발간등록번호
11-1613000-001099-01

기술료사업

R&D-14ENGF-C067989-02

리니어펄스모터 기반 철도차량 추진시스템 원천기술 개발

2015. 11

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
위탁연구기관 / 건국대학교
서울도시철도공사
한국철도시설공단
한양대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제출문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

이 보고서를 “리니어펄스모터 기반 철도차량 추진시스템 원천기술 개발”과제의 보고서로 제출합니다.

2015. 11.

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원
주관연구책임자 : 이 병 송 수석연구원
연 구 원 : 이 우 동 책임연구원
〃 : 김 명 룡 책임연구원
〃 : 박 춘 수 수석연구원
〃 : 이 수 길 책임연구원
〃 : 최 강 윤 수석연구원
〃 : 백 남 욱 책임연구원
〃 : 문 대 섭 책임연구원
〃 : 이 준 호 책임연구원
〃 : 김 재 희 선임연구원
〃 : 정 신 명 선임연구원
〃 : 이 승 환 선임연구원
〃 : 백 제 훈 선임연구원
〃 : 이 경 표 선임연구원

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>14ENGF-C
067989-02</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2014.11.11.~
2015.11.10.</td><td>단 계 구 분</td><td>2차년도/
2차년도</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">기술료사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">리니어펄스모터 기반 철도차량 추진시스템
원천기술 개발</td></tr>
<tr><td>단위과제명</td><td colspan="4">리니어펄스모터 기반 철도차량 추진시스템
원천기술 개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>이 병 송</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 69명
내부 : 29명
외부 : 40명</td><td>총연구비</td><td>정부: 2,193백만원
기업: 천원
계: 2,193백만원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국철도기술연구원
무선급전연구팀</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">지상에서 추진전력을 공급하므로 가공전차선 설비가 불필요해지고, 그에 따라 기존 철도 시스템보다 건설비 저감, 유지보수비 저감이 가능한 LPM 추진시스템은 그 구조적인 특징에 의해 가감속 성능 우수, 비점착 구동에 의한 등판능력 우수, 차량 경량화에 따른 높은 에너지 효율 등 많은 장점을 갖는다. 본 보고서에서는 철도차량용 LPM 추진시스템의 원천기술 개발을 위한 기초기술을 확보하고, Test-Bed를 통해 실증하는 기술 개발을 진행하였다. 철도차량용 LPM 추진시스템 원천기술 개발을 위해 5개의 세부 연구 테마를 도출하여 진행하였고, 축소모형/실모형 Test-Bed를 구축하여 제안 기술을 검증/평가하였다. 원천기술 개발과 함께 기술 실용화를 위한 초석으로 LPM 추진시스템의 BOM 체계 구축 및 유지보수 방안을 마련하여 실용화 가능성을 검토하였다. 5개의 세부 연구 목표는 다음과 같다.
○ 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술 확보
○ 축소형 LPM 추진시스템
○ 실모형 LPM 추진시스템
○ LPM BOM 시스템 구축
○ LPM 추진시스템 실용화 검토</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">리니어펄스모터, 추진시스템, 추진인버터, 차상 집전, 전력시스템</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Linear pulse motor, Propulsion system, Propulsion inverter,
On-board power collection, Power system</td></tr>
</table>

요 약 문

I. 연구개발과제 개요

(1) 연구의 배경

○ 세계적으로 꾸준히 증가하는 철도 건설 및 수요에 대응하기 위하여 교통수단의 다양화가 요구되고 있으며, 팬터그래프와 가공차선을 이용한 접촉식 전력공급장치의 터널 건설비용 증가, 점착 구동방식의 열차 속도 한계, 도심내 전력선의 미관 침해 및 위험성 증대 등이 이슈인 점에서 새로운 친환경적인 미래형 전기철도 추진시스템의 개발이 필요한 상황임

○ 기존 철도차량 추진시스템은 다음과 같은 단점을 가지고 있음
- 접촉식 전력공급에 따른 터널 건설비 및 유지보수비용 증가
- 점착 구동 방식에 따른 급가속 혹은 초고속화의 어려움
- 전력변환장치 및 회전형 견인전동기/기어 장치의 차량 탑재에 따른 부피/무게 증가로 에너지 효율 저하
- 도심내 전력선의 미관 침해 및 위험성 증대

○ 이러한 기존 철도차량 추진시스템의 문제점을 일시에 소거할 수 있는 신개념의 미래형 전기철도 추진시스템 개발의 필요성이 대두하였고, 그 방법으로 리니어펄스모터(LPM, Linear Pulse Motor) 추진시스템의 원천기술 개발이 시급함

○ LPM 추진시스템은 다음과 같은 장점을 가지고 있음
- 가감속 성능 우수 및 비점착 구동에 의한 등판능력 우수
- 저속에서 초고속까지 모든 속도영역에서 주행 가능
- 차량 경량화에 따른 높은 에너지 효율
- 가공전차선 설비가 불필요하여 기존 철도시스템보다 건설비 및 유지보수비용 저감 가능

○ LPM 추진시스템은 철도의 첨단화와 초고속화 달성은 물론 친환경적인 미래형 교통수단으로서의 파급효과가 크므로, 본 과제를 통하여 LPM 추진시스템 설계기술 확보 및 조합 성능평가를 위하여 기술적으로 데모가 가능한 실대차 Test-Bed를 구축함

○ 새로운 기술이 접목된 미래형 교통수단의 핵심 기술 개발을 통한 시장 주도 및 국가의 위상 제고 선도가 가능

○ 본 핵심 기술은 기술 개발 초기 단계이므로, 기술 개발에 성공할 경우 세계 시장 선도는 물론, 수출산업화가 가능하여 녹색 철도교통시스템의 해외 진출 활성화에 크게 기여할 것으로 기대

(2) 연구개발 목표 및 범위

○ 본 연구개발을 위하여 세부 내용을 분류하였으며, 총 5개의 연구개발 목표를 설정함

- 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술 확보
  ▷ LPM 추진시스템의 철도적용 타당성 평가
  ▷ 철도차량 추진을 위한 LPM 기초기술 연구

- 축소형 LPM 추진시스템
  ▷ 축소형 LPM 추진시스템 개발
  ▷ 축소형 모델 해석 연구
  ▷ LPM 추진시스템 분석 및 토크 리플 저감 연구

- 실모형 LPM 추진시스템
  ▷ 실모형 LPM 추진시스템 설계 및 제작
  ▷ 실모형 LPM 추진시스템 해석 모델 구축
  ▷ 철도차량용 LPM 추진시스템 성능평가

- LPM BOM 시스템 구축
  ▷ LPM BOM 시스템 구축(안)
  ▷ 유지보수 체계 구축(안)

- LPM 추진시스템 실용화 검토
  ▷ 철도종합시험선로 Test-Bed 구축(안)
  ▷ LPM 추진시스템 전원공급 방안

II. 연구 성과 요약 및 활용방안

(1) 연구개발 핵심성과

○ 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술 확보
- 철도차량용 LPM 추진시스템의 정책적, 기술적, 경제적 타당성 제시
- LPM 추진시스템의 모델링, 제어기법, 시뮬레이션 등 기초기술 연구

○ 축소형 LPM 추진시스템 설계 및 제작
- 축소형 LPM 추진시스템 개발

- 축소모형 해석 모델 구축 및 성능 예측
- LPM 추진시스템 특성 분석 및 토크 리플 저감 기법 연구

○ 실모형 LPM 추진시스템 설계 및 제작
- 실모형 LPM 추진시스템 개발
- 실모형 해석 모델 구축 및 성능 예측
- 개발된 LPM 추진시스템의 성능평가를 통한 기술 검증

○ LPM BOM 시스템 구축
- LPM BOM 프로그램 구축
- LPM 추진시스템의 유지보수 체계(안) 제시

○ LPM 추진시스템 실용화 검토
- 철도종합시험선로내에 LPM 추진시스템 Test-Bed 구축 방안 제시
- Test-Bed에 설치될 LPM 추진시스템 전원공급 방안 제시

(2) 연구개발 효과

○ 본 과제를 통해 기존 철도의 속도향상을 저해하는 전차선 및 차량에 탑재되는 추진장치를 제거하여 에너지 소모량을 저감하는 경제적인 철도시스템 운영 가능

○ 철도차량 추진시스템 분야 선도 원천기술의 독자개발 및 세계적 기술우위 선점이 가능하여 무가선, 비점착, 순시제동, 자동위치검지 등의 기능을 갖춘 철도차량 추진시스템 핵심기술 개발 및 상용화 실현 시 기술 선도 가능

○ LPM 추진시스템을 기존 철도차량에 적용함으로써 차량의 경량화, 등판능력향상, 터널단면적 축소 등 인프라 비용 절감

○ 도시 이미지를 훼손하는 전차선이 불필요하여 도심환경의 심미성을 향상시킬 수 있고, 도시 내 전차선을 제거하여 도시의 경관과 조화를 이룰 수 있어 첨단시설이라는 이미지 제공이 가능하여 도시의 이미지 메이킹 가능

○ 기존 추진시스템에서 탈피하여 새로운 추진시스템의 활성화에 따른 철도문화 개선 및 국가 경쟁력 향상

(3) 연구성과 활용방안

○ 저심도철도의 급구배 등판 시 부족한 추진력을 보완하는 기술로 활용

○ 산악 트램 및 놀이시설의 롤러코스터 등 급구배 추진이 요구되는 타 수송수단에 적용

○ 미래 전기철도 추진시스템의 핵심 기술 개발을 통해 성능 검증 및 효율적 활용에 대한 운영 모델로 활용

○ 국내외에서 추진되고 있는 비점착 구동 추진시스템을 위한 핵심기술 및 핵심 장치 개발에 활용

○ 철도 운영기관에서의 신 비즈니스 모델 창출에 활용하여, LPM 추진시스템을 적용한 물류운송시스템 개발 시 매립형 궤도를 이용하여 타 지상교통수단에 장애를 주지 않고, 물류운송 네트워크 구축 가능

III. 연구개발 수행 내용 및 결과

(1) 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술

○ LPM 추진시스템의 철도적용 타당성 평가
- 국가에서 추진하고 있는 신성장 동력 및 녹색 성장 관련 정책, 철도 관련 정책 및 규제를 탐색하여 LPM 추진시스템 기술개발의 타당성을 정책적, 기술적, 경제적인 측면에서 분석하였음
- 타 선형전동기 및 기존의 철도차량 추진시스템과 비교하여 차량 경량화, 제어 단순성, 열차제어시스템과의 결합 등 시스템 구축 측면 및 경제성 등에서 우수하며, 특히 유지보수 측면에서 기존차량 대비 23% 수준일 것으로 예측

○ 철도차량 추진을 위한 LPM 기초기술 연구
- LPM 추진시스템의 경우 BLDC 전동기에서 구동원리를 찾을 수 있고, 이를 토대로 LPM 추진시스템 모델링 진행
- 고정자 전압방정식은 2극의 회전기기로 생각하여 유도할 수 있으며, 이를 기반으로 토크 방정식 등을 도출하고, 회전기기와 선형기기 사이의 변환을 위한 변환식 유도
- LPM 추진시스템의 역기전력은 그 구조의 특성 상 근사 사다리꼴 형태로 발생하며, 따라서 구형파 전류제어방법이 토크 리플 저감 측면에서 유리
- LPM 추진시스템 모델링을 기반으로 그 특성을 살펴보기 위해 전류제어기를 설계하고 시뮬레이션 모델을 구축
- 실모형 설계 파라미터를 이용하여 시뮬레이션한 결과, 지상 코일에 2,000A를 공급할 경우 발생되는 추력은 약 5kN이 될 것으로 예측

(2) 축소형 LPM 추진시스템

○ 축소형 LPM 추진시스템 개발
- 인버터, CPU보드, 게이트 보드 등 축소형 LPM 추진시스템의 사양을 결정하고, 설계 및 제작 진행
- 전류 제어를 위해서는 대차의 위치정보가 필요하고, 이를 위해 위치센싱용 홀센서 및 대차에 부착된 영구자석을 이용하여 구성

○ 축소형 모델 해석 연구
- 축소형 모델의 파라미터를 이용하여 2차원, 3차원 유한요소해석 모델 구축하여 축소형 모델에 대한 성능 예측
- 역기전력 시뮬레이션 결과와 실측한 데이터를 비교한 결과 그 결과가 유사함을 확인하여 해석 모델의 정확성 검증
- 해석 모델에 전류 200A를 인가하여 추력을 예측한 결과 2차원 모델의 해석결과는 4.65N, 3차원은 5.05N의 추력을 보였고, 실제 실험에서는 전류 150A에서 약 3.9N의 결과를 보임
- 해석 결과와 실제 실험에서의 차이는 지상 코일에 투입한 전류의 차이에서 기인하며, 동일한 전류를 인가하였을 경우 해석 결과와 실험 결과가 근사한 결과를 얻을 것으로 예상

○ LPM 추진시스템 분석 및 토크 리플 저감 연구
- LPM 추진시스템은 지상 코일 권선설치 방식으로 인해 A상과 B상의 역기전력이 동일하게 나타나지 않음
- 이는 공극 길이의 변화로 인하여 각각의 상 권선에 쇄교하는 쇄교자속의 최대치가 다르기 때문임
- 따라서, A상과 B상에 동일 전류를 흘릴 경우, 역기전력의 차이만큼 토크 리플이 발생함
- 토크 리플을 저감하기 위해서는 각 상의 전류를 역기전력의 차이만큼 차이를 두어 인가하여야 하며, 토크 리플을 최소로 하는 전류 제어 기법 제안
- 제안 방법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 모의 실험을 진행하였고, 보상 기법 적용 전과 후의 토크 리플 편차는 약 77%에서 약 48%로 29%의 리플 감소 확인

(3) 실모형 LPM 추진시스템

○ 실모형 LPM 추진시스템 설계 및 제작
- 지상 LPM 추진시스템 설계 및 제작
  ▷ 지상 코일은 전류가 통전하여 이동자의 자기장과 반응하여 힘을 발생하는 장치임
  ▷ 2상 2열 구조로 설계하였으며, 통전 최대 전류는 2,000A 기준임
- 차상 계자용 전자석 설계 및 제작
  ▷ 차상 전자석에는 DC전류가 공급되어 일정한 자기장을 만들어 지상 코일과 상호작용으로 힘을 발생하는 장치임 (8극으로 제작)
- 차상 전원용 전원공급시스템 모듈 설계 및 제작
  ▷ 차상 계자 전자석 및 기타 전력소모장치에 전원을 공급하기 위한 전원장치 제작

▷ 유도집전방식은 집전코일이 차량의 이동방향에 따라 지상코일이 생성하는 직류자계 안에서 역기전력이 유도되는 점을 이용

▷ 차상의 각족 전자부품 및 전자석에 전력을 공급하기 위해 배터리 및 배터리 충전을 위한 충전기, 정전류 공급을 위한 전력변환장치를 제작

- 지상 대전류 공급용 전력변환장치 모듈 시작품 설계 및 제작

▷ 지상 대전류 공급용 전력변환장치는 컨버터, 인버터, 냉각장치, 위치센서, 브레이크 시스템, 표시장치 등의 6가지 구성품으로 구성

▷ 표시장치의 경우 모든 구성품으로부터 정보를 받아 사용자에게 표시해 주며, 사용자로부터 입력을 받아 LPM 추진시스템을 제어하는 역할을 수행하여 최종적으로 실대차를 사용자가 편리하게 운행할 수 있도록 함

- 실대차 제작 및 시스템 통합

▷ 실대차는 LPM 추진시스템의 차상 장치를 장착하여 주행하는 장치로, 위치검출용 영구자석, 차상 전자석, 배터리, 전력변환장치, 브레이크 시스템 등을 탑재하고 있음

▷ 일반 철도차량의 대차와는 다르게 하나의 차륜에 하나의 차축을 적용하는 액슬레스 차축을 채용하여 곡선구간 통과 시 성능향상 및 소음 저감에 감점이 있음

○ 실모형 LPM 추진시스템 해석 모델 구축

- 실모형 모델의 파라미터를 이용하여 2차원, 3차원 유한요소해석 모델을 구축하여 실모형 LPM 추진시스템의 성능 예측

- 해석 모델에 전류 2,000A인가할 경우, 2차원, 3차원 모두 추력은 약 3.6kN을 보였으며, 리플은 다소 큰 60%를 갖는 것을 확인하였다. 큰 리플은 진동이 심하기 때문에 주행시 승차감에 영향을 줄 수 있으나, 관성이 큰 철도차량의 특성으로 인하여 승객이 느끼는 승차감에는 큰 영향이 없을 것으로 판단됨

○ 철도차량용 LPM 추진시스템 성능평가

- LPM 추진시스템의 성능평가는 4가지 항목에 대하여 진행되었으며, 그 결과는 다음 표와 같음

성능평가 항목	목표치	달성치	달성여부
지상 LPM 추진시스템 평가 (견인력 측정)	5kN 이상	5.6kN	달성
차상 계자용 전자석 성능평가 (차상자기장 측정)	1.2T 이상	1.08T (180A 시)	달성 (200A 공급시)
차상 전원용 전원장치 성능평가 (차상전원장치 부하시험)	5kW 이상	40kW이상	달성
지상 전력변환장치 성능평가 (전력량 측정)	200kW급	200kW 이상	달성

(4) LPM BOM 시스템 구축

○ LPM BOM 시스템 구축(안)

- 실대차 모델의 장치는 크게 차상장치와 지상장치로 분류하였음
- 차상장치는 실대차 모델에 장착된 장치로 대차, 전자석 전원공급장치, 추진용 전자석, 유도집전장치, 제동제어장치, GPS장치로 구성됨
- 지상장치는 지상코일, 차량 위치 검지시스템, 인버터 장치, 컨버터 장치, 모니터링 시스템으로 구성됨
- BOM 시스템은 실대차 모델의 구성부품 레벨에 따라 부품 LEVEL을 0~7LEVEL까지 계층구조로 하는 BOM Tree를 구성하였으며, 데이터 정보는 BOM 부품명, 부품번호, 부품버전, 단가, 원명, 부품등록정보, 부품재질, 업체부품코드, 정비지침서, 원수량, 위치, 특기사항, 일련번호, 구매단가, 구매일자, 고유수명, 기타정보, 문서정보 등을 포함하고 있음
- 또한, 고징이력을 관리할 수 있도록 고장일, 장소, 고장유형, 고장현상, 고장 원인 및 조치내역을 관리할 수 있도록 시스템 구축됨

○ 유지보수 체계 구축(안)

- 서울도시철도공사의 유지보수체계를 기반으로 LPM 추진시스템의 유지보수체계(안)을 구성
- LPM 추진시스템은 기존 도시철도 전동차와 달리 추진을 위한 인버터 장치와 견인전동기 고정자가 차량이 아닌 지상에 설치되어 있기 때문에 차상장치와 지상장치의 검사를 구분하여 차량을 운용하는 경정비 수준의 검사에 대해 설정함
- 또한, 정기검사를 시행하기 위해 검사대상기기에 대한 항목별 세부 검사기준을 수립함
- 고장 부품의 수선 및 중정비 업무 수행을 위한 부품별 표준작업 절차서를 마련하였고, 이를 위해 각 구성품에 대한 유지보수 매뉴얼 작성함

(5) LPM 추진시스템 실용화 검토

○ 철도종합시험선로 Test-Bed 구축(안)

- 철도 핵심 분야별 부품단위, 구조단위 성능평가와 인터페이스 성능평가가 가능한 철도종합시험선로내에 LPM 추진시스템의 Test-Bed구축을 위한 변전설비부터 지상코일 전원공급용 전력변환장치에 전원공급이 용이하고, 구배기동시험이 가능한 시험선로(안)을 구성함
- 자갈궤도와 콘크리트궤도의 지상코일과 레일체결장치 및 침목과의 간섭여부를 검토하엿음
- 자갈궤도는 지상코일의 형상 축소 없이 설치가 가능하나, 콘크리트궤도는 코일 형상의 축소가 필요함
- 지상코일지지 앵커와 P.S강선 배치에 대해 검토한 결과, 자갈궤도에 부설되는 P.C침목의 경우 저촉되지 않는 것이 확인되나, 이격 거리가 미소하여 시공오차 발생 등이 발생할 우려가 있음

○ LPM 추진시스템 전원공급 방안

- LPM 추진시스템의 지상 전력변환장치에는 선로 손실 등을 고려하였을 때, 22.9kV의 교

류전원으로 전원을 공급하는 것이 유리할 것으로 판단됨

- 전력변환장치는 440V가 필요하므로 변압기가 필요하며, 변압기 용량을 시제품 제작사양을 기준으로 선정함
- 또한, 케이블 역시 시제품 제작사양을 기준으로 굵기 및 선종을 정하였고, 변전소에서부터 선로변에 설치되어 있는 공동관로를 이용하여 포설 예정임

SUMMARY

I. R&D project summary

(1) Background of the project

○ With the rising growth in railway construction and transportation demands throughout the world, diversified transportation means are needed, now more than ever before. As well, there is a need for a new eco-friendly and innovative electric railway vehicle traction system, considering the increase in tunneling cost for contact power supply using pantograph and overhead catenary, the limits to train speed under the cohesive driving system, negative aesthetic problem and increased risk.

○ Shortcomings of existing railway vehicle traction systems include:
- Increase in construction & maintenance cost for contact power supply system
- Difficulty in quick acceleration or increase in speed with cohesive driving system
- Low energy efficiency due to increase in volume and weight caused by power converter, rotary traction motor/gear
- Negative aesthetic effect and increased risk

○ The need to develop a new innovative electric railway traction system that will eliminate such problems has been growing; as part of this effort, original technology of linear pulse motor (LPM) traction system is highly critical.

○ LPM traction system has the following advantages
- Superior acceleration & deceleration and hill-climbing performance through no-adhesive driving
- Driving over comprehensive speed range, from low to high speed
- High energy efficiency achieved through a reduction in vehicle weight
- Reduction in construction and maintenance cost compared to existing railway system thanks to the lack of an overhead catenary system.

○ The eco-friendly LPM traction system represents a commitment to upgrading and increasing the speed of railway and will have significant ripple effects as a future transportation means; as such, the intent with this project is to build a full-scale test-bed that will be able to implement technical demonstration for securing design technology and evaluating combined performance.

○ The development of a future transportation means integrated with innovative technology will lead the global market and enhance the nation's position and image.

○ Given that this core technology is at an early development stage, it has the potential to be able to lead the global market and activate the green railway system in overseas markets.

(2) Goal and scope of the project

○ The scope of the project is categorized into 5 goals, and the details thereof are as follows.

- Development of fundamental technology for railway LPM traction system
  ▷ Evaluation of applicability of LPM traction system to railway
  ▷ Research on fundamental technology for railway vehicle

- A down-scale LPM traction system model
  ▷ Development of a down-scale LPM traction system model
  ▷ Analysis of a down-scale model
  ▷ Analysis of LPM traction system and study on torque ripple reduction

- A full-scale LPM traction system
  ▷ Design and fabrication of a full-scale LPM traction system
  ▷ Development of a full-scale LPM traction system analysis model
  ▷ Evaluation of the performance of railway LPM traction system

- Development of LPM BOM system
  ▷ Development of LPM BOM system (proposal)
  ▷ Development of maintenance system (proposal)

- Review of commercializing LPM traction system
  ▷ Development of railway integrated Test-Bed (proposal)
  ▷ Power supply for LPM traction system

II. Deliverable and use

(1) Deliverable for the project

○ Development of fundamental technology for railway LPM traction system
- General, technical and economic feasibility of railway LPM traction system
- Study on fundamental technologies including modeling, controlling and simulation of LPM traction system.

○ Design and fabrication of a down-scale LPM traction system
- Development of a down-scale LPM traction system
- Development of a down-scale analysis model and performance prediction
- Analysis of LPM traction system characteristic analysis and study on torque ripple reduction

○ Design and fabrication of a full-scale LPM traction system
- Development of a full-scale LPM traction system
- Development of a full-scale analysis model and performance prediction
- Technical validation through performance evaluation of developed LPM traction system

○ Development of LPM BOM system
- Development of LPM BOM program
- Maintenance system for LPM traction system (proposal)

○ Review of commercialization of LPM traction system
- Development of railway integrated Test-Bed (proposal)
- Power supply for LPM traction system on Test-Bed

(2) Project effect

○ Elimination of traction system mounted on catenary and vehicle that hinders improvements in train speed, in order to develop an energy-efficient and cost efficient railway system.

○ Independent development of fundamental technologies in railway traction system and achieving early technical dominance in order to develop and commercialize wireless, no-cohesive, instantaneous brake and automatic location detection system.

○ Development of lightweight vehicle with enhanced hill-climbing performance and

reduced tunnel section by applying LPM traction system to existing railway, which will reduce infrastructure costs.

○ As no overhead catenary is needed, there is no negative aesthetic effect on the urban landscape, and the advanced system will produce an urban image-making effect.

○ New innovative traction system that will improve railway environment as well as the nation's competitiveness.

(3) Use of project deliverables

○ Technology to increase the traction power to run a steep slope for shallow underground railway

○ For other means of transportation, including mountainous tram or roller coaster that requires hill-climbing performance

○ As operation model for performance verification of future railway traction system

○ As a core technology to develop core devices for no-cohesive driving traction system under development domestically

○ To create a new business model for each railway operator so as to develop a logistics transport network using embedded track without interrupting other means of transportation when developing a logistics transport system using the LPM traction system.

III. Scope of the project and deliverable

(1) Fundamental technology for railway LPM traction system

○ Evaluation of the applicability of LPM traction system to railway
- A review of the government's new growth engine and green growth policy, railway policy and regulation was carried out to analyze the political, technical and economical feasibility of developing an LPM traction system.

- Compared with other linear motors and the existing railway traction system, the system appeared to be superior in terms of system installation and cost efficiency, including the characteristics of lightweight, simplified control and compatibility with other train control system; in particular, the maintenance cost could be reduced to 23% that of other systems.

○ Study on LPM fundamental technology for traction
- The driving principle of the LPM traction system originated from BLDC motor's driving system and LPM traction system modeling was implemented based on this principle.
- Stator voltage system could be inducted as a 2-pole rotary machine and torque equation was sought, accordingly, and conversion equation for conversion between rotary device and linear device was induced.
- Back electromotive force of LPM traction system is generated in a trapezoidal profile due to structural characteristics, and thus a square wave current control system is favorable in terms of torque ripple reduction.
- Current controller was designed and simulation model was developed to identify the characteristics based on LPM traction system modeling.
- Through a simulation using a full-scale design parameter, traction force when supplying 1,000A to ground coil was estimated at 5kN.

(2) A down-scale LPM traction system

○ Development of down-scale LPM traction system
- Design and fabrication were implemented after determining the specification of LPM traction system including inverter, COU board and gate board.
- Bogie location information is needed for current control, and hole sensor for sensing the position and permanent magnet on bogie were used.

○ Study on down-scale model analysis
- Predicting the performance of a down-scale model with 2D and 3F finite element analysis model using the parameter of a down-scale model.
- Verifying the accuracy of analysis model after comparing and confirming simulation of back electromotive force and measured data are similar.
- As a result of predicting the traction power after energizing 200A current, 2D model analysis indicated 4.65N and 3D indicated 5.05N; according to actual test, 3.9N was obtained.
- The difference between the analysis result and actual test was attributable to the difference in current to ground coil, and should the same current be applied, the result is expected to be similar.

○ Analysis of LPM traction system and study on torque ripple reduction

- LPM traction system uses a ground coil winding method, and thus the back electromotive force of phase A and phase B appears to not be the same.
- There are different maximum values of magnetic flux interlinkage to each phase winding due to variation in pore size.
- Thus, as much torque ripple as the difference in back electromotive force is generated when applying the same current to phase A and phase B.
- To reduce the torque ripple, the current difference according to the different back electromotive force shall be applied to each phase, and a current control technique to minimize torque ripple is proposed.
- Simulation and test were conducted to validate the proposal and deviation in torque ripple before and after applying compensation method was reduced by 29% to 48% from 77%.

(3) A full-scale LPM traction system

○ Design and fabrication of a full-scale LPM traction system

- Design and fabrication of ground LPM traction system
  ▷ A ground coil generates the power by responding to the magnetic field of the mover while conducting.
  ▷ This is designed as a 2-phase and 2-row structure, and maximum conduction current is 2,000A.
- Design and fabrication of onboard electromagnet
  ▷ Magnetic field is generated by DC to the on-board electromagnet, which interacts with the ground coil to generate the power (8-pole)
- Design and fabrication of current feeder and collector system
  ▷ Inductive power collection and battery are applied to feed the vehicle
  ▷ Inductive power collection uses the back electromotive force induced in the DC magnetic field generated by ground coil along the vehicle running direction.
  ▷ Battery, charger, and power converter to supply a constant current were fabricated to supply the power to electronic appliances and electromagnets.
- Design & fabrication of power converter module for supplying ground high current
  ▷ This consists of 6 components, including converter, inverter, cooler, positioning sensor, brake system and display.
  ▷ Display shows the user the information from the components and controls the LPM traction system according to the input by the user, helping the user to operate the bogie more conveniently.
- Fabrication of bogie and system integration
  ▷ A bogie is designed to fix the onboard equipment to the LPM traction system,

which includes a permanent magnet, onboard electromagnet, battery, power converter and brake system.

▷ Unlike other bogies for ordinary railway vehicles, an axle-less system that uses one axle per wheel was adopted in order to enhance the performance and reduce the noise on curve.

○ A full-scale LPM traction system analysis model

- Predicting the performance of a full-scale model with 2D and 3F finite element analysis model using the parameters of a full-scale model.
- When applying 2,000A to the analysis model, 2D and 3D traction power was 3.6kN with a relatively larger ripple of 60%. Though a large ripple may have an effect on ride quality because of the significant vibration, the passenger would be affected insignificantly because of the larger inertial force.

(4) Development of LPM BOM system

○ Development of LPM BOM system (proposal)

- This can be classified into the onboard system and the ground system
- Onboard system comprises bogie, electromagnetic power supply, inductive power collector, brake control system and GPS
- Ground system comprises ground coil, vehicle location detector, inverter, converter and monitoring system.
- BOM system components comprise a BOM tree including Level 0 ~ Level 7, and data information includes BOM part name, part number, part version, unit price, original name, part register number, part material, manufacturer's code number, O&M manual, original quantity, location, serial number, procurement cost & date, service life and other information and document information.
- System is also designed to accommodate failure logging, which includes failure date, place, failure mode, failure characteristic, cause and corrective measures.

○ Maintenance system (proposed)

- The maintenance system of the LPM traction system was developed based on a system used by Seoul Metropolitan Rapid Transit.
- The LPM traction system, unlike existing systems, is equipped with the stator of traction motor and inverter installed on ground, instead of onboard, and thus light maintenance is categorized into onboard and ground system separately.
- In addition, a detailed inspection standard for regular inspections by item was developed.
- A standard work procedure for repair and heavy maintenance was developed, as well

as an O&M manual for components.

(5) Review of commercializing LPM traction system

○ Development of integrated railway Test-Bed (proposal)

- Substation of integrated railway test bed for LPM traction system that could accommodate performance evaluation by part and by structure, and a system to enable easy power supply to converter and slope starting test were proposed.
- Interference between ground coil, rail fastener and sleeper of ballast track and concrete track was reviewed.
- While ballast track could be installed without an adjustment of shape, concrete track requires an adjustment of the shape.
- Through a review of the layout of ground coil anchor and PS steel wire, no conflict with PC sleeper for ballast track was confirmed, but a construction error may occur because of a shortage of clearance.

○ Power supply to LPM traction system

- 22.9kV AC would be favorable for ground power converter of LPM traction system when considering line loss.
- As power converter requires 440V, transformer shall be provided and transformer capacity was determined considering pilot product specification.
- Thickness and type of cable also were determined considering pilot product specifications, and cable will be laid using existing common duct along the track from substation.

CONTENTS

1. Project summary ····· 33
1.1 Objective and the need of the project ····· 33
1.1.1 Background and goal of the project ····· 33
1.1.2 Importance of the project ····· 35
1.2 Goal and scope of the project ····· 36
1.2.1 Final goal of the project ····· 36
1.2.2 Detailed goal and scope of the project ····· 36
1.3 Technology development, at home and abroad ····· 39
1.3.1 Domestic technology and industry trend ····· 39
1.3.2 Foreign technology and industry trend ····· 44
1.3.3 Patent trend ····· 48
1.4 Differentiation from existing technology (project) ····· 54
1.4.1 Classification of linear traction system ····· 54
1.4.2 Analysis of characteristics by linear traction system ····· 54
1.4.3 Analysis of differentiation from existing technology, and superiority ···· 60

2. Final project deliverable and use ····· 63
2.1 Core accomplishment and summary ····· 63
2.1.1 List of accomplishment ····· 63
2.1.2 Fundamental technology of railway LPM traction system ····· 64
2.1.3 A down-scale LPM traction system ····· 65
2.1.4 A full-scale LPM traction system ····· 68
2.1.5 Development of LPM BOM system ····· 72
2.1.6 Review of commercializing LPM traction system ····· 74
2.2 Final accomplishment diagram ····· 77
2.3 Effect of the project and use ····· 79
2.3.1 Project effect ····· 79
2.3.2 Use of deliverable ····· 80

3. Detail scope of project and deliverable ····· 83
3.1 Fundamental technology of railway LPM traction system ····· 83
3.1.1 Evaluation of applicability of LPM traction system to railway ····· 83
3.1.2 LPM fundamental technology for railway vehicle traction ····· 90
3.2 A down-scale LPM traction system ····· 119

3.2.1 Development of a down-scale LPM traction system ····· 119
3.2.2 Analysis of a down-scale model ····· 157
3.2.3 Analysis of LPM traction system and torque ripple reduction ····· 175
3.3 A full-scale LPM traction system ····· 195
3.3.1 Design and fabrication of a full-scale LPM traction system ····· 195
3.3.2 Development of a full-scale LPM traction system analysis model ····· 313
3.3.3 Evaluation of railway LPM traction system performance ····· 341
3.4 Development of LPM BOM system ····· 349
3.4.1 Development of LPM BOM system (proposal) ····· 349
3.4.2 Development of maintenance system (proposal) ····· 355
3.5 Review of commercializing LPM traction system ····· 381
3.5.1 Development of railway integrated Test-Bed (proposal) ····· 381
3.5.2 Power supply to LPM traction system ····· 406
3.6 Consequencies and Further Works ····· 434
3.6.1 Result of R&D ····· 434
3.6.2 Effect of R&D ····· 438
3.6.3 Utilizatioins of Outcomes ····· 438
3.6.4 Future Challenges ····· 439

Bibliography ····· 440

<목차>

1. 연구개발과제 개요 ····· 33
1.1. 연구의 목적 및 필요성 ····· 33
1.1.1. 연구의 배경 및 목적 ····· 33
1.1.2. 연구개발의 중요성 ····· 35
1.2. 연구 목표 및 주요 연구 내용 ····· 36
1.2.1. 연구개발의 최종 목표 ····· 36
1.2.2. 세부 연구 목표 및 내용 ····· 36
1.3. 국내외 기술개발 현황 ····· 39
1.3.1. 국내 기술 및 산업 동향 ····· 39
1.3.2. 국외 기술 및 산업 동향 ····· 44
1.3.3. 특허 동향 ····· 48
1.4. 기존 기술(연구)과의 차별성 ····· 54
1.4.1. 선형 추진시스템 분류 ····· 54
1.4.2. 선형 추진시스템별 특징 분석 ····· 54
1.4.3. 기존 기술과의 차별성 및 우수성 종합 분석 ····· 60
2. 최종 연구 성과 요약 및 활용방안 ····· 63
2.1. 연구개발 핵심성과 요약 ····· 63
2.1.1. 성과리스트 ····· 63
2.1.2. 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술 ····· 64
2.1.3. 축소형 LPM 추진시스템 ····· 65
2.1.4. 실모형 LPM 추진시스템 ····· 68
2.1.5. LPM BOM 시스템 구축 ····· 72
2.1.6. LPM 추진시스템 실용화 검토 ····· 74
2.2. 연구개발 최종목표 달성도 ····· 77
2.3. 연구개발 효과 및 활용방안 ····· 79
2.3.1. 연구개발 효과 ····· 79
2.3.2. 연구성과 활용방안 ····· 80
3. 연구개발 수행 상세 내용 및 결과 ····· 83
3.1. 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술 ····· 83
3.1.1. LPM 추진시스템의 철도적용 타당성 평가 ····· 83
3.1.2. 철도차량 추진을 위한 LPM 기초기술 연구 ····· 90
3.2. 축소형 LPM 추진시스템 ····· 119
3.2.1. 축소형 LPM 추진시스템 개발 ····· 119
3.2.2. 축소형 모델 해석 연구 ····· 157
3.2.3. LPM 추진시스템 분석 및 토크 리플 저감 연구 ····· 175

3.3. 실모형 LPM 추진시스템 ····· 195
3.3.1. 실모형 LPM 추진시스템 설계 및 제작 ····· 195
3.3.2. 실모형 LPM 추진시스템 해석 모델 구축 ····· 313
3.3.3. 철도차량용 LPM 추진시스템 성능평가 ····· 341
3.4. LPM BOM 시스템 구축 ····· 349
3.4.1. LPM BOM 시스템 구축(안) ····· 349
3.4.2. 유지보수 체계 구축 ····· 355
3.5. LPM 추진시스템 실용화 검토 ····· 381
3.5.1. 철도종합시험선로 Test-Bed 구축(안) ····· 381
3.5.2. LPM 추진시스템 전원공급 방안 ····· 406
3.6. 결과검토 및 향후 과제 ····· 434
3.6.1. 연구개발의 결과검토 ····· 434
3.6.2. 연구개발 효과 ····· 438
3.6.3. 연구성과 활용방안 ····· 438
3.6.4. 향후 과제 ····· 439

참고문헌 ····· 440

<표 목차>

표 1.3.1.1 용인경전철의 주요사양 ····· 41
표 1.3.2.1 일본과 캐나다의 LIM 추진시스템을 적용한 지하철/경전철 개발 현황 ····· 44
표 1.3.3.1 특허건수와 연평균 피인용도 상위 10위 출원인 비교 ····· 51
표 1.3.3.2 주요 특허 리스트 ····· 52
표 2.1.4.1 LPM 추진시스템 성능평가 요약 ····· 72
표 2.1.5.1 BOM Tree 구성 ····· 73
표 3.1.1.1 추진시스템별 도시철도 시스템 구성 ····· 86
표 3.1.1.2 추진시스템별 경제성 비교 ····· 86
표 3.1.2.1 구형파 전류제어 및 정현파 전류제어 비교 ····· 97
표 3.1.2.2 스위칭 상태에 따른 출력 전압 ····· 108
표 3.1.2.3 구형파 전류제어 방식 모의실험 실험조건 ····· 108
표 3.2.1.1 인버터 주요 성능 ····· 119
표 3.2.1.2 LMH500M156 주요 사양 ····· 122
표 3.2.1.3 보조전원의 출력 전원과 그 역할 ····· 130
표 3.2.1.4 600A급 전류센서 'HAH1DR 600-S LEM' 측정 및 동작특성 ····· 133
표 3.2.1.5 축소모형 파라미터 ····· 151
표 3.2.2.1 축소 모델 설계 파라미터 값 ····· 165
표 3.2.2.2 스위치 타이밍의 파라미터 설정 값 ····· 171
표 3.2.2.3 2차원 유한요소해석 모델의 추력 및 수직력 ····· 173
표 3.2.2.4 3차원 유한요소해석 모델의 추력 및 수직력 ····· 174
표 3.3.1.1 지상 코일 상세 사항 ····· 196
표 3.3.1.2 이동자 권선 설계 사양 ····· 201
표 3.3.1.3 이동자 코어 설계 사양 ····· 202
표 3.3.1.4 파라미터 : CASE 1 ····· 206
표 3.3.1.5 파라미터 : CASE 2 ····· 206
표 3.3.1.6 유도 집전 장치 설계 사양 ····· 209
표 3.3.1.7 충전기 세부 설계 사양 ····· 211
표 3.3.1.8 DC/DC 컨버터 세부 설계 사양 ····· 213
표 3.3.1.9 축전지 세부 설계 사양 ····· 214
표 3.3.1.10 MCC-16IO2 소자 주요 사양 ····· 221
표 3.3.1.11 냉각장치의 용량산출 ····· 237
표 3.3.1.12 컨버터 주요부에 대한 온도 ····· 238
표 3.3.1.13 위치표시 제어서버의 구성품 ····· 246
표 3.3.1.14 주요 하드웨어 구성품 ····· 249
표 3.3.1.15 이동식 Rack 장치 ····· 249
표 3.3.1.16 AC-DC 전원장치 ····· 249
표 3.3.1.17 DBMS ····· 249
표 3.3.1.18 인버터 제작사양 ····· 251
표 3.3.1.19 컨버터 제작사양 ····· 252
표 3.3.1.20 냉각장치 제작사양 ····· 253

표 3.3.1.21 표시장치 제작사양 ····· 254
표 3.3.1.22 대차 주요 제원 ····· 298
표 3.3.2.1 LPM의 자로 구성에 의한 분류 ····· 323
표 3.3.2.2 스위치 타이밍의 파라미터 값 ····· 329
표 3.3.2.3 2D 모델의 추력특성 ····· 334
표 3.3.2.3 3D 유한요소 해석 모델 추력 및 부상력 특성 ····· 336
표 3.3.2.4 자기등가회로를 통한 기초 설계 및 유한요소 해석 결과 비교 ····· 337
표 3.3.2.5 자기등가회로를 통한 기초 설계 및 유한요소 해석 결과 비교 ····· 339
표 3.3.3.1 LPM 추진시스템 성능평가 요약 ····· 341
표 3.3.3.2 공극자속 측정 결과 ····· 344
표 3.3.3.3 차상 전원장치 부하시험 결과 ····· 346
표 3.4.2.1 국내 도시철도운영기관 유지보수체계 현황 ····· 355
표 3.4.2.2 검사종별 정비 ····· 356

<그림 목차>

그림 1.1.1.1 기존철도차량 추진시스템의 한계 ····· 33
그림 1.1.1.2 리니어펄스모터 추진시스템의 구성 ····· 34
그림 1.2.1.1 연구개발 목표 및 내용 ····· 36
그림 1.3.1.1 반도체 이송 공정용 소형 리니어 모터 제품 ····· 39
그림 1.3.1.2 공작기계 이송테이블 구동용 150N급 Hybrid-type LPM ····· 40
그림 1.3.1.3 원자로의 제어봉 구동장치용 Tubular-type LPM ····· 40
그림 1.3.1.4 용인경전철 추진시스템용 LIM의 차상 Primary와 지상 리액션 플레이트 ····· 41
그림 1.3.1.5 LIM 방식의 추진 기술 국내 적용 현황 ····· 42
그림 1.3.1.6 상전도 LSM 추진 시스템 시작품 (한국철도기술연구원) ····· 42
그림 1.3.1.7 한국전기연구원이 개발한 30kW급 CPS ····· 43
그림 1.3.1.8 KAIST의 서울대공원 코끼리 열차 급전선로 ····· 43
그림 1.3.1.9 한국철도기술연구원의 대용량 비접촉 급전 기술 시연 ····· 43
그림 1.3.2.1 SERAPHIM 열차 concept (Vertical reaction plate 방식) ····· 46
그림 1.3.2.2 국외 LSM 방식 추진 철도 ····· 46
그림 1.3.2.3 독일 초고속 자기부상열차의 유도급전 시스템 ····· 47
그림 1.3.2.4 독일 초고속 자기부상열차의 유도급전시스템 ····· 47
그림 1.3.3.1 연도별 특허 출원 현황 ····· 48
그림 1.3.3.2 연도별 특허 출원 추이 ····· 48
그림 1.3.3.3 도메인별 출원비율 ····· 49
그림 1.3.3.4 출원인 국적별 분포 ····· 49
그림 1.3.3.5 출원인별 특허 출원 추이 ····· 50
그림 1.3.3.6 상위 4개 출원인의 도메인별 출원 현황 ····· 50
그림 1.3.3.7 상위 출원인 연도별 특허 출원 추이 ····· 51
그림 1.3.3.8 IPC 분류별 특허건수 ····· 52
그림 1.4.1.1 선형 추진시스템의 분류 ····· 54
그림 1.4.3.1 각 추진시스템의 기술적 특징 비교 ····· 62
그림 2.1.3.1 LPM 추진시스템 구성도 ····· 66
그림 2.1.3.2 상권선 적층 효과를 고려한 역기전력 ····· 67
그림 2.1.4.1 차상 장치가 탑재된 실대차 ····· 70
그림 2.1.5.1 구축된 BOM 시스템 화면 ····· 73
그림 2.1.6.1 철도종합시험선로 내 LPM Test-Bed 구축 ····· 75
그림 3.1.1.1 악순환 구조(좌)와 선순환 구조(우) ····· 83
그림 3.1.2.1 자화성분과 누설성분 ····· 91
그림 3.1.2.2 고정자 A상 및 B상 권선의 공간적 배치 ····· 92
그림 3.1.2.3 2극 2상 회전기기로 등가변환 된 LPM ····· 93
그림 3.1.2.4 구형파 전류제어 구동 방식 블록도 ····· 98
그림 3.1.2.5 각도에 따른 홀 센서 신호 ····· 99
그림 3.1.2.6 연산된 위치 및 스텝 ····· 100
그림 3.1.2.7 스텝에 따른 전류 인가 ····· 100
그림 3.1.2.8 병렬 구조의 단상 풀브릿지 인버터 ····· 101

그림 3.1.2.9 일반적인 제어시스템의 블록선도 ····· 102
그림 3.1.2.10 LPM 시스템의 블록선도 ····· 104
그림 3.1.2.11 전류제어기를 포함하는 LPM 시스템의 블록선도 ····· 104
그림 3.1.2.12 관성 모멘트가 큰 경우의 전류제어기를 포함하는 ····· 105
그림 3.1.2.13 비례 적분제어기를 적용한 전류제어기 ····· 105
그림 3.1.2.14 단상 풀 브릿지 인버터 ····· 107
그림 3.1.2.15 구형파 전류제어 방식을 사용한 LPM 추진제어 시스템의 전체구성도 ····· 111
그림 3.1.2.16 구형파 전류제어 방식을 사용한 LPM 추진제어 시스템의 전동기부 ····· 112
그림 3.1.2.17 구형파 전류제어 방식을 사용한 LPM 추진제어 시스템의 제어 및 전원인가부 ····· 113
그림 3.1.2.18 역기전력 (구형파 전류제어 방식) ····· 114
그림 3.1.2.19 전동기 각 위치에 따른 스텝 연산 결과 (구형파 전류제어 방식) ····· 114
그림 3.1.2.20 스텝에 따른 A상 및 B상 권선의 전류 인가 (구형파 전류제어 방식) ····· 115
그림 3.1.2.21 상전류 인가에 따른 발생 토크 및 추력 (구형파 전류제어 방식) ····· 115
그림 3.1.2.22 발생 토크에 따른 기계각속도 및 시속 (구형파 전류제어 방식) ····· 116
그림 3.1.2.23 정격전류 인가 시 가속도 (구형파 전류제어 방식) ····· 117
그림 3.1.2.24 전류제어기 스텝 응답 (구형파 전류제어 방식) ····· 117
그림 3.2.1.1 시스템 구성도 ····· 119
그림 3.2.1.2 인버터 개발 제품 3D형상 ····· 121
그림 3.2.1.3 주요기구부품 종류 및 형상 ····· 121
그림 3.2.1.4 MOSFET 모듈 실제 형상 ····· 122
그림 3.2.1.5 직류링크 커패시터 보드 ····· 123
그림 3.2.1.6 컨넥터 용도의 Bus-Bar 처리 방법 ····· 123
그림 3.2.1.7 강제 공랭식 방열 구조 ····· 124
그림 3.2.1.8 CPU보드 구성도 ····· 124
그림 3.2.1.9 CPU보드 Top면 ····· 125
그림 3.2.1.10 CPU보드 Bottom면 ····· 125
그림 3.2.1.11 CPU회로와 I/O 신호 ····· 129
그림 3.2.1.12 보조전원 생성회로 ····· 131
그림 3.2.1.13 RS232와 CAN 통신 회로 ····· 132
그림 3.2.1.14 전류 검출 회로 ····· 134
그림 3.2.1.15 과전류인가시 보호회로 동작파형 ····· 135
그림 3.2.1.16 과전류 보호 회로 ····· 136
그림 3.2.1.17 입력과전압 보호회로 ····· 138
그림 3.2.1.18 PWM 회로 ····· 139
그림 3.2.1.19 H/W PWM Protection회로 ····· 140
그림 3.2.1.20 전압 Level 변환 회로 ····· 141
그림 3.2.1.21 게이트보드 블록도 ····· 142
그림 3.2.1.22 게이트보드 Top ····· 143
그림 3.2.1.23 게이트보드 Bottom ····· 143
그림 3.2.1.24 PWM 드라이브 IC를 이용한 MOSFET 구동회로 ····· 145

그림 3.2.1.25 PWM 드라이브 IC를 이용한 MOSFET 구동회로 ····· 146
그림 3.2.1.26 위치센싱용 Hall센서 파형과 위치 인식 방법 ····· 147
그림 3.2.1.27 A3295 내부 블록도 ····· 148
그림 3.2.1.28 A3295 등가 회로도 ····· 148
그림 3.2.1.29 마그네트 Flux density에 따른 출력전압 ····· 149
그림 3.2.1.30 Hall Sensor 드라이브 회로도 ····· 150
그림 3.2.1.31 대차의 위치 변동에 따른 Hall Sensor 출력 A,B상 ····· 152
그림 3.2.1.32 +50A 출력 제어 ····· 152
그림 3.2.1.33 +100A 출력 제어 ····· 153
그림 3.2.1.34 +150A 출력 제어 ····· 153
그림 3.2.1.35 -50A 출력 제어 ····· 154
그림 3.2.1.36 -100A 출력 제어 ····· 154
그림 3.2.1.37 -150A 출력 제어 ····· 155
그림 3.2.1.38 추진코일의 A상과 B상의 2상제어 파형 ····· 155
그림 3.2.1.39 대차 가속시의 A상과 B상의 2상제어 파형 ····· 156
그림 3.2.1.40 90도 운전시 한상의 전류파형(150A 제어) ····· 156
그림 3.2.2.1 이동자(차체) 하단부 구조 및 영구자석 사이즈 ····· 157
그림 3.2.2.2 LPM 축소 모델의 고정자 권선 케이블 ····· 158
그림 3.2.2.3 LPM 축소 모델의 고정자 권선 레이아웃 ····· 158
그림 3.2.2.4 2상 전류 펄스 파형 ····· 158
그림 3.2.2.5 2상 펄스 전류 생성을 위한 전력변환 회로 ····· 159
그림 3.2.2.6 펄스 파 형태 결정 요소 ····· 159
그림 3.2.2.7 2상 펄스 전류 파형에서의 운전 구간 ····· 160
그림 3.2.2.8 운전 구간에 따른 고정자 권선에서의 극성 변화 ····· 161
그림 3.2.2.9 운전 구간 I에서의 전류 방향 및 극성 ····· 161
그림 3.2.2.10 운전 구간 I에서의 이동자 위치 ····· 162
그림 3.2.2.11 운전 구간 II에서의 전류 방향 및 극성 ····· 162
그림 3.2.2.12 운전 구간 II에서의 이동자 위치 ····· 162
그림 3.2.2.13 운전 구간 III에서의 전류 방향 및 극성 ····· 163
그림 3.2.2.14 운전 구간 III에서의 이동자 위치 ····· 163
그림 3.2.2.15 운전 구간 IV에서의 전류 방향 및 극성 ····· 164
그림 3.2.2.16 운전 구간 IV에서의 이동자 위치 ····· 164
그림 3.2.2.17 이동자와 권선 간의 힘의 방향 ····· 165
그림 3.2.2.18 LPM 축소 모델의 설계 파라미터 ····· 165
그림 3.2.2.19 LPM 축소 모델의 2차원 유한요소해석 모델 ····· 166
그림 3.2.2.20 2차원 유한요소해석 모델의 사이즈 ····· 166
그림 3.2.2.21 2차원 유한요소해석 모델의 권선 사이즈 ····· 166
그림 3.2.2.22 2차원 유한요소해석 모델의 요소분할도 ····· 167
그림 3.2.2.23 3차원 유한요소해석 모델 ····· 167
그림 3.2.2.24 3차원 유한요소해석 모델의 사이즈 ····· 167
그림 3.2.2.25 3차원 유한요소해석 모델의 요소분할도 ····· 168

그림 3.2.2.26 LPM 축소 모델의 무부하 역기전력 측정 파형 ····· 168
그림 3.2.2.27 2차원 유한요소해석 모델의 무부하 역기전력 파형 ····· 169
그림 3.2.2.28 3차원 유한요소해석 모델의 무부하 역기전력 파형 ····· 169
그림 3.2.2.29 2상 펄스 전류 생성을 위한 LPM 전자계 해석 모델의 외부 회로 ····· 170
그림 3.2.2.30 펄스파 생성을 위한 스위치 타이밍의 파라미터 ····· 171
그림 3.2.2.31 외부 회로에서 생성된 펄스 전류 파형 ····· 172
그림 3.2.2.32 2차원 유한요소해석 모델의 추력 특성 ····· 172
그림 3.2.2.33 2차원 유한요소해석 모델의 수직력 특성 ····· 173
그림 3.2.2.34 유한 요소법 LPM 3D 모델 추력 ····· 174
그림 3.2.2.35 유한 요소법 LPM 3D 모델 흡인력 ····· 174
그림 3.2.2.36 3차원 유한요소해석 결과 - 자속밀도 벡터도 ····· 175
그림 3.2.3.1 LPM의 유기기전력 및 쇄교자속 파형 ····· 176
그림 3.2.3.2 스위칭 소자 내부 다이오드에 의한 역기전력 정류 ····· 177
그림 3.2.3.3 상권선 적층 효과를 고려한 역기전력 ····· 178
그림 3.2.3.4 전력에 유효한 역기전력 ····· 179
그림 3.2.3.5 상권선 적층 시 발생 추력 ····· 181
그림 3.2.3.6 고정자 상권선 적층 시 역기전력 ····· 182
그림 3.2.3.7 상전류 및 역기전력 (보상 기법 적용 전) ····· 183
그림 3.2.3.8 발생 토크 및 추력 (보상 기법 적용 전) ····· 184
그림 3.2.3.9 상전류 및 역기전력 (보상 기법 적용 후) ····· 185
그림 3.2.3.10 발생 토크 및 추력 (보상 기법 적용 후) ····· 186
그림 3.2.3.11 실험장치 구성도 ····· 187
그림 3.2.3.12 제어부 및 전력부 ····· 189
그림 3.2.3.13 다이나모미터 ····· 189
그림 3.2.3.14 홀센서 신호에 따른 위치 연산 및 스텝 연산 ····· 191
그림 3.2.3.15 발생 역기전력 ····· 192
그림 3.2.3.16 스텝에 따른 상전류 인가 ····· 193
그림 3.2.3.17 상권선 적층으로 인한 발생 토크 리플 보상 전 발생 추력 ····· 194
그림 3.2.3.18 상권선 적층으로 인한 발생 토크 리플 보상 전 발생 추력 ····· 194
그림 3.3.1.1 이동자 및 지상코일 ····· 195
그림 3.3.1.2 지상 코일 기본 구조 ····· 196
그림 3.3.1.3 2상 2열 구조의 지상 코일 ····· 198
그림 3.3.1.4 LPM 추진시스템 시험선 지상코일 설치 ····· 199
그림 3.3.1.5 이동자 코어 기본 치수 ····· 200
그림 3.3.1.6 이동자 코일 기본 치수 ····· 201
그림 3.3.1.7 이동자 코일 설계 도면 ····· 202
그림 3.3.1.8 이동자 코어 설계 도면 ····· 203
그림 3.3.1.9 이동자 코일 제작 사진 ····· 204
그림 3.3.1.10 차상 전자석 제작 및 실대차 취부 ····· 204
그림 3.3.1.11 기본 구성도 ····· 205
그림 3.3.1.12 전자석 및 집전코일 구성도 ····· 205

그림 3.3.1.13 유도 전압 : CASE 1 ····· 206
그림 3.3.1.14 집전 코어 형상 디자인 : CASE 2 ····· 207
그림 3.3.1.15 유도 전압 : CASE 2 ····· 207
그림 3.3.1.16 집전 코어 형상 디자인 : CASE 3 ····· 208
그림 3.3.1.17 유도 전압 : CASE 3 ····· 208
그림 3.3.1.18 제안한 유도급전 장치의 실험파형(역기전력 특성) ····· 208
그림 3.3.1.19 차상 전자석 및 집전 코어의 시뮬레이션 결과 ····· 209
그림 3.3.1.20 유도 집전 장치 설계 도면 ····· 210
그림 3.3.1.21 제작된 유도 집전 장치 ····· 211
그림 3.3.1.22 DC/DC 컨버터 시스템 구성도 ····· 213
그림 3.3.1.23 축전지 + BMS 설계 도면 ····· 215
그림 3.3.1.24 충전기 + DC/DC 컨버터 설계 도면 ····· 216
그림 3.3.1.25 제작된 충전기/컨버터/축전지 ····· 217
그림 3.3.1.26 시스템 구성도 ····· 219
그림 3.3.1.27 컨버터 주 전원 생성부 ····· 220
그림 3.3.1.28 Thyristor의 기호와 등가회로 ····· 221
그림 3.3.1.29 다이오드의 특성곡선 ····· 222
그림 3.3.1.30 DC필터 인덕터 초안 ····· 223
그림 3.3.1.31 컨버터 함체 도면 ····· 225
그림 3.3.1.32 컨버터의 부하 특성 ····· 226
그림 3.3.1.33 인버터 구성도 ····· 227
그림 3.3.1.34 스위칭 소자와 등가회로 ····· 228
그림 3.3.1.35 CPU 특징 ····· 228
그림 3.3.1.36 CPU보드 구성도 ····· 229
그림 3.3.1.37 드라이브 보드 구성도 ····· 229
그림 3.3.1.38 보조전원보드 구성도 ····· 230
그림 3.3.1.39 인버터 제작도면 ····· 231
그림 3.3.1.40 인버터 내부 제작도면 ····· 232
그림 3.3.1.41 추진코일 배치간격 ····· 233
그림 3.3.1.42 Full Bridge 인버터 구성 ····· 234
그림 3.3.1.43 Full Bridge 인버터 스위칭 조합에 따른 등가회로 ····· 234
그림 3.3.1.45 Full Bridge 인버터 PSIM Schematic ····· 236
그림 3.3.1.46 Full Bridge 인버터 PSIM wave form ····· 236
그림 3.3.1.47 추진 코일과 추진 파형 ····· 239
그림 3.3.1.48 위치 검출용 홀센서 파형과 위치인식방법 ····· 240
그림 3.3.1.49 A3295 내부 블록도 ····· 241
그림 3.3.1.50 A3295 등가 회로도 ····· 241
그림 3.3.1.51 자속밀도에 따른 출력전압 ····· 242
그림 3.3.1.52 브레이크 제어 시스템 구성도 ····· 243
그림 3.3.1.53 브레이크 제어시스템 제작도면 ····· 244
그림 3.3.1.54 브레이크 동작 알고리즘 ····· 245

그림 3.3.1.55 표시장치 화면구성 ····· 246
그림 3.3.1.56 GPS 위치추적(DMR) ····· 248
그림 3.3.1.57 컨버터 구성부품 ····· 263
그림 3.3.1.58 컨버터 구성품 설치 ····· 264
그림 3.3.1.59 인버터 구성부품 ····· 275
그림 3.3.1.60 컨버터 구성품 설치 ····· 276
그림 3.3.1.61 냉각장치 구성부품 ····· 279
그림 3.3.1.62 냉각장치 구성품 설치 ····· 280
그림 3.3.1.63 위치센서 구성부품 ····· 282
그림 3.3.1.64 위치센서 구성품 설치 ····· 283
그림 3.3.1.65 브레이크 제어시스템 구성부품 ····· 285
그림 3.3.1.66 브레이크 제어시스템 구성품 설치 ····· 285
그림 3.3.1.67 표시장치 구성품 설치 ····· 285
그림 3.3.1.68 제품 현장설치 ····· 286
그림 3.3.1.69 Lab Test 환경 ····· 287
그림 3.3.1.70 스위치 회로 ····· 288
그림 3.3.1.71 스위치들의 신호와 출력전압 파형 ····· 288
그림 3.3.1.72 전자로드에 PWM 신호 인가시 ····· 289
그림 3.3.1.73 인덕터-저항 직렬부하에 PWM 신호 인가시 ····· 289
그림 3.3.1.74 궤환제어기의 전류지령치 변화에 따른 파형 ····· 290
그림 3.3.1.75 대차 위치변동에 따른 홀센서 출력 A, B상 ····· 291
그림 3.3.1.76 PWM에 따른 전류제어파형 ····· 291
그림 3.3.1.77 전류제어 명령에 따른 PWM과 전류파형 ····· 292
그림 3.3.1.78 추진코일의 A상과 B상의 2상 제어파형 ····· 292
그림 3.3.1.79 정지상태의 SCR게이트 파형과 출력파형 ····· 293
그림 3.3.1.80 추진상태의 SCR게이트 파형과 출력파형 ····· 293
그림 3.3.1.81 온도 상승시험 ····· 294
그림 3.3.1.82 조합시험시의 데이터 레코더 파형 ····· 295
그림 3.3.1.82 소음 측정 ····· 296
그림 3.3.1.83 대차 주요 구성 ····· 297
그림 3.3.1.84 대차의 주요 구성품 조립도 ····· 297
그림 3.3.1.85 독립윤축의 구조 ····· 299
그림 3.3.1.86 곡선구간에서 조향장치의 거동 ····· 299
그림 3.3.1.86 윤축의 구조 ····· 300
그림 3.3.1.87 차륜 답면 형상 ····· 300
그림 3.3.1.88 액슬박스 조립 구조 ····· 301
그림 3.3.1.89 대차프레임 조립 구조 ····· 301
그림 3.3.1.90 조향장치 조립 구조 ····· 302
그림 3.3.1.91 회전장치 조립 구조 ····· 303
그림 3.3.1.92 견인력 전달 구조 ····· 303
그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (1/6) ····· 306

그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (2/6) ····· 307
그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (3/6) ····· 308
그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (4/6) ····· 309
그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (5/6) ····· 310
그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (6/6) ····· 311
그림 3.3.1.94 실대차 및 지상 코일 ····· 312
그림 3.3.2.1 BLDC 전동기의 구조 ····· 313
그림 3.3.2.2 BLDC 전동기의 고정자 권선 (집중권) ····· 313
그림 3.3.2.3 BLDC 전동기의 착자방향과 역기전력 파형 ····· 314
그림 3.3.2.4 3상 2극 BLDC 전동기의 구동 과정 ····· 315
그림 3.3.2.6 3상 2극 BLDC 전동기의 구동 원리 ····· 316
그림 3.3.2.7 철도차량용 LPM 시스템 자기등가회로 ····· 317
그림 3.3.2.8 LPM 기본 형상 및 치수 ····· 319
그림 3.3.2.9 철도차량 추진용 LPM 구동 시스템 ····· 321
그림 3.3.2.10 HB type single side LPM ····· 322
그림 3.3.2.11 HB type single side LPM ····· 322
그림 3.3.2.12 VR type single side LPM ····· 322
그림 3.3.2.13 PM type double side LPM ····· 323
그림 3.3.2.14 2D 유한요소 해석 모델 ····· 324
그림 3.3.2.15 2D 유한요소 해석 모델 설계 파라미터 ····· 324
그림 3.3.2.16 2D 유한요소 해석모델 지상 권선 권선 방향 ····· 325
그림 3.3.2.17 운전 모드에 따른 고정자 권선 전류 파형 ····· 325
그림 3.3.2.18 A,B상 전류에 따른 지상 권선 극성 변화 ····· 325
그림 3.3.2.19 3D 유한요소 해석 모델 설계 ····· 326
그림 3.3.2.20 3D 유한요소 해석모델 3D 유한요소 해석모델 ····· 326
그림 3.3.2.21 2상 펄스 전류 생성을 위한 전력변환 회로 ····· 327
그림 3.3.2.22 펄스파 형태 결정 요소 ····· 328
그림 3.3.2.23 외부회로를 통한 2상 펄스파 ····· 329
그림 3.3.2.24 2D 유한요소 해석모델 요소 분할도 ····· 330
그림 3.3.2.25 2D 유한요소 해석 모델 자기 포화 특성 ····· 331
그림 3.3.2.26 2D 유한요소 해석 모델 자속 선도 ····· 331
그림 3.3.2.27 2D 모델의 추력 특성 ····· 332
그림 3.3.2.28 2D 모델의 부상력 특성 ····· 333
그림 3.3.2.29 3D 유한요소 해석모델 요소 분할도 ····· 335
그림 3.3.2.30 3D 유한요소 해석 모델 추력 특성 ····· 336
그림 3.3.2.32 추력 특성 계측 장비 ····· 338
그림 3.3.2.33 추력 특성 계측 실험 ····· 338
그림 3.3.2.34 추력 특성 실험 계측 값 분산도 ····· 339
그림 3.3.3.1 견인력 측정을 위한 환경 ····· 342
그림 3.3.3.2 견인력 측정값 ····· 343
그림 3.3.3.3 공극 자속 측정 개요 ····· 343

그림 3.3.3.4 공극 자속 측정 사진 ····· 344
그림 3.3.3.5 공극자속 측정 결과 ····· 344
그림 3.3.3.5 공극자속 측정 결과 ····· 345
그림 3.3.3.6 차상 전원용 집전모듈의 전류 파형 ····· 345
그림 3.3.3.7 차상 전원공급장치 부하시험 ····· 346
그림 3.3.3.8 차상전원공급장치 정전류 특성시험 결과 ····· 347
그림 3.3.3.9 A상에 전류 1,800A 공급 시 모니터링 화면 ····· 347
그림 3.3.3.10 A상에 전류 2,000A 공습 시 출력 전압/전류 측정 화면 ····· 348
그림 3.4.1.1 BOM 프로그램 구성 ····· 349
그림 3.4.1.2 LPM BOM Manager 프로그램 화면 ····· 349
그림 3.4.1.3 LPM BOM DB Logical Diagram ····· 350
그림 3.4.1.4 LPM BOM DB Physical Diagram ····· 350
그림 3.4.1.5 실대차 모델 장치 분류 ····· 351
그림 3.4.1.6 LogIn ····· 352
그림 3.4.1.7 LPM BOM Manager 기본화면 ····· 352
그림 3.4.1.8 부품 추가 ····· 353
그림 3.4.1.9 부품 정보 변경 ····· 353
그림 3.4.1.10 차상장치 BOM Tree ····· 354
그림 3.4.1.11 지상장치 BOM Tree ····· 354
그림 3.4.2.1 일상검사 공정도 ····· 357
그림 3.4.2.2 월상검사 공정도 ····· 357
그림 3.4.2.3 연간검사 공정도 ····· 358

1. 연구개발과제 개요

1.1. 연구의 목적 및 필요성

1.1.1. 연구의 배경 및 목적

지구온난화 및 원유 공급 감소 또는 고갈로 에너지 효율성이 높고, 저탄소 녹색 성장을 주도할 수 있는 철도산업에 대한 관심이 고조되고 있다. 또한, 세계적으로 꾸준히 증가하는 철도 건설 및 수요에 대응하기 위하여 교통수단의 다양화가 요구되고 있으며, 기존 철도차량 추진시스템의 한계를 극복하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 철도차량 추진시스템은 다음과 같은 단점을 가지고 있다.

