위 그림은 400 mm 와 600 mm 차폐코일의 실험을 위한 실험 셋업 사진이며, 실험은 집전 전력에 10 kW의 전력이 전달될 때 발생하는 EMF를 기준으로 측정을 수행하였음.
· 아래 표는 차폐코일의 실험 결과이며, 400 mm 차폐코일을 사용하였을 때보다 600 mm를 사용하였을 때 약 0.5 uT의 EMF가 더욱 저감되는 것을 확인할 수 있음.
· 하지만 효율 측면에서는 400mm 차폐 코일을 사용한 경우 약 5%의 효율 저감이 발생하였으며, 600 mm 차폐 코일을 사용한 경우는 약 1.2%의 효율 저감이 발생

· 이러한 결과를 통해 EMF 저감 성능 및 효율은 반지름이 커질수록 향상되는 것을 실험을 통해 확인하였으며, 이러한 효과를 더욱 증가시킬 수 있도록 차폐 코일을 다수의 턴으로 구성하는 설계 방안에 대해 검토하였음.

표 93 반지름별 차폐코일 적용 시뮬레이션 결과

구분	급전 전력 (kW)	집전 전력 (kW)	0.5m (uT)	1.0m (uT)	1.5m (uT)	EMF 평균	효율 (%)
차폐코일 없음	13	10.1	11.5	4.3	2.3	6.03	77.7
400 mm 차폐코일	13	9.46	5.3	3.1	2.0	3.46	72.8
600 mm 차폐코일	13	9.9	4.7	2.3	1.4	2.8	76.5

(2) 급집전 EMF 안전성 보완

○ Reactive shield 사양변화에 따른 안전성 향상 분석

- 차폐코일을 무선급전 철도에 적용함에 있어 EMF 저감성능의 향상과 전력전송 효율 저감 방지 등을 중심으로 적용 방안 연구
- 차폐 코일의 성능을 향상을 위해 차폐 코일의 주요 설계 변수 중 반지름을 달리할 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였음.

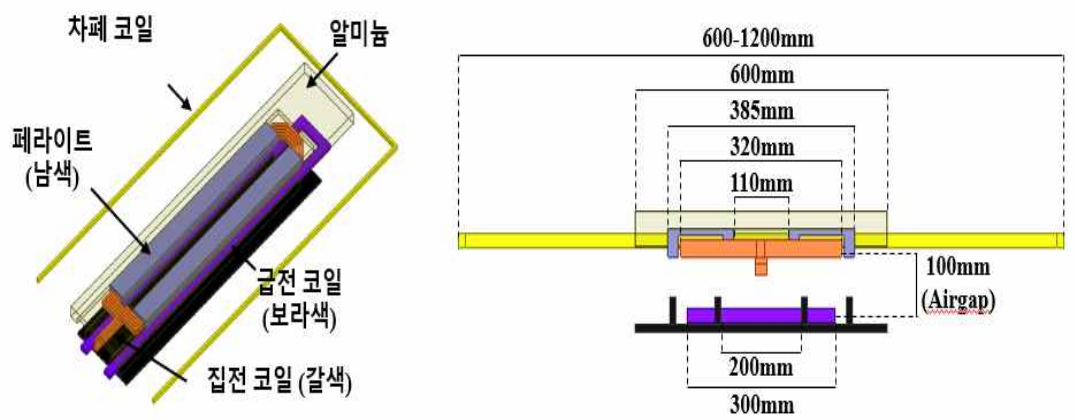


그림 427 차폐 코일 적용 시뮬레이션 모델

- 경전철 무선급전 철도의 실험 모듈에 대한 시뮬레이션 모델이며, 급집전 모듈에 대해 적용되는 차폐코일의 반지름을 300 mm에서부터 600 mm까지 50 mm씩 반지름의 변화를 주며 EMF 저감 성능과 효율 향상 변화를 분석하였음.
- 반지름이 달라짐에 따라 코일의 인덕턴스가 달라지는 것을 고려하여, 설계 시 적용하는 커패시터의 용량에 변화를 주어 적용하였음.
- 실험은 10kW 시를 기준으로 실험을 수행하였으며, 측정은 차폐코일로부터 0.2 m 이격거리에서 0.5 m 높이에서부터 1.5 m까지 0.5 m 씩의 이격 거리를 두며 측정하는 3점 측정 방법을 적용하였음.

표 94 반지름별 차폐코일 적용 시뮬레이션 결과

반지름	300 mm	350 mm	400 mm	450 mm	500 mm	550 mm	600 mm
커패시터(uF)	1.28	1.01	0.92	0.83	0.76	0.75	0.69
급전 전류(A)	182.5	179.3	178.8	178.1	177.4	176.9	176.4
집전 전류(A)	82.5	83.1	83.1	83	83	82.9	82.8
차폐 전류(A)	119.5	43.1	36.7	30.5	25.5	20.5	17.4
급전 전력(kW)	14.53	14.35	14.31	14.25	14.19	14.15	14.12
집전 전력(kW)	10.58	10.74	10.73	10.71	10.68	10.67	10.65
차폐 전력(W)	221.6	30.7	23.6	17.7	13.4	9.5	7.3
0.5m EMF (uT)	4.07	3.71	3.32	3.09	2.99	2.91	2.84
1.0m EMF (uT)	1.69	1.48	1.33	1.28	1.25	1.23	1.19
1.5m EMF (uT)	0.75	0.67	0.53	0.5	0.5	0.47	0.46
EMF 평균 (uT)	2.17	1.95	1.72	1.62	1.58	1.53	1.49
저감율 (%)	70	73.3	76.4	77.8	78.4	79	79.5
효율 (%)	72.8	74.8	74.9	75.1	75.2	75.4	75.4
효율 저감 (%)	-2.6	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	0	0

- 각 반지름의 차폐 코일 적용 시 EMF 저감 성능 및 효율 저감의 변화를 시뮬레이션한 결과이며, 반지름이 커질수록 차폐 성능이 향상됨과 동시에 효율 저감이 낮아지는 것을 확인할 수 있음.
- 300 mm 반지름의 차폐 코일은 집전모듈과 길이가 유사하다는 측면에서 집전모듈에 포함시키기 용이하다는 장점이 존재하지만, 해당 코일을 적용할 경우 효율저감이 발생할 수 있음을 확인할 수 있음.
- 350 mm 반지름의 차폐코일은 300 mm 반지름의 차폐 코일을 적용할 경우보다 효율 저감이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있으며, EMF 저감율 또한 증가하는 것을 확인할 수 있음.
- 400 mm 반지름의 차폐 코일은 350 mm 차폐 코일 대비 EMF 저감 성능 측면에서는 비슷한 양상으로 증가하였지만, 효율저감 측면에서는 큰 향상을 보이지 않음.
- 400 mm 반지름보다 큰 반지름으로 설계된 코일은 400 mm 대비 EMF 저감 성능과 효율저감 감소가 균일하게 발생하지만, 그 향상 폭이 크지는 않은 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있음.
- 이에 대해 EMF 저감 성능 및 효율 향상이 두드러지게 발생하기 시작한 400 mm 반지름의 차폐코일과, 실험 대상 중 EMF 저감과 효율 측면에서 가장 높은 성능을 보인 600mm 반지름의 차폐 코일 두 개에 대해 실험을 수행하여 실효성을 검증하였음.

(3) 철도 운영환경을 반영하는 테스트베드에서의 EMF 안전 방안 현장 검증 및 보완

○ 경산 시험선에서의 무선급전철도 EMF 안전성 검증

- EMF 취약지점에 대한 측정

· 무선급전 철도의 EMF 안전성 검증을 위한 경산 시험선에서의 EMF 측정 수행.

· EMF 측정 위치는 무선급전 철도 시스템에서 높은 EMF가 발생할 것으로 예측되는 지점을 선정하여 각 위치에서 3점 측정 방법을 적용하여 측정을 수행하였음.

· 3점 측정 방법을 통해 각 높이에서 측정을 수행한 후 이에 대한 평균값을 내는 것으로 측정을 수행하였음.

· 측정은 총 2회에 걸쳐 수행하였으며, 첫 번째 측정은 철도차량이 없이 급집전만 존재하는 경우에 대한 측정, 그리고 두 번째 측정은 철도차량이 있는 경우에 대한 측정을 수행하였음.

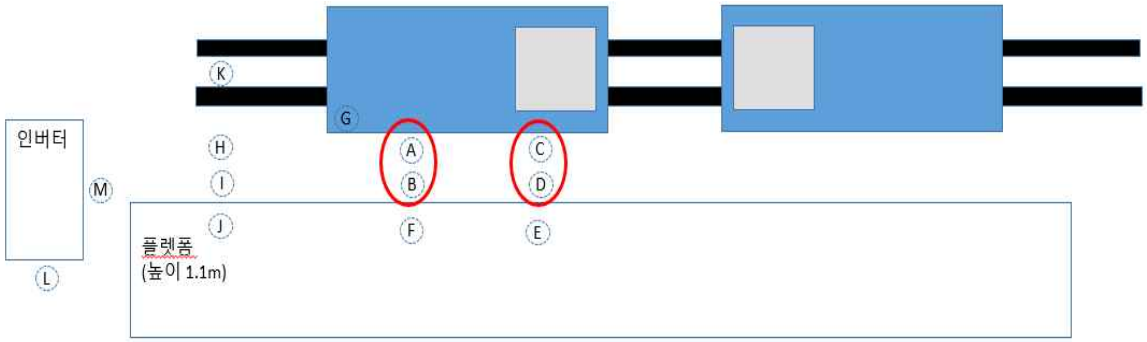


그림 428 경전철 무선급전 철도 집전 EMF 측정 위치

표 95 차체가 없는 경우에 대한 EMF 측정 결과

기호	측정 지점	자기장 세기 [uT]			
		0.5m	1m	1.5m	평균
A	집전코일 중심 1.4m	12.59	9.36	4.73	8.89
B	집전코일 중심 1.7m	11.68	9.09	3.14	7.97
C	정류기 중심 1.4m	11.91	9.59	5.05	8.85
D	정류기 중심 1.7m	19.30	9.30	3.73	7.78
E	정류기 중심 플랫폼 0.2m	3.21	2.43	1.03	2.22
F	집전코일 중심 플랫폼 0.2m	2.72	1.99	1.53	2.08
G	차량 내부 출입문 0.2m	5.87	3.17	2.00	3.68
H	급전코일 중심 1.2m	7.18	5.21	3.01	5.13
I	급전코일 중심 1.7m	5.67	4.20	2.37	4.08
J	급전코일 플랫폼 0.2m	1.91	1.49	1.14	1.51
K	전철 통로 예상지점	4.55	2.20	1.40	2.72
L	인버터 우측 측면	14.93	11.13	4.06	10.04
M	인버터 뒷면	20.01	15.45	11.43	15.63

· 표는 각 위치에서의 EMF 측정 결과를 보여주며, 차체가 없는 경우에 집전 코일 중심부 및 정류기 중심부에서의 EMF가 6.25 uT를 초과하는 것으로 측정되었음.
· 하지만 이는 차체가 없는 경우의 EMF 결과로서, 차체가 존재할 경우에는 EMF 기준을 만족할 수 있을 것으로 판단됨.
· 급집전부에 대한 이외의 위치에서는 EMF 기준치 6.25 uT의 기준을 모두 만족하였음.
· 인버터에 대한 자기장 세기는 인버터의 우측 측면과 인버터의 뒷면 등 두 위치에서 측정을 수행하였으며, 측정 결과는 인버터 우측 측면에서 약 10 uT로 측정되었고, 인버터 뒷면에서는 약 15 uT가 측정되었음.
· 인버터 위치에서는 일반인 기준인 6.25 uT보다 높지만, 인버터는 일반인의 출입이 제한되는 위치로서, 직업인 기준인 30.7 uT를 적용할 경우 기준치에 만족하는 것을 확인할 수 있음.

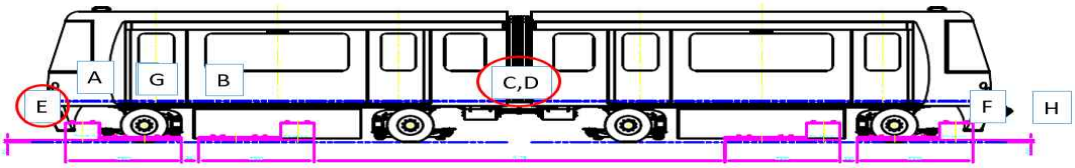


그림 429 경전철 무선급전 철도 급집전 EMF 측정 위치

표 96 차체가 있는 경우에 대한 EMF 측정 결과

기호	측정 지점	자기장 세기 [uT]			
		0.5m	1m	1.5m	평균
A	차량 내 좌석	1.2	1.38	1.29	1.29
B	차량 객실 중심부	1.1	1.1	1.1	1.1
C	차량 연결부 통로	4.4	3.5	2.5	3.4
D	차량 연결부	4.2	3.1	2.7	3.3
E	차량 앞쪽 모서리	4.1	3.0	2.6	3.23
F	차량 뒤쪽 모서리	3.1	2.4	1.9	2.46
G	출입문	1.1	1.1	1.06	1.08
H	급전 선로	2.6	1.9	1.9	2.13

· 차체가 있는 경우에 대한 EMF 측정 위치를 보여주며, 객실의 내부에서 승객이 위치할 수 있는 주요 위치를 선정하여 측정을 수행하였음.

· 상기 표는 각 위치에서의 EMF 측정 결과를 보여주며, 차체가 있는 경우 객실 내부에서의 EMF 수준은 6.25 uT인 일반인 기준에 모두 만족하는 것을 확인할 수 있음.

· 객실 내부에서의 측정 결과 중 가장 높은 EMF가 측정된 위치는 차량 연결부 통로였으며, 이는 객실 내부는 차체가 존재하는 반면 차량 연결부에는 전도성 차체가 없기 때문에 상대적으로 높은 EMF가 측정된 것으로 판단됨.

· 또한 차량 모서리 부분에서의 EMF가 상대적으로 높은 EMF가 발생하였으며, 이는 같은 전도성을 가지는 차체라 할지라도 첨예도가 높은 쪽으로 자기장이 집중되는 현상 때문에 객실 정 중앙과 같은 위치보다 상대적으로 높은 EMF가 측정된 것이라 판단됨.

너. 전기안전지원 통신 프로토콜 검증

1) 전기안전지원 통신 프로토콜 검증 (4차년도)

가) SAE 표준 기반, 도시철도 무선급전에 최적화된 전기안전 통신 프로토콜 제안

(1) 경전철 및 인프라 시스템 환경 분석

○ 도시철도용 무선 급집전 통신프로토콜 시스템 설계

- 모니터링 시스템 설계
- 메시지 교환 프로토콜 설계

○ 무선급집전 시스템 환경 분석

- 무선급집전 인프라는 Electric train supply equipment (ETSE) 및 supply equipment communication controller (SECC) 로 구성됨

- 무선급집전 경전철 차량은 Electric train (ET) 및 electric train communication controller (ETCC) 로 구성됨

(2) 전기안전 통신 프로토콜 메시지 및 파라미터 정의

○ 전기차용 무선충전 통신 프로토콜 표준 분석

- SAE 표준 시스템과 경전철 시스템 비교 분석
- IEC 무선충전 표준 추가 고려

○ 전기안전 통신 프로토콜 메시지 교환 시퀀스 정의

- 무선충전 메시지 흐름도 제시

나) 충전 중 모니터링 기능 제안

(1) 모니터링 시스템

○ 통신 프로토콜 메시지 교환

- 인프라의 SECC와 경전철 차량의 ETCC는 통신 프로토콜 메시지 교환을 통한 충전 모니터링 가능
- ETCC와 SECC는 각 통신 프로토콜 메시지 단계별, 다음 단계로 넘어가기 위한 조건과 동작을 확인

다) 장애 발생 시, 재전송 및 강제종료 기능 제안

(1) 재전송 및 강제종료 기능

○ 각 메시지 단계별 정상 동작 조건과 에러의 종류 및 장애 처리 동작 설계

라) 장애 발생 시, 관리자에게 장애 상태 통보 기능 제안

(1) 장애 상태 통보 기능

○ 장애 발생 시, 장애 원인 및 시스템 상태를 파악하기 위해 사용하는 ResponseCode, ETErrorCode, ETSEStatusCode 엘리먼트의 Enumeration 값 통보

2) 전기안전지원 통신 프로토콜 검증 (5차년도)

가) SAE 표준 기반, 도시철도 무선급전에 최적화된 충전 및 장애처리 전기안전 통신 프로토콜 검증 및 보완

(1) SAE 표준 및 경전철 융합 설계 기반 전기안전통신 프로토콜 구현

○ SECC 및 EVCC 통신시스템 구현

- SECC 및 EVCC는 전력제어시스템에서 정보를 받아 통신 프로토콜 메시지를 교환

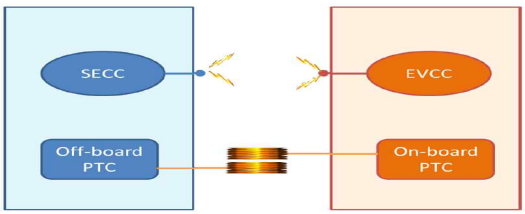


그림 430 SECC-EVCC 통신시스템

○ 국제 표준 SAE J2847-6, IEC 61980-2 기반 XML 형식 메시지 형성

- 전체적인 메시지 교환 방식은 EVCC가 먼저 Req 메시지를 보낸 후 SECC가 Res 메시지로 응답
- 각 메시지는 여러 개의 파라미터들을 포함한 XML 형식으로 구성

	메시지	약어
1	SupportedAppProtocolReq/Res	0a/b
2	SessionSetupReq/Res	1a/b
3	ServiceDiscoveryReq/Res	2a/b
4	ServicePaymentSelectionReq/Res	Xa/b
5	ContractAuthenticationReq/Res	Ya/b
6	ChargeParameterDiscoveryReq/Res	3a/b
7	StartAlignmentReq/Res	4a/b
8	HeartbeatReq/Res	Ha/b
9	AlignmentCompleteReq/Res	5a/b
10	StartAlignmentCheckReq/Res	6a/b
11	EndAlignmentCheckReq/Res	7a/b
12	WPPreChargeReq/Res	8a/b
13	PowerDeliveryReq/Res	9a/b
14	PowerDemandReq/Res	10a/b
15	PowerDeliveryReq/Res	11a/b
16	SessionStopReq/Res	12a/b

그림 431 무선 충전 통신 프로토콜 메시지 목록

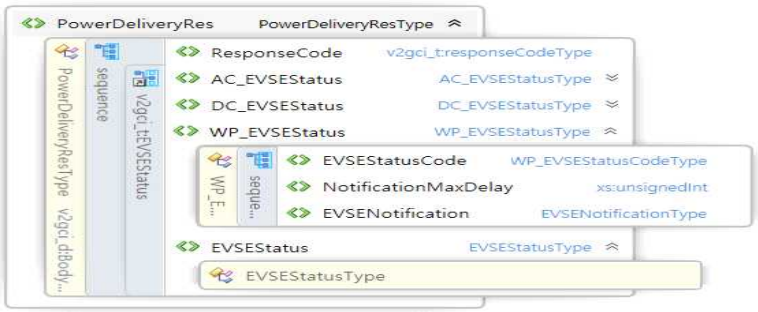


그림 432 무선 충전 통신 프로토콜 XML 형식 메시지 예시

나) 충전 중 모니터링 기능 검증 및 보완

(1) 메시지 전달 알고리즘 추가

○ 통신 데이터 및 절차

- XML 형식 메시지를 통하여 집전 및 급전장치의 전력 전달 정보 및 상태 정보를 파악하고 장애 발생시 정보 교환을 통해 안전사고 예방
- 통신 절차는 경전철 차량이 먼저 데이터 전송을 하고, 무선급전 인버터가 응답
- 경전철 데이터

· 경전철에서 무선급전 인버터로 전송하는 데이터

표 97 경전철 전송 데이터

데이터 이름	종류	설명
EVReady	Boolean	충전 준비 상태를 나타낸다.
EVErrorCode	Enumeration	경전철 내부 상태 정보를 나타낸다.
EVCabinConditioning	Boolean	객실 냉난방에 전력 사용 여부를 나타낸다.
EVRESSConditioning	Boolean	배터리 냉각에 전력 사용 여부를 나타낸다.
EVRESSSOC	percentValueType byte(range: 0-100)	경전철 배터리 SOC를 나타낸다.

· 다음의 5가지 데이터를 모두 전송

- 무선급전 인버터 데이터

· 무선급전 인버터에서 경전철로 전송하는 데이터

표 98 무선급전 인버터 전송 데이터

데이터 이름	종류	설명
ResponseCode	Enumeration	경전철로부터 받은 데이터에 대한 응답을 나타냄.
EVSEStatusCode	Enumeration	무선급전 인버터 내부 상태를 나타냄.
NotificationMaxDelay	unsignedInt	무선급전 인버터는 이 데이터를 사용하여 경전철이 EVSENotification 데이터에 표시된 조치 요청에 대해 반응할 것으로 예상되는 시간을 표시함. 목표 시간이 미래가 아니면 경전철은 즉시 조치를 수행할 것으로 고려함
EVSENotification	Enumeration	이 값은 무선급전 인버터에서 경전철의 동작에 영향을 주기 위해 사용함. EVSENotification은 인버터가 경전철에게 수행하기를 원하는 조치를 포함함. 요청된 작업은 NotificiationMaxDelay에 제공된 시간까지 수행할 것으로 예상함. 정상 작동 중에 EVSENotification 값은 “None”으로 설정됨.