□ 기존 철도차량 추진시스템의 단점

- 접촉식 전력공급장치에 따른 터널 건설비 및 유지보수비용 증가
- 점착구동 방식에 따른 급가속이나 초고속화의 어려움
- 전력변환장치 및 회전형 견인전동기/기어 장치의 차량 탑재에 따른 부피/무게 증가로 에너지 효율 저하 문제
- 도심내 전력선의 미관 침해 및 위험성 증대

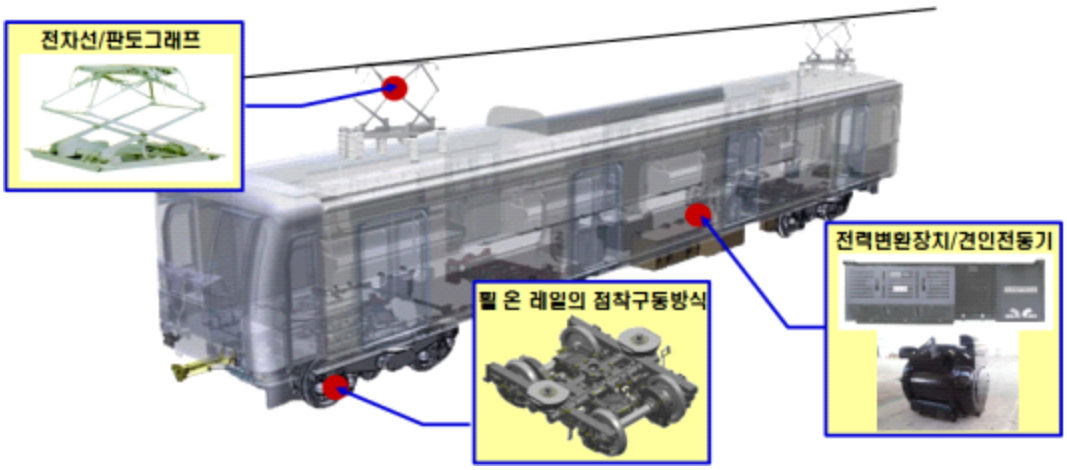


그림 1.1.1.1 기존철도차량 추진시스템의 한계

따라서, 이러한 문제점을 일시에 소거하는, 신개념의 미래형 전기철도 추진시스템 개발의 필요성이 대두하게 되었고, 그 방법으로 리니어펄스모터(Linear Pulse Motor, LPM) 추진시스템이 주목받고 있다. LPM 추진시스템은 그 구조적인 특징으로 인해 다음과 같은 장점을 갖는다.

□ LPM 추진시스템의 장점

- 가감속 성능 우수 및 비점착 구동에 의한 등판능력 우수
- 저속부터 초고속까지 모든 속도영역 주행 가능
- 차량 경량화에 따른 높은 에너지 효율
- 가공전차선 설비가 불필요하여 기존 철도시스템보다 약 20% 건설비 저감 가능
- 지상 1차 추진전력 공급시스템으로 인해 대용량 전력의 차량 공급문제 해소

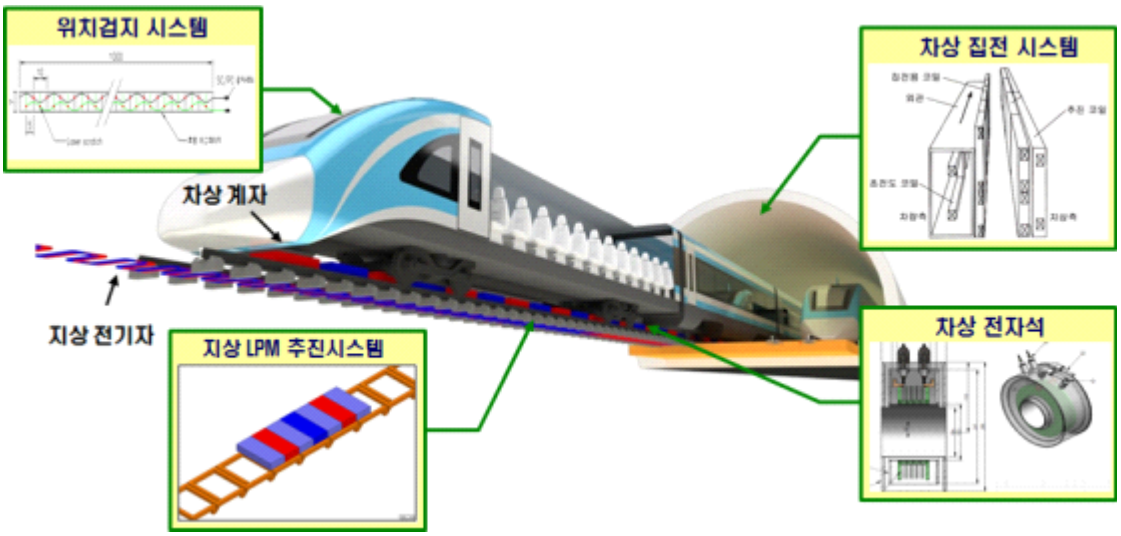


그림 1.1.1.2 리니어펄스모터 추진시스템의 구성

LPM 추진시스템은 철도의 첨단화와 초고속화 달성은 물론 친환경적인 미래형 교통수단으로서의 파급효과가 크고, 또한 기계부품, 전기·전자 및 제어 등의 기술이 집약된 시스템으로서 각 기술 간의 인터페이스가 중요하며, 개발 시작 단계에서부터 시스템에 대한 운영 요구사항과 기본사양을 종합적으로 검토하고, 이를 개념설계 및 기본설계에 반영하여 시스템을 통합해가는 과정이 필수적이며, 이러한 과정을 체계적으로 수행하기 위한 시스템엔지니어링 기술이 필요하다.

본 과제에서는 LPM 추진시스템 설계기술 확보 및 조합 성능평가를 위하여 기술적으로 데모가 가능한 실대차 및 LPM 추진시스템 시제품을 제작하였다.

1.1.2. 연구개발의 중요성

LPM 추진시스템 개발 시 해외 주도의 리니어 추진시스템 기술 종속 탈피가 가능하고, 이와 더불어 선진국 수준의 차세대 철도 핵심 추진기술 보유가 가능하다. 추진/전력시스템의 경우 첨단 운영 및 유지보수 기술의 확보를 통한 철도 안전성과 신뢰성 확보를 통해 선진국 수준을 능가하는 리니어 추진 및 전력시스템의 핵심 요소 기술 확보가 필요하며, LPM 추진시스템은 물류분야의 클린 운송시스템, 궤도형 첨단 놀이기구, 급경사 상승이 필요한 산악철도, 수직 엘리베이터 등에도 활용될 수 있으므로 기술적 파급 및 이에 따른 경제적인 효용성이 크다.

LPM 추진시스템은 비접촉 추진 방식이므로 바퀴 접촉식 철도에 비해 유지보수 비용이 저렴하고, 수명주기 비용측면에서 기존 철도시스템에 비해 경쟁력이 있으므로 개발 및 활용이 필요하다. 원천기술 개발을 통해 철도산업 분야의 첨단과학 기술화로 철도산업의 기술 진흥에 기여하고 해외 철도사업의 시장 경쟁력 강화를 위한 기반 제공이 가능하다. 또한, 국내 철도산업의 신수요 창출 및 관련 산업의 경쟁력을 증대시켜 철도부품 및 소재 개발에 필요한 원천 기술 파급효과도 크다.

향후, LPM 추진시스템을 이용한 초고속 철도기술의 상용화 개발로 대국민 수송 서비스 확충 및 국민의 편의 증진을 통해 초고속 교통 기반에 의한 경제, 문화, 환경 개선 등 생활수준 향상을 기대할 수 있다. 더하여, 친환경 추진시스템으로 인한 국민 건강 유해요소 최소화와 최첨단 기술보유에 따른 첨단기술국가로의 이미지 개선으로 국제적 위상 제고가 가능하다.

1.2. 연구 목표 및 주요 연구 내용

1.2.1. 연구개발의 최종 목표

□ 기존 철도차량 추진시스템을 개선하여 무가선, 비접착, 순시제동, 자동위치 검지, 차상 급전 등의 기능을 갖춘 신개념 미래 철도차량 추진시스템의 핵심 기술을 개발하고, 테스트베드를 통해 실증하는 기술 개발



그림 1.2.1.1 연구개발 목표 및 내용

1.2.2. 세부 연구 목표 및 내용

□ 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술 확보

○ LPM 추진시스템의 철도적용 타당성 평가

- LPM 추진시스템의 경제적, 정책적, 기술적 타당성 제시

○ 철도차량 추진을 위한 LPM 기초기술 연구

- LPM 관련 모델링, 추진제어 기법, 모의 해석 등 기초 이론 수립

□ 축소형 LPM 추진시스템

○ 축소형 LPM 추진시스템 개발

▪ 축소형 모델 실험에 필요한 구성요소 확정

▪ 축소형 LPM 추진시스템 제작

○ 축소형 모델 해석 연구 및 성능 예측

▪ 축소 모델에 대한 성능해석 및 시험

○ LPM 추진시스템 분석 및 토크 리플 저감 기법 연구

▪ LPM 추진시스템의 토크 리플 분석 및 저감 기법 연구

▪ 시뮬레이션 및 실험을 통한 검증

□ 실모형 LPM 추진시스템

○ 실모형 LPM 추진시스템 설계 및 제작

▪ 지상 LPM 추진시스템 설계 및 제작

▪ 차상 계자용 전자석 설계 및 제작

▪ 차상 전원용 전원장치 설계 및 제작

▪ 지상 대전류 공급용 전력변환장치 설계 및 제작

▪ 실대차 제작 및 시스템 통합

○ 실모형 LPM 추진시스템 해석 모델 구축

▪ 실대차 모델에 대한 성능해석 및 시험

○ 철도차량용 LPM 추진시스템 성능평가

▪ 지상 LPM 추진시스템 성능평가

▪ 차상 계자용 전자석 성능평가

▪ 차상 전원용 전원장치 성능평가

▪ 지상 대전류 공급용 전력변환장치 성능평가

□ LPM BOM 시스템 구축

○ LPM BOM 시스템 구축

▪ LPM 추진시스템 구성품 분류

▪ BOM Tree 작성

○ 유지보수 체계 구축

▪ 기존 도시철도 정비 체계를 기반으로 LPM 추진시스템 유지보수(안) 제시

□ LPM 추진시스템 실용화 검토

○ 철도종합시험선로 Test-Bed 구축

▪ 철도종합시험선로내에 LPM 추진시스템을 설치하여 테스트할 수 있는 구축(안) 제시

○ LPM 추진시스템 전원공급 방안

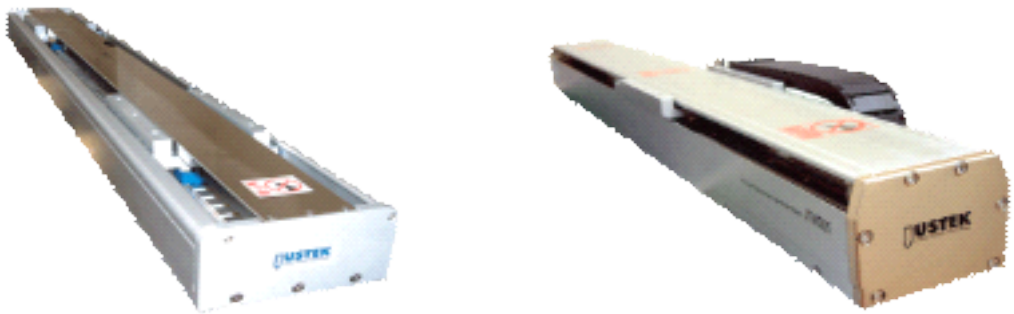
▪ LPM 추진시스템의 전력변환장치에 전원을 공급하는 방안 제시

1.3. 국내외 기술개발 현황

1.3.1. 국내 기술 및 산업 동향

국내에서는 1990년대 공작기계용으로 리니어 모터가 주목을 받기 시작한 이래 고속화, 고속가공을 목적으로 리니어 모터를 탑재하는 공작기계에 대한 시장이 형성되기 시작했으며, 최근에는 반도체 및 평판 디스플레이 생산 장비와 고정밀 인쇄 장비의 모션 제어 등에도 활용범위가 확산됨에 따라 매년 그 수요가 점차 증가하고 있다. 2007년 말부터는 8세대 LCD 설비투자를 시작으로 10, 11세대는 물론 5세대, 6세대에 대한 설비투자가 잇달아 진행되고 있으며, 최근에는 일본, 대만 등으로부터의 해외물량 수주도 크게 늘어나면서 국산 제조 산업체들의 해외진출이 활발히 늘어나고 있으며, 반도체 및 평판 디스플레이 생산 장비와 고정밀 인쇄 장비의 모션제어 등에 적용하며 그 활용범위도 확산되고 있다.

국내 대표적인 리니어 모터 산업체는 신성 ENG, 세우산전, 삼익 LM, 져스텍, 미래산업, 동진기전과 같은 중소 벤처기업이 있으며, 최근에는 일본, 대만 등으로부터의 해외물량 수주도 크게 늘어나면서 국산 제조 산업체들의 해외진출이 활발하며 소형, 소용량 리니어 모터 분야에서는 선진국과 대등한 수준의 기술력을 보유하고 있다.



(a) 철심형 (b) 공심형

그림 1.3.1.1 반도체 이송 공정용 소형 리니어 모터 제품

최근 관련기술의 활용분야는 리니어 추진시스템을 이용한 친환경 지능형 이송 시스템 및 클린 반송 시스템의 사업화 기술, 친환경 ITS시스템 사업화 기술 등 고청정, 고효율 이송시스템 개발 등이 있다.

그림 1.3.1.1은 다수의 리니어 추진시스템을 루프형으로 구성한 물류이송시스템으로 각각의 섹션에 구동 드라이브(JSMD)를 설치하여 대차가 위치한 섹션과 이웃한 섹션에 추진전원을 공급하는 시스템으로 섹션전환 방식은 독일의 Leapfrog 방식과 유사하다. 그러나 상기 시스템은 저속에서 토크 리플(ripple) 없이 사용이 가능하지만 하나의 구동시스템 고장 시 연속운전이 어렵고(리던던시 기능이 없음) 동시에 2대의 인버터에 전원을 공급하는 방식으로 에너지 소모도 많다.

하이브리드 방식의 LPM 연구와 관련하여, 2001년도에 (주)모아텍 주관 하에 공작기계용 이송테이블 시스템을 위한 직접 구동 LPM 연구를 통하여 최대추력 150N, 최대속도 2m/s 의 LPM 시제품 제작 연구가 진행되었다.

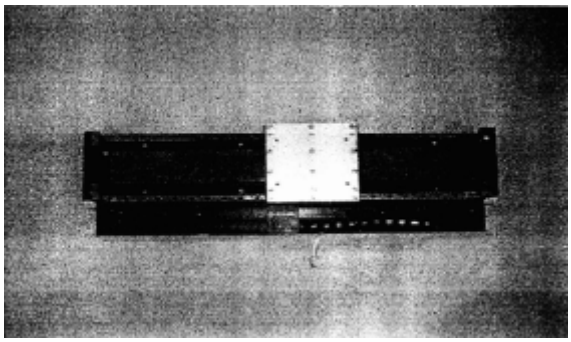


그림 1.3.1.2 공작기계 이송테이블
구동용 150N급 Hybrid-type LPM

한국원자력연구원에서는 2006년도에 원자로 제어봉의 안전하고 신속한 구동을 위하여 액츄에이터로 튜블라 방식의 LPM을 적용하는 연구를 수행하였으며, 시제품으로 2m 스트로크에 100kg의 부하를 50mm/s의 속도로 이송시킬 수 있는 시제품을 제작하였다.

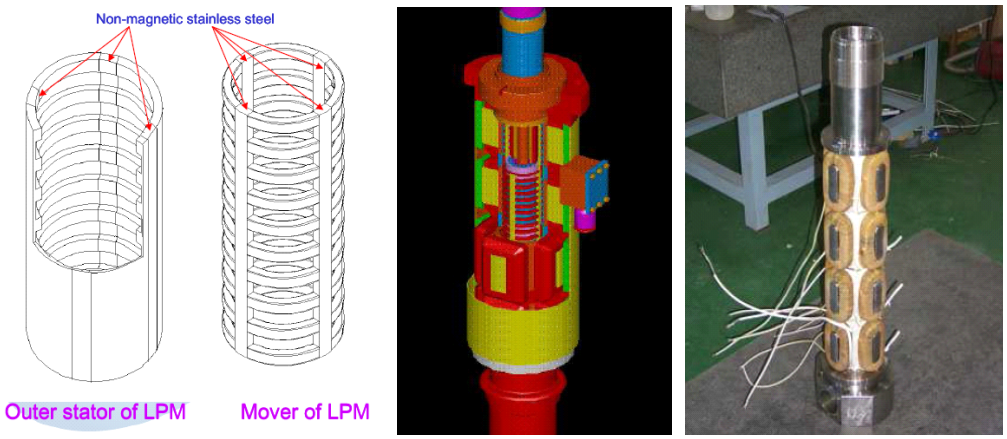


그림 1.3.1.3 원자로의 제어봉 구동장치용 Tubular-type LPM

국내의 철도교통에 적용되고 있는 선형전동기 기술은 주로 대형, 대용량 리니어 모터 기술로서, 선형유도전동기(Linear induction motor, LIM) 가 리니어 경전철 및 도시형 자기부상철도에 적용 중에 있으며, 최근 550km/h급 초고속 자기부상철도에 상전도 전자석 방식의 선형동기전동기(Linear Synchronous motor, LSM)를 이용한 추진 시스템 기술이 연구 중에 있다.

표 1.3.1.1 용인경전철의 주요사양

용인 경전철	개 요
	용인 경전철(에버라인) 개통시기 : 2012년 노선연장 : 18.4km 제작사 : 캐나다 봄바디어 정거장 : 15개 궤간 : 1435mm (표준궤) 전원 : 제3궤조 방식, DC750V 영업최고속도 : 80km/h

국내 최초의 리니어 추진방식의 경전철은 용인경전철이며, 봄바디어 트랜스포테이션의 ART 기반 열차를 사용하며, 최대속도는 80km/h 이고 약 200명 정도가 탑승할 수 있으며, 차량의 구동 방식으로 철궤도 중앙에 위치한 리액션 플레이트를 이용한 LIM 추진방식을 사용하고 있으며, 2012년에 개통되었다.

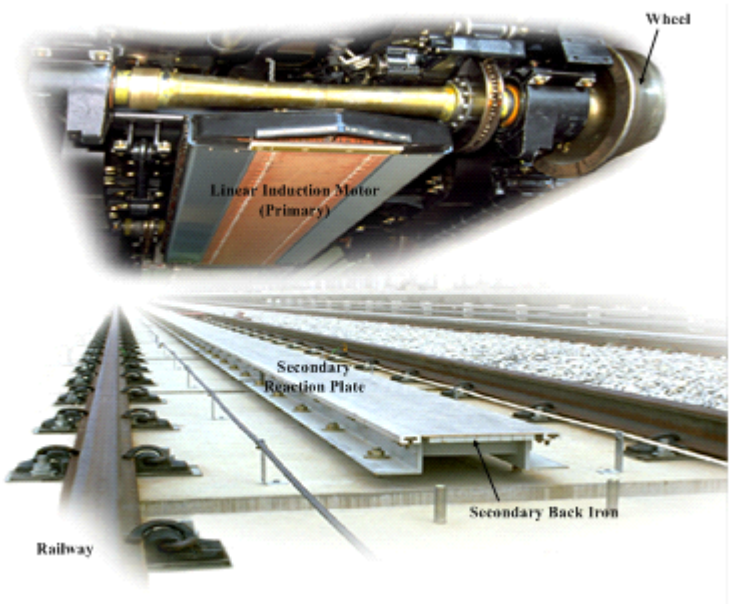


그림 1.3.1.4 용인경전철 추진시스템용 LIM의 차상 Primary와 지상 리액션 플레이트

LIM 추진방식의 도시형 자기부상철도는 1989년 한국기계연구원에서 연구를 시작으로 약 20여 년간 기술개발을 추진해 왔으며, 현재 인천공항~용유기지(8km)를 노선으로 하는 영업선이 개통을 눈 앞에 두고 있다.



(a) 국내 LIM추진 용인경전철



(b) 중저속 도시형 자기부상열차

그림 1.3.1.5 LIM 방식의 추진 기술 국내 적용 현황

상전도 LSM 방식의 추진 기술은 한국철도기술연구원에서 수행한 초고속 튜브철도 차량 핵심기술 개발을 목적으로 700km/h급 초고속 LSM 추진 기술 대한 기초 연구를 수행한 바 있으며, 이러한 기반 연구를 토대로 550km/h급 초고속 자기부상철도의 핵심 기술 개발을 목표로 2011년부터 3년간 약 160억 규모의 국가 R&D가 현재 진행 중에 있다.

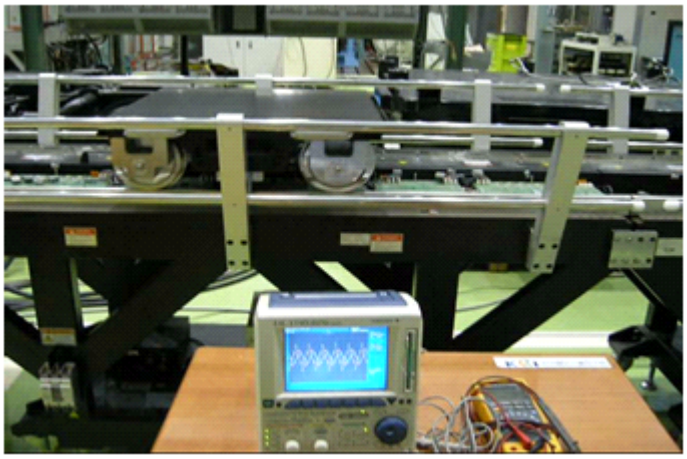


그림 1.3.1.6 상전도 LSM 추진 시스템 시작품
(한국철도기술연구원)

차상 급전을 위한 유도급전은 국내의 경우 주로 소용량 전자기기의 무선전원공급 또는 충전기술 개발을 목적으로 연구가 진행되고 있으며, 유도급전을 활용한 핸드폰 충전기기가 상용화되어 시장에 출시되고 있다. 또한, 반도체 공정 등 산업 자동화 분야(한국전기연구원) 및 전기버스(KAIST) 등에서 중용량 유도급전 관련 연구를 수행하였다.

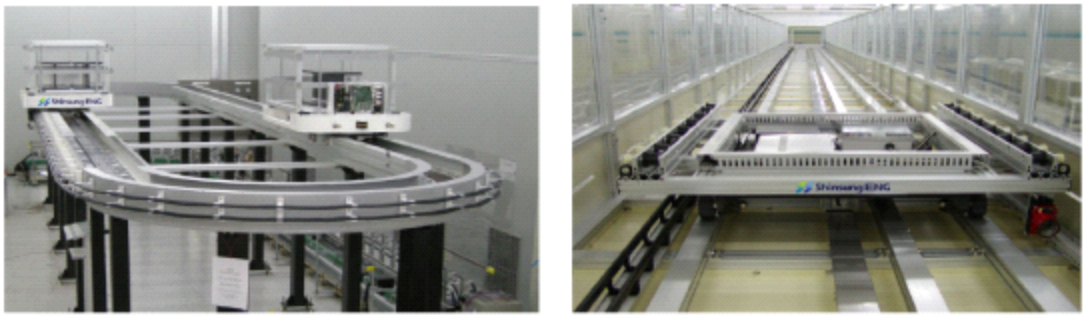


그림 1.3.1.7 한국전기연구원이 개발한 30kW급 CPS

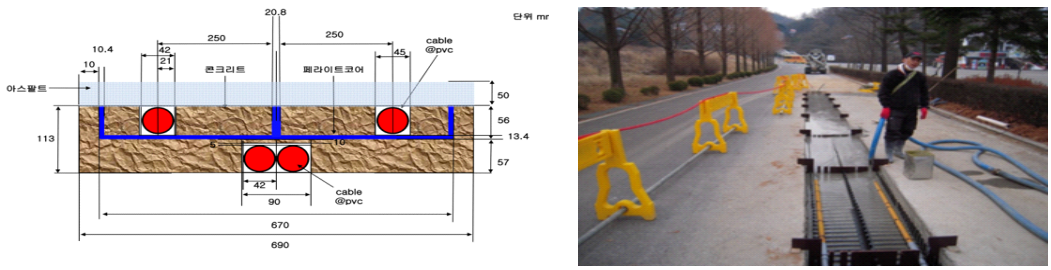


그림 1.3.1.8 KAIST의 서울대공원 코끼리 열차 급전선로

대용량 비접촉 급전의 경우, KAIST의 온라인 버스에 적용한 시스템을 응용하여, 한국철도기술연구원이 주관하여 KAIST와 공동으로 2013년 6월에 무가선 트램(180kW급)에 적용하였고, 이를 좀 더 발전시켜 2014년 5월에는 차세대 고속열차인 HEMU-430X(1MW급)에 적용하여 시험운행에 성공하였다.



(a) 무가선 트램 (180kW급) (b) HEMU-430X (1MW급)

그림 1.3.1.9 한국철도기술연구원의 대용량 비접촉 급전 기술 시연

1.3.2. 국외 기술 및 산업 동향

LIM을 이용한 지하철 또는 경전철의 국외 개발 동향을 살펴보면, 일본, 캐나다, 미국 등을 중심으로 연구되었고, 1980년대 후반부터 상용화가 이루어졌다. 2007년 현재 리니어 전철을 자체적으로 설계제작 가능한 국가는 캐나다와 일본 2개 국가가 있으며, 캐나다 Bombardier사는 미국, 말레이시아, 중국, 한국 등에 MK-I, MK-II 모델의 리니어 경전철차량을 수출하고 있고, 일본에서는 국산화된 기술을 바탕으로 자국의 5개 도시에서 LIM 지하철을 운행하고 있다.

표 1.3.2.1 일본과 캐나다의 LIM 추진시스템을 적용한 지하철/경전철 개발 현황

일본의 리니어 지하철		캐나다의 리니어 경전철	
이미지	주요 사양	이미지	주요 사양
	오사카 Line No.8 개통시기 : 1990년 노선연장 : 26.9km 제작사 : Kawasaki 정거장 : 5개 최급구배 : 60‰ 최소곡선반경 : 100m		벤쿠버 Skytrain 개통시기 : 1986년 (1994년 연장) 노선연장 : 49.5km 제작사 : Bombardier 최고속도 : 80km/h 열차편성 : 2~4량
	도쿄 Oedo Line 개통시기 : 1997년 노선연장 : 40.7km 제작사 : Hitachi 정거장 : 38개 최급구배 : 55‰ 최소곡선반경 : 100m		미국 뉴욕 Airtrain JFK 개통시기 : 2003년 노선연장 : 13km 제작사 : Bombardier 최고속도 : 110km/h 열차편성 : 1~4량
	고베 Kaigan Line 개통시기 : 2001년 노선연장 : 7.9km 제작사 : Kawasaki 정거장 : 10개 최급구배 : 50‰ 최소곡선반경 : 100m		말레이시아 Putra 개통시기 : 1998년 노선연장 : 29.2km 제작사 : Bombardier 정거장 : 24개 열차편성 : 4량
	중국 광저우 개통시기 : 2005년 노선연장 : 14.11km 제작사 : Kawasaki; Sifang R&S 정거장 : 5개 열차편성 : 4량		한국 경기도 용인 개통예정시기 : 2012년 노선연장 : 18.6km 제작사 : Bombardier 정거장 : 15개 열차편성 : 1량

	후쿠오카 Nanakuma Line 개통시기 : 2005년 노선연장 : 12km 제작사 : Hitachi 정거장 : 16개 최급구배 : 60‰ 최소곡선반경 : 100m		
	요코하마 Line No.4 개통시기 : 2007년 노선연장 : 12.9km 정거장 : 10개 최급구배 : 60‰ 최소곡선반경 : 100m		
	센타이 Tozai Line 개통예정시기 : 2015년 노선연장 : 14km 정거장 : 13개 최급구배 : 60‰ 최소곡선반경 : 100m		

캐나다의 경우, UTDC(캐나다 온타리오의 도시수송개발공사, Urban Transit Development Corporation, Ltd)사는 1970년대부터 리니어 모터를 이용한 수송시스템을 개발하기 시작하여 지금은 ALRT(Advanced Light Rapid Transit)시스템으로 상용화를 달성하였다. 세계 최초로 리니어 모터 전철을 개발하여 1985년에 토론토의 스카보로(Scarborough)에 시스템을 건설하였고, 그 후 밴쿠버의 스카이트레인, 디트로이트의 피플무버(People Mover)를 건설하여 상용화시켰다. 현재 캐나다에서는 Bombardier사가 기술을 이전받아, 미국의 디트로이트, 뉴욕 JFK 공항 순환노선, 말레이시아 쿠알라룸푸르의 리니어 전철 시스템을 설계, 제작한 바 있으며, 한국의 용인 경전철, 중국 북경의 공항노선에 리니어 전철시스템을 건설하였다.

일본의 경우, 1985년 4월부터 운수성이 주관하여 산・학・연・관 합동으로 지하철의 저가격화에 관한 연구개발을 시작한 이래 1987년 3월부터 오사카에 1,885m의 시험선을 설치하여 LIM 추진시스템 적용 차량의 안전성, 경제성 등의 평가시험을 실시하였으며, 사단법인 일본 지하철협회가 '리니어 모터 구동 소형 지하철 시스템'의 연구로 최고속도 70km/h, 길이 1,850m, 구배 60‰, 40‰의 선로를 오사카에 설치하여 연구를 수행하였다. 오사카 7호선, 동경 12호선 등의 상용화선이 대표적인 경우로서 기존 지하철에 비하여 LIM을 이용한 경우 터널의 단면적을 64% 정도까지 줄일 수가 있어서 전체 건설비의 70% 이상을 차지하는 터널공사비를 대폭 경감시킬 수가 있었다.

미국에서는 Sandia National Lab.에서 1995년도에 SERAPHIM-200 (SEgmented RAil PHased Induction Motor) 프로젝트를 수행하였으며, 일반적인 LIM과 다르게 Pulsed magnetic field와 Segmented reaction rail을 이용한 펄스타입의 LIM 기술을 선보였다.

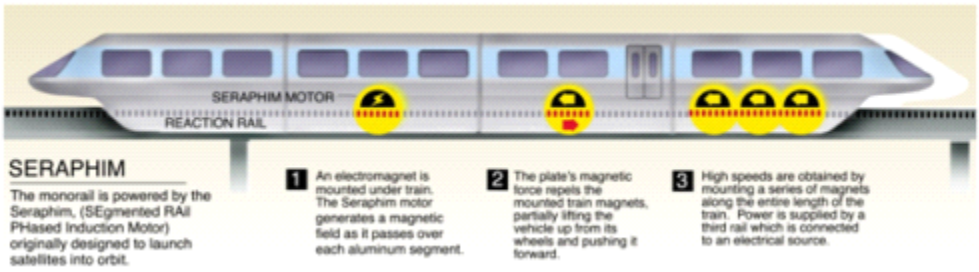
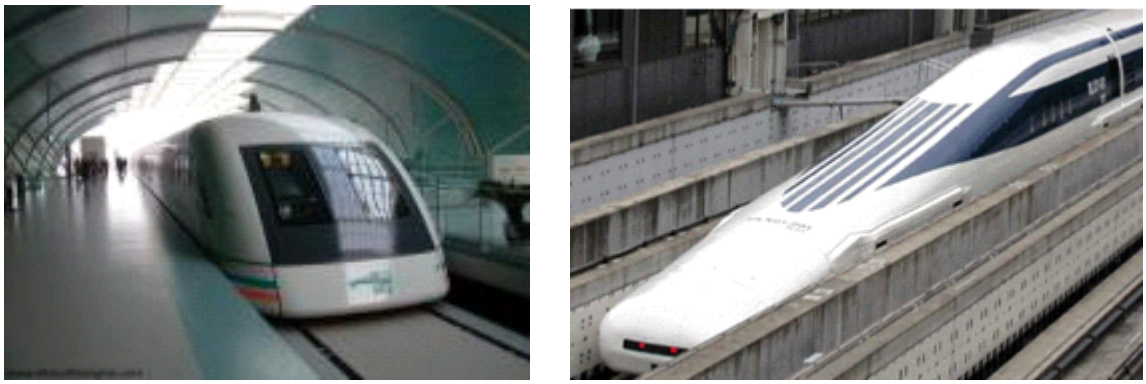


그림 1.3.2.1 SERAPHIM 열차 concept (Vertical reaction plate 방식)

독일에서는 1970년 초부터 상전도 LSM 기술을 적용하여 500km/h 급 초고속 자기부상철도인 Transrapid를 개발하였으며, 중국 상하이에 세계 최초로 영업노선을 구축하여 2004년부터 운행 중에 있다.

일본은 토카이도 신칸센 노선(도쿄~오사카)의 포화로 대체선로의 필요성이 증가하면서 추오신칸센 계획을 수립(신칸센 철도정비법 제4조)하고, 1970년도부터 초전도 전자석을 이용한 LSM 기술을 적용하여 500km/h 이상의 초고속 자기부상철도를 개발하였으며, 도쿄와 오사카 간 약 500km 구간을 초전도 자기부상열차로 약 1시간 내에 주파하는 영업 노선을 계획하고, 전체노선 중 1단계 사업으로서 도쿄에서 나고야까지 약 290km 구간을 2027년까지 건설 완료하는 것을 목표로 연구개발을 진행하고 있다.



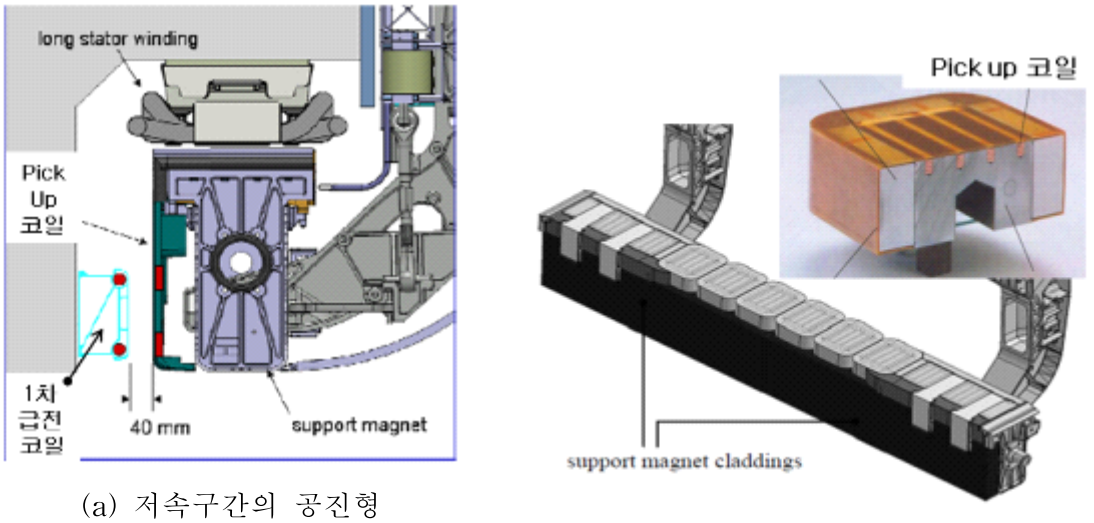
(a) LSM 초고속 자기부상열차 (b) LSM 초고속자기부상열차

그림 1.3.2.2 국외 LSM 방식 추진 철도

비접촉 차상 집전기술의 경우, 독일, 프랑스, 영국 등을 포함하는 유럽연합에서는 2002년도부터 EVIAC (Electric Vehicle Inductive Automatic Charging)를 구성하여 전기자동차 및 경량전철에 활용할 수 있는 유도 급전기술을 공동 개발하고 있다.

비접촉 차상 집전기술을 수송시스템에 적용한 사례로는 미국 라스베가스 관광객 수송을 위한 환경 친화적인 궤도전용 유도 급전 경량전철에 상용화 하였으며, 뉴질랜드의 경우 오크랜드 대학에서 연구를 수행하여, 환경 친화적인 도로전용 유도급전 소형자동차시험선을 구축하여 상용화 검증시험이 진행 중이다.

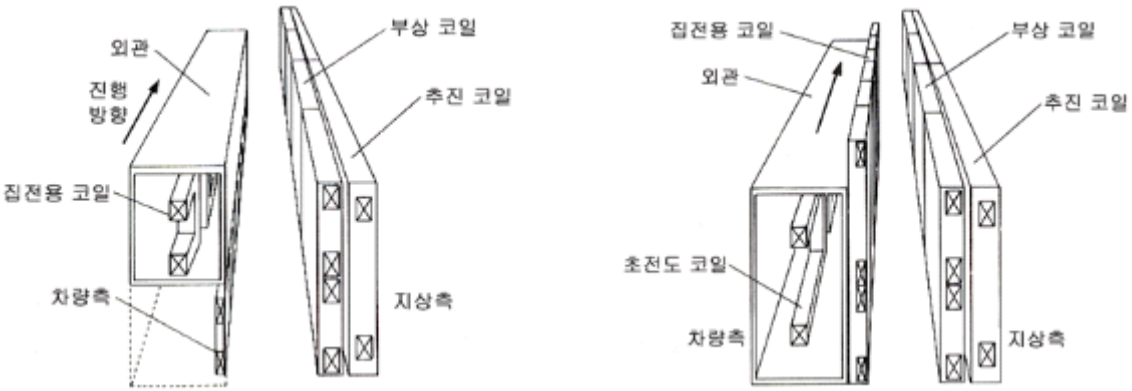
독일의 500km/h 초고속 자기부상철도의 경우 역사 등 저속주행 구간에서의 차량급전을 목적으로 공진방식의 유도급전기술을 적용하고 있으며, 100km/h 이상의 고속 주행구간에서는 선형발전기식 유도급전기술을 적용하고 있다.



(a) 저속구간의 공진형 유도급전시스템 (b) 고속구간의 선형발전식 차량 전자석

그림 1.3.2.3 독일 초고속 자기부상열차의 유도급전 시스템

일본의 MLX는 전 속도구간에서 비접촉식 차상집전 시스템을 개발하여 채용하고 있으며, 차상 집중식 및 차상 분산식 두 가지 방법을 적용중이다.



(a) 차상 집중 방식 (b) 차상 분산 방식

그림 1.3.2.4 독일 초고속 자기부상열차의 유도급전시스템

1.3.3. 특허 동향

1.3.3.1. 년도별 출원 현황

리니어 추진시스템 관련 기술은 1970년대부터 꾸준히 발전해왔으며 1990년대 초와 1990년대 말에 상대적으로 많은 특허 출원이 시작되어 2003년에는 가장 많은 18건의 특허가 출원되었다. 이는 1990년대 말 자기부상열차와 관련한 연구가 활발해지면서 다시 특허출원이 활발해진 것으로 판단되며, 2006년도 이후 특허 출원 수가 감소하는 것은 특허 출원 후 공개되기까지 시간이 소요되기 때문인 것으로 판단된다.

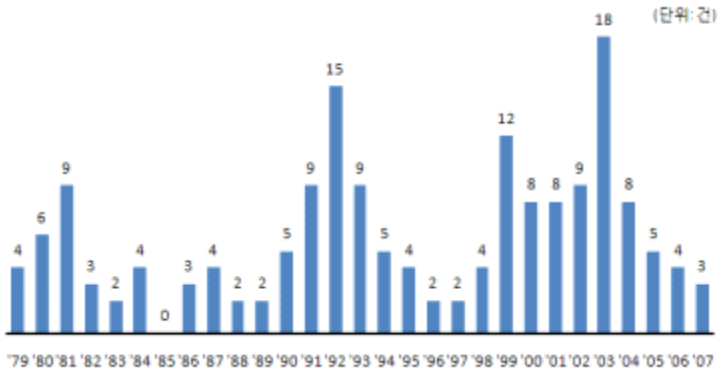


그림 1.3.3.1 연도별 특허 출원 현황

리니어 추진시스템 기술은 일본에서 높은 특허 출원율을 보이며, 2000년대 중반에 가장 많은 특허를 출원하였다. 미국과 유럽의 경우 특허 출원 추이는 비슷하며, 2000년대 초에 미국에 특허출원이 활발하였다.

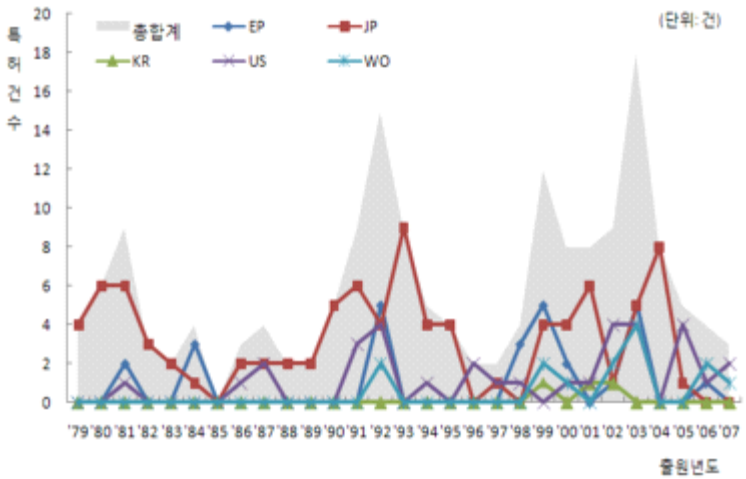


그림 1.3.3.2 연도별 특허 출원 추이

1.3.3.2. 국가별 출원 동향

리니어 추진시스템 기술 관련 도메인별 특허 출원 건수를 살펴보면, 일본에 많은 특허를 출원하고 있음을 알 수 있으며, 미국과 유럽에 비슷한 출원 건수를 출원하였다. 일본에서 가장 많은 54%인 92건을 출원하였고 유럽과 미국에 출원하는 특허가 비슷하나 유럽이 4%정도 앞서고 있으며, 한국에는 2%의 특허를 출원하였다.

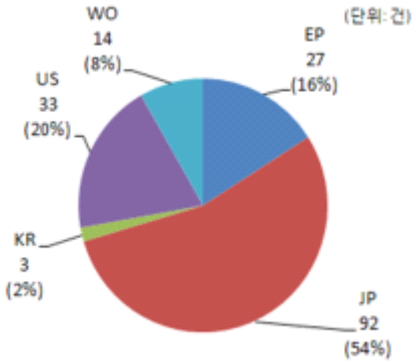


그림 1.3.3.3 도메인별 출원비율

출원인 국적별 특허 출원 현황을 살펴보면, 일본 출원인이 가장 많은 특허를 출원하였고 미국, 독일 순으로 특허를 많이 출원하였다. 가장 많은 특허를 출원한 일본은 자국 내 특허 출원이 가장 많고 독일, 미국 등에도 특허를 출원하였다. 미국과 독일의 출원인도 자국의 특허출원을 많이 하는 경향을 보였으나, 상대적으로 고르게 각 국가에 출원하고 있는 것으로 분석된다.

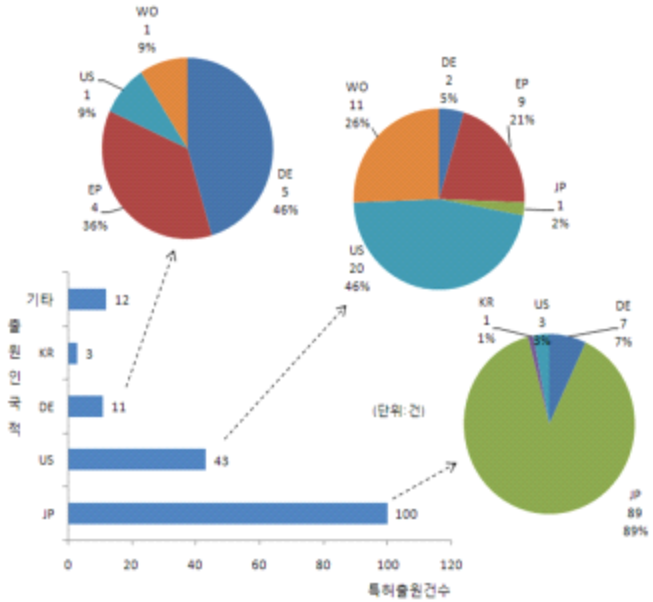


그림 1.3.3.4 출원인 국적별 분포

1.3.3.3. 출원인별 출원 동향

출원인별로 특허 출원현황을 살펴보면 일본의 HITACHI 사가 가장 많은 17건의 특허를 출원하였으며 MAGNEMOTION을 제외하고는 거의 일본회사가 상위권에 분포하고 있다.

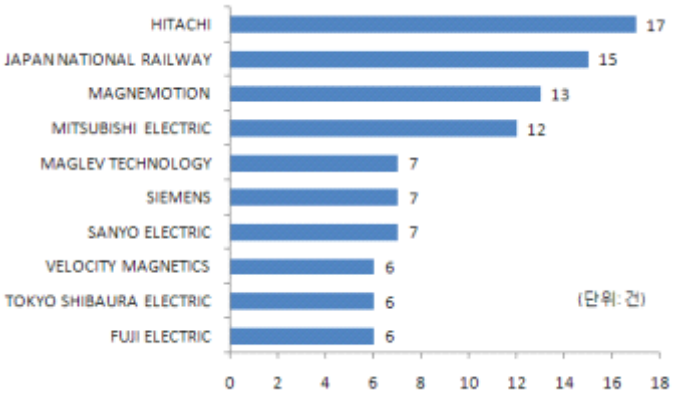


그림 1.3.3.5 출원인별 특허 출원 추이

상위 4위 출원인의 도메인별 특허 출원 현황을 살펴보면 대부분 자국에 특허를 많이 내고 있지만 독일과 미국에도 특허를 출원하고 있다. 출원 건수가 가장 많은 일본의 HITACHI社의 경우 전체 17건 중 독일에 5건, 일본에 10건, 미국에 2건을 출원하였고, Japan National Railway의 경우 독일과 일본에 출원하는 모습을 보이고 있다.

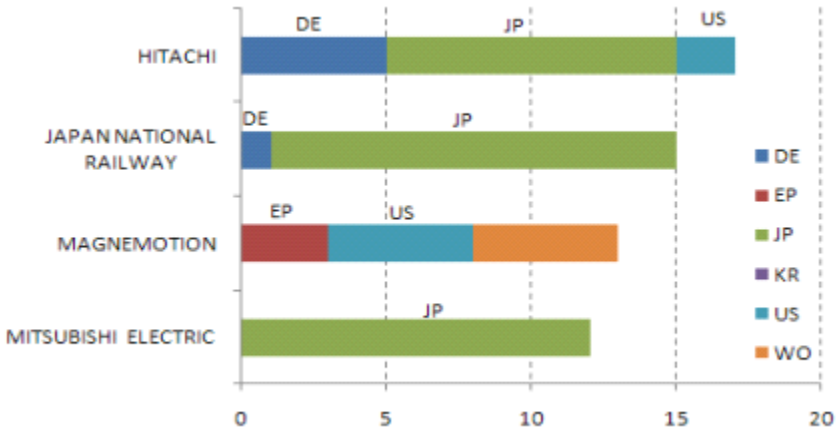


그림 1.3.3.6 상위 4개 출원인의 도메인별 출원 현황

양적으로 많이 보유한 출원인은 HITACHI, JNR, MAGNEMOTION 등이고 질적으로 우수한 특허를 보유한 출원인은 MAGLEV TECHNOLOGY, SIEMENS, SANYO 등으로 나타난다.

표 1.3.3.1 특허건수와 연평균 피인용도 상위 10위 출원인 비교

특허 출원 건수 상위 10위 출원인		연평균 피인용도 상위 10위 출원인	
HITACHI	17	MAGLEV TECHNOLOGY	3.41
JAPAN NATIONAL RAILWAY	15	WAVRE; NICOLAS	3.38
MAGNEMOTION	13	SIEMENS	3.21
MITSUBISHI ELECTRIC	12	SANYO ELECTRIC	2.62
SANYO ELECTRIC	7	HITACHI	1.92
SIEMENS	7	MAGNEMOTION	1.10
MAGLEV TECHNOLOGY	7	CIMARRON TECHNOLOGY	0.98
FUJI ELECTRIC	6	OTIS ELEVATOR	0.80
TOKYO SHIBAURA ELECTRIC	6	BOEING	0.71
VELOCITY MAGNETICS	6	POWER PARAGON	0.64

주) 질적 지표로 연평균피인용도를 활용하였으나 절대적인 지표는 아님

출원인별로 특허 출원 추이를 살펴보면 90년대 초에는 HITACHI, MITSUBISHI 등 일본기업들의 특허 출원이 활발하였으나, 2000년대에는 SIEMENS, MAGNEMOTION 등 독일과 미국 기업의 특허출원이 활발히 진행되고 있다.

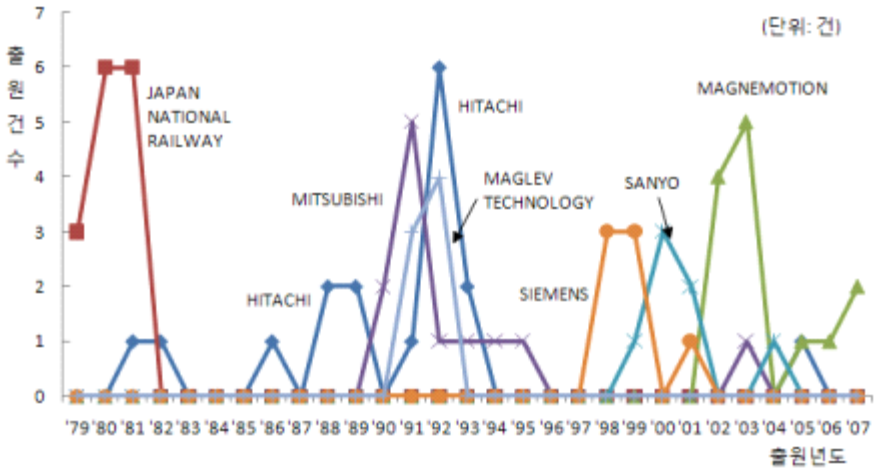


그림 1.3.3.7 상위 출원인 연도별 특허 출원 추이

1.3.3.4. IPC 분류별 출원 동향

특허들의 IPC 분류들을 살펴보면 B60L(전기적 추진차량의 전기장치)와 H02K(발전기, 전동기)의 분류가 75%를 차지하며 H02P(전동기, 발전기 제어/조정), B61B(철도 방식) 등의 순서로 높은 비율을 차지하고 있다.

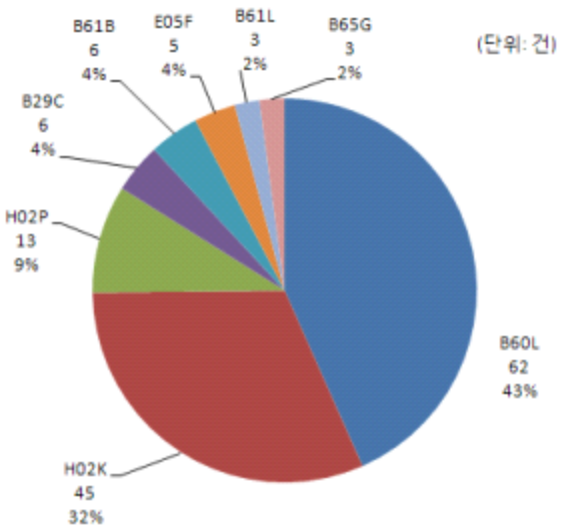


그림 1.3.3.8 IPC 분류별 특허건수

1.3.3.5. 주요특허리스트

연평균 피인용도가 높은 특허, 패밀리특허가 많은 특허 등을 주요특허로 선별하였으며, 2000년 이후 최근 특허는 모두 검토하여 주요특허 리스트로 선별하였다.

표 1.3.3.2 주요 특허 리스트

NO.	특허번호	출원인	명칭
1	JP2003052164A	UNIV NIHON	MAGNETICALLY LEVITATED TYPE XY PLANAR LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR
2	US5208496A	MAGLEV TECHNOLOGY	Linear synchronous motor having variable pole pitches
3	JP2003116262A	SHOWA ELECTRIC	LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR

4	JP2007089260A	HITACHI	LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR
5	JP2005224074A	TOKAI RYOKAKU TETSUDO	FEEDER CONTROL SYSTEM AND METHOD FOR LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR VEHICLE
6	US5253592A	UNITED STATES OF AMERICA DEPARTMENT OF ENERGY	Magnetic levitation configuration incorporating levitation, guidance and linear synchronous motor
7	US5910691A	WAVRE; NICOLAS	Permanent-magnet linear synchronous motor
8	US6917136B2	MAGNEMOTION	Synchronous machine design and manufacturing
9	WO2007108586A1	KOREA RAILROAD RES INST	SYSTEM OF RAILWAY VEHICLE USING LINEAR MOTOR AND NON-CONTACT ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM
10	WO2008005428A2	MAGNEMOTION	LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR POWER CONTROL SYSTEM AND METHODS

1.3.3.6. 결론 및 시사점

리니어 추진시스템 기술 관련한 특허는 모두 169건이 출원되었으며, 패밀리 특허를 제외하면 108건이 출원되었다. 그중 54%의 특허가 일본에 출원되었고, 미국과 유럽에도 약 20% 씩 출원되었다. 1990년대 일본 기업들의 출원이 활발하였고 2000년도에는 미국, 유럽, 일본 기업의 특허가 고르게 출원되는 경향을 보인다. 유럽 중 독일의 특허가 상위권에 랭크되어 연구개발이 활발히 이뤄지고 있는 것으로 분석된다.

전체 특허 출원 수는 HITACHI가 가장 많으나, 1990년도에 출원한 특허가 대부분이며 2000년대 이후에는 MAGNEMOTION, SEIMENS 등 기업에서 특허를 다수 출원하였다.

특허 대부분이 구성 부분에 대한 설명과 원리를 설명하는 방식으로 권리범위를 한정하여 특허를 출원하는 경향을 보이고 있다. 또한, 대부분의 특허들이 LSM에 관한 내용으로 구동제어 방식이 상이한 LPM에 대한 특허 출원은 없는 상황이다.

우리나라의 경우 특허가 많지 않아 특허문제를 야기할 가능성은 적으나 일본이나 미국에 특허를 출원할 경우 특허 침해 회피를 위한 전략이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

1.4. 기존 기술(연구)과의 차별성

1.4.1. 선형 추진시스템 분류

선형추진시스템은 추진용 선형전동기 방식에 따라 LIM based traction system, LSM based traction system, LPM based traction system으로 구분할 수 있으며, 본 연구에서 제안하는 LPM 추진시스템은 Electro-magnet type 선형 추진시스템으로서 공심형(Coreless type)이며, 계자는 전자석이 적용되었다. (축소모델의 경우 영구자석을 사용함)

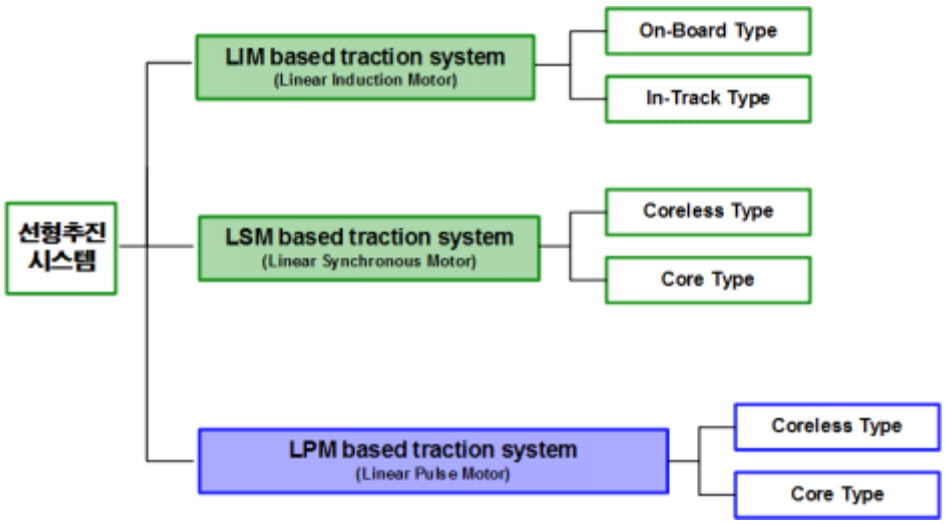
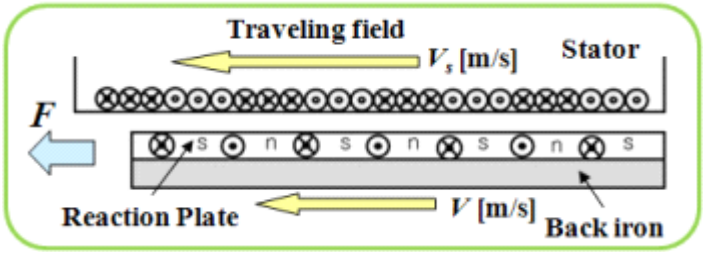
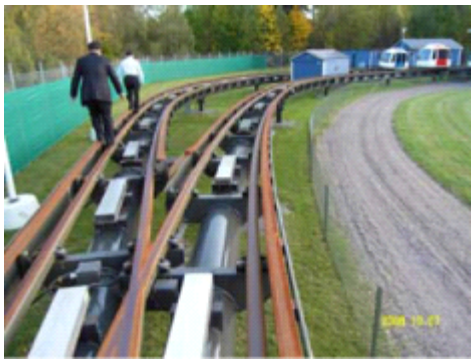


그림 1.4.1.1 선형 추진시스템의 분류

1.4.2. 선형 추진시스템별 특징 분석

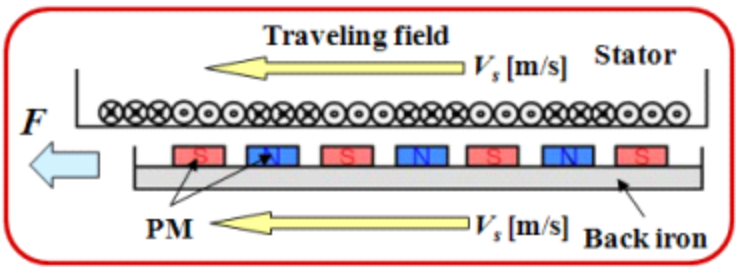
1.4.2.1. LIM(Linear Induction Motor) Based traction system

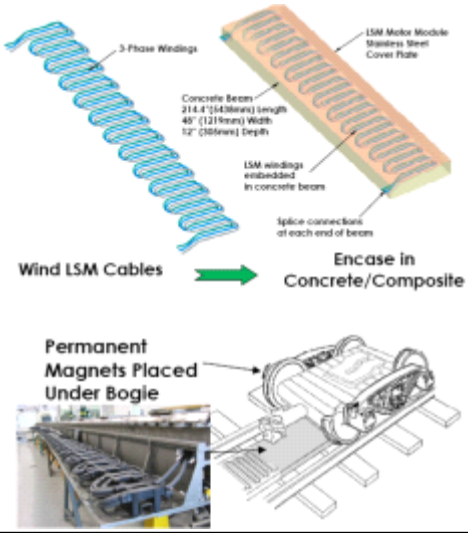
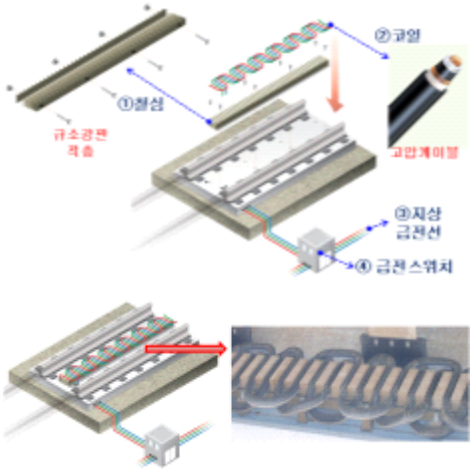
	내 용
원리	• 1차 전기자 코일과 2차 도체(리액션 플레이트)로 구성 • 1차 전기자 코일에 3상 교류를 흘리면, 회전형의 유도전동기의 회전자계와 같은 모양으로 이동자계가 발생 • 이동자계의 자속이 2차 도체를 가로 지를 때에 2차 도체에 전류를 유기시켜, 상호 흡인 · 반발 작용에 의하여 추진력을 발생시키는 원리

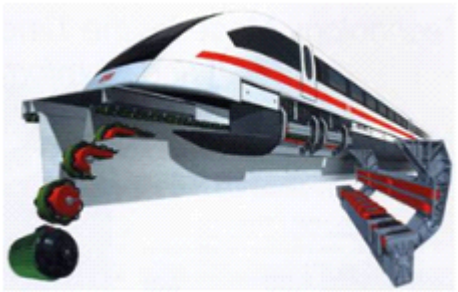
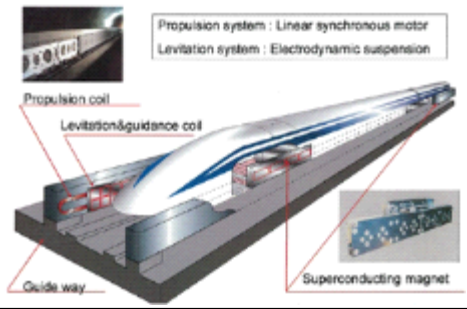
<table>
<tr><td></td><td> 
</td></tr>
<tr><td>분류</td><td><table>
<tr><th>On-Board Type LIM</th><th>In-track Type LIM</th></tr>
<tr><td>• 1차 3상 전기자는 차상에 설치
• 2차 도체(리액션 플레이트)는 지상에 설치
• 차상에 인버터가 탑재되므로 차상으로의 급전시스템 필요</td><td>• 1차 3상 전기자는 지상에 설치
• 2차 도체(리액션 플레이트)는 차상에 설치
• 인버터가 지상에 설치되므로 차상으로의 급전시스템 불필요
  </td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>특징</td><td><table>
<tr><th>장점</th><th>단점</th></tr>
<tr><td>• 가감속 성능 우수 및 비점착 구동에 의한 등판능력 우수
• 2차측 구조의 간단함으로 인해 생산비 및 건설비 저렴(알루미늄판)
• In-track type LIM 적용 시 대차 경량화가 가능함
• In-track type LIM 적용 시 가공전차선 설비 불필요</td><td>• 2차측 도체판에 의한 전기적 공극이 큼(출력비 및 효율이 낮음)
• 단부효과에 의한 성능 저하
• 수직력 불균형에 의한 고속 운전의 어려움(200km/h 이하)
• 서보성능이 낮음(위치결정도가 낮음)
• On-Board type LIM 적용 시 가공전차선 설비 필요
• In-Track type LIM 적용 시 불연속 토크 발생
• In-Track type LIM 적용 시 섹션 전환을 위한 스위치기어 필요에 따른 비용 증가</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>응용사례</td><td>
<table>
<tr><th>지하철/경전철</th><th>자기부상열차</th><th>PRT</th></tr>
<tr>
<td>• On-Board type LIM 적용
 
  </td>
<td>• 중저속 자기부상열차 추진용으로 On-Board type LIM 적용
  </td>
<td>• In-Track type LIM 적용
  </td>
</tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>핵심기술</td><td>• LIM 최적 설계 및 제작 기술
• 전자장 해석을 통한 LIM 동특성 분석 기술
• LIM 제어기 최적 설계/제작 기술
• LIM 고효율 제어 알고리즘 기술
• LIM 최적공극제어 기술
• LIM의 단부효과 저감설계 기술
• 무효전력 저감설계를 통한 역률/효율 개선 기술
• LIM 서보능력 향상을 위한 제어기술</td></tr>
</table>

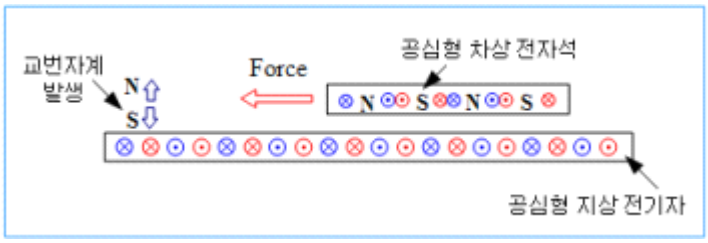
1.4.2.2. LSM(Linear Synchronous Motor) Based traction system

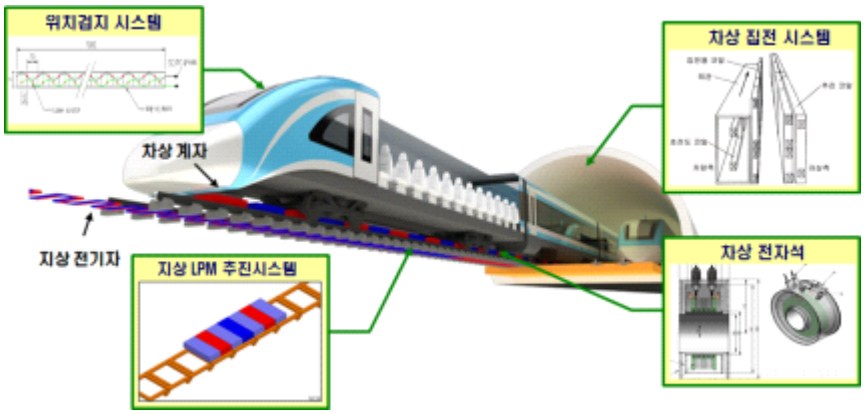
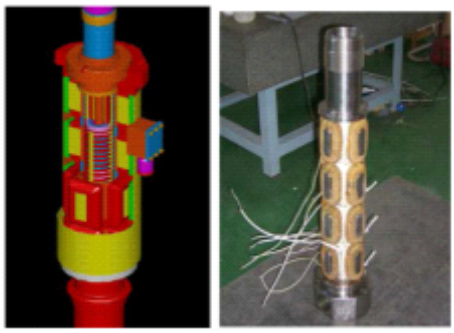
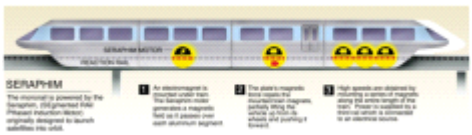
<table>
<tr><th></th><th>내 용</th></tr>
<tr><td>원리</td><td>• 1차 전기자 코일과 2차측 계자(전자석형, 영구자석형)로 구성되며, 1차측 전기자의 자계와 2차측 계자의 자계가 상호작용하여 동기속도로 이동하는 원리
• 1차 전기자 코일에 3상 교류를 흘리면, 전기자에 3상 이동자계 발생. 이때, 2차측 계자는 이동자계의 속도와 동기화된 속도로 구동됨.
 