· 다음의 4가지 데이터를 모두 전송

(2) 상세 데이터 포맷 추가

○ Enumeration 형태 데이터의 요소 값을 나열

○ 여러 요소 값들 중에서 하나를 가질 수 있음

다) 장애 발생 시, 장애 처리 기능 검증 및 보완

(1) 장애 처리 기능 보완

○ 타임아웃

- 경전철과 인버터 모두 데이터 전송 후 25ms 동안 응답이 없는 경우 고장으로 판단하고 고장정보를 표출
- 경전철 경우 EVErrorCode를 “FAILED_CommunicationsTimeOut”로 설정 후 전송
- 인버터 경우 EVSEStatusCode를 “ETSE_CommnuicationsTimeOut”로 설정 후 전송

○ 경전철 비정상동작

- EVErrorCode를 해당 비정상동작에 맞게 설정한 후, 인버터로 전송
- 해당 데이터를 받은 인버터는 ResponseCode를 “FAILED_XXXXX”로 응답

○ 인버터 비정상동작

- ResponseCode를 “FAILED_XXXXX”로 설정하고, 해당 비정상동작에 맞게 EVSEStatusCode를 설정하여 경전철로 전송

○ 경전철 환경 반영 고장코드 추가

고장 위치	고장 CODE	고장 명칭	약어	ErrorCode	EnumValue
인버터	1	인버터 스택 과전류	F0	WPEVSEStatusCode	EVSE_InverterStackOverCurrent
	2	출력 과전류	F1		EVSE_OutputOverCurrent
	3	입력 과전류	F2		EVSE_InputOverCurrent
	4	입력 과전압	F3		EVSE_InputOverVoltage
	5	DC-Link 과전압	F4		EVSE_DCLinkOverVoltage
	6	출력 과전압	F5		EVSE_OutputOverVoltage
	7	DC-Link 저전압	F6		EVSE_DCLinkLowVoltage
	8	제어전원 오류	F7		EVSE_ControlPowerError1
	9	제어전원 오류	F8		EVSE_ControlPowerError2
	10	제어전원 오류	F9		EVSE_ControlPowerError3
	11	ESTOP	F10		EVSE_ESTOP
	12	Door OPEN	F11		EVSE_DoorOPEN
	13	스택 전류 불균형	F12		EVSE_StackCurrentUnbalance
	14	제어 에러	F13		EVSE_ControlError
	15	입력전압 감지 에러	F14		EVSE_InputVoltageSensingError
	16	출력전압 감지 에러	F15		EVSE_OutputVoltageSensingError
DC/DC 컨버터	1	출력상 과전류	OOC	WPEVErrorCode	FAILED_DDC_OOC
	2	입력 과전류	IOC		FAILED_DDC_IOC
	3	배터리 과전류	BOC		FAILED_DDC_BOC
	4	FC 과전압	FCOV		FAILED_DDC_FCOV
	5	배터리 과전압	BOV		FAILED_DDC_BOV
	6	스택 과온 고장	OTF		FAILED_DDC_OTF
	7	상 불평형	PUD		FAILED_DDC_PUD
	8	DCHK 컨택터 고장	DCKF		FAILED_DDC_DCKF
	9	CHK 컨택터 고장	CHKF		FAILED_DDC_CHKF
	10	K 컨택터 고장	KF		FAILED_DDC_KF
	11	BATK 컨택터 고장	BAKF		FAILED_DDC_BAKF
	12	수냉각기 고장	WCF		FAILED_DDC_WCF
	13	BMS(배터리) 고장	BNSF		FAILED_DDC_BNSF
	14	가선 과전압	ESOV		FAILED_DDC_ESOV
	15	배터리 저전압	BUV		FAILED_DDC_BUV
	16	게이트 고장	CFD		FAILED_DDC_CFD
	17	기동 불능	STF		FAILED_DDC_STF
	18	제어전원 고장	CPSF		FAILED_DDC_CPSF
집전장치	100	출력 과전류	OCP	WPEVErrorCode	FAILED_RESS_OCP
	101	출력 과전압	OVP		FAILED_RESS_OVP
	102	출력 저전압	LVP		FAILED_RESS_LVP
	103	제어전원이상	CPSF		FAILED_RESS_CPSF
	104	정류기 스택 과열 상태	RSTS		FAILED_RESS_RSTS
	105	출력단 FUSE 용단 상태	OFS		FAILED_RESS_OFS
	106	물 누수 상태	WLS		FAILED_RESS_WLS

그림 433 인버터 및 경전철 추가 고장코드

(2) 통신 지연 시간 25ms 이내 무선랜을 통한 메시지 전달 확인

○ SAE J2847-6 표준에 따르면 가장 짧은 타임아웃을 갖는 무선 충전 통신 프로토콜 메시지의 경우 25ms 이내로 교환이 완료되어야 함

○ 검증을 통해 해당 메시지의 경우 25ms 이내로 전달되는 것을 확인

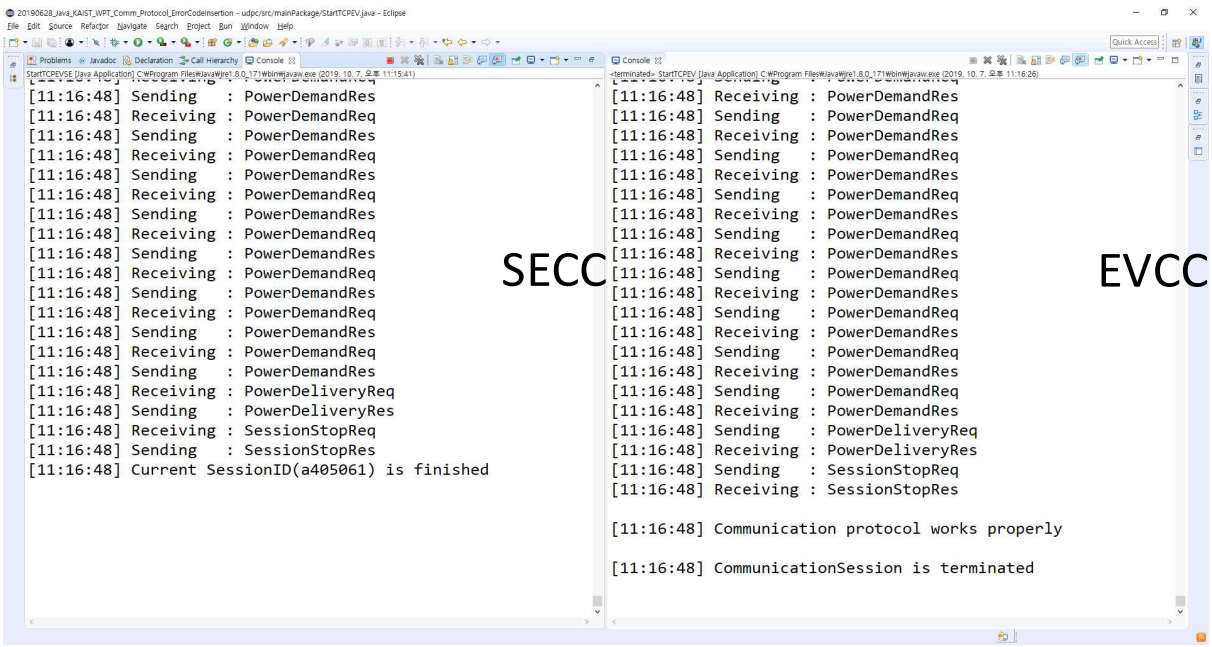


그림 434 통신 프로토콜 실시간 모니터링 화면

라) 검증을 통한 도시철도 무선급전 안전성 확보

(1) IEEE 802.11 무선랜 기반 server-client 통신시스템 구현

○ SECC 통신 시스템을 server로 구현

○ EVCC 통신 시스템을 client로 구현

○ Eclipse 개발 도구를 이용한 통신 프로토콜 구현

(2) 장애 처리 기능 검증

○ 임의의 고장코드 생성 후 전송

○ 실시간 모니터링 화면 및 팝업 화면 동시 출력 시험

○ 해당 고장코드 인식 시험 진행

- 인버터에서 고장이 발생하여 SECC가 고장상황 인식 후 해당 고장정보를 EVCC로 전송한 뒤 EVCC와 SECC 모두 세션을 종료
- 실시간 모니터링 화면 및 팝업 화면에 출력되는 정보를 통해 열차의 상태 및 인버터의 상태를 실시간으로 확인 가능
- 메시지 로그 기록 저장 기능을 통해 장애 발생 시 사후 관리 가능

(3) 실제 환경 고려 통합 테스트를 통한 통신 신뢰성 확보

○ 무선급전 인버터와 무선집전 경전철 차량 사이에 직접적인 통신 링크 고려

- 중대 결함 또는 문제 발생 시 관련 정보를 인버터와 경전철이 직접 공유
- 운영시스템을 거치지 않아 지연 시간 감소 및 실시간 안전 관리 가능

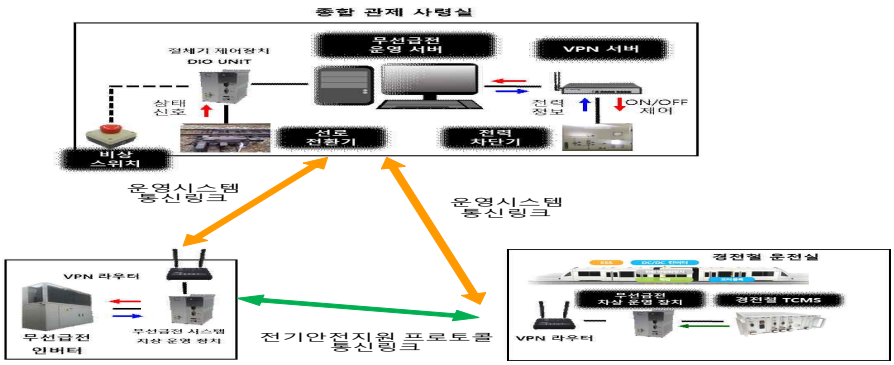


그림 435 경전철 무선 급집전 통신 인터페이스 구성도

○ VOD-WOD 펌웨어 업데이트를 통한 통신 링크 구성

- 차량 VOD 시스템
  · 차량 VOD 펌웨어 수정 및 프로토콜 추가
  · TCMS로부터 전송되는 데이터를 검색하여 특정 고장정보 발생시 운영서버 IP와 WOD IP로 동시에 전송 알고리즘 추가
  · WOD로부터 직접 수신한 특정 고장정보 데이터일 경우 TCMS에 비상제동 명령 생성 및 전달 알고리즘 추가
  · 비상 제동 완료시 비상 제동 상태 운영서버에 전달
- WOD 시스템
  · 역사 WOD 펌웨어 수정 및 프로토콜 추가
  · TCMS로부터 전송되는 데이터를 검색하여 특정 고장정보 발생시 운영서버 IP와 WOD IP로 동시에 전송 알고리즘 추가
  · WOD로부터 직접 수신한 특정 고장정보 데이터일 경우 인버터 운전 모드를 판단하여 인버터 운전 제어 명령 생성 및 전달
  · 인버터 운전 모드 변경시 인버터 상태 운영서버에 전달
- 관제실 서버

· 무선 운영 급전 SW 프로토콜 추가

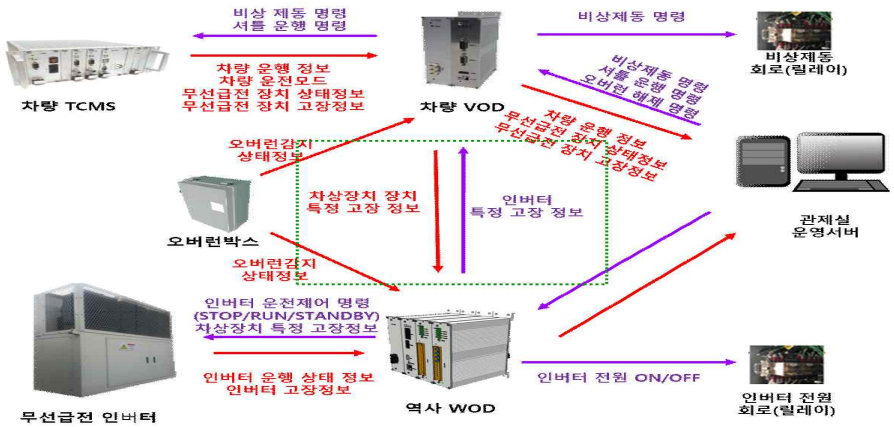


그림 436 실제 환경 통신 프로토콜 테스트 구성도

더. 경제성 분석

1) 경제성 분석 (4차년도)

가) 사양분석

(1) 개발된 무선급전 철도 시스템에 대한 사양 분석

○ 무선급전 철도시스템은 열차 및 선로에 급·집전 시스템을 장착하여 주행하는 철도 시스템으로, 기존 철도시스템의 상부가선 전력공급 방식이 갖는 단점을 개선할 수 있는 대안임

○ 기존 철도차량의 접촉식 전력 공급 시스템의 에너지 운영효율, 높은 건설비 및 유지보수비 등의 문제를 개선할 수 있음

○ 추가로, 선로를 따라 설치된 전차선이 제거로 인하여 주변 경관 개선 효과 발생

(2) 기존 철도 방식에 대한 사양 분석

○ 무선급전 철도시스템과 기존 철도시스템의 가장 큰 차이는 철도가 주행하기 위하여 필요한 전기 공급방식에 있음

나) 평가지표에 대한 국내외 조사 연구

(1) 일반적인 경제성 평가에 사용되는 평가 지표에 대한 자료 조사

○ 경제성 평가를 위한 주요변수는 수요, 비용, 편익, 사회적 할인율이며, 이러한 변수가 어떻게 설정이 되느냐에 따라 경제성 평가결과에 많은 영향을 끼침

○ 수요의 추정 결과가 편익 산정의 기초자료가 되므로 각 사업 부문별 적정 수요추정 모델을 이용하여 수요를 추정하여야 함

○ 비용의 분석도 사업의 성격 및 내용에 따라 차이가 있으며 사업의 비용은 공사비, 용지보상비, 유지관리비 등으로 구분할 수 있음

○ 편익은 재화와 용역의 사용으로부터 얻을 수 있는 주관적인 만족을 측정하는 단위이며, 이를 화폐적 가치로 나타낸 것임

○ 편익 추정은 우선 편익항목을 식별(identify)하는 작업으로부터 시작하며, 특정 사업의 편익항목은 사업의 성격과 내용에 따라 매우 다양하므로 사업계획에 따라 편익항목을 구체적으로 세분화하는 작업이 필요함

○ 사회적 할인율은 공공투자사업의 경제적 타당성 평가에서 사용되는 가장 중요한 파라미터 중 하나이며, 사회적 할인율이 얼마인가에 따라 할인된 편익 및 비용이 결정되며, 이에 따라 편익/비용 비율이 결정됨

○ 경제성 분석에서 사업의 리스크에 대한 충분한 검토가 이루어지지 못하는 점을 감안할 때 상대적으로 높은 수준의 할인율이 필요한 측면이 있음

(2) 기존에 유사한 사례의 예비타당성 및 경제성 분석 지표 검토

○ 교통시설 투자사업의 시행으로 발생하는 편익은 교통 측면의 편익인 직접편익과 교통개선으로 인한 사회적 편익인 간접편익으로 구분할 수 있음.

○ 도로와 철도 등 교통시설사업 시행 시 교통시설의 이용자들에게 발생하는 직접편익으로는 차량운행비용 절감, 통행시간 절감, 교통사고 감소, 쾌적성 증가, 정시성 향상, 안정성 향상 등을 들 수 있음

○ 한편, 철도부문 사업의 경우 항공 및 해운의 전환수요에 의한 편익과 건널목 개선에 따른 사고/지체 감소편익을 반영할 필요가 있지만, 계량화가 용이하지 않음

○ 간접편익은 교통시설사업 시행 시 교통시설 이용에 관계없이 모든 사람에게 발생하는 파급효과로 환경비용 절감, 지역개발효과, 시장권 확대, 산업구조 개편효과 등을 들 수 있음

○ 철도부문 사업의 경우 전환수요에 의한 고속도로 유지관리비 절감, 주차수요 감소로 인한 주차공간 기회비용 절감, 공사 중 교통혼잡 및 도로공간 축소로 인한 부(-)의 편익 등을 추가적으로 고려할 수 있음

○ 환경비용 절감편익의 경우 대기오염, 소음 등 일부 항목을 계량화하는 연구 성과가 축적되어 비용・편익 분석에 반영할 수 있음

○ 그러나 지역개발효과, 시장권 확대, 산업구조 개편효과 등이 실현되기 위해서는 교통시설사업 이외의 분야에 대한 투자가 병행되어야 하기 때문에 계량화에 어려움이 따르고, 투자의 구축효과(crowding out effects) 등으로 비용편익분석의 편익으로 직접 산정하는 데는 논란의 여지가 있어 편익항목에는 포함하지 않음

○ 또한 고속도로 유지관리비 절감편익의 경우 반영할 필요는 있지만, 계량화가 용이하지 않음

(3) 무선급전 철도에 대한 평가 지표 도출 및 검토

○ 무선급전 철도시스템 도입 시 기존 철도시스템에서 필요 없는 구성요소들이 제거됨으로써 건설비 절감, 유지보수비 절감, 주변 경관개선 등 다양한 효과를 가져올 수 있음

○ 이와 같은 긍정적 효과를 편익으로 반영하여 경제성 분석 시 B/C를 올릴 수 있는 평가지표로서 활용하여야 함

다) 평가방법에 대한 국내외 조사 연구

(1) 경제성 분석에 대한 평가 방법 비교 연구

(가) 비용편익분석

○ 비용편익분석은 비용과 편익을 화폐가치로 환산하여 비교・분석함으로써 경제적인 타당성을 추정하는 것으로써 분석과정에서 평가자의 주관이 개입될 여지가 적고 균일한 척도로 비교가 가능한 비용・편익을 통하여 분석됨

○ 편익/비용(B/C Ratio) 분석
○ 순현재가치(Net Present Value) 분석
○ 내부수익률(IRR) 분석

(나) 비용효과 분석이론

○ 공공사업의 경제적 타당성을 평가하기 위한 다른 방법으로 비용효과분석을 활용할 수 있음
○ 일반적으로 비용효과분석은 사업의 결과물을 금전적 가치로 환산하기 어렵거나, 비교대상이 되는 대안들의 결과물이 동일한 사업의 평가에 주로 이용됨
○ 흔히 비용효과분석은 효율성(efficiency)을 계산하는 데 정말 좋은 기법이라 간주됨
○ 비용효과분석을 위해 효과의 평가는 다음과 같은 점을 유의하여야 함
○ 비용효과분석을 위해 비용의 추정은 다음과 같은 점을 유의하여야 함

(다) 철도관련 R&D사업 평가

○ 일반적으로 철도관련 R&D사업에서는 부가가치 창출 편익과 비용저감 편익 고려
○ 비용저감 편익은 총사업비 및 유지보수비 절감편익, 안전사고 저감 비용 절감편익 및 현차 시험비용 절감편익으로 구성됨
○ 안전사고 저감비용 절감편익과 현차시험비용 절감편익도 발생할 수 있으나, 일반적으로는 안전사고 저감 비용 절감액 부분은 간접편익에 해당되고, 현차시험 비용 절감편익은 어떤 제품이든 부품이든 단가에는 다양한 시험 및 평가비용이 포함되어 있다고 보는 것이 통상적이므로 이중 계상 가능성이 있어 편익 대상에서 제외하고 있음
○ 부가가치 창출 편익은 국내외 대상시장 규모와 사업기여율, R&D 기여율, R&D 사업화 성공률 및 부가가치율을 고려하여 산정함

(라) Impact Analysis

○ 최근 사업 또는 정책의 파급효과에 대한 평가 방법 중의 하나로 “Impact Analysis”를 도입하고 있으며, 이는 교통인프라 건설에 대한 설계, 수행, 평가 등 사업초기부터 사업 전 과정의 직·간접적 영향(Specific cause-and-effect)에 대한 분석임
○ Impact Analysis는 성과 및 영향을 도출하는 것이 관건이며, 이를 위해 사업 전·후 비교, 사업 혜택 여부 비교 방법을 사용함
○ Impact Analysis 방법론은 크게 4가지로 구분할 수 있음.

(2) 각 평가방법에 대한 적용 가능성 및 평가지표와의 연계 방안 연구

○ 미국, 독일, 일본의 교통 관련 사업 추진을 위한 투자평가지침을 살펴본 결과, 교통시설 투자에 따른 효과를 분석하여 해당 사업의 가치를 평가하고 있음
○ 효과분석 방법으로 경제성 및 타당성 분석을 시행하고 있으며 우리나라와 비슷하게 비용-편익 분석, 환경 관련 평가 등을 활용하고 있음
○ 경제성 분석 시 사용되는 평가지표들은 정량화가 가능한 통행시간절감, 환경비용절감, 차량비용절감 등 우리나라와 비슷한 지표를 사용하고 있으나, 무선급전 철도시스템과 같은 신교통시스템을 위한 평가지표는 부족함
○ 미국의 Impact Analysis는 간접편익의 중요성을 나타내는 분석 방법 중 하나이며, 간접편익의 필요성을 뒷받침할 수 있는 사례로 판단됨

○ 간접편익과 같은 계량화가 어려운 부분들에 대하여 정량적으로 추정할 수 있는 CVM(Contingent Valuation Method) 방법을 검토할 필요가 있음

○ 간접편익은 교통시설사업 시행 시 교통시설 이용에 관계 없이 모든 사람에게 발생하는 파급효과로 신교통시스템과 같은 사업 도입 시 고려할 필요가 있으며, 교통수단 자체의 특성 및 장점을 파악하여 이를 반영하는 새로운 평가지표 및 평가항목 개발이 이루어져야함

2) 경제성 분석 (5차년도)

가) 평가 지표 및 평가 방법 선정

(1) 무선급전철도의 특성을 반영할 수 있는 평가 지표 선정

○ 기존 철도차량의 접촉식 전력 공급 시스템의 에너지 운영효율, 높은 건설비 및 유지보수비 등의 문제를 개선할 수 있음

- 비접촉식 유도급전 적용 시 상부 전차선 설비가 불필요하여 전차선이 제거되는 면적만큼 터널구간의 면적이 감소하므로 터널 공사비 절감이 가능함
- 전력 관련 설비가 감소하여 건설비 절감이 가능함
- 팬터그래프와 같은 집전장치 및 전차선의 마찰이 줄어들어 유지보수 횟수가 줄어들며, 노출되어있는 급·집전 장치로 인한 감전사고 발생이 줄어들어 안전성 향상을 기대할 수 있음

○ 추가로, 선로를 따라 설치된 전차선이 제거로 인하여 주변 경관 개선 효과 발생

○ 무선급전의 정량적 평가를 위하여 건설비 절감편익, 감전사고 감소편익, 유지보수 절감편익을 선정하도록 함

- 건설비 절감편익은 철도차량 무선급전 기술 적용 시 설치가 불필요한 전차선 건설비용과 터넙면적 축소로 인한 공사비용 감소에 따른 편익
- 감전사고 감소편익은 무선급전도입에 따른 전차선과 관련된 감전사고 감소 편익
- 유지보수절감편익은 무선급전철도시스템 도입에 따라 전력공급장치와 접촉하지 않고 전력수급이 가능하여 급전장치(전차선) 마모가 적어짐에 따른 절감편익

(2) 선정된 평가 지표의 적절성 평가(경제적, 사회적 비용과 편익에 대한 반영 여부를 평가하여 선정)

(가) 건설비 절감편익

○ 기존 철도시스템은 가공가선, 공중가선, 제3궤조식 등의 전력공급방식을 통하여 전기를 공급 받아 운행하고 있음

- 가공가선 또는 공중가선 방식은 차량 위쪽에 급전선(전차선) 또는 가선 등 설비를 매달아 전력을 공급해주는 방식임

○ 철도에 전력을 공급하기 위한 장치로 가장 많이 이용되는 팬터그래프는 모든 전동차에 장착되어 있으며 공기저항이 적고, 경량인 장점이 있으나 가선의 상태에 따라 파손 및 이선현상이 발생할 수 있음

○ 또한, 열차 내의 급전을 위한 추가 시설이 필요하므로 고가의 설비투자비용이 소요된다는 단점이 있음

○ 무선급전 철도시스템은 이러한 기존 급·집전 방식과 다르게 가선을 이용하여 전력공급을 하지 않고, 선로 및 열차에 급·집전시스템을 장착하여 전력을 주고받는

방식을 적용하는 시스템임

○ 따라서, 무선급전 철도시스템 도입 시 가선 및 전력공급시설 비용감소와 가선제거로 인한 터널 면적 축소로 총 공사비 감소가 예상되므로 이를 감안하여 건설비절감 편익을 산정하도록 함

(나) 감전사고 감소편익

○ 철도사고의 유형으로 열차의 탈선, 전복, 추락, 충돌 및 추돌, 화재, 감전 등으로 구분되며 그 중 감전사고의 경우 전차선 접촉으로 인해 고압선에 감전되는 치명적인 사고로 분류할 수 있음

○ 감전 관련 사고의 대부분은 팬터그래프 및 가선의 접촉과 관련이 있어 무선급전 시스템 도입 시 전차선과 같은 접촉식 전력시스템이 제거되어 감전사고가 발생하지 않는다고 가정하여 감전사고 감소 편익을 산정할 수 있음

○ 감전사고의 경우 대부분 사망으로 이어지는 치명적인 사고이므로, 예비타당성 조사지침 철도부문 교통사고비용 원단위 중 “사망”사고 원단위를 적용하여 감전사고 감소편익을 추정하고자 함