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>분류</td><td>
<table>
<tr><th>Coreless Type LSM</th><th>Core Type LSM</th></tr>
<tr><td>• 1차측 3상 전기자 및 2차측 계자에 철심을 사용하지 않고 코일만으로 구성되는 구조
 
</td><td>• 1차측 3상 전기자 및 2차측 계자에 철심으로 Core를 구성하고, Core의 한 측면에 다수개의 슬롯을 구성하여 코일을 삽입한 구조
 
</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>
<table>
<tr><th>장점</th><th>단점</th></tr>
<tr><td>• 가감속 성능 우수 및 비점착 구동에 의한 등판능력 우수
• 초고속 주행이 가능함
• LIM보다 상대적으로 높은 효율
• LIM보다 제어측면에서 상대적으로 높은 신뢰성을 가짐
• 지상 전기자 방식으로 주로 적용되며, 가공전차선 설비 불필요</td><td>• 구동을 위한 정밀 위치제어 필요(제어 비용 증가)
• 차상에 계자 및 차상전원용 급전장치 및 전력변환장치 탑재
• Core Type의 경우 재료 및 설치 비용이 큼
• 지상 급전의 섹션전환을 위한 스위치기어 필요에 따른 비용 증가
• SMART에 비해 2배의 지상 전기자 코일 필요에 따른 비용 증가</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>응용사례</td><td>
<table>
<tr><th>자기부상열차</th><th>화물이송시스템</th></tr>
<tr><td>• 독일 초고속 자기부상열차 (Core Type LSM 적용, 상전도 흡인식)
• 일본 초고속 자기부상열차 (Coreless Type LSM 적용, 초전도 반발식)
 
 
</td><td>• 미국 General Atomics의 Cargo 운송용 MagneRail에 Coreless Type LSM 적용
 
  </td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>핵심기술</td><td>• LSM 최적 설계 및 제작 기술
• 전자장 해석을 통한 LSM 동특성 분석 기술
• LSM 제어기 최적 설계 및 제작 기술
• LSM 고효율 제어 알고리즘 기술
• LSM 디텐트력 저감 설계 기술
• LSM의 부하각 제어를 위한 정밀 위치 센싱 기술
• 지상 급전의 섹션전환 기술 및 이를 위한 LSM 위치검지 기술</td></tr>
</table>

1.4.2.3. LPM(Linear Pulse Motor) Based traction system

<table>
<tr><th></th><th>내 용</th></tr>
<tr><td>원리</td><td>• 1차측 지상 전기자 코일과 2차측 차상 전자석으로 구성되며, 구동 원리는 LSM과 유사한 리니어펄스모터 기술임.
• 1차 전기자 코일에 펄스 전원을 흘리면, 전기자에 교번자계 발생. 이때, 2차측 계자는 교번자계의 교번 속도와 동기화된 속도로 구동됨.
•
 
</td></tr>
<tr><td>구성</td><td>• LPM(Linear Pulse Motor)은
– 지상의 Coreless Type 단상 또는 2상의 전기자 코일 노선 및 계자의 위</td></tr>
</table>

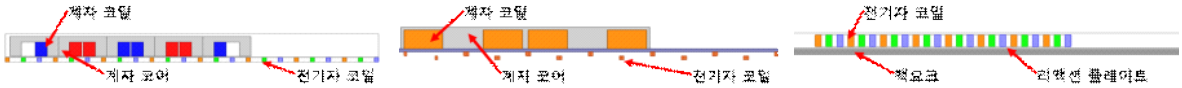
<table>
<tr><td></td><td>치에 따라 대전류를 공급하는 전력변환장치 및 섹션전환 장치
– 차상의 Coreless Type 전자석과 운전용 전원장치
– 차상에 필요한 전력을 공급하기 위한 차상 전원용 집전장치로 구성됨
 
</td></tr>
<tr><td>특징</td><td><table>
<tr><th>장점</th><th>단점</th></tr>
<tr><td>• 가감속 성능 우수 및 비점착 구동에 의한 등판능력 우수
• 저속부터 초고속까지 모든 속도영역 주행 가능
• LSM 수준의 높은 효율
• 구동을 위한 정밀 위치 검지 불필요(Self position detection)
• 지상 전기자 방식으로 가공전차선 설비 불필요하며, 전 구간 공심형이므로 기존 철도시스템(전차선+TM)보다 차량 경량화 및 터널단면적 축소로 약 20% 건설비 저감 가능
• 지상코일 매설로 기존선로와 병행운전 가능</td><td>• 차상에 계자 전자석 및 차상전원용 전력변환장치 탑재
• 지상 급전의 섹션전환을 위한 스위치기어 필요 (In-Track 방식 LIM, LSM 대비 1/10 수준)</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>응용사례</td><td><table>
<tr><th>산업용 액츄에이터</th><th>철도차량용 추진시스템</th></tr>
<tr><td>• 한국원자력연구원의 원자로 제어봉 구동용 튜블라 방식의 리니어 펄스모터(LPM).
  </td><td>• 미국 Sandia National Lab.의 SERAPHIM-200.
• Pulsed magnetic field와 Segmented reaction rail을 이용한 펄스타입의 LIM 기술 적용
  </td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>핵심기술</td><td>• 대용량 SMART 최적 설계 및 제작 기술
• 전자장 해석을 통한 SMART 동특성 분석 기술
• SMART 구동용 제어기 최적 설계 및 제작 기술</td></tr>
</table>

	• SMART 구동용 고효율 제어 알고리즘 기술 • 지상 전기자 권선 저비용 성형 기술 • 대전류 공급용 전력변환장치 기술 • 블록 스위칭 및 정밀 위치/속도 검지 기술 • 차상 초전도 전자석 및 냉각시스템 기술 • 차상 전원용 집전장치 기술

1.4.3. 기존 기술과의 차별성 및 우수성 종합 분석

리니어 추진시스템은 차륜가 휠의 마찰력에 의해 구동하는 종래의 추진방식과 달리 비점착 구동에 의해 급구배, 급가속, 급곡선, 가용률, 환경성 등 많은 장점을 가지고 있으며, 또다시, 사용된 선형전동기의 형식에 따라 보다 세부적으로 그 장단점을 달리한다. 이러한 장단점을 객관적으로 비교하기 위하여 본 과제의 수행으로 확보된 유한요소해석 모델을 사용한 LIM, LSM, LPM의 특징을 비교하였다. LIM, LSM, LPM이 동일한 추진력 성능을 갖도록 설계하여 선형전동기의 구조적 차이에 따른 특징의 비교가 될 수 있도록 하였다.

해석에 사용된 유한요소 해석 모델 및 해석 결과를 다음에 나타내었다.



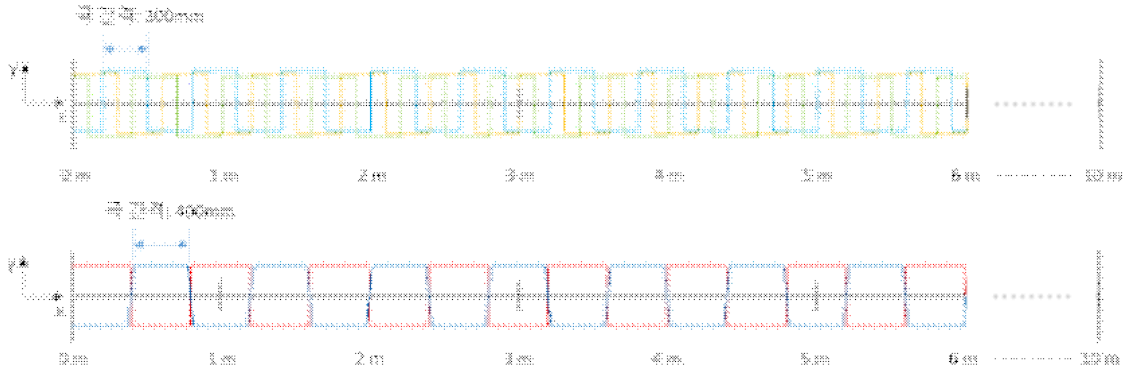
항목		설계사양		
		LPM	LSM	LIM
상수		2상	3상	3상
극수		4극	4극	4극
턴수	계자	180	200	-
	전기자	1	1	5
전류	계자 [A]	200	200	-
	전기자 [A]	2000	2000	2000
이동자 속도 [km/h]		15	15	15
적층길이 [mm]		900 (450 X 2)	900	900
코어구조		전기자 공심형	전기자 공심형	전기자 공심형
추력 [kN]		4.6	4.6	1.3
흡인력 [kN]		5	-0.7	-5
전기자 동 사용량 [mm^3]		46,622,720	31,349,760	94,049,280

LIM은 요구 추력을 만족시키지 못하며, 전기자 턴수로 인해 동사용량이 가장 많음

LSM은 LPM보다 계자 턴수가 많지만 전기자 동 사용량은 가장 적음

LPM은 LSM 보다 전기자 동 사용량이 약 1.48배 많음.

※ 동량 절약형 설계



설계함수	LSM	LPM	비고
상수	3상	1상	
턴수	1턴	1턴	
전기자 전류	2000A	3425A	
슬롯면적	803mm^2	1376mm^2	(2×턴수×전류)/(점적률×전류밀도)
적층길이	900mm	900mm	
극간격	300mm	400mm	
전류밀도	5Apeak/mm^2	5Apeak/mm^2	
점적률	1	1	
권선반경	16mm	21mm	
권선넓이	803mm^2	1385mm^2	πr^2
코일 길이	120 m	64.1 m	
동 사용량	96.5 m^3	88.8 m^3	

슬롯 면적 = (2×턴수×전류)/(점적률×전류밀도)

코일 길이 = (X방향 거리 x 상수) + (Y의 개수 x 적층길이)

동사용량 = 코일 길이 x πr2

LPM은 이와 같이 1상 구조의 전기자를 구성함으로써 동량을 절약할 수 있는 설계가 가능하며 이와 같이 하는 경우 LSM 대비 92% 의 동량으로도 동일한 추력을 발생할 수 있어 경제적인 시스템 구성이 가능하다. 다만, 동량 절약형 LPM에 대해서는 1상 구조의 전기자 구조를 가지므로, 1상 제어법의 연구가 필요하며, 또한, 정지상태에서 출발에 필요한 추력을 발생시킬 수 없으므로 철도차량과 같은 가변속 운전에 사용하는 경우 일정속도까지 가속하는 구간에서는 2상 구조로 하며, 일정 속도 이상의 정속 구간에 적용하는 방안 등의 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

이상 검토한 바에 따라 선형전동기 시스템의 종합적인 장단점 비교를 하면, LIM은 150km/h 이상 고속 적용이 어려운 한계를 가지고 있으며, LSM은 고비용 시스템 (아래표 참조)으로, 추진만 사용하는 Wheel-on-rail 방식의 경우(자기부상을 위한 부상력 불필요), LPM이 가장 적합하다.

리니어 추진시스템은 비점착 구동에 의해 급구배, 급가속, 급곡선, 가용률, 환경성 등 많은 장점을 가지고 있다. 이 중, LIM은 150km/h 이상 고속 적용이 어려운 한계를 가지고 있으며,

LSM은 고비용 시스템 (아래표 참조)으로, 추진만 사용하는 Wheel-on-rail 방식의 경우(자기부상을 위한 부상력 불필요), LPM이 가장 적합하다.

LPM 추진시스템은 기존철도에 비해 전장품의 차량 미 탑재로 경량화가 가능하고, 이로 인한 에너지 세이브 실현 및 선로 건설비 저감이 가능하므로 철도차량 추진의 근본적인 혁신 기술이다. 설치비용 및 유지보수 비용이 타 시스템 대비 저렴하여 경제성 또한 확보할 수 있다.

	LIM	LSM	LPM
속도	150 km/h 이내	300 km/h 이상	300 km/h 이상
효율	약 70% 이하	약 75% 내외	약 75% 내외
제어성 인버터	복잡	복잡	간단
제어성 위치검지	불필요	복잡	간단
열차 위치 신호	비콘/발리스 (복잡)	인크레파/교차유도 (복잡)	제어위치검지 병용 (간단)

그림 1.4.3.1 각 추진시스템의 기술적 특징 비교

2. 최종 연구 성과 요약 및 활용방안

2.1. 연구개발 핵심성과 요약

2.1.1. 성과리스트

연번	핵심성과명	핵심성과 설명	성과유형	비고
1	철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술	- 철도차량용 LPM 추진시스템의 정책적, 기술적, 경제적 타당성 제시 - LPM 추진시스템 모델링, 제어기법, 시뮬레이션 등 기초기술 연구	기타	3.1장 참고
2	축소형 LPM 추진시스템	- 축소형 LPM 추진시스템 개발 - 축소모형 해석 모델 구축 및 성능 예측 - LPM 추진시스템 분석 및 토크 리플 저감 기법 연구	장비·장치	3.2장 참고
3	실모형 LPM 추진시스템	- 실모형 LPM 추진시스템 개발 - 실모형 해석 모델 구축 및 성능 예측 - 개발된 LPM 추진시스템의 성능평가를 통한 기술 검증	장비·장치	3.3장 참고
4	LPM BOM 시스템 구축	- LPM BOM 프로그램 (LPM 추진시스템의 구성품 자재정보 및 고장정보 관리 프로그램) 구축 - LPM 추진시스템 유지보수 체계(안) 제시	소프트웨어	3.4장 참고
5	LPM 추진시스템 실용화 검토	- LPM 추진시스템 전원공급 방안 제시 - 철도종합시험선로 Test-Bed 구축 방안 제시	기타	3.5장 참고

2.1.2. 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술

2.1.2.1. LPM 추진시스템의 철도적용 타당성 평가

타당성 분석에서는 현재 국가에서 추진하고 있는 신성장 동력 및 녹색 성장 관련 정책, 철도 관련 정책 및 관련 규제를 탐색하여 본 과제의 사업적 타당성을 정부 정책 관점에서 분석하고 현재 사업 추진의 당위성을 도출하였다. 또한, LPM 추진시스템의 경우 다른 선형전동기(LPM, LSM 등)과 비교하여 차량 경량화, 제어 단순성, 열차제어시스템과의 결합 등 시스템 구성 측면 및 경제성 등에서 우수하여 유지보수비용이 기존 차량 대비 23% 수준일 것으로 예측된다.

결론으로 “LPM 추진시스템 핵심기술 개발”은 정책적, 기술적, 경제적 타당성을 확보하고 있으며, 시급한 기술개발의 필요성이 있다고 할 수 있다. 따라서, 본 과제는 정부지원이 타당하며, 국가 차원에서의 주도적인 연구개발이 반드시 수행되어야 한다. 충분한 예산과 인력 및 인프라를 투입하여, 조속한 시일 내에 연구 결과를 도출하여 실용화 할 수 있도록 노력한다면, 세계 기술 주도를 할 수 있을 것으로 기대된다.

2.1.2.2. 철도차량 추진을 위한 LPM 기초기술 연구

가. LPM 추진시스템 모델링

LPM 추진시스템의 경우 BLDC 전동기에서 구동원리를 찾을 수 있기 때문에, BLDC 전동기의 구조와 구동 원리에 대하여 조사하고, LPM 추진시스템을 모델링하였다. 고정자 전압방정식은 2상 2극의 회전기기로 생각하여 유도할 수 있으며, 이를 기반으로 토크방정식 등을 유도하여 모델링 하였다.

선형기기를 회전기기로 변환하여 모델링하였기 때문에 해석 결과 등은 모두 회전기기로 도출된다. 따라서, 선형기기로의 결과를 도출할 수 있도록 회전기기와 선형기기 상호변환 방정식이 필요하며, 선형기기에서 극간 거리에 따라 변환할 수 있는 변환식을 유도하였다.

나. LPM 추진제어 기법

LPM의 구동 방법은 역기전력(Back-EMF) 파형의 형태에 따라 2가지 경우로 구분하여 제어한다. 역기전력 파형의 형상이 이상적인 근사 사다리꼴(Trapezoidal) 형태일 경우 LPM의 추진제어는 구형파(Square Wave) 형태의 전압을 인가하여 구형파 형태의 전류를 발생시켜 일정 토크(Torque)를 발생시키는 구형파 전류 제어방법을 사용하며 역기전력 파형의 형상이 이상적인 정현파(Sine Wave)일 경우 d-q축 좌표 변환을 통한 벡터제어(Vector Control)를 사용하여 일정 토크를 발생시키는 정현파 전류제어 방법을 사용한다. LPM의 경우 그 구조의 특성 상 역기전력 파형은 근사 사다리꼴 형태로 발생하며 이에 따라 구형파 전류제어방법이 토크 리플 저

감 측면에서 유리하다.

구형파 전류제어방식은 위치정보가 필요하며, 이는 위치센서에 의해 검출할 수 있다. 위치정보는 스텝 계산기(Step Calculator)에서 가공하여 정해진 각도에서 정해진 상에 전류를 인가하는 4단계의 전류 인가 정보인 스텝으로 변환하게 된다. 이때 각 스텝에 따라 고정자 각 상 권선에 인가된 전압으로 발생한 전류를 전류 센서(Current Sensor)를 통하여 검출하며 검출된 현재 전류 값을 P-I제어기로 되먹임(Feedback) 하여 사용자가 지정한 전류 지령치를 만족하는 전압 지령을 스위칭 신호의 형태로 인버터(Inverter)에 전달한다. 인버터는 전력 소자의 스위칭을 통해 원하는 전류 지령에 해당하는 전압 값을 출력한다. 따라서 최종적으로 지령치의 전류를 만족하는 전압 값이 정해진 각도만큼 전기자 각 상 권선에 인가되며 인가된 전류에 의해 발생한 힘으로 LPM이 구동된다.

다. 시뮬레이션 모델 구축

앞서 LPM의 모델링 및 전류제어 방법에 따라 그 특성을 파악하기 위하여 모의실험을 실시하였다. 모의실험은 MathWorks社의 MATLAB Simulink를 사용하여 구현하였으며 추진제어 기법으로 구형파 전류제어 방식을 사용하였다.

역기전력 파형을 살펴본 결과, 근사 사다리꼴 형태의 역기전력을 확인할 수 있었으며, 이는 뒤의 제작된 축소모형에서 확인할 수 있다. 전동기 각 위치에 따른 스텝 연산 결과 정상적으로 연산되어 출력함을 확인하였다. 마지막으로, 각 상에 최대 2,000A의 전류를 흘렸을 경우에 발생되는 추력을 예측하여 약 5kN이 나타나는 것을 확인하였다.

2.1.3. 축소형 LPM 추진시스템

2.1.3.1. 축소형 LPM 추진시스템 개발

축소형 모델에 필요한 인버터, CPU 보드, 게이트보드 등에 대한 사양 결정을 결정하였다. 인버터는 8kW의 출력을 낼 수 있도록 각 부품의 정격을 설계/제작하였고, 최대전류 300A, 역기전력 제한 100V로 개발 주요 성능을 결정하였다. 그에 따라, 스위칭 소자, DC-Link Capacitor, 커넥터, 냉각 등을 해당 사양에 맞추어 설계하였다.

CPU 보드는 제어 알고리즘 프로그램을 탑재하고 있으며, CPU, 보조전원 및 게이트드라이브 구동전원, 통신 회로, 전류측정 센서, 보호회로, PWM 회로, GPIO Interface & Level 변환회로 등의 구성요소를 내포하고 있다. 게이트보드는 CPU보드의 PWM 8채널을 운전하기 위한 드라이버 증폭회로와 MOSFET 보호를 위한 단락방지회로와 직류링크전압을 측정하기 위한 회로를 포함하고 있다.

축소모형 대차의 위치는 그림 2.1.3.1과 같이 배치된 위치센싱용 홀센서로 센싱하도록 하였으

며, 제작된 축소형 LPM 추진시스템이 정상 동작을 확인하였다. 축소모형을 통해 기초기술 연구로 진행되었던 모델링, 제어기법 등을 적용하여 확인할 수 있었으며, 특별히 LPM 추진시스템의 지상 코일 구조로 인해 발생하는 토크 리플을 저감할 수 있는 알고리즘을 제안하고 검증할 수 있었다.

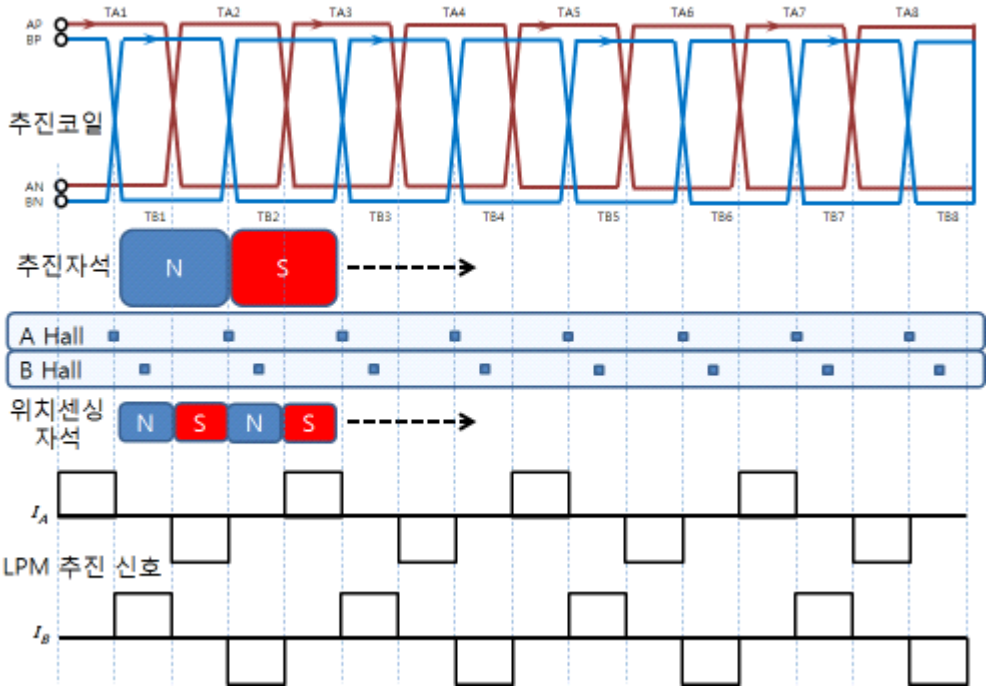


그림 2.1.3.1 LPM 추진시스템 구성도

2.1.3.2. 축소형 모델 해석 연구

LPM 추진시스템 축소 모델에 대하여 2차원, 3차원 유한요소해석 모델을 만들고, 해석을 통해 역기전력 파형을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과와 앞서 제작된 축소모형 LPM 추진시스템에서 실측한 역기전력 결과를 비교하였고, 그 결과가 유사함을 확인할 수 있었다.

축소모형 LPM 추진시스템의 성능예측을 위해 펄스전류생성 전력변환회로의 시뮬레이션 모델을 만들고 이를 유한요소해석 모델과 결합하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 통하여 LPM 축소모델에 대한 2차원, 3차원 성능해석 결과를 도출하였고, 해석 결과 2차원은 4.65N의 추력, 3차원은 5.05N의 추력을 보였다. 실제 축소모형 LPM 추진시스템과 비교하였을 때, 상당히 유사한 결과를 얻을 수 있어 시뮬레이션의 타당성을 입증할 수 있었다.

2.1.3.3. LPM 추진시스템 분석 및 토크 리플 저감 연구

LPM 추진시스템은 지상 코일 권선설치로 인해 A/B상의 역기전력이 동일하게 나타나지 않는다. 이는 공극 길이의 변화로 인하여 각각의 상 권선에 쇄교하는 쇄교자속의 최대치가 달라지기 때문이다. 이러한 쇄교자속 최대치의 변화는 각 권선에 유기되는 역기전력의 크기가 동일한 기계각속도에서 같지 않음을 의미하며 역기전력 상수가 단일 고정 값으로 표현되지 않는다. 이때 정류되어진 역기전력은 그림 2.1.3.2와 같고, 각 상에 동일한 전류를 흘려줄 경우, 역기전력 차이만큼 토크 리플이 발생하게 된다.

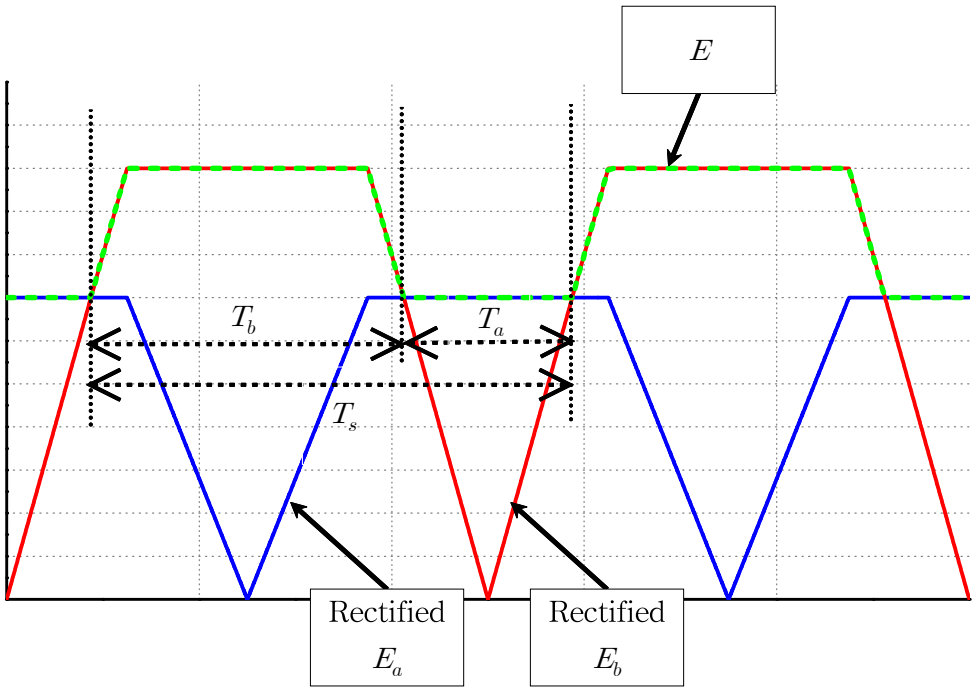


그림 2.1.3.2 상권선 적층 효과를 고려한 역기전력

따라서, 토크 리플을 저감하기 위해서는 각 상의 전류를 역기전력의 차이만큼 차이를 두어 인가하여야 하며, 그 방법에 대해 제안하였다. 제안 방법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 모의 실험을 진행하였고, 보상 기법 적용 전과 후의 토크 리플 편차는 약 77%에서 약 48%로 29%의 리플 감소 확인하였다.

2.1.4. 실모형 LPM 추진시스템

2.1.4.1. 실모형 LPM 추진시스템 설계 및 제작

가. 지상 LPM 추진시스템 설계 및 제작

지상코일은 펄스 형태의 전류를 통전하여 이동자에 전진 또는 정지 할 수 있는 힘을 발생시키는 장치이다. 지상코일 권선의 구조는 2층권 형태를 가지면 각 이동자 극에 대하여 상•하층 권선이 엇갈리는 구조를 가진다. 또한, 2상 2열 구조로 설계하였고, 지상코일에 통전하는 전류의 세기는 2,000[A] 내외를 기준으로 하였다.

나. 차상 계자용 전자석 설계 및 제작

차상 전자석에는 DC전류가 공급되어 일정한 자기장을 만들어 지상 코일과 상호작용으로 힘이 발생한다. 이동자 전자석은 극수를 8극으로 하여 설계하였다. 크기는 대차가 위치하여 운행될 때 레일의 간격 및 실대차의 크기를 고려하여 설계 및 제작하였다.

다. 차상 전원용 전원장치 설계 및 제작

차상 계자 전자석 및 기타 전력소모장치에 전원 공급을 위한 전원공급장치 시작품을 제작하였으며, 전원공급장치는 축전지와 축전지를 충전하기 위한 충전기 및 차상에 직류전압을 공급하기 위한 전력변환장치(DC to DC 컨버터)로 구성하도록 설계 및 제작을 하였다. 또한, 차량의 주행 중 유도집전 방식으로 축전지를 충전할 수 있도록 하기 위하여 집전코일이 차량의 이동방향에 따라 직류자계 안에서 역기전력이 유도되는 점을 이용한 유도급전 모듈을 제작하였다.

(1) 유도집전방식

유도집전방식은 권선 방식과 위치에 따라 복잡한 추가 전력변환장치 없이 간단한 정류회로를 이용하여 차량에 DC전원을 공급할 수 있다. 단, 이 방식은 차량의 속도에 비례하여 발생하는 단점이 있다.

(2) 차상 전원공급시스템

차상의 각종 전자부품 및 전자석에 전력을 공급하기 위해서는 차상 전원 공급 장치가 필요하다. 차상 전원 공급 장치는 기본적으로 배터리를 사용하며, 이 배터리 충전을 위한 충전기 및 정전류 제공을 위한 전력변환장치를 포함한다.

라. 지상 대전류 공급용 전력변환장치 모듈 시작품 설계 및 제작

지상 대전류 공급용 전력변환장치는 컨버터, 인버터, 냉각장치, 위치센서, 브레이크 시스템,

표시장치 등의 6가지 구성품으로 이루어져 있으며, 이들 6가지 구성품들의 조합된 기능으로 실대차를 운행할 수 있도록 설계 및 제작되었다. 각 구성품의 기능 및 역할은 다음과 같다.

(1) 컨버터

AC 3상 440V를 입력받아서 DC 200V/2000A의 양질의 직류전원을 인버터에 공급한다. 또한 AC입력전압, 전류, DC출력전압, 전류의 검출값을 인버터에 공급하여 운행 중의 전원상태를 모니터링 할 수 있게 하여준다.

(2) 인버터

컨버터로부터 DC 200V/2000A의 양질의 직류전원을 공급받아서 구동 동력인 LPM 추진용 전류를 발생시킨다. 또한 위치센서로부터 위치센서의 정보를 받아서 실대차의 위치에 따른 LPM 추진 동력용 전류를 교번 발생시킴으로서 실대차를 운행할 수 있게 하여준다. 그리고 컨버터와 인버터의 운전정보를 표시장치로 전송하고 표시장치로 부터의 운전 명령을 송신 받아서 운전명령에 따른 실대차 운행을 시킨다.

(3) 냉각장치

컨버터와 인버터의 메인 스위칭 소자의 방열을 담당하는 구성품으로서 메인스위칭 소자의 온도상승을 주위온도 대비 최대 Δt 40도 이하가 될 수 있도록 방열을 시켜준다.

(4) 위치센서

실대차의 위치정보를 검출한다. 이 검출된 정보를 인버터에 전송하여 인버터가 실대차의 위치정보를 바탕으로 LPM 추진 전류를 발생할 수 있도록 하여준다.

(5) 브레이크 시스템

실대차에 탑재되어서 바퀴의 동작을 검출하고 zigbee 무선통신을 통하여 인버터의 운전정보를 송신받고, 이 정보를 바탕으로 실대차에 장착된 브레이크를 자동 동작 시킨다.

(6) 표시장치

인버터로부터 컨버터와 인버터의 운전정보를 송신받고, 실대차에 장착된 GPS 정보를 송신받아, 이 정보를 기반으로 실대차의 운행정보 및 컨버터와 인버터의 운전정보를 그래픽형태로 표시하고 실대차의 운행 명령을 인버터로 전송하여 최종적으로 실대차를 운용자가 편리하게 운행할 수 있게 하여 준다.

마. 실대차 제작 및 시스템 통합

대차는 리니어펄스모터 추진장치를 장착하여 주행하는 대차로서 주요 구성품은 윤축조립, 축상조립, 대차프레임 조립, 조향장치 조립, 회전장치 조립, 지지프레임 그리고 축전지 지지박스 조립 등으로 구성되어 있다.

일반 철도차량의 대차에 적용된 차축은 하나의 차축에 두 개의 차륜을 압입하는 일체형 차축이나, 본 과제에서는 하나의 차륜에 하나의 차축을 적용하는 액슬레스 차축을 채용하는 것이 특징이며, 본 시스템은 곡선통과 시 곡선통과 성능 향상 및 소음 저감에 강점을 갖고 있다.

앞서 제작된 시제품을 실대차에 설치하여 시스템을 통합하였다. 실대차에는 차상 전자석, 차상전원용 전원공급시스템과 유도 급집전 장치, 위치 센싱을 위한 영구자석, 브레이크 시스템, GPS시스템 등이 탑재되었으며, 완성된 LPM 추진시스템은 그림 2.1.4.1과 같다.



그림 2.1.4.1 차상 장치가 탑재된 실대차

2.1.4.2. 실모형 LPM 추진시스템 해석 모델 구축

LPM 실차 모델의 성능 특성 해석을 위한 2차원 유한요소 해석과 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석의 타당성을 위하여 두 모델간의 특성 해석 값을 비교하였다.

유한요소 해석을 통한 출력 특성을 확인하기 위해서는 해석 모델에 펄스 전류를 인가해야 하므로, 별도의 외부 전력변환 회로를 만들어 펄스 전류를 생성하였다. 외부 전력변환 회로는 구동원리가 유사한 3상 BLDC 전동기를 기반으로 하였으며 극피치, 속도 및 통전방식에 따라 제어 파라미터를 계산하여 입력해 주었다. 외부 전력 변환 회로를 통하여 지상 코일에 2000A의 전류가 펄스 파형으로 인가됨을 확인 하였고 그 이후 특성 해석 결과를 비교하였다. 2차원 모델과 3차원 모델의 평균 추력은 각각 0.9kN이 발생하였고 그 이후의 소수점 자리에서 차이를 보이며 큰 차이를 보이지 않았다. 부상력 또한 1.27kN, 1.25kN의 값을 가지며 유사한 결과 값이 나오는 것을 확인하였다. 유한요소 해석 특성 해석 값은 유한요소 해석모델이 1/4모델이므로

약 추력 3.6kN, 부상력 5.0kN의 힘을 가질 것으로 추정된다.

추력과 부상력의 리플률은 각각 60%, 30% 이상의 리플률을 가진다. 리플률이 강한 경우 진동이 심하여 주행시 승차감에 영향을 줄 수 있으나, 관성력이 큰 철도차량의 특성으로 인하여 승객의 승차감에 큰 영향은 없다.

LPM의 구동 방식은 크게 단일 펄스 구동 방식과 마이크로 스텝 구동 방식으로 나눌 수 있으며, 마이크로 스텝 구동 방식으로 정현파에 가까운 전류를 생성할 수 있다. 그러나 정현파 전류를 인가하였을 경우 기본 펄스파보다 성능이 우수하게 나타나나 전력변환기의 스위칭 손실을 고려할 경우, 철도차량 추진용 LPM으로는 펄스파 모델이 더 유리할 수 있다.

2.1.4.3. 철도차량용 LPM 추진시스템 성능평가

가. 지상 LPM 추진시스템 성능평가

LPM 추진시스템의 견인력 측정을 수행하였다. LPM 추진시스템의 실대차에 동차를 연결하고 대차와 동차 사이에 발생하는 견인력을 측정하였다. 측정 결과 최대 약 571.2kg·f, 즉 5597.8N으로 목표 성능치인 5kN을 상회하는 결과를 얻을 수 있었다.

나. 차상 계자용 전자석 성능평가

LPM 추진시스템의 차상 계자용 전자석 성능평가를 수행하였다. Hall 소자 type 직류 자계측정기를 사용하여 차상 계자용 전자석과 지상 전기자 간 공극의 자속밀도를 측정한 결과 차상 전자석에 180A를 공급하였을때 1.08T가 측정되어 200A를 공급하는 경우 목표 성능치인 1.2T가 달성될 수 있음을 확인하였다.

다. 차상 전원용 전원공급시스템 모듈 성능평가

LPM 추진시스템의 차상 전원용 전원공급장치 성능평가를 위하여 전원공급시스템의 부하시험을 실시하였으며, 전원공급장치의 정전류제어성능을 확인하고 성능평가 결과(목표치 5 kW 이상)40 kW 이상의 출력을 가지고 있음을 확인하였다.

라. 지상 대전류 공급용 전력변환장치 성능평가

지상 대전류 공급용 전력변환장치는 크게 입력 AC를 DC로 변환하여 주는 컨버터와 DC를 다시 펄스 형태의 전류로 만들어 주는 인버터로 구성되어 있다. Test-Bed는 약 128m 길이로 구성되어 있으며, A상과 B상의 지상 코일에 전류를 공급한다. 성능평가 결과(목표치 200kW급), 지상 코일에 최대 전류 2,000A를 공급할 경우, 인버터 출력전력은 최소 200kW이상 공급하는 것을 확인하였다.

마. 성능평가 요약

표 2.1.4.1 LPM 추진시스템 성능평가 요약

성능평가 항목	목표치	달성치	달성여부
지상 LPM 추진시스템 평가 (견인력 측정)	5kN 이상	5.6kN	달성
차상 계자용 전자석 성능평가 (차상자기장 측정)	1.2T 이상	1.08T (180A 시)	달성 (200A 공급시)
차상 전원용 전원공급시스템 성능평가 (차상 전원장치 부하시험)	5kW 이상	40 kW 이상	달성
지상 전력변환장치 성능평가 (전력량 측정)	200kW급	200kW 이상	달성

2.1.5. LPM BOM 시스템 구축

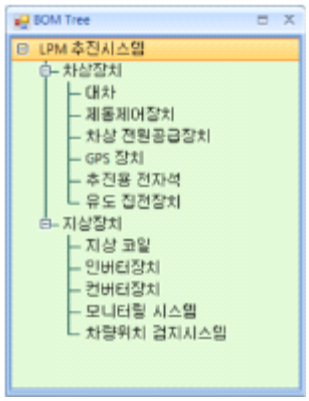
2.1.5.1. LPM BOM 시스템 구축(안)

가. LPM BOM Tree 구성

BOM (Build of Material)이란 제품이 어떤 부품들로 구성되어 있는가에 대한 데이터로 가장 기본이 되는 정보는 자재명세서이다. 실대차 모델의 장치는 설치 위치에 따라 크게 차상장치와 지상장치로 분류하였으며, 세부 장치는 부품의 기능 및 위치에 따라 표 2.1.5.1과 같이 분류하였다.

차상장치는 실대차 모델에 설치된 장치로 대차, 전자석 전원공급장치, 추진용 전자석, 유도집전장치, 제동제어장치, GPS장치로 구성되어있다. 지상장치는 지상코일, 차량위치 검지시스템, 인버터장치, 컨버터장치, 모니터링시스템으로 구성되어 있다.

표 2.1.5.1 BOM Tree 구성

차상장치	지상장치	
대 차	지상 코일	
차상 전원공급장치	차량위치 검지시스템	
추진용 전자석	인버터장치	
유도 집전장치	모니터링 시스템	
제동제어장치	컨버터장치	
GPS 장치		

나. BOM 시스템 구성

BOM Table은 부품에 대한 기본 정보와 도면, 사진 및 회의록 등의 문서를 입력 할 수 있도록 하여 부품에 대한 정보를 제공할 수 있도록 하였고, 부품에 대한 데이터의 수정, 삭제 및 추가 할 수 있도록 구성하였다.

부품 LEVEL은 0~7LEV까지 BOM tree를 구성되어 있으며, 기본적인 데이터 정보는 BOM 부품명, BOM 부품번호, 부품버전, 단가, 원명, 부품등록정보, 부품재질, 업체부품코드, 정비지침서, 원수량, 위치, 특기사항, 일련번호, 구매단가, 구매일자, 고유수명, 기타정보, 문서정보 등을 포함하고 있다.

LPM 추진시스템의 시작품에 대한 고장이력 관리를 할 수 있도록 고장일, 장소, 고장유형, 고장현상, 고장원인 및 고장조치내역을 관리할 수 있도록 시스템에 고장정보를 입력하여 관리할 수 있도록 시스템이 구축하였다.

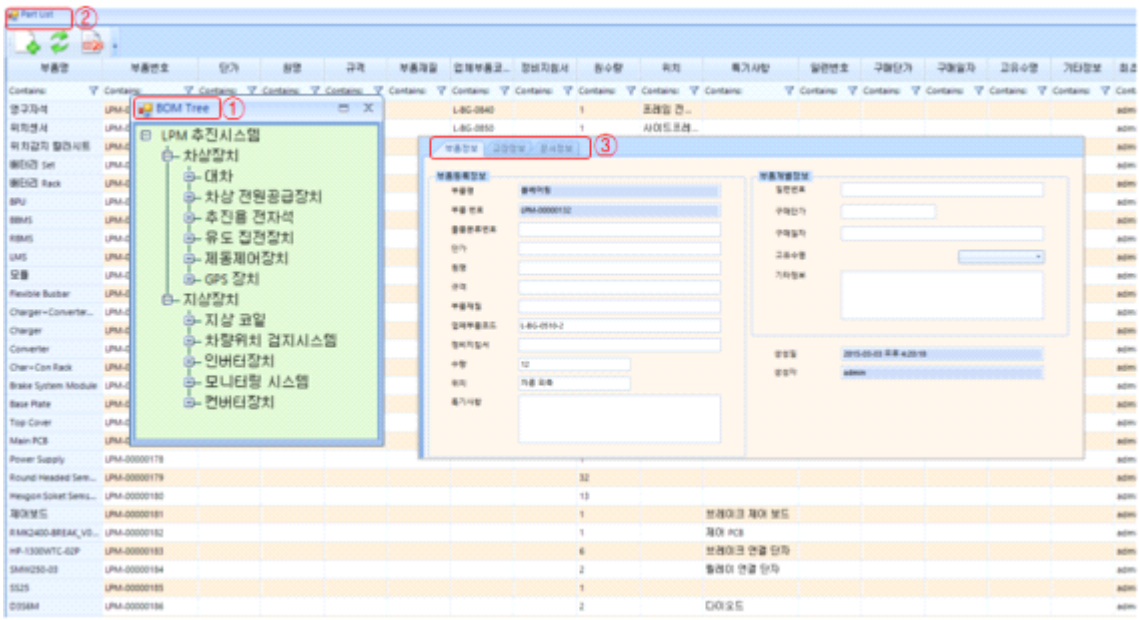


그림 2.1.5.1 구축된 BOM 시스템 화면

2.1.5.2. 유지보수 체계 구축(안)

가. 유관기관 유지보수체계 현황 조사 및 정리

LPM 추진시스템의 유지보수 체계를 구축하기 위해 서울도시철도공사의 유지보수체계를 사전조사하였다. 현재, 서울도시철도공사에서는 4개 노선에 6개 차량사업소에서 전동차를 관리하며, 157개역 162.2km를 운영하고 있으며, 206편성 1,608량의 전동차를 운영하고 있다. 서울도시철도공사의 유지보수체계 현황, 검사 분류별 정비내용을 조사하고, 경정비와 중정비 업무 내용을 각각 조사하여 정리하였다.

나. LPM 추진시스템 유지보수(안)

서울도시철도공사의 유지보수체계를 바탕으로 LPM 실대차 모델의 유지보수(안)을 구축하였다. LPM 추진시스템은 기존 도시철도 전동차와 달리 인버터장치와 LPM(고정자)가 차량이 아닌 지상에 설치되어 차상장치와 지상장치의 검사를 구분하여 차량을 운용하는 경정비 수준의 검사에 대하여 설정하였다.

또한, 정기검사(경정비: 일상검사, 월상검사 / 중정비: 년간검사)를 시행하기 위하여 검사대상 기기에 대한 항목별 세부 검사기준 수립을 정리하였다.

고장 부품의 수선 및 중정비 업무 수행을 위한 부품별 분해, 청소, 수선, 교환, 조립 및 시험 등에 대한 부품별 표준작업 절차서가 마련되어야 한다. 이를 위해 LPM 추진시스템의 각 구성품에 대한 유지보수 매뉴얼을 작성하였다.

2.1.6. LPM 추진시스템 실용화 검토

2.1.6.1. 철도종합시험선로 Test-Bed 구축(안)

가. 시험선로 선정

철도 핵심 분야별 부품단위, 구조단위 성능평가와 인터페이스 성능평가가 가능한 철도종합시험선로내 변전설비로부터 지상코일 전원공급용 전력변환장치에 전원공급이 용이하고, 최급기울기(35‰)가 포함된 구간을 선정하여 구배기동시험이 가능하도록 하였다. 노선 선정 조건은

- DC차량 및 DC급전설비 시험이 모두 가능한 구간
- AC급전 시험에 영향을 최소화할 수 있는 구간
- DC 1500V 급전설비를 기반으로 DC 750V 급전설비 설치 공간 확보

로 그림 2.1.6.1과 같이 선정하였다.

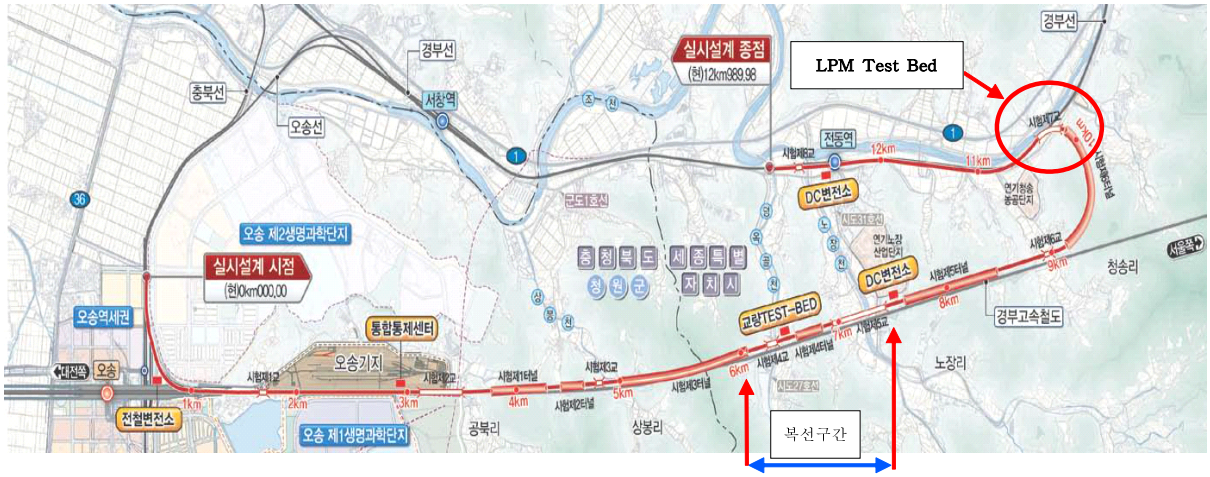


그림 2.1.6.1 철도종합시험선로 내 LPM Test-Bed 구축

나. 궤도구조물 검토

자갈궤도(P.C침목)와 콘크리트궤도(Rheda2000)의 지상코일과 레일체결장치 및 침목과의 간섭여부를 검토한 결과 자갈궤도는 레일체결장치 및 침목간 거리가 1,203mm로 지상코일의 형상축소 없이 설치가 가능하나, 콘크리트궤도는 레일체결장치 및 침목간 거리가 834mm로서 간섭없이 지상코일을 설치하기 위해서는 코일형상을 축소(780mm)하여야 한다.

자갈궤도와 콘크리트궤도에 대해서 지상코일 지지 앵커와 P.S강선 배치에 대하여 검토하였다. 검토결과, 자갈궤도에 부설되는 P.C침목의 경우 지상코일 형상(안)으로도 P.S강선과 저촉되지 않는 것으로 확인되었으나, 이격거리가 미소하여 시공오차 발생등을 감안할 때 침목의 균열/전단파괴에 대한 구조적 안전성이 확보되는 선에서 지지앵커의 직경을 감소할 필요가 있다고 보여진다.

콘크리트궤도는 현장타설식과 공장제작식 2가지 부설형식으로 분류하여 검토하였으며, 콘크리트궤도에 LPM추진시스템을 적용하기 위해서는 지상코일과 침목간의 상호간섭이 발생하여 코일형상의 축소제작이 요구되므로 종방향(열차진행 방향)철근 위치와 매립앵커의 저촉여부는 생략하고 횡방향(열차진행 수직방향)철근과의 저촉여부만을 검토하였다.

현장타설식 콘크리트궤도는 RHEDA2000, KCT-Ⅱ에 적용되는 Bi-Block침목 + 연속철근보강콘크리트, 공장제작식 콘크리트궤도의 경우 B2S, PST-B형(L=4.95m) 슬래브궤도를 선정하여 매립되는 앵커와 내부철근과의 저촉여부를 검토하였다.

RHEDA2000, KCT-Ⅱ궤도는 다른 침목에 비해 상대적으로 길이가 긴 Bi-Block침목으로 인해 침목선상에 앵커를 매립하는 것보다 침목과 침목사이에 매립하는 것이 적절하지만 상부횡철근에 저촉되어 침목사이에서 종방향으로 100mm이격하여 매립하는 방향으로 개선안을 제시하였다.

공장제작식 콘크리트 슬래브 궤도(패널형) 중 B2S궤도의 경우 침목과 침목사이 중앙부, PST-B형의 경우 전단포켓부의 사선철근으로 매립공간이 협소하여 침목과 동일선상에 앵커를 매립하는 것이 가장 적합한 것으로 나타났다.

콘크리트궤도의 철근의 종류 및 배치간격, 콘크리트 단면크기와 재료특성은 도상콘크리트층

또는 슬래브 패널에 작용하는 온도, 종/횡방향하중, 기울기하중, 구속하중등 외부하중에 의한 콘크리트의 휨인장응력/허용균열폭 제어등을 종합적으로 검토하여 결정되므로 같은 콘크리트 궤도 시스템이라도 적용구간 내 설계속도, 운행차량, 현장여건, 노반상태등에 따라 철근의 배치 형태가 변경될 여지가 크다.

따라서 콘크리트궤도상에 LPM추진시스템을 적용할 경우 앞서 언급한 설계제원(차량, 현장여건등)을 통한 콘크리트궤도의 구조 안정성 검토를 선행한 뒤 결정되는 철근배근현황을 상세하게 검토하여 적정한 앵커의 매립위치를 결정해야 한다.

2.1.6.2. LPM 추진시스템 전원공급 방안

가. 수전변전소 및 공급전원

철도종합시험선로 노선에는 154kV 수전하는 변전소 1개소와 22.9kV를 수전하는 DC변전소 2개소로 구성되어 있다. LPM 추진시스템의 지상 전원공급용 전력변환장치에 공급하는 전압이 440V이므로 별도의 변환설비가 필요하다. 일반적으로 AC변환이 DC변환에 비하여 시공, 유지관리 및 경제성 면에서 유리하므로 교류급전으로 선정하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 또한, 6.6kV 및 22.9kV 교류전원을 비교할 때, 22.9kV로 수전할 경우, 선로 손실이 1/4정도 감소되므로 22.9kV로 선정하는 것이 유리하다.

나. 전기설비 및 전원 케이블

현재 한국철도기술연구원에 구축된 Test-Bed의 LPM 추진시스템을 철도종합시험선로에 구축할 경우를 예로, 변압기, 차단기 및 수전케이블을 선정하였다. 변압기 용량은 제작사 표준용량을 감안하여 450kVA로 선정하였고, 차단기의 경우, 1차 보호차단기는 VCB 630A, 2차 보호차단기는 ACB 630A로 선정하였다.

케이블은 변압기 1차 케이블(22.9kV)의 굵기 및 선종은 1차측 부하전류가 11.34A이므로 ELP 매설 기준으로 22.9kV FR-CNCO-W 60㎟ 1Cx3으로 정하였다. 케이블 형식은 변전소 구내는 Cable Pit를 이용하고 옥외구간은 선로변에 설치되어 있는 공동관로에 포설예정이므로 케이블 접속개소를 줄이고 시공성을 고려하여 전구간 22.9㎸ 수밀형 저독성 난연케이블 구조를 선정하였다. 변압기 2차 케이블(440V)의 굵기 및 선종은 2차측 부하전류가 590.47A이므로 ELP매설 기준으로 0.6/1㎸ HFCO 400[㎟] 1Cx3로 하였다.

2.2. 연구개발 최종목표 달성도

목 표	달성도 (%)	내 용
철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술 확보	100	○ LPM 추진시스템의 철도적용 타당성 확인 - 정책적, 기술적, 경제적 측면에서 LPM 추진시스템의 기술개발 타당성 제시 ○ 철도차량 추진을 위한 LPM 기초기술 확보 - LPM 관련 자기장, 에너지, 힘 등 물리량에 대하여 수식전개를 통한 이론적 모델 도출 - LPM 추진시스템의 특성을 고려하여 가장 적합한 제어 기법 선정 및 제어기 설계 - 시뮬레이션 모델 구축 및 모의실험을 통한 제어 기법의 타당성 및 성능 예측
축소형 LPM 추진시스템 개발	100	○ 축소형 Test-bed 사양 개발 완료 - 축소형 모델 실험에 필요한 인버터, CPU 보드, 게이트보드 등에 대한 사양 도출 - 대차 위치 센싱 방식 선정 완료 ○ 축소형 모델 해석 결과 - 축소 모델의 이동자 구조, 선로 구조, 2상 전류 펄스 파형 생성 전력변환 회로를 검토 - LPM 축소 모델에 대하여 2차원, 3차원 유한요소해석 모델을 만들어 해석 결과 도출 ○ LPM 추진시스템 분석 및 토크 리플 저감 연구 - 지상 코일 적층형 권선 방식에 따른 토크 리플 원인 분석 - 토크 리플 저감을 위한 전류 제어 기법 제안 - 시뮬레이션 및 축소형 LPM 추진시스템에 적용하여 제안 기법 검증
실모형 LPM 추진시스템 개발	100	○ 실모형 LPM 추진시스템 설계 및 제작 - 추진용 LPM 모듈 시작품 설계 및 제작 완료 - 상 계자용 전자석 시작품 설계 및 제작 완료 - 상 대전류 공급용 전력변환장치 시작품 설계 및 제작 완료 - 차상 전원 공급용 전원공급장치 시작품 설계 및 제작 - 대차 설계 및 제작, 시스템 통합 완료 ○ 실모형 LPM 추진시스템 해석 모델 구축 - 자기등가회로를 이용한 LPM 설계 프로세스 정립

		- 실모형 LPM 추진시스템 2·3차원 해석 모델링 및 성능 예측 ○ 철도차량용 LPM 추진시스템 성능평가 - 지상 LPM 추진시스템 성능평가 - 차상 계자용 전자석 성능평가 - 차상 전원용 전원공급장치 성능평가 - 지상 대전류 공급용 전력변환장치 성능평가
LPM BOM 시스템 구축	100	○ LPM BOM 시스템 구축(안) - 구성품 BOM 체계 도출 (BOM 시스템 구축) ○ 유지보수 체계 구축(안) - 성능시험을 위한 시험절차서 및 제작기술 검토 - 유지보수 체계 수립 - 표준작업 절차서 도출을 위한 기술항목 정리
LPM 추진시스템 실용화 검토	100	○ 철도종합시험선로 Test-Bed 구축(안) - 철도종합시험선로 내 LPM 추진시스템 성능테스트를 위한 Test-Bed 구축 방안 분석 - 지상코일과 궤도구조물간의 영향 분석 ○ LPM 추진시스템 전원공급 방법 제시 - LPM 추진시스템 구성을 위한 전력설비구성 최적화 방안 분석

2.3. 연구개발 효과 및 활용방안

2.3.1. 연구개발 효과

본 연구를 통해 LPM 추진시스템이 실용화 될 경우 다음과 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

○ 기존 철도의 속도향상을 저해하는 가공전차선 방식의 집전 및 추진장치를 제거하여 에너지 소모량을 저감하여 경제적인 철도시스템 운영이 가능

○ LPM 추진시스템을 기존 철도차량에 적용함으로써 차량의 경량화, 등판능력향상, 터널단면적 축소 등을 통한 인프라 비용 절감이 가능

※ 철도 터널 단면 축소를 통한 건설비 절감

※ 가공 전차선 설비 저감

※ 유지보수 비용의 절감

○ 기존의 추진시스템 방식에서 벗어나 새로운 추진시스템의 개발 활성화에 따른 철도문화 개선 및 국가 경쟁력 향상

※ 경전철 속도향상을 통한 타 교통수단과의 경쟁력 확보

※ 관련기술을 차량제작사에 이전함으로써 사업화가 가능하고, 대형철도시스템에 접목한 국외사업화로 성과의 국외확산 및 기술적 우위에 따른 대외기술경쟁력 확보

2.3.1.1. 기술적 측면

LPM 추진시스템 개발 연구가 성공적으로 수행될 경우 가공전차선 및 부속설비 등으로 복잡한 기존 전력공급시스템 및 차상의 전력변환장치와 견인전동기 등을 대체할 수 있는 안전하고 미려한 전기철도시스템을 개발 및 보급할 수 있다. 또한, 철도차량의 이용효율을 개선할 수 있으며, 철도차량기지, 정거장 및 전차선 구간 급속충전에 의한 급전전원 확보로 배터리 무게 증가 및 차량기계 배치 공간 감소의 문제점도 해결할 수 있다.

LPM 추진시스템은 추진에 필요한 자동위치검지 기술을 포함하고 있으므로, 이를 활용하여 별도의 열차 신호시스템 없이 철도차량 운행이 가능하다. 따라서, 철도차량 추진시스템 분야 선도 원천기술의 독자개발 및 세계적 기술우위 선점이 가능하여 세계 최초의 무가선, 비점착, 순시제동, 자동위치검지 등의 기능을 갖춘 철도차량 추진시스템 핵심기술 개발 및 상용화 실현 시 세계 기술표준을 선도할 수 있다.

본 연구의 핵심기술은 향후 철도분야 및 타 산업분야(자동차 및 항공 생산 공정, 대용량 항공 추진시스템, 물류운송, 공장 자동화 등)에 다양하게 응용될 미래첨단기술개발의 발판이 될 수 있다.

2.3.1.2. 사회·경제적 측면

LPM 추진시스템은 일반 전기철도시스템이 가지고 있는 단점인 집전장치에서의 환경오염물질 발생을 원천적으로 봉쇄하고 있으며, 바퀴와 레일사이의 분진이 매우 적은 청정시스템으로 친환경적인 녹색교통 기술이다. 에너지 효율 측면에서도 전차선-변압기-전력변환장치-견인전동기-기어-구동축으로 전달되는 일반 전기철도와 달리, 직접 전력으로부터 견인력을 확보하므로 에너지 전달 효율이 높다. 따라서, LPM 추진시스템은 이산화탄소 등 대기오염의 최소화, 에너지 효율성 향상 등으로 환경성과 경제성을 동시에 충족시킬 수 있는 시스템으로서 향후 친환경 고에너지효율 시대에 적합한 시스템으로서 그 활용성이 매우 높을 것으로 판단된다.

교통 환경적 측면에서 보면, 도시 이미지를 훼손하는 전차선이 불필요하여 도심환경의 심미성을 크게 향상 시킬 수 있고, 도시 내 거리에서의 전차선을 없애기 때문에 도시의 경관과 조화될 뿐만 아니라 첨단시설이라는 이미지의 제공이 가능하여 도시의 새로운 이미지 메이킹이 가능해진다.

현재 전 세계는 고령화의 시대로 진입하고 있으며, 이러한 측면에서 각 정부는 고령자 뿐만 아니라 교통약자에 대한 각종 공공편의 시설의 제공에 많은 노력을 기울이고 있는 추세이며, 이런 측면에서 LPM 추진시스템은 차량의 바닥높이가 다른 전철시스템 보다 낮게 설계할 수 있으므로 노약자와 같은 교통약자 및 휠체어 등을 이용하는 장애인에게 고품질의 서비스 제공할 수 있는 특징이 있다.

마지막으로, 경제적인 측면에서 LPM 추진시스템의 구조적인 특징으로 기술 개발을 통해 터널 건설비, 전차선 건설비, 유지보수비 등을 획기적으로 절감이 가능하다. 또한, 교통이 혼잡한 도심지역 및 산간지역에 적용 할 경우, 가공전차선이 없으므로 터널 건설 시의 터널 단면적을 작게 할 수 있어 적은 공사비로 건설이 가능해지며, 비점착방식 구동이므로 접촉에 의한 마모가 없어 유지보수 비용의 절감을 기대할 수 있다.

2.3.2. 연구성과 활용방안

LPM 추진시스템은 저심도철도의 급구배 등판 시 부족한 추진력을 보완하는 기술로 적용이 가능하다. 또한, 산악 트램 및 놀이시설의 롤러코스터 등 급구배 추진이 요구되는 타 수송수단에 적용할 수 있어, 세계 테마파크의 시장의 50% 이상을 점유하고 있는 미국 (2007년 매출 12

조원, 입장객 3억 4천만명)으로 시장 진출 모색이 가능하다.

또한, 미래 전기철도 추진시스템의 핵심 기술 개발을 통하여 성능 검증 및 효율적 활용에 대한 운영 모델로 활용할 수 있고, 향후 국내외에서 추진되고 있는 비점착 구동 추진시스템을 위한 핵심 기술 및 핵심 장치 개발에 활용이 가능하다. 철도 운영기관에서의 신 비즈니즈 모델 창출에 활용하여, LPM 추진시스템을 적용한 물류운송시스템 개발 시 매립형 궤도를 이용하여 타 지상교통수단에 장애를 주지 않고, 물류운송 네트워크 구축 가능하다.

그 외, 아래와 같은 분야에서 본 연구 성과의 확산이 가능할 것으로 예상된다.

○ 국내 철도기관의 해외 진출시 기술 우위를 선점하기 위한 기술 자료로 확대 활용

○ 고부가가치형 철도 추진시스템으로서 산업체로의 기술이전 가능 및 기술 선점으로 수출 동력화 추진

○ 철도시스템 분야 국가 경쟁력 확보 및 철도차량 분야의 세계시장 선도에 기여

○ 타 운송수단 분야에 대한 기술지원 및 확산에 활용

○ 새로운 철도차량 활용의 활성화 기여

3. 연구개발 수행 상세 내용 및 결과

3.1. 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술

3.1.1. LPM 추진시스템의 철도적용 타당성 평가

3.1.1.1. 정책적 타당성

가. 정부 정책 및 규제와의 부합성

LPM 추진시스템은 수송 시스템 혁신을 가져오는 신기술로, 미래 신성장 동력으로 반드시 정부의 투자가 필요하다. 현재, 자동차 기반의 수송 시스템의 한계를 극복하고, 기존의 상부 가선식의 열차 시스템에서 탈피하게 됨으로써, 도심에 적합한 철도 개발이 가능하고, 나아가 중전철 및 고속 전철에 적용 시 파급효과가 막대한 새로운 신성장 산업으로 이어질 수 있다.

나. 녹색성장 정책

국제 온실가스 규제대응, 저탄소 친환경 신성장 전략사업 창출, 환경규제에 대한 국가경쟁력 향상 및 세계시장 선점을 위한 정책들을 추진하고 있고, 저탄소 녹색성장(Low Carbon, Green Growth)은 온실가스와 환경오염을 줄이는 지속가능한 성장으로 녹색기술과 청정에너지를 활용하여 신성장 동력과 일자리를 창출하는 신 국가 발전 패러다임이다. 세계는 환경문제에 대한 고려 없이는 경제발전도 생각할 수 없는 메커니즘으로 운영되고 있고, 녹색성장의 핵심은 경제성장을 추구하되 자원이용과 환경오염을 최소화하고, 이를 다시 경제성장의 동력으로 활용하는 '선순환구조'에 있다.

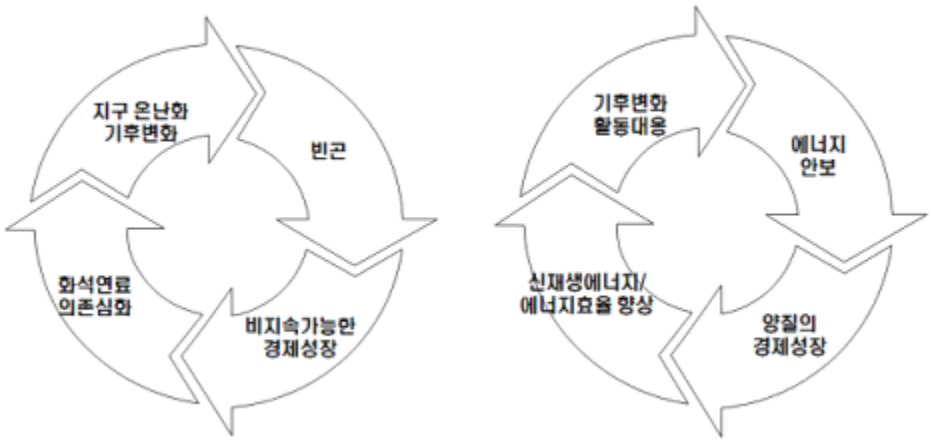


그림 3.1.1.1 악순환 구조(좌)와 선순환 구조(우)

세계 여러 나라에서 추진하고 있는 녹색성장 정책은 에너지 소비절약/사용 효율화, 저탄소·친환경 인프라 구축, 녹색기술에 대한 R&D 투자, 신 재생에너지 등 녹색산업 육성 및 수출 산업화, 세계시장 선점 지원 등이 핵심이다. 따라서, LPM 추진시스템 핵심기술 개발은 이런 세계 여러 나라에서 추진하고 있는 정책과 매우 부합되는 새로운 사업이며 도심 내 철도 서비스를 활성화하여 에너지 사용을 효율화 하고, 저탄소 친환경 인프라를 구축할 수 있을 것으로 기대된다. R&D 투자를 통해 국내 철도 기술을 발전시킴으로, 나아가 해외 수출 및 해외 시장을 선점할 수 있는 교두보를 마련할 수 있을 것이다.

다. 국가 과학기술 정책

LPM 추진시스템 핵심기술 개발 사업은 새로운 신성장 동력 사업으로 경전철 뿐만 아니라 중전철 및 고속 전철까지 적용 가능한 핵심 원천 기술 개발을 1차적 목표로 하고 있으며, 이는 현재 국가적으로 추진하고 있는 국가 과학 기술 정책과 매우 부합되는 연구 개발 사업이다.

라. 철도관련 정책과의 부합성

LPM 추진시스템은 탄소배출을 줄일 수 있는 친환경적인 철도 시스템으로 다양한 철도 형태에 적용 가능한 첨단 기술로서 철도 분야에서 상용화하여야 하며, 핵심기술 개발에 성공할 경우 세계 시장을 선도적으로 주도할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 추진에 필요한 전력 및 동력을 지상으로부터 직접 전달 받음으로써 상부가선시스템을 이용하는 전철 대비, 터널 단면적 감소가 가능하여 공사비 및 유지보수비 저감이 가능하다. 주행 중 급집전이 불필요하므로 상대적으로 저 용량의 배터리로 운행 가능함으로 배터리비용을 혁신적으로 절감 할 수 있다.

상부의 전력선이 사라지므로 이용 안전성 및 도심 미관 개선이 가능하며, 속도와 무관하고, 온도변화, 강우, 강설 등 외부환경에 대해 강인하여 신뢰도 및 안전성이 우수하여 안정적인 전력 공급 및 추진이 가능하다. 또한, 급전선 사고에 무관하여 운행 안전성 이 우수하고 가선 사고에 의한 피해를 최소화할 수 있다.

건설비와 운영비가 저렴한 LPM 추진시스템 기술개발을 통해 도심지 경량전철건설에 대한 풍부한 해외 시장을 바탕으로 수출 산업화가 가능하며, 기술 개발을 통한 요소기술의 수출이 가능하다.

결과적으로 LPM 추진시스템은 하부 가선으로 인한 공사비 감소와 효율적인 에너지 전달을 가능하게 함으로써 비용을 줄이고 안전성 및 도시 미관을 살릴 수 있는 획기적인 첨단 기술로서, 현재 이 분야에서 국내에서 선도적인 아이디어를 보유하고 있으므로 본 연구를 성공적으로 수행할 경우 전 세계적으로 실용 가능한 선도 기술을 우리나라에서 보유하게 될 것이며, 이는 철도 정책이 추진하는 바와 유사하다.

마. 관련 규제

현재 국내에서는 경전철 관련 건설 및 운행 기준이 미흡한 실정이며, 관련 법령, 기준, 절차 등이 명확하지 않아 경전철 도입에 혼선을 주고 있다. 경전철의 종류가 다양하고 특수한 경우가 많아 기존의 법 적용이 모호하고, 행정 절차가 복잡하여 통합된 가칭 '경전철 특별법'을 제정

하기 위해 준비 중이다. 현재 '노면전차 건설관리 법안'이 발의된 상태이다.

3.1.1.2. 기술적 타당성

LPM 추진시스템은 리니어 전철, 자기부상열차 등에 사용되는 선형전동기와 유사하나, 현재의 기술은 대량의 코어가 소요되어 실용성이 낮은 문제점을 가지고 있다. 또한, 본 연구에 필요한 대전류 전력변환장치는 기존의 철도에 사용되는 전력변환장치와 달리, 대전류 펄스가 필요하여 현재의 기술로는 어려우며, 새로운 연구개발이 필요한 실정이다.

차상 전력 공급용 비접촉 집전 기술은 전기자동차용 유도급전, 자기부상열차용 선형발전기 등이 개발되었으나, 다수의 대용량 공진형 컨버터가 요구되고, 발전을 위한 일정 속도 이상의 고속 주행이 요구되어지므로 새로운 기술 개발이 필요하다.

본 연구는 철도차량용 추진시스템에 있어, 전기기기, 제어, 섹션전환, 급전, 신호 등을 포함하는 시스템에 대한 기술개발로, 각 분야에 국한된 부분적인 분야의 기술개발과 차별성을 갖고 있으며, 시스템 사양 결정을 통한 독자 모델의 시스템 개발이다.

3.1.1.3. 경제적 타당성

가. 선형전동기 추진시스템 기술

전통적 철도차량은 접촉식 전력공급에 의한 점착구동 방식 동력장치의 차량 탑재로 인해 전차선 설치에 따른 도시미관 침해 및 위험성이 크게 증대되고, 넓은 차량 한계 및 터널 단면적에 따른 높은 건설비용이 필요하다. 또한, 가감속의 한계, 승객 중량 대비 높은 자체중량 비율로 에너지 효율이 저하되는 문제가 있다. 이를 극복하기 위해 점착구동 방식을 탈피하여 선형전동기 추진시스템 기술이 도입되었으며, 크게 LIM (Linear Induction Motor), LSM (Linear Synchronous Motor), 그리고 본 과제에서 제안하는 LPM (Linear Pulse Motor)가 있다.

그중, LPM은 차량 경량화, 제어 단순성, 열차제어시스템과의 결합 등 시스템 구성 측면 및 경제성 등에서 타 선형전동기와 비교하여 우수하다고 할 수 있으며 따라서, 초기 단계인 LPM 철도시스템 기술개발로 시장선점 및 수출전략 산업화가 필요하다.

나. LPM 추진시스템의 경제적 장점

기술적으로, 본 시스템은 비접촉방식으로서 접촉에 의한 마모가 없어 유지보수 비용 절감이 가능하다고 예측할 수 있으며, 직접 추력 발생 특성에 의한 효율적 운전이 가능한 설비구성으로 에너지효율성이 높으며, 추가적인 차량설비 없이 제동 시 발생하는 회생에너지 이용이 가능하기 때문에 이를 활용한 경제적 장점도 보유하고 있다고 할 수 있다. 이러한 기술적 특징에 따

른 효과를 정량적으로 분석하기 위하여 가장 최근에 제작된 서울 지하철 7호선(회전기 추진시스템), 용인경전철(LIM 추진시스템), 도시형 자기부상 열차(LSM 추진시스템) 등을 동일한 규모의 차량으로 구성하는 경우를 상정하여, 각 구성 장치별 중량 및 가격등을 비교하였다.

도시철도차량에 각각의 기술을 적용하여 추진시스템을 구성하는 경우 기술적 특징에 따라, 차량시스템별로 구성되는 차상장치 및 지상장치를 표 3.1.1.1에 나타내었다.

표 3.1.1.1 추진시스템별 도시철도 시스템 구성

항목	기존 도시철도			LPM 추진 도시철도
	서울지하철7호선	LIM 추진 (용인)	LSM 추진 (도시형 자기부상)	
차상장치	Panto+필터+인버터+모터+제동장치+보조제동장치	집전슈+필터+인버터+LIM+제동장치+보조제동장치	집전슈+필터+인버터+MG+부상코일+추진코일+보조제동장치	PCU+차상코일+보조제동장치
지상장치	전차선	제3궤조+지상 RP	제3궤조+지상코어+지상코일+인버터	지상코일+인버터

표 3.1.1.2 추진시스템별 경제성 비교

		서울7호선(8량1편성)			LIM (8량1편성)			도시형 자기부상 (8량1편성)			LPM도시철도 (8량1편성)		
		중량	수량	계(kg)	중량	수량	계(kg)	중량	수량	계(kg)	중량	수량	계(kg)
차상장치중량	집전장치	180	4	720	17	8	136	17	8	136	-	-	-
	추진장치	624	4	2496	435	16	6960	650	8	5200	200	16	3200
	필터	500	4	2000	50	16	800	280	8	2240	-	-	-
	견인전동기	690	16	11040	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	제동장치	100	8	800	100	8	800	-	-	-	-	-	-
	보조제동장치	200	8	1600	200	8	1600	200	8	1600	200	8	1600
	추진코일	-	-	-	700	16	11200	200	64	12800	700	16	11200
	부상코일	-	-	-	-	-	-	400	64	25600	-	-	-
	부상제어기	-	-	-	-	-	-	63	64	4032	-	-	-
	계			17936			21496			51608			16000
	중량/량			2242			2687			6451			2000
	중량비율			100%			120%			288%			89%
시스템 비용(백만원)													
		수량	단가	가격	수량	단가	가격	수량	단가	가격	수량	단가	가격
차상장치비용	Panto	4	10	40	4	10	40	8	5	40	-	-	-
	C/I	4	150	600	16	50	800	8	15	120	16	50	800
	FL	4	50	200	16	20	320	8	5	40	-	-	-
	TM	16	60	960	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	제동장치	8	15	120	8	15	120	-	-	-	-	-	-
	제동보조장치	8	35	280	8	35	280	8	35	280	8	35	280
	추진코일	-	-	-	16	40	640	64	10	640	-	-	
	부상코일	-	-	-	-	-	-	64	10	640	16	40	640
	MG	-	-	-	-	-	-	64	10	640	-	-	-
	계			2200			2200			2400			1440
	단가/량			275			275			300			180
	비율			100%			100%			109%			65%

지상설비비용	전차선	(km 당)	1200	-	-	-	-	-	-
	제3궤조	-	-	(km 당)	1200	(km 당)	1200	-	-
	LIM레일	-	-	(km 당)	500	-	-	-	-
	지상코어	-	-	-	-	(km 당)	1100	-	-
	지상코일	-	-	-	-	(km 당)	700	(km 당)	700
	지상인버터	-	-	-	-	(km 당)	400	(km 당)	500
	계(km당)	1200		1700		3400		1200	
	시설비비율	100%		142%		283%		100%	
비용(차상+지상)		3400		3900		5800		2640	
비율		100%		115%		171%		78%	

유지보수 비용 - 지상설비 1km 당 비용(백만원)				
	서울7호선	LIM	도시형 자기부상	LPM도시철도
전차선	120	-	-	-
선로	36	18	18	18
제3궤조	-	150	150	-
LIM레일	-	18	-	-
지상코일드라이버	-	-	-	-
지상전기자	-	-	18	18
유지관리비(km당)	156	186	186	36
비율	100%	119%	119%	23%

표. 3.1.1.2의 검토 결과와 같이 LPM 추진시스템을 적용하여 도시철도차량시스템을 구성하는 경우 차상설비 및 지상설비의 구성장치가 기존 시스템에 대비하여 간략히 구성할 수 있는 장점이 있으며, 이에 따라 장치별 중량은 기존의 회전기를 적용한 차량에 비교하여 89%에 불과한 장점이 있으며, 설비를 구성하는데 있어 차량1량 및 단위편성 당 약78%의 경제적 효과와 연간 유지관리비에서 23%에 불과한 경제적 효과를 가지고 있음을 알 수 있다.

3.1.1.4. 타당성검토 종합

가. 기술개발 필요성

세계적으로 꾸준히 증가하는 철도 건설 및 수요에 대응하기 위하여 교통수단의 다양화가 요구되고 있으며, 팬터그래프와 가공차선을 이용한 접촉식 전력공급장치의 터널 건설비용 증가, 점착 구동방식의 바퀴식 초고속 열차의 속도 한계, 도심내 전력선의 미관 침해 및 위험성 증대 등이 커다란 이슈인 시점에서 새로운 친환경적인 미래형 전기철도 추진시스템의 개발이 필요한 시점이다.

기존의 차량추진시스템은 전차선 및 팬터그래프와 같은 접촉식의 전력공급 장치에 따른 터널 건설비 및 유지보수비용이 큰 문제점이 있었다. 또한, 차량에 변압기, 컨버터, 인버터 등의 전력변환 장치와 회전형 견인전동기 및 기어 등의 에너지 변환 및 동력전달 장치를 탑재함에 따른 부피/무게 증가 및 구조가 복잡하고, 무게 증가에 따른 가감속 능력의 저하로 초고속주행이 어렵다. 휠 온 레일 방식은 차체에 장착된 휠과 지면에 고정되어 있는 레일 사이의 마찰력을 통해 추진력을 얻는 원리 상 급가속이나 고속이 어려운 문제도 있다.

따라서, 이러한 문제점을 일시에 소거하는, 신개념 미래형 전기철도 추진시스템의 개발이 필요하다. 새로운 추진시스템은 기존의 접촉식 전력공급장치를 제거하여 전차선 설비가 필요 없고, 이로 인한 터널 단면적 축소로 공사비 저감 및 유지보수 비용 절감이 가능한 전력공급 및 추진 일체형 시스템이다. 기존 전력공급장치의 단선 및 전기접촉 등에 의한 위험성이 없는 친환경적인 전기철도 시스템 구현이 가능한 새로운 기술 이며, 비점착 구동을 통한 직접 추력 발생 방식으로 급가속 및 고속 주행이 가능한 미래 철도차량 추진시스템이다.

리니어펄스 전동기 기술, 위치검지 기술, 차량 전자석 기술 등 LPM 추진시스템에 의한 원천기술 개발을 통해 미래형 교통수단에 대한 선진국의 기술선점 및 특허장벽 극복을 위하여 연구개발 조기 착수가 필요하다. 새로운 기술이 접목된 미래형 교통수단의 핵심 기술 개발을 통해 시장 주도 및 국가의 위상 제고 선도도 가능하다. 또한, 정부 및 지자체의 저비용, 고효율 수송시스템에 대한 관심 및 요구가 증대되고 있는 상황에서, LPM 추진시스템은 저비용, 고효율의 철도시스템 구축이 가능하다.

본 핵심 기술은 개발 초기 단계이므로, 현 시점에서 기술 개발에 성공할 경우 세계 시장을 선도적으로 주도할 수 있으며, 풍부한 해외 철도 시장을 바탕으로 수출 산업화가 가능하여 녹색철도교통시스템의 해외 진출 활성화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

LPM 추진시스템은 리니어 전철, 자기부상열차 등에 사용되는 선형전동기와 유사하나, LIM의 속도 한계를 극복하고, LSM의 고비용에 의한 실용성을 해결할 수 있는 차세대 추진시스템이다. 또한, 본 연구에 필요한 대전류 전력변환장치는 기존의 철도에 사용되는 전력변환장치와 달리, 대전류 펄스가 필요하여 현재의 기술로 어려우며, 새로운 연구개발이 필요하다.

차상 전력 공급용 비접촉 집전 기술은 전기자동차용 유도급전, 자기부상열차용 선형발전기 등이 개발되었으나, 다수의 대용량 공진형 컨버터가 요구되고, 발전을 위한 일정 속도 이상의 고속 주행이 요구되어지므로 새로운 기술 개발이 필요하다. LPM 추진시스템의 전기자 권선을 궤도 사이에 매입하는 기술은 연구된 바가 없으며, 누전 및 강도 등의 문제를 고려한 기술 개발이 필요하다.

나. 정부지원 타당성

(1) 기술개발투자의 시의성, 시급성

철도 건설에 있어서 건설비 저감 및 운영시 유지보수비 절감은 반드시 이루어야 할 과제로서, 전 세계적으로 이에 대한 연구개발이 활발히 진행 중이다. LPM 추진시스템은 기존의 접촉식 전력공급장치, 전력변환장치, 견인전동기, 기어 등을 사용하는 일반전철과 비교하여 경제적인 시스템으로 비용 저감이 가능하다.

세계 철도시장이 연평균 증가율 4.5% (The worldwide market for railway technology 2009-2013, SCI Verkehr, 2008)의 빠른 성장을 보이고 있는 시점에서 새로운 기술이 접목된 미래형 교통수단에 대한 선진국의 기술선점 및 특허장벽 극복을 위하여 연구개발 조기 착수가 반드시 필요하다. 또한, 향후 남북 통일 및 중국, 러시아로의 철도확장에서 우위를 선점하기 위해서도 연구개발의 빠른 추진이 요구된다.

(2) 정부 상위계획과의 부합성

LPM 추진시스템 핵심기술은 7대 기술 분야 중 4번째 분야인 국가주도 기술 분야와 관련하여 민간의 투자가 어려운 건설교통 분야 기술과 연계된다. 7대 기술 분야 중 세계적 관심사인 에너지 환경 문제와 관련되어 있으므로 6번째 분야인 글로벌 이슈분야와도 관련이 있다. 또한, 친환경 교통 시스템의 연구 개발을 목표로 하고 있으므로 과학기술기본계획에서 추진되고 있는 21세기 핵심기술로 부상한 신・재생에너지 등 친환경 기술과도 관련된다.

기초・원천 연구역량 강화로 핵심기술의 해외의존을 탈피하고자 하는 정부의 의지를 반영하고 있으며, 창조형 혁신을 주도할 핵심 과학기술인재의 양성・활용과 창의적・도전적 연구지원 강화를 목표로 하는 방향과도 부합하고 있다.

정부에서 계획하고 있는 2018년까지 90%의 기술력 달성 및 세계 5위의 점유 목표 달성을 위해서는 기술 추종형 연구개발이 아닌 기술 선도형 연구개발이 반드시 필요한 상황이다.

(3) 국토교통부 주도의 개발 및 지원 필요성

LPM 추진시스템 핵심기술 개발은 신개념 미래형 교통수단에 대한 기술개발로서 철도 교통을 담당하고 있는 국토교통부에서 지원하는 것이 타당하다. 새로운 추진시스템의 원천기술은 실용화 위주의 이익창출을 위한 산업체에서 수행하기가 매우 어려우며, 정부의 지원이 반드시 요구된다.

원천기술 개발에 성공할 경우, 철도뿐만 아니라 산업 이송 장치 및 로켓 보조 추진시스템, 물류 운송시스템 등 산업전반으로의 기술 이전 및 확대가 가능하므로 정부의 선도적인 투자가 필요하다.

(4) 정부 미지원시 문제점

새로운 미래형 철도 추진시스템에 대한 정부의 선도적 지원 없이, 산업체에서 이를 수행하기는 매우 어려운 상황이다. 정부가 주도적으로 지원하지 않을 경우 원천기술 개발 및 세계 기술 선도는 불가능 하며, 기술 추종형 전략만으로는 세계시장 점유 5위 목표를 달성하기 힘들다. 원천기술의 선점 실패 시, 막대한 기술료 지불이 불가피하며, 이는 선도적 투자비의 수십 배에 이를 수 있다.

다. 종합평가 및 결론

“LPM 추진시스템 핵심기술 개발”은 정책적, 기술적, 경제적 타당성을 확보하고 있으며, 시급한 기술개발의 필요성이 있다. 본 과제는 정부지원이 타당하며, 국가 차원에서의 주도적인 연구개발이 반드시 수행되어야 한다. 충분한 예산과 인력 및 인프라를 투입하여, 조속한 시일 내에 연구 결과를 도출하여 실용화 할 수 있도록 노력한다면, 세계 기술 주도를 할 수 있을 것으로 기대된다.

3.1.2. 철도차량 추진을 위한 LPM 기초기술 연구

3.1.2.1. LPM 모델링

가. 고정자 A상 및 B상 권선의 쇄교자속식

고정자 A상 권선에 쇄교하는 성분은 3가지 성분으로 표시할 수 있다. 이는 A상 권선에 인가된 A상 전류로 발생한 자속이 다시 A상 권선에 쇄교하는 쇄교자속량을 전류 당 쇄교자속의 비율로 나타낸 자기인덕턴스(Self Inductance) 성분과 B상 권선에 인가된 B상 전류로 인해 발생한 자속이 상대 권선인 A상 권선에 쇄교하는 쇄교자속량을 전류 당 쇄교자속의 비율로 나타낸 상호인덕턴스(Mutual Inductance) 성분 그리고 회전자 전자석에서 발생한 자속이 A상 권선에 쇄교하는 성분이다.

고정자 A상 권선에 쇄교하는 3가지 성분은 식 3.1.2.1과 같다..

$$\lambda_a = L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{fa} i_f f(\theta_r) \tag{3.1.2.1}$$

식 3.1.2.1에서 λ_a는 A상 권선에 쇄교하는 쇄교자속량(Magnetic Flux Linkage), i_a은 A상 권선의 전류, i_b는 B상 권선의 전류, i_f는 회전자 전자석 권선의 전류이다. L_a는 A상 권선에서 발생한 자속이 다시 자기 권선에 쇄교하는 쇄교자속량을 인가 전류 당 쇄교자속의 비율로 나타낸 자기인덕턴스(Self Inductance), L_{ab}는 A상 권선에서 발생한 자속이 B상 권선에 쇄교하는 쇄교자속량을 전류 당 쇄교자속의 비율로 나타낸 상호인덕턴스(Mutual Inductance)이며 반대의 경우인 B상 권선에서 발생한 자속이 A상 권선에 쇄교하는 쇄교자속량을 전류 당 쇄교자속의 비율로 나타낸 L_{ba}와 같다. 따라서 $L_{ab} = L_{ba}$이다. 또한 L_{fa}는 회전자 전자석에서 발생한 자속이 A상 권선에 쇄교하는 쇄교자속량을 전류 당 쇄교자속의 비율로 나타낸 상수 값이다.

여기서 L_a는 다시 그림 3.1.2.1과 같이 자기 전류에 의해 발생한 자속이 자기 권선과 상대 권선에 쇄교하는 쇄교자속량을 전류 당 쇄교자속의 비율로 나타낸 자화 인덕턴스(Magnetizing Inductance) L_m과 자기 전류에 의해 발생하여 다시 자기 권선에 쇄교 하지만 상대 권선에는 쇄교 하지 않는 성분의 쇄교자속량을 전류 당 쇄교자속의 비율로 나타낸 누설 인덕턴스(Leakage Inductance) L_{ls}로 이루어져 있다. 따라서 L_a는 이 두 인덕턴스 성분의 합으로 나타낼 수 있으며 식 3.1.2.2와 같다.

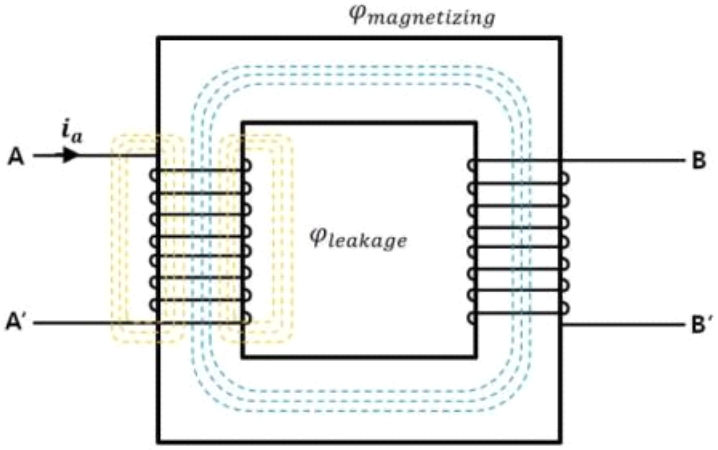


그림 3.1.2.1 자화성분과 누설성분

$$L_a = L_m + L_{ls} \tag{3.1.2.2}$$

또한 상대 권선에서 발생한 자속이 자기 권선에 쇄교 시 자속이 권선에 입사하는 각도에 따라 권선에 쇄교 되는 자속의 양이 변화하게 된다. 이때 식 3.1.2.3과 같이 자속과 권선이 이루는 공간적인 각도가 90도 일 경우 최대가 된다. 따라서 LPM의 경우 이상적으로 각 상 권선이 공간상에 배치됨을 가정하면 그림 3.1.2.2와 같이 고정자의 두 상 권선이 공간적으로 90도 이격되어 있음으로 상대 권선에서 발생한 자속이 자기 권선에 입사하는 각도는 0도가 되어 발생한 자속이 권선에 쇄교 하지 않는다.

$$L_{ab} = L_{ba} = L_m \cos(90^\circ) = 0 \tag{3.1.2.3}$$

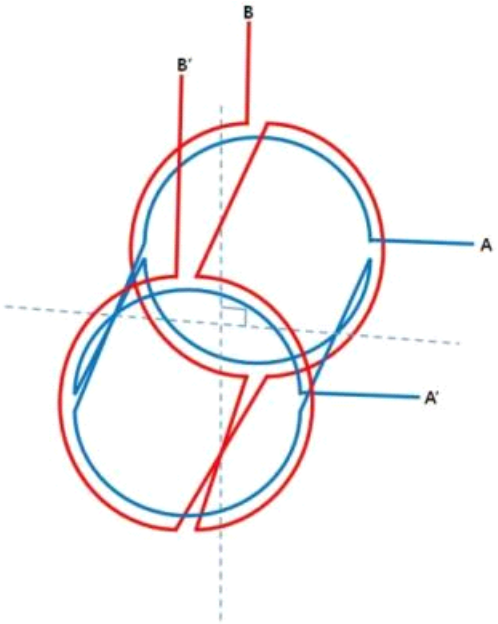


그림 3.1.2.2 고정자 A상 및 B상 권선의
공간적 배치

A상 권선에 쇄교 하는 자속 중 마지막 성분은 회전자 전자석에서 발생한 자속이 A상 권선에 쇄교 하는 성분으로 회전자가 회전함에 따라 권선에 쇄교하는 쇄교자속량이 변화하며 이를 $f(\theta_r)$로 나타내면 식 3.1.2.4와 같다.

$$\lambda_{ma} = L_{fa} i_f f(\theta_r) \tag{3.1.2.4}$$

여기서 λ_{ma}은 회전자 전자석에서 발생한 자속이 고정자 A상 권선에 쇄교하는 쇄교자속량이다.

앞서 설명한 A권선에 쇄교하는 세 성분을 종합하여 다시 쓰면 식 3.1.2.1은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_a = L_a i_a + L_{fa} i_f f(\theta_r) \tag{3.1.2.5}$$

B상 권선에 쇄교하는 쇄교자속 λ_b 또한 λ_a와 같은 방법으로 정리할 수 있다. 영구자석에서 발생하여 고정자 A상 및 B상 권선에 쇄교하는 자속량의 최대크기가 동일하다고 가정하고 λ_b에 대해 정리하면 식 3.1.2.6과 같다.

$$\lambda_b = L_b i_b + L_{fb} i_f f(\theta_r + 90^\circ) \tag{3.1.2.6}$$

이때 LPM을 돌극비(Salient Ratio)가 1인 전동기로 가정하면 $L_a = L_b = L_s = L_m + L_{ls}$로 나타낼 수 있으며 식 3.1.2.7와 같이 고정자 쇄교자속식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix}\lambda_a \\ \lambda_b\end{bmatrix} = (L_m + L_{ls})\begin{bmatrix}i_a \\ i_b\end{bmatrix} + \lambda_m \begin{bmatrix}f(\theta_r) \\ f(\theta_r + 90^\circ)\end{bmatrix} \tag{3.1.2.7}$$

또한 A상 및 B상 권선에서 발생한 자속은 상대권선 뿐만 아니라 회전자 권선에도 쇄교하며 λ_a와 동일하게 정리하면 식 3.1.2.8과 같다.

$$\lambda_f = L_f i_f + L_{af} i_a f(\theta_r) + L_{bf} i_b f(\theta_r + 90^\circ) \tag{3.1.2.8}$$

여기서 λ_f는 회전자 전자석에 쇄교하는 쇄교자속량이다. L_{af}는 고정자 A상 권선에서 발생한 자속이 회전자 권선에 쇄교하는 쇄교자속량을 인가 전류 당 쇄교자속량의 비로 나타낸 값이며 또한 L_{bf}는 고정자 B상 권선에서 발생한 자속이 회전자 권선에 쇄교하는 쇄교자속량을 인가 전류 당 쇄교자속량의 비로 나타낸 값이다.

나. 고정자 전압방정식

고정자 모델링에 사용된 2극 2상 회전기기는 그림 3.1.2.3과 같다.

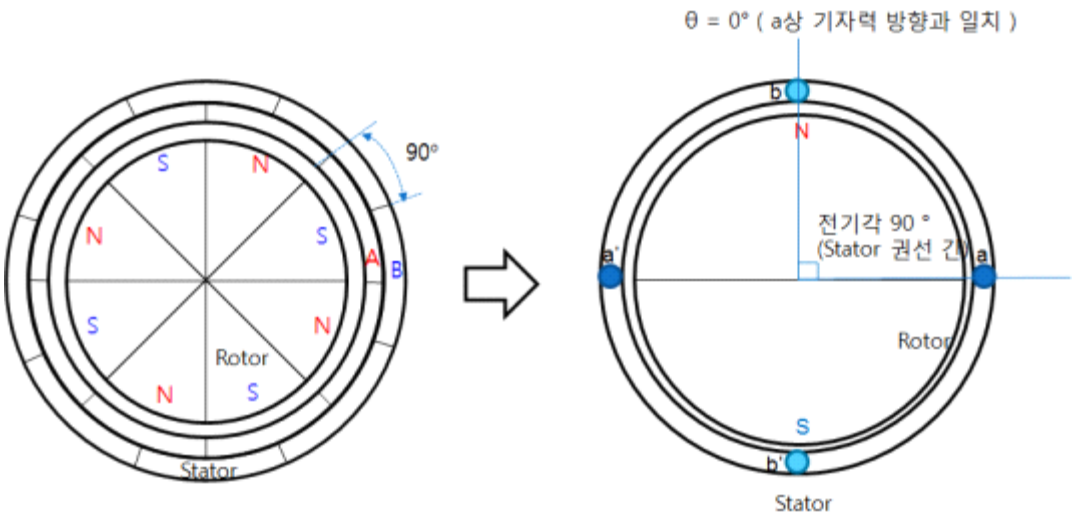


그림 3.1.2.3 2극 2상 회전기기로 등가변환 된 LPM

이를 고정자 전압방정식(Stator Voltage Equation)으로 나타내면 식 3.1.2.9와 같다.

$$V = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \tag{3.1.2.9}$$

식 3.1.2.9에서 전압 $V = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_f \end{bmatrix}$, 전류 $i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_f \end{bmatrix}$, 저항 $R = \begin{bmatrix} R_a \\ R_b \\ R_f \end{bmatrix}$, 쇄교자속 $\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_f \end{bmatrix}$이다. 여기서 앞서 구한 A 및 B상 권선에 대한 쇄교자속식을 대입하여 정리하면 고정자 A상 및 B상, 회전자 권선에 대한 전압방정식은 식 3.1.2.10, 식 3.1.2.11 및 식 3.1.2.12와 같다.

$$V_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt}$$

$$V_a = R_a i_a + \frac{dL_a i_a}{dt} + \frac{dL_{fa} i_f f(\theta_r)}{dt}$$

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + L_{fa} i_f \omega_r g(\theta_r) + L_{fa} f(\theta_r) \frac{di_f}{dt} \tag{3.1.2.10}$$

$$V_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + L_{fb} i_f \omega_r g(\theta_r + 90^\circ) + L_{fb} f(\theta_r + 90^\circ) \frac{di_f}{dt} \tag{3.1.2.11}$$

$$\begin{aligned} V_f = {} & R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + L_{af} i_a \omega_f g(\theta_r) + L_{af} f(\theta_r) \frac{di_a}{dt} \\ & + L_{bf} i_b \omega_f g(\theta_r + 90^\circ) + L_{bf} f(\theta_r + 90^\circ) \frac{di_b}{dt} \end{aligned} \tag{3.1.2.12}$$

여기서 V_a, V_b 및 V_f는 각각 고정자 A상, B상 및 회전자 전압, i_a, i_b 및 i_f 는 각각 고정자 A상, B상 및 회전자 전류, R_a, R_b 및 R_f는 각각 고정자 A상, B상 및 회전자 저항, ω_r은 전기각속도, $g(\theta_r)$은 역기전력 파형의 단위 함수이다. 상기 전압 방정식에서 고장자 및 회전자 권선의 인가 전류의 형태가 직류임을 가정하면 식 3.1.2.10, 식 3.1.2.11 및 식 3.1.2.12는 식 3.1.2.13, 식 3.1.2.14 및 식 3.1.2.15와 같이 간단한 형태로 표현가능하다.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + L_{fa} i_f \omega_r g(\theta_r) \tag{3.1.2.13}$$

$$V_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + L_{fb} i_f \omega_r g(\theta_r + 90^\circ) \quad (3.1.2.14)$$

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + L_{af} i_a \omega_f g(\theta_r) + L_{bf} i_b \omega_f g(\theta_r + 90^\circ) \quad (3.1.2.15)$$

여기서 $L_{fa} i_f \omega_r g(\theta_r)$ 및 $L_{fb} i_f \omega_r g(\theta_r + 90^\circ)$는 역기전력을 나타내는 항으로 각각 E_a 및 E_b로 표현 가능하다.

다. 토크방정식

LPM의 입력 전력은 식 3.1.2.16과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{in} = V_a i_a + V_b i_b \quad (3.1.2.16)$$

식 3.1.2.16에 식 3.1.2.10 및 식 3.1.2.11의 전압방정식을 대입하면 식 3.1.2.17과 같다.

$$P_{in} = (R_a i_a + \frac{dL_a i_a}{dt} + E_a) i_a + (R_b i_b + \frac{dL_b i_b}{dt} + E_b) i_b$$

$$P_{in} = R_a i_a^2 + L_a i_a \frac{di_a}{dt} + E_a i_a + R_b i_b^2 + L_b i_b \frac{di_b}{dt} + E_b i_b$$

$$P_{in} = R_a i_a^2 + R_b i_b^2 + L_a i_a \frac{di_a}{dt} + L_b i_b \frac{di_b}{dt} + E_a i_a + E_b i_b \quad (3.1.2.17)$$

식 3.1.2.17에서 $R_a i_a^2$ 및 $R_b i_b^2$은 고정자 상권선의 동손을 의미하며 $L_a i_a \frac{di_a}{dt} + L_b i_b \frac{di_b}{dt}$는 저장되는 자계 에너지의 변동분을 나타낸다. 따라서 손실성분을 제외한 실질적인 토크에 기여하는 기계적 출력 P_{out}은 앞의 두 항을 제외한 나머지 항이며 식 3.1.2.18과 같다.

$$P_{out} = E_a i_a + E_b i_b \quad (3.1.2.18)$$

여기서 기계적 출력 P_{out}은 다시 식 3.1.2.19와 같이 표현된다.

$$P_{out} = T_e \omega_m \tag{3.1.2.19}$$

여기서 T_e는 전동기의 토크를, ω_m은 전동기 기계 각속도를 나타낸다. 식 3.1.2.19에 식 3.1.2.18을 대입하여 토크 T_e에 대하여 정리하면 최종 토크방정식(Torque equation)은 식 3.1.2.20과 같다.

$$T_e \omega_m = E_a i_a + E_b i_b$$

$$T_e = \frac{E_a i_a + E_b i_b}{\omega_m} \tag{3.1.2.20}$$

라. 기계시스템의 운동방정식

기계시스템의 운동방정식은 식은 식 3.1.2.21과 같다.

$$T_e = B\omega_m + J\frac{d\omega_m}{dt} + T_L \tag{3.1.2.21}$$

여기서 B는 마찰계수, J는 전체 시스템의 관성모멘트, T_L은 부하토크, B는 마찰계수이다.

마. 회전기기 및 선형기기 상호변환

선형기기를 회전기기로 변환하였을 경우 회전기기의 반지름은 선형기기에서의 한 극과 다음 극간의 거리인 극간거리 $\tau[m]$ 및 극 수(Number of Pole) P로부터 구해진다. 따라서 선형기기를 회전기기로 변환하였을 경우 회전기기의 반지름 r은 식 3.1.2.22와 같다.

$$r = \frac{\tau P}{2\pi} \tag{3.1.2.22}$$

회전기기의 토크는 반지름 당 발생 힘과 같고 회전기기 형태에서의 반지름은 식 3.1.2.22와 동일함으로 회전기기에서 발생하는 토크 T_e를 선형기기의 추력 F로 변환은 식 3.1.2.23과 같다.

$$F = \frac{Te}{r} = {}_e\frac{2\pi}{\tau P} \tag{3.1.2.23}$$

선형기기에서의 관성은 물체의 질량 M과 동일하며 이를 회전기기의 관성 모멘트 J로 변환하면 식 3.1.2.24와 같다.

$$J = Mr^2 = M(\frac{\tau P}{2\pi})^2 \quad (3.1.2.24)$$

선형기기에서 대차의 진행 속도인 초속 v를 회전기기의 기계각속도 ω_m으로 변환하면 식 3.1.2.25와 같다.

$$\omega_m = \frac{v}{\tau P} 2\pi \quad (3.1.2.25)$$

3.1.2.2. LPM 추진제어 기법

LPM의 구동 방법은 역기전력(Back-EMF) 파형의 형태에 따라 2가지 경우로 구분하여 제어한다. 역기전력 파형의 형상이 이상적인 근사 사다리꼴(Trapezoidal) 형태일 경우 LPM의 추진제어는 구형파(Square Wave) 형태의 전압을 인가하여 구형파 형태의 전류를 발생시켜 일정 토크(Torque)를 발생시키는 구형파 전류 제어방법을 사용하며 역기전력 파형의 형상이 이상적인 정현파(Sine Wave)일 경우 d-q축 좌표 변환을 통한 벡터제어(Vector Control)를 사용하여 일정 토크를 발생시키는 정현파 전류제어 방법을 사용한다. 다음의 표 3.1.2.1은 구형파 전류제어 방식과 정현파 전류제어 방식을 비교한 비교표이다. LPM의 경우 그 구조의 특성 상 역기전력 파형은 근사 사다리꼴 형태로 발생하며 이에 따라 구형파 전류제어방법이 토크 리플 저감 측면에서 유리하다.

표 3.1.2.1 구형파 전류제어 및 정현파 전류제어 비교

	구형파 전류제어	정현파 전류제어
고정자 인가 전류 형태	구형파	정현파
제어 방식	구형파 전류제어 방식 (BLDC 제어 방식)	정현파 전류제어 방식 (벡터 제어 방식)
토크 리플	상 전환 시 토크 리플 발생	구형파 전류제어 대비 적은 토크 리플

가. 구형파 전류제어 방식

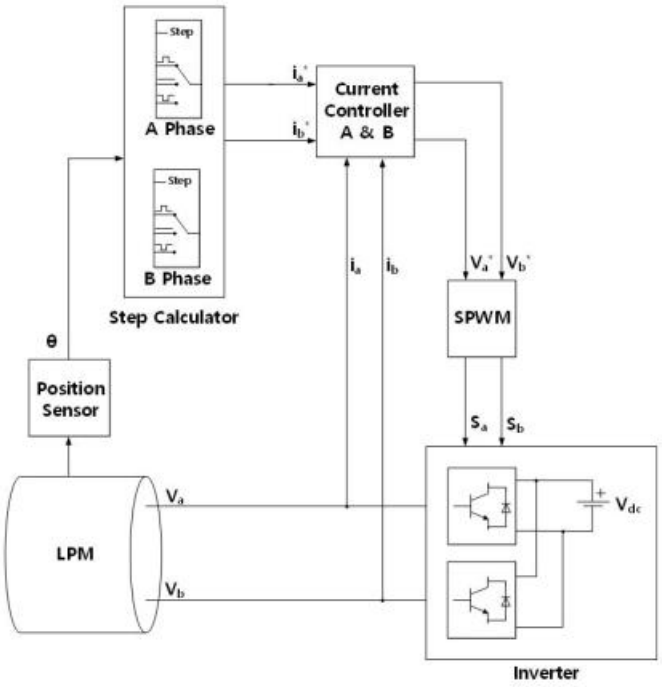


그림 3.1.2.4 구형파 전류제어 구동 방식 블록도

구형파 전류제어방식은 그림 3.1.2.4와 같이 구성된다. LPM의 회전에 따른 위치 정보(Θ, Theta)가 위치센서(Position Sensor)에 의해 검출되며 검출된 위치정보를 스텝 계산기(Step Calculator)에서 가공하여 정해진 각도에서 정해진 상에 전류를 인가하는 4단계의 전류 인가 정보인 스텝으로 변환하게 된다. 이때 각 스텝에 따라 고정자 각 상 권선에 인가된 전압으로 발생한 전류를 전류 센서(Current Sensor)를 통하여 검출하며 검출된 현재 전류 값을 P-I제어기로 되먹임(Feedback) 하여 사용자가 지정한 전류 지령치를 만족하는 전압 지령을 스위칭 신호의 형태로 인버터(Inverter)에 전달한다. 인버터는 전력 소자의 스위칭을 통해 원하는 전류 지령에 해당하는 전압 값을 출력한다. 따라서 최종적으로 지령치의 전류를 만족하는 전압 값이 정해진 각도만큼 전기자 각 상 권선에 인가되며 인가된 전류에 의해 발생한 힘으로 LPM이 구동된다.

구형파 전류제어 방식에서 발생하는 토크는 홀센서의 신호로 계산되어진 스텝에 따라 상 전환 순간에 토크 리플이 발생한다. 이는 권선의 인덕턴스 성분으로 인하여 전류가 기울기를 가지고 변화하기 때문이며 권선의 인덕턴스 매우 작다고 가정하면 순간적인 상 전환으로 리플이 없는 일정한 토크가 발생하지만 실제의 경우 권선의 인덕턴스 성분으로 인하여 전류가 기울기가 존재함으로 상 전환 순간에 토크 리플이 발생한다.

(1) 스텝 계산기

실제 LPM 시스템에서는 현재 회전자의 각 위치 정보를 장착된 A 및 B 홀센서의 상승(Rising) 및 하강(Falling) 신호의 검출에 의하여 절대 위치가 검출된다. LPM에서 A 및 B 홀센서는 공간상으로 서로 90도 이격되어 장착되며 총 1회전 360도 기준으로 A 홀센서 2개, B 홀센서 2개가 90도씩 교번하며 장착된다. 따라서 홀센서에서 출력되는 A 홀센서 신호 및 B 홀센서 신호는 그림 3.1.2.5와 같으며 45도 간격으로 각각의 홀센서에서 출력되는 신호의 상태가 변환된다. 전동기 1회전 시 홀센서의 출력 신호는 A 및 B 홀센서 각각 상승 신호 2번, 하강 신호 2번이 발생하며 A 및 B 홀센서에서 신호의 변화는 총 8회 발생한다. 따라서 각각의 홀센서의 장착위치에 대한 오차 및 발생한 홀센서 신호의 샘플링(Sampling)으로 인한 지연이 없다고 가정할 경우 신호의 변화를 검출하여 누적하면 45도 간격으로 전동기 1회전 당 8단계의 LPM의 절대각의 추출이 가능하다. 상기 방법으로 LPM의 각정보를 추출하면 각각의 홀센서의 온-오프 시점에 따른 45도 간격의 절대각 만을 추출 가능하고 그 사이의 각 정보는 추가적인 알고리즘이나 하드웨어(Hardware)적 기법을 사용하지 않는다면 불가능하여 분해능(Resolution)이 낮다. 하지만 구형파 전류제어 방식의 경우 고 분해능의 위치정보를 요구하지 않고 회전자 각 위치를 360도 기준 4분주하여 90도 간격으로 인가되는 상권선 및 전류의 극성이 변화함으로 90도 간격의 절대각의 추출만으로 구동가능하다. 따라서 LPM 시스템에 장착된 45도의 분해능을 갖는 홀센서로 8단계의 위치 정보의 추출이 가능함으로 추출된 8단계의 위치 정보의 가공을 통하여 LPM을 구동하기 위한 4단계의 스텝 정보의 계산이 가능하다.

8단계의 위치정보를 통하여 연산되는 스텝은 360도 기준 8번 및 1번 위치인 315도(-45도)에서 45도까지 스텝 4이 연산 결과로 출력되며 동일하게 2번 및 3번 위치인 46도에서 135도까지 스텝 1를, 4번 및 5번 위치인 136도에서 225도까지 스텝 2를, 6번 및 7번 위치인 226도에서 314도(-44도)까지 스텝 3이 출력되며 그림 3.1.2.6과 같다.

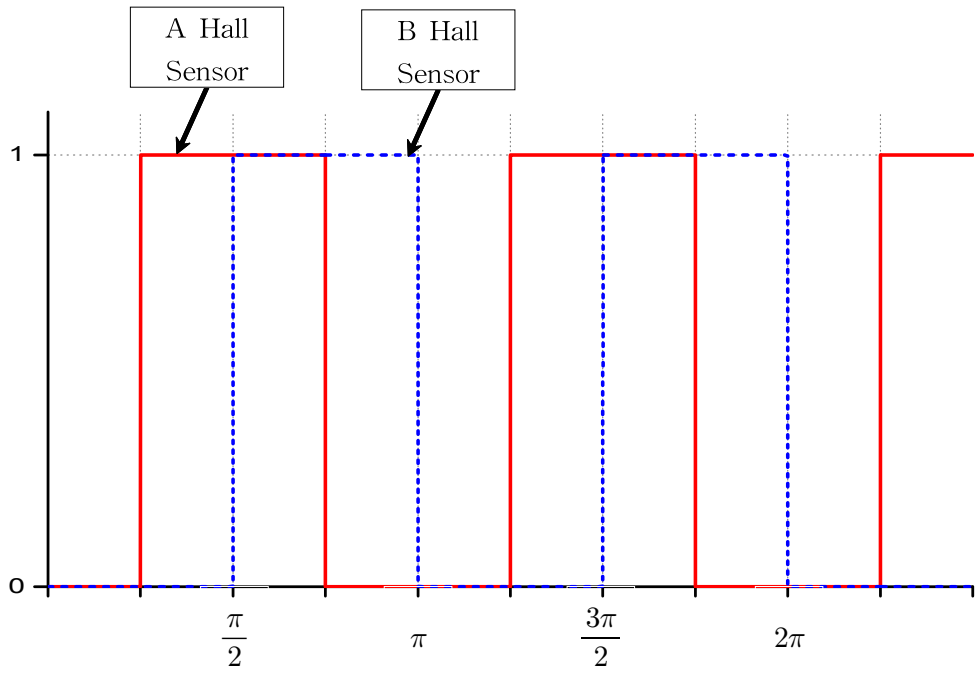


그림 3.1.2.5 각도에 따른 홀 센서 신호

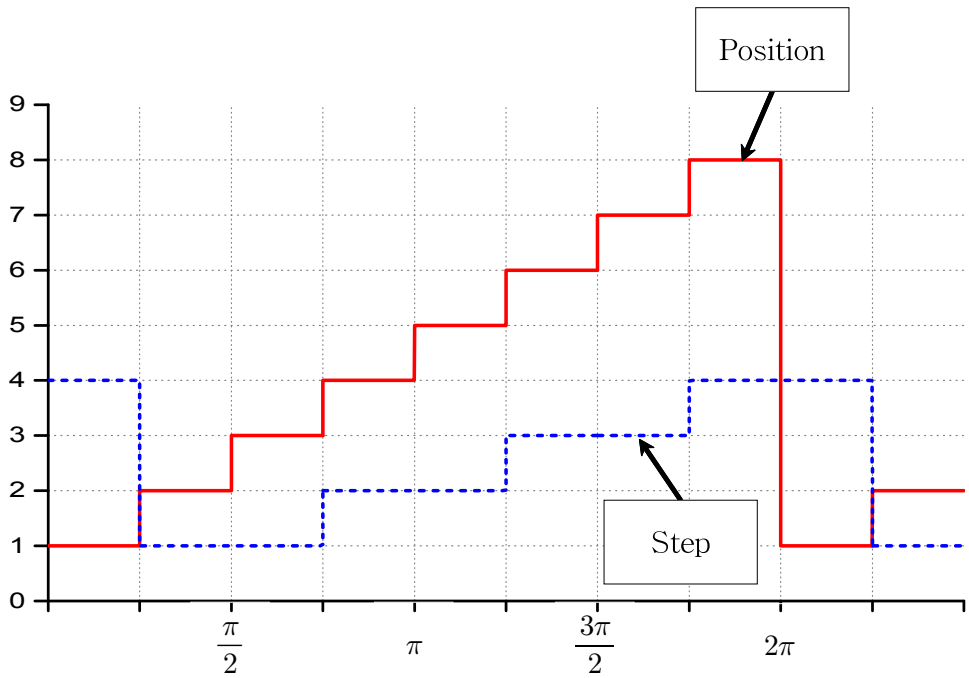


그림 3.1.2.6 연산된 위치 및 스텝

(2) 스텝에 따른 전압 인가 방식

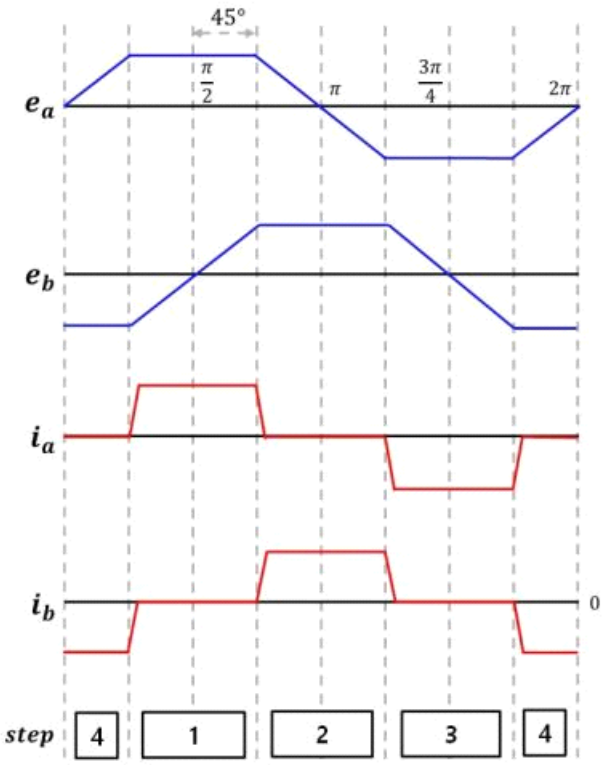


그림 3.1.2.7 스텝에 따른 전류 인가

앞서 스텝 계산기에서 연산된 스텝에 따라 그림 3.1.2.7과 같이 역기전력 파형이 평탄한 구간에서 구형파의 전류가 인가되어 일정 토크의 출력을 유지하며 LPM이 회전한다.

스텝 1에서 A상 권선에 양의 전류가 지령 전류만큼 인가된다. 동일하게 스텝 2에서 B상 권선에 음의 전류, 스텝 3에서 A상 권선에 음의 전류, 스텝 4에서 B상 권선에 양의 전류가 지령 전류만큼 인가된다.

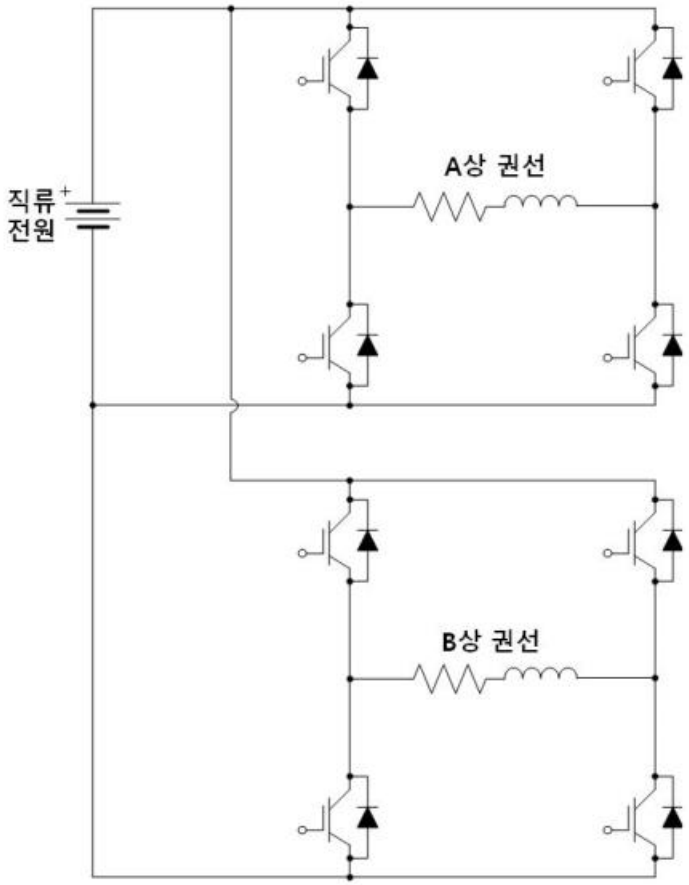


그림 3.1.2.8 병렬 구조의 단상 풀브릿지 인버터

LPM은 두 개의 단상 풀브릿지(Single Phase Full Bridge) 구조의 인버터를 이용하여 전동기에 전원을 공급한다. 그림 3.1.2.8과 같이 두 개의 단상 풀브릿지 인버터가 병렬로 전원에 연결된 형태로 구성이 되며 각각의 단상 풀브릿지 인버터 일개 구성 당 스위칭 소자 4개로 구성되어 있어 총 8개의 스위칭 소자를 이용하여 전동기에 전원을 공급한다.

스텝 1에서는 A상 권선에 연결된 단상 풀브릿지 인버터의 좌측 레그(Leg)의 상단 스위치 및 우측 레그의 하단 스위치를 도통(Turn-on)하여 A상 권선에 양의 전압을 인가한다. 인가된 전압에 의해 발생된 전류는 A상 권선에 인가되어 전류와 자속의 관계에 의해 기자력(MMF, Magnetic Motive Force)이 발생하며 회전자가 고정자에서 발생한 기자력에 의해 반시계 방향(Counter ClockWise)으로 46도부터 135도까지 회전한다.

스텝2에서는 B상 권선에 연결된 단상 풀브릿지 인버터의 좌측 레그 상단 스위치 및 우측 레

그 하단 스위치를 도통하여 B상 권선에 양의 전압을 인가한다. 인가된 전압에 의해 발생된 전류는 B상 권선에 인가되어 전류와 자속의 관계에 의해 기자력이 발생하며 회전자가 고정자에서 발생한 기자력에 의해 반시계 방향으로 136도부터 225도 까지 회전한다.

스텝 3에서는 A상 권선에 연결된 단상 풀브릿지 인버터의 좌측 레그 하단 스위치 및 우측 레그 상단 스위치를 도통하여 A상 권선에 음의 전압을 인가한다. 인가된 전압에 의해 발생된 전류는 A상 권선에 인가되어 전류와 자속의 관계에 의해 기자력이 발생하며 회전자가 고정자에서 발생한 기자력에 의해 반시계 방향으로 226도부터 315도까지 회전한다.

스텝 4에서는 B상 권선에 연결된 단상 풀브릿지 인버터의 좌측 레그 하단 스위치 및 우측 레그 상단 스위치를 도통하여 B상 권선에 음의 전압을 인가한다. 인가된 전압에 의해 발생된 전류는 B상 권선에 인가되어 전류와 자속의 관계에 의해 기자력이 발생하며 회전자가 고정자에서 발생한 기자력에 의해 반시계 방향으로 316(-46)도부터 45도까지 회전한다.

이와 같은 4단계의 스텝을 통하여 LPM은 온전히 1회전을 완료하며 1스텝에서 4스텝으로, 다시 1스텝으로의 연속적인 스텝 인가를 통해 지속적으로 회전한다. 시계 방향(Clockwise)의 회전은 반시계 방향으로 회전 시의 역순으로 스텝을 인가하며 4스텝에서 1스텝으로 다시 4스텝으로의 연속적인 스텝을 인가하여 회전한다.

나. 전류제어기 설계

제어란 일반적으로 원하는 제어 목표를 달성하기 위하여 제어 대상을 말하는 플랜트(Plant)에 적절한 입력을 인가하는 것을 말한다. 이때 적절한 입력을 발생시키는 것이 제어기(Controller)이며 일반적으로 P-I제어기를 사용하여 구성한다. 또한 플랜트와 제어기 모두를 제어 시스템(Control System)이라 칭한다.

전동기는 전기 에너지를 입력 받아 기계적 추력(Thrust) 또는 토크로 변환하는 장치를 말한다. 입력된 전기에너지로 발생한 추력 또는 토크는 전동기의 기계 시스템에 의해 다시 속도로 변환된다. 따라서 원하는 값을 가지는 속도로 제어하기 위해서는 토크의 제어가 요구된다. 하지만 토크를 제어하기 위해서는 현재의 순시 토크를 직접 제어하는 것이 가장 효과적이나 순시 토크를 측정 하는 것은 고가의 토크센서 사용이 요구됨으로 현실적인 적용이 불가능하다. 따라서 식 3.1.2.20의 토크방정식으로부터 전류와 토크가 비례함을 이용하여 전류를 제어함으로써 토크를 간접적으로 제어한다.

(1) 되먹임제어

일반적인 물리적 제어시스템의 구성의 블록선도는 그림 3.1.2.9와 같다.

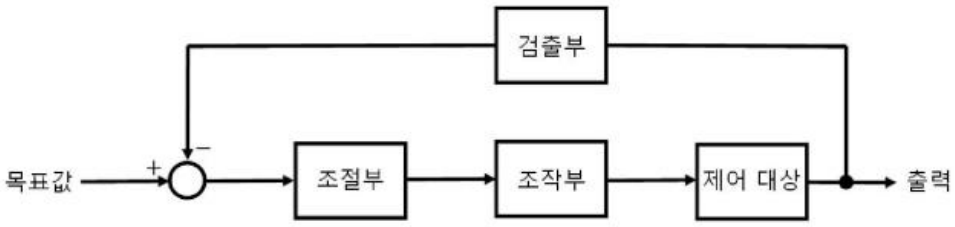


그림 3.1.2.9 일반적인 제어시스템의 블록선도

그림 3.1.2.9에서 목표값이란 제어대상에서 출력되는 출력값이 도달해야 하는 값으로 외부입력에 의하여 결정된다.

출력부에서는 출력신호를 검출하며 조절부에서는 목표값과 검출부에서 검출된 출력값을 제어시스템에서 사용 가능한 값으로 변환하여 조작부에 공급한다. 조작부에서는 조절부의 신호를 받아 그 신호에 해당하는 값의 실제 대상을 구동하는 힘을 제어대상에 공급한다.

(2) LPM 시스템의 블록선도

그림 3.1.2.9에서 제어대상에 해당하는 LPM 시스템의 전압방정식인 식 3.1.2.9를 라플라스 변환을 통하여 주파수 영역으로 변환하면 식 3.1.2.26과 같다. 식 3.1.2.21의 기계시스템의 운동방정식 또한 라플라스 변환을 통하여 주파수 영역으로 변환하면 식 3.1.2.27과 같다. 주파수 영역으로 변환된 전압방정식 및 기계시스템의 운동방정식을 각각 전류와 기계각속도에 대해 정리하면 식 3.1.2.26과 식 3.1.2.27은 각각 식 3.1.2.28과 식 3.1.2.29로 정리된다.

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + sL_s I_a(s) + E_a(s) \tag{3.1.2.26}$$

$$T_e(s) = B\omega_m(s) + sJ\omega_m(s) + T_L(s) \tag{3.1.2.27}$$

$$V_a(s) = I_a(s)(R_a + sL_s) + E_a(s)$$

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - E_a(s)}{R_a + sL_s} \tag{3.1.2.28}$$

$$T_e(s) = \omega_m(s)(B + sJ) + T_L(s)$$

$$\omega_m(s) = \frac{T_e(s) - T_L(s)}{B + sJ} \tag{3.1.2.29}$$

또한 인가 전류와 발생 토크의 비 혹은 속도와 발생 역기전력의 비인 역기전력 상수 K_e로 나타낼 수 있다고 하면 주파수 영역에서 표현된 역기전력과 토크는 각각 식 3.1.2.30 및 식 3.1.2.31과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_a(s) = K\omega_m(s) \tag{3.1.2.30}$$

$$T_e(s) = KI_a(s) \tag{3.1.2.31}$$

따라서 LPM 시스템의 입력이 전압, 출력이 기계각속도로 보고 블록선도(Block Diagram)로 표시하면 그림 3.1.2.10과 같다.

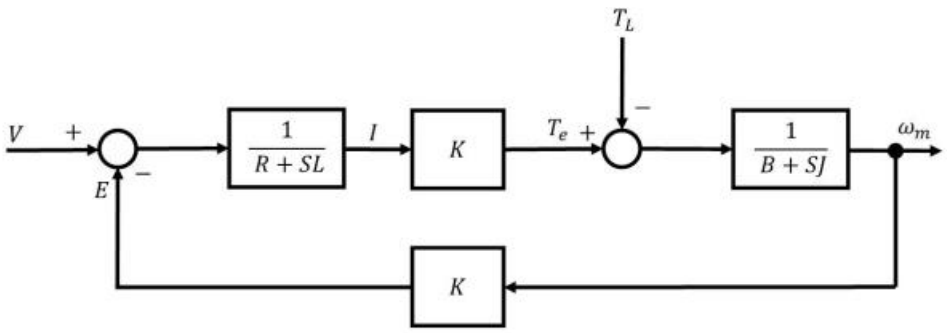


그림 3.1.2.10 LPM 시스템의 블록선도

그림 3.1.2.10에서 시스템의 모든 초기값을 0으로 할 때의 출력신호와 입력신호 사이의 관계를 비율로 나타내는 전달함수(Transfer Function)은 부하토크를 0으로 가정했을 경우 식 3.1.2.32와 같이 표현된다.

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{\frac{1}{R_a+sL_a} \cdot K \cdot \frac{1}{B+sJ}}{1+(\frac{1}{R_a+sL_a} \cdot K \cdot \frac{1}{B+sJ} \cdot K)}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{(R_a+sL_a)(B+sJ)+K^2} \tag{3.1.2.32}$$

(3) 전류제어기 설계

그림 3.1.2.11은 부하토크가 없고 전류제어기의 출력 값인 전압지령이 손실 없이 전동기에 인가됨을 가정하였을 경우에서의 전류제어기를 포함하는 LPM 시스템의 블록선도를 나타내며 일반적으로 관성모멘트 값이 충분히 크다면 역기전력의 되먹임(Feedback) 효과가 0에 근접하여 무시할 수 있다 따라서 관성 모멘트가 큰 경우의 블록선도는 그림 3.1.2.12와 같다.

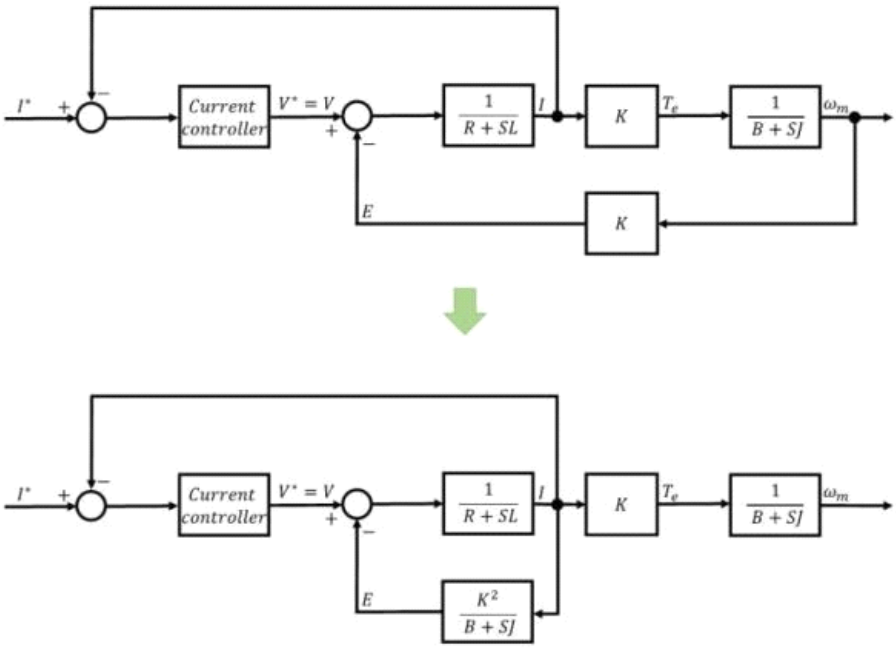


그림 3.1.2.11 전류제어기를 포함하는 LPM 시스템의 블록선도

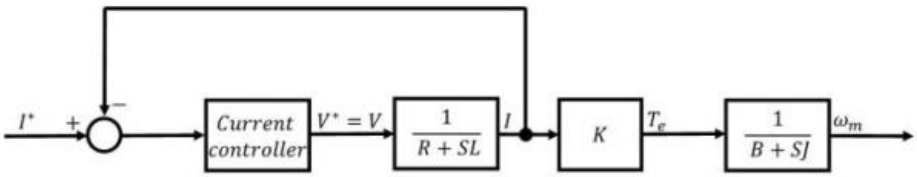


그림 3.1.2.12 관성 모멘트가 큰 경우의 전류제어기를 포함하는
LPM 시스템의 블록선도

그림 3.1.2.12에서 전류제어기(Current Controller)는 일반적으로 비례 제어기에서 정상상태에서 발생하는 지령치와 출력값의 차이가 발생하며 이러한 오차를 제거하기 위하여 적분제어기가 포함된 형태의 비례-적분 제어기(Proportion-Integral Controller, P-I Controller)를 사용한다. 따라서 P-I 제어기를 사용한 경우 그림 3.1.2.12는 그림 3.1.2.13과 같이 표현된다.