○ 경량전철의 경우 감전사고 자료 구득의 한계로 인하여 중량전철 기준으로 감전사고 감소편익 산정함

(다) 유지보수 절감편익

○ 접촉 시 전력공급시스템인 철도 시스템에서 중요한 업무인 전기업무는 주기적인 시설물 유지보수를 통해 단전사고에 대비하고 시스템을 운용하여야 함

○ 전기업무 중 철도의 급·집전을 책임지는 전차선 유지보수는 송·변전, 전기설비 감리업무보다 중요성이 큼

○ 무선급전 철도시스템 도입 시 전차선로가 제거되므로, 기존 전기업무 중 전차선 업무의 비중만큼 업무의 비중이 줄어들게 되면 그만큼 유지보수에 관한 비용이 감소할 수 있으며, 업무감소에 따른 잉여시간만큼 다른 전기업무를 수행할 수 있음

○ 따라서 무선급전 철도시스템 도입 시 전차선 제거에 따른 유지보수인원 감소 등으로 인해 유지보수 인건비가 감소될 것으로 예상되므로 유지보수비 절감편익을 산정하도록 함

○ 중량전철(일반철도) 기술 유지보수 인원 산정기준은 예비타당성 조사지침(제5판)에 제시되어 있으나, 경량전철 기술 유지보수 인원 산정기준은 특별한 기준이 제시되어 있지 않아서 부산 도시철도 4호선 사례를 활용하도록 함

(라) 경관개선 편익

○ 무선급전 철도시스템의 사양분석을 통해 경제성 분석 시 활용 가능한 정성적 평가지표는 경관개선편익이 있음

- 무선급전 철도시스템 도입 시 전차선을 포함한 급·집전시스템이 제거되므로 철도역을 이용하는 이용객, 열차 내 탑승인원, 역사 주변 거주자들의 주변 경관이 개선 될 것으로 예상됨

○ 경관개선편익은 철도사업에서는 일반적으로 고려하지 않지만, 본 무선급전 철도시스템의 경우 경관개선편익이 클 것으로 판단되므로 정성적 평가지표로 선정함

○ 경관개선편익은 계량화가 어려운 간접편익 중 하나로 타 분야에서는 보편적으로

조건부가치측정법(CVM)을 사용하여 분석하고 있음

○ 예비타당성조사지침상에도 철도시설 건설에 따른 편익을 열거하고 있으나, 경관개선편익에 대해서는 언급하지 않고 있으며, 타 분야에서는 경관의 가치개선 효과를 대상으로 편익을 산정하는 연구를 진행한 바 있음

(3) 지표에 따른 평가 방법 선정

(가) 건설비 절감편익

○ 전차선을 통한 전기공급 방식의 경우 열차 위에 설치된 전차선을 통해 전기를 공급받게 되므로, 무선급전 철도시스템 도입 시 전차선이 제거되어 철도 건설 시 전차선 면적만큼 터널단면이 축소될 수 있음

- 중량전철(일반철도)은 전차선이 상부에 위치하여 터널 단면적에 영향을 주지만, 경전철[1]은 열차 하부를 통해 전기를 공급(3궤조 방식)하는 방식을 사용하므로 터널단면적에 영향을 미치지 않음

○ 전철전력설비 항목은 기존 철도시스템에서 제거(감소)되는 항목과 추가되는 시스템으로 구분할 수 있음

- 무선급전 기술의 경우 전차선이 제거되므로 전철전력설비 공사비에서 전차선로 항목이 제외된다고 가정함
- 전차선로 이외에도 변전설비가 감소하므로 감소하는 비율을 산정하여 적용해야 함
- 전차선으로 공급하던 전력을 급·집전 시스템을 통해 공급하므로, 이에 대한 항목이 추가될 것이며 이는 부편익에 해당됨

○ 무선급전 철도시스템 도입으로 팬터그래프와 전차선 등 급·집전 시스템이 제거되고 열차 하부에 집전시스템, 선로에 급전시스템이 장착됨

- 따라서 제거 및 감소되는 전철전력설비 이외에 추가되는 급전시스템은 부 편익이 될 수 있으며 “시스템”항목에 추가된다고 가정함

(나) 감전사고 감소편익

○ 철도부문의 교통사고비용 원단위는 크게 인적피해, 물적피해로 구분되며 인적피해는 사망, 중상, 경상으로 분류됨

○ 예비타당성 조사 지침에서 제시한 교통사고감소 비용을 참고하여 편익을 산정하도록 함

(다) 유지보수비 절감편익

○ 기술 유지보수인원은『철도부문 사업의 예비타당성조사 운영비 추정 개정안-일반철도(PIMAC 업무 GUIDELINE)』(한국개발연구원, 2015)에 따라 필요 유지보수 인원수를 산정하도록 함

○ 다만, 세부적인 업무분담량이 제시되지 않는 경우에 대해서는 유지보수 담당자와의 면접조사를 통하여 전차선 유지보수 업무 비중 등을 판단하도록 함

○ 중량전철과 경량전철에 대한 유지보수 인원에 차이가 있기에 이를 구분하도록 함

(라) 경관개선 편익 지표선정

○ 경관개선편익 산정을 위하여 기존에 많이 활용하고 있는 조건부 가치측정법을 활용하도록 함

---

1) 현재 우리나라에서 운행되고 있는 경전철은 3궤조 방식을 채택하고 있음

- 조건부 가치측정법은 공공재, 환경재 등과 같이 시장에서 거래되지 않는 상품의 가치를 추정하기 위해 힉스(Hicks, 1943)의 보상 잉여 개념으로 상품의 존재 유무에 따른 상황처리를 직접 피설문자에게 물어보는 방식임

○ 조건부 가치측정법은 다음 식과 같이 두가지 상황(공공재 도입 이전과 이후)에 대한 가치평가 결과를 비교하여 도출하는 것임

$$CS = E(p, q_0; U_0, O, T) - E(p, q_1; U_0, O, T)$$

여기서 CS: 보상잉여

E : 효용 수준

P : 시장재화들의 가격 벡터

q0: 공공재 도입 이전의 환경 수준

q1: 공공재 도입 이후의 환경 수준

U0: 최초의 효용 수준

O : 변화되지 않은(가정) 타 공공재

T : 응답자 특성이나 기호 벡터

- 위 식에서 첫 번째 E함수는 최초의 공공재 상태에서 최초의 효율수준을 확보하기 위하여 지출하여야 하는 금액을 산출함
- 두 번째 함수는 공공재 수준만 새롭게 변경된 상태에서 동일한 최초 효용수준을 확보하기 위하여 지출하여야 하는 금액을 산출함
- 이때 기타 조건들은 일정할 때 조건부 가치 측정법에서 보상잉여는 피설문자들의 상기 지불의사 금액의 차이에 해당함

나) 경제적 효과 분석

(1) 평가 지표 및 평가 방법에 따른 평가 추진 계획 수립

(가) 건설비 절감편익

○ 공사비 감소는 예비타당성지침의 철도사업 비용항목 분류표를 기준으로 세 가지로 구분하여 반영하도록 함

- 기존 공사비 항목에서 새롭게 추가되는 항목
- 기존 공사비 항목에서 제외(감소)되는 항목
- 기존 공사비 항목과 동일하게 유지되는 항목

○ 변동이 없는 항목들은 기존 철도시스템 도입 시 소요되는 비용과 동일하다고 가정하고, 변동이 있을 것으로 예상되는 항목은 편익 추정에 활용하도록 함

○ 아래 표는 공사비에 영향을 미치는 항목에 대해 표시한 내용으로 터널단면 축소, 전차선로 비용 감소는 정(+) 편익으로 정의하며, 급전 및 집전시스템 추가 장착으로 인해 비용이 증가하는 항목은 부(-) 편익으로 정의하도록 함

표 99 무선급전 철도시스템 도입 시 비용항목 변동 여부

구분		항목				무선급전 철도시스템 도입 시 변동 여부	편익
비용	총사업비	건설비	공사비	노반	토공	변동없음 가정	-
					교량	변동없음 가정	-
					정거장	변동없음 가정	-
					터널	① 터널면적 감소	(+) 정 편익
					입체교차	변동없음 가정	-
				궤도		변동없음 가정	-
				건축		변동없음 가정	-
				차량기지		변동없음 가정	-
				시스템	전철전력	② 전차선로 비용 감소	(+) 정 편익, (-) 부 편익
					통신	변동없음 가정	-
					신호	변동없음 가정	-
			부대비, 용지보상비, 예비비			변동없음 가정	-
	운영비	인건비,동력비,유지관리비,일반관리비, 대체투자비				변동없음 가정	

○ 전차선이 존재하는 일반철도 터널단면과 무선급전 철도시스템 도입 시 전차선이 없을 때의 터널단면을 비교할 경우 내공단면적 기준 전차선 제거로 인한 터널단면은 23.1% 감소하는 것으로 분석되었음

○ 철도기술 업체의 자문을 통해 단면축소로 인한 터널공사비는 약 14.2%가 감소하나, 부대공(시험비용, 터널용 전기, 기계 등) 포함 시 약 11.5% 감소하는 것으로 분석 되었음

○ 따라서, 예비타당성지침 상 제시된 2013년 일반철도 터널 단위공사비를 2018년 기준으로 환산한 189.1억 원/km에서 무선급전 철도시스템 도입 시 가선이 제거된다면 터널 단위공사비는 11.5% 감소한 166.4억 원/km으로 추정할 수 있으며, 두 공사비의 차이에 터널연장을 곱하여 터널공사비 절감편익 산출 가능함

표 100 무선급전 철도시스템 도입 시 감소되는 터널 단위공사비용

(단위 : 억 원/km)

공 종	규 격		일반철도 단위공사비(A)	무선급전철도시스템 단위공사비(A)	감소되는 터널 단위공사비용(A-B)
터 널	NATM (복선)	일반부	189.1	166.4	22.7
		도시부	246.7	217.1	29.6

- 감소된 터널공사 단위비용

  = 일반철도시스템 터널 단위공사비 - 무선급전철도시스템 터널 단위공사비

- 터널공사비 절감편익 = 감소된 터널공사 단위비용 × 터널연장

○ 전철전력설비 절감편익을 위하여 중량전철(일반철도)의 경우 전차선 제거로 인해 전력 표준공사비에서 전차선로 비용만큼 제외가 될 것이며, 무선급전 시스템에도 필요한 변전설비는 일정부분 감소하는 것으로 가정하여 변전설비 감소율을 적용한 공사비는 아래 표와 같음

○ 전력설비, 송전선로, 변전설비, 전차선로 공사비는 『도로 및 철도부문 비용 추정 지침 변경(PIMAC 업무 GUIDELINE)』(한국개발연구원, 2015)의 전철전력 표준공사비를 기준으로 산출함

- 전차선로 공사비의 경우 카티너리 방식과 강체가선 방식으로 구분되어 있으며, 강체가선 방식의 경우 보통 도시철도에서 적용하는 방식으로, 앞서 터널 공사비 절감편익 산출 시 일반철도 기준을 적용하였기에 일반철도의 전차선 방식인 카티너리 방식의 단선을 기준으로 사업비를 구하고자 함

표 101 전력 표준공사비(세부적 기준)

(단위 : 백만 원/km)

구 분		2013년 (ES=100)			2018년 (ES=108.7)			비 고
		단선	복 선		단선	복 선		
			간선	도심		간선	도심	
전력설비		531	788	1,101	577.2	856.6	1,196.8	
송전선로	가공선로	105	105	105	114.1	114.1	114.1	변동없음 가정
	지중선로	201	201	201	218.5	218.5	218.5	
변전설비		429	571	729	466.3	620.7	792.4	무선급전 도입 시 일정부분 감소함
전차선로	카티너리	580	892	892	630.5	969.6	969.6	무선급전 도입 시 삭제
	강체가선방식	739	1,138	1,138	803.3	1,237	1,237	

표 102 무선급전시스템 도입시 중량전철 전력설비 감소비용

(단위: 억 원/km)

구분		2018년(단선)	감소율	중량전철 전철전력설비 절감비용
전기	변전설비	4.7	55%*	4.7 × 55% = 2.59
전차선로 (카티너리)		6.31	100%	6.31 × 100% = 6.31
합계				8.9

주 : 무선급전시스템에 따른 변전설비 감소율은 전문가 자문을 통하여 도출함

○ 전철전력설비는 철도 노선연장 전체에 적용되므로 전력 표준공사비에 무선급전 철도시스템 도입 시 감소율을 적용한 노선연장을 곱하여 전철전력설비 절감편익을 산출할 수 있음

- 전철전력설비 단위절감비용

  = 중량전철 전력 표준공사비 × 전력 표준공사비 감소율(%)

- 중량전철 전철전력설비 절감편익 = 중량전철 전철전력설비 단위절감비용 × 노선연장

○ 경량전철 전기 표준공사비는 일반 전력, 송전 및 변전설비 비용을 모두 포함하여 제시하고 있으며, 그 중 변전설비는 2013년 기준 41억 원으로 제시함

○ 경량전철 전철전력설비 절감비용은 중량전철과 동일하게 2013년 기준 금액을 2018년으로 환산하여 해당 금액에 감소율 55%를 적용하여 산정하며, 노선 전체 연장을 곱하여 산출할 수 있음

표 103 무선급전 시스템 도입 시 경량전철 변전설비 감소비용

(단위: 억 원/km)

구분	표준공사비		감소율	경량전철 전철전력설비 절감비용
	2013년 (ES=100)	2018년 (ES=108.7)		
변전설비*	41.0	44.6	55%	44.6 × 55% = 24.53

주 : “2015년 도로 및 철도부문 비용 추정 지침 변경”에서 제시한 변전설비 41억원, 설치간격 2.4km 기준으로 함

- 전철전력설비 단위절감비용

  = 경량전철 전력 표준공사비 × 전력 표준공사비 감소율(%)

- 경량전철 전철전력설비 절감편익 = 경량전철 전철전력설비 단위절감비용 × 노선연장

○ 추가되는 무선급전 철도시스템 급전선로 항목 및 비용은 “철도차량 무선급전 실용화 기술개발 기획보고서(2013)”에 제시된 경전철(부산 도시철도 4호선) 내용을 참고하였음

표 104 급전선로구축 시스템 단가

항목	단가(백만 원/km)
급전 인버터	300
급전 케이블	30
급전 코어	32
급전 캐패시터	8
급전지지부포설	5
급전선로매설	13
PC 패널 지지부	10
급전선 외함	45
합계	443

(나) 감전사고 감소편익

○ 감전사고의 경우 사망으로 이어질 확률이 높기 때문에 사망사고 원단위를 적용함
- 예비타당성조사 지침 상 2007년 기준으로 제시되었으나 물가상승률을 고려하여 2019년으로 환산할 경우 원단위가 상승하게 됨

○ 인적피해-사망 시 2007년 기준 교통사고비용 원단위는 생산손실비용, 의료비용, 물적피해비용, 행정비용을 포함하여 약 4억 4천여만 원으로 제시되어 있음

표 105 철도부문의 교통사고비용 원단위(2007년 기준)

(단위: 만 원/건)

구분		생산손실비용	의료비용	물적피해비용	행정비용	계
인적피해-사망	PGS* 제외	30,695	666	504	70	31,935
	PGS 포함	42,360	919	696	97	44,071

주 : Pain, Grief & Suffering의 약자로, 교통사고 피해자 및 가족이 겪는 심리적, 육체적 고통비용을 뜻함

○ 철도감전사고의 경우 여객, 공중, 직원의 감전사고로 나뉘며 여객은 철도를 이용하여 여행할 목적으로 역 구내에 들어온 사람이나 열차를 이용 중인 사람을 뜻함

○ 공중은 여객과 직원(계약을 체결하여 철도운영자 등의 업무를 수행하는 사람 포함)을 뜻하며, 직원의 경우 여객 운송에 종사하는자를 뜻함

○ 국토교통부와 한국교통안전공단에서 매년 배포하는 철도사고 및 안전성능 분석보고서에서 여객, 공중, 직원의 감전사고 건수를 2009년부터 2018년까지 제시하고 있으며 여객, 공중, 직원의 감전사고 건수를 합한 감전사고 건수는 아래 표와 같음

표 106 철도사고통계(감전사고)

2009년	2010년	2011년	2012년	2013년	2014년	2015년	2016년	2017년	2018년	평균
7	16	14	6	10	7	8	5	0	5	7.8건

자료 : 국토교통부, KRIC, 철도사고통계현황

○ 2009년~2018년까지 철도 감전사고는 평균 7.8건으로 타 사고에 비해 치사율이 높지만 사고발생건수 자체는 타 사고건수에 비해 많지 않음

○ 철도부문의 교통사고비용 원단위와 평균 철도 감전사고건수를 곱하여 아래와 같이 감전사고 감소편익을 산정할 수 있음

• 감전사고 감소편익 = 철도교통사고비용 원단위 × 평균 감전사고 건수

(다) 유지보수비 절감편익

○ 먼저, 중량전철 전기 유지보수를 위하여 현재 30km당 1분소씩 설치하도록 되어 있으며, 분소당 인원은 분소장, 팀장, 보수인원을 포함하여 총 14인으로 구성됨

○ 중량전철(일반철도) 전기 유지보수 인원은 km당 0.47인이지만, 전기와 관련된 모든

업무를 담당하는 단위인원이기에 전차선 유지보수 인원만을 재산정 할 필요가 있음

○ 한국철도공사 내부자료에 따르면, 전철전력설비 유지보수 업무 중 '전차선' 관련 업무 비중은 70% 수준으로 제시하고 있기에, 무선급전 철도시스템 도입 시 전철전력설비 유지보수인원의 업무강도가 70% 줄어들 것으로 가정함

표 107 중량전철(일반철도) 전차선 유지보수 인원 산정

구 분		분소당 인원	분소 설치 기준	기준인원	전차선 유지보수 인원
전기	분소장	1인	30km당 1분소	0.47인/km	0.47인/km × 70% = 0.329 인/km
	팀장	2인			
	보수인원	4인 × 3교대			
	소계	14인			

주: 1) 분소의 행정업무(서무)담당 인원은 보수인원에 포함한 것으로 가정함.
2) km 또는 역당 인원 산정기준을 적용하며, 소요인원은 소수점 첫째 자리에서 올림하여 적용함.
자료 : 철도부문 사업의 예비타당성조사 운영비 추정 개정안(일반철도)(2015),KDI

○ 여기에 전차선 유지보수 업무 비중 70%를 곱하여 전차선 유지보수 인원은 0.329 인/km로 산출할 수 있으며, 그 내용은 아래 표와 같음

○ 70%의 업무강도가 줄어드는 만큼 전차선 이외의 다른 업무를 수행할 수 있는 기회비용이 발생한다고 가정하여 km당 소요인원에 한국철도공사 직원 평균 보수를 적용, 노선연장을 곱하여 중량전철 유지보수 절감편익을 산정할 수 있음

- 중량전철 유지보수 절감편익 = 중량전철 전차선 유지보수 인원(인/km) × 인건비 × 노선연장(km)

○ 현재 철도업무 종사자 인건비는 69,954천원이며, 일반철도 전차선 유지보수 인원에 적용하면 연간 23,015천 원/km를 절감할 수 있음

- 적용된 인건비는 2018년 한국철도공사 직원 1인당 연평균 보수를 기준으로 하였음

표 108 중량전철 유지보수 절감편익

구분	내용
중량전철 전차선 유지보수 인원	0.329인/km
평균 인건비	69,954천 원/인/년
유지보수 단위절감편익	23,015천 원/km

주 : 유지보수 인건비는 철도공사 직원 평균 보수를 적용함

○ 경량전철의 경우, 현재 부산 도시철도 4호선은 제3궤조 방식으로 운영 중이며, 분소당 인원은 14인, 10km당 1분소씩 위치하며, 1km당 전기유지보수 소요인원은 1.4인임

○ 전기유지보수 소요인원 중 중량전철과 동일한 70%를 적용하여 경량전철 전차선 유지보수 인원은 0.98인/km로 소요될 것으로 추정됨

표 109 경량전철 전차선 유지보수 인원 산정

구 분		분소당 인원	분소 설치 기준	기준인원	전차선 유지보수 인원
전기	분소장	1인	10km당 1분소	1.4인/km	1.4인/km × 70% = 0.98인/km
	팀장	2인			
	보수인원	3인 × 3교대			
	기술지원부	분소인원 × 15%			
	소계	14인			

주 1) 분소의 행정업무(서무)담당 인원은 보수인원에 포함한 것으로 가정함.
2) km 또는 역당 인원 산정기준을 적용하며, 소요인원은 소수점 첫째 자리에서 올림하여 적용함.

○ 전차선 유지보수 인원에 소요 인건비를 곱해 유지보수 인건비 절감액을 산정함

• 경량전철 유지보수 절감편익 = 경량전철 전차선 유지보수 인원(인/km) × 인건비 × 노선연장(km)

○ 경전철을 운행 중인 부산 도시철도 4호선의 운영사 부산교통공사의 2017년 직원 연평균 보수 7,580천 원을 경량전철 전차선 유지보수 인원에 적용하면 연간 74,284천 원/km를 절감할 수 있음

표 110 경량전철 유지보수 절감편익

구분	내용
경량전철전차선 유지보수 인원	0.98인/km
평균 인건비	75,800천 원/인/년
유지보수 단위절감편익	74,284천 원/km

주 : 유지보수 인건비는 부산교통공사 직원 평균 보수를 적용함

(라) 경관개선 편익

○ CVM 조사에서 중요한 포인트는 응답자가 보유한 지불의사를 진실되게 나타낼 수 있도록 하는 현실적으로 개연성 있는지 지불수단을 제시하는 것임
- 본 조사에서는 지불 방식은 향후 5년간 매년 지불하는 것으로 설정하였음

○ 본 조사에서는 KDI(2014)에서와 동일하게 이중경계 양분선택형 질문법을 사용함
- 두 번에 걸쳐 지불금액이 제시되는데, 두 번째 제시금액은 첫 번째 제시금액에 대해 '예'라고 대답한 경우 첫 번째 제시금액의 2배가 되며, '아니오'라고 대답한 경우 첫 번째 제시금액의 1/2가 됨

○ 제시금액의 설계
- 제시금액은 WTP의 평균값에 영향을 미칠 수 있으므로, 합리적인 기준에 의해 선정될 필요가 있음
- 본 조사에서는 동일한 시설물에 대한 총 세 차례의 CVM조사의 제시금액을 참고하여 1,000원에서 10,000원까지 총 6개의 금액을 제시하였음

○ 설문조사 방법
- 조사 기간: 2019년 7월 30일 ~ 8월 19일
- 총 1,912가구를 접촉하여 최종 500가구에서 조사가 성공적으로 이루어짐(26.2%)
- 조사 방법: 일대일면접조사

- 자료 수집 도구: 조사목적에 맞게 제작된 구조화된 설문지와 보기카드

○ 조사 대상 및 표본

- 조사 대상: 서울특별시에 거주하는 20~65세 사이의 소득이 있는 세대주 또는 배우자
- 표본 크기: 500가구
- 표본추출 방법: 사업지와 비사업지를 각각 250가구씩 할당한 후, 각각의 지역별로 세대수에 비례하여 할당
- 사업지(250가구): KTX 주요역 행정구역(서울시 용산구, 부산시 동구, 대구시 동구, 대전시 동구, 충남 아산시 배방읍)별 각 50가구씩 할당
- 비사업지(250가구): 사업지를 제외한 전국지역을 세대수에 비례하여 할당 표집하되 제주도와 세종시, 서울 광진구, 성동구, 송파구, 마포구, 영등포구, 구로구, 관악구 지역은 제외함

○ 제시금액 문항 응답의 타당성 검증

- 일반적으로 조건부 가치측정법 연구에서는 WTP 모형 내에서 사회경제적 특징을 나타내는 공변량을 포함하여 추정함으로써 모형의 이론적 타당성과 내적 일관성을 검증함
- 공변량을 포함할 경우 $G_c(A)=[1+\exp(a-blnA)]^{-1}$에서 a는 단순히 $\alpha+x_i\beta$로 대체
- 여기서 x_i는 응답자들의 사회경제적 특성을 반영하는 공변량 벡터이고, β는 추정해야 할 모수(parameter)들로 이루어진 벡터임

표 111 변수의 정의 및 표본 통계

변수	변수의 내용	응답자수(명)	평균	표준편차
연령대	응답자의 나이	500	47.046000	10.440013
교육 수준	중졸 이하	500	2.522000	0.549655
	고졸			
	대재 이상			
월평균 가구소득 (세후소득)	100-149만원	500	6.952000	1.752666
	150-199만원			
	200-249만원			
	250-299만원			
	300-399만원			
	400-499만원			
	500-599만원			
	600-699만원			
	700-799만원			
	800만원 이상			

○ 다음 표는 공변량을 포함한 WTP모형의 추정 결과를 보여줌

- 분석 결과 소득 수준이 높을수록 지불의사는 높은 것으로 나타났음
- 또한 제시금액과 지불의사간의 상관관계는 약하나 양의 관계를 나타내는 것으로 분석되었음
- 반면 소득수준이 높거나 연령대가 높은 응답자일수록 지불 의사가 높은 것으로 나타났으며, 교육수준이 높을수록 지불의사가 낮은 것으로 분석됨

표 112 공변량을 포함한 WTP모형의 추정 결과

모수	추정계수	t-통계량
a(상수항)	1.408876033	1.21710
b(제시금액)	0.000503291	12.28885
income(소득 수준)	0.026916048	0.34738
age(연령대)	0.014904566	1.12025
education(교육 수준)	-0.133574506	-0.46728

○ WTP 추정 결과

- 로지스틱 분포함수를 가정하고, 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation)을 사용하여 계수와 WTP모형을 추정한 결과는 다음 표와 같음
- 본 추정은 지불의사거부자 285가구를 제외한 215개구를 대상으로 분석한 것임

표 113 WTP모형 추정 결과

구 분	계수	t-값
α	1.9192496107	10.06762
β	0.0004982703	12.01119

○ 이 추정 결과를 적용하여 추정된 WTP는 가구당 4,126.58원으로 추정되었으며, 가구당 평균 인원 수로 나누어 인당 WTP를 추정함

표 114 경관개선편익을 위한 원단위 결과

WTP(원/가구당)	평균 가구인원수(명)	WTP(원/인)
4,126.58	3.05	1,352.97

(2) 실제 노선 적용을 가정으로 투입 비용 대비 편익에 대한 분석(직접적인 효과 및 간접적인 효과까지 포함)

(가) 건설비 절감편익

○ 앞서 무선급전시스템 도입에 따른 터널공사비 감소율은 11.5% 산정되었으며, 예비타당성조사지침에 명시된 단위공사비에 적용하였을 시 일반부 터널은 22.7억 원/km, 도시부 터널은 29.6억 원/km 절감

○ 전철전력설비 절감편익을 위하여 변전설비 비용 감소율은 약 55%로 조사되었으며, 카트너리 전차선로는 무선급전시설로 더 이상 필요없기에 100% 감소 되는 것으로 분석됨

○ 이를 적용하였을시 중량전철은 8.9억 원/km, 경량전철은 24.53억 원km 절감되는 것으로 나타남

○ 무선급전시스템으로 급전선로구축 비용은 추가로 발생을 하며, 추정된 비용은 4.43억 원/km 임

표 115 건설비 단위절감편익 요약

(단위: 억 원/km)

구분		건설비 단위절감편익		
		터널비 단위절감편익	전철전력설비 단위절감편익	급전시스템 단위절감편익 (부 편익)
중량 전철	일반부	22.7	8.9	4.43
	도시부	29.6		
경량전철		0*	24.53	4.43

주 : 경량전철의 터널비 절감편익은 극히 미비하여 본 연구에서 고려하지 않음

(나) 감전사고 감소편익

○ 감전사고에 따른 사망사고 인적 피해액은 4.4억 원/건이며, 이를 발생사고건수에 적용하여 감전사고 감소편익을 산정하도록 함

○ 2009년부터 2018년까지 철도 감전사고는 평균 7.8건이 발생을 하고 있기에, 무선급전시스템 도입에 따라 연간 감전사고 감소편익은 약 34.32억 원/년으로 추정됨

(다) 유지보수 절감편익

○ 중량전철과 경량전철 유지보수 인원은 각각 0.329인/km과 0.98인/km이며, 운영사의 평균임금을 적용하였을 시, 중량전철과 경량전철의 유지보수 단위 절감편익은 23,015천 원km와 74,284천 원/km로 산정이 됨

(라) 경관개선 편익

○ 무선급전으로 기존의 가선으로 침해받았던 경관이 개선이 되면서 이용자가 느낄 수 있는 경관개선가치는 1,354원/인으로 산정이 되었음

○ 무선급전 시스템이 적용되는 노선을 중심으로 경관영향권을 설정하도록 하며 경관영향권에 포함된 겨주자 및 유동인구를 산정하여 전체 경관개선 편익을 산정

(마) 노선적용시 편익 산정 예시

○ 현재 서울 지하철 2호선 일부 구간이 지상으로 되어 있어서 많은 민원이 제기되고 있어서, 서울시에서는 지상구간의 지하화 사업을 추진하려고 하고 있음

- 현재 지상구간은 총 18.9km로서 구체적으로 한양대역～잠실역(8.02km), 신도림역～신림역(4.82km), 신답역～성수역(3.57km), 영등포구청역～합정역(2.5km) 임
- 하지만, 지하화에 따른 많은 사업비가 소요되고 있기에 사업의 추진이 지지부진하고 있음
- 지상구간을 지하화 하면 좋겠으나, 이게 당장 어렵다면 무선급전 시스템 도입으로 지상의 가선을 제거해 주므로서 주변 사람들에게 경관개선효과를 제공해 줄 수 있을 것임

○ 가상으로 신답역～성수역 3.57km 구간을 무선급전시스템으로 추진할 경우 발생예상되는 편익은 다음과 같음

- 터널은 존재하기 않기에 터널절감편익은 0원
- 전력설비와 급전시스템을 고려할 시 순편익 단가는 20.1억 원/km이며, 연장 3.57km 적용할 시 발생편익은 71.8억 원

- 감전사고 절감편익에 대해서는 해당지역의 감전사고 건수가 보고되지 않고 있기에 반영하지 않음
- 유지보수절감편익은 74,284천원/km 단가를 총 연장에 적용할 시 2.65억 원/년 발생
- 경관개선편익은 연장 3.57km 구간에 대해서 경관영향권 반경 200미터를 설정하였을 시 일평균 유동인구는 11,403명으로 추정됨 (biz-gis 웹페이지 툴 활용)
- 이를 바탕으로 경관개선편익 원단위 1,354원을 적용하였을시 56.4억 원/년 발생

○ 최종적으로 신답역~성수역 3.57km 구간에 무선급전시스템이 적용이 되었을시 발생하는 총 편익은 130.85억 원/년으로 추정됨

(바) 배터리시스템에 대한 무선급전시스템 경제적 효과

○ 위례선은 무가선트램방식을 고려하고 있으며,이를 무선급전시스템으로 교체하였을 시 시설 및 시스템 비용절감효과를 분석하도록 함

○ 무가선트램의 왕복에서는 85.5kWh에 대한 여유율을 감하였을 시 편도 필요용량은 45kWh이며, 이는 현재 기본설계보고서에 제시하고 있는 500kW 급속충전기로는 부족할 것으로 판단됨

- 45kWh용량을 5분간 충전하기 위해서는 계획된 112역사에서 충전설비가 최소 540kW가 필요하기에, 기존 500kW를 유지시 종착역 5분충전시 41.67kWH가 가능하며, 이는 편도운행을 위해서 3.33kWh가 부족한 것으로 판단됨
- 결국 충전량의 감소에 따라 운영편성수가 2편성이 많은 10편성이 필요할 것으로 판단됨
- 또한 1MW급 22.9kV 수전을 위해서 112 및 110 전력변전소가 필요함

○ 위례선 무가선트램을 무선급전시스템으로 적용시 다음과 같은 사업비 차이가 발생할 것으로 예상됨

- 종점역사 충전시간 감소로 운영편성수 절감
- 중간역 충전시스템으로 110, 112 역사 변전소 제거
- 102, 103, 104, 108, 111, 역사충전설비를 위해 한전으로부터 AC380V 수전 받아 전력공급하도록 함. 단, 별도 변압기 설치를 위해 수전비용 추가 필요
- 101, 112 역사는 한전으로부터 AC380V 수전받아 평균전력 500kW 이내 운전가능하며, 단 별도 변압기 설치를 위해 수전비용 추가 필요
- 무선급전 충전역사에는 별도 급전인버터 설치 필요

표 116 무가선트램에 무선급전시스템 적용시 사업비 절감비용

항목	항목		변동사항	절감비용(억원)	비고
무선급전 적용 절감액	편성수		10 → 8	65.2	편성당 32.6억. *부산 용호선발주금액 기준
	배터리감소		220kwh → 100kwh	36.0	10편성에 대한 배터리감소액 (8편성분:24+ 2편성분:12)
	변전소	토목공사비	3개소 → 1개소	51.36	위례기본설계보고서 참고
		변전설비비	3개소 → 1개소	66.91	위례기본설계보고서 참고
		송전공사비	3개소 → 1개소	25.53	위례기본설계보고서 참고
	전차선 충전설비		6개역 → 0개소	4.54	위례기본설계보고서 참고
	기지 전력공사비		10개소 → 8개소	22.06	위례기본설계보고서 참고
	소계			271.6	
무선급전 적용 추가액	무선급전지상설비		0 → 15개	- 44	8개소분지상설비5.5억 × 8개소
	무선급전차상설비		0 → 8개	- 10.5	7편성분 집전 1.5억 × 7편성
	무선급전 수전비 (AC 380V)		0 → 7개소	- 6.5	7개 정류장에 수전비용 종착역 2개소 : 2억/역당 중간역 5개소 : 0.5억/역당
	무선급전설치비용		0 → 7개소	- 3.5	인버터 설치비 0.5억/역당
	소계			- 64.5	
최종 절감 추정액				207.1	예상절감비용

다) 법·제도적 지원 방안

(1) 경제성 분석시 무선급전 철도를 위한 신규 평가지표 반영을 위한 법·제도적 개선방안 도출

○ 대규모 재정사업 추진 시 타당성 여부를 사전에 조사하기 위하여 예비타당성 조사 제도가 국가재정법 제38조에 근거하여 1999년부터 도입되었음

- 대상조건은 총사업비 500억 원 이상이고 국고 300억 원 이상인 SOC, R&D, 정보화, 사회복지 등 모든 분야의 신규사업이 해당됨
- 다만, 공공청사, 국방관련, 법령상 의무사업, 재난예방·복구사업, 남북협력사업, 국무회의를 거친 구각 정책적 추진사업 등은 본 예비타당성 조사의 면제사업의 분류됨
- 경제성, 정책성, 지역균혈을 종합적으로 평가하여 AHP(계층화분석)가 0.5이상일 경우 타당성이 확보되는 것으로 판단함

○ 경제성에 많은 초점이 맞추어져 있다보니, 거주밀도가 높은 수도권의 사업들이 사업성이 높게 나오는 경향들이 있어서, 교통 SOC 사업의 부익부 빈익빈 현상이 발생하였음

○ 이를 개선하기 위하여 최근에 예비타당성 조사에서는 사업의 지역에 따라 수도권과 비수도권으로 구분을 하고 지역별로 경제성, 정책성, 지역균형발전 비중을 차별화 하였음

- 수도권에 대해서는 경제성 비중을 높이고(60~70%), 지역균형발전을 고려하지 않음

- 비수도권에 대해서는 경제성 비중을 낮추고(30~45%), 정책성(25~40%)과 균형발전(30~40%) 비중을 높였음

○ 이러한 변화는 철도사업(철도차량 포함)를 확대할 수 있는 기반을 마련하였음

○ 하지만, 여전히 철도사업과 관련하여 반영할 수 있는 다양한 편익들이 있으나 이를 반영하지 못하는 구조는 바뀌어야 할 것으로 판단됨

○ 철도사업을 위해서 추가로 반영될 수 있는 편익은 정시성 개선 등 기본적인 철도가 가지고 있는 특징을 편익으로 반영할 필요가 있을 것임

- 기존 도로 이용자 및 도로 전환수요의 정시성 개선편익으로 고려할 수 있음
- 해외사례의 경우 정시성가치를 알기위하여 시간가치와 비교한 신뢰성비를 산출하고 있으며, 국가별로 약간의 상의성은 가지고 있으나 0.6~1.3 수준으로 제시하고 있음
- 이를 해석하면 정시성의 가치는 시간가치의 60%~130% 수준을 나타내는 것으로 시간가치 만큼 정시성의 가치가 중요함을 명시하고 있음

표 117 타국가에 대한 정시성 가치

국가	신뢰성비(Reliability Ratio)	비고
네덜란드	0.6	Significance et al. 2013
뉴질랜드	0.8	Taylor, 2009
호주	1.3	Taylor, 2009
스웨덴	0.9	Eliasson, 2009
캐나다	1.0	CS and ICF International, 2012
영국	0.8	UK Dep. For Transport, 2014
일본	0.966	Fukuda et al., 2009

주: 신뢰성비=정시성 가치/시간가치
자료: SHRP 2 Reliability Project L35B

○ 최근 기술의 발전으로 과거보다 빠른 속도로 기술이 발전하고 있으며, 무선급전 철도시스템등과 같이 과거에 경험하지 못한 기술들이 속속 등장하고 있음

○ 이러한 기술의 상용화를 위해서는 정부차원에서 지속적인 관심을 가지고 법제도적인 지원이 있어야 함

- 신기술의 적용은 앞서 제시한 예비타당성평가제도에서 다룰 수 있는 부분이 아님
- 즉, 무선급전철도차량의 기술 측면에서는 신기술이지만, 예비타당성조사 차원에서는 단순히 비용을 다루고 있는 부분이기에 실제로 예비타당성조사를 통하여 이러한 기술 상용화를 이끌 수는 없을 것임
- 다만, 철도사업의 확장을 위해서는 앞서 제시한 철도사업 관련 추가 편익의 발굴을 통하여 사업의 경제성을 높이는 것이 필요하며, 이를 통하여 철도사업에 무선급전 시스템이 적용될 수 있도록 하여야 함

○ 신기술의 상용화를 위해서는 기술개발의 기획단계에서부터 체계적인 상용화 전략을 추진하여야 할 것임

- 연구기술개발 사업의 성과가 이루어지면 좋겠지만, 성과가 이루어지지 못하는 부분에 대해서 실패로 보는 것이 아닌 큰 그림에서 연구기술개발 성공을 위한 밑거름으로 보는 인식이 전환될 필요가 있음

- 연구기술개발이 개발을 위한 개발이 아닌 실제 연구의 가치 및 상용화의 가치를 충분히 창출할 수 있도록 연구가 지원되어야 하며, 연구수행이 결정이 되었을 시는 연구성과가 달성될 수 있도록 재정적인 지원이 충분히 이루어 져야 함

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도(1세부)

1) 질적성과

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						비고
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	달성도	
A	무선 급전 경전철 시스템 시험선	A-1	1km 이상 경전철 무선 급전 시험선 기본 설계	①	시험선 기본 설계서	1건	설계서 확인	연차 평가	100%	1차년도
				②	시험 요소별 요구 사항 정리	1건	연차평가보고서 확인	연차 평가	100%	
		A-2	1km 이상 경전철 무선 급전 시험선 상세 설계	①	시험선 상세 설계서	1건	설계서 확인	연차평가	100%	2차년도
		A-3	1km 이상 경전철 무선 급전 시험선 구축	①	단위 섹션 무선 급전 선로 길이	길이 100m 내외	거리 측정	성능시험확인서	100%	3~4차년도
				②	무선 급전 설비 설치 정류장수	정류장 3개소	인버터 설치 정류장 개수 측정	보고서 확인	100%	
				③	시험선 총 길이	길이 총 1km 이상	거리 측정	거리 측정	100%	
B	무선 급전 경전철 시스템 통합 성능 시험 방안 및 성능 기준	B-1	사전 조사 및 필요 시험 요소 선정	①	기존 성능 시험 규격 검토	1건	연차 평가 보고서 확인	연차평가	100%	1차년도
				②	필요 시험 요소 선정	1건	연차 평가 보고서 확인	연차평가	100%	
		B-2	통합성능시험 방안 마련 및 검토	①	시험 요소별 시험 방안 및 통합 시험 방안 마련 필요 시험 요소 선정	1건	연차 평가 보고서 확인	연차평가	100%	2차년도
		B-3	통합 성능 시험 방안	①	통합성능시험 절차서	성능시험 절차서	성능시험 절차서	보고서확인	100%	3차년도
				②	정적시험	모의부하시험기에의한 운행 거리 4만 km 이상	모의부하시험기 이용한 지상시험	보고서 확인	100%	4차년도
				③	동적시험	시험 운행 거리 4만km 이상	시험 운행거리 누적 측정	공인 기관 참여	100%	5차년도
		B-4	무선 급전 경전철 시스템 성능 기준	①	시스템 효율	효율 85%	입출력 전력 측정	성능시험확인서	100%	3~5차년도
				②	시스템 용량	집전 용량 1MW 이상	입출력 전력 측정	성능시험확인서	100%	
				③	출력 전압 안정성	운영기관 요구 전압 만족	출력 전압 측정	성능시험확인서	100%	
C	무선 급전 경전철 시스템 운영 적합성 평가안 및 기준	C-1	사전 조사	①	타 유사 시스템 운영 적합성 평가 방안 검토	1건	연차 평가 보고서 확인	연차 평가	100%	1차년도
		C-2	운영시나리오 시뮬레이션	①	운영 시나리오 시뮬레이션	1건	연차 평가 보고서 확인	연차 평가	100%	2차년도
		C-3	운영시나리오 시험 절차서	①	운영시나리오 시험 절차서	1건	시험 절차서	운영기관 참여검증	100%	3차년도
		C-4	운영시나리오 시험	①	운영시나리오 시험	1건	평가 방안 제안서	운영기관 참여검증	100%	4차년도
		C-5	운영시나리오 제시	①	운영시나리오 제시	1건	운영시나리오	운영기관 참여검증	100%	5차년도
D	경전철 인프라 인터페이스 영향성 평가 보고서	D-1	사전 조사 및 필요 시험 요소 선정	①	운영 기관 요구 사항 분석	1건	연차 평가 보고서 확인	연차 평가	100%	1차년도
E	무선급전 경전철 시스템 모듈형 급전 선로	E-1	모듈형 급전선로 설계안	①	시스템 기본설계	기본 설계	설계도 여부	설계도	100%	1차년도
		E-2	모듈형 급전선로 시작품 제작	①	시작품 제작	금형 제작	금형 여부	실물 확인	100%	2차년도
				②	시작품 자체 평가	단차 ± 10 mm 이내	실측	실측	100%	

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						비고
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	달성도	
		E-3	모듈형 급전선로 시제품 제작	①	시제품 제작	금형 제작	금형 여부	실물 확인	100%	3차년도
				②	시제품 단품 평가	단차 ± 5 mm 이내	실측	철도안전법에 의한 형식승인절차 수행	100%	
		E-4	모듈형 급전선로 제작	①	시험선 구축	길이 100 m	길이측정	실측	100%	4차년도
				②	단위 모듈 길이	길이 3m	길이 측정	철도안전법에 의한 형식승인절차 수행	100%	
				③	선로 절연 내압	전압 20kV	내압 측정	철도안전법에 의한 형식승인절차 수행	100%	
				④	선로 전류 정격	전류 500A 이상	전류 정격 측정	철도안전법에 의한 형식승인절차 수행	100%	
				⑤	선로 효율	93 % 이상	입출력 전력 측정	철도안전법에 의한 형식승인절차	100%	5차년도
				⑥	기술사양서	사양서 작성	사양서 여부	기술사양서	100%	
F	급전선로 평탄도 확보 기술	F-1	급전선로 평탄도 확보	①	평탄도 규격 조사	도로 평탄지수 관련 규격 검토	규격 검토서 여부	규격 검토서	100%	1차년도
				②	평탄도 측정방법 수립	측정방법 작성	측정방법여부	측정방법 도서	100%	2차년도
				③	평탄도 측정장비 개발	측정장비 개발	장비 여부	측정 장비	100%	3차년도
				④	평탄도 측정	평탄도 단위 모듈별 ± 5 mm 이내	평탄도 측정	철도안전법에 의한 형식승인절차 수행	100%	4차년도
				⑤	기술사양서	사양서 작성	사양서 여부정	기술사양서	100%	5차년도
G	무선 급전용 인버터 개발	G-1	인버터 기본설계	①	인버터 사양서	1건	사양 확인	사양서 확인	100%	1차년도
				②	인버터 개념설계도	1건	설계도 확인	설계도 확인	100%	
		G-2	시험용 인버터 제작 (1.2 MW)	①	전력용량	1..2MW (SiC MOSFET 사용)	전력계측기	자체시험	100%	2차년도
				②	동작 주파수	60kHz	파형 측정기	자체시험	100%	
				③	트랙전류	500A	파형 측정기	자체시험	100%	
				④	냉각방식	공랭	제품확인	자체시험	100%	
				⑤	인버터크기	8m3	제품확인	자체시험	100%	
				⑥	시스템 효율	96%	전력계측기	계산서	100%	
				⑦	EMF/EMI/EMC 저감기술	동축 케이블 적용	기존케이블과 비교	시뮬레이션 결과	100%	
				⑧	케이블 발열 감지	기준 온도에서 40초 이내	동작시간 측정	측정	100%	
				⑨	전압제어 오차	±5%이내	전압 계측	시뮬레이션 결과	100%	
				⑩	시험 인버터 제작	1건	제작 인버터 확인	제작 인버터 확인	100%	
		G-3	단품/구성품 시험 (조합시험 포함) 및 신뢰성 시험용 인버터 제작	①	전력용량	1..2MW (SiC MOSFET 사용)	전력계측기	철도안전법에 의한 형식승인절차 수행	100%	3~4차년도
				②	동작 주파수	60kHz	파형 측정기	〃	100%	
				③	트랙전류	500A	파형 측정기	〃	100%	
				④	냉각방식	공랭	제품확인	〃	100%	
				⑤	인버터크기	8m3	제품확인	〃	100%	
				⑥	시스템 효율	96%	전력계측기	〃	100%	
				⑦	EMF/EMI/EMC 저감기술	동축 케이블 적용	기존케이블과 비교	〃	100%	