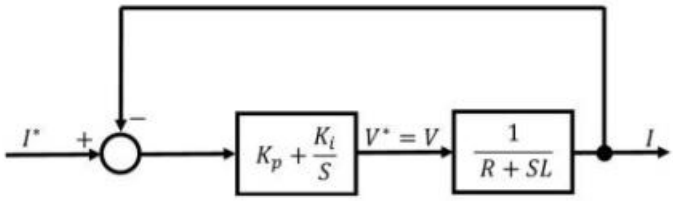


그림 3.1.2.13 비례 적분제어기를 적용한
전류제어기

그림 3.1.2.13에서 K_p는 비례 이득이고 K_i는 적분 이득이다. 이때 개루프 전달함수(Open Loop Transfer Function) G_{oc}는 식 3.1.2.33과 식 3.1.2.34와 같다.

$$G_{oc} = (K_p + \frac{K_i}{s})(\frac{1}{R+sL})$$

$$G_{oc} = \frac{K_p s + K_i}{s}\frac{1}{R}\frac{1}{1+s\frac{L}{R}}$$

$$G_{oc} = \frac{1+s\frac{K_p}{K_i}}{\frac{s}{K_i}}\frac{1}{R}\frac{1}{1+s\frac{L}{R}} \quad (3.1.2.33)$$

$$G_{oc} = (K_p + \frac{K_i}{s})(\frac{1}{R+sL})$$

$$G_{oc} = K_p\frac{s+\frac{K_i}{K_p}}{s}\frac{1}{L}\frac{1}{s+\frac{R}{L}} \quad (3.1.2.34)$$

식 3.1.2.33에서 극점-영점 상쇄 기법(Pole Zero Cancellation)을 사용하여 비례-적분 제어기의 영점이 LPM의 극점을 상쇄하도록 비례 이득 및 적분 이득을 선정하면 식 3.1.2.33 및 식 3.1.2.34의 개루프 전달함수는 식 3.1.2.35 및 식 3.1.2.36과 같다.

$$G_{oc} = \frac{1}{\frac{s}{K_i}}\frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{R}{K_i}s} \quad (3.1.2.35)$$

$$G_{oc} = \frac{1}{\frac{L}{K_p}s} \quad (3.1.2.36)$$

따라서 비례-적분 제어기의 비례 이득 및 적분 이득은 식 3.1.2.37 및 식 3.1.2.38과 같다.

$$K_p = L\omega_{cc} \tag{3.1.2.37}$$

$$K_i = R\omega_{cc} \tag{3.1.2.38}$$

다. 인버터

인버터(Inverter)는 직류전원으로부터 가변전압(Variable Voltage) 및 가변주파수(Variable Frequency)의 교류 전압을 공급하기 위한 전력변환장치를 말한다. LPM 시스템은 2개의 단상 풀 브릿지 인버터(Single Phase Full Bridge Inverter)를 사용하여 각 상권선에 전력을 공급한다. 사용되는 단상 풀 브릿지 인버터는 그림 3.1.2.14와 같고 4개의 스위칭 소자를 사용하여 구성된다.

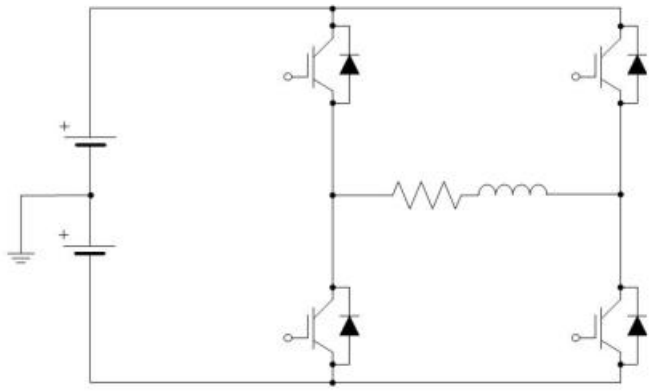


그림 3.1.2.14 단상 풀 브릿지 인버터

서로 직렬로 연결된 스위칭 소자인 Q_1 및 Q_2, Q_3 및 Q_4를 일반적으로 극(Pole), 암(Arm) 또는 레그(Leg)라고 칭하며 두 스위칭 소자는 서로 교번하며 온-오프 동작을 수행한다. 이것을 상보(Complementary) 동작이라고 칭하며 상보 동작으로 동작하지 않고 동일 레그의 스위치 2개가 동시에 온 동작 하였을 경우 단락(Short)이며 이 경우 단락된 레그를 통하여 대전류가 흐름으로 스위칭 소자의 파손을 야기한다. 또한 이상적인 경우 한 레그의 두 스위칭 소자는 소자의 온-오프 상태를 변경하는데 지연시간 없이 즉각적으로 상태변경이 이루어지지만 실제로는 상태를 변경하는데 일정 지연이 발생한다. 또한 이러한 지연은 스위칭 소자가 켜지는 시간(Turn-On Time)보다 꺼지는 시간(Turn-Off Time)보다 항상 길다. 따라서 스위칭 소자의 상태 변경이 이루어지는 순간 두 스위칭 소자가 모두 켜지는 단락이 발생한다. 따라서 이를 방지하기 위해 꺼지는 스위칭 소자가 확실히 꺼진 후 켜지는 스위치를 일정시간 후에 켜게 되는데 이 시간을 데드 타임(Dead Time)이라 한다. 이러한 데드 타임은 지령 전압을 인가하기 위하여 필요한 스위칭 소자가 켜진 상태로 유지되는 시간보다 더 적은 시간동안 켜진 상태를 유지하게 되며 이것은 원하는 지령 전압보다 데드타임만큼 손실이 발생한 전압이 인가되어 전압 손실로 나타난다.

동일 레그에서 직렬로 연결된 2개의 스위칭 소자 사이에서 스위칭 소자의 온-오프 동작에 따

른 교류 전압이 출력되며 이 출력되어진 교류 출력전압을 극전압(Terminal Voltage)이라 하며 식 3.1.2.39와 같다.

$$V_p = V_{dc}(S - \frac{1}{2}) \tag{3.1.2.39}$$

식 3.1.2.39에서 V_p는 극전압, V_{dc}는 직류전원단의 직류전압, S는 동일 레그의 직렬로 연결된 스위칭 소자 중에서 상단에 위치한 스위칭 소자가 켜진 경우 1, 하단에 위치한 스위칭 소자가 켜진 경우를 0으로 정의하며 두 스위치는 상보 동작한다.

이러한 극전압은 단상 풀 브릿지 인버터에 사용되어진 4개의 스위칭 소자에 상태에 따라 결정되며 같은 레그의 스위치가 동시에 켜지는 경우를 제외하면 표 3.1.2.2와 같이 총 4가지의 전압 출력이 가능하다.

표 3.1.2.2 스위칭 상태에 따른 출력 전압

스위칭 상태				출력 극전압		출력 상전압
Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	v_H	v_L	
1	0	0	1	$\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	V_{dc}
0	1	1	0	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$\frac{V_{dc}}{2}$	$-V_{dc}$
1	0	1	0	$\frac{V_{dc}}{2}$	$\frac{V_{dc}}{2}$	0
0	1	0	1	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	0

3.1.2.3. 모의 실험 결과

가. 모의실험 조건

실제 시험에 앞서 LPM의 모델링 및 설계된 전류제어기의 효용성을 고찰하고 제어 특성을 파악하기 위하여 모의실험을 실시하였다.

모의실험은 MathWorks社의 MATLAB Simulink를 사용하여 구현하였으며 추진제어기법으로 구형파 전류제어 방식을 사용한 경우의 모의실험의 실험조건은 표 3.1.2.3과 같다.

표 3.1.2.3 구형파 전류제어 방식 모의실험 실험조건

항목		수치	단위
코일	코일 가로길이	400	$[mm]$
	코일 세로길이	400	$[mm]$
	고정자 저항	1	$[m\Omega]$
	고정자 인덕턴스	400	$[\mu H]$
	회전자 저항	1	$[m\Omega]$
	회전자 인덕턴스	1	$[mH]$
	극 수	8	$[pole]$
모터 파라미터	무게	3	$[ton]$
	관성 모멘트	778.1467	$[kg-m^2]$
	마찰 계수	3.5	$[kg-m^2/\mathrm{sec}]$
	직류 전압	200	$[V]$
	정격 전류	2000	$[A]$
	극간 거리	0.4	$[m]$
	모터 반지름	0.5093	$[m]$

나. 모의실험 구성

구형파 전류제어 방식을 사용한 LPM 추진제어 시스템의 전체구성은 그림 3.1.2.15와 같으며 크게 선형기기인 LPM 시스템을 회전기기로 변환한 전동기부와 부하 전동기를 모사한 부하 전동기부, 제어 및 전동기로 전원을 인가를 담당하는 제어 및 전원인가부로 구성되어 있다.

모의실험 시 샘플시간(Sample Time)은 1$[ms]$로 100초간 진행하였고, 직류전원단은 200$[V]$의 고정값으로 설정하였으며 직류전원단의 전압변동 및 리플(Ripple)은 무시하였다. 또한 제어 시스템의 제어 주기는 실제 실험과 동일하게 10$[kHz]$로 설정하였다.

실제 LPM 시스템에서는 스위칭 소자로 IGBT를 사용함으로써 발생하는 온-드롭 성분으로 인한 손실분은 무시하였다. 또한 한 래그의 두 개 스위치가 동시에 통전되어 발생하는 단락을 방지하기 위한 데드타임으로 발생하는 손실분의 구현을 위하여 1$[us]$의 데드타임을 적용하였다. 또한 전류제어기에서 생성되어진 기준전압에 맞춰 생성되는 스위칭 신호에 따라 인버터의 스위칭 소자가 온-오프 동작을 실시하여 직류전원단 전압을 극전압의 형태로 전동기에 인가됨을 모사하였다. 따라서 전류제어기에서 출력되는 기준전압과 동일한 극전압 형태의 입력전압이 전동기에 인가된다.

그림 3.1.2.16은 전동기부의 구성을 나타낸다. 전동기부는 또한 식 3.1.2.9의 LPM의 전압방정식에 따라 극전압 형태로 전동기에 인가된 상전압을 상전류로 변환하는 전기 모델, 현재 모사되고 있는 전동기의 각도 정보 및 기계각속도 정보를 바탕으로 역기전력을 생성하는 역기전력

생성 모델, 식 3.1.2.16의 LPM의 토크방정식에 따라 상전류, 각상에 유기되는 역기전력 및 기계각속도 정보로 현재 발생 토크로 변환하는 토크 모델, 식 3.1.2.21의 기계시스템의 운동방정식에 따라 발생 토크를 기계각속도로 변환하는 기계 모델 및 현재 기계각속도 정보 및 초기각 정보를 통해 현재 각 정보로 변환하는 위치센서 모델로 구성된다. 각 정보 변환 시 실제 시스템에서는 A상 및 B상 홀센서에서 출력된 홀 신호를 가공하여 각 정보를 추출하며 홀센서의 장착 오차 및 샘플링에 따른 오차가 발생하지만 모의실험에서는 이 두 가지 경우의 오차를 무시하고 현재 각 정보가 정확하다고 가정하였다. 또한 역기전력 생성 시 발생하는 역기전력의 파형은 180도 반주기 기준으로 90도의 평탄한 구간 및 평탄한 구간 전후로 45도의 기울기를 가지고 변화하는 구간을 갖는 이상적인 근사 사다리꼴 형태를 가정하였다.

그림 3.1.2.17은 제어부의 구성을 나타낸다. 제어부는 크게 두 부분으로 구성된다. 스텝 계산기에서는 현재 LPM의 각 정보를 바탕으로 앞서 설명한 전압 및 전류 인가 정보인 스텝으로 가공한다. 전류제어기에서는 계산되어진 스텝 정보 및 사용자가 지정한 전류 지령을 통해 현재 LPM의 A상 및 B상의 전류를 제어하며 앞서 설계한 P-I제어기를 사용하여 각 상의 전류를 제어한다. P-I 제어기는 LPM의 관성이 충분히 커서 제어 주기 당 역기전력의 변화가 거의 없다고 가정하며 따라서 역기전력 전향보상이 불필요하다. 마지막으로 입력 기준전압이 손실 없이 전동기에 인가됨을 가정하였으며 인버터는 생략하여 모의실험을 진행하였다. 제어부의 제어주기는 실제 시스템과 동일하게 100[μs] 당 1회 연산으로 제어된다.

부하 전동기부에서는 부하전동기를 모사하여 LPM을 일정 속도로 운전이 가능하며 사용자의 선택에 따라 무부하 운전 및 사용자가 지정한 속도로 일정하게 운행하는 LPM의 모의실험이 가능하다.

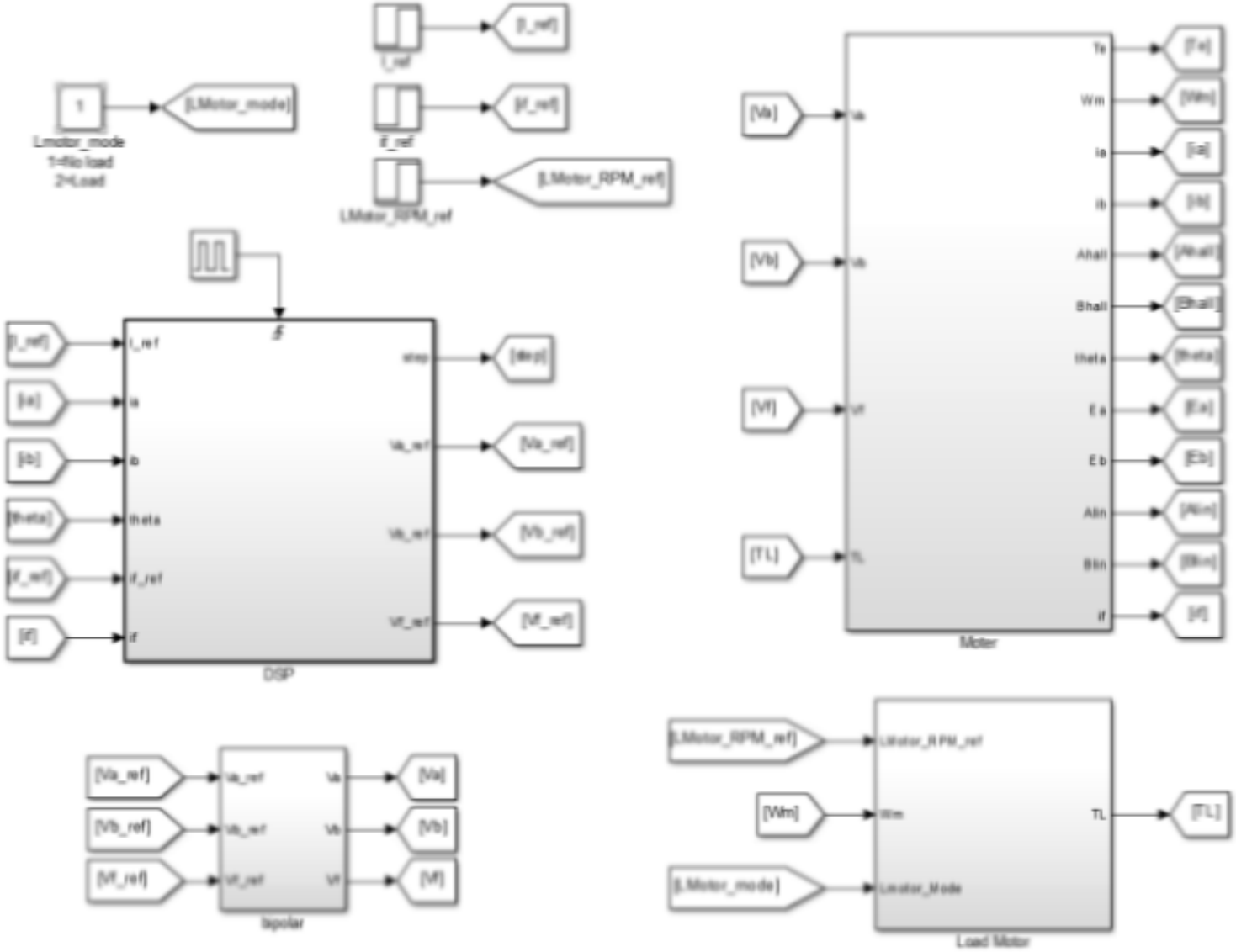


그림 3.1.2.15 구형파 전류제어 방식을 사용한 LPM 추진제어 시스템의 전체구성도

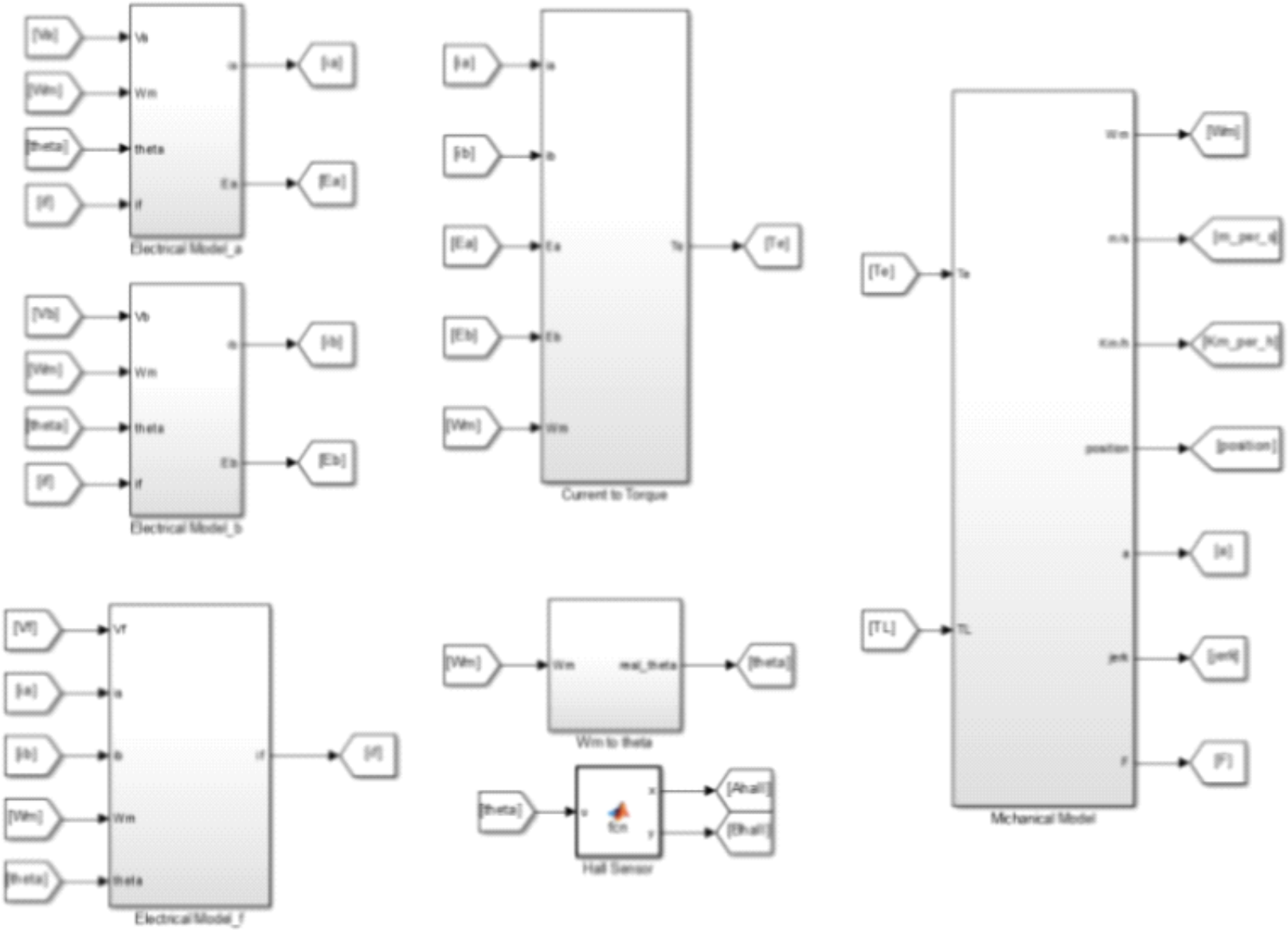


그림 3.1.2.16 구형파 전류제어 방식을 사용한 LPM 추진제어 시스템의 전동기부

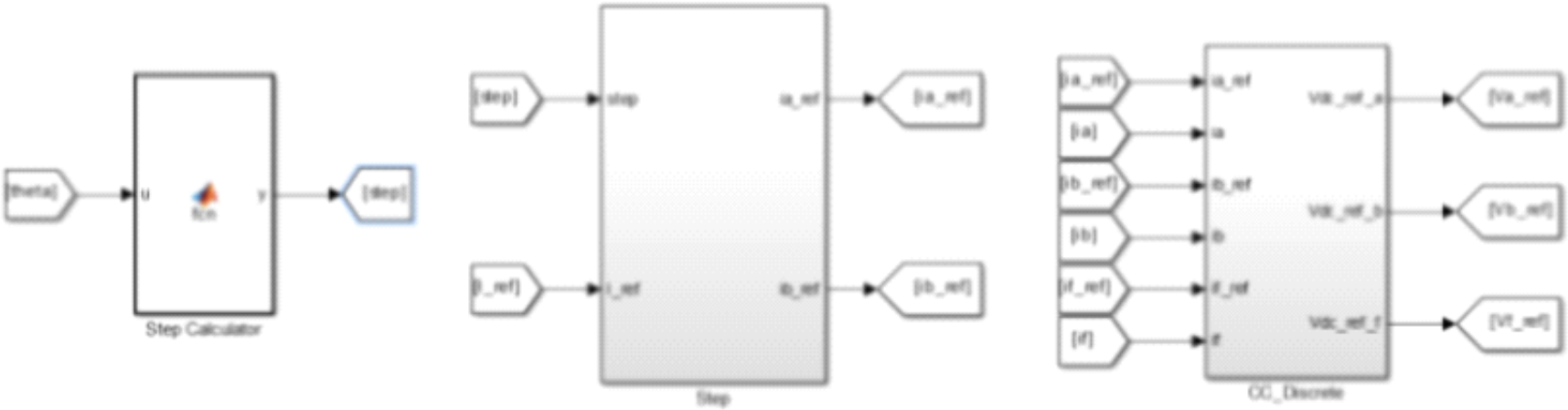


그림 3.1.2.17 구형파 전류제어 방식을 사용한 LPM 추진제어 시스템의 제어 및 전원인가부

그림 3.1.2.18은 생성되어진 역기전력 파형을 나타내며 이상적인 근사 사다리꼴 형태의 역기전력을 생성하였다. 전동기의 속도의 증감에 동기화되어 증감되며 종단속도인 약 77.2[rad/s]에서 평균 약 99.7[V]이다.

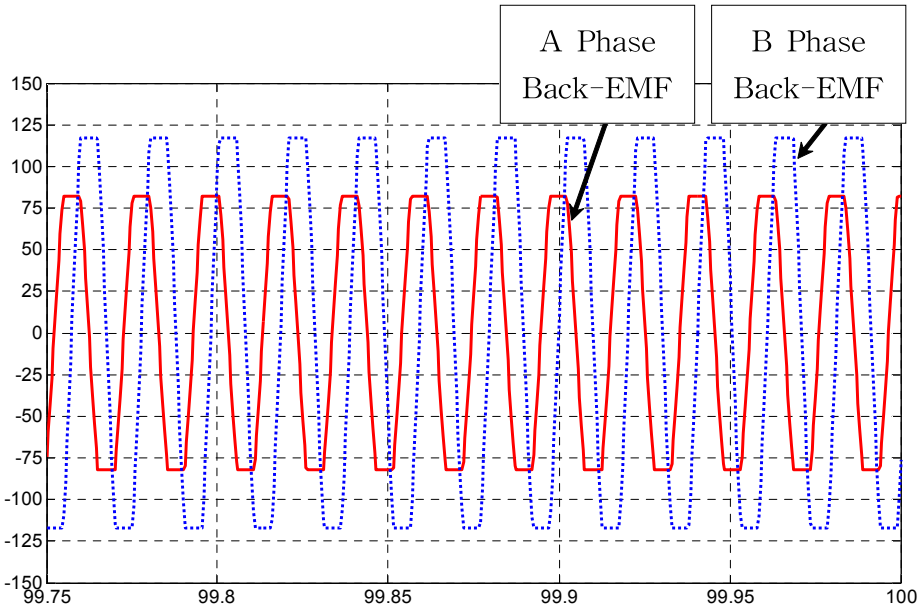


그림 3.1.2.18 역기전력 (구형파 전류제어 방식)

그림 3.1.2.19는 전동기기의 회전으로 변화하는 각 위치에 따라 스텝 계산기에서 연산되어 출력되어진 스텝 값이며 총 4단계로 세분화된 스텝이 정상적으로 연산되어 출력된다.

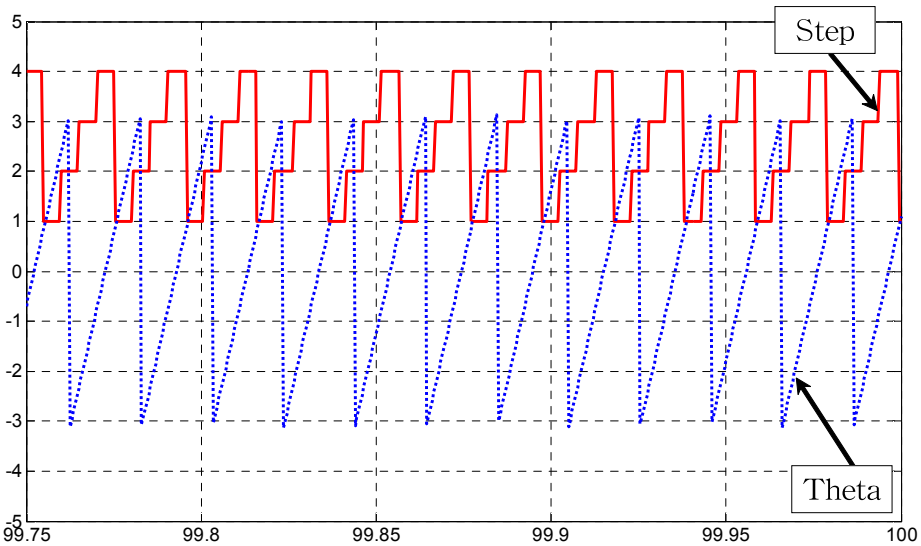


그림 3.1.2.19 전동기 각 위치에 따른 스텝 연산 결과 (구형파 전류제어 방식)

그림 3.1.2.20은 연산된 스텝에 따라 그에 해당하는 지령 전류인 2000[A]를 A상 및 B상 권선에 교번하며 인가됨을 확인할 수 있다.

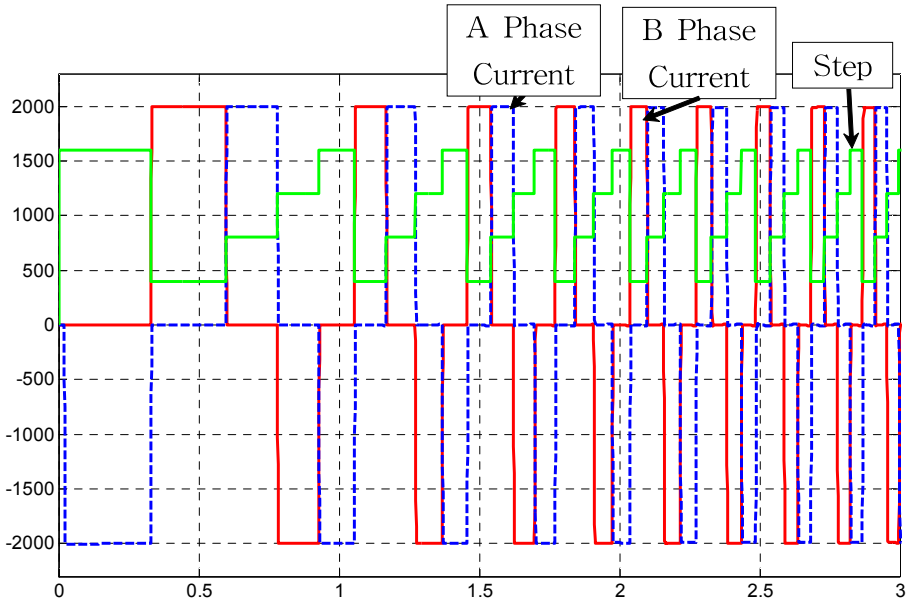
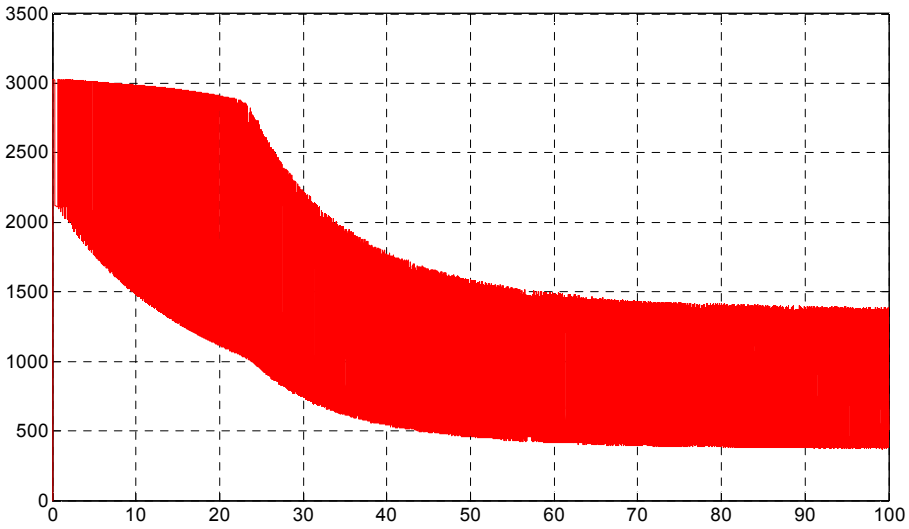
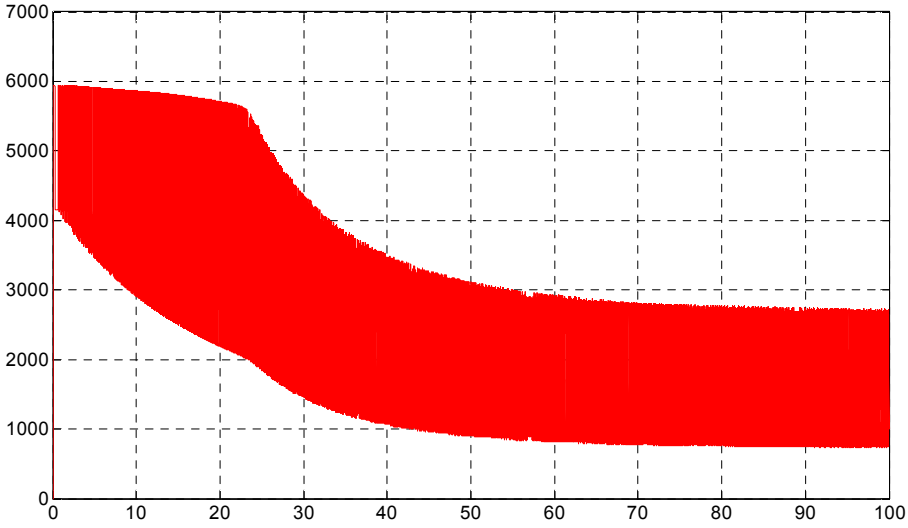


그림 3.1.2.20 스텝에 따른 A상 및 B상 권선의 전류 인가 (구형파 전류제어 방식)

그림 3.1.2.21은 스텝에 따라 인가된 상전류로 인하여 발생되는 토크 및 추력을 나타내며 회전기기로 변환된 LPM에서 발생한 토크 성분이 변환식에 따라 추력으로 변환되며 정격 전류인 2000[A] 인가 시 발생 토크는 평균 약 2552[Nm]이고 추력으로 환산 시 약 5048[N]이다.



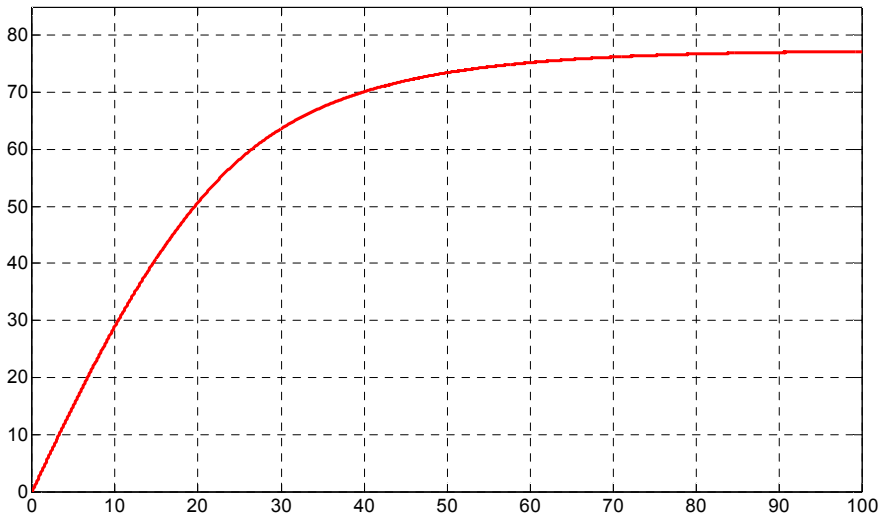
(a) 발생 토크



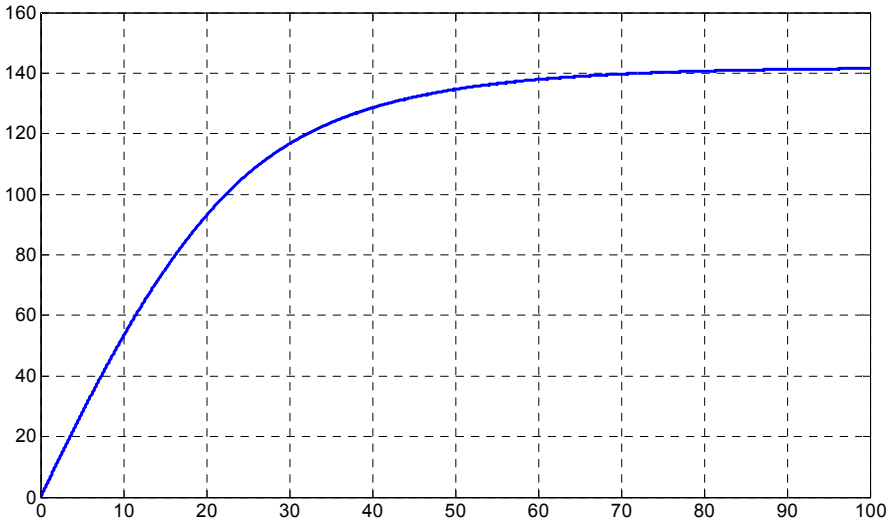
(b) 발생 추력

그림 3.1.2.21 상전류 인가에 따른 발생 토크 및 추력 (구형파 전류제어 방식)

그림 3.1.2.22의 (a)은 발생되어진 토크로 인하여 전동기의 기계각속도가 증가하며 인가되어지는 토크와 부하 토크가 평형을 이루는 정상상태에 도달하며 정격전류를 인가하였을 경우에서 발생하는 토크로 인한 기계각속도의 종단속도는 약 77.2[rad/s]이다. 이때 회전기기 형태의 값인 기계각속도를 선형기기의 값인 시속[km/h]로 변환식을 사용하여 환산하면 그림 3.1.2.22의 (b)와 같으며 종단속도는 약 141.5[km/h]이다. 이때 가속도는 그림 3.1.2.23과 같으며 약 1.88[m/s^2]이다.



(a) 기계각속도



(b) 시속

그림 3.1.2.22 발생 토크에 따른 기계각속도 및 시속 (구형파 전류제어 방식)

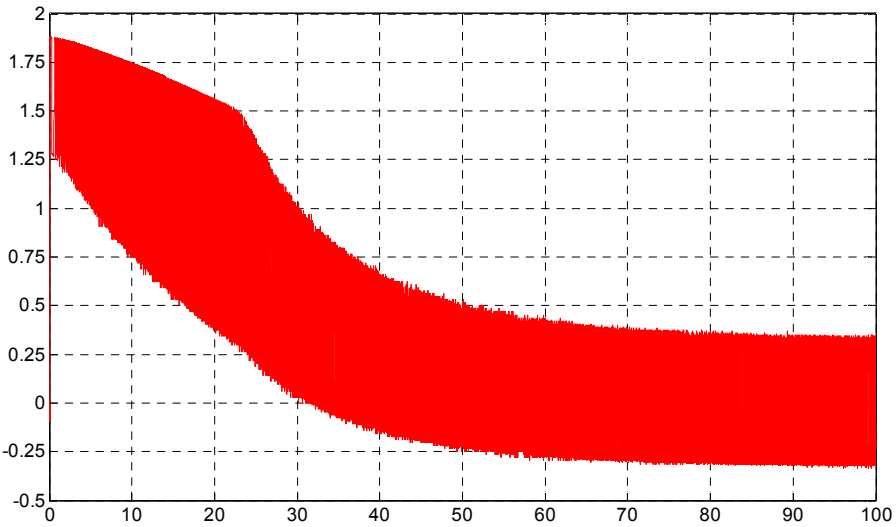
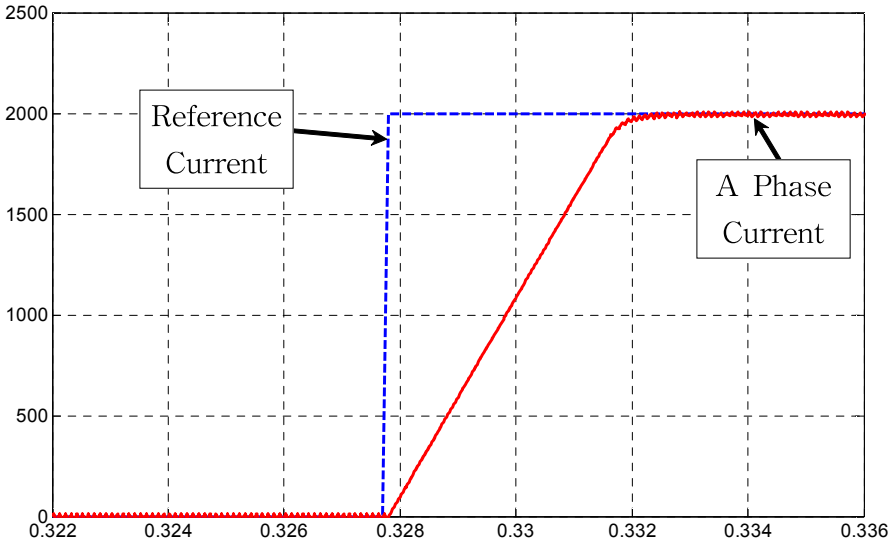
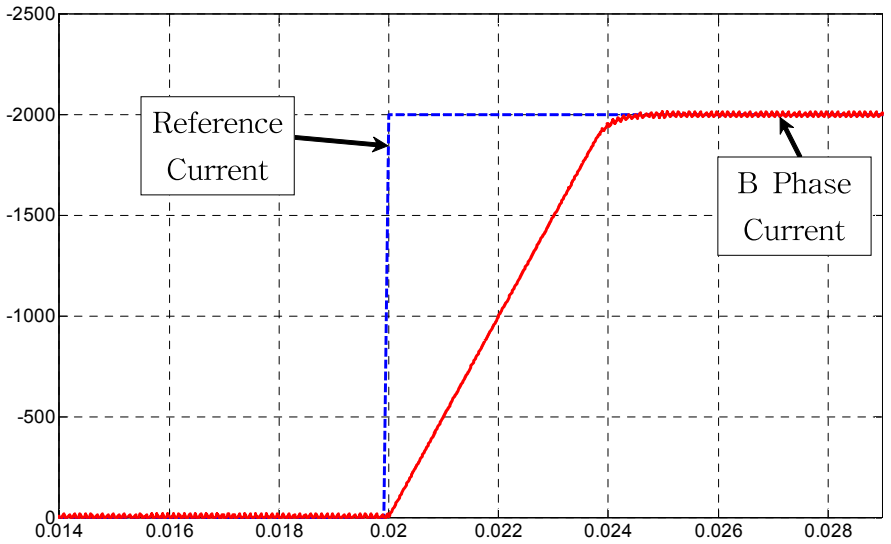


그림 3.1.2.23 정격전류 인가 시 가속도 (구형파 전류제어 방식)

그림 3.1.2.24는 전류 제어기에 스텝(Step) 형태의 지형 전류를 입력하였을 경우의 스텝응답을 나타내며 A상 및 B상 전류제어기에 지령 전류로 정격전류인 2000[A]의 지령을 스텝 입력하였을 경우 4[ms] 이내로 지령 전류를 추종하는 것을 확인하였다.



(a) A상 전류제어기 스텝응답



(b) B상 전류제어기 스텝응답

그림 3.1.2.24 전류제어기 스텝 응답 (구형파 전류제어 방식)

3.2. 축소형 LPM 추진시스템

3.2.1. 축소형 LPM 추진시스템 개발

3.2.1.1. 인버터 디자인

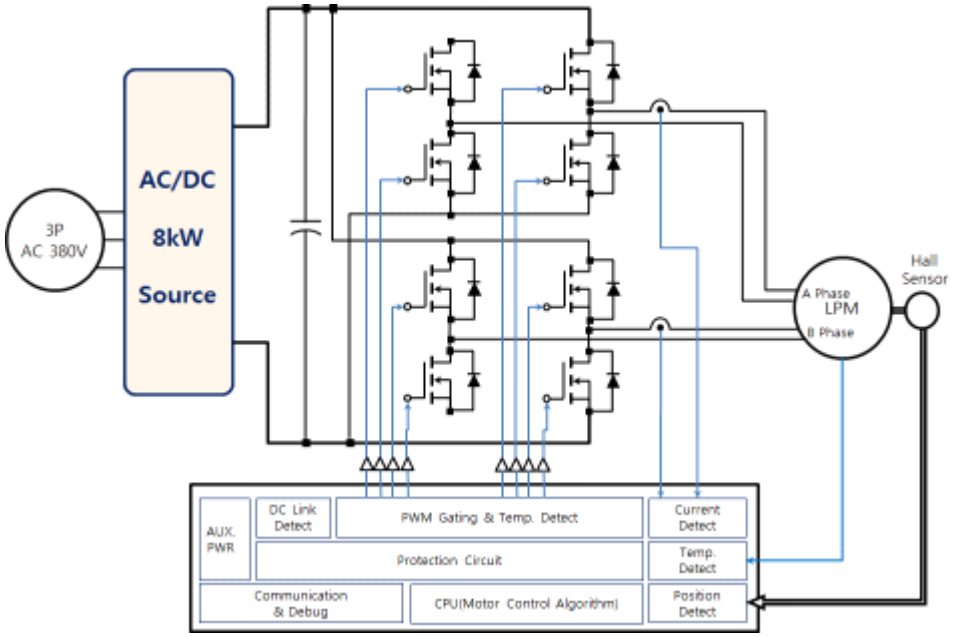


그림 3.2.1.1 시스템 구성도

인버터는 전기적인 특성과 구조적인 형상을 고려하여 게이트보드(Gate Board), CPU보드(Control Board), 직류링크 커패시터(DC Link Capacitor), MOSFET모듈, 센서를 비롯한 Bus-Bar 등으로 구성하였다. 제품의 외함은 방열을 위하여 공냉구조를 적용하고 단품들의 배치를 고려하여 설계/제작하였다. 인버터는 8㎾의 출력을 낼 수 있도록 각 부품의 정격을 설계/제작하였다.

인버터의 개발 주요 성능은 다음의 표 3.2.1.1과 같다.

표 3.2.1.1 인버터 주요 성능

구 분	항 목	단위	사 양
시스템 전압	동작 전압 범위	V	16~25
출력	최대출력	㎾	8
	정격전류	Arms	150A
	최대전류	Arms	300A

	스위칭 주파수	㎑	10
	역기전력제한	V	100V
냉각	방식	-	Air Cooling
	Coolant 입력 최고온도	℃	70
환경	동작 온도 범위	℃	-10 to +50
	저장 온도 범위	℃	-20 to +70
	온도센서 장착위치	-	1(MOSFET모듈)
	온도센서 오차율	%	5↓
전기적 사양	CPU보드 동작전압 범위	V	12V ± 10%
	외부 통신 방식	-	CAN
	통신채널수	-	1
	통신속도	kbps	500
	속도, 위치 검출용 센서	-	Hall sensor
계측 정밀도	DC Link 전압측정 오차	%	5↓
	모터 3상 전류측정 오차	%	3↓
	모터 속도측정 오차	%	3↓
	절연특성	Ω	1[MΩ]@500V, 1min
제어 방식	인버터 형식	-	전압형 인버터
	제어기 방식	-	토크제어

인버터 내부에 모든 구성요소가 내장되어 하나의 제품이 되는 기본단위로서 각 단품의 기계적, 전기적, 기능적 기능의 조건을 모두 만족하여야 한다. 우선 방수/진동 등급은 IP50 등급을 만족하도록 설계하였으며, 메탈구조의 커넥터가 제품의 측면에 돌출/부착되어 외부 전장품과의 연결이 될 수 있다. 열유동해석을 통하여 효율적인 발열 설계구조로 설계, 제작되어 MOSFET 직류링크 커패시터에 대한 열적 스트레스를 줄일 수 있다. 알루미늄형상 차체 발열을 통한 열확산은 매우 우수한 알루미늄 케이스를 통해서 이루어진다.

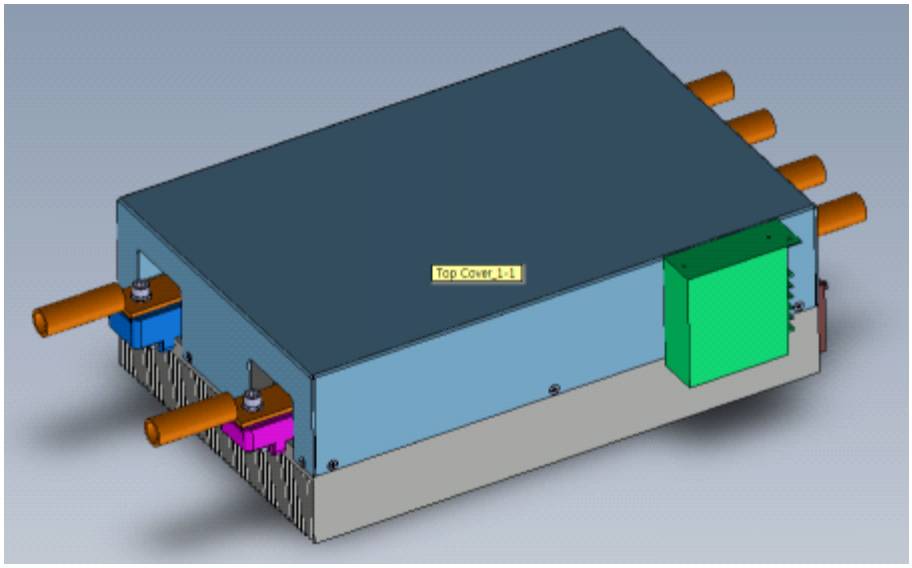


그림 3.2.1.2 인버터 개발 제품 3D형상

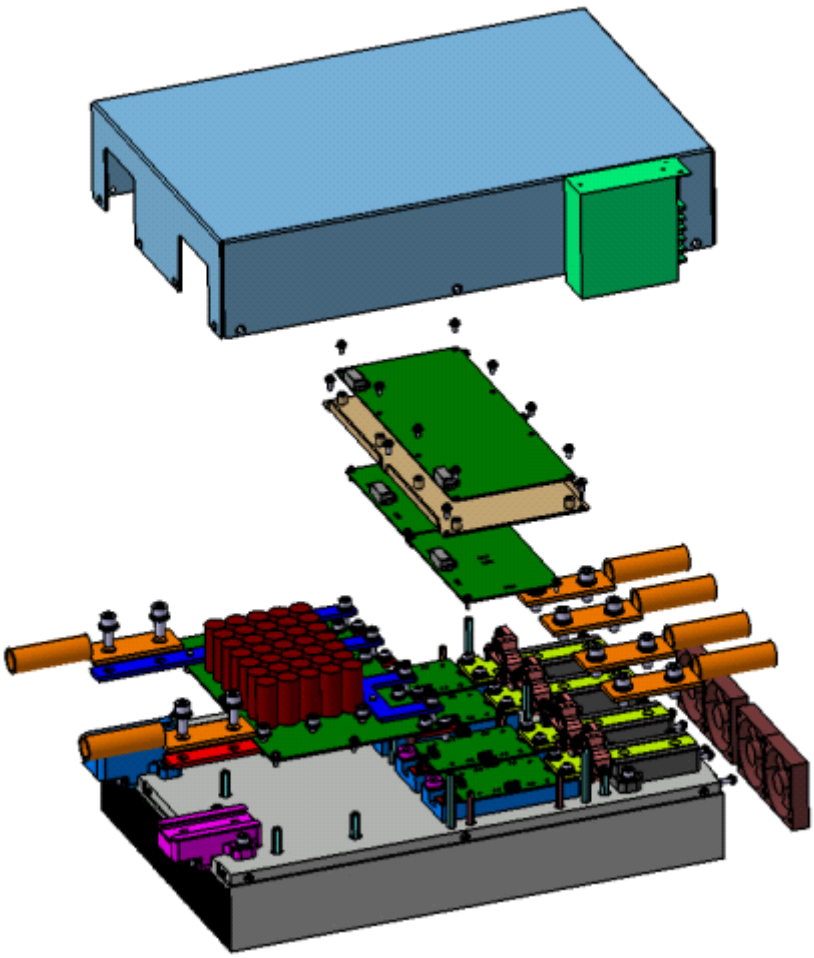


그림 3.2.1.3 주요기구부품 종류 및 형상

가. 스위칭 소자 선정

시스템의 주요 성능 중 가장 중요한 인버터 구성요소는 스위칭 소자이다. 스위칭 소자로는 150V 500A MOSFET 모듈을 사용하였다.

- 2 Module MOSFET
- LS산전 Company
- Dimension (W × D × H) [mm] : 122 × 45 × 20
- Contact Cooling



그림 3.2.1.4 MOSFET
모듈 실제 형상

표 3.2.1.2 LMH500M156 주요 사양

Index	Symbol	Unit	Value	Remark
Drain-Source Voltage	V_{DSS}	V	150	@ T_{vj}= 25℃
Drain Current	I_D	A	500	
Drain-Source On Resistance	R_{DON}	mΩ	1.8	
Gate-Source Voltage	V_{GSS}	V	±20	

나. DC-Link Capacitor (직류링크커패시터의 용량 산정)

인버터의 입력단에 전해 커패시터로 구성하여 직류단에 리플전류를 감소시킬 수 있게 하였다. 출력 리플전류의 실효값 I_{rms} = 150A, ΔV_{rms} = 5V, LPM 모터의 속도에 따른 동기각속도 $\omega_s = 2\times\pi\times f_s$ = $2\pi\times120$로 설정할 경우, 직류링크커패시터(DC-Link Capacitor)의 용량은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$C = \frac{I_{rms}}{2\pi f_s \times \Delta V_{rms}} = \frac{150}{2\pi\times120\times5} = 0.039788\ \mathrm{F}$$

따라서 커패시터의 용량은 40,000㎌ 이상 선정하면 주어진 조건을 만족한다. 본 과제에서는 전류나 전압의 마진을 두기 위해 35V/1,200㎌×35 = 42,000㎌의 직류링크 커패시터 보드를 제작하였다.

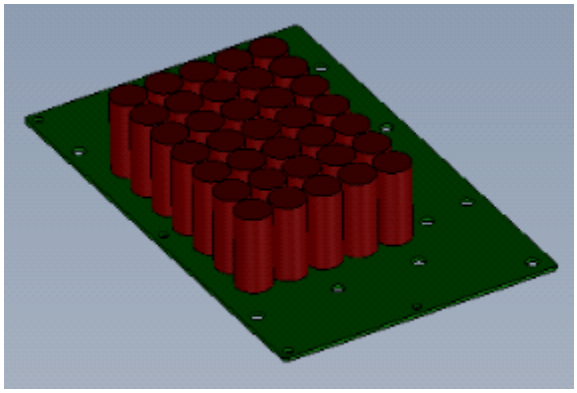


그림 3.2.1.5 직류링크 커패시터 보드

다. 컨넥터

LPM 구동용 인버터의 입력단인 전원 소스와 출력단인 LPM 코일을 연결시키기 위해 케이블이 필요하여 이를 접속시키기 위해 커넥터가 필요하다. 정격 150A의 전류를 흘리고 굵은 Litz 와이어 코일을 연결하기 위하여 Bus-Bar를 직접 컨넥터로 사용할 수 있는 구조로 만들었다.

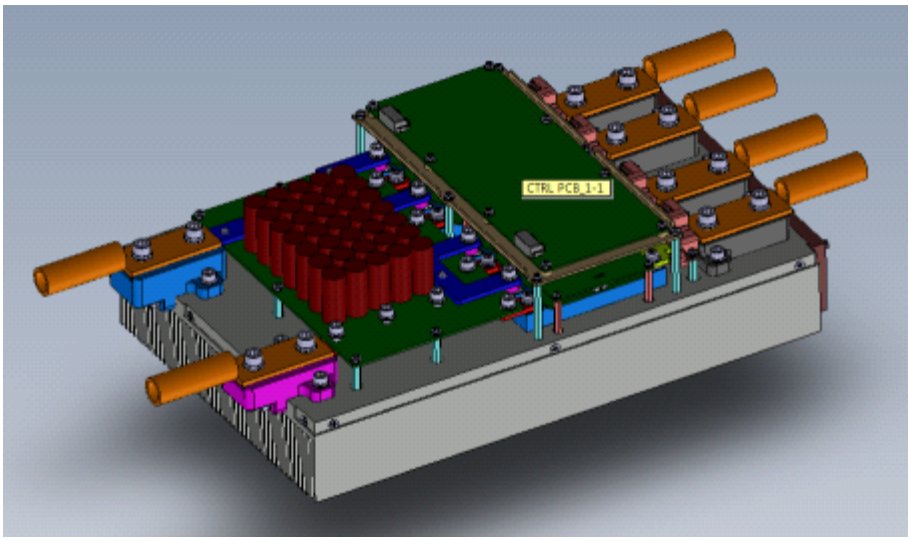


그림 3.2.1.6 컨넥터 용도의 Bus-Bar 처리 방법

라. 냉각

주열원인 MOSFET 모듈에서 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 알루미늄 방열판용 압출재에 FAN을 동작 시켰다.

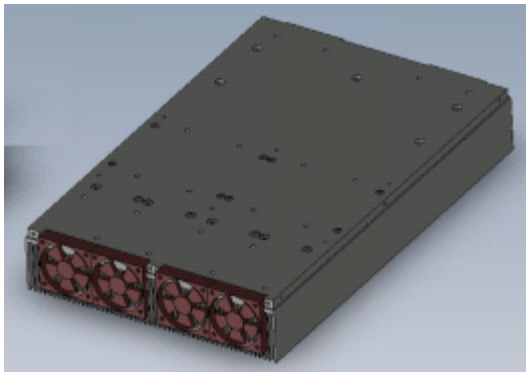


그림 3.2.1.7 강제 공랭식 방열 구조

3.2.1.2. CPU보드

인버터를 구성하는 요소 중 핵심적인 역할을 하는 CPU보드는 제어 알고리즘 프로그램을 탑재하고 있다. 주요 기능으로 스위칭 소자인 MOSFET 모듈을 구동하기 위한 PWM 신호출력부를 비롯하여 2채널의 CAN과 디버깅용 JTAG, 2상전류측정, 직류링크커패시터 전압측정, 스위칭 소자 온도를 측정하는 A/D 변환기능 등의 기능을 가진다. 또한 인버터의 제품을 보호하기 위해 하드웨어적으로 전압/전류 보호회로를 내장하고 있다.

CPU보드의 주요 입출력 신호는 시그널 커넥터를 통하여 게이트 보드를 거쳐 구동되며, 전압측정회로 및 전류센서의 신호를 입력받아 A/D 변환기를 통하여 신호를 처리한다.

가. 블록도

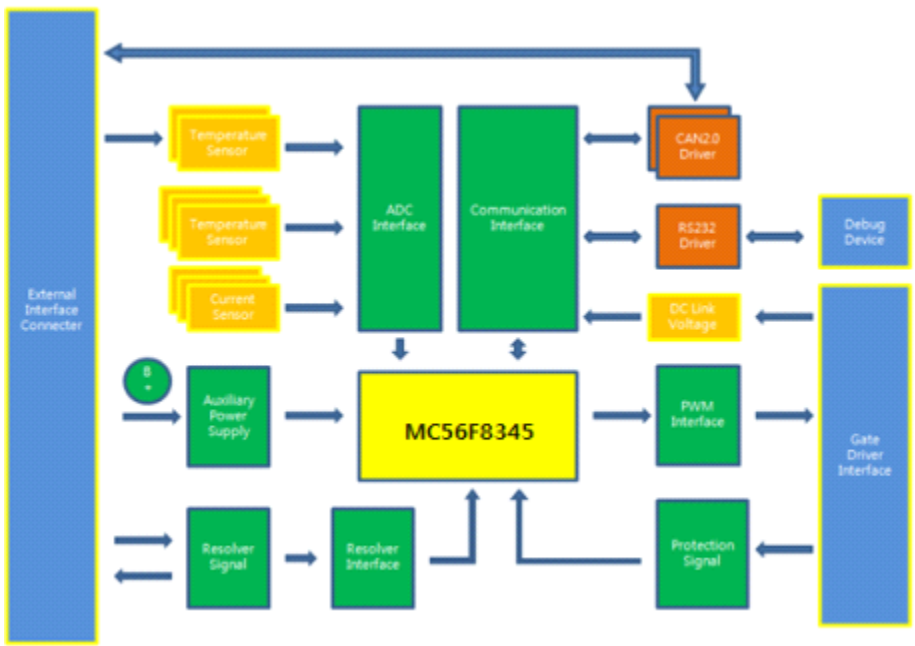


그림 3.2.1.8 CPU보드 구성도

나. 형상

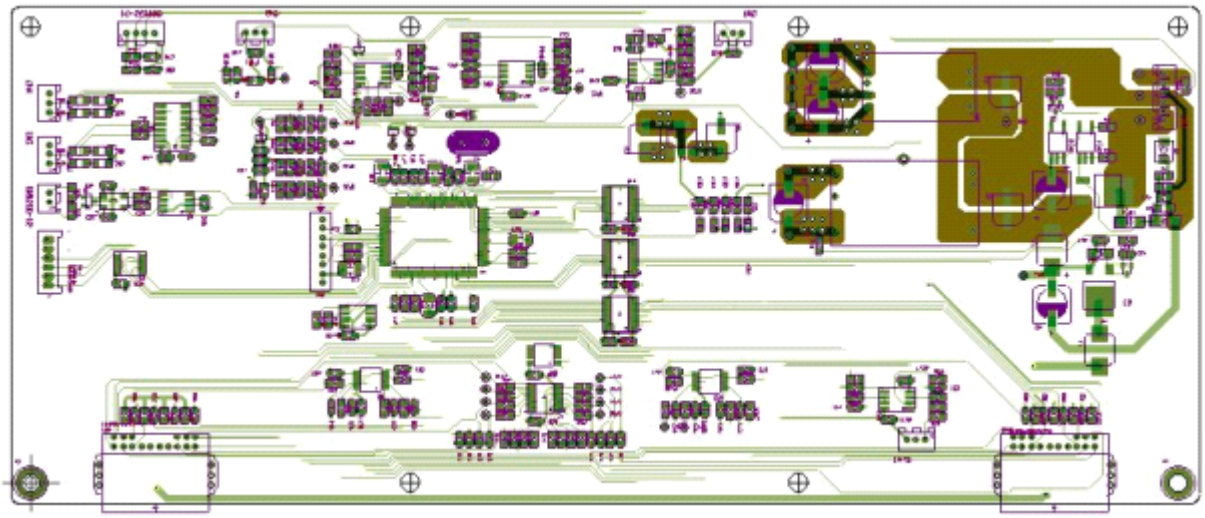


그림 3.2.1.9 CPU보드 Top면

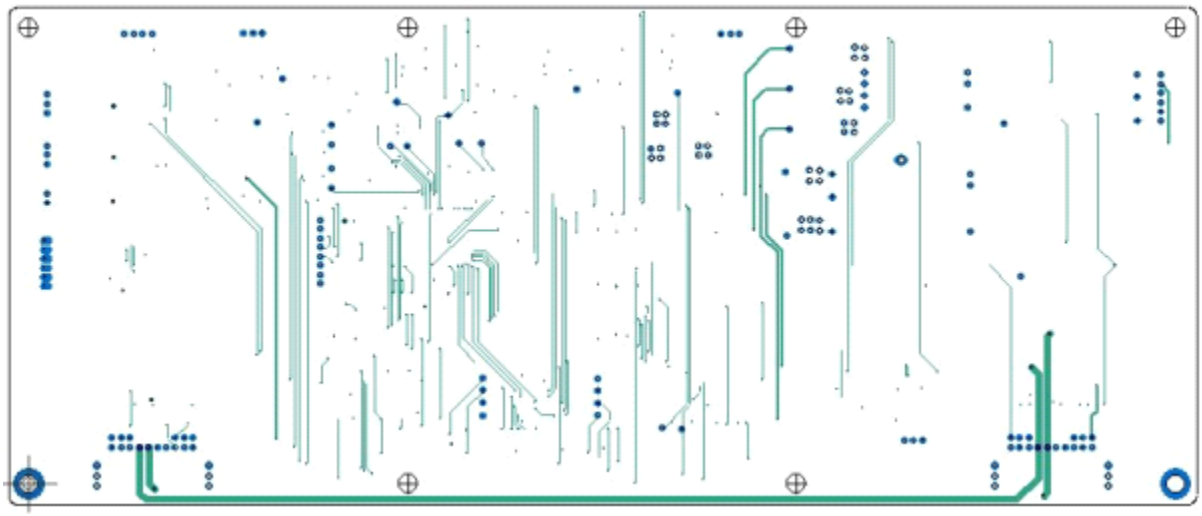


그림 3.2.1.10 CPU보드 Bottom면

다. 주요요소

- 16 bit급 정수연산형 프로세서 사용
- PWM 출력부
- Mosfet 온도 측정부
- 직류링크커패시터 전압 측정부
- 전류센서 입력부

- 보호회로부
- eCAN 회로부
- JTAG을 통한 디버거

라. CPU

LPM 인버터의 CPU는 프리스케일사의 “MC56F8345”을 적용하였다. 16비트급 CPU로 +3.3V 전원을 사용하고 일반적인 MCU에 비해 전원 노이즈 및 계측에 강인성을 더하였다. MC56F8345의 주요 기능은 다음과 같다.