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						비고
				질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	달성도	
				⑧	케이블 발열 감지	기준 온도에서 40초 이내	동작시간 측정	〃	100%	
				⑨	전압제어 오차	±5%이내	전압 계측	〃	100%	
				⑩	신뢰성 시험용 인버터 제작	5건	제작 인버터 확인	철도 차량 형식 승인 절차 및 기준 적용	100%	
		G-4	인버터 시험보고서	①	자체 시험 결과 보고서	1건	보고서 확인	보고서 확인	100%	2차년도
				②	단품 시험 결과 보고서	1건	보고서 확인	보고서 확인	100%	3차년도
				③	구성품 조합시험 결과보고서	1건	보고서 확인	보고서 확인	100%	
				④	현장 설치 시험 결과보고서	1건	보고서 확인	보고서 확인	100%	
				⑤	통합시험 결과보고서	1건	보고서 확인	보고서 확인	100%	4차년도
				⑥	정적 조합시험 결과보고서	1건	보고서 확인	보고서확인	100%	
				⑦	정적 신뢰성 (4만km이상) 시험보고서	1건	보고서 확인	보고서확인	100%	
				⑧	동적 조합시험 결과보고서	1건	보고서 확인	보고서 확인	100%	5차년도
				⑨	동적 신뢰성 (4만 km 이상) 시험보고서	1건	보고서 확인	보고서 확인	100%	
H	무선 급전용 인버터 유지보수 절차서	H-1	유지보수 절차서	①	절차서	1건	보고서 확인	보고서 확인	100%	5차년도
I	무선 급전 커패시터 최적화 기술 개발	I-1	대전력 무선 급전용 필름 캐패시터 개발 기본설계	①	커패시터 사양서	1건	사양 확인	사양서확인	100%	1차년도
				②	터미널(단자)설계	1건	설계도확인	설계도확인	100%	
		I-2	대전력 무선 급전용 시험용 필름 캐패시터 제작	①	시험용 시작품 제작	1건	사양 확인	제작커패시터 확인	100%	2차년도
				②	터미널(단자)제작	1건	금형 확인	실물확인	100%	
		I-3	대전력 무선 급전용 필름 캐패시터 신뢰성 시제품 제작	①	시험용 시제품 제작	1건	사양 확인	제작커패시터 확인	100%	3차년도
				②	터미널 방열판 제작	1건	금형 확인	실물확인	100%	
				③	정격 운전 주파수	60kHz	파형 측정	공인시험성적서	100%	
				④	정격 전압	900~1000Vrms	정격 전압 측정	공인시험성적서	100%	
				⑤	절연 내압(피크전압)	정격전압*1.414	내압측정(60Hz)	공인시험성적서	100%	
				⑥	정격 전류	500Arms이상	정격전류 측정	공인시험성적서	100%	
				⑦	캐패시턴스	1.3μF ~ 3μF	LCR 미터이용	공인시험성적서	100%	
				⑧	기생저항 (ESR)	1.5mΩ 이하	LCR 미터이용	공인시험성적서	100%	
				⑨	기생인덕턴스(ESL)	10nH 이하	기생인덕턴스 측정	공인시험성적서	100%	
		I-4	대전력 무선 급전용 필름 캐패시터 시험보고서	①	정적 신뢰성 (4만 km 이상) 시험보고서	1건	보고서 확인	보고서확인	100%	4차년도
		I-5	대전력 무선 급전용 필름 캐패시터 시험보고서	①	통합시험결과 보고서	1건	보고서 확인	보고서확인	100%	5차년도
				②	동적 신뢰성 (4만 km 이상) 시험보고서	1건	보고서 확인	보고서확인	100%	
J	무선급전용 필름 캐패시터 특성 시험 방법 및 신뢰성 평가 방법 및 기준	J-1	급전 캐패시터 주파수별 전기적 신뢰성 시험 장비 구축	①	자체성능시험	1건	보고서 확인	보고서 확인	100%	2차년도
		J-2	무선 급전 캐패시터 주파수별 전기적 신뢰성 시험장비,방법 및 기준제시	①	시험 가능 주파수	50kHz ~ 70kHz	해당규격	보고서 확인	100%	4차년도
				②	최대 시험 가능 전압 정격	1600Vrms	해당규격	보고서 확인	100%	

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						비고
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	달성도	
	제시			③	최대 시험 가능 전류 정격	1000Arms	해당규격	보고서 확인	100%	
				④	자체 열안정시험	최대80℃	보고서 확인	보고서 확인	100%	
		J-3	무선 급전 캐패시터 주파수별 기계적 신뢰성 시험장비,방법 및 기준제시	①	내충격 시험	4종시험 A,B,C, D종항목중 택일	해당규격 (KS R 9187)	보고서확인	100%	3차년도
				②	내진동 시험	저진동 10~38Hz: 복진폭 2.5mm 고진동:38 ~1000Hz:가속도 복진폭 147m/s2	해당규격 (KS R 9186)	보고서확인	100%	
		J-4	무선급전용 필름 캐패시터 전기적 및 기계적 신뢰성 시험 및 평가 기준서	①	평가 기준	1건	평가 기준 확인	보고서확인	100%	5차년도

2) 양적성과

가) 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	A New Design Methodology for a 300-kW, Low Flux Density, Large Air Gap, Online Wireless Power Transfer System	IEEE Transactions on Industry Applications	Seung-Hwan Lee	52(5)	미국	IEEE	SCI	2016.09
2	6.78-MHz, 50-W Wireless Power Supply Over a 60-cm Distance Using a GaN-Based Full-Bridge Inverter	Energies	Seung-Hwan Lee	12(3)	스위스	MDPI	SCI	2019.01
3	Impact of Rebar and Concrete on Power Dissipation of Wireless Power Transfer Systems	IEEE Transactions on Industrial Electronics	Seung-Hwan Lee	67(1)	미국	IEEE	SCI	2020.1

나) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	전력전자학회 추계학술대회	유효열	2016.11.25	한국교통대학교	한국
2	전력전자학회 추계학술대회	김찬인	2017.11.24	건국대학교	한국
3	전력전자학회 추계학술대회	김찬인	2018.11.30	중앙대학교	대한민국

다) 특허 출원/등록

번호	특허 명칭	국명	출원			등록		
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호
1	열차의 부하변동에 따른 인버터 전류제어 방법	한국	한국철도기술연구원	2015.12.24	10-2015-0186605			
2	무선충전 전기 자동차 및 무선충전 방법	한국	㈜그린파워	2015.11.04	10-2015-0154492	㈜그린파워	2016.05.31	10-1627798
3	경량화 전극플레이트 고주파 대전류 전도냉각 커패시터	한국	대동콘덴서공업㈜	2016.01.27	10-2016-09867	대동콘덴서공업㈜	2016.01.27	10-1615083
4	온라인 무선전력 시스템의 급전코일 권선 방법 및 이를 위한 연결기	한국	한국철도기술연구원	2016.04.05	10-2016-0041433	한국철도기술연구원	2018.01.31	10-1826158

5	무선충전 급전장치용 플라스틱 함체의 좌우 회전형 조립구조	한국	동원건설산업 ㈜	2016.04.14	10-2016-0045333			
6	절연 확보를 위한 무선전력 케이블 작업 방법	한국	동원건설산업 ㈜	2016.04.14	10-2016-0045337			
7	무선충전 급전장치 함체용 이동형 평탄도 측정장치	한국	동원건설산업 ㈜	2016.04.14	10-2016-0045335			
8	전극플레이트 적층형 고주파 대전류 캐패시터	한국	대동콘덴서공업㈜	2016.11.22	10-2016-0155577	대동콘덴서공업㈜	2017.04.18	10-1729647
9	비접촉 급전시스템의 집전장치 취부구조	한국	한국철도기술연구원	2016.12.20	10-2016-0174326	한국철도기술연구원	2019.01.29	10-1945242
10	레일 또는 궤도에 설치되는 무선충전 급전선로용 전선덕트	한국	동원건설산업 ㈜	2017.02.13	10-2017-0019572	동원건설산업㈜	2018.04.13	10-1850642
11	무선충전 급전장치용 리츠 와이어 단말부 보호 브라켓	한국	동원건설산업 ㈜	2017.02.13	10-2017-0019573	동원건설산업㈜	2017.02.13	10-1806764
12	무선충전 급전장치용 리츠와이어 단말기	한국	동원건설산업 ㈜	2017.02.13	10-2017-0019574	동원건설산업㈜	2018.04.13	10-1850643
13	인버터 스택 구조	한국	㈜그린파워	2017.03.03	10-2017-0027526			
14	인버터의 전압과 전류의 위상차 감지 장치 및 방법	한국	㈜그린파워	2017.03.03	10-2017-0027541	㈜그린파워	2018.10.01	10-1905425
15	무선급전 선로에 연결되는 캐패시터 함체 구조	한국	한국철도기술연구원	2017.04.24	10-2017-0052519	한국철도기술연구원	2018.09.17	10-1901134
16	방수기능을 갖는 고주파 대전류 커패시터	한국	대동콘덴서공업㈜	2017. 8.21	10-2017-0105556	대동콘덴서공업㈜	2017.12.18	10-1811987
17	방열판 일체형 고주파 대전류 커패시터	한국	대동콘덴서공업㈜	2017. 8.21	10-2017-0105557	대동콘덴서공업㈜	2017.12.18	10-1811988
18	철도차량을 이용한 무선전력전송 장치	한국	한국철도기술연구원	2017.09.20	10-2017-0121159	한국철도기술연구원	2019.07.02	10-1997483
19	방진부를 구비하는 무선충전 급전선로용 전선덕트	한국	동원건설산업㈜	2017.12.15	10-2017-0173209			
20	체결부재를 구비하는 무선충전 급전선로용 전선덕트	한국	동원건설산업㈜	2017.12.15	10-2017-0173210			
21	무선전력전송장치의 공진 인덕터 및 그 제작 방법	한국	㈜그린파워	2018.01.04	10-2018-0001098	㈜그린파워	2018.06.26	10-1873399
22	무선전력전송장치의 페라이트 코어 검사장치 및 그 검사 방법	한국	㈜그린파워	2018.01.04	10-2018-0001104	㈜그린파워	2018.09.04	10-1897259
23	방열효율을 높인 대전류 커패시터 조립체	한국	대동콘덴서공업㈜	2018.05.11	10-2018-0054261	대동콘덴서공업㈜	2018.11.19	10-1921609

24	무선충전 급전선로용 전선덕트	한국	동원건설산업㈜	2018.09.13	10-2018-0109785			
25	내부에 냉각 관로가 형성된 커패시터 및 이를 포함하는 커패시터 조립체	한국	동원건설산업㈜	2018.11.26	10-2018-0147210			
26	과전압 방지 수단을 구비한 수전장치	한국	㈜그린파워	2018.11.29	10-2018-0151424			
27	전차선 상태감시시스템용 무선전력전송시스템 설계장치 및 방법	한국				한국철도기술연구원	2017.06.01	10-1744577
28	단상 공진형 무선 전력 전송 시스템의 동기 좌표계 dq 모델링을 이용한 부하 모니터링 방법 및 부하 추정 시스템	한국				한국철도기술연구원	2018.03.22	10-1843064
29	수냉식 무선전력 전송용 고주파 대전류 커패시터 조립체	한국	대동콘덴서공업㈜	2019.07.11	10-2019-0083764	대동콘덴서공업㈜	2019.09.16	10-2023874
30	무선전력 전송용 커패시터 모듈	한국	㈜그린파워	2019.11.26	10-2019-052950	㈜그린파워	2020.07.10	10-2134698
31	과열감지수단을 구비한 커패시터 장치	한국	㈜그린파워	2019.11.26	10-2019-0152954			
32	무선급전용 공진 캐패시터 박스 세트	한국	한국철도기술연구원	2020.01.15	10-2020-0005576			
33	무선 급전선로의 이상 검지 시스템 및 방법	한국	한국철도기술연구원	2020.01.30	10-2020-0011361			
34	차폐 기능을 갖는 무선전력전송용 케이블	한국	한국철도기술연구원	2020.06.26	10-2020-0078409			

라) 소프트웨어

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호*	저작권자명	기여율
1	무선급전도시철도 안전관리 시스템 (서버 프로그램)	2019.04.22	한국철도기술연구원	2020.01.16	C-2020-002757	한국철도기술연구원	100%

마) 표준화

번호	수행기관명	표준화 주제	표준화 기구	표준화 단계	관련 번호	제출(채택)일	국가

바) 연구시설·장비 구축

연구시설·장비명	구축 금액(천원)	구축일	활용 용도	설치 장소	NTIS 시설 장비 등록 번호
Cu전극형성기(Cu용사기)	61,570	2016.12.21	기술개발 및 양산	대동콘덴서공업(주) 1층 용사실	NFEC-2017-01-235872
커패시터(콘덴서) 자동권취기	320,000	2018.9.18	공진용 커패시터 소자권취 제작	대동콘덴서공업 권취실	NFEC-2018-10-246369

나. 목표 달성도(2세부)

1) 질적성과

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						비고
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	달성도	
A	무선급전 경전철 차량 인터페이스 표준사양 (안)	A-1	경전철 무선급전 시스템 표준구성안	①	차량 요구사항 도출	1건	설계 사양 건수	보고서 확인	100%	1차년도
				②	표준구성안	1건	표준구성안 건수	표준구성안 확인	100%	
		A-2	무선급전 차량 구성장치 기본설계	①	집전장치 기본설계안	1건	설계안 건수	설계안 확인	100%	1차년도
				②	DC-DC 컨버터 기본설계안	1건	설계안 건수	설계안 확인	100%	
				③	에너지 저장장치 기본설계안	1건	설계안 건수	설계안 확인	100%	
		A-3	무선급전 시스템 구성요소 간 인터페이스 사양서	①	인터페이스 설계안	1건	설계안 건수	설계안 확인	100%	2차년도
				②	인터페이스 시험 절차서	1건	시험절차서 건수	보고서 확인	100%	
				③	인터페이스 사양(안)	1건	사양(안) 건수	인터페이스 사양안 확인	100%	
				④	인터페이스 표준사양안	1건	표준사양안 건수	표준사양안 확인	100%	3차년도
B	무선급전 집전장치	B-1	집전장치 사양 결정	①	사양서	1건	사양서	사양서	100%	1차년도
		B-2	집전장치 기본개념설계	①	개념설계도	1건	설계도	설계도	100%	
		B-3	단품 모듈 집전장치 제작	①	집전장치 제작	1대	제품확인	자체시험결과서	100%	2차년도
				②	자체시험	성능 시험	시험성적서	자체시험결과서	100%	
		B-4	단품 모듈 집전장치 개발	①	단위모듈 전력용량	250kW	전력계측기	자체시험결과서	100%	2차년도
				②	동작 주파수	60kHz	파형 측정기	자체시험결과서	100%	
				③	단위모듈 무게	400kg 이내	무게 측정	자체시험결과서	100%	
				④	크기	0.36m3 이내	제품확인	자체시험결과서	100%	
				⑤	EMF	국내 기준	EMF 측정	시뮬레이션 결과	100%	
		B-5	집전장치 단품시험	①	형식승인시험용 집전장치 시작품 제작	1조	시작품	시작품 확인	100%	3차년도
				②	전력용량	1MW 이상	전력 측정	철도안전법에 의한 형식승인 절차수행	100%	
				③	동작 주파수	60kHz	주파수 측정	〃	100%	
				④	무게 (250kw x 4ea 기준)	1,200kg 이내	무게 측정	〃	100%	
				⑤	크기 (250kw x 4ea 기준)	1.08m3 이내	크기 측정	〃	100%	
				⑥	EMF	국내 기준	EMF 측정	〃	100%	
				⑦	효율 (정류기 효율 포함)	97%이상	효율 측정	〃	100%	
		B-6	집전장치 차량장착 및 정적시험	①	신뢰성 시험용 집전장치 시작품 제작	2 조	시작품	시작품 확인	100%	4차년도
				②	전력용량	2MW 이상	전력 측정	철도안전법에 의한 형식승인 절차수행	100%	
				③	동작 주파수	60kHz	주파수 측정	〃	100%	
				④	무게 (250kw x 4ea 기준)	1,200kg 이내	무게 측정	〃	100%	
				⑤	크기 (250kw x 4ea 기준)	1.08m3 이내	크기 측정	〃	100%	

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						비고
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	달성도	
				⑥	EMF	국내 기준	EMF 측정	〃	100%	
				⑦	효율 (정류기 효율 포함)	97%이상	효율 측정	〃	100%	
C	고압, 대전류, 고주파용 정류기	C-1	정류기 사양 결정	①	정류기 사양서	1건	사양서	사양서	100%	1차년도
		C-2	정류기 기본개념설계	①	정류기 개념설계도	1건	설계도	설계도	100%	1차년도
		C-3	단품모듈정류기 제작	①	정전압제어장치 제작	1대	제품확인	자체시험결과서	100%	2차년도
				②	단품시험	성능 시험	시험성적서	자체시험결과서	100%	
		C-4	단품모듈 정류기 개발	①	단위모듈 전력용량	250kW	전력계측기	자체시험결과서	100%	2차년도
				②	Active Rectifier	전부하정전압유지	전력계측기	자체시험결과서	100%	
				③	무게	270kg 이내	무게 측정	자체시험결과서	100%	
				④	크기	0.2m3 이내	크기측정	자체시험결과서	100%	
				⑤	효율	99%	전력측정기	시뮬레이션 결과	100%	
				⑥	실시간 공진튜닝	15% 출력 보상	전력측정기	시뮬레이션 결과	100%	
		C-5	정전압제어 정류기 단품시험	①	형식승인시험용 정류기 시작품 제작	1조	시작품	시작품 확인	100%	3차년도
				②	전력용량	1MW 이상	전력 측정	철도안전법에 의한 형식승인 절차수행	100%	
				③	Active Rectifier	전부하정전압유지	전력 측정	〃	100%	
				④	무게 (250kw x 4ea 기준)	800kg 이내	무게 측정	〃	100%	
				⑤	크기 (250kw x 4ea 기준)	0.65m3 이내	크기 측정	〃	100%	
				⑥	실시간 공진튜닝	15% 출력 보상	전력 측정	〃	100%	
		C-6	고압 대전류, 고주파용 정류기	①	신뢰성 시험용 정류기 시작품 제작	2 조	시작품	시작품 확인	100%	4차년도
				②	전력용량	2MW 이상	전력 측정	철도안전법에 의한 형식승인 절차수행	100%	
				③	Active Rectifier	전부하정전압유지	전력 측정	〃	100%	
				④	무게 (250kw x 4ea 기준)	800kg 이내	무게 측정	〃	100%	
				⑤	크기 (250kw x 4ea 기준)	0.65m3 이내	크기 측정	〃	100%	
				⑥	실시간 공진튜닝	15% 출력 보상	전력 측정	〃	100%	
D	경전철 무선급전용 집전장치 유지보수 절차서	D-1	집전장치 유지보수 절차서	①	유지보수 절차서	1건	절차서 건수	절차서 건수 확인	100%	5차년도
E	무선급전 경전철 차량용 DC-DC 컨버터	E-1	DC-DC 컨버터 제작 사양서	①	DC-DC 컨버터 요구사항 정의서	1건	요구사항 정의서 건수	보고서 확인	100%	1차년도
				②	DC-DC 컨버터 제작사양	1건	사양서	사양서 확인	100%	2차년도
		E-2	고효율/초소형 DC-DC 컨버터 제작 및 자체시험	①	DC-DC 컨버터 제작	1건	자체시험성적서	자체시험결과서	100%	2차년도
		E-3	DC-DC 컨버터 단품시험	①	DC-DC 컨버터 기능규격서	1건	기능규격서 건수	보고서 확인	100%	3차년도

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						비고
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	달성도	
				②	DC-DC 컨버터 출력	1MW 이상	출력 측정	철도안전법에 의한 형식승인 절차수행	100%	
				③	DC-DC 컨버터 크기	1.2mx1.0x0.8m 이하	크기 측정	〃	100%	
				④	DC-DC 컨버터 무게	600kg 이하	무게 측정	〃	100%	
		E-4	양방향 컨버터 제어 소프트웨어	①	양방향 컨버터 제어 소프트웨어 건수	1건	S/W 건수	보고서 확인	100%	4차년도
F	무선급전 경전철 차량용 에너지 저장장치	F-1	에너지 저장장치 제작사양서	①	에너지 저장장치 요구사항 정의서	1건	요구사항 정의서 건수	보고서 확인	100%	1차년도
				②	에너지 저장장치 제작사양	2건	사양서	사양서 확인	100%	2차년도
		F-2	에너지 저장장치 제작 및 자체시험	①	에너지 저장장치 제작	2건	자체시험성적서	자체시험결과서	100%	2차년도
		F-3	에너지 저장장치 단품시험	①	에너지 저장장치 기능규격서	1건	기능규격서 건수	보고서 확인	100%	3차년도
				②	에너지 저장장치 출력	1MW 이상	출력 측정	철도안전법에 의한 형식승인 절차수행	100%	
				③	에너지 저장장치 크기	1.5mx1.2mx1.0m 이하	크기 측정	〃	100%	
				④	에너지 저장장치 무게	2000kg 이하	무게 측정	〃	100%	
		F-4	에너지 저장장치 운영관리 소프트웨어	①	에너지 저장장치 운영관리 소프트웨어 건수	1건	S/W 건수	보고서 확인	100%	4차년도
G	무선급전 경전철 차량 전원안정화 장치 유지보수 절차서	G-1	유지보수 절차서	①	유지보수 절차서 건수	1건	절차서 건수	보고서 확인	100%	5차년도
H	무선급전 경전철 차량 조합시험	H-1	무선급전 차량 조합시험 절차서	①	시험절차서	1건	시험절차서 건수	성적서 확인	100%	3차년도
		H-2	집전장치 조합시험	①	조합시험 성적서	1건	시험성적서 건수	성적서 확인	100%	3차년도
		H-3	DC-DC 컨버터 조합시험	①	조합시험 성적서	1건	시험성적서 건수	성적서 확인	100%	3차년도
		H-4	에너지 저장장치 조합시험	①	조합시험 성적서	1건	시험성적서 건수	성적서 확인	100%	3차년도
		H-5	무선급전 차량 조합시험	①	조합시험 성적서	1건	시험성적서 건수	성적서 확인	100%	3차년도
I	무선급전 경전철 차량 신뢰성 보고서	I-1	신뢰성 시험 절차서	①	정적신뢰성 시험 절차서	1건	시험 절차서 건수	외부인증기관을 통한 검증	100%	4차년도
				②	동적신뢰성 시험 절차서	1건	시험 절차서 건수	외부인증기관을 통한 검증	100%	5차년도
		I-2	정적신뢰성 보고서	①	집전장치 정적신뢰성 보고서	1건	신뢰성 보고서 건수	신뢰성 보고서	100%	4차년도
				②	DC-DC 컨버터 정적신뢰성 보고서	1건	신뢰성 보고서 건수	신뢰성 보고서	100%	
				③	에너지 저장장치 정적신뢰성 보고서	1건	신뢰성 보고서 건수	신뢰성 보고서	100%	
				④	무선급전 차량 시스템 정적신뢰성 시험 거리	4만 km 이상	시뮬레이션 거리 계산	신뢰성 보고서	100%	
		I-3	동적신뢰성 보고서	①	집전장치 동적신뢰성 보고서	1건	신뢰성 보고서 건수	신뢰성 보고서	100%	5차년도
				②	DC-DC 컨버터 동적신뢰성 보고서	1건	신뢰성 보고서 건수	신뢰성 보고서	100%	
				③	에너지 저장장치 동적신뢰성 보고서	1건	신뢰성 보고서 건수	신뢰성 보고서	100%	
				④	무선급전 경전철 차량	4만 km 이상	시험	신뢰성	100%	

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준					비고
				질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	달성도	
				동적신뢰성 시험 거리		운행거리 누적 측정	보고서		

2) 양적성과

가) 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	Development of a 60 kHz, 180 kW, Over 85% Efficiency Inductive Power Transfer System for a Tram	Energies	Seung-Hwan Lee	9(12)	스위스	MDPI	SCI	2016.12
2	The Strategy of Wireless Power Transfer for Light Rail Transit By Core Technologies Analysis Based on Text Mining	Journal of The Korea Society of Computer and Information	맹상우	23(11)	한국	한국컴퓨터정보학회	비SCI (KCI 등재지)	2018.11
3	LDA 기반의 토픽모델링을 이용한 철도차량용 무선급전시스템 연구 동향 분석	Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers	음수민	45(4)	한국	대한산업공학회	비SCI (KCI 등재지)	2019.08
4	Text Mining for Patent Analysis to Forecast Emerging Technologies in Wireless Power Transfer	sustainability	Ki Hong Kim	11(22)	스위스	MDPI	SCI	2019.11
5	자기유도 기반 철도차량간 거리감지시스템	한국철도학회논문집	이은수	23(3)	한국	한국철도학회	비SCI (KCI 등재지)	2020.03

나) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	전력전자학회 추계학술대회	조정구	2016.11.25	한국교통대학교	한국
2	한국철도학회 추계학술대회	이건복	2017.10.20	웰리힐리파크	한국
3	대한전기학회 부산지회 2017년도 학술대회	이수길	2017.12.08	경성대학교 (부산)	한국
4	대한전기학회 부산지회 2017년도 학술대회	이경표	2017.12.08	경성대학교 (부산)	한국
5	2018 대한전기학회 산업전기위원회 학술대회	이수길	2018.11.09	대덕대학교	대한민국
6	전력전자학회 추계학술대회	김찬인	2019.11.22	중앙대학교	대한민국

다) 특허 출원/등록

번호	특허 명칭	국명	출원			등록		
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호

1	자기유도 전력 픽업장치	한국	㈜그린파워	2016.04.19	10-2016-0047327	㈜그린파워	2018.03.23	10-1843369
2	무선전력전송을 위한 모듈형 집전장치 구조	한국	한국철도기술연구원	2016.12.28	10-2016-0180917	한국철도기술연구원	2018.12.03	101926765
3	무선전력 전송에서 넓은 공진주파수 허용을 위한 집전 컨버터 스위칭 방법	한국	㈜그린파워	2017.02.07	10-2017-0017033	㈜그린파워	2018.07.13	10-1880267
4	철도차량용 무선 급전전력 안정화를 위한 에너지 저장장치	한국	㈜메트로텍	2017.02.08	10-2017-0017675			
5	전압 안정화 모듈이 구비된 철도 무선 급전장치	한국	㈜우진산전	2017.02.16	10-2017-0021046			
6	집전케이블 구조	한국	㈜그린파워	2017.03.03	10-2017-0027552	㈜그린파워	2018.10.01	10-1905457
7	냉동컨테이너용 무선전력전송 구조	한국	한국철도기술연구원	2017.10.27	10-2017-0140835	한국철도기술연구원	2019.10.23	10-2037876
8	인터리브드 방식의 양방향 DC-DC 컨버터	한국	㈜우진산전	2017.12.28	10-2017-0182024			
9	스위칭 손실을 저감하기 위한 무선전력 전송장치의 집전장치, 집전시스템 및 그 제어방법	한국	㈜그린파워	2017.12.28	10-2017-182380	㈜그린파워	2018.08.16	10-1890657
10	무선전력전송장치의 집전 코일 및 그 제작방법	한국	㈜그린파워	2018.01.04	10-2018-0001127	㈜그린파워	2018.02.23	10-1833777
11	부하 균등 제어 기능을 갖은 병렬 연결형 전력 컨버터 및 시스템	한국	㈜그린파워	2018.10.18	10-2018-0124688	㈜그린파워	2020.06.25	10-2128830
12	축전지팩	한국	㈜메트로텍	2018.11.14	10-2018-0139697			
13	철도 차량의 전력변환장치용 팬 구동 제어장치	한국	㈜우진산전	2018.11.28	10-2018-0149665	㈜우진산전	2020.07.13	10-2135513
14	배터리 모듈의 다중 적층 구조에 냉각 도구를 구비하는 배터리 팩	한국	㈜메트로텍	2018.11.30	10-2018-0151622			
15	전원 공급용 원거리 무선전력전송장치	한국				한국철도기술연구원	2017.04.12	10-1728149
16	수중 무선전력 전송용 도킹 장치	한국				한국철도기술연구원	2018.02.28	10-1835553

17	모듈형 집전장치를 구비한 항만 RTGC의 무선전력전송 구조	한국				한국철도기술연구원	2018.09.04	10-1897153
18	무선전력전송용 송수신 코일	한국				한국철도기술연구원	2018.10.2	10-1906365
19	무선급전시스템의 차량용 집전장치	한국	한국철도기술연구원	2020.02.07	10-2020-0014740			
20	차량용 무선 집전 시스템	한국	한국철도기술연구원	2020.02.07	10-2020-0015213			

라) 소프트웨어

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호*	저작권자명	기여율
1	무선급전 경전철 차량용 에너지 저장장치 상태정보 운영관리 소프트웨어	2018.10.17	㈜메트로텍	2018.10.31	C-2018-029767	㈜메트로텍	100%

마) 표준화

번호	수행기관명	표준화 주제	표준화 기구	표준화 단계	관련 번호	제출(채택) 일	국가

바) 연구시설・장비 구축

연구시설·장비명	구축 금액 (천원)	구축일	활용 용도	설치 장소	NTIS 시설 장비 등록 번호

다. 목표 달성도(3세부)

1) 질적성과

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						비고
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	달성도	
A	급전장치 전기안전 기준	A-1	표준 및 논문 등에 대한 사전 연구 자료 검토 확인	①	관련 기준 및 표준 확보 및 검토	< 20건	보고서	보고서		1차년도
		A-2	사전 연구자료 검토를 통한 기준(안) 확인	①	기준(안) 초안 도출	1건	보고서	보고서		2차년도
				②	장비구축설계	1건	보고서	보고서		
		A-3	현장 검증 시험 결과 확인	①	현장 검증	< 95 %	실증시험장	기준 비교		3차년도
				②	안전 장치 개발	1건	보고서	출원증		
		A-4	전력설비 시설기준 개정(안) 제출 공문 확인	①	전기안전 기준 제정(안) 검증	1건	보고서	보고서		4차년도
				②	안전 장치 개발	1건	보고서	출원증		
				③	전기안전 기준 제정(안) 제출	1건	공문	보고서		5차년도
B	집전장치 전기안전 기준	B-1	표준 및 논문 등에 대한 사전 연구 자료 검토 확인	①	관련 기준 및 표준 확보 및 검토	< 10건	보고서	보고서		1차년도
		B-2	집전장치 전기안전 기준 개정(안) 제출 공문 확인	②	전기안전 기준 제정(안) 제출	1건	공문	보고서		5차년도
C	무선급전시스템 EMI 안전 기준	C-1	급전 EMI 안전 기준 요구사항분석	①	기존 국내·외 EMI 평가 기준, 최신 동향 및 기술정보 수집	기술 동향서	보고서	보고서		1차년도
				②	국내·외 급전 EMI 평가 기준 검토	보고서	보고서	보고서		
				③	전자기기에 미치는 전자파 영향 분석	보고서	보고서	보고서		
		C-2	급전 EMI 안전기준 검증 및 개선	①	모듈적용실험 결과보고서	95dBμV/m 기준치 부합	EN 50121 (K N 50)	보고서		2차년도
				②	안전성 개선 방안 도출	95dBμV/m 기준치 미만	EN 50121 (K N 50)	보고서		
				③	모듈실험 결과 보고서	보고서작성	EN 50121 (K N 50)	보고서		
		C-3	급전 EMI 안전기준(안) 제출	①	EMI 안전 기준안 및 시험기준안 제안	제안서	보고서	보고서		4~5 차년도
				②	도시철도용 무선전력전달 시스템의 EMI 안전 및 시험 기준안 논의	회의록	보고서	보고서		
				③	전자파 영향에 대한 안전기준을 규정하는 전파법 고시의 개정	개정안	보고서	보고서		
D	무선 집전시스템 EMI 안전 기준	D-1	집전 EMI 안전 기준 요구사항분석	①	기존 국내·외 EMI 평가 기준, 최신 동향 및 기술정보 수집	기술 동향서	보고서	보고서		1차년도
				②	국내·외 급전 EMI 평가 기준 검토	검토결과 분석서	보고서	보고서		
				③	전자기기에 미치는 전자파 영향 분석	분석서	보고서	보고서		
		D-2	집전 EMI안전 기준 설계 및 분석	①	국내외 안전기준 검토	분석서	보고서	연차 보고서		2차년도
				②	안전기준 설계	설계서	보고서	연차 보고서		
				③	모의실험 및 분석	결과 분석서	보고서	연차 보고서		
				④	급집전 EMI 기준 작성	기준서	기준서	기준서		
		D-3	집전 EMI 안전기준(안) 제출	①	EMI 안전 기준안 및 시험기준안 제안	제안서	보고서	보고서		4~5 차년도
				②	도시철도용 무선전력전달 시스템의 EMI 안전 및 시험 기준안 논의	회의록	보고서	보고서		

				③	전자파 영향에 대한 안전기준을 규정하는 전파법 고시의 개정	개정안	보고서	보고서		
E	급전 EMI 감쇄 및 차폐 모듈	E-1	기존 국제 기준 검토 및 EMI 감쇄 급전 구조 연구	①	국제기준 분석서	분석서 작성	보고서	보고서		1차년도
				②	EMI 감쇄기술 분석서	분석서 작성	시뮬레이션	보고서		
				③	EMI 감쇄 적용 후보기술 보고서	보고서 작성	시뮬레이션	보고서		
		E-2	철도 무선전력전송 기술에 대한 급전 EMI 차폐 해결방안 제시	①	후보기술 및 구조별 분석서	분석서	시뮬레이션	연차 보고서		2차년도
				②	EMI 감쇄 구조의 변수별 민감도 분석서	분석서	시뮬레이션	연차 보고서		
				③	모의실험 및 분석	보고서 작성	시뮬레이션 (KN 50)	연차 보고서		
		E-3	급전 EMI 감쇄 모듈 개발 및 시험	①	모듈적용실험 결과보고서	95dBμV/m 기준치 부합	EN 50121 (KN 50)	보고서		3~4 차년도
				②	안전성 개선 방안 도출	95dBμV/m 기준치 미만	EN 50121 (KN 50)	보고서		
				③	모듈실험 결과 보고서	보고서작성	EN 50121 (KN 50)	보고서		
		E-4	급전 EMI 안전성 현장 검증 및 최적화	①	test-bed 적용실험 결과보고서	95dBμV/m 기준치 부합	EN 50121 (KN 50)	보고서		5차년도
				②	EMI 최소화 방안 도출	95dBμV/m 기준치 미만	EN 50121 (KN 50)	보고서		
				③	현장검증 결과보고서	보고서 작성	EN 50121 (KN 50)	보고서		
F	집전 EMI 감쇄 및 차폐 모듈	F-1	기존 국제 기준 검토 및 EMI 감쇄 집전 구조 연구	①	국제기준 분석서	분석서 작성	보고서	보고서		1차년도
				②	EMI 감쇄기술 분석서	분석서 작성	시뮬레이션	보고서		
				③	EMI 감쇄 적용 후보기술 보고서	보고서 작성	시뮬레이션	보고서		
		F-3	집전 EMI 감쇄 모듈 개발 및 시험	①	모듈적용실험 결과보고서	95dBμV/m 기준치 부합	EN 50121 (KN 50)	보고서		3~4 차년도
				②	안전성 개선 방안 도출	95dBμV/m 기준치 미만	EN 50121 (KN 50)	보고서		
				③	모듈실험 결과 보고서	보고서작성	EN 50121 (KN 50)	보고서		
		F-4	집전 EMI 안전성 현장 검증 및 최적화	①	test-bed 적용실험 결과보고서	95dBμV/m 기준치 부합	EN 50121 (KN 50)	보고서		5차년도
				②	EMI 최소화 방안 도출	95dBμV/m 기준치 미만	EN 50121 (KN 50)	보고서		
				③	현장검증 결과보고서	보고서 작성	EN 50121 (KN 50)	보고서		
G	급집전 EMF 안전 기준	G-1	급집전 EMF 안전 기준 요구사항 분석	①	기존 국내·외 EMF 평가 기준, 최신 동향 및 기술정보 수집	기술 동향서	보고서	보고서		1차년도
				②	국내·외 급집전 EMF 평가 기준 검토	검토 결과 분석서	보고서	보고서		
				③	인체에 미치는 영향 분석	분석서	보고서	보고서		
		G-2	급집전 EMF안전 기준 설계 및 분석	①	국내외 안전기준 검토	분석서	분석서 평가	보고서		3차년도
				②	안전기준 설계	설계서	설계서 평가	보고서		
				③	모의실험 및 분석	실험결과분석서	분석서 평가	보고서		
		G-3	급집전 EMF 안전기준 검증 및 개선	①	60 kHz EMF 인체노출 안전 및 시험 기준 검증 및 개선	검증결과 분석서	분석서 평가	보고서		4차년도
				②	저주파 전자계 인체 노출 안전 및 시험 기준의 검증	검증결과 분석서	분석서 평가	보고서		
				③	다양한 선로, 신호시스템, 철도 차량등에 대한 급집전 EMF 안전 검증	측정결과 분석서	분석서 평가	보고서		
		G-4	급집전 EMF 안전기준 (안) 제출	①	인체 노출 안전 기준안 및 시험기준안 제안	제안서	제안서 검토	보고서		5차년도
				②	도시철도용 무선전력전달 시스템의 EMF 인체 노출 안전 및	회의록	회의록 검토	기준안		

					시험 기준안 논의					
				③	전자파 인체노출 안전기준을 규정하는 전파법 고시의 개정	개정안	개정안 존재 확인	개정안		
H	급집전 EMF 감쇄 및 차폐 모듈	H-1	기존 국제 기준 검토 및 EMF 감쇄 급전 구조 연구	①	국제기준검토	분석서	보고서	보고서		1차년도
				②	EMF 감쇄구조	국내전파법기준 따름	시뮬레이션	보고서		
				③	적용 후보기술 도출	국내전파법기준 따름	시뮬레이션	보고서		
		H-2	철도 무선전력전송 기술에 대한 EMF 차폐 해결방안 제시	①	후보기술 및 구조별 분석서	분석서	시뮬레이션	연차 보고서		2~3 차년도
				②	EMI 감쇄 구조의 변수별 민감도 분석서	분석서	시뮬레이션	연차 보고서		
				③	모의실험 및 분석	분석서	시뮬레이션	연차 보고서		
		H-3	급집전 EMF 감쇄 모듈 개발 및 시험	①	급집전 EMF 감쇄 안전성 검증	국내전파법기준 따름	IEC62110	보고서		4차년도
				②	급집전 EMF 차폐 안전성 검증	국내전파법기준 따름	IEC62110	보고서		
				③	급집전 EMF 차폐 장치 적용 및 시험	국내전파법기준 따름	IEC62110	보고서		
		H-4	급집전 EMF 안전성 현장 검증 및 최적화	①	test-bed 적용실험 결과보고서	95dBμV/m 기준치 부합	EN 50121 (KN 50)	보고서		5차년도
				②	EMI 최소화 방안 도출	95dBμV/m 기준치 미만	EN 50121 (KN 50)	보고서		
				③	현장검증 결과보고서	보고서 작성	EN 50121 (KN 50)	보고서		
I	무선 급전철도 경제성분석	I-1	경제성 분석	①	무선급전 철도에 대한 경제성 분석	분석서	분석서	분석보고서		4차년도

2) 양적성과지표

가) 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	고속철도시스템의 전자파적합성에 대한 국내 표준화 동향	한국전자파학회 전자파기술	전강희	28(1)	한국	한국전자파학회	비SCI	2017.01
2	무선전력전송시 전자기장의 유도현상으로 인한 인체 안전성 확보 방안 연구	조명 · 전기설비학회논문지	채동주	31(2)	한국	한국조명 · 전기설비학회	비SCI (KCI 등재지)	2017.02
3	무선전력전송 철도시스템의 기술 현황 및 전기자기적합성(EMC) 국제 표준화 동향	한국전자파학회 전자파기술	전강희	28(6)	한국	한국전자파학회	비SCI	2017.11
4	대용량 무선전력전송 환경 유도현상 감쇄를 위한 차폐 특성 분석	전기학회논문지	채동주	66(12)	한국	대한전기학회	비SCI (KCI 등재지)	2017.12
5	Low Leakage Electromagnetic Field Level and High Efficiency Using a Novel Hybrid Loop-array Design for Wireless High Power Transfer System	IEEE Transactions on Industrial Electronics	Seongsoo Lee	66(6)	미국	IEEE	SCI	2018.07

6	도시철도용 무선 급집전 시스템 주변의 전자기장 측정 방법 및 안전성 평가 방법 연구	한국전자파학회논문지	김윤명	29(12)	한국	한국전자파학회	비SCI (KCI 등재지)	2018.12
7	대용량 무선전력전송 환경 인근 메쉬구조 도전부 유도현상 특성 분석	전기학회논문지	채동주	68(1)	한국	대한전기학회	비SCI (KCI 등재지)	2019.01
8	Precise Vehicle Location Detection Method Using a Wireless Power Transfer (WPT) System	IEEE Transactions on Vehicular Technology	신유준	2	미국	IEEE	SCI	2019.02
9	Planar multiresonance reactive shield for reducing electromagnetic interference in portable wireless power charging application	Applied Physics Letters	박재형	114	미국	American Institute of Physics	SCI	2019.05
10	고속철도시스템의 전자파적합성에 대한 국내 표준화 동향	한국전자파학회 전자파기술	봉한울	30(5)	한국	한국전자파학회	비SCI	2019.09
11	무선전력으로 충전되는 전지 구동형 전기철도 시스템의 차량 내외의 전자기장 측정 방법에 대한 국내외 표준 동향	한국전자파학회 전자파기술	김윤명	30(6)	대한민국	한국전자파학회	비SCI	2019.11
12	전기수송설비용 무선전력전송 시스템 전기안전 확보를 위한 접지환경 연구	전기학회논문지	채동주	69(6)	한국	대한전기학회	비SCI (KCI 등재지)	2020.06

나) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	Korea-Japan Joint Conference on EMT/EMC/BE	안승영	2015.11.25	Sendai International Center, Sendai	일본
2	Korea-Japan Joint Conference on EMT/EMC/BE	박재형	2015.11.25	Sendai International Center, Sendai	일본
3	IEEE Wireless Power Transfer Conference 2017	송치억	2017.05.12	Howard Civil Service International House, Taipei	대만

4	IEEE Wireless Power Transfer Conference 2017	이성수	2017.05.12	Howard Civil Service International House, Taipei, Taiwan	대만
5	IEEE Wireless Power Transfer Conference 2017	홍석우	2017.05.12	Howard Civil Service International House, Taipei	대만
6	2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal and Power Integrity	송경환	2017.08.09	Washington	미국
7	2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal and Power Integrity	박계영	2017.08.09	Washington	미국
8	IEEE MTT-S Wireless Powe Transfer Conference	이성수	2018.06	Polytechnique Montreal, Montreal, Quebec	캐나다
9	IEEE MTT-S Wireless Powe Transfer Conference	정승택	2018.06	Polytechnique Montreal, Montreal, Quebec	캐나다
10	IEEE MTT-S Wireless Powe Transfer Conference	심부교	2018.06	Polytechnique Montreal, Montreal, Quebec	캐나다
11	IEEE PELS workshop on Emerging Technologies	채동주	2018.06.06	University of Montreal, Montreal, Quebec	캐나다
12	2018년도 대한전기학회 하계학술대회	채동주	2018.07.12	용평리조트	대한민국
13	2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity	박재형	2018.08	Long Beach, Alabama	미국
14	2018년도 대한전기학회 전기설비부문회 추계학술대회	채동주	2018.10.18	하이원리조트	대한민국
15	2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)	이성수	2019.06.19	IET Savoy Place, London	영국
16	2019년도 대한전기학회 하계학술대회	채동주	2019.07.10	델피노리조트	대한민국
17	2019 한국 전자파학회	김제독	2019.08.23	제주국제컨벤션센터	대한민국
18	2019년도 대한전기학회 전기설비부문회 추계학술대회	채동주	2019.10.24	제주대학교	대한민국

다) 특허 출원/등록

번호	특허 명칭	국명	출원			등록		
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호

1	누설자기장 반응형 자기장 차폐장치	한국	한국과학기술원	2016.04.08	10-2016-0043347			
2	전자기 유도영향 회피 케이블	한국	한국전기안전공사	2016.12.30	10-2016-0184232	한국전기안전공사	2018.09.05.	10-1897489
3	누설자기장 반응형 자기장 차폐장치의 설계 및 방법	한국	한국과학기술원	2017.01.19	10-2017-0009220			
4	무선전력전달 장치 및 이를 채용한 전철용 무선전력전달 시스템	한국	한국과학기술원	2017.02.03	10-2017-0015665			
5	누설 자기장 상쇄 방법	한국	한국과학기술원	2017.04.10	10-2017-0046112	한국과학기술원	2018.11.19	10-1921700
6	무선충전 장치	한국	한국과학기술원	2017.11.23	10-2017-0157016	한국과학기술원	2018.11.13	10-1920010
7	전기안전 시각화 장치	한국	한국전기안전공사	2017.12.08	10-2017-0168459	한국전기안전공사	2020.02.19	10-2081052
8	누설자기장 반응형 자기장 차폐코일 적용 방법	한국	한국과학기술원	2017.12.13	10-2017-0171361			
9	고효율의 하이브리드 메타물질 슬래브 구조 및 이를 이용한 무선전력전송 시스템	한국	한국과학기술원	2017.12.26	10-2017-0180080			
10	다수의 전자기기 충전을 위한 주파수 선택 가능 액티브 메타물질 장치와 이를 이용한 무선전력전송 시스템	한국	한국과학기술원	2017.12.27	10-2017-018576	한국과학기술원	2018.12.18	10-1932228
11	루프코일 어레이 장치 및 이를 이용한 전철용 무선전력전송 시스템	한국	한국과학기술원	2017.12.29	10-2017-0184481	한국과학기술원	2019.07.09	10-2059020
12	능동형 자기장 차폐장치	한국	한국과학기술원	2018.04.06	10-2018-0040573			
13	메타물질과 루프 코일 어레이를 이용한 무선전력전송 장치 및 그 방법	한국	한국과학기술원	2018.06.22	10-2018-0071848	한국과학기술원	2018.12.18	10-1932383
14	자기장 차폐방법 및 장치	한국	한국과학기술원	2018.09.06	10-2018-0106400	한국과학기술원	2019.04.25	10-1974597

15	대류현상을 이용한 자체 방열 시스템 탑재 차폐막	한국	한국전기안전공사	2018.12.10	10-2018-0158306	한국전기안전공사	2020.02.04	10-2075772
16	무선전력 송수신 장치, 무선전력 송신장치 및 무선전력 수신장치	한국	한국과학기술원	2019.12.20	10-2019-0172103			
17	무선전력 송신용 이물질 센서 장치	한국	한국과학기술원	2020.04.29	10-2020-0052698			

라) 소프트웨어

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호*	저작권자명	기여율
1							

마) 표준화

번호	수행기관명	표준화 주제	표준화 기구	표준화 단계	관련 번호	제출(채택)일	국가
1	한국전기안전공사	전기수송설비용 무선전력전송시스템 전기안전 요구사항	국가기술표준원 단체표준국	제정	SPS-C KESCO-EV-1-7395	2020.05.06	한국
2	한국전기안전공사	전기설비 기술기준 및 판단기준	산업부	개정안 제출		2020.05.11	한국
3	한국과학기술원 (단국대, 충북대)	철도차량 기술기준개정 (안) (집전전기안전, EMC, EMF)	국토교통부	개정안 제출		2020.07.15	한국
4	충북대학교	전자파적합성(EMC) - 경전철 시스템 및 무선 급집전 시스템의 방출 및 내성	중소기업 중앙회 단체표준국	재심의	SPS-KORA C 0035	-	한국
5	단국대학교	무선 급집전 시스템으로 구동되는 전기철도에서 발생하는 전자기장의 인체 노출량 측정 및 평가방법	중소기업 중앙회 단체표준국	재심의	SPS-KORA C 0034	-	한국