- High-performance core
  - Efficient 16-bit 56800E family controller engine with dual Harvard architecture
  - Up to 60 Million Instructions Per Second (MIPS) at 60MHz core frequency
  - Single-cycle 16 × 16-bit parallel Multiplier-Accumulator (MAC)
  - Four 36-bit accumulators, including extension bits
  - Arithmetic and logic multi-bit shifter
  - Parallel instruction set with unique DSP addressing modes
  - Hardware DO and REP loops
  - Three internal address buses
  - Four internal data buses
  - Instruction set supports both DSP and controller functions
  - Controller-style addressing modes and instructions for compact code
  - Efficient C compiler and local variable support
  - Software subroutine and interrupt stack with depth limited only by memory
  - JTAG/EOnCE debug programming interface
- Memory available
  - Harvard architecture permits as many as three simultaneous accesses to program and data memory
  - Flash security protection feature
  - On-chip memory, including a low-cost, high-volume Flash solution

    256KB of Program Flash

    4KB of Program RAM

8KB of Data Flash

16KB of Data RAM

16KB of Boot Flash

- EEPROM emulation capability

- Energy Information
  - Fabricated in high-density CMOS with 5V-tolerant, TTL-compatible digital inputs
  - On-board 3.3V down to 2.6V voltage regulator for powering internal logic and memories; can be disabled
  - On-chip regulators for digital and analog circuitry to lower cost and reduce noise
  - Wait and Stop modes available
  - ADC smart power management
  - Each peripheral can be individually disabled to save power
- Pulse Width Modulator module:
  - two Pulse Width Modulator modules, each with six PWM outputs, three Current Sense inputs, and four Fault inputs; fault-tolerant design with dead time insertion;
  - supports both center-aligned and edge-aligned modes
- Four 12-bit, Analog-to-Digital Converters (ADCs), which support four simultaneous conversions with quad, 4-pin multiplexed inputs; ADC and PWM modules can be synchronized through Timer C, channels 2 and 3
- Quadrature Decoder:
  - Two four-input Quadrature Decoders or two additional Quad Timers
- Temperature Sensor can be connected, on the board, to any of the ADC inputs to monitor the on-chip temperature
- Quad Timer:
  - Four dedicated general-purpose Quad Timers totaling six dedicated pins: Timer C with two pins and Timer D with four pins
- Optional On-Chip Regulator
- FlexCAN (CAN Version 2.0 B-compliant) module with 2-pin port for transmit and receive
- Two Serial Communication Interfaces (SCIs), each with two pins (or four additional GPIO lines)
- Up to two Serial Peripheral Interfaces (SPIs), both with configurable 4-pin port (or

eight additional GPIO lines); SPI 1 can also be used as Quadrature Decoder 1 or Quad Timer B

- Computer Operating Properly (COP)/Watchdog timer
- Two dedicated external interrupt pins
- 49 General Purpose I/O (GPIO) pins; 28 pins dedicated to GPIO
- External reset input pin for hardware reset
- External reset output pin for system reset
- Integrated low-voltage interrupt module
- JTAG/Enhanced On-Chip Emulation (OnCE) for unobtrusive, processor speed-independent, real-time debugging
- Software-programmable, Phase Lock Loop-based frequency synthesizer for the core clock

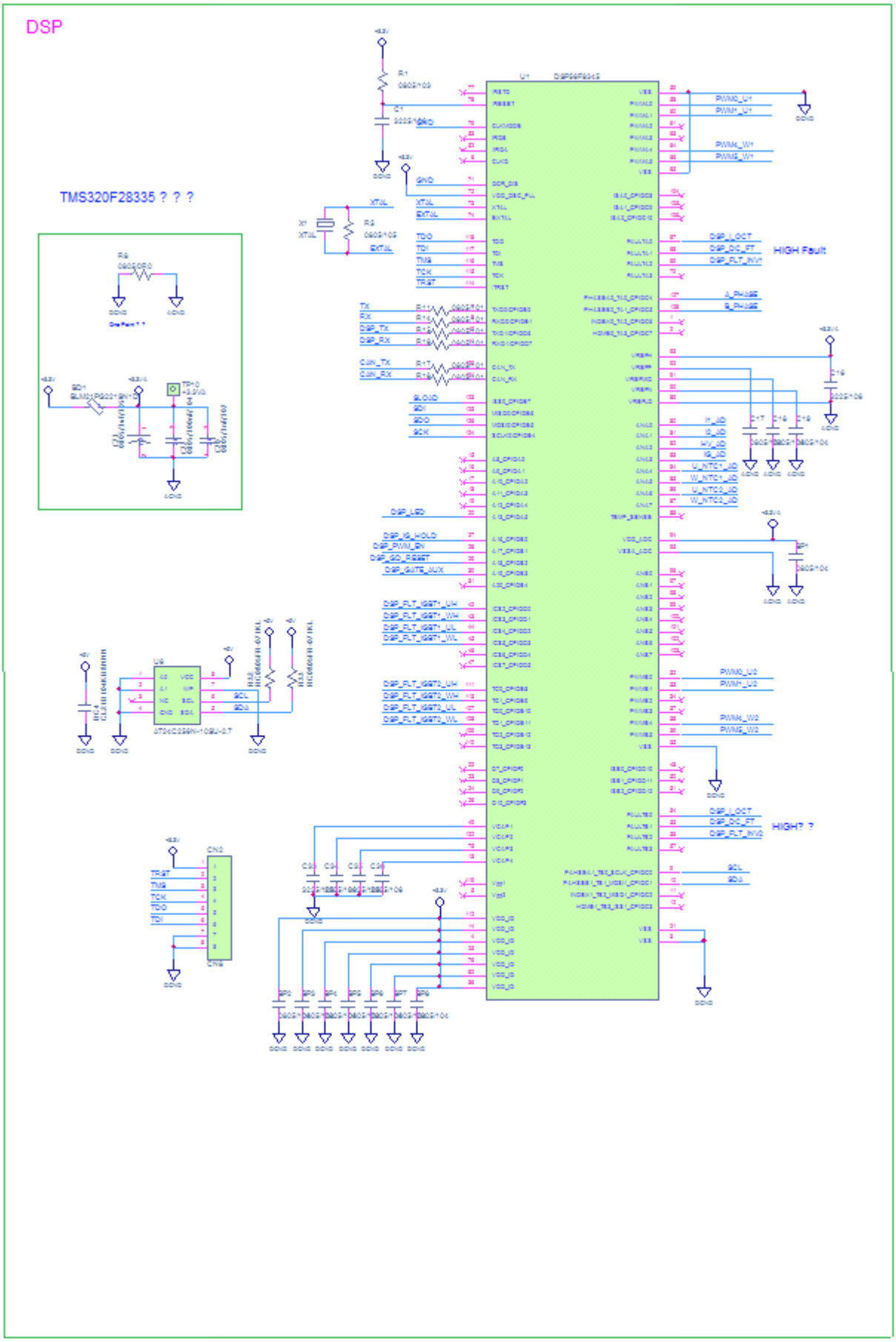


그림 3.2.1.11 CPU회로와 I/O 신호

마. 보조전원 및 게이트드라이브 구동전원

보조전원 회로는 12V을 입력받아 다음의 표 3.2.1.3과 같은 용도로 전원을 생성시킨다. 관련 회로도면은 그림 3.2.1.12와 같다.

표 3.2.1.3 보조전원의 출력 전원과 그 역할

전원		역할
전원 NAME	전원 GND명	
VDD5V	D	디지털 전원, TTL IC, CPU GPIO
VDDA5V	A	아날로그 전원, OP-AMP, CPU의 ADC
VDD3V3	D	디지털 전원, CPU Power Source
VDDA3V3	A	아날로그 전원, CPU의 ADC 센싱의 기준 전원

바. 통신

통신 회로는 그림 3.2.1.13과 같이 디버깅 및 모니터링을 위한 RS232C 통신 회로와 타장비와의 통신을 위한 CAN 통신 회로로 구성되어 있다.

사. 전류측정

스위칭 소자 Mosfet의 허용전류 500A급 조금 높은 전류용량까지 측정할 수 있고, 전류측정 환경을 고려하여 600A 전류 측정급 센서인 'HAH1DR 600-S LEM'를 사용하였다. 이 전류센서는 표 3.2.1.4에 나타난 것과 같이 우수한 정확성, 선형성, 온도변화에 대한 아주 작은 오프셋과 작은 민감도, 넓은 범위의 주파수 특성을 가진다.

전류센서는 전류의 크기에 선형적으로 비례한 전압을 출력시킨다. 이 전압으로 필터회로를 거쳐 CPU 내의 ADC(Analog to Digital Converter)에서 값을 판독하여 전류를 계산하게 된다. 전류 검출 회로는 그림 3.2.1.14와 같이 구성되어 있다.

- 2′nd order 중 워터퍼스 Low Pass Filter를 사용
- 정밀한 연산을 위해 Rail to Rail형 OP-AMP를 사용

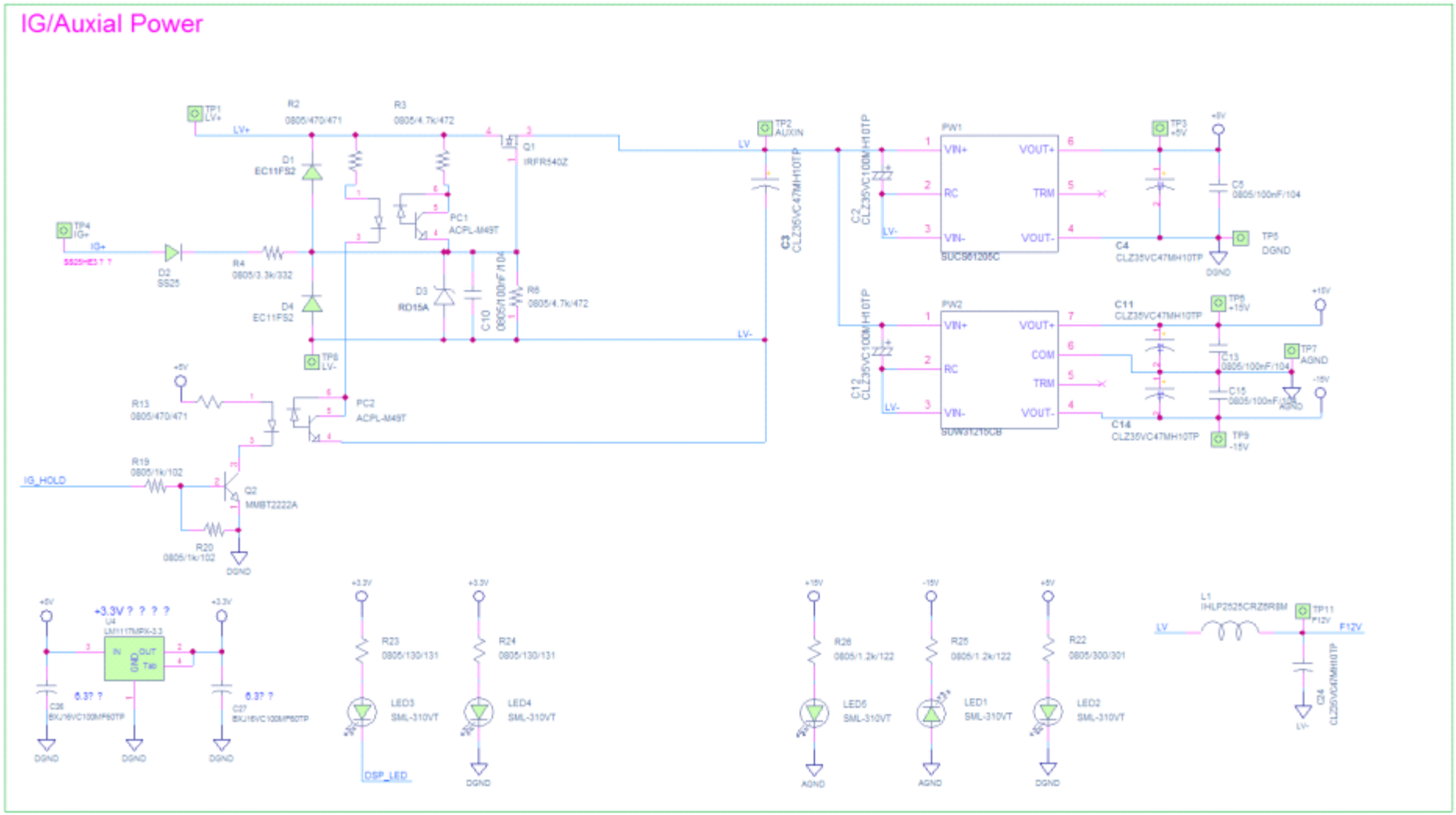


그림 3.2.1.12 보조전원 생성회로

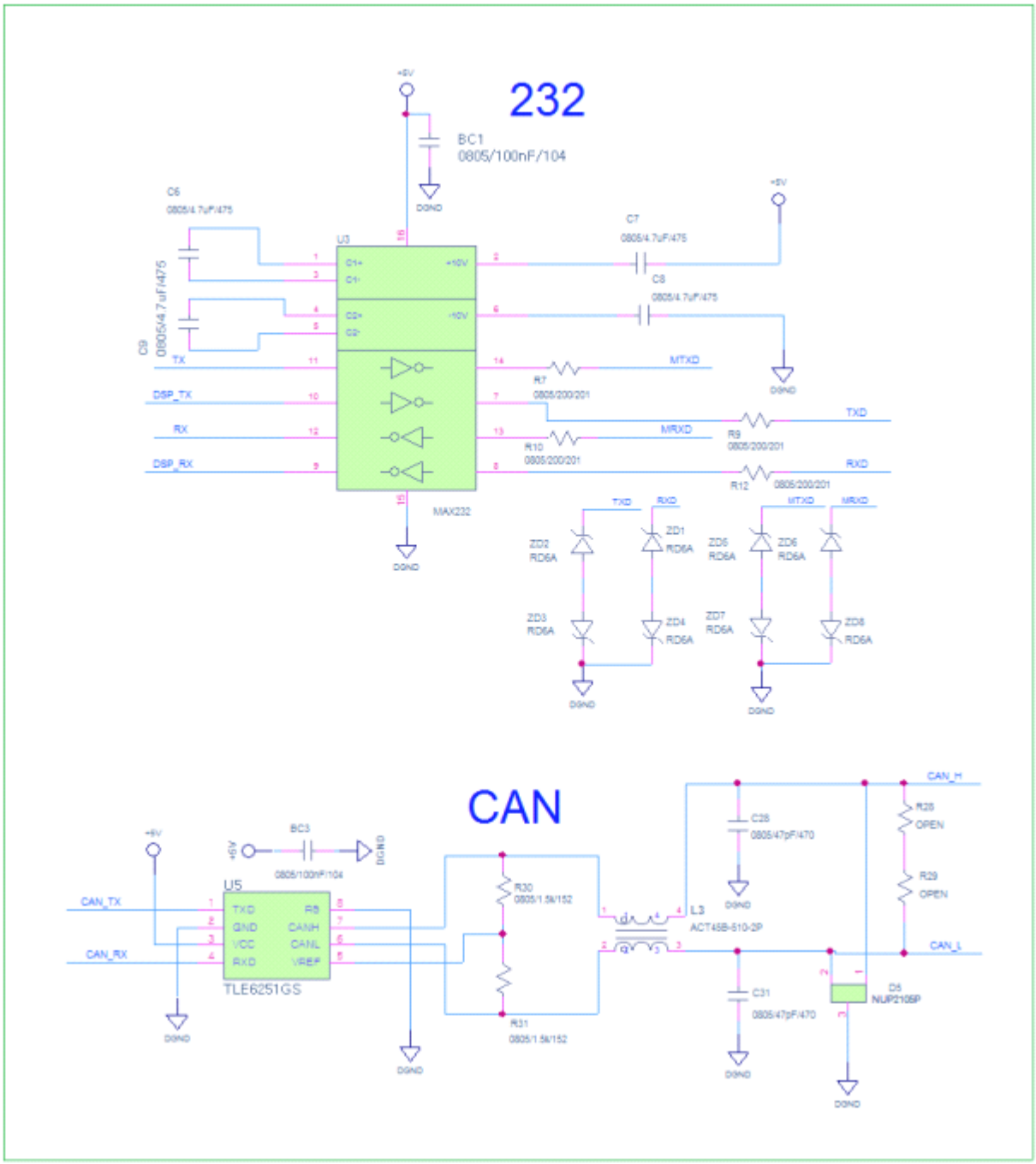


그림 3.2.1.13 RS232와 CAN 통신 회로

표 3.2.1.4 600A급 전류센서 'HAH1DR 600-S LEM' 측정 및 동작특성

Absolute maximum ratings

Parameter	Symbol	Unit	Specification			Conditions
			Min	Typ	Max	
Electrical Data						
Max primary current peak	I_{Pmax}	A			0	
Supply continuous over voltage	V_C	V			7	Not operating
Reverse voltage [3]			-0.5			1 min @ T_A = 25°C
Output over voltage (continuous)	V_{OUT}	V	-0.5		V_C + 0.5	
Continuous output current	I_{OUT}	mA	-10		10	
Output short-circuit duration	T_c	min			2	
Rms voltage for AC isolation test	V_d	kV			2	50 Hz, 1 min
Isolation resistance	R_{is}	MΩ	500			500 V - ISO 16750-2
Electrostatic discharge voltage	V_{ESD}	kV			2	JESD22-A114-B
Ambient storage temperature	T_s	°C	-40		125	

Operating characteristics

Parameter	Symbol	Unit	Specification			Conditions
			Min	Typ	Max	
Electrical Data						
Primary current	I_P	A	-600		600	
Calibration current	I_{CAL}	A	-500		500	@ T_A = 25°C
Supply voltage	V_C	V	4.75	5.00	5.25	
Output voltage (Analog) [3]	V_{OUT}	V	V_{OUT} = (V_C/5) x (2.5 + G x I_P)			@ V_C
Sensitivity [3]	G	mV/A		3.33		@ V_C = 5 V
Current consumption	I_C	mA		15	20	@ V_C = 5 V, @ - 40°C < T_A < 125°C
Load resistance	R_L	kΩ	10			
Output internal resistance	R_{OUT}	Ω			10	DC to 1 kHz
Capacitive loading	C_L	nF	1		100	
Ambient operating temperature	T_A	°C	-40		125	Connector limited 105°C
Output drift versus power supply	$V_{OUT\ PS}$	%		0.5		
Performance Data						
Sensitivity error	ε_G	%	-1.0	± 0.5	1.0	@ T_A = 25°C @ I = I_{CAL}
			-2.0		2.0	@ T_A = 25°C @ I = I_P
Electrical offset current	I_{OE}	A		± 2.0		@ T_A = 25°C, @ V_C = 5 V
Magnetic offset current	I_{OM}			± 1.0		@ T_A = 25°C, after ± I_P
Global offset current	I_O		-3.5		3.5	@ T_A = 25°C
Average temperature coefficient of V_{OE}	$TCV_{OE\ AV}$	mV/°C	-0.08	± 0.03	0.08	@ - 40°C < T° < 125°C
Average temperature coefficient of G	TCG_{AV}	%/°C	-0.035	± 0.02	0.035	@ - 40°C < T° < 125°C
Linearity error	ε_L	%	-1		1	@ V_C = 5 V @, T_A = 25°C, @ I = I_P
			-0.5		0.5	@ V_C = 5 V @, T_A = 25°C, @ I = I_{PCAL}
Response time to 90 % of I_{PN} step	t_r	µs		6	10	@ dI/dt = 100 A/µs
Frequency bandwidth [4]	BW	kHz		30		@ -3 dB
Output clamping voltage min	V_{el}	V			0.1	@ V_C = 5 V, T_A = 25°C
Output clamping voltage max			4.9			@ V_C = 5 V, T_A = 25°C
Output voltage noise peak-peak	$V_{no\ pp}$	mV			14	DC to 1MHz

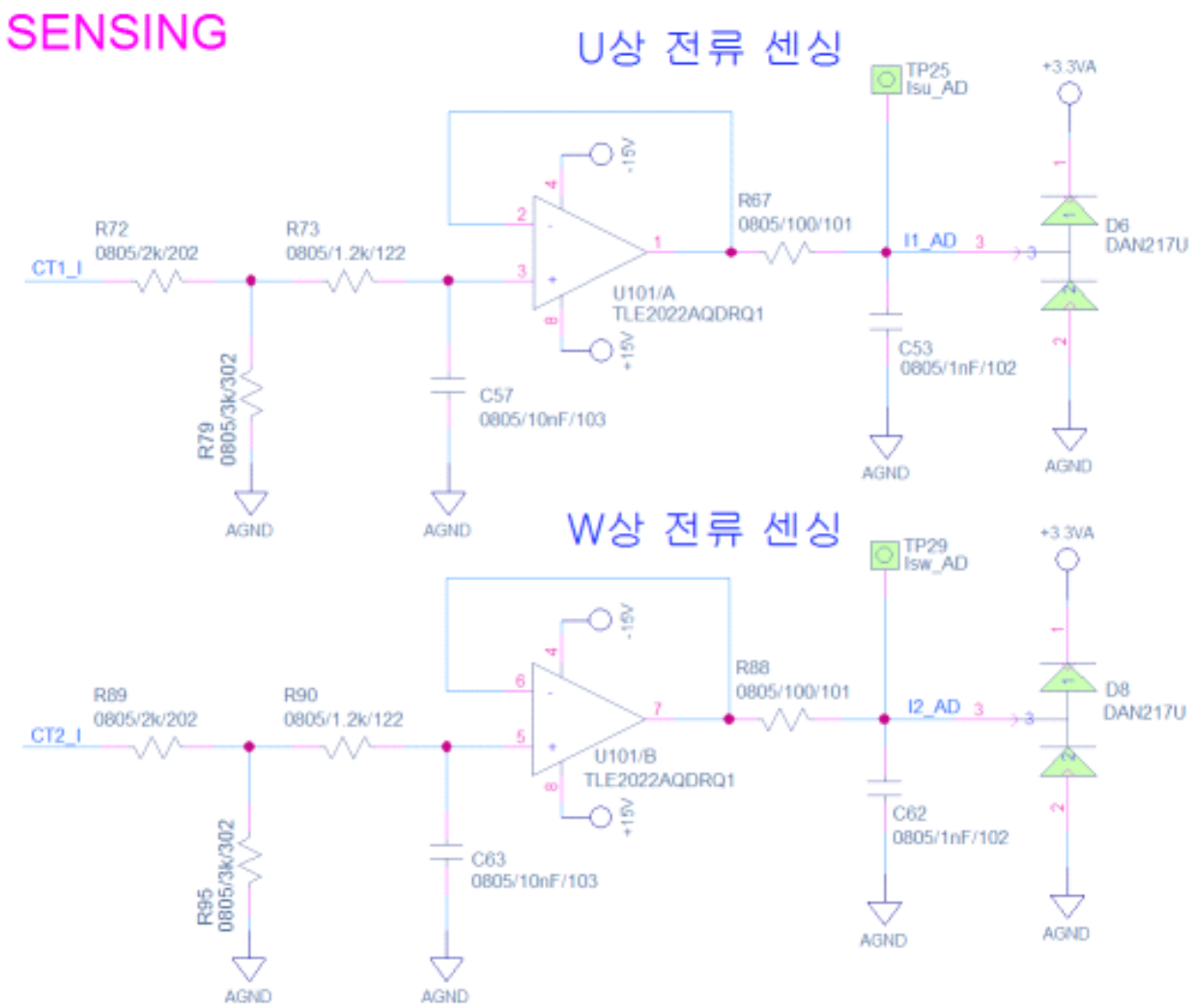


그림 3.2.1.14 전류 검출 회로

아. 보호회로

과전압, 과전류, 과온 등으로부터 인버터를 보호하기 위해 하드웨어적, 소프트웨어적인 보호 방법이 있으나, 본 개발에서는 CPU가 동작하지 않더라도 인버터 회로로 보호하기 위한 각 보호회로를 구성하였다..

(1) 과전류 검출회로

인버터를 통해 모터에 흐르는 전류는 양(+)과 음(-)의 교류전류이지만, 전류센서를 통해 검출된 신호전압은 0 ~ 5[V] 범위로 2.5[V]를 기준으로 교번하게 된다. 따라서 양(+)의 과전류와 음(-)의 과전류에 대해 보호회로를 가지기 위해 기준범위에 해당하는 전압을 생성하고 각 상전류를 이 전압과 비교하여 그 중 하나 이상이라도 벗어나면 논리 '0'으로 플래그 된다.

그림 3.2.1.15는 과전류 검출회로 동작파형을 나타낸 것이고, 그림 3.2.1.16은 검출회로도이다.

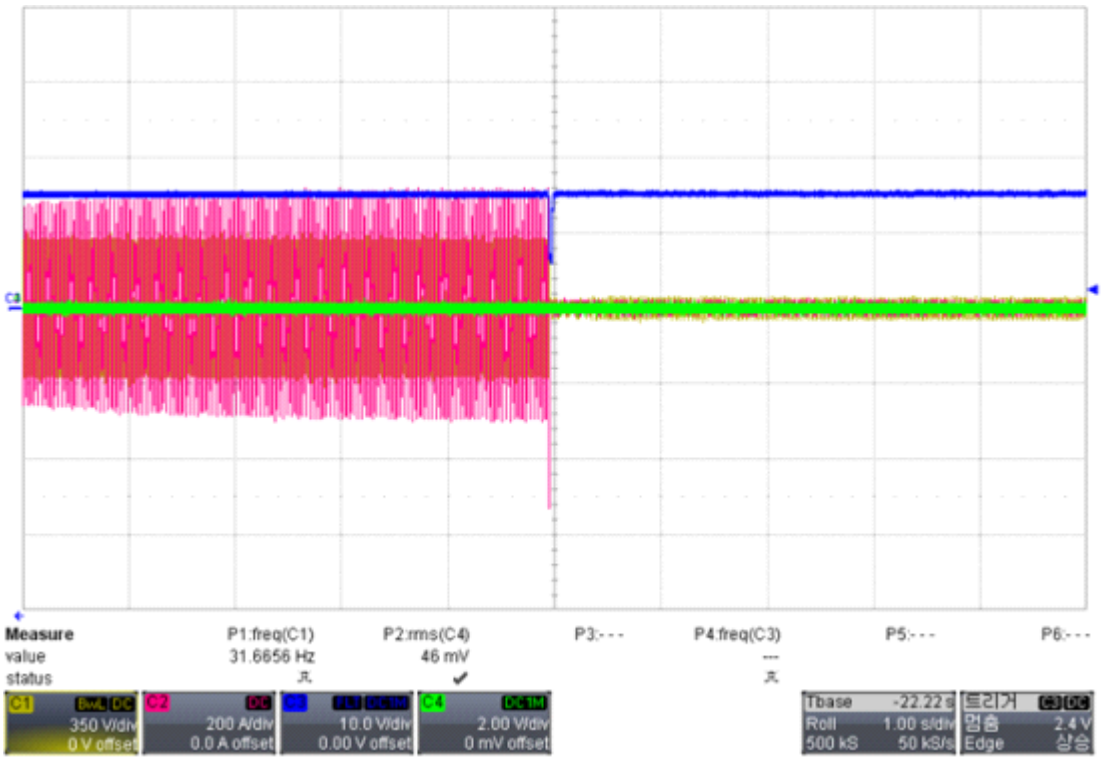


그림 3.2.1.15 과전류인가시 보호회로 동작파형

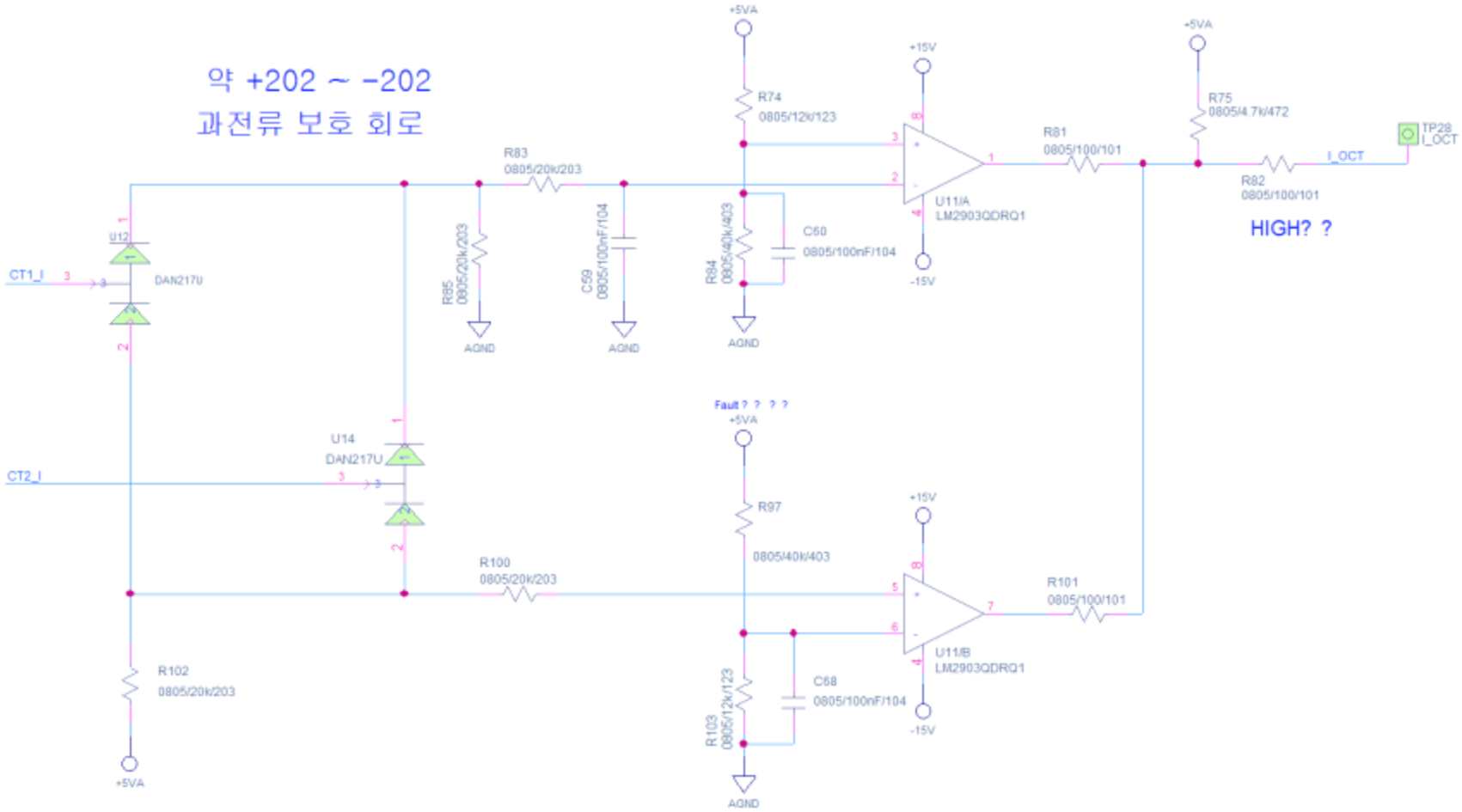


그림 3.2.1.16 과전류 보호 회로

(2) 과전압 보호회로

시스템에서 동작전압의 범위를 20V로 정의하였기 때문에 DC Link 전압이 83V 이상이 되면 과전압 플래그가 발생되도록 하드웨어적 회로를 구성해야 한다. 관련 과전압 보호회로도는 그림 3.2.1.17과 같다.

자. PWM 회로

CPU에서 생성된 PWM 신호가 BUFFER 및 고전압 구동드라이브 회로 등을 거쳐서 MOSFET에 인가되며, 이 신호에 의해 전력이 변환되므로 가장 중요한 출력신호가 된다. PWM 신호는 CPU에서 레졸버, 통신, 전압, 전류 등의 복합적인 계산에 의해 결정되지만 만약 이들 회로 중 어느 하나의 이상을 소프트웨어적으로 감지하지 못하고 제어를 할 경우 모터와 인버터를 비롯하여 시스템에 큰 고장을 가져올 수 있기 때문에 하드웨어적인 보호장치가 필요하다. 그림 3.2.1.18 및 그림 3.2.1.19는 각각 PWM 및 보호장치 회로도를 나타낸다.

앞서 과전류, 과전압, 과온 등의 상황이 발생하면 CPU로 그 값을 입력시키기도 하지만, 위의 회로에서와 같이 하드웨어적으로 PWM을 차단시킬 수 있도록 설계되어 있다.

모든 PWM 신호 LINE은 같은 길이가 되도록 유지하며, GND Guard 처리를 반드시 해야 한다.

차. GPIO Interface & Level 변환회로

CPU와 GPIO간의 인터페이스에서 서로 다른 전압레벨의 차이를 버퍼를 통하여 완충역활을 한다. 관련 회로도는 그림 3.2.1.20과 같다.

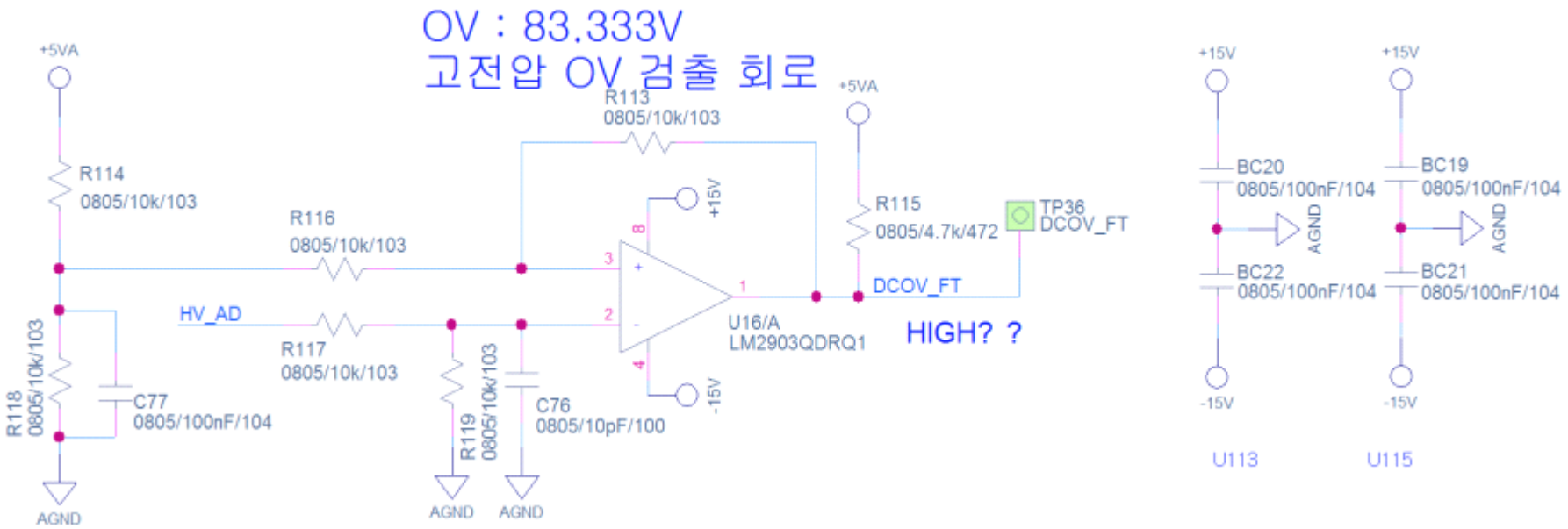


그림 3.2.1.17 입력과전압 보호회로

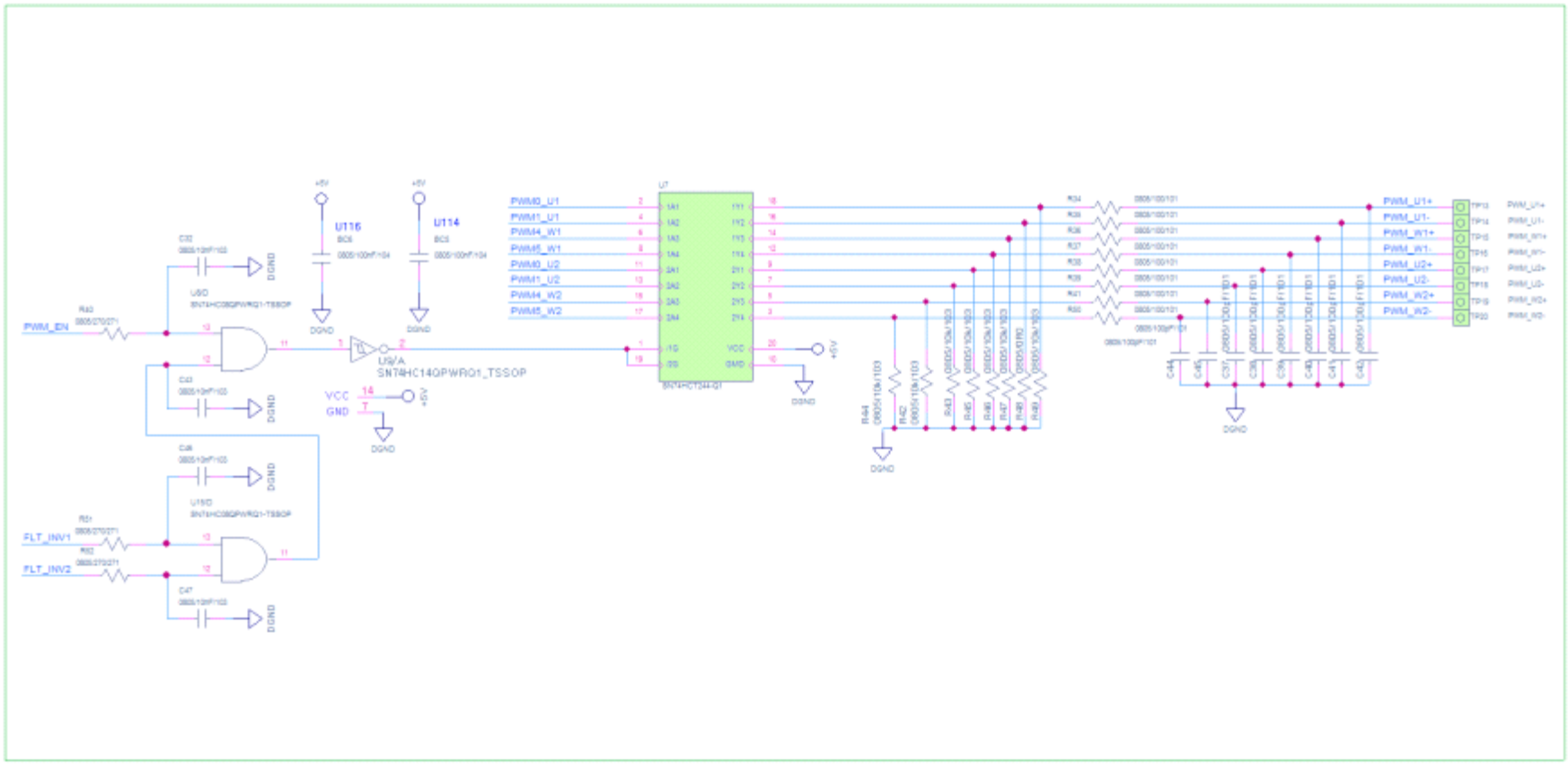


그림 3.2.1.18 PWM 회로

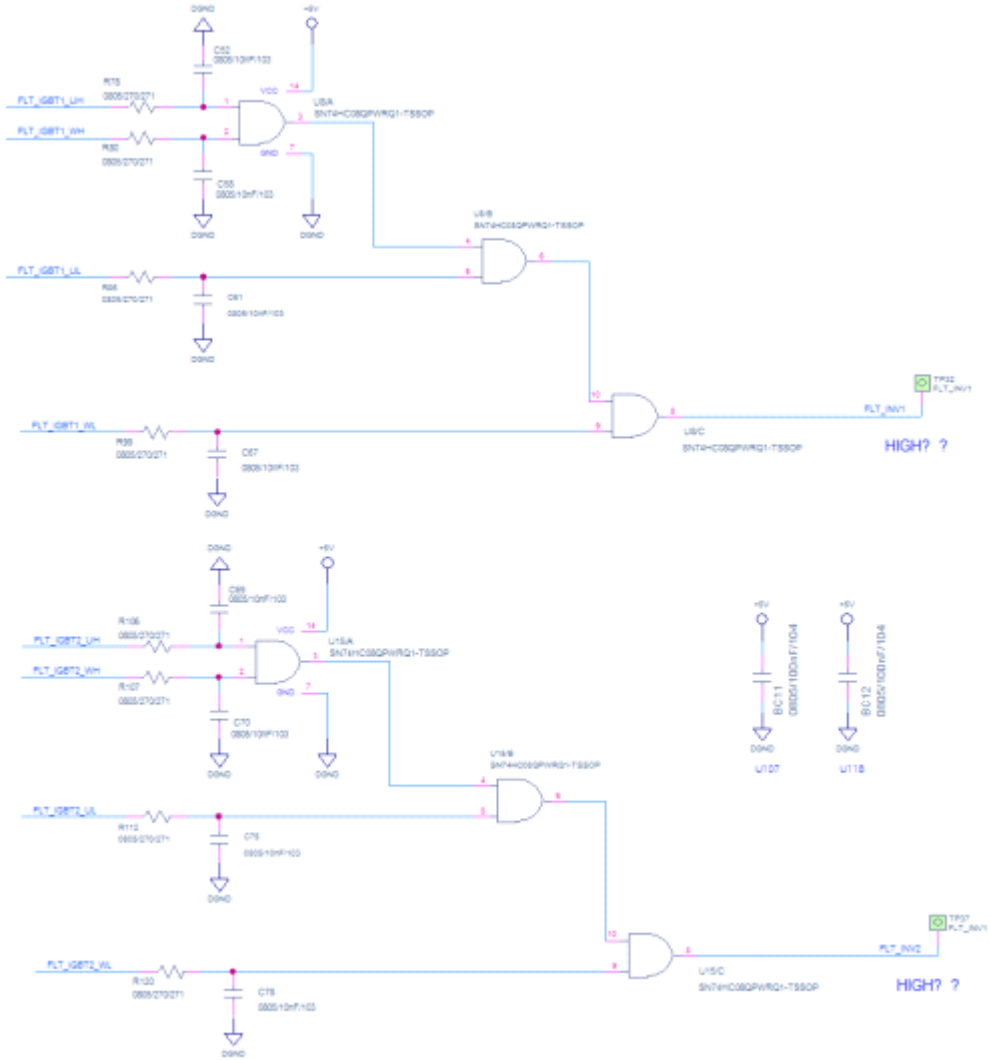


그림 3.2.1.19 H/W PWM Protection회로

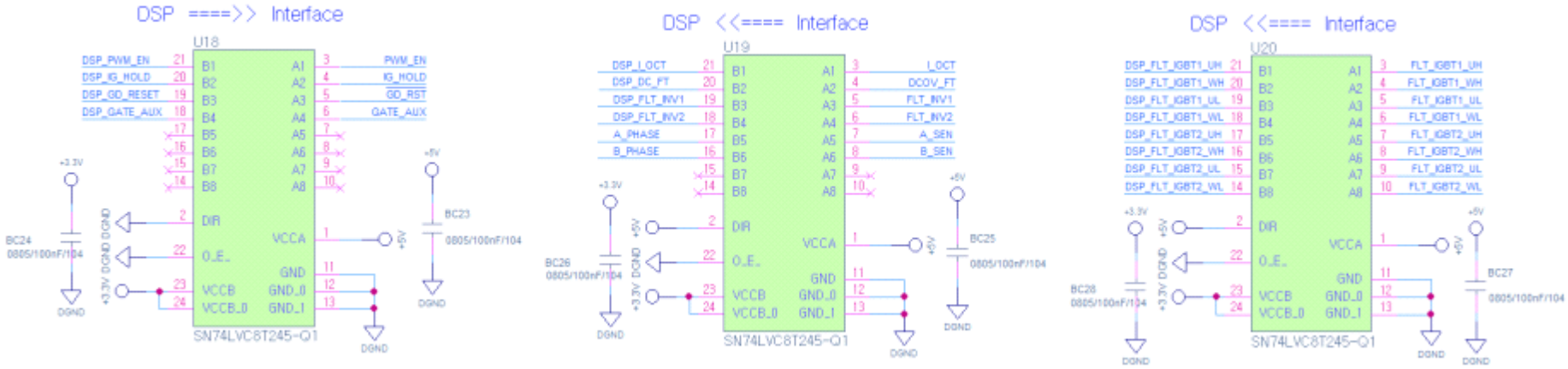


그림 3.2.1.20 전압 Level 변환 회로

3.2.1.3. 게이트보드

게이트보드는 CPU보드의 PWM 8채널을 운전하기 위하여 드라이버 증폭회로와 MOSFET 보호를 위한 단락방지회로와 직류링크전압을 측정하기 위한 회로를 포함하고 있다. 각각의 PWM 8채널에 대한 독립전원을 생성하고 토템플 방식으로 각전원의 출력에는 탄탈커패시터를 사용하고 있다.

가. 블록도



그림 3.2.1.21 게이트보드 블록도

나. 형상

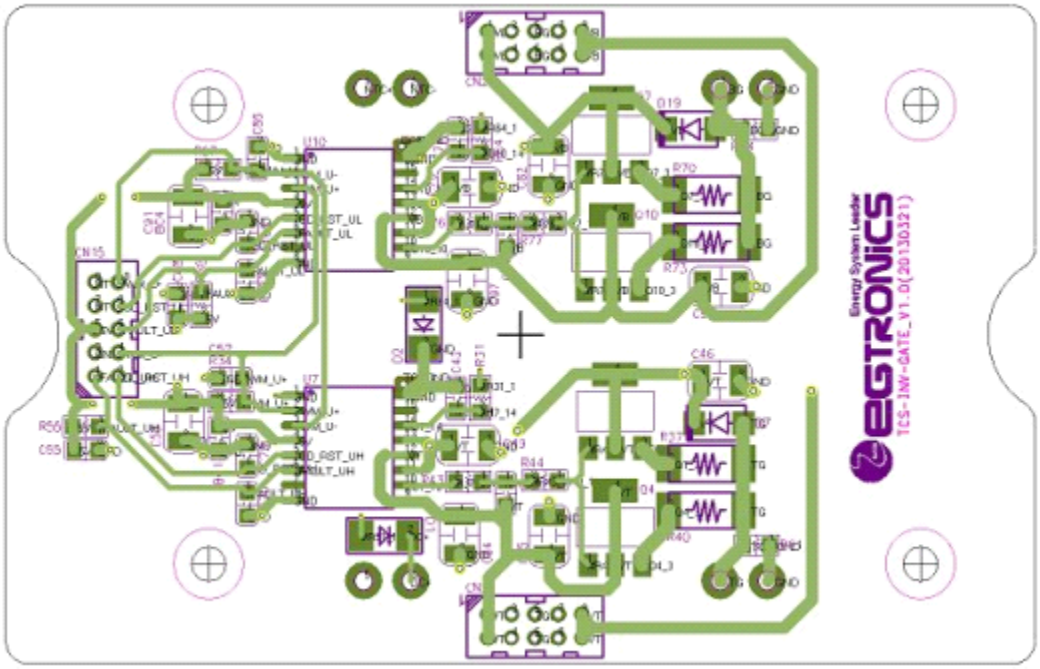


그림 3.2.1.22 게이트보드 Top

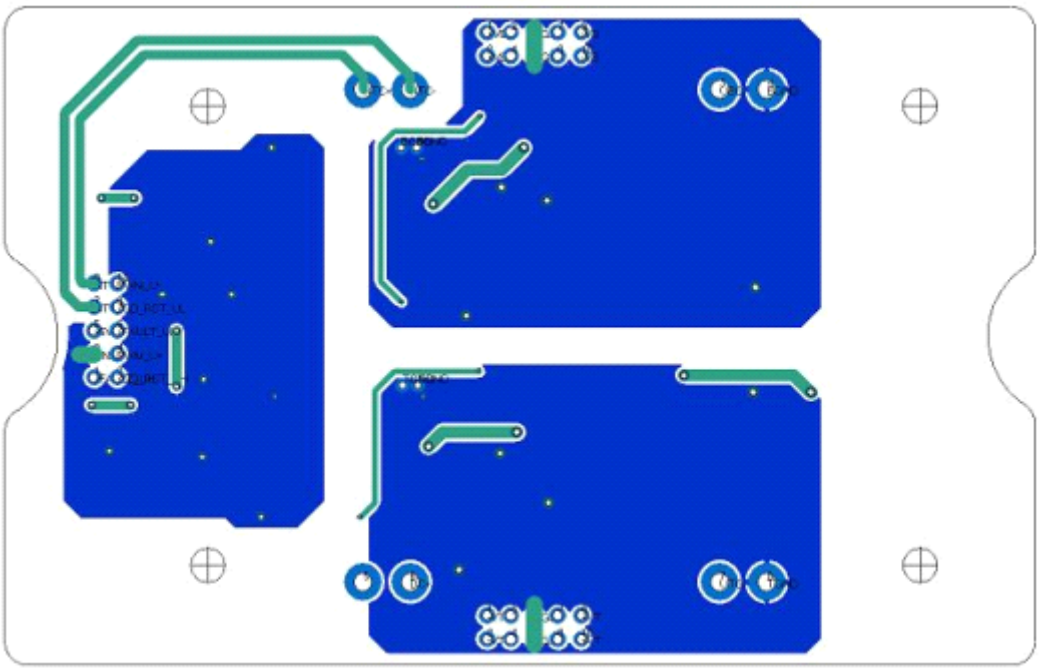


그림 3.2.1.23 게이트보드 Bottom

다. 주요요소

- 8 채널 PWM 동작
- 절연전원 16채널 생성
- 전압측정 : VDC
- PWM Driver 전용칩 사용

라. PWM Driver IC

PWM Driver IC는 아래와 같은 이유로 사용되며, 관련 회로도는 그림 3.2.1.24와 같다.

- CPU 보드에서 생성된 PWM 신호를 MOSFET에 인가하기 위해 사용되는 드라이브 IC
- ACPL-34JT에 PWM 신호를 입력시키면 출력단에 토템폴 타입의 트랜지스터 구동회로에 바이어스되어 MOSFET를 턴-온 할 수 있게 됨

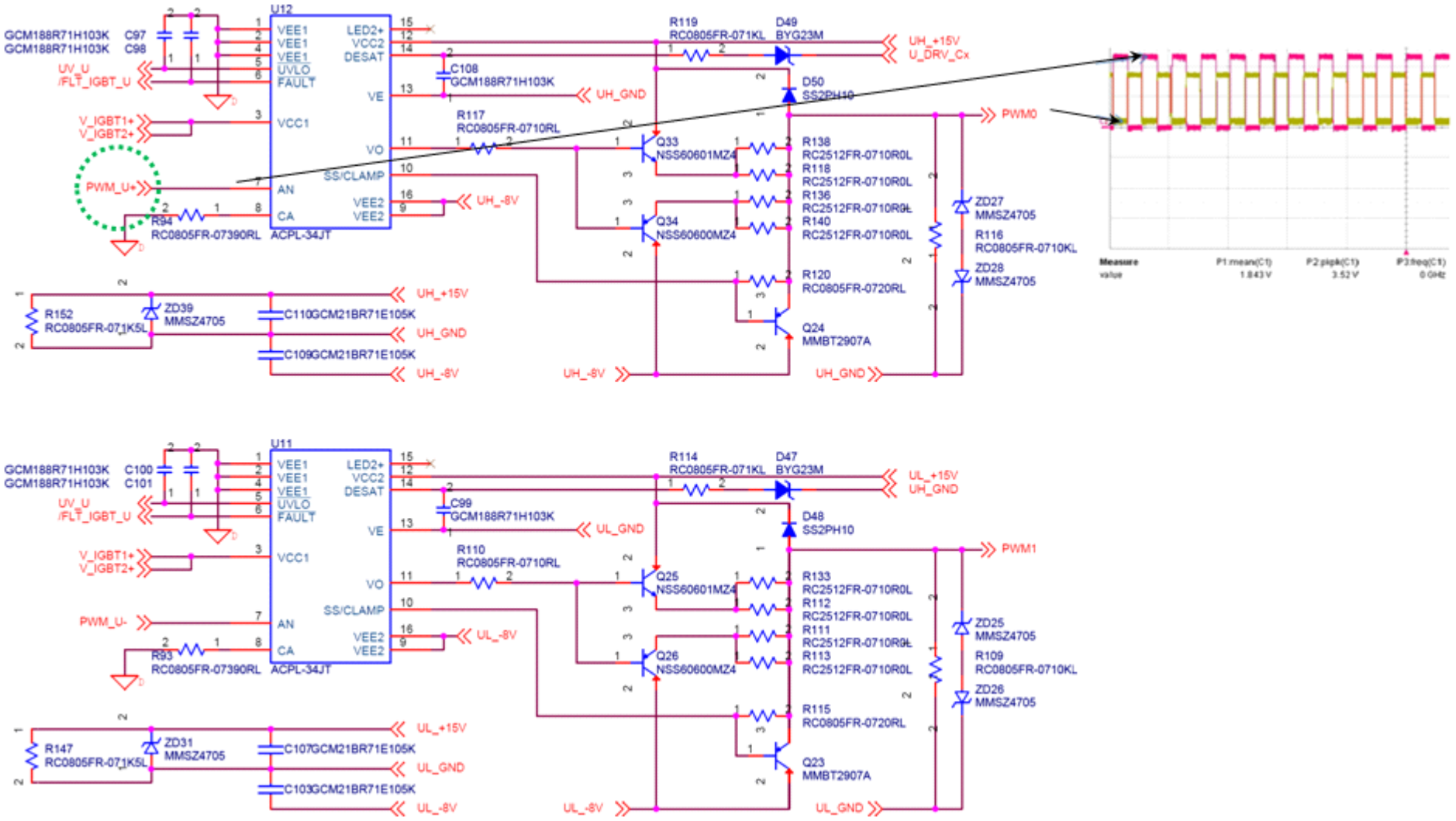


그림 3.2.1.24 PWM 드라이브 IC를 이용한 MOSFET 구동회로

3.2.1.4. 대차의 위치센싱

LPM 제어에서 중요한 요소중 하나인 지상 추진 코일의 배치에 따른 대차의 위치를 정확히 센싱한다는 것은 LPM 추진장치를 정밀 제어하고 운전의 신뢰성을 높이는 것과 깊은 관계가 있다.

가. 추진 코일과 대차의 자석 배치도

그림 3.2.1.25에서 A Hall sensor 센서의 위치를 추진 코일의 위치와 동일 하게 놓아주고 B Hall sensor의 위치를 45도 비껴서 놓아주면 그림 3.2.1.26과 같이 대차의 이동위치를 45도 간격으로 인식할 수 있게 된다. 이것을 카운트하여 90도 마다 LPM 추진신호를 발생시킬 수 있도록 한다.

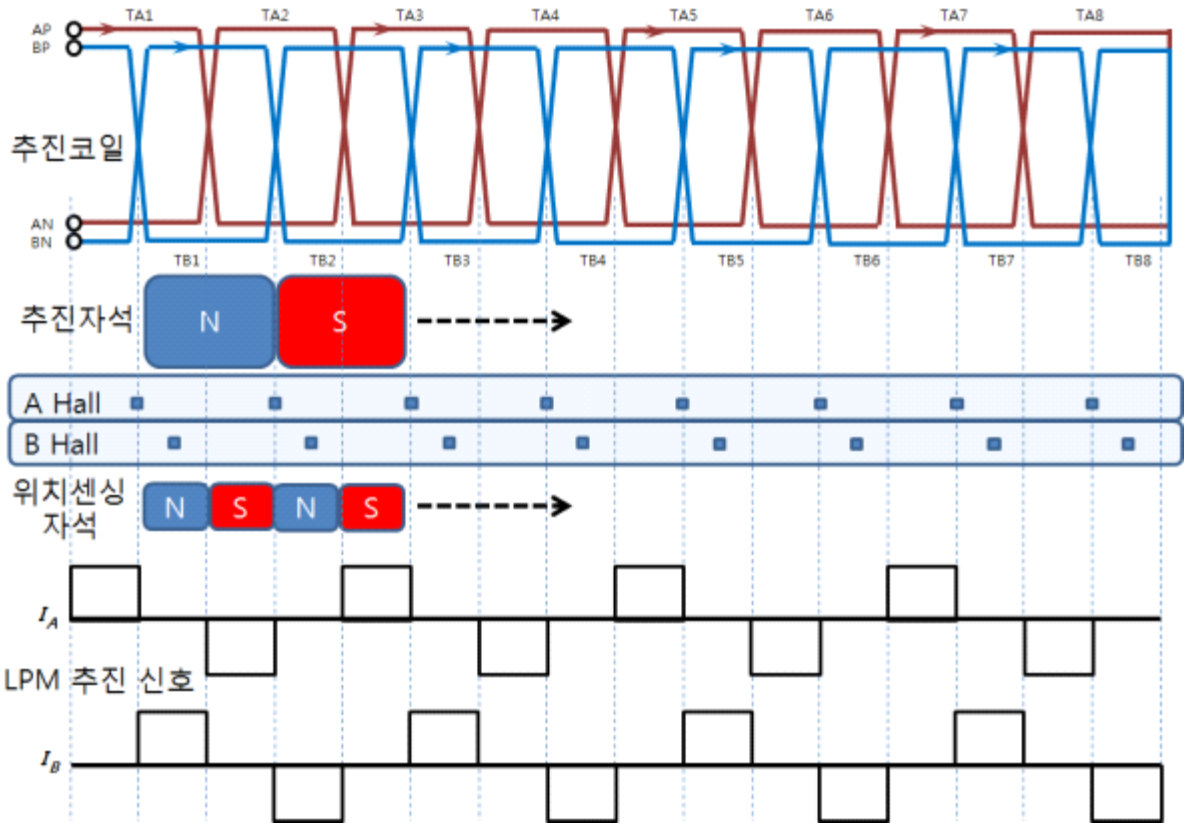


그림 3.2.1.25 PWM 드라이브 IC를 이용한 MOSFET 구동회로

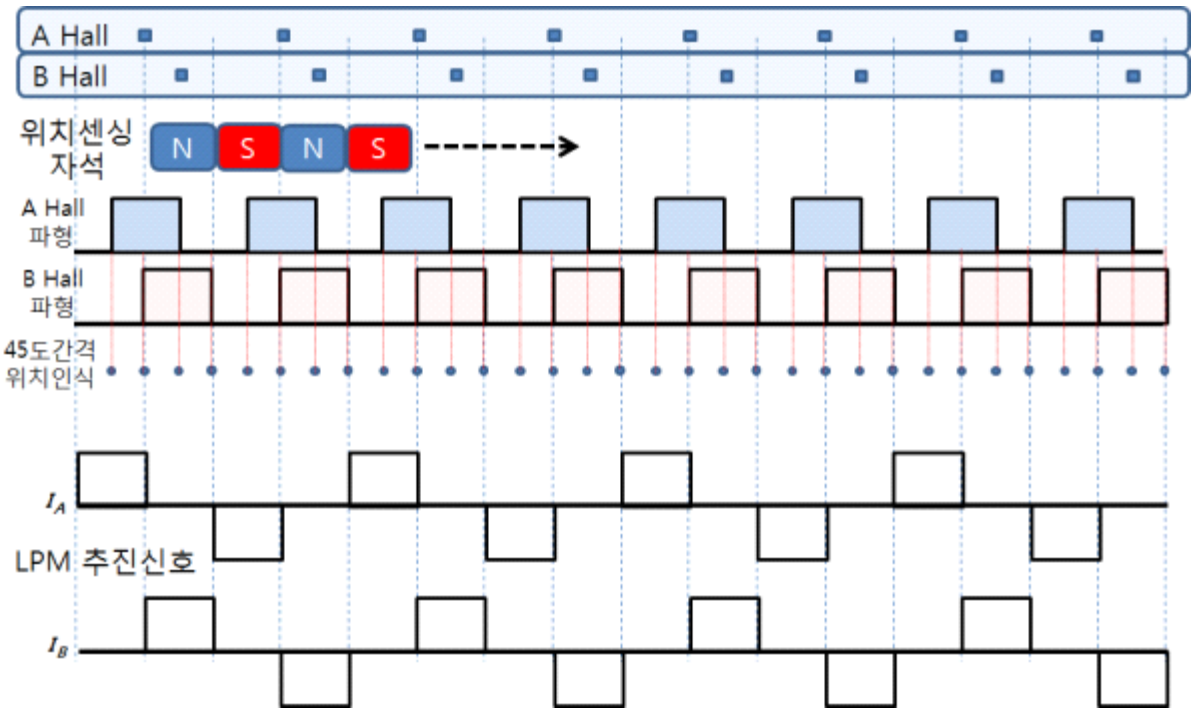


그림 3.2.1.26 위치센싱용 Hall센서 파형과 위치 인식 방법

나. Hall Sensor 소자 선정

대차에 실장된 위치센싱용 자석에 반응하여 위치펄스를 출력할 수 있는 Allegro사의 A3295 Hall Sensor를 선정하였다.

(1) 주요 기능 특징

- Resistant to physical stress
- Superior temperature stability
- Output short-circuit protection
- Operation from unregulated supply
- Reverse battery protection
- Solid-state reliability
- Small package size
- Internal pull-up resistor optional

(2) 내부 블록도

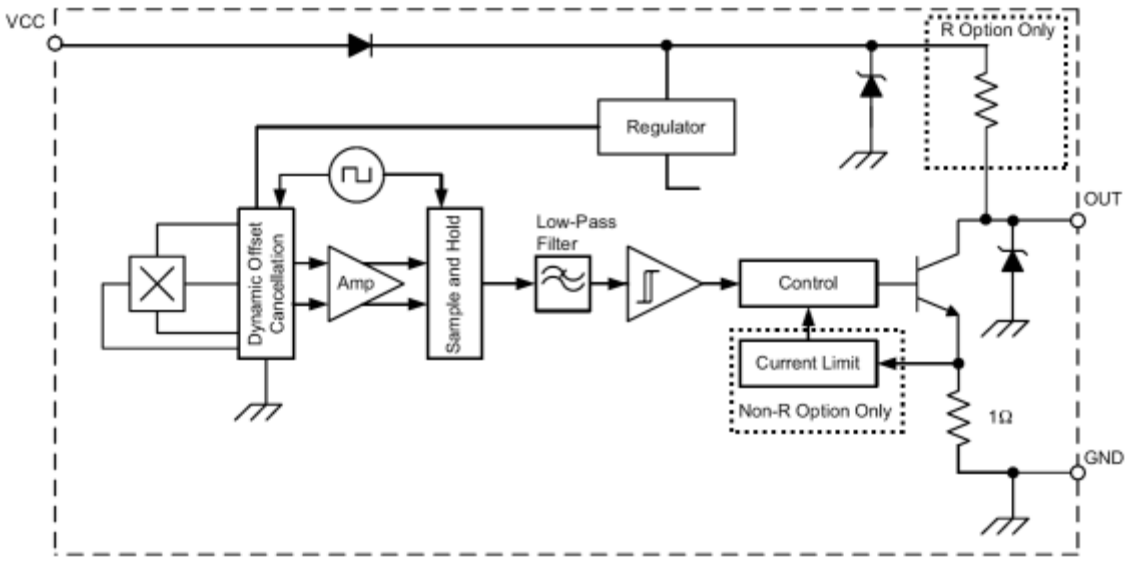


그림 3.2.1.27 A3295 내부 블록도

(3) Hall 센서의 구동 원리 및 등가 회로

그림 3.2.1.28과 같이 홀 소자는 휘스토브리지 Array 저항처럼 등가적으로 표현 할 수 있다. Hall 센서의 표면에 마그네트 Flux를 투과 시키면 등가 평형이 변경되어 저항값이 변하는 특징을 이용하여 마그네트 Flux의 세기를 측정 할 수 있다.

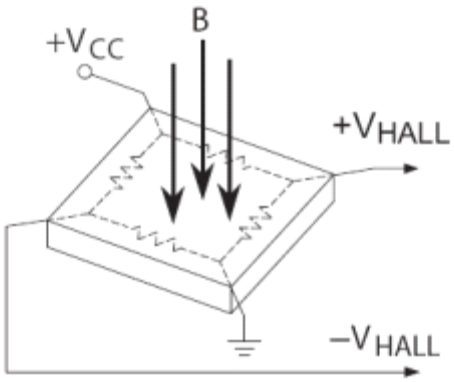


그림 3.2.1.28 A3295 등가 회로도

A3295는 마그네트 Flux density에 따른 출력 특성은 마그네트 Flux density에 비례하여 값이 나타나지 않고 그림 3.2.1.29와 같이 B_{OP} 와 B_{RP}의 B_{HYS} 폭을 가지고 Switch Low과 Switch High 값으로 나타나는 특징을 가지고 있다. 따라서 마그네트 Flux density 양을 측정하는 용도로는 적합하지가 않고 어느 일정량의 마그네트 Flux density 존재 유무의 파악하는 용도로의 사용이 유리하다.

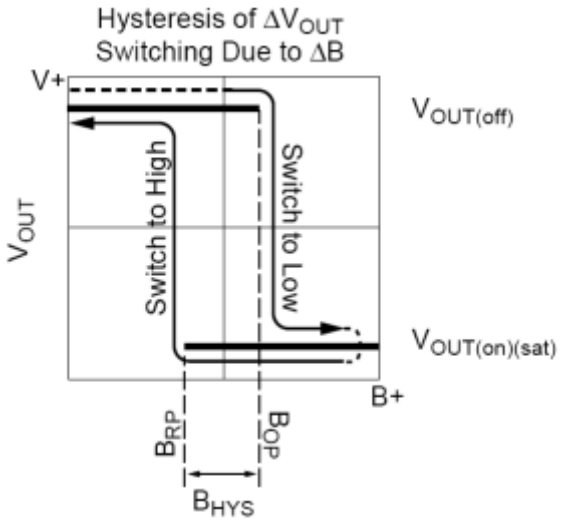


그림 3.2.1.29 마그네트 Flux density에
따른 출력전압

다. Hall Sensor 드라이브 회로도

앞서 설명한 Hall 센서 A3295를 사용하기 위해서는 드라이브 회로가 필요하며, 그 주변 회로는 그림 3.2.1.30과 같다.

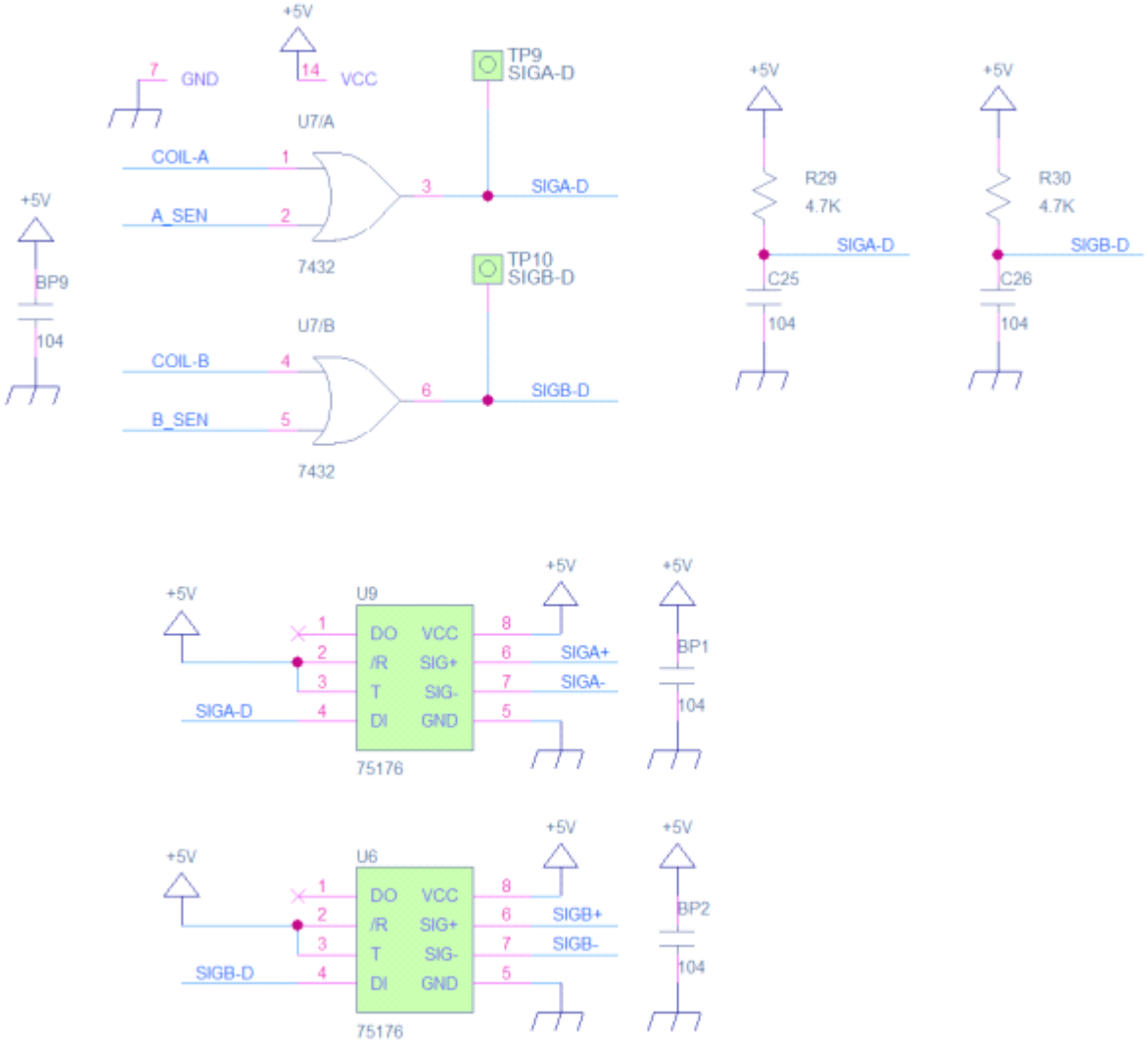


그림 3.2.1.30 Hall Sensor 드라이브 회로도

3.2.1.5. 축소모형 파라미터

제작된 축소모형의 각종 파라미터들은 다음 표 3.2.1.5와 같다.