바) 연구시설·장비 구축

연구시설·장비명	구축 금액 (천원)	구축일	활용 용도	설치 장소	NTIS 시설 장비 등록 번호

라. 관련 분야 기여도

세부	항목	개발 전	개발 후
(1세부) 무선급전 경전철 시스템 통합 및 운용기술개발	무선급전 인버터	- 전력용량: 1MW - 모듈: 200kW 5모듈 - 부피: 13.87m3 - 스위칭소자: Si-IGBT	- 전력용량: 1.2MW - 모듈: 300kW 4모듈 - 부피: 4.92m3 - 스위칭소자: 신소재 SiC-MOSFET
	급전선로	- Litz-wire: 9,900가닥 - 코어형태: U형 코어 - 선로길이: 128m - 전류정격: 300A - 시공: 선로 판넬고정방식	- Litz-wire: 25,200가닥 - 코어형태: 코어리스 - 선로길이: 250m - 전류정격: 500A - 시공: 전용함체제작, 함체바닥설치기술, 평탄화 기술
	공진커패시터	- 커패시턴스: 1.34μF - 전력용량: 400kvar - 수입품 사용 (Alcon)	- 커패시턴스: 1.32μF - 전력용량: 450kvar - 국내기술로 국산화 (대동콘덴서공업)
	테스트베드 (시험선)	- 전용 테스트베드 없음	- 시험선 길이: 1.87km - 무선급전 역사: 3개소 - 운영시스템: WPTMS 개발
	종합효율 (무선급전 시스템)	82.7%	90.1%
(2세부) 무선급전 경전철 차량 인터페이스 기술개발	무선급전 경전철 차량 인터페이스 표준사양(안)	없음	- 무선급전 경전철 차량 개발 및 실용화를 위한 인터페이스 표준사양 (안) 도출
	무선급전 집전장치	- 200kW급 무선급전 집전장치  - 트램에 임시 설치하여 적용 가능성 검토	- 1MW급 경전철용 무선급전 집전장치  - 차량과의 인터페이스 및 장시간 운영을 고려한 설계 및 제작 - 공인인증 성능시험 및 4만km 이상의 동적시험을 통한 신뢰성 검증
	무선급전 경전전철 차량용 전원안정화장치	- 전차선/제3궤조 차량: 없음 - 배터리 차량: 정차 혹은 입고 상태에서 에너지 충전하고 주행 중에는 에너지 저장장치를 이용해 전력을 공급하는 전원안정화	- 가감속 주행 중에도 무선급전을 통해 전력을 공급 받으면서 추진 전력 공급, 제동 에너지 회생, 배터리 충방전을 동시에 유기적으로 수행하여 차량 전원을 안정적으로 관리할 수 있는 장치

		장치	 - 공인인증 성능시험 및 4만km 이상의 동적시험을 통한 신뢰성 검증
	무선급전 경전철 차량	없음	- 세계 최초 1MW급 무선급전시스템을 적용한 경전철 차량 개발  - 공인인증 성능시험 및 4만km 이상의 동적시험을 통한 신뢰성 검증
(3세부) 도시철도용 무선급전 시스템 안전기술 개발	급전 전기안전 기준	- 무선전력전송 분야 철도 인프라에 대한 표준 및 기준 부재 - 무선전력전송 분야 유지보수와 관련된 안전 요소에 대한 표준 및 기준 부재	- 무선전력전송 환경에 적합한 전기설비 기준(안) 제출 - 무선전력전송 전력설비 유지보수 관련 단체표준 제정
	집전 전기안전 기준	- 무선전력전송 분야 철도 차량에 대한 표준 및 기준 부재	- 무선급전 차량 시스템에 대한 집전 전기 안전기준(안) 제시
	급집전EMI 안전기준	- 경전철 무선급집전시스템 전자파장해(EMI) 및 전자파 내성(EMS) 시험방법, 방출 한계값, 관련 기준 부재	- 경전철 무선급집전시스템 전자파장해(EMI) 및 내성(EMS) 시험 방법 및 방출 한계값 도출 - 무선급전 차량 시스템에 대한 급집전 EMI 안전기준(안) 제시
	급집전 EMF 안전기준	- 경전철 무선급집전시스템 EMF 안전기준, 측정 및 평가방법 부재	- 무선급전 차량 시스템에 대한 급집전 EMF 안전기준(안) 제시 - 무선 급집전 경전철의 EMF 측정 및 평가 방법 마련

	급집전 EMI 안전성	- 무선급전철도 기술의 적용시 급집전 코일 및 전력 공급 장치로부터 발생하는 전자파로 인해 주변 장치에 대한 오동작 및 고장 유발 가능	- 무선급전 철도에서 발생하는 전자파의 저감을 통해 무선급전 철도에 대한 사용자의 안전성이 향상됨
	급집전 EMF 안전성	- 무선급전철도 기술의 적용시 인체에 대한 영향발생 가능	- 전자파가 인체에 미치는 영향을 저감하여 사용자가 안전하게 무선급전 철도를 이용할 수 있는 환경 조성 가능
	전기 안전지원통신 프로토콜 검증	- 무선 도시철도 전기안전 지원 통신 프로토콜 부재	- 기존 자동차 무선충전 표준인 SAE J 2847 및 IEC 61980을 기반으로 도시철도 무선 급집전 시스템에 최적화된 도시철도 전기안전지원 통신 프로토콜 개발 및 검증
	경제성 분석	- 무선급전 방식 경전철 시스템의 경제성 분석 및 편익 계산 방안 부재	- 무선급전 방식 경전철 시스템의 건설비 절감, 감전사고 감소, 유지보수비 절감을 제시하였으며, 기존철도시스템과 비교를 통하여 절감효과 및 편익 산정

4. 연구개발성과의 활용 계획 및 기대효과

가. 활용계획

○ 현재 국내에서 계획 중인 경전철 및 트램 노선에 경전철용 무선급전시스템 기술을 적용할 수 있도록 운영처와 지속적으로 협의 중이며, 개통 예정에 맞추어 개발일정을 최대한 단축 (실증 사업 완료는 노선 사업 착수 후 5년 내외일 것으로 예상)

표 118 국내 경전철 및 트램 추진 상황

구분	노선거리 (km)	차량시스템	진행 상황	개통 예정
강서선	21.3	트램	추진 중	2030년
하단녹산선	14.4	AGT	추진 중	2028년
C-Bay~Park선	9.1	트램	추진 중	2030년
기장선	7.1	AGT	추진 중	미정
정관선	12.8	트램	추진 중	미정
신정선	10.0	AGT	추진 중	미정
광주2호선 지선	5.5	AGT	추진 중	미정
위례트램	4.6	트램	2022년 착공예정	2025년
위례신사선	14.7	AGT	2022년 착공예정	2027년

○ 광주 2호선 1단계 AGT 경전철 완공예정이 2022 예정. 2호선 지선은 광주시청-기아자동차-고속터미널-무등경기장-광주역을 연결하는 황금노선으로 광주도시철도공사 및 광주시에서 무선급전 경전철 차량을 도입 준비중에 있음.



그림 437 광주2호선 노선도

○ 광주도시철도공사에서는 2호선 2단계 착공에 맞춰 지선에 국가 R&D를 통한 무선급전 경전철 시범사업을 추진을 요청하고 있어 무선급전 2단계 사업 “경전철 무선급전 실노선 실증사업” 예산 지원이 절실히 필요함.

○ 특히 위례선의 경우 노선길이가 4.6km 로 짧고 배터리를 이용한 시스템으로 검토되고 있으나, 비용이 과다하여 운영처에서는 여러 방안을 검토하는 중 무선급전에 따른 초기 투자비 및 운영비를 절감할수 있음을 인지하고 기술적 검토를 요청함.

○ 무선급전 기술검토

- 무선급전 시스템은 현재 1MW 급(급전인버터 1.2MW, 집전장치 1MW)으로 개발되어 경산 경전철시험선에서 4만km 주행시험을 완료함
- 현재 트램차량에 취부가능한 225kW 급으로 개발완료
- 차량 급집전을 위한 무선급전 3D 도면을 통한 인터페이스 기술 확보
- 무선급전 차량 장치 취부를 위해 레일면에서부터 여유공간 230mm 이상 확보
- 무선급전 차량의 급전시스템 이중화를 위해 225kW 급 2개를 트램 차량 하부에 취부함.
- 두 개의 무선급전 집전장치는 차량 취부 위치에 따라 무선급전 급전선로의 위치가 결정됨.

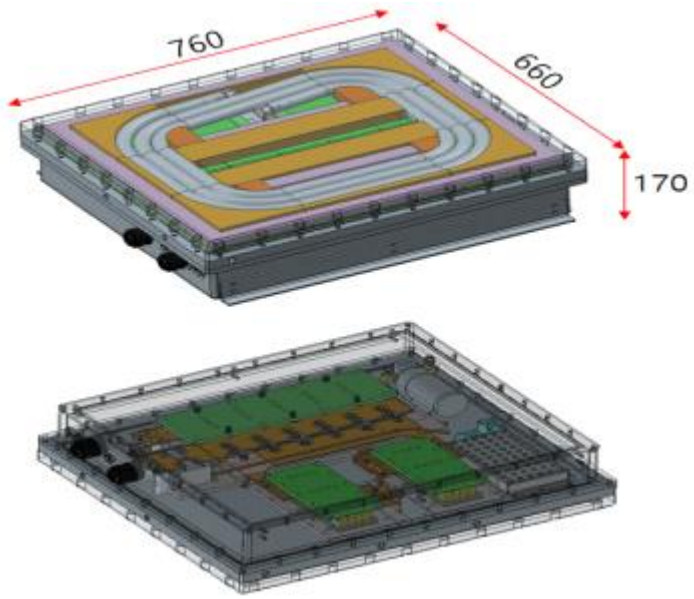


그림 438 트램차량용 집전장치(차상장치)

- 무선급전 지상 장치 설치를 위해 길이방향으로 1800mm 이상 확보하고 차상장치의 위치에 따라 지상장치의 위치를 결정하여 2개를 설치함.
- 무선급전 지상 장치 설치를 위해 깊이 방향으로 최소 200mm 이상을 확보하여 설치함.
- 무선급전 위치를 확인하기 위해 지상 및 차상센서를 활용하여 정차위치 오차 ±300mm 이내로 관리

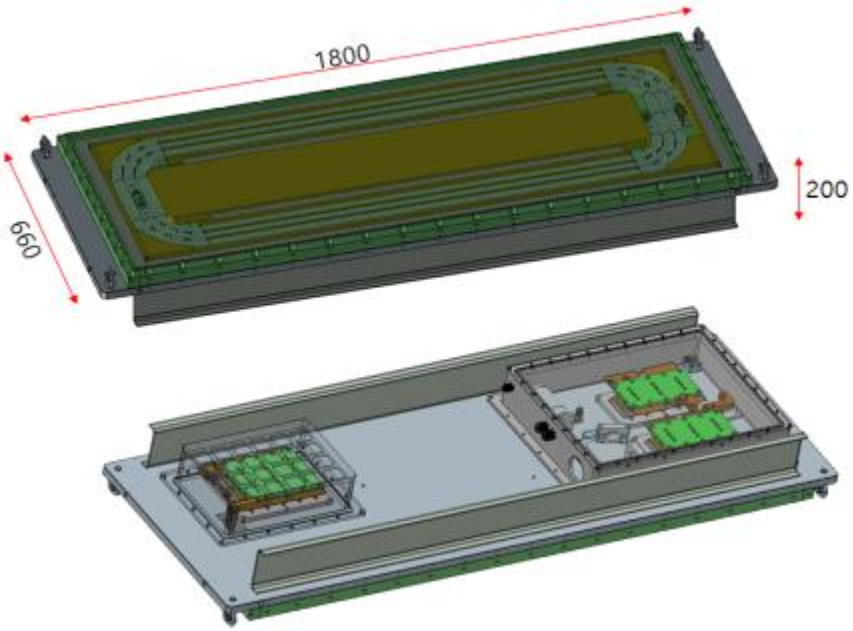


그림 439 트램차량용 급전장치(지상장치)

- 무선급전 전자장 해석 결과

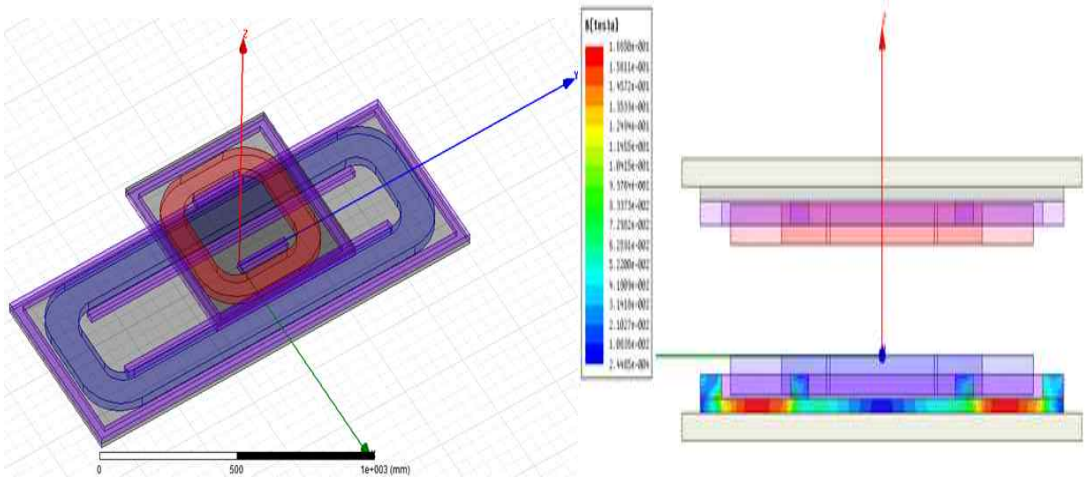


그림 440 트램차량용 무선급전 전자장 해석

○ 위례 트램차량 설치 검토

- 무선급전 집전장치는 트램차량에 적용하기 위해 집전장치는 상하로 집전코일 정류기 일체형으로 설계되어 제작되었음
- 트램차량 하부면과 레일상면의 여유공간은 약 200mm 로 공극 50~60mm 제외한 취부공간은 약 140mm 임.
- 최종 무선급전 집전장치는 트램차량의 여유공간에 적합한 두께 기존 170mm 에서 115mm 로 설계가능하며, 이는 집전코일과 ACDC 컨버터를 평행으로 배치함.

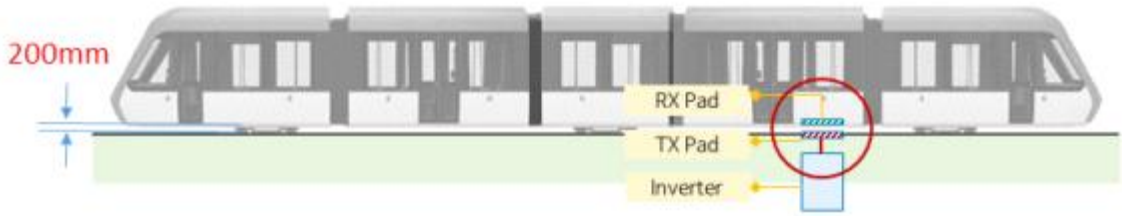


그림 441 트램차량 급집전 설치 위치도

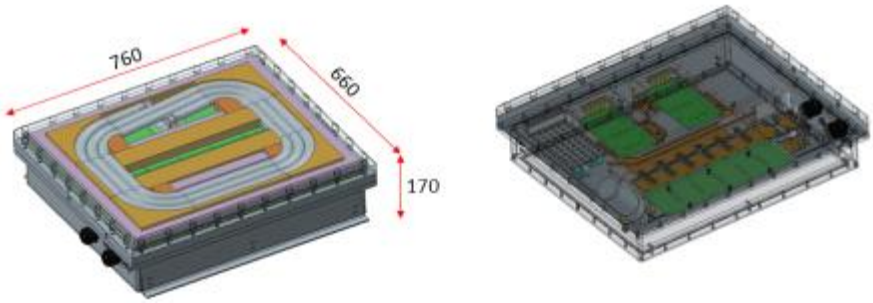


그림 442 기존 트램차량용 집전장치



그림 443 수정된 집전장치 외형도

- 트램차량 무선급전 하부 취부 공간검토

표 119 부산 용호선 트램차량 기준 하부 공간검토

항목	기존시스템	개선 시스템(안)	비고
바닥높이(A)	350	350	
언더프레임 두께(B)	150	150	
하부여유공간(C)	200	200	C = A - B
집전장치(D)	170	115	
차상픽업상치의 상하진동 최대폭(E)	30	60	
여유공간(F)	0	25	F = C - (D + E)

- 결론 : 차상집전장치내에 DC-DC 컨버터를 설치하면서 폭을 115mm로 설계하여 여유공간 25mm가 확보되므로 오륙도 트램 차량에 취부함에 문제 없음.

○ 무선급전 운영기술검토

- 트램적용 무선급전 용량 및 시뮬레이션 조건

· 무선급전 용량은 450kW (225kW * 2EA)

· 무선급전 전원안정화장치 용량은 100kWh 이상 검토

· 무선급전 급집전 길이는 1.8m

· 무선급전 최적화를 위해 위례광장 이외에 설치 검토



그림 444 위례트램 무선급전지상인버터 위치선정(안)

- 트램적용 무선급전 운행조건별 시뮬레이션

· 만차하중 정상 조건에서 운전 (최대충전시간 5분이내)

· 정상상태 조건에서 무선급전 1회 왕복 운전시 배터리 SOC 약 5% 상승됨.

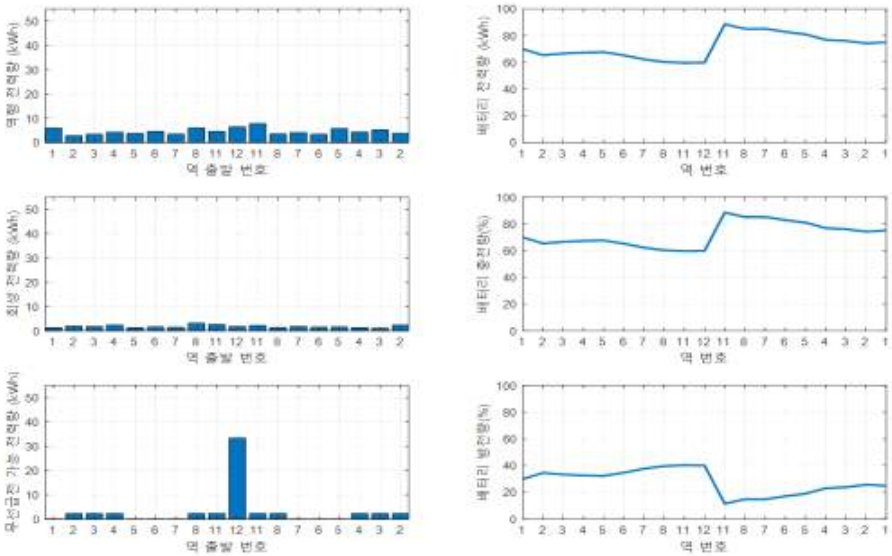


그림 445 위례트램 무선급전 정상상태 운행

· 트램차량 집전장치 2개중 1개 고장

집전장치 2개중 1개 고장시 300kW 용량으로 집전가능하며, 최종 SOC 61% 임.

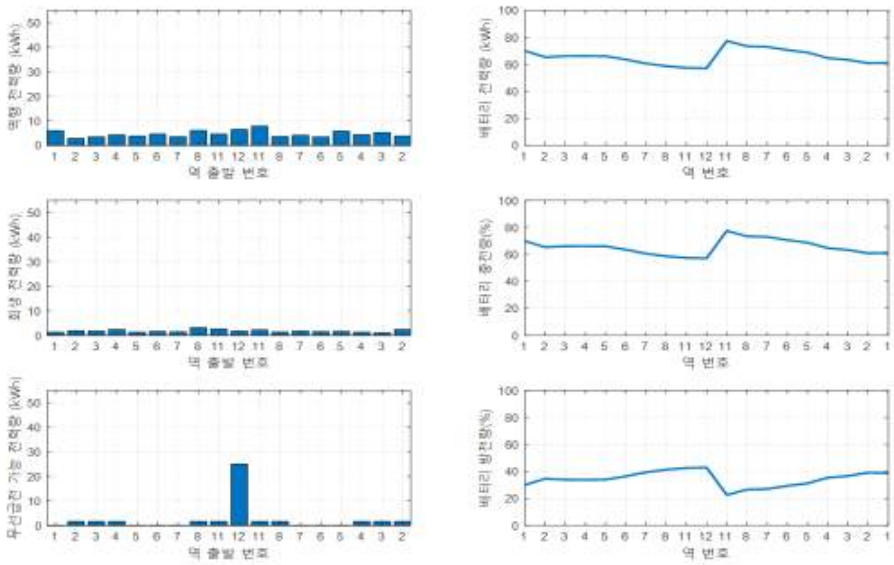


그림 446 위례트램 무선급전 집전장치 고장 상태

· 112역 충전소 고장

112역 충전소 고장 무선급전 1회 왕복운전시 최종 SOC 72%

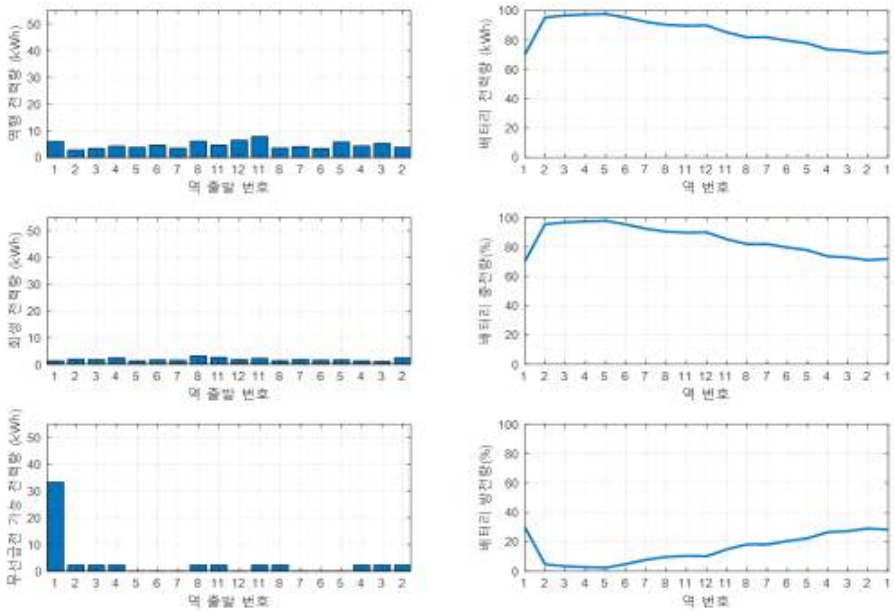


그림 447 위례트램 무선급전 급전인버터 고장 상태

· 104역, 108역 충전소 고장
가장 취약한 연속 무선급전충전 고장시에도 최종 SOC 66% 안정적임

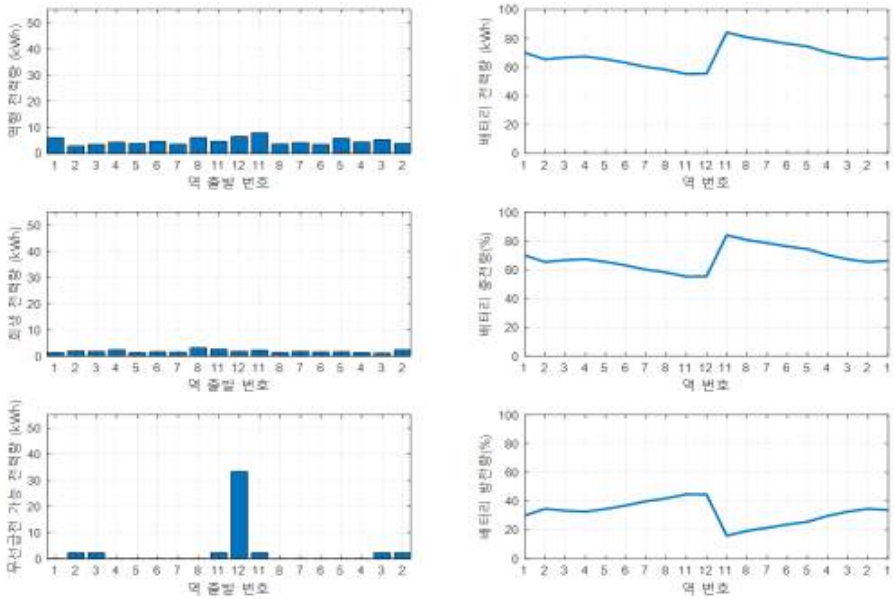


그림 448 위레트램 무선급전 급전인버터 중간역 고장 상태

· 101역, 102역, 103역, 104역 충전소 고장 (기지 변전소 고장)
기지 변전소 고장으로 4개역 연속으로 충전이 불가 할 경우에도 최종 SOC 61% 임.

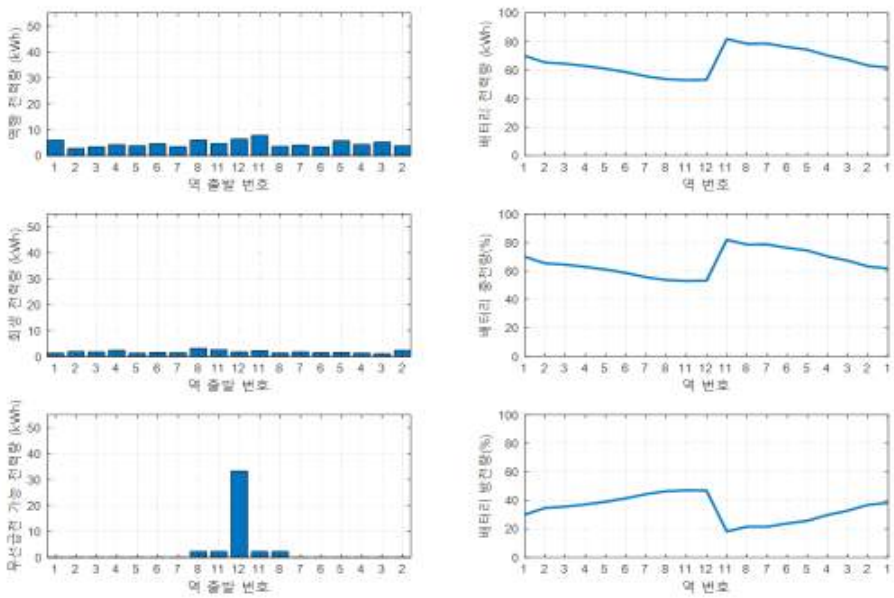


그림 449 위레트램 무선급전 기지변전소 고장 상태

· 108역, 111역, 1123역 충전소 고장 (112 변전소 고장)
112 변전소 고장으로 3개연속 충전 불가시에도 최종 SOC 63%

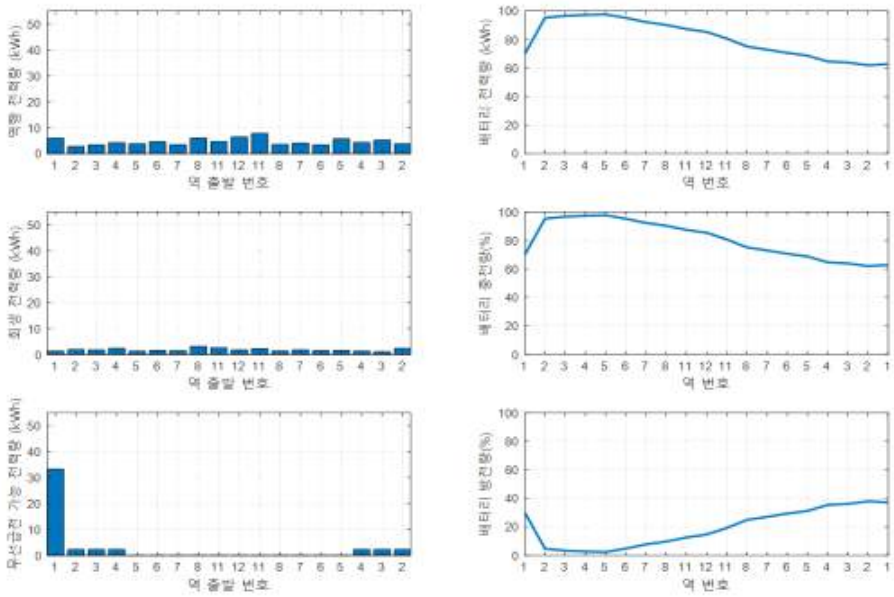


그림 450 위례트램 무선급전 112변전소 고장 상태

· 검토결과 : 무선급전시스템의 모든 상정사고 조건에서도 1회 왕복 운전은 문제 없음. 집전시스템 1개 고장시 1회 왕복 운전후 예비차량으로 교체

○ 무선급전 운영시스템 인터페이스 기술검토

- 무선급전 지상시스템 운영 조건

· 지상 무선급전시스템은 차량이 무선급전 지상선로에 진입이 완료된 경우 지상선로에 신호를 보내어 동작하게 함.

· 지상 무선급전시스템은 차량이 무선급전 지상선로에서 차량이 진출이 완료된 경우 지상선로에 신호를 보내어 동작하지 아니하게 함.

· 무선급전 지상 차상 자동동작 신호 제어는 무선급전운영시스템에서 제어하고, 관련 정보는 종합운영사령시스템과 인터페이스 함

· 무선급전 지상-차상 운영조건

○ 무선급전 운영인터페이스 검토

	급전선로1 (지상장치)	급전선로2 (지상장치)	집전장치1 (차상장치)	집전장치2 (차상장치)
차량 역사 정차	O	O	O	O
차량 역사 출발	X	X	X	X
급전선로2 고장	O	X	O	X
집전장치1 고장	X	O	X	O

○ 무선급전 전기설비 기술검토

- 기존 검토된 설비용량은 10편성기준으로 설정되어 있음.
- 이에 차량기지변전소 8MVA, 110 변전소 8MVA, 112 변전소 5MVA 로 선정됨
- 최대 부하용량 기준 변전소 용량 [kVA]

○ 기존안

표 120 위례트램 변전소 구성안

구 분	수전 1 (차량기지)	수전 2 (110정거장)	수전 3 (112정거장)
정상시	6 000	2 000	3 000
수전 1 사고시		8 000	3 000
수전 2 사고시	8 000		5 000
수전 3 사고시	6 000	5 000	
수전용량 선정 (MAX)	8 000	8 000	5 000

- 제안된 변전소 설비용량은 8편성기준 설정되어 있음.

○ 제안안

표 121 위례트램 무선급전 적용시 변전소 구성안

구 분	수전 1 (차량기지)	수전 2 (110정거장)	수전 3 (112정거장)
정상시	5 000	-	-
수전 1 사고시		-	-
수전 2 사고시	-		-
수전 3 사고시	7 000	-	
수전용량 선정 (MAX)	**7 000**	-	-

- 제안된 변전소 설치 위치 및 무선급전 방식

· 기본설계안

1차안 (2개소) : 기지변전소, 108역변전소

2차안 (3개소) : 기지변전소, 110역변전소, 112역변전소



그림 451 위례트램 변전소 구성안

· 무전급전안

기지변전소 및 7개역사에서 한전으로부터 수전



그림 452 위례트램 무선급전 적용시 변전소 구성안

- 검토결과

· 부하용량 1MW 미만은 저압수전(380V) 가능 (변압기설치공간 2m X 2m 필요)

· 용량 1MW 이상은 22.9kV 전압으로 수전하여 수전변전소 필요

· 무선급전 트램은 7개역사에 500kW 급 저압수전으로 운용가능하기 때문에 기지변전소 1개소로 운영가능함.

· 배터리 트램은 110역, 112역 에서 1MW 급 고압수전으로 운용하기 때문에 기지변전소 및 110역, 112역 수전변전소 3개로 운영 계획함.

○ 세부과제 간 연구내용 및 성과 연계 전략

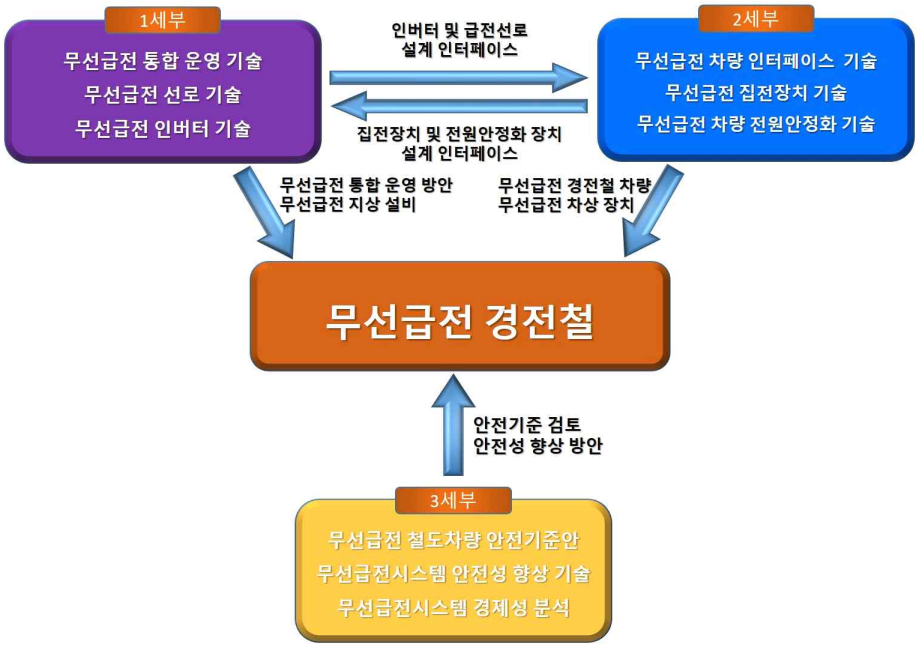


그림 453 세부과제 간 연계 전략

○ 해외시장 진출을 위한 인증

- SIL 인증

· Safety Integrity Level의 약자로 현장에 설치되는 계기설비의 안전 등급을 나타낸 것

· IEC 61508 표준에 사용되고 있는 기준으로 국내외 발주시 SIL 등급을 요구하고 있음

· 4등급으로 구분되어 있고, SIL4가 가장 높은 등급임

· SIL1: 1~100년 사이에 예상치 못한 장애 발생 가능

· SIL2: 100~1000년 사이에 예상치 못한 장애 발생 가능

· SIL3: 1000~10000년 사이에 예상치 못한 장애 발생 가능

· SIL4: 10000~100000년 사이에 예상치 못한 장애 발생 가능

- 국제철도산업표준 (IRIS) 인증

· International Railway Industry Standard의 약자로 유럽 철도산업협회 UNIFE가 ISO9001을 기반으로 철도산업분야의 특화된 요구사항을 만족시키기 위해 제정한 표준이며 이후에 국제 규격 ISO/TS22163으로 승격된 품질 규격임

· 철도차량용 전장품 등의 품질인증제도로서 해외 진출 시 필요한 인증

· 인증기관은 TUV라인란드. SGS등이 있고 IRIS는 철도산업공급 업체에 동일한 언어, 동일한 지침, 상호 검사 인증을 제공함

· IRIS 항목: 고객 관계 관리, 요청 관리, 프로젝트 관리, 개발, 공급 사슬 관리 (아웃소싱), 형상관리, 초도품 검사(FAI), RAMS (신뢰성, 가용성, 유지보수성, 안전성) LCC (수명주기 비용), 지식관리 등

나. 기대효과

○ 전차선이 필요 없는 무선급전시스템의 도입으로 경전철 초기 공사비 및 유지보수비 절감에 활용

- 제3궤조 방식의 경전철의 경우 12억/km이나 무선급전적용시 8억/km로 절감가능함.
- 무선급전시스템(급전인버터, 급전선로, 집전장치 등)은 전자장비로 마모가 심한 전차선 및 3궤조 방식에 비해 유지보수 비용이 약 20% 절감이 가능함.

○ 전차선 제거로 터널단면 약 20% 축소를 통해 터널 건설비의 15% 절감 가능하여 지하구간이 많은 경전철 건설비 저감에 활용

○ 배터리 용량에 따른 운행거리 제한 해소에 활용가능

○ 세계 최초 경전철용 무선급전 기술 적용을 통한 국내·외 첨단 철도 선진국으로서의 위상 제고 기대

○ 상부 전차선 제거로 철도 건설비, 유지보수비 저감, 도시 경관과의 조화 등 환경성 개선, 감전사고 위험감소 등 안전성 향상이 가능하며, 이를 통해 국민행복을 위한 안전하고 경제적인 철도건설을 기대

○ 전차선이 필요 없는 무선급전시스템의 도입으로 경전철 초기 공사비 및 유지보수비 절감 기대

○ 경전철용 무선급전 시스템은 회생 제동기술이 기본적으로 동반되며, 제동 시 저장한 에너지를 가속 또는 운행 시 재사용으로써 에너지 사용량 감소 기대

○ 세계 최초 1MW 대용량 경전철 무선급전 적용 실적을 통해 기술적 우위를 선점하고, 이를 바탕으로 해외 무선급전 경전철 시장에 진출 기대

다. 선진기술수준과의 기술격차

○ 봄바디어 Primove는 노면전차인 경량전철로서 도심지내의 전력선들을 제거하고자 비접촉식 자기유도방식을 적용하였음.

○ 봄바디어 Primove 모델은 급전선로 8m, 급전용량 200kW, 집전모듈 100kW 2대, DC/DC로 설계되었음.

○ 20kHz의 교류전류가 급전라인을 통해 흐르게 되면, 자기장이 만들어지고, 차량 하부에 장착된 픽업 모듈 내의 코일에 유기 전압이 발생하여 에너지가 전달됨.

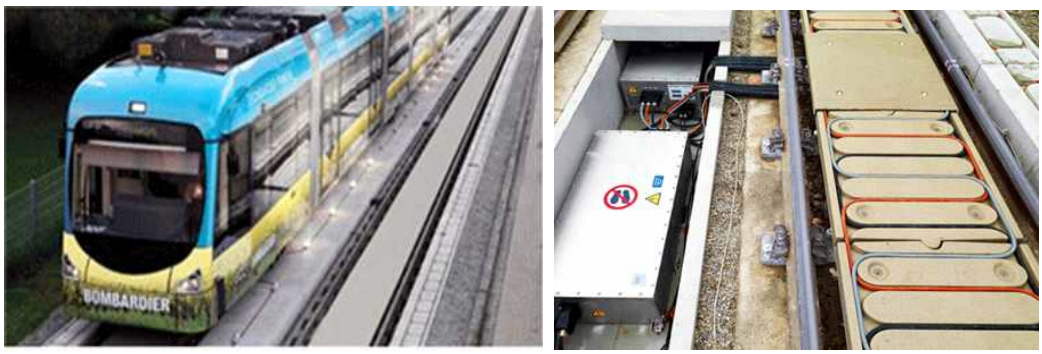


그림 454 Primove 차량 독일 Augsburg에서 설치된 3상 급전 라인 및 인버터

○ Primove 3상 급전라인은 단상 급전라인과 비교하여 같은 전류 크기를 사용시 약 1.7배 큰 전력을 공급할수 있지만, 단상과 비교하여 전선의 길이는 3배 더 필요한 단점이 있음.

○ 3상 급전라인의 각 상에 흐르는 전류의 방향이 서로 180도 반대로 형성되어 자기장이 서로 상쇄되기 때문에, 선로(Track)에 유기 전압이 거의 발생하지 않음.

○ 8m의 급전라인들은 서로 직렬로 연결되어 있으며, 차량이 진입하기 전에 미리 전력을 공급하여 차량 진입 시 전력이 끊임없이 공급되도록 설계됨. 또한 차량이 급전 세그먼트를 벗어남과 동시에 전력을 차단하여 외부로의 불필요한 자기장 유출을 막음.

○ 스페인 CAF 사에서는 Luxtram에 50kW 급 무선급전을 설치하여 전차선이 없는 구간에서 무선급전으로 차량의 전력을 공급받는 방식을 시험하고 있음. 2018년도에 인증시험을 완료하여 상용화 적용을 검토하고 있음.

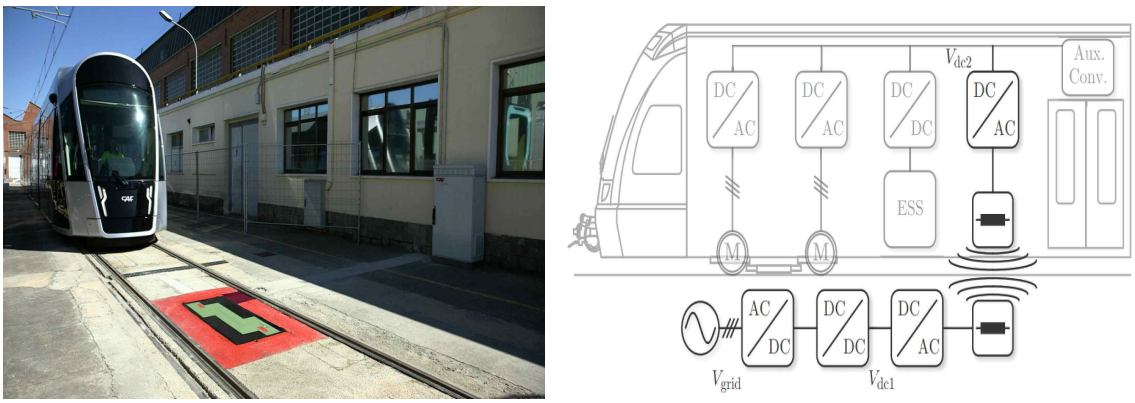


그림 455 CAF(스페인) Luxtram의 50kW 실증 및 인증시험 (2018년)

○ 일본 철도종합연구소(RTRI) 철도차량용 무선급전 적용성 검토를 위해 프로토타입 시험을 진행완료하여 실용화를 위한 기술검토를 추진중에 있음. 철도차량 적용을 위한 집전용량 300kW, 750V 공극 75mm 로 설계하여 실용화 검토 중에 있음.

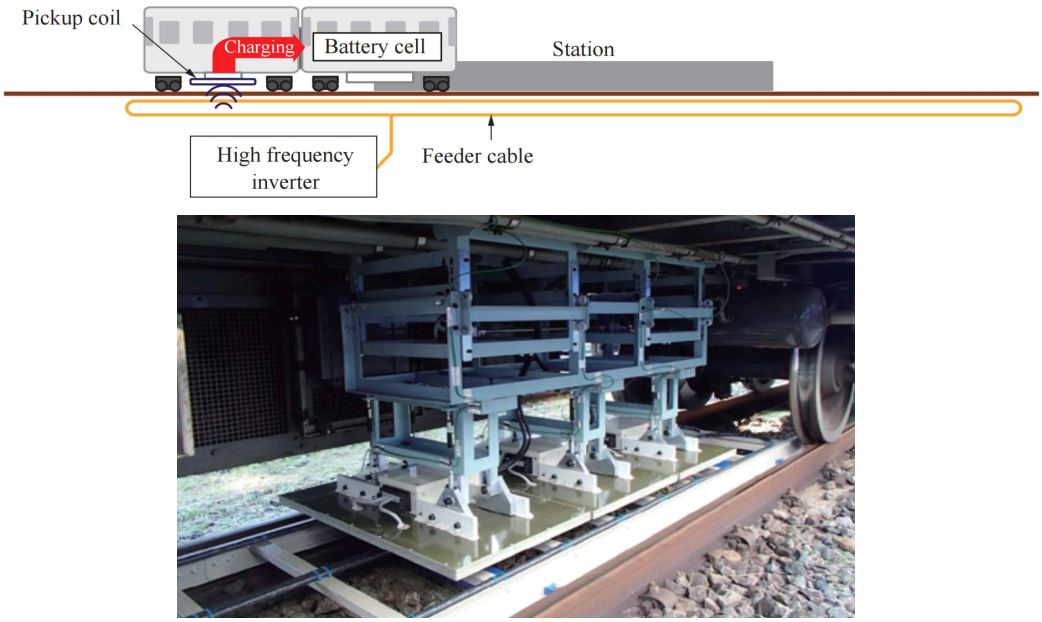


그림 456 일본 철도종합연구소에서 300kW 급 무선급전 실증시험 (2016년)

○ 독일, 스페인, 일본 등 철도선진국에서는 무선급전을 철도차량에 적용하기위해 연구개발에 또는 실용화를 위해 노력하고 있어 국내에서 개발된 최신 무선급전 기술을 적용해 철도 선진국 이미지 확산 및 시민의 안전한 철도 이용이 가능함.

○ 국내 무선급전기술은 세계최초 1MW 급 전송이 가능한 시스템으로 이는 외국의 시스템에 비해 상당히 높은 기술로 평가되고 있으며, 또한 하나의 급전선로로 250m를 전송할 수 있어 경제적인 관점에서도 상당히 유리함.

○ 국내 무선급전기술과 봄바디어 Primove 무선급전 기술 비교

- 기존 선진국 대비 국내 무선급전 기술은 세계최고 기술로 세계 무선급전 기술을 리딩하고 있음
- 현재 기술개발 추진한 독일 봄바디어사에 비해 국내 무선급전 개발품은 용량이 약 10배, 급전선로 길이가 약 30배 정도로 기술개발이 우수함. 봄바디어사의 3상 방식에 비해 급전선로 및 인버터가 약 2/3 로 감소하여 설치비용도 약 20% 저렴함.

표 122 무선급전시스템 국외시스템 기술비교

항 목	철도연 무선급전	봄바디어 무선급전	기술 우위
전송 주파수	60kHz	20kHz	120%
전송 용량	250kW * 4EA	100kW * 2EA	110%
전송 방식	단상	3상	100%
전송 효율	92%	90% 추정	110%
인버터	1대/역당	10대이상/역당	120%
장점	- 고주파 전송으로 대용량 가능 - 단상시스템 사용으로 구조 단순화 - 급전인버터 수량 축소로 가격 경쟁력 확보	- 3상 방식으로 전송용량 증가 - 자계상쇄 방식을 통한 선로 유기기전력 최소화	120%
단점	- 고주파 전송으로 EMF 발생량이 증가하지만, 차단설계, 고효율 EMF 제어등으로 국내/국제 규정을 만족함.	- 인버터 및 3상 선로 적용으로 시스템 가격 상승 - 구조가 복잡하고 용량증대 한계	95%

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

210㎜×297㎜[백상지(80g/㎡) 또는 중질지(80g/㎡)]