표 3.2.1.5 축소모형 파라미터

항목		수치	단위
속도	최대 시속	1.44	[km/h]
	최대 RPM	60.0	[rpm]
	기계 각 주파수	6.2832	[rad/s]
	전기 각 주파수	12.5664	[rad/s]
코일 길이	가로	100	[mm]
	세로	60	[mm]
모터 파라미터	영구자석	1.21	[T]
		79.12	[mWb]
	저항	26	[mΩ]
	상 인덕턴스	28	[uH]
	Pole 수	4	[pole]
	질량	5.4	[kg]
	관성모멘트	0.0219	[kg·m^2]
	마찰계수	-	[kg·m^2/s]
	DC단 전압	20	[V]
	정격 토크	0.5157	[Nm]
	정격 전류	325.8734	[A]

3.2.1.6. 동작 시험 파형

LPM를 추진하기 위해서는 먼저 대차의 추진자석의 위치에 따른 정확한 위치센싱이 되어야 하고 이에 따른 추진 Pulse파형을 인가되어야 한다. 또한 대차의 가감속을 위하여 신속한 토크 제어를 할 수 있도록 LPM 코일에 원활한 전류제어가 되어야 한다.

가. Hall Sensor에 의한 위치 센싱 파형

그림 3.2.1.31에서 대차의 움직에 따라 A상과 B상의 Hall Sensor 출력 파형이 정확히 교차 되면서 나오고 있다. 이 A,B상의 신호를 4채배하여 대차의 위치를 45도 간격으로 인식하여 운전

할 수 있게 된다.

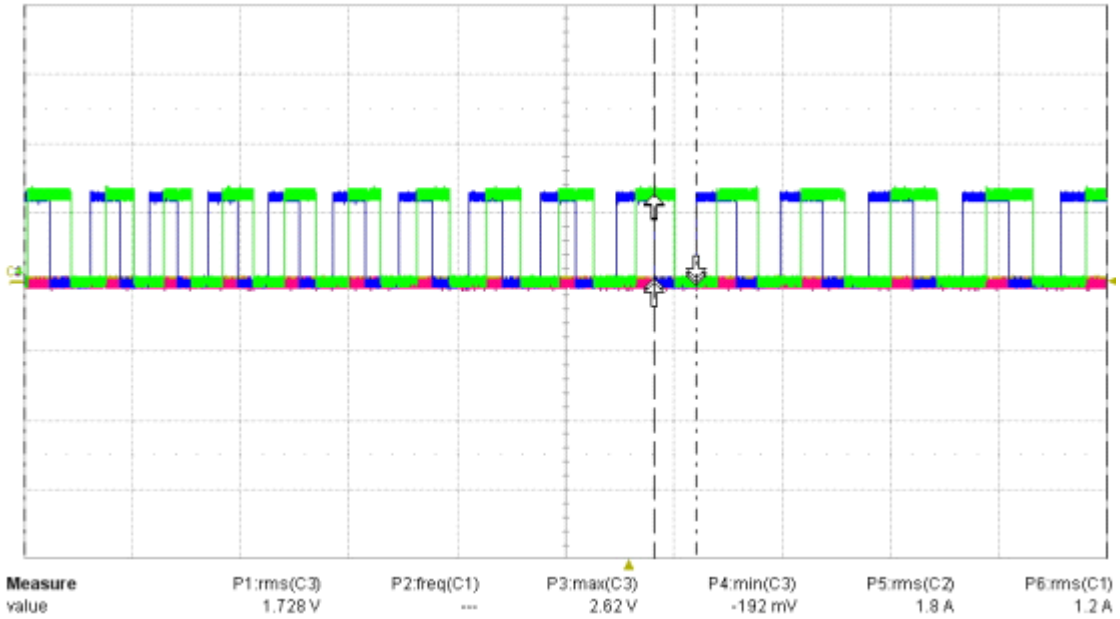


그림 3.2.1.31 대차의 위치 변동에 따른 Hall Sensor 출력 A,B상

나. LPM코일에 흐르는 전류 제어 파형

그림 3.2.1.32에서부터 그림 3.2.1.37에서 볼 수 있는 것처럼 전류 제어 명령에 따라서 +150A ~ -150A 까지 정확하게 연속모드로 전류가 제어 되고 있음을 볼 수 있다.

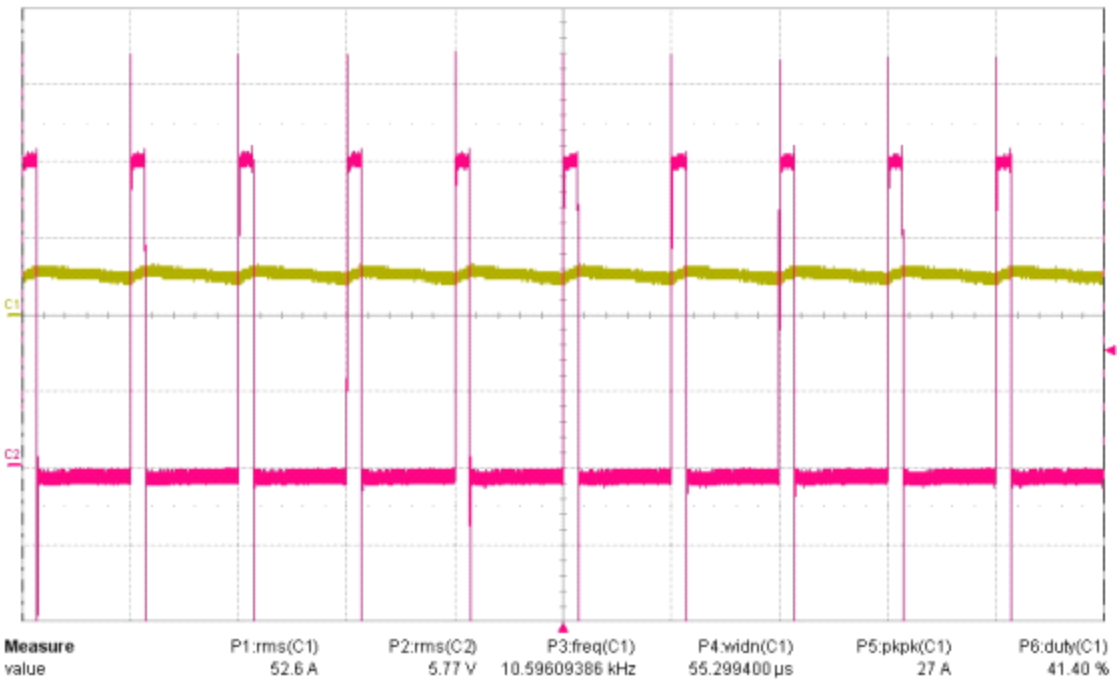


그림 3.2.1.32 +50A 출력 제어

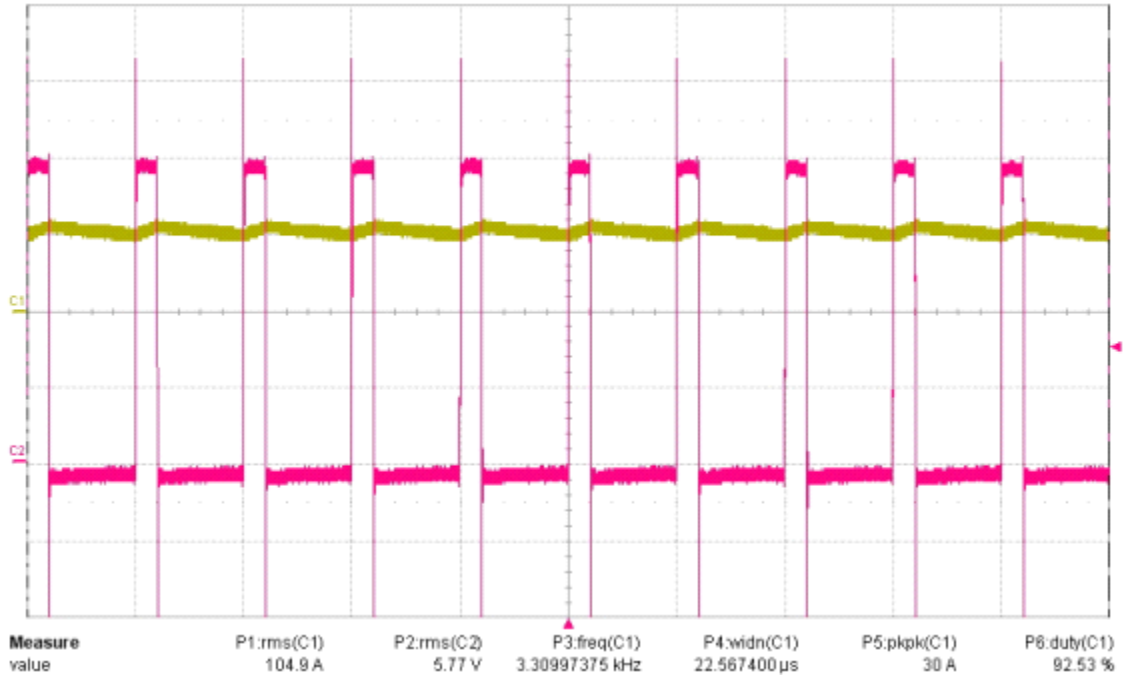


그림 3.2.1.33 +100A 출력 제어

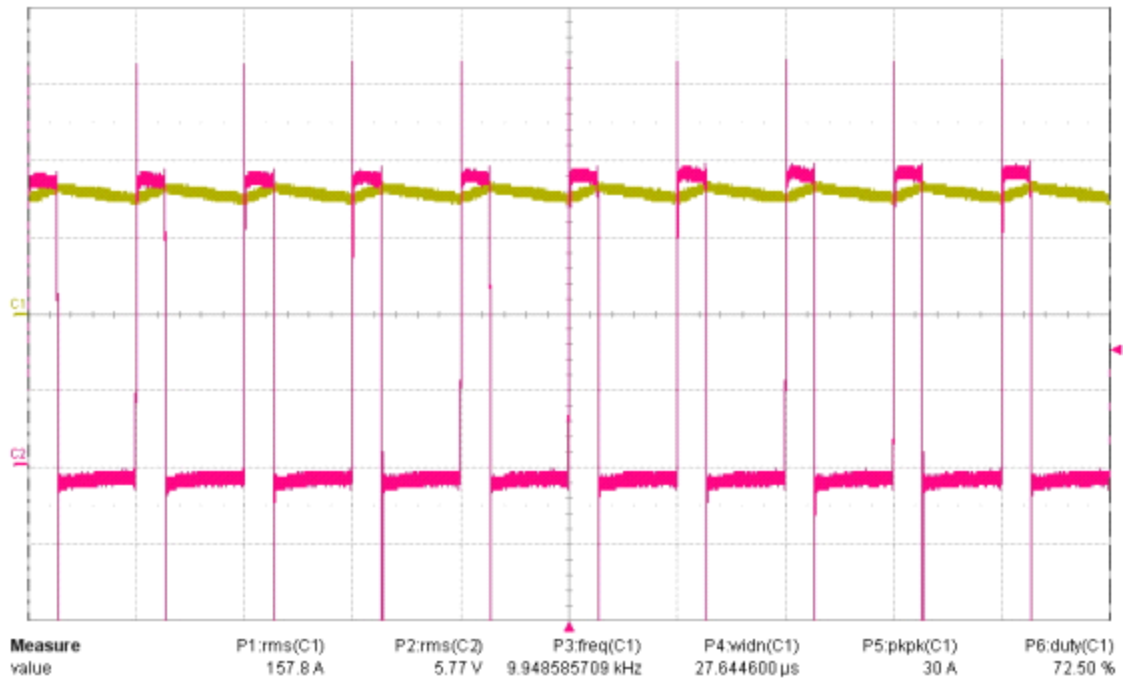


그림 3.2.1.34 +150A 출력 제어

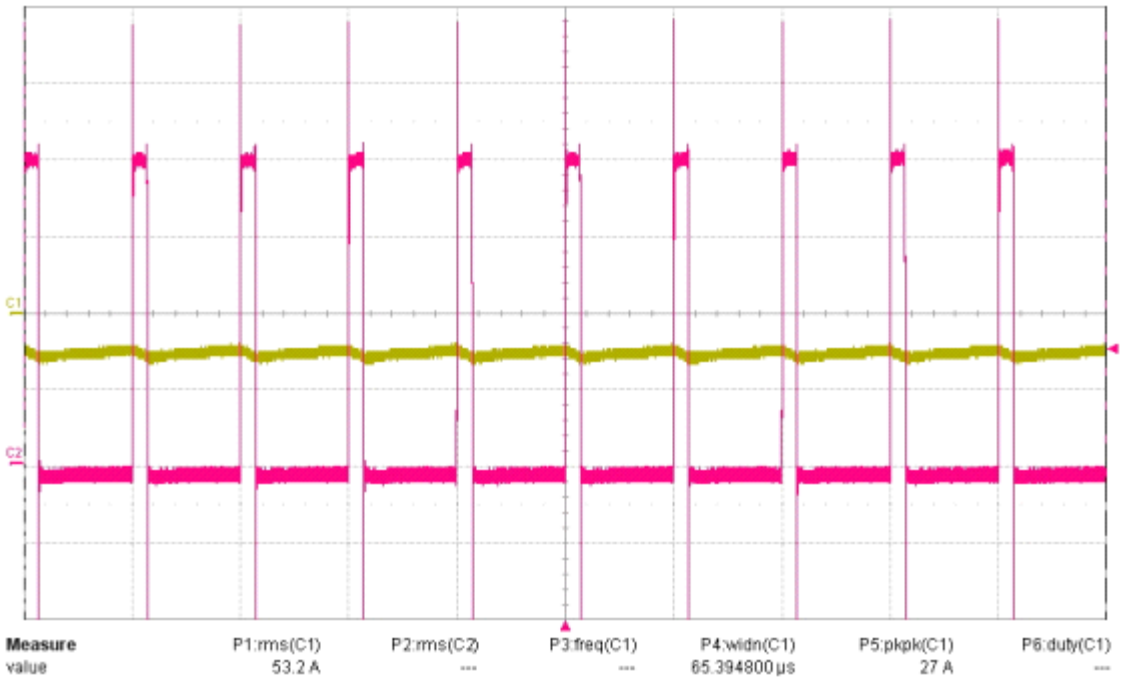


그림 3.2.1.35 -50A 출력 제어

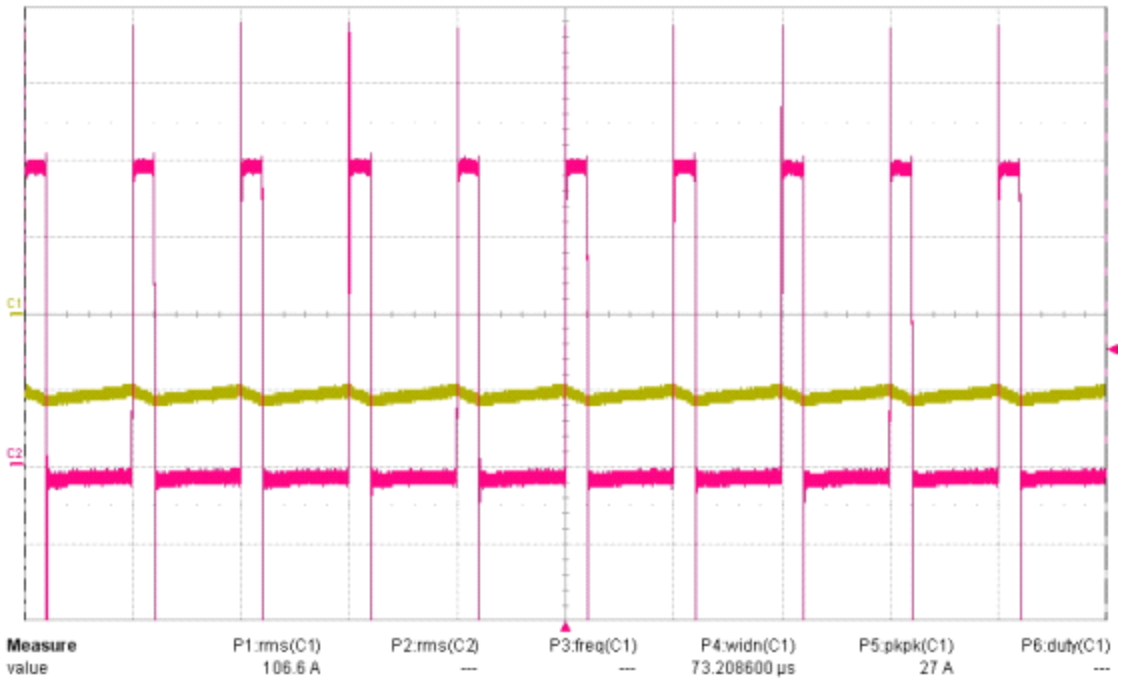


그림 3.2.1.36 -100A 출력 제어

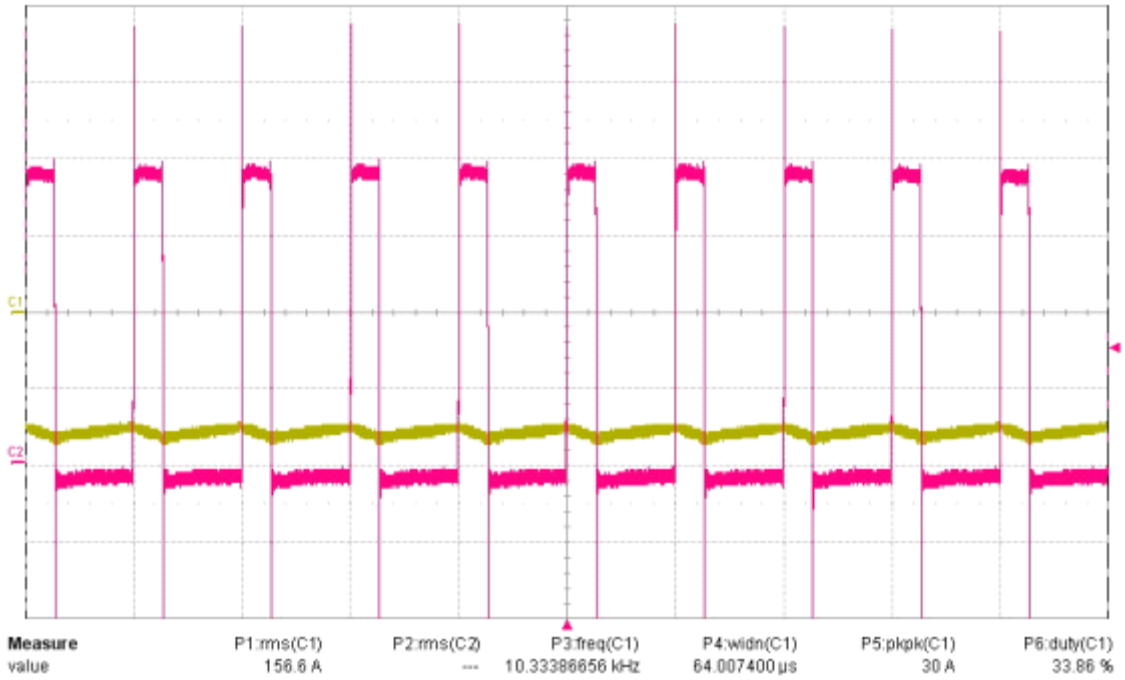


그림 3.2.1.37 -150A 출력 제어

다. 대차 추진 제어 Pulse 파형

그림 3.2.1.38에서부터 그림 3.2.1.40까지의 시험 파형을 보면, 대차의 위치에 따른 추진 제어가 원활히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

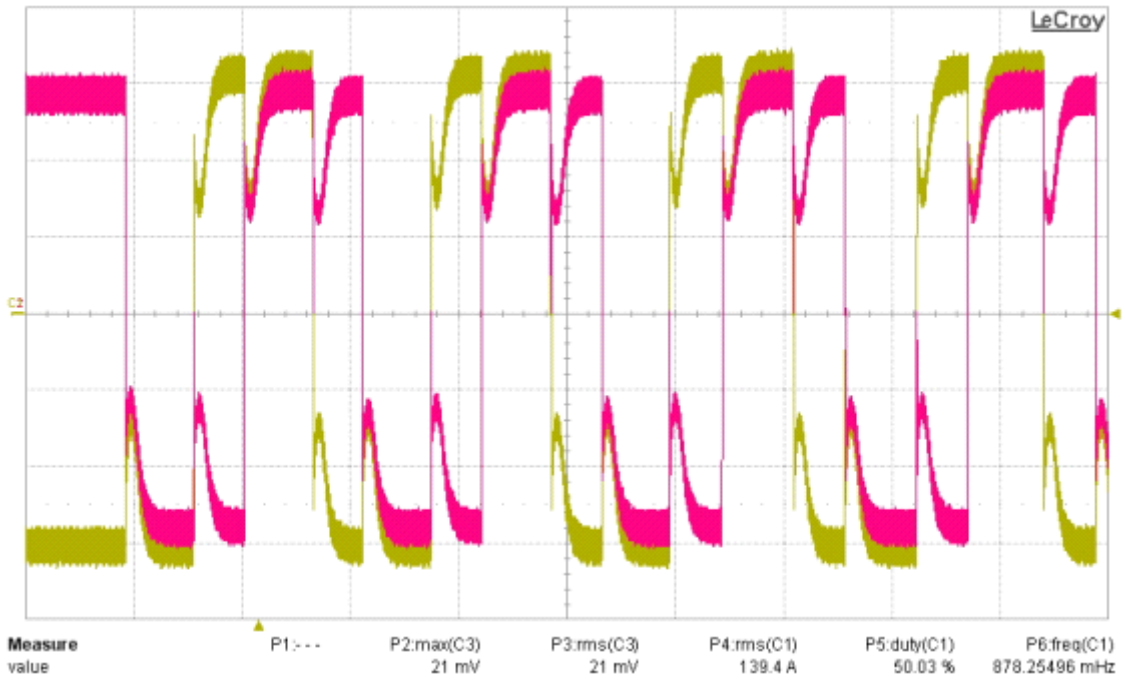


그림 3.2.1.38 추진코일의 A상과 B상의 2상제어 파형

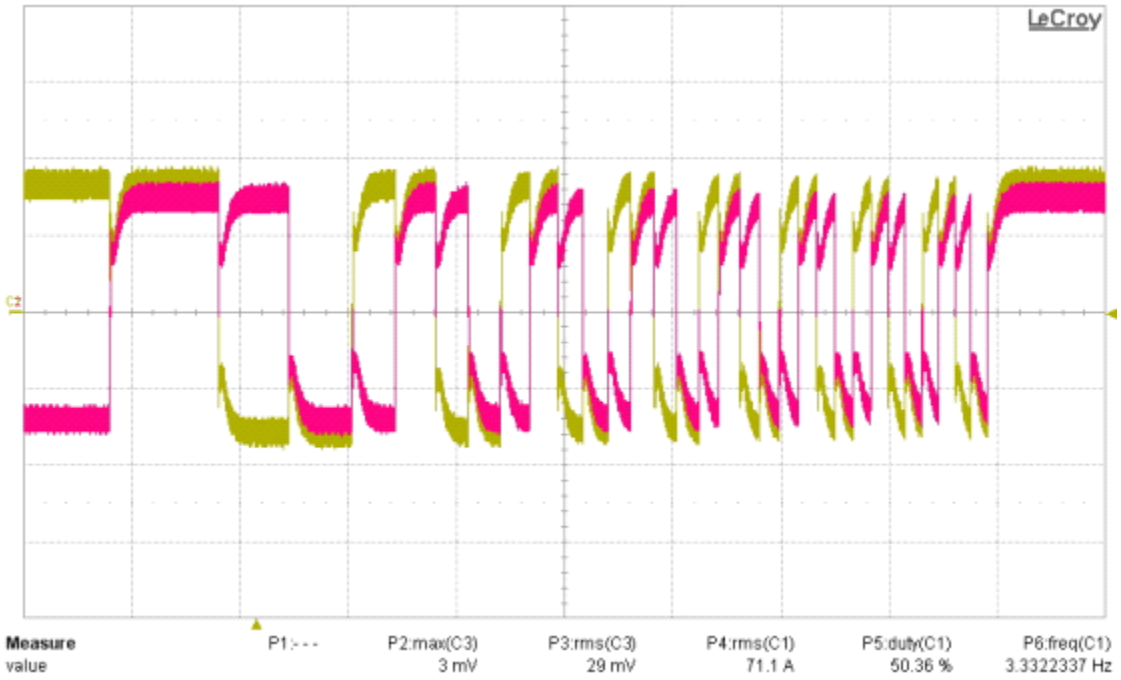


그림 3.2.1.39 대차 가속시의 A상과 B상의 2상제어 파형

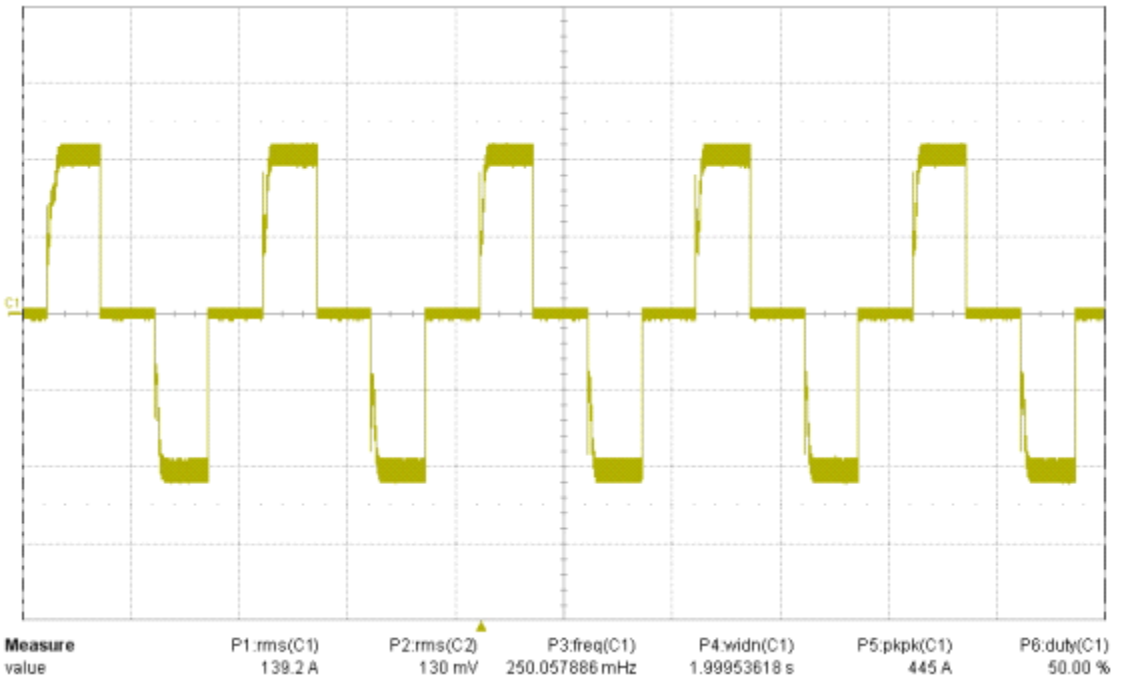


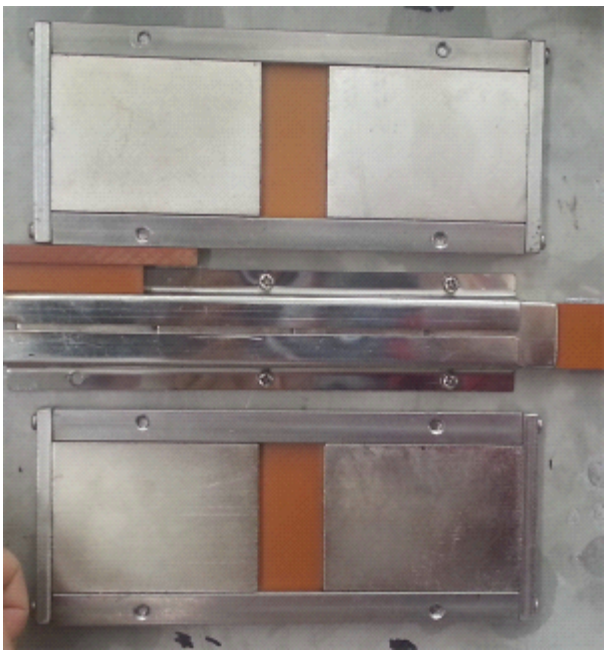
그림 3.2.1.40 90도 운전시 한상의 전류파형(150A 제어)

3.2.2. 축소형 모델 해석 연구

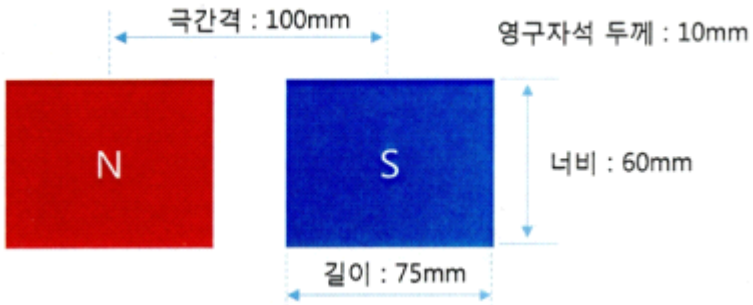
3.2.2.1. LPM 축소 모델과 구동 원리

가. LMP 축소 모델의 이동자(차체) 구조

LPM 축소 모델의 이동자(차체)는 그림 3.2.2.1의 (a)와 같이 SUS(Stainless Use Steel) 재질로 된 프레임 차체의 하단부에 영구자석 4개가 부착된 형태이다. 영구자석의 사이즈는 그림 3.2.2.1의 (b)와 같이 가로 75mm, 세로 60mm, 두께는 10mm이다. 영구자석의 N극과 S극 사이의 간격(Pole Pitch)은 100mm이며, 영구자석 사이는 25mm가 떨어져 있다. 영구자석은 잔류자속밀도가 1.21T로 에너지밀도가 높은 NdFeB 희토류 자석을 사용하였다.



(a) 이동자 하단부



(b) 영구자석 사이즈

그림 3.2.2.1 이동자(차체) 하단부 구조 및 영구자석 사이즈

나. LPM 축소 모델의 선로(고정자) 구조

그림 3.2.2.2는 LPM 축소 모델의 선로에 사용된 고정자 권선을 나타낸다. 붉은색 케이블이 LPM 고정자의 A상 권선이며, 파란색 케이블은 B상 권선으로 A상 권선 아래에 위치한다.



그림 3.2.2.2 LPM 축소 모델의 고정자 권선 케이블

본 연구의 LPM 축소 모델의 고정자 권선은 A상과 B상 2개를 가지며, 그림 3.2.2.3에 고정자 권선 레이아웃을 나타냈다. A상 권선과 B상 권선은 공간적으로 90° 의 위상차를 갖는다.

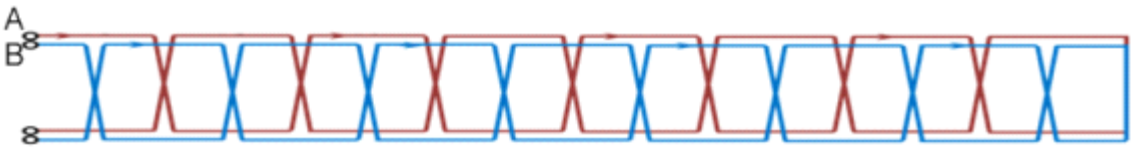


그림 3.2.2.3 LPM 축소 모델의 고정자 권선 레이아웃

그림 3.2.2.4는 고정자 권선에 인가되는 2상 전류 펄스 파형을 나타낸다. I_A는 A상 권선에 인가되는 전류, I_B는 B상 권선에 인가되는 전류를 각각 나타낸다.

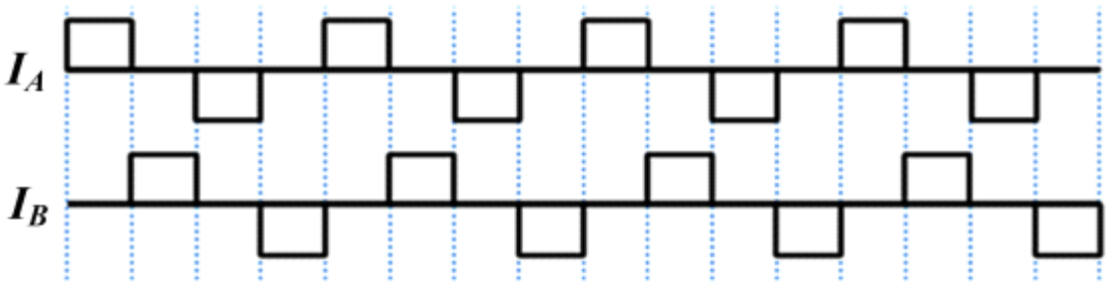


그림 3.2.2.4 2상 전류 펄스 파형

다. 2상 전류 펄스 파형의 생성

LPM 축소 모델의 전자계 해석을 위해서는 고정자 권선에 인가되는 2상 펄스 전류 파형을 시뮬레이션 상에서 구현해야 한다. 그림 3.2.2.5는 그림 3.2.2.4와 같은 2상 펄스 전류를 생성하기 위한 전력변환 회로를 나타낸다. Pulse Voltage Source 회로에서 메인 회로의 스위치 제어 신호를 생성하며, 펄스 전류의 펄스폭과 주파수 등을 제어한다. 펄스 전류의 펄스폭과 주파수는 그림 3.2.2.6에 나타낸 파라미터 값을 조정하여 제어할 수 있다.

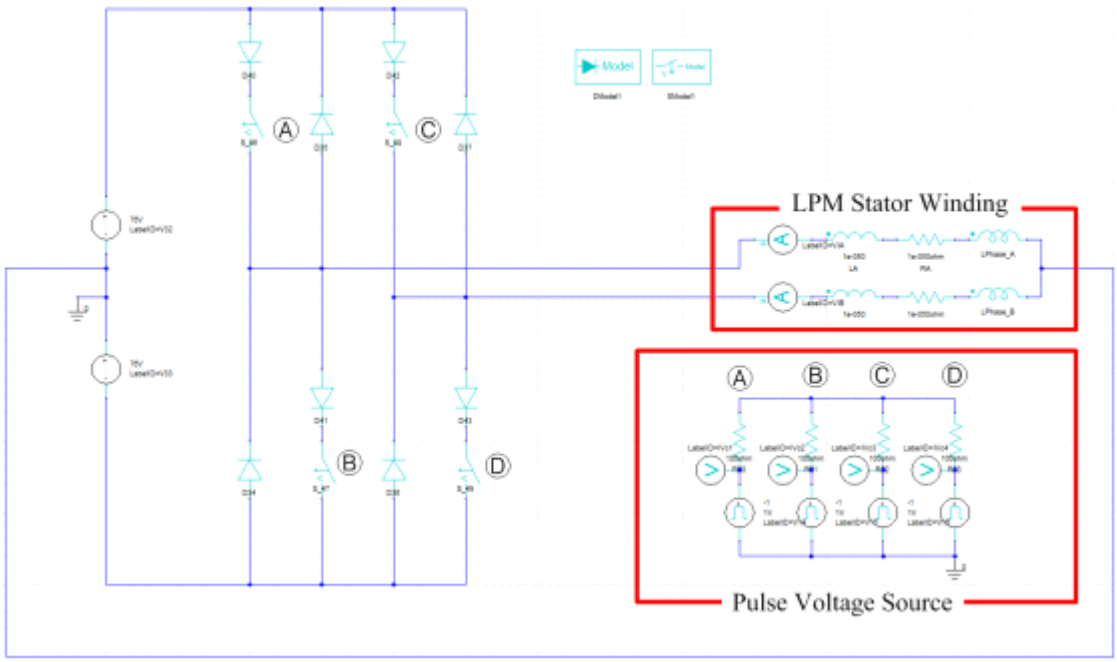


그림 3.2.2.5 2상 펄스 전류 생성을 위한 전력변환 회로

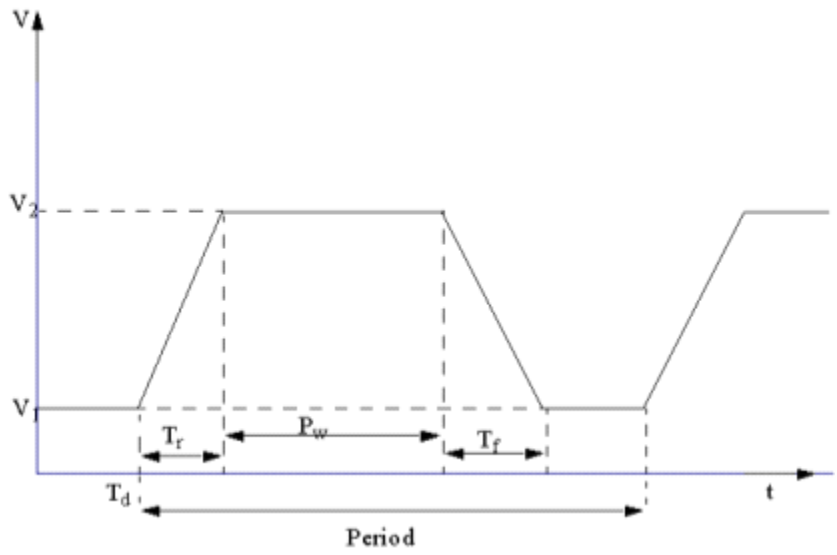


그림 3.2.2.6 펄스 파 형태 결정 요소

V_1 : Initial voltage in Volts

V_2 : Peak Voltage in Volts

T_d : Initial delay time

T_r : Rise time

T_f : Fall time

P_w : Pulse width

Period : Pulse period

차량 속도 v[m/s]가 주어지면 펄스파의 주기 Period는 다음 식을 통하여 계산할 수 있다. 여기서 τ는 극 간격[m]을 의미한다.

$$\text{Period} = \frac{2\tau}{v} \text{ [sec]}$$

T_d와 P_w 값은 통전 방식에 의해 결정되며, T_r과 T_f 값은 0으로 설정하고 전자계 해석을 수행하였다.

라. 이동자 위치에 따른 운전 모드에서의 이동자와 고정자 사이의 힘의 방향

LPM은 A상과 B상의 전류에 따라 4가지 운전 구간을 갖는다. 그림 3.2.2.7에서 운전 구간 I에서는 A상에서만 양의 전류가 흐르며, 고정자 권선은 그림 3.2.2.8(a)와 같은 극성을 갖는다. 운전 구간 II에서는 B상에만 양의 전류가 흐르며, 고정자 권선은 그림 3.2.2.8(b)와 같은 극성을 갖는다. 운전 구간 III에서는 A상에만 음의 전류가 흐르며, 고정자 권선은 그림 3.2.2.8(c)와 같은 극성을 갖는다. 운전 구간 IV에서는 B상에만 음의 전류가 흐르며, 고정자 권선은 그림 3.2.2.8(d)와 같은 극성을 갖는다. 운전 구간 IV 이후에는 다시 운전 구간 I부터 IV까지를 반복한다. 각각의 운전 구간은 이동자의 위치에 의해 결정된다. LPM 축소 모델에서 이동자의 위치는 홀센서를 통해 검출한다.

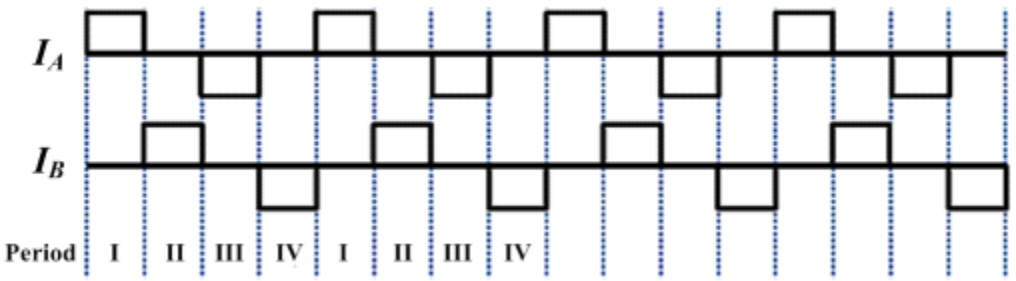


그림 3.2.2.7 2상 펄스 전류 파형에서의 운전 구간

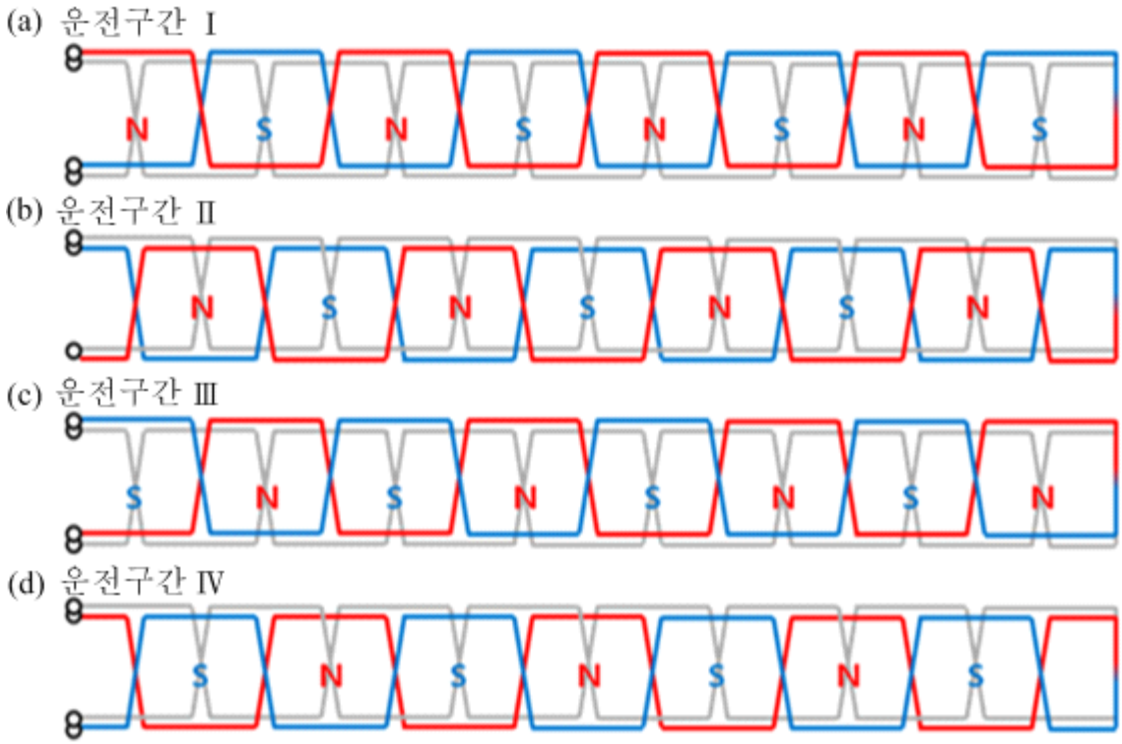


그림 3.2.2.8 운전 구간에 따른 고정자 권선에서의 극성 변화

(1) 운전 구간 Ⅰ

그림 3.2.2.9는 운전 구간 Ⅰ에서의 상태를 나타낸다. 이동자가 그림 3.2.2.10과 같은 위치에 있을 경우, A상 권선에만 양의 전류를 흘려주어 그림 3.2.2.10과 같이 A상 권선이 여자되어 N극과 S극이 반복적으로 나타나게 된다. 고정자의 S극과 이동자의 N극 사이와 고정자의 N극과 이동자의 S극 사이에 인력이 작용하여 이동자는 오른쪽 방향으로 힘을 받아 추진하게 된다.

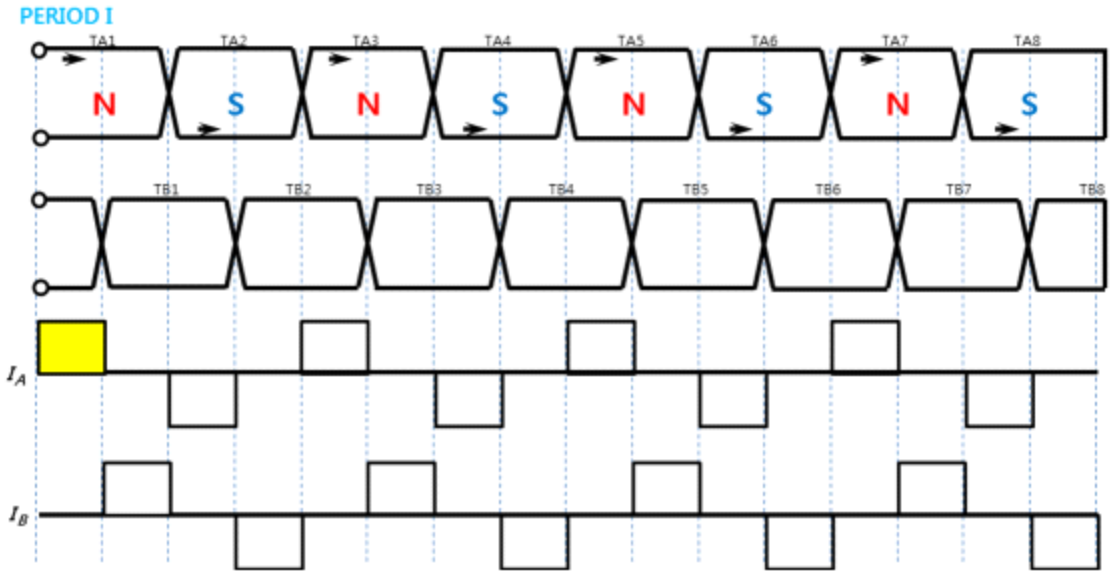


그림 3.2.2.9 운전 구간 Ⅰ에서의 전류 방향 및 극성

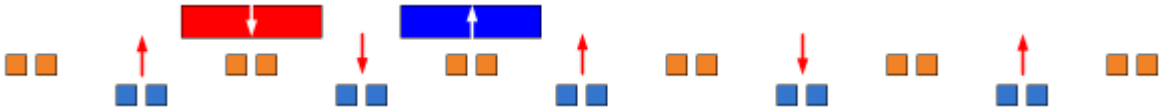


그림 3.2.2.10 운전 구간 I에서의 이동자 위치

(2) 운전 구간 II

그림 3.2.2.11은 운전 구간 II에서의 상태를 나타낸다. 이동자가 그림 3.2.2.12와 같은 위치에 있을 경우, B상 권선에만 양의 전류를 흘려주어 그림 3.2.2.12와 같이 B상 권선이 여자되어 N극과 S극이 반복적으로 나타나게 된다. 운전 구간 I에서와 마찬가지로 고정자의 S극과 이동자의 N극 사이와 고정자의 N극과 이동자의 S극 사이에 인력이 작용하여 이동자는 오른쪽 방향으로 힘을 받아 추진하게 된다.

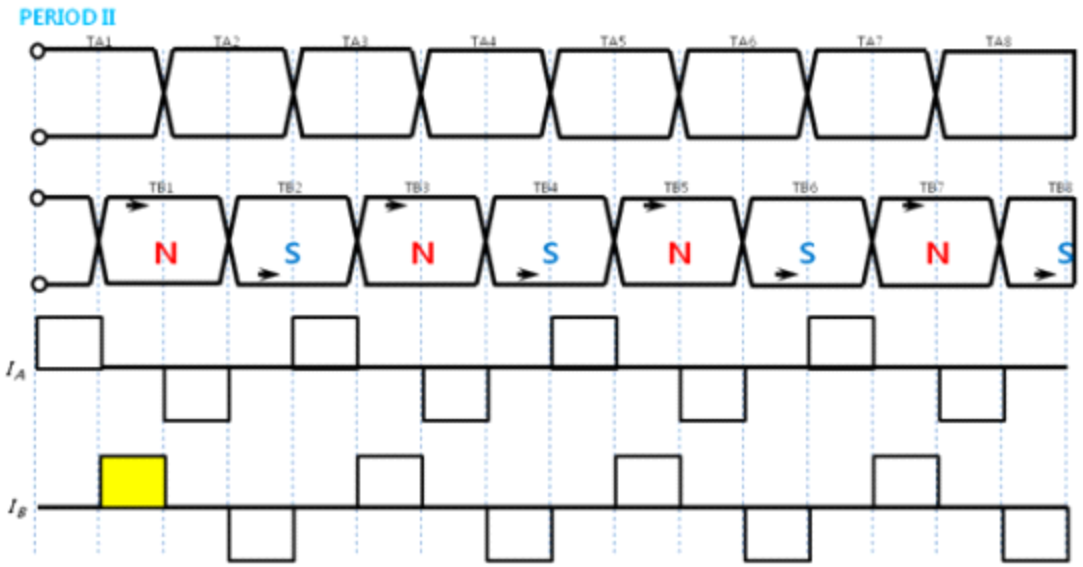


그림 3.2.2.11 운전 구간 II에서의 전류 방향 및 극성

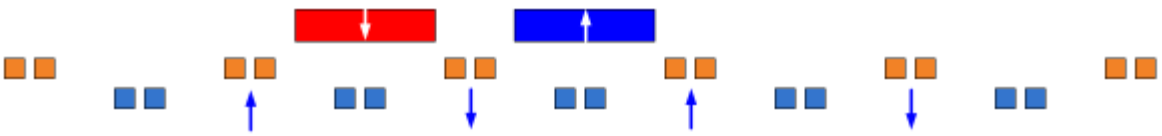


그림 3.2.2.12 운전 구간 II에서의 이동자 위치

(3) 운전 구간 III

그림 3.2.2.13은 운전 구간 III에서의 상태를 나타낸다. 이동자가 그림 3.2.2.14와 같은 위치에 있을 경우, A상 권선에만 음의 전류를 흘려주어 그림 3.2.2.14와 같이 A상 권선이 여자되어 S극과 N극이 반복적으로 나타나게 된다. 운전 구간 I, II에서와 마찬가지로 고정자의 S극과 이동자

의 N극 사이와 고정자의 N극과 이동자의 S극 사이에 인력이 작용하여 이동자는 오른쪽 방향으로 힘을 받아 추진하게 된다.

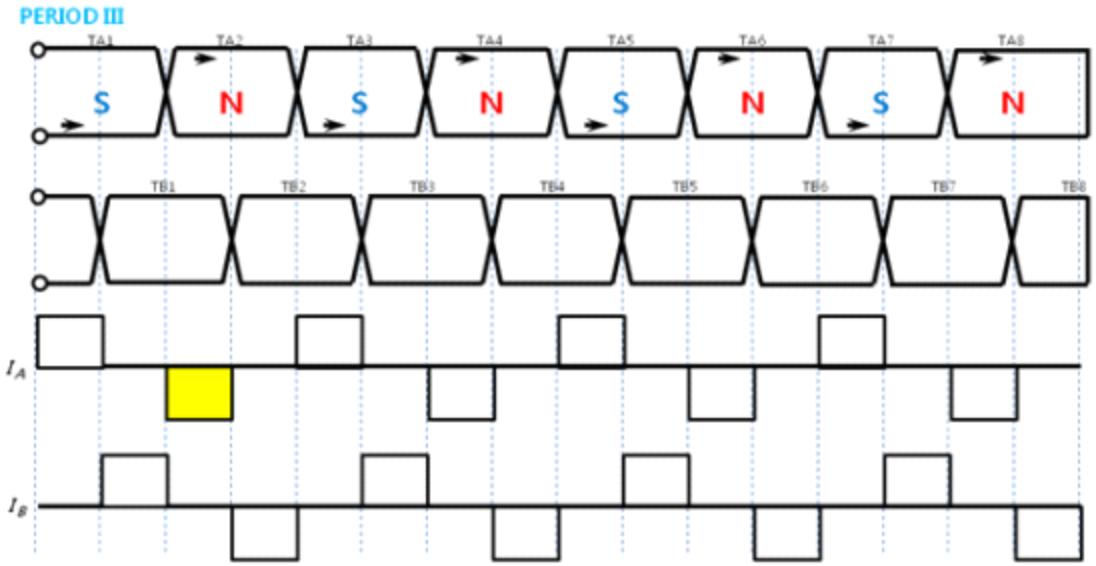


그림 3.2.2.13 운전 구간 III에서의 전류 방향 및 극성

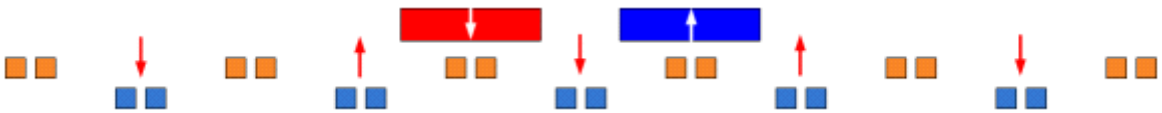


그림 3.2.2.14 운전 구간 III에서의 이동자 위치

(4) 운전 구간 IV

그림 3.2.2.15는 운전 구간 IV에서의 상태를 나타낸다. 이동자가 그림 3.2.2.16과 같은 위치에 있을 경우, B상 권선에만 음의 전류를 흘려주어 그림 3.2.2.16과 같이 B상 권선이 여자되어 S극과 N극이 반복적으로 나타나게 된다. 운전 구간 I, II, III에서와 마찬가지로 고정자의 S극과 이동자의 N극 사이와 고정자의 N극과 이동자의 S극 사이에 인력이 작용하여 이동자는 오른쪽 방향으로 힘을 받아 추진하게 된다.

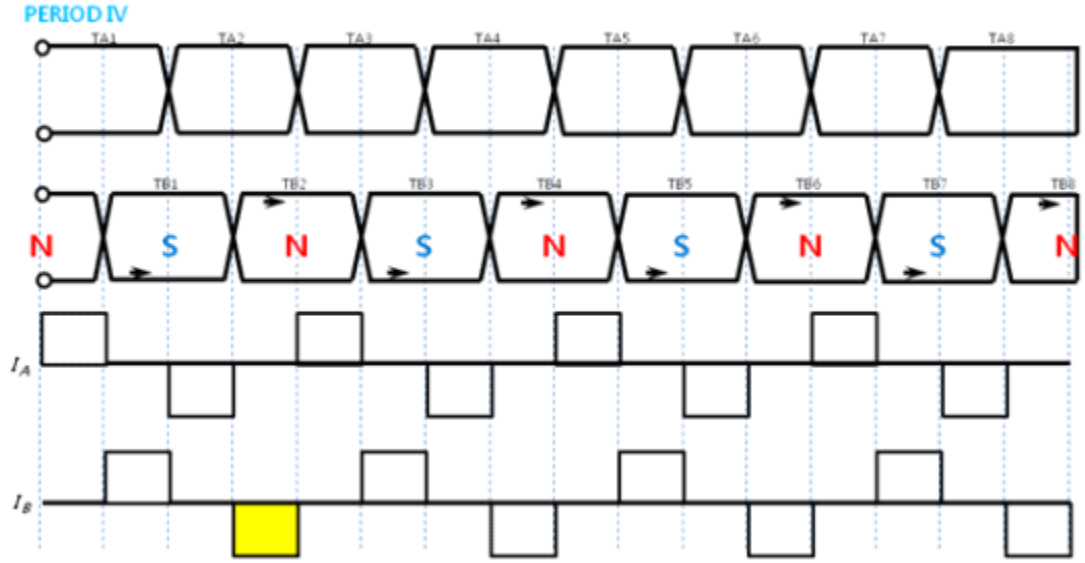


그림 3.2.2.15 운전 구간 IV에서의 전류 방향 및 극성



그림 3.2.2.16 운전 구간 IV에서의 이동자 위치

마. 이동자와 고정자 권선 사이의 힘

LPM 축소 모델의 이동자가 받는 힘은 그림 3.2.2.17과 같이 추력(Thrust Force)과 수직력(Normal Force)으로 나눌 수 있다. 추력은 이동자의 진행방향으로 발생하는 힘을 의미하며, 수직력은 이동자의 진행방향에 수직인 방향으로 발생하는 힘으로 (+) 값은 부상력을, (-)값은 흡인력을 각각 의미한다. 철도차량 추진용 LPM의 경우, LPM은 추진만 담당하고 휠과 레일에 의해 LPM의 일정 공극을 유지하므로 부상력이 증가하면 차량의 휠과 레일 사이의 점착력이 약해져 탈선의 위험성이 증가하는 문제가 있으며, 흡인력이 증가할 경우에는 점착력은 증가하지만 차량의 하중도 함께 증가하여 에너지 효율이 감소한다. 따라서 수직력은 0에 가까운 것이 좋다.

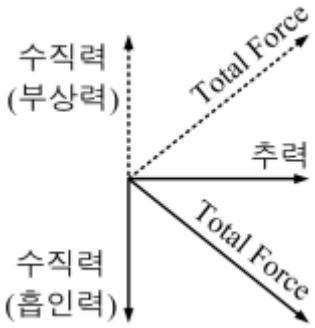


그림 3.2.2.17 이동자와 권선 간의 힘의 방향

3.2.2.2. LPM 축소 모델의 전자계 해석

가. LPM 축소 모델과 유한요소해석 모델

(1) LPM 축소 모델 설계 파라미터

LPM 축소 모델의 설계 파라미터는 다음 그림 3.2.2.18에 나타냈으며, 파라미터 값은 표 3.2.2.1에 표기하였다.

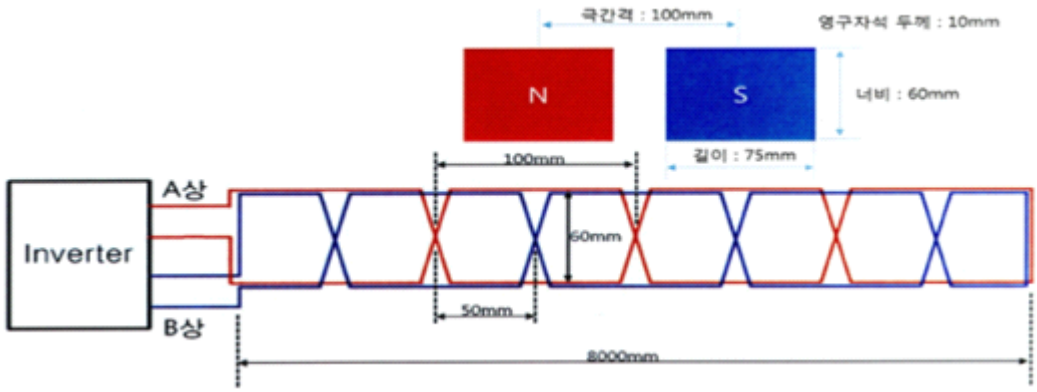


그림 3.2.2.18 LPM 축소 모델의 설계 파라미터

표 3.2.2.1 축소 모델 설계 파라미터 값

설계 파라미터	값	단위
공극 길이	5	mm
이동자 극 간격	100	mm
고정자 극 간격	100	mm
A상과 B상 권선 간격	50	mm

영구자석 및 고정자 권선 너비	60	mm

(2) LPM 2차원 유한요소해석 모델

LPM 축소 모델의 전자계 해석을 위한 2차원 유한요소해석 모델을 그림 3.2.2.19에 권선 방향과 함께 나타냈다. (+)는 권선이 나오는 방향을, (-)는 권선이 들어가는 방향을 의미한다. 2차원 유한요소해석 모델에서는 X-Y 평면에 모델이 표현되므로 Z 방향의 사이즈를 모델 상에서는 알 수 없다. 이런 경우 Z 방향으로 1m라고 가정하여 계산한 후 실제 모델의 Z 방향 길이(LPM의 경우 영구자석 및 고정자 권선의 너비)를 곱하여 정확한 결과를 얻을 수 있다. LPM 축소 모델의 경우 Z 방향 길이는 60mm이므로, 1m 계산 결과(역기전력, 추력, 수직력)에 0.06을 곱하면 된다. 영구자석 재질은 1.21T의 잔류자속밀도와 1.05의 비투자율을 갖는다. 해석 모델에서 영구자석 N극의 자화 방향은 아래쪽, S극의 자화 방향은 위쪽을 향한다.

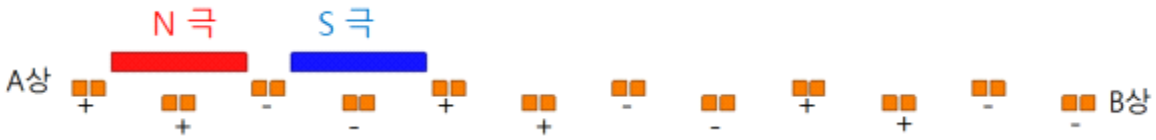


그림 3.2.2.19 LPM 축소 모델의 2차원 유한요소해석 모델

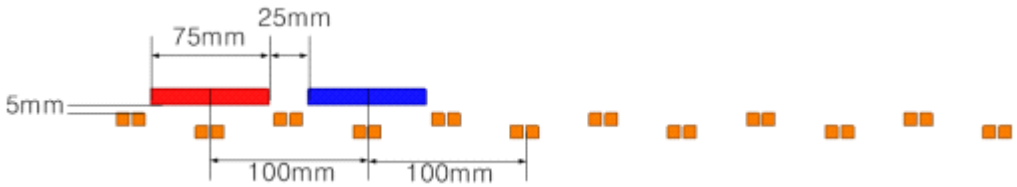


그림 3.2.2.20 2차원 유한요소해석 모델의 사이즈

그림 3.2.2.21은 고정자 권선(A상, B상)의 사이즈를 나타낸다. LPM 축소 모델은 B상 권선 위에 A상 권선이 배치되는 구조를 갖고 있어서, A상 권선과 이동자의 영구자석은 가깝지만 B상 권선과는 멀다. 따라서 A상과 B상의 간격은 매우 중요한 설계 변수가 된다. 해석 모델에서 A상과 B상의 상하 간격은 5mm로 설정하였다. 실제 LPM 축소 모델의 경우 권선의 피복 두께에 의해 5mm정도 간격이 벌어진다. 권선 도체의 모양은 유한요소해석 결과에 큰 영향을 미치지 않으므로 단순하게 정사각형으로 모델링하였다.

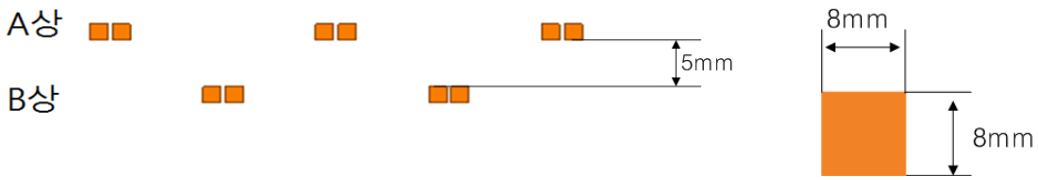


그림 3.2.2.21 2차원 유한요소해석 모델의 권선 사이즈

그림 3.2.2.22는 2차원 유한요소해석 모델의 요소분할도를 나타낸다. 요소(Element) 수는 총 5858개이다.

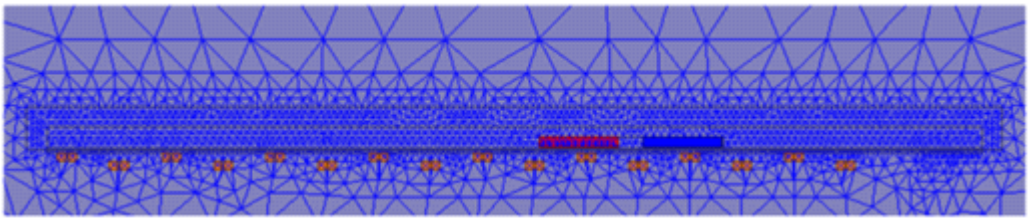


그림 3.2.2.22 2차원 유한요소해석 모델의 요소분할도

(3) LPM 3차원 유한요소해석 모델

LPM 축소 모델의 전자계 해석을 위한 3차원 유한요소해석 모델을 그림 3.2.2.23에 권선 방향과 함께 나타냈다. 2차원 해석 모델과 동일한 권선 방향을 가지고 있으며, 해석 조건도 2차원 해석 모델과 동일하다.

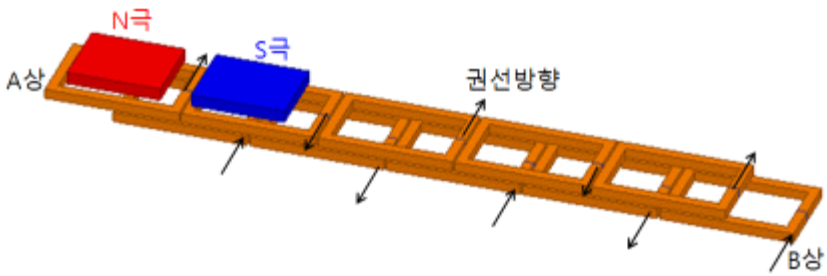


그림 3.2.2.23 3차원 유한요소해석 모델

그림 3.2.2.24는 3차원 유한요소해석 모델의 사이즈를 나타내며, 2차원 해석 모델과 동일한 사이즈로 모델링하였다.

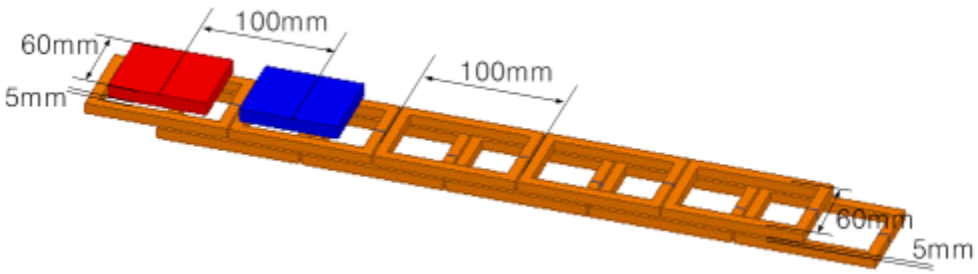


그림 3.2.2.24 3차원 유한요소해석 모델의 사이즈

그림 3.2.2.25는 3차원 유한요소해석 모델의 요소분할도를 나타낸다. 해석 모델의 전체 요소 개수는 158,031개로 2차원 해석 모델보다 약 27배 더 많으며 해석 시간 또한 매우 증가하게 된다.

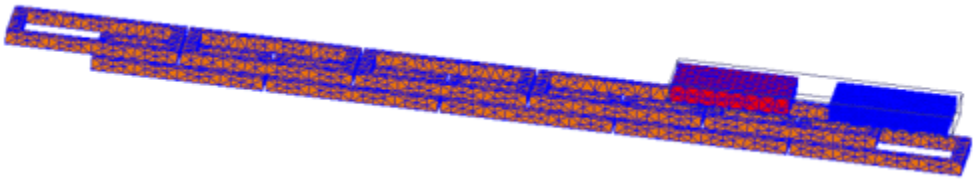


그림 3.2.2.25 3차원 유한요소해석 모델의 요소분할도

나. LPM 축소 모델과 유한요소해석 모델의 역기전력 비교

(1) LPM 축소 모델의 역기전력 측정

LPM 축소 모델의 무부하 역기전력을 측정하기 위해 고정자 권선을 개방한 상태에서 이동자를 강제로 밀어서 관성으로 움직이는 순간 고정자 권선에서 발생하는 전압을 측정하였다. 측정결과 역기전력 파형은 그림 3.2.2.26에 나타냈다. A상의 역기전력은 32.8mV, B상은 22mV가 발생하였으며, 이때의 주파수는 5.575Hz로 이동자의 이동속도로 환산하면 4.014km/h이다. 영구자석과의 A상 권선의 거리가 더 가까우므로 A상 권선에서 더 높은 역기전력이 측정된다.

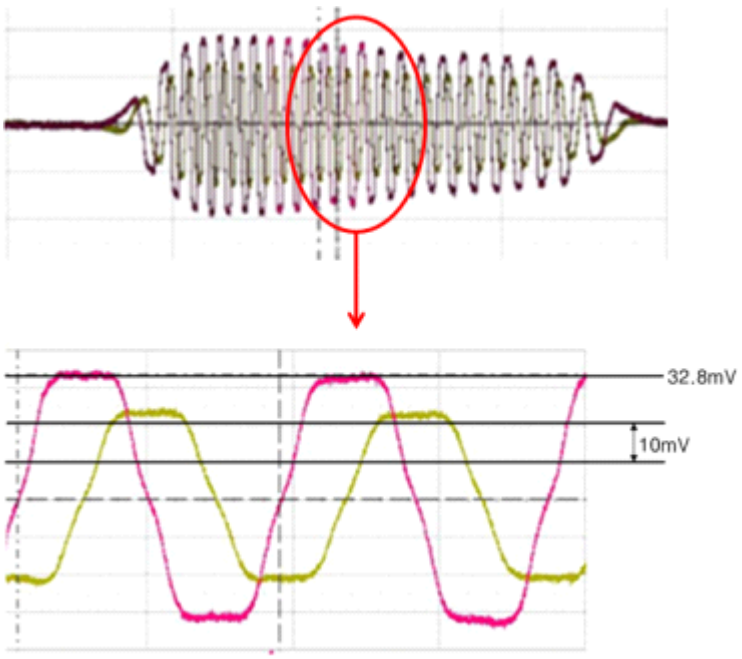


그림 3.2.2.26 LPM 축소 모델의 무부하 역기전력 측정 파형

(2) 2차원 유한요소해석 모델의 역기전력

2차원 유한요소해석 모델에서 역기전력 측정 시와 동일한 조건으로 전자장 해석을 수행한 결과, 그림 3.2.2.27과 같은 무부하 역기전력 파형을 얻었다. A상의 역기전력은 33.38mV, B상은 22.79mV로 측정 결과와 거의 동일한 결과가 나왔다. 따라서 2차원 유한요소해석의 타당성이 입증되었다.

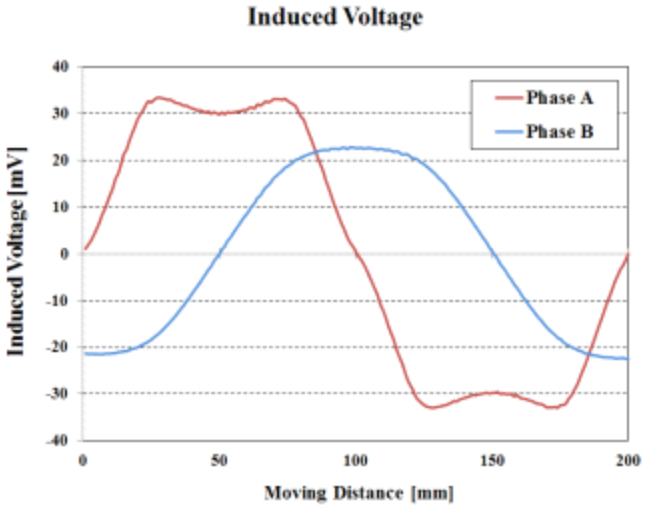


그림 3.2.2.27 2차원 유한요소해석 모델의
무부하 역기전력 파형

(3) 3차원 유한요소해석 모델의 역기전력

3차원 유한요소해석 모델에서 역기전력 측정 시와 동일한 조건으로 전자장 해석을 수행한 결과, 그림 3.2.2.28과 같은 무부하 역기전력 파형을 얻었다. A상의 역기전력은 33.33mV, B상은 19.24mV로, 실측 결과와 2차원 해석 결과, 3차원 해석 결과가 모두 비슷한 값을 갖는다. 따라서 3차원 유한요소해석의 타당성도 입증되었다.

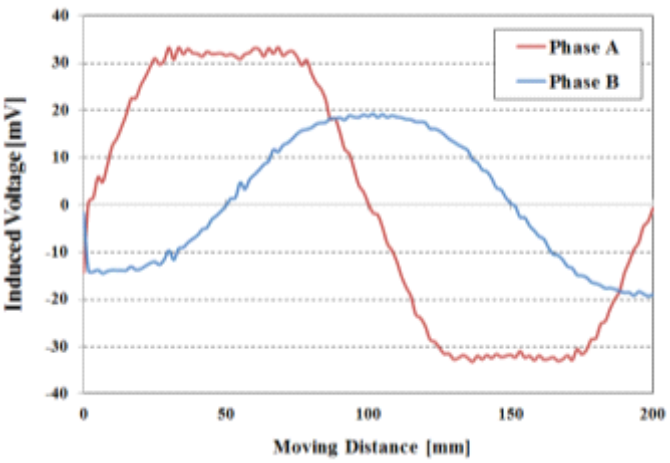


그림 3.2.2.28 3차원 유한요소해석 모델의 무부하
역기전력 파형

다. LPM 성능 특성 해석

(1) 펄스파 전류의 생성

LPM은 마이크로 스텝 구동 방식으로 고정자 권선에 정현파에 가까운 전류를 인가할 수 있으나, 한 주기 동안 여러 번의 스위칭을 해야 하므로 많은 스위칭 손실이 발생한다. 철도차량과 같이 차체의 관성이 크고 대용량의 전원이 인가되는 LPM의 경우에는 단일 펄스 구동이 적합하다. 단일 펄스 구동 시 한 주기 동안 하나의 스위칭 소자에서 2번(ON 1회, OFF 1회)의 스위칭이 일어난다.

LPM의 단일 펄스 구동에 의해 그림 3.2.2.29와 같은 펄스 형태의 전류가 인가되는데, LPM의 전자계 해석을 위해서는 동일한 형태의 펄스 전류를 해석 모델에서 구현해야 한다. 따라서 LPM 전자계 해석 모델의 펄스 전류 생성을 위해 그림 3.2.2.29와 같이 별도의 외부 회로를 만들었다. 그림 3.2.2.29의 외부 회로에서 Pulse Voltage Source 회로를 통하여 스위칭 시간을 조절하여 펄스파의 형태를 결정할 수 있다.

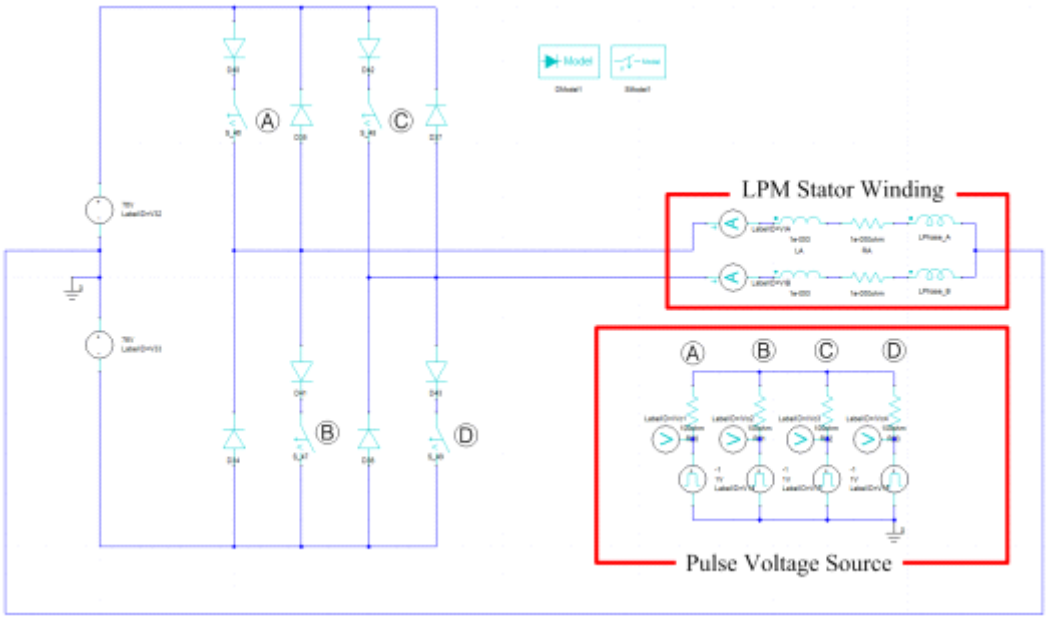


그림 3.2.2.29 2상 펄스 전류 생성을 위한 LPM 전자계 해석 모델의 외부 회로

그림 3.2.2.30은 외부 회로에서 펄스파 생성을 위한 스위치 타이밍의 파라미터를 나타내며, 표 2는 파라미터 설정 값을 나타낸다. LPM 축소 모델의 경우 극 간격이 100mm이고 최대 속도가 0.4m/s이다. 따라서 최대 속도에서의 Period는 앞의 식 (2.3.2.1)에 의해 0.5sec가 되고, 주파수는 Period의 역수이므로 2Hz가 된다. 또한 LPM의 극 간격이 100mm이므로 이동자는 1주기 동안 200mm를 이동한다.

표 3.2.2.2에 나타낸 파라미터 설정 값은 LPM 축소 모델이 최대 속도 0.4m/s로 달리기 위해 필요한 펄스 전류의 설정 값이다. Rising Time T_r과 Falling Time T_f는 스위칭 소자의 용량 및

제조사에 따라 다르며, LPM 축소 모델의 경우 저속으로 운행되므로 Rising Time이나 Falling Time에 비해 주기가 매우 긴 편이다. 따라서 유한요소해석 모델에서는 T_r과 T_f는 0으로 설정하였다.

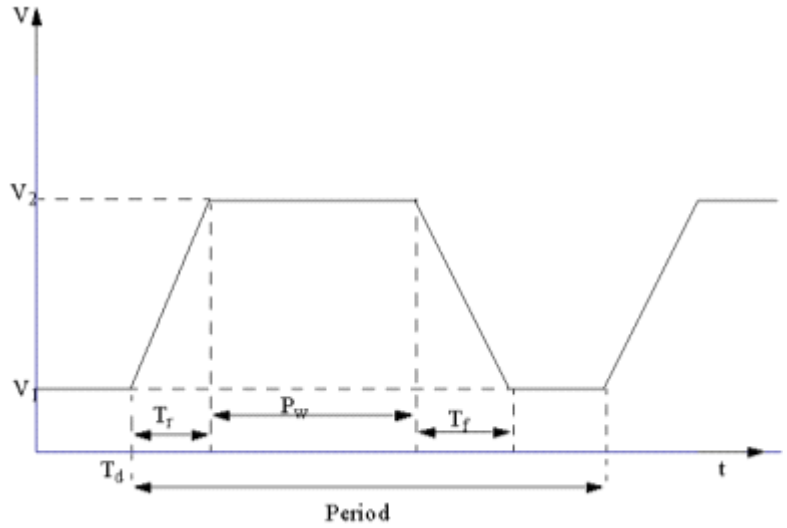


그림 3.2.2.30 펄스파 생성을 위한 스위치 타이밍의 파라미터

표 3.2.2.2 스위치 타이밍의 파라미터 설정 값

	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ
period [s]	0.5	0.5	0.5	0.5
Td [s]	0	0.25	0.125	0.375
Tr [s]	0	0	0	0
Pw [s]	0.125	0.125	0.125	0.125
Tf [s]	0	0	0	0

그림 3.2.2.31은 외부 회로에서 생성된 펄스 전류 파형을 나타낸다. 이 전류가 2차원과 3차원 유한요소해석 모델의 전류 입력 값으로 사용된다.

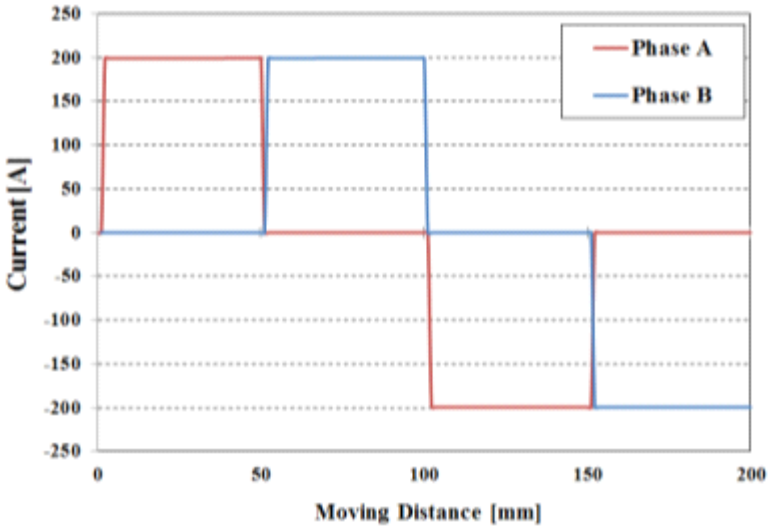


그림 3.2.2.31 외부 회로에서 생성된 펄스 전류 파형

(2) 2차원 유한요소해석 모델의 성능 특성

그림 3.2.2.19의 2차원 유한요소해석 모델에 그림 3.2.2.31의 펄스 전류를 인가하여 유한요소해석을 수행하였다. LPM 축소 모델에 대한 2차원 유한요소해석 결과, 그림 3.2.2.32와 같은 추력 파형과 그림 3.2.2.33과 같은 수직력 파형을 얻었다. 2차원 유한요소해석 모델은 2극에 대한 출력만 나타내지만, LPM 축소 모델은 4극을 갖기 때문에 해석 결과 값에 2배를 취해주면 LPM 축소 모델의 실제 출력이 된다. 2차원 유한요소해석 결과 평균 추력은 4.63N, 수직력은 -2.3N이 발생하였다. 따라서 LPM 축소 모델에 200A의 펄스 전류가 인가될 경우, 해석 결과 값의 2배인 9.26N의 추력과 -4.6N의 수직력이 발생할 것으로 예측할 수 있다.

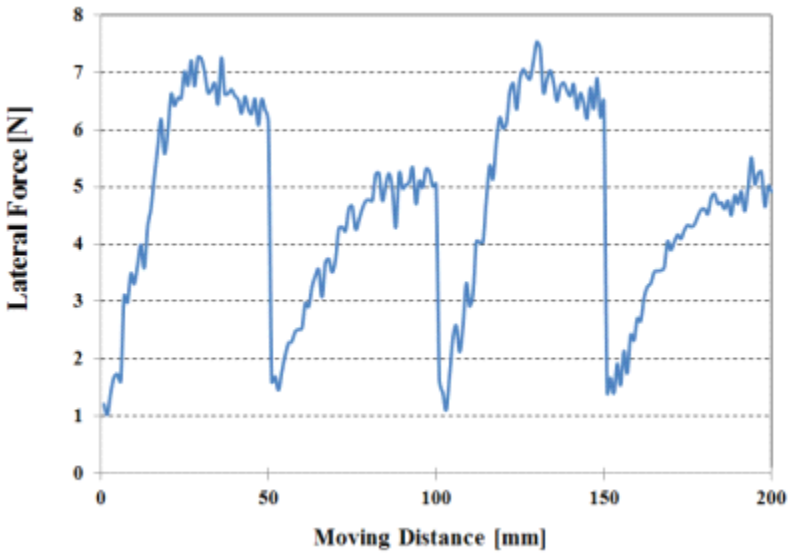


그림 3.2.2.32 2차원 유한요소해석 모델의 추력 특성

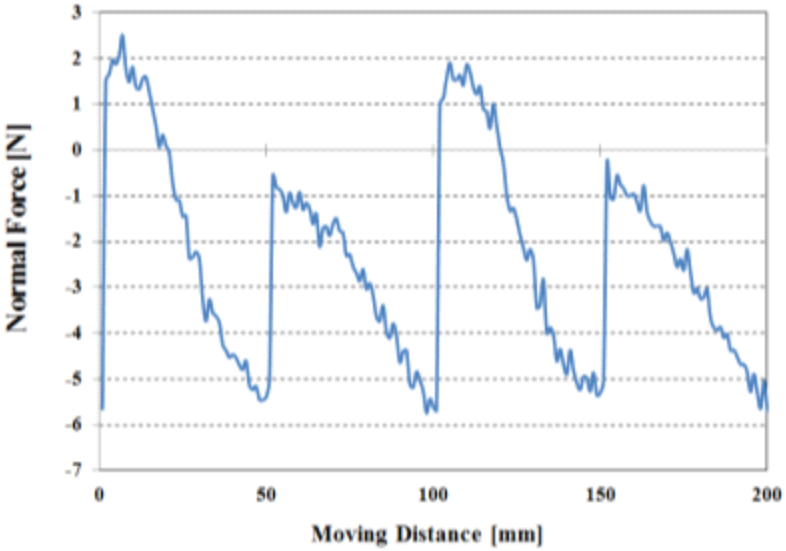


그림 3.2.2.33 2차원 유한요소해석 모델의 수직력 특성

표 3.2.2.3 2차원 유한요소해석 모델의 추력 및 수직력

	평균 값	리플 값	단위
추력	4.65	6.42	N
수직력	-2.30	7.59	N

(3) 3차원 유한요소해석 모델의 성능 특성

LPM 축소 모델에 대한 3차원 유한요소해석도 2차원 해석과 동일하게 200A의 펄스 전류를 3차원 해석 모델에 인가하여 진행하였다. LPM 축소 모델에 대한 3차원 유한요소해석 결과, 그림 3.2.2.34와 같은 추력 파형과 그림 3.2.2.35와 같은 수직력 파형을 얻었다. 3차원 유한요소해석 모델도 2차원 모델과 마찬가지로 2극에 대한 출력만 나타내므로 LPM 축소 모델의 실제 출력은 해석 결과 값에 2배를 취해야 한다. 3차원 유한요소해석 결과 평균 추력은 5.05N, 수직력은 -102.29N이 발생하였다. 따라서 LPM 축소 모델에 200A의 펄스 전류가 인가될 경우, 해석 결과 값의 2배인 10.1N의 추력과 -204.58N의 수직력이 발생할 것으로 예측할 수 있다. 그러나 2차원 유한요소해석 결과와 비교하면, 추력의 크기는 거의 유사한 결과를 나타내지만, 수직력에서 매우 큰 차이를 보인다. 3차원 유한요소해석 상의 문제로 보이나 정확한 원인은 더 조사를 해야 할 것이다. 만약, LPM 축소 모델의 수직력이 3차원 유한요소해석 결과대로 -204.58N이 발생한다면, LPM 축소 모델의 실제 중량 5.4kg에 -204.58N의 수직력이 가해져서 약 21kg의 하중이 추가될 것이다. 따라서 차량 중량의 4배에 달하는 하중이 증가되어 차량의 추진 성능은 매우 저하될 것이다.

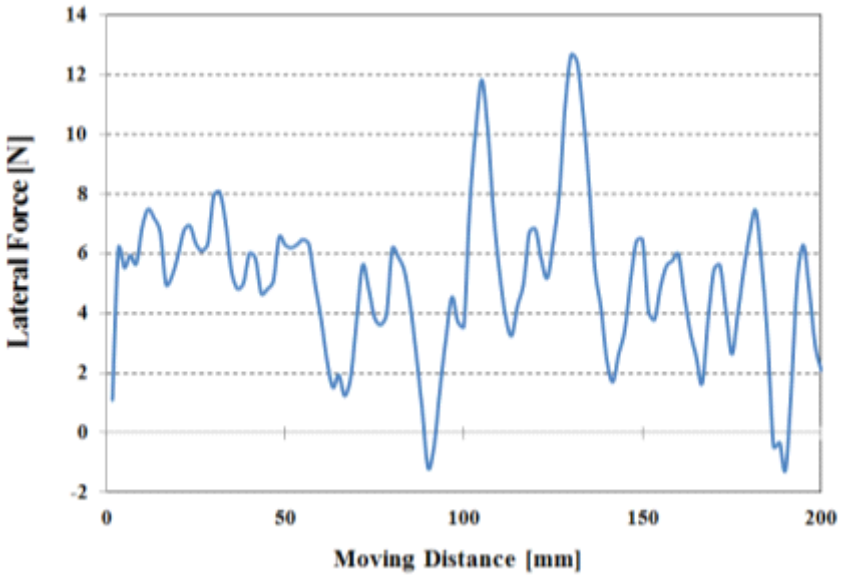


그림 3.2.2.34 유한 요소법 LPM 3D 모델 추력

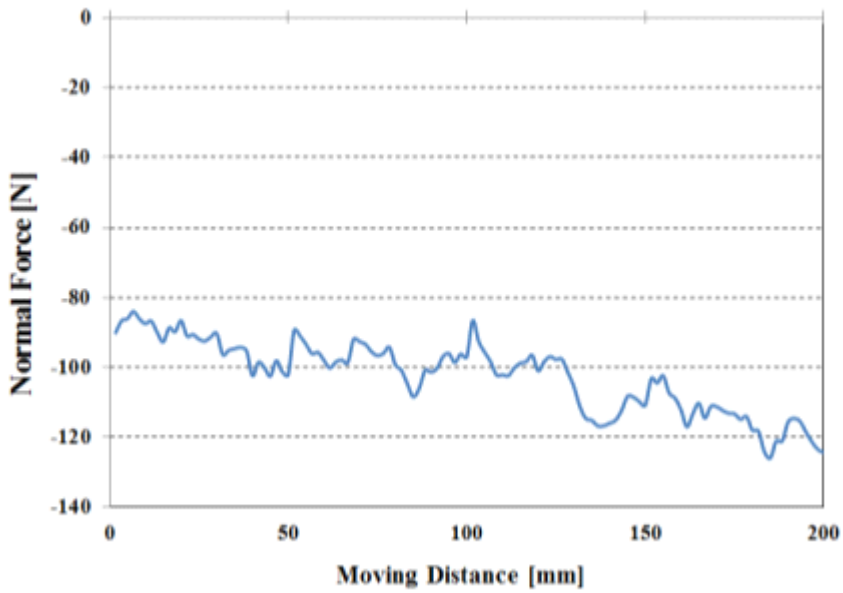


그림 3.2.2.35 유한 요소법 LPM 3D 모델 흡인력

표 3.2.2.4 3차원 유한요소해석 모델의 추력 및 수직력

	평균 값	리플 값	단위
추력	5.05	13.88	N
수직력	-102.29	41.92	N

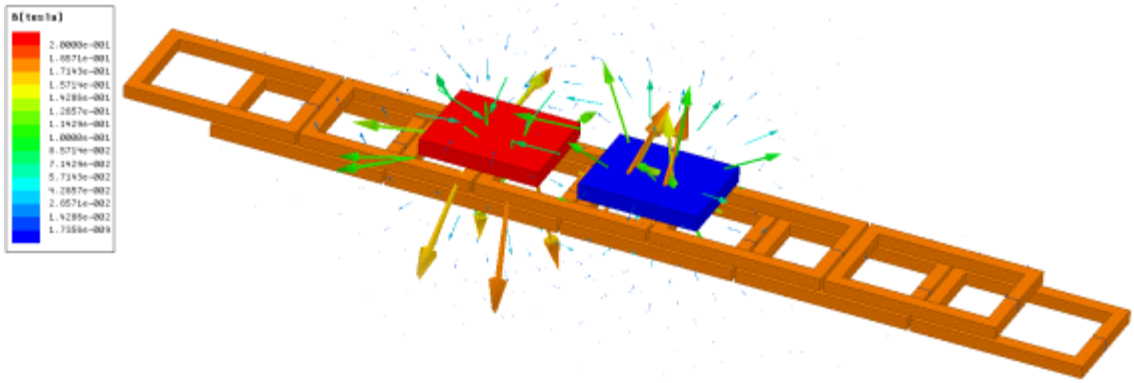


그림 3.2.2.36 3차원 유한요소해석 결과 - 자속밀도 벡터도

3.2.3. LPM 추진시스템 분석 및 토크 리플 저감 연구

3.2.3.1. 고정자 상권선 적층에 따른 발생 토크 리플 저감

가. 역기전력 상수

LPM에서 차량 하부의 전자석에서 발생한 자속은 고정자 A상 및 B상 권선에 쇄교한다. 또한 고정자 A상 권선에서 발생하는 자속의 방향과 전자석에서 발생한 자속의 방향이 일치하는 경우의 각도를 0도($\theta_r = 0^\circ$)로 보면 차량의 이동에 따라 전자석에서 발생한 자속과 각각의 고정자 권선에서 발생하는 자속이 이루는 공간적인 각도가 변화한다. 따라서 쇄교하는 쇄교자속량 또한 공간(θ)에 대하여 변화한다. 이러한 쇄교자속의 공간(θ)에 따른 변화는 패러데이(Faraday)의 법칙에 따라 유기기전력(Electromotive Force)을 발생시키며 식 3.2.3.1과 같다.

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} \tag{3.2.3.1}$$

식 3.2.3.1에서 e는 발생하는 유기기전력이며 λ는 전자석에서 발생한 자속 성분이 권선에 쇄교하는 쇄교자속량이다.

A상 및 B상 권선에 쇄교하는 쇄교자속의 형태가 각각 $\cos(\theta_r)$ 및 $\sin(\theta_r)$의 함수로 표현된다면 A상에 유기되는 유기기전력은 각각 $\sin(\theta_r)$ 및 $-\cos(\theta_r)$의 함수로 표현되지만 LPM의 역기전력은 180도 반주기를 기준으로 90도 동안 일정하게 유지되는 평탄한 역기전력을 보이며 평탄한 부분 전반부 및 후반부에 45도씩 증가 및 감소하는 구간을 가지는 근사 사다리꼴 형태를 이룬다. 따라서 LPM의 쇄교자속은 $\cos(\theta_r)$의 함수로 표현할 수 없으며 선형적인 기울기는 가지는 1차 함수 구간과 기울기가 가변되는 2차 함수 구간이 90도씩 교번하며 나타남으로 그림

3.2.3.1과 같다.

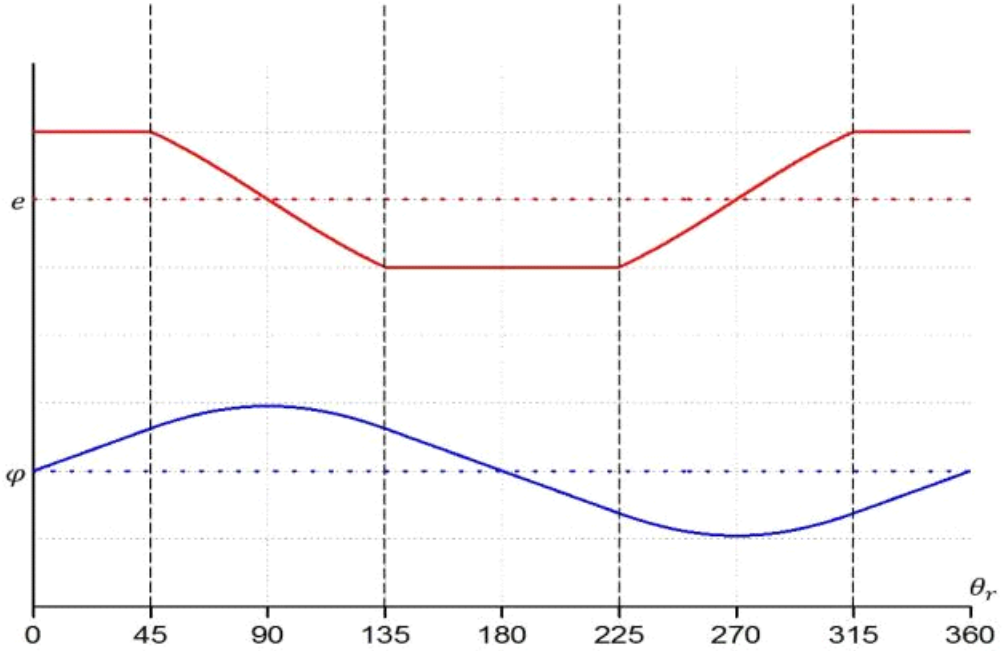
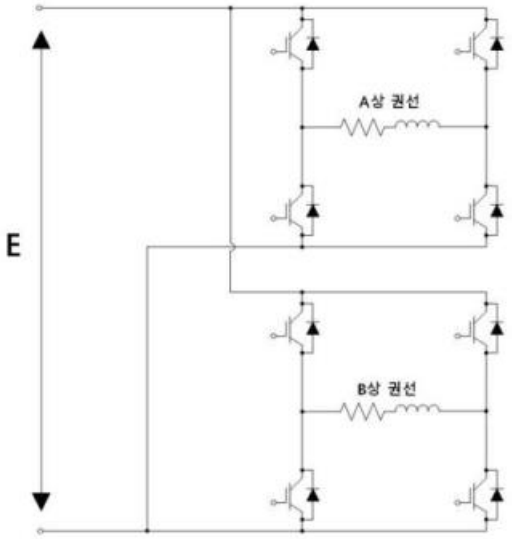
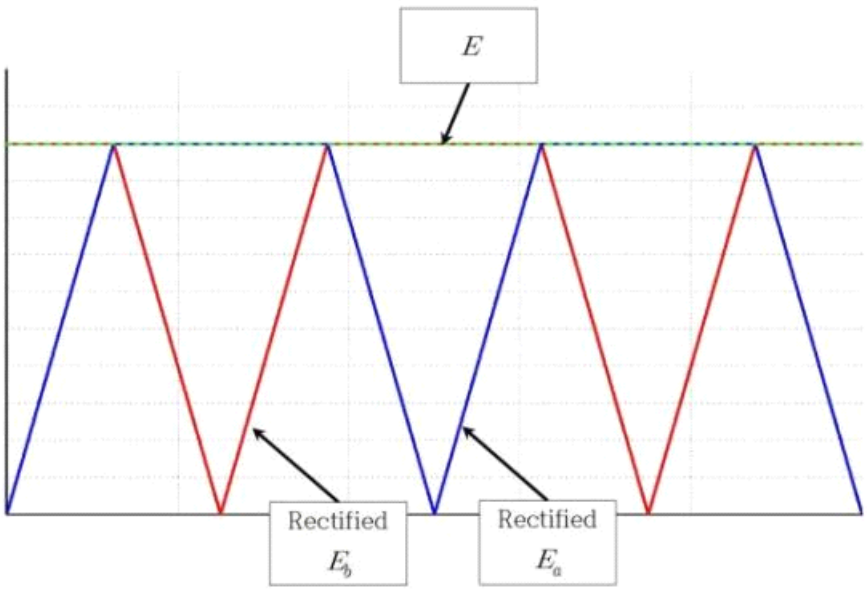


그림 3.2.3.1 LPM의 유기기전력 및 쇄교자속 파형

LPM 시스템의 경우 그림 3.2.3.2의 (a)와 같이 풀 브릿지 인버터 2개가 병렬로 연결된 형태로 A상 권선 및 B상 권선에 유기되는 역기전력은 스위칭 소자의 내부 다이오드에 의해 정류된다. 따라서 각 상의 물리적인 특성 및 쇄교자속의 최대치가 동일하여 발생하는 역기전력의 최대치가 같다고 가정하면 각 상 권선이 공간적으로 90도 이격되어 설치됨에 따라 역기전력이 평탄하게 유지되는 구간은 A상 및 B상이 교번하여 발생한다. 이를 정류한 파형은 역기전력이 이상적인 근사사다리꼴임을 가정하면 그림 3.2.3.2의 (b)와 같이 직류 형태로 표현된다. 따라서 각 상에서 발생하는 역기전력은 강자성체(Ferromagnetic Substance)인 자로를 사용하지 않는 코어레스 방식임으로 상 권선의 자기 포화 현상을 고려하지 않고 온도 변화로 인한 영구자석의 감자 현상 및 기타 사유로 인한 감자 현상에 따른 영구자석이 발생 자속량의 변동을 무시하여 전자석에서 발생하는 자속이 일정하다고 가정하고 또한 고정자 각 상권선과 전자석 사이의 공극이 일정하다고 가정하면 기계각속도 및 최대 쇄교자속량에 비례하여 역기전력의 최대치는 선형적으로 증가한다. 이에 상 권선에 쇄교하는 쇄교자속의 미분형태로 표시되는 유기기전력은 기계각속도와 상권선에 쇄교하는 쇄교자속량, 기계각속도와의 고정 값을 갖는 상수(Constant)와 곱으로 표현가능하며 식 3.2.3.2와 같다.



(a) 병렬 구조의 풀 브릿지 인버터



(b) 스위칭 소자 내부 다이오드에 의한 역기전력 정류

그림 3.2.3.2 스위칭 소자 내부 다이오드에 의한 역기전력 정류

$$E = K\lambda_m\omega_m \tag{3.2.3.2}$$

식 3.2.3.2에서 E는 정류된 발생역기전력, K는 고정 값을 갖는 상수, λ_m은 전자석의 발생 자속이 고정자 상 권선에 쇄교하는 쇄교자속량의 최대치, ω_m은 기계각속도이다. 또한 $K\lambda_m$을 역기전력 상수 K_e(Back-Electromotive Force Constant)로 표시하면 식 3.2.3.3과 같다.

$$E = K_e w_m \tag{3.2.3.3}$$

하지만 실제 LPM은 상권선 적층 구조로 발생하는 공극 길이의 변화로 인하여 각각의 상 권선에 쇄교하는 쇄교자속의 최대치가 변화한다. 이러한 쇄교자속 최대치의 변화는 각 권선에 유기되는 역기전력의 크기가 동일한 기계각속도에서 같지 않음을 의미하며 역기전력 상수가 단일 고정 값으로 표현되지 않는다. 이때 정류되어진 역기전력은 그림 3.2.3.3과 같으며 이 때 역기전력은 식 3.2.3.4와 같다.

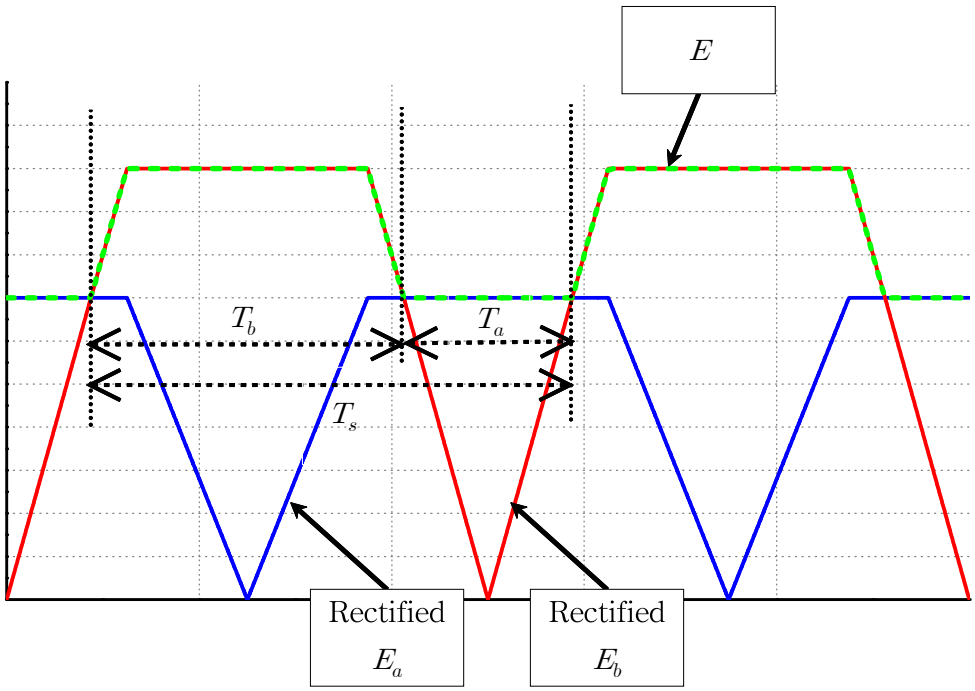


그림 3.2.3.3 상권선 적층 효과를 고려한 역기전력

$$E = \frac{1}{T_s}\left(\int_0^{T_b} e_b dt + \int_{T_b}^{T_a} e_a dt\right) \tag{3.2.3.4}$$

여기서 전력은 정류된 역기전력과 직류전원단에서 공급되는 전류의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서 회전자의 각 위치에 따라 2상의 고정자 상권선 중 역기전력이 평탄하게 발생되는 한 권선에만 전류가 인가됨으로 전력에 기여하고 있는 역기전력 성분인 E_{act}만을 표시하면 그림 3.2.3.4와 같다. 따라서 현재 전력에 기여하고 있는 상에 따라 정류된 역기전력의 최대치는 2가지 값을 가지며 이에 역기전력 상수도 2가지 고정 값을 갖는 형태로 표현 가능하다. 이는 회전자 각 위치를 기준으로 나타낼 수 있으며 식 3.2.3.5와 같다.

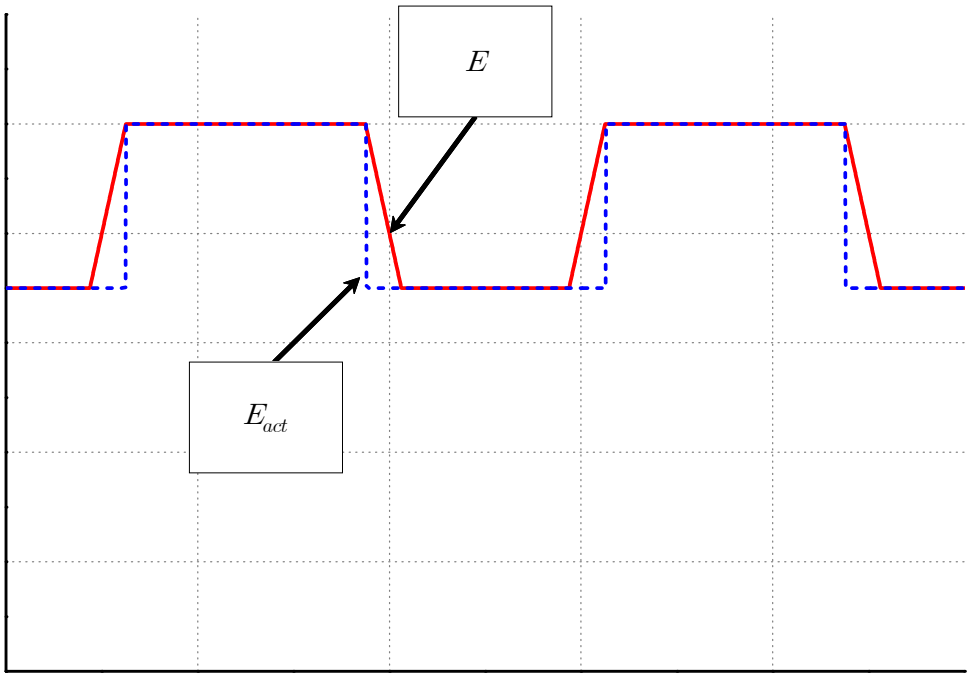


그림 3.2.3.4 전력에 유효한 역기전력

$$E_{act} = \begin{cases} K_{eb}\omega_m \ (-45^\circ < \theta_r \leq 45^\circ) \\ K_{ea}\omega_m \ (45^\circ < \theta_r \leq 135^\circ) \\ K_{eb}\omega_m \ (135^\circ < \theta_r \leq 225^\circ) \\ K_{ea}\omega_m \ (225^\circ < \theta_r \leq 315^\circ) \end{cases} \quad (3.2.3.5)$$

여기서 K_{ea} 및 K_{eb}는 각각 A상 및 B상 권선의 역기전력 상수이며 θ_r은 회전자 각 위치이다.

나. 토크 상수

LPM의 토크 방정식은 식 3.2.3.6과 같다. 토크 방정식에 포함된 역기전력을 상권선 적층으로 인한 역기전력의 차이가 없다고 가정하고 식 3.2.3.3을 대입하여 정리하면 식 3.2.3.6과 같다.

$$T_e = \frac{E_a i_a + E_b i_b}{\omega_m}$$

$$T_e = \frac{E(i_a + i_b)}{\omega_m} = \frac{\omega_m K_e (i_a + i_b)}{\omega_m}$$

$$T_e = K_e (i_a + i_b)$$

$$T_e = K_e I \quad (3.2.3.6)$$

식 3.2.3.6에서 I는 직류전원단에서 공급하는 전류로 A상 권선의 전류와 B상 권선의 전류의

합과 같다. 따라서 역기전력 상수와 직류전원단에서 공급하는 전류와의 곱으로 인가된 전류 당 발생 토크가 산출되며 이것은 전류 당 발생 토크의 비인 토크상수(Torque Constant) K_t와 같다. 따라서 길이, 질량 및 시간의 단위를 각각 미터, 킬로그램 및 초를 사용하는 MKS 단위계에서 역기전력 상수는 토크 상수와 같고 식 3.2.3.6는 식 3.2.3.7과 같이 표현된다.

$$T_e = K_t I \tag{3.2.3.7}$$

또한 역기전력 상수와 같이 LPM의 상권선 적층 효과를 고려하면 회전자 각 위치에 따라 토크 상수 또한 2개의 고정 값으로 표현되며 식 3.2.3.8과 같다.

$$T_e = \begin{cases} K_{ta} I(step1) \\ K_{tb} I(step2) \\ K_{ta} I(step3) \\ K_{tb} I(step4) \end{cases} \tag{3.2.3.8}$$

식 3.2.3.8에서 K_{ta} 및 K_{tb}는 각각 고정자 A상 및 B상 권선에 인가되는 전류에 대한 토크 상수이다.

다. 고정자 상권선 적층에 따른 토크 리플 저감

LPM의 고정자 상권선의 적층 구조 특성 상 발생하는 각각의 권선의 쇄교자속량의 차이는 각 상 권선에 유기되는 역기전력의 크기 또한 변화시킨다. 따라서 식 3.2.3.6의 토크방정식에 따라 역기전력의 변화는 각각의 상 권선에 동일한 전류가 인가되고 LPM의 회전속도가 일정한 상황에서도 발생 토크 및 추력은 일정하지 못하고 그림 3.2.3.5와 같이 일종의 리플을 포함한 형태로 스텝에 따라 변화하게 된다. 따라서 이러한 리플 성분을 제거하기 위해서 앞서 유도한 회전자 각 위치 및 스텝에 따라 2개의 고정된 값으로 표현 가능한 토크상수를 사용하여 스텝별 전류제어기의 지령 토크가 발생하도록 전류 지령을 생성한다. 지령 토크를 만족하는 지령 전류는 식 3.2.3.9와 같다.

$$I_{ref} = \begin{cases} \dfrac{T_{ref}}{K_{ta}} \, (step1, step3) \\ \dfrac{T_{ref}}{K_{tb}} \, (step2, step4) \end{cases} \tag{3.2.3.9}$$

식 3.2.3.9에서 I_{ref}는 전류제어기에 입력인 지령 전류[A]이며 T_{ref}는 사용자의 요구에 의하여 입력되는 지령 토크[Nm]이다.

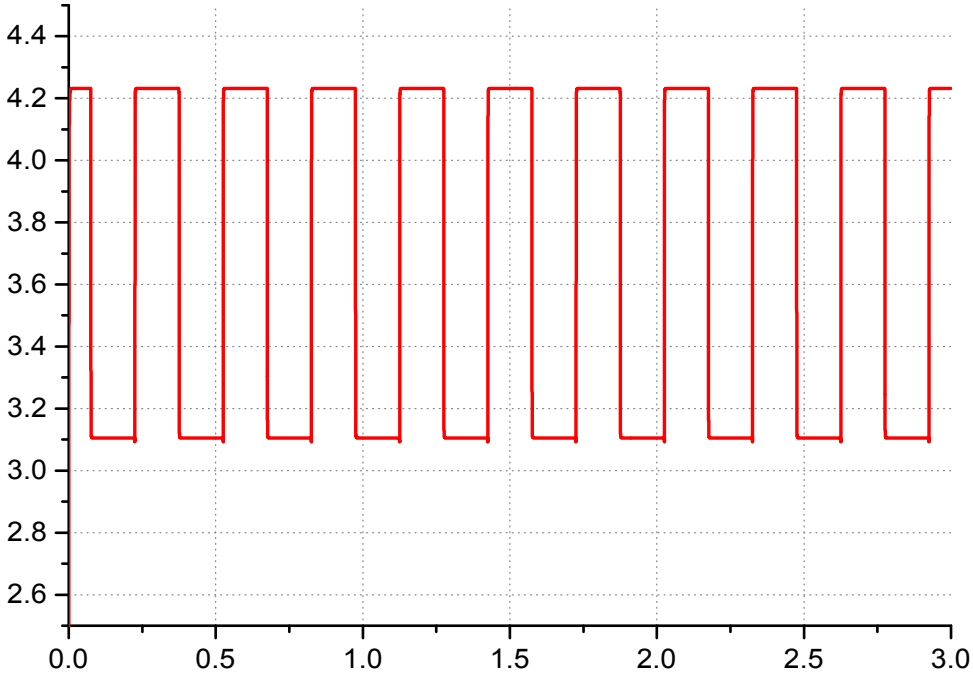


그림 3.2.3.5 상권선 적층 시 발생 추력

3.2.3.2. 모의 실험

가. 모의실험 구성

본 모의실험에서는 위하여 앞서 유도한 각 상별 역기전력 상수, 토크 상수 및 스텝에 따른 전류지령을 사용하여 고정자 상권선 적층에 따라 토크 및 추력에 함유되는 일종의 리플 성분을 제거한다. 모의실험 조건은 역기전력 발생부분을 제외하면 앞의 3.1.3장에서의 구형파 전류제어 방식 모의실험과 동일하며 단지, 실제 제작된 실대차 LPM 추진시스템에 맞는 파라미터를 사용하였다. 또한, 역기전력 발생부분은 실제 LPM에서 A상 및 B상 역기전력의 차이가 존재하는 역기전력과 동일한 역기전력을 생성하여 사용하였다. 따라서 부하 전동기가 일정속도로 LPM을 회전시키고 있는 상황에서 발생 토크 리플 보상 기법을 적용하지 않은 경우와 적용한 경우 두 가지 경우에 대하여 모의실험을 통해 비교분석하였다.

나. 모의실험 결과

그림 3.2.3.6은 고정자 상권선의 형태가 A상권선 상부에 B상권선이 적층된 구조일 경우 발생하는 역기전력의 파형으로써 실제 LPM에서 발생하는 각 상권선의 역기전력 파형과 유사하다. 이때 약 77.2[rad/s]로 회전 시 고정자 B상 권선에 유기되는 역기전력의 최대치는 약 82.1[V]이고 A상 권선에 유기되는 역기전력의 최대치는 117.3[V]이며 두 권선에 유기되는 역기전력의 차이는 약 1.4배로 B상역기전력이 크다.

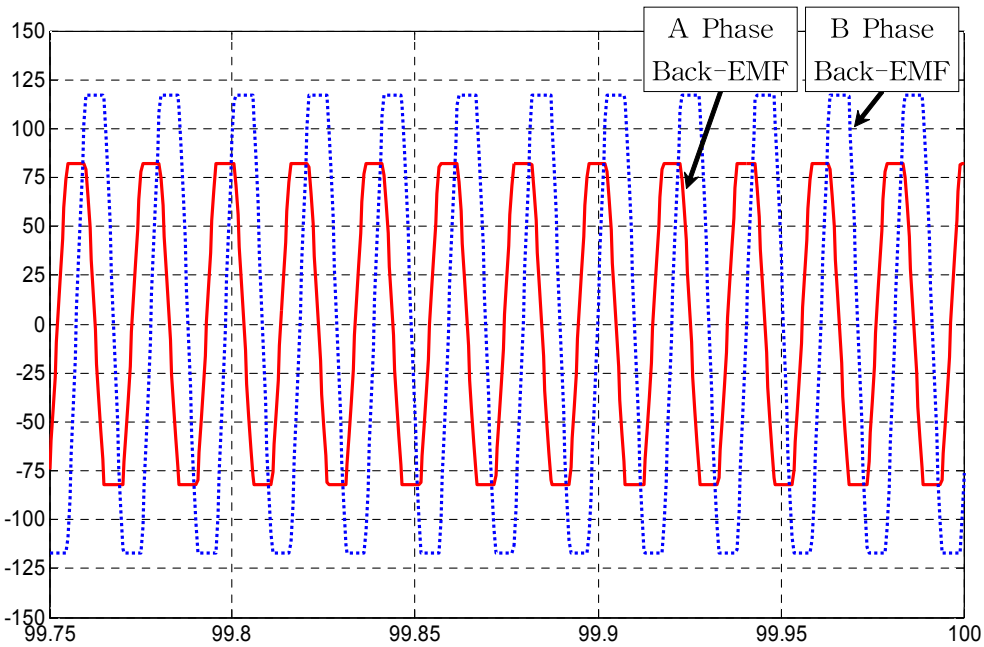
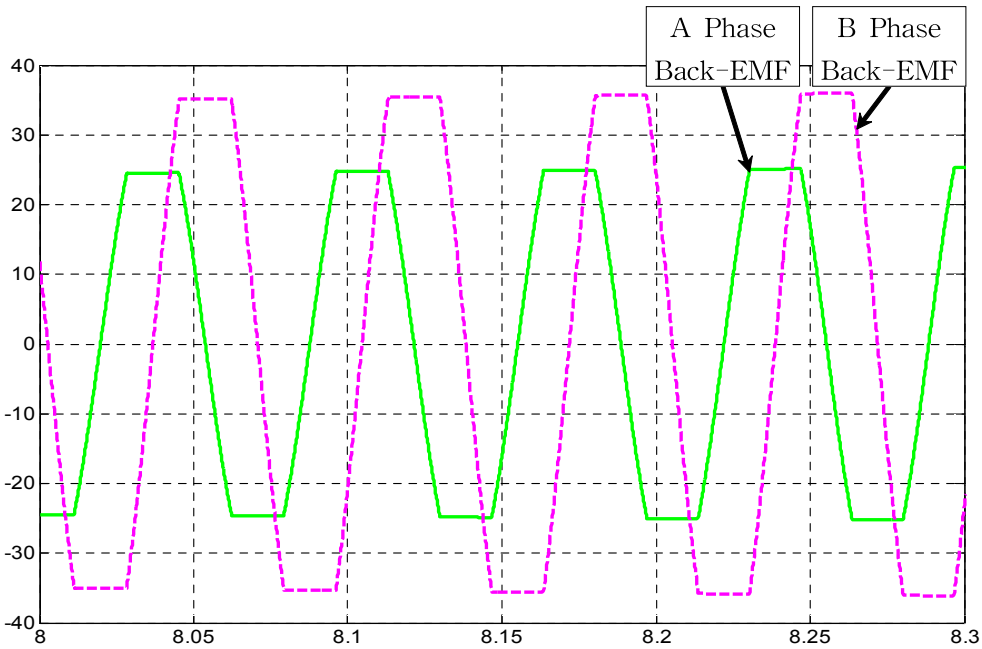


그림 3.2.3.6 고정자 상권선 적층 시 역기전력

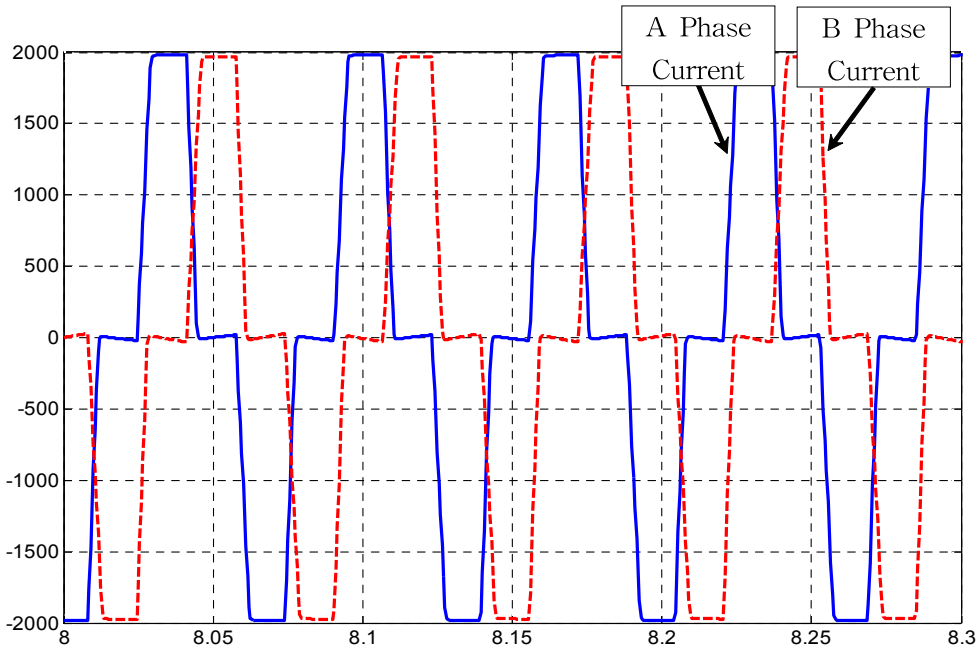
그림 3.2.3.7은 토크 리플 보상 기법 적용 전의 상전류와 역기전력으로 각 상권선에 유기되는 역기전력의 크기가 차이가 존재함에도 각상의 전류 크기는 지령 전류인 2000[A]로 동일하게 제어된다. 따라서 식 3.2.3.16의 토크 방정식에 따라 각상의 전류 크기가 일정하다면 발생하는 역기전력의 차이는 그림 3.2.3.8의 (b)와 같이 토크 및 추력의 리플로 나타난다. 토크 리플 보상 기법 적용 전의 추력은 최대 약 5900[N]에서 최소 4200[N]까지 발생하며 역기전력 차이와 동일하게 추력의 최소치보다 최대치가 약 1.4배 크다. 이때 발생하는 추력의 평균값은 약 5050[N]이며 추력 리플은 33.66[%]이다.

그림 3.2.3.9는 토크 리플 보상 기법을 적용 후의 상전류와 역기전력으로 식 2.6.1.8을 기반으로 주어진 토크 지령에 따라 토크 상수를 사용하여 각 상의 전류제어기의 지령 전류를 생성된다. 따라서 지령 토크를 만족하는 상전류가 정확히 인가됨이 확인된다.

그림 3.2.3.10은 보상 기법 적용 시 발생 토크 및 추력을 나타내며 각 상권선의 역기전력이 동일하지 않은 상황에서도 지령 토크 2500[Nm]를 만족함이 확인된다. 지령 토크인 2500[Nm]를 추력으로 환산 시 약 4900[N]이며 평균 발생 추력은 약 4900[N]이고 상 전환 순간에 발생하는 추력 리플 성분을 제외한 고정자 상권선 적층에 의한 추력 리플은 1[%]로 보상 기법 미적용 시 대비 추력 리플 측면에서 32.66[%] 감소 효과가 있음을 확인하였다.

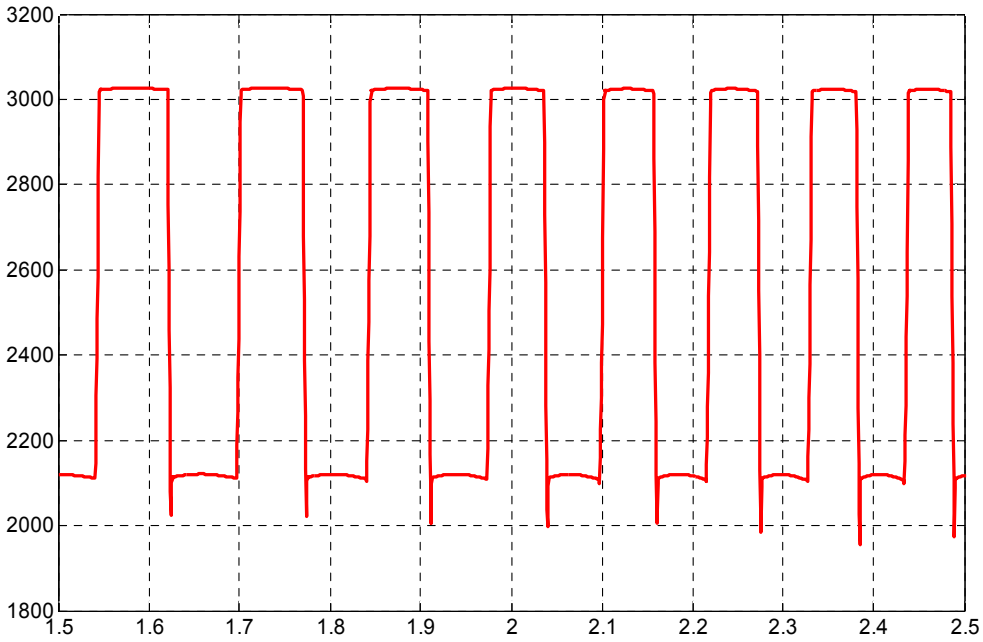


(a) 역기전력

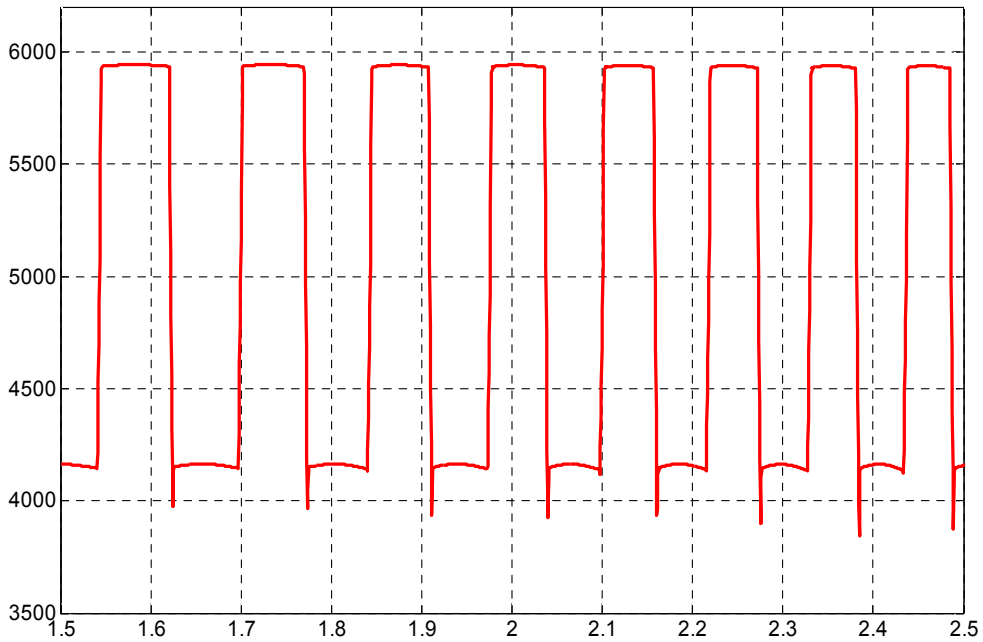


(b) 상전류

그림 3.2.3.7 상전류 및 역기전력 (보상 기법 적용 전)

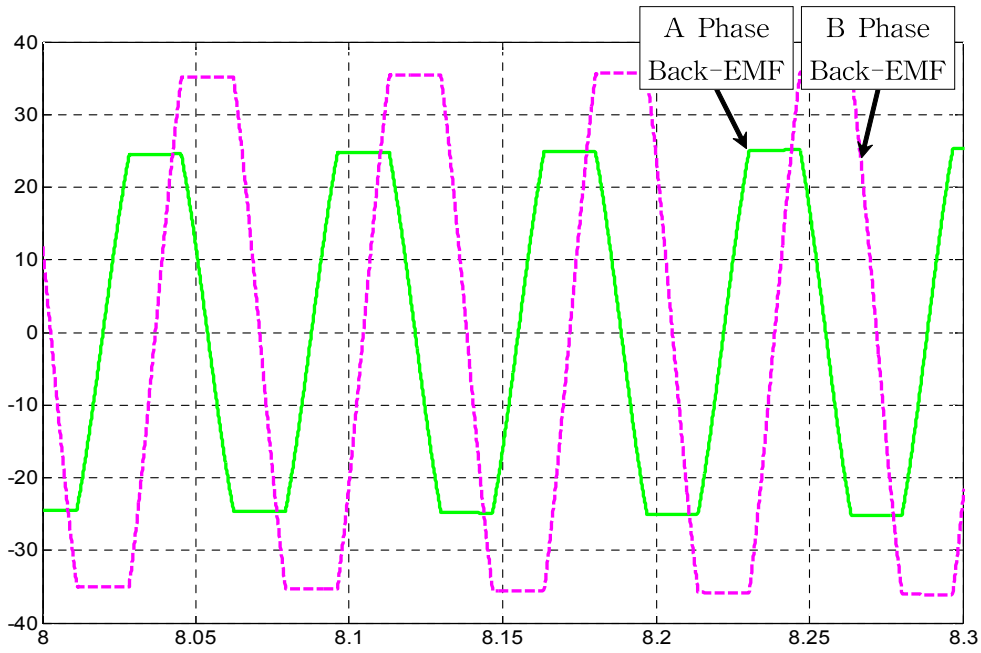


(a) 발생 토크

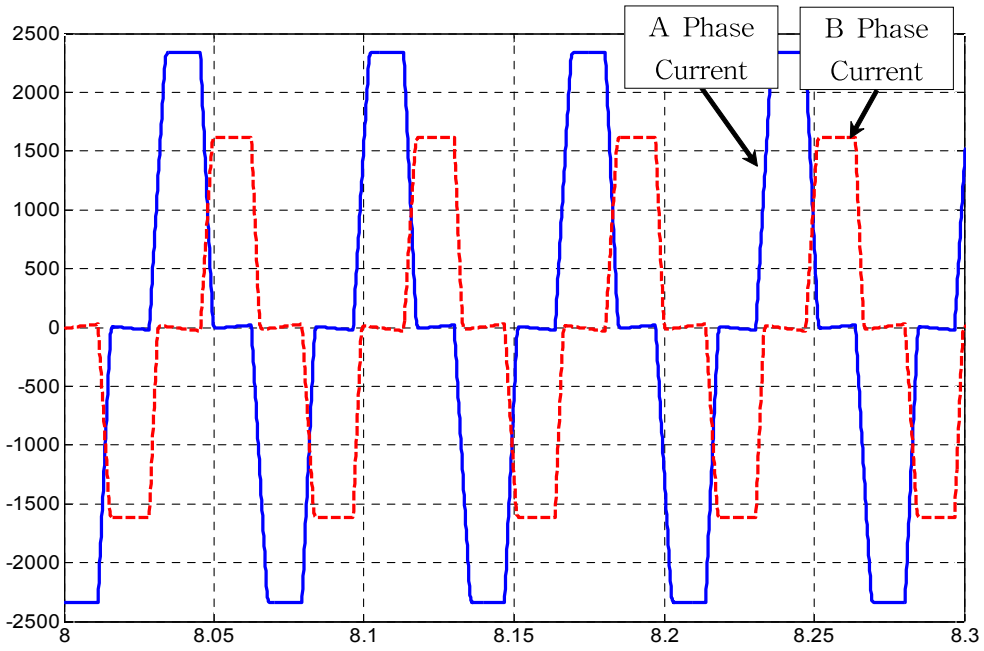


(b) 발생 추력

그림 3.2.3.8 발생 토크 및 추력 (보상 기법 적용 전)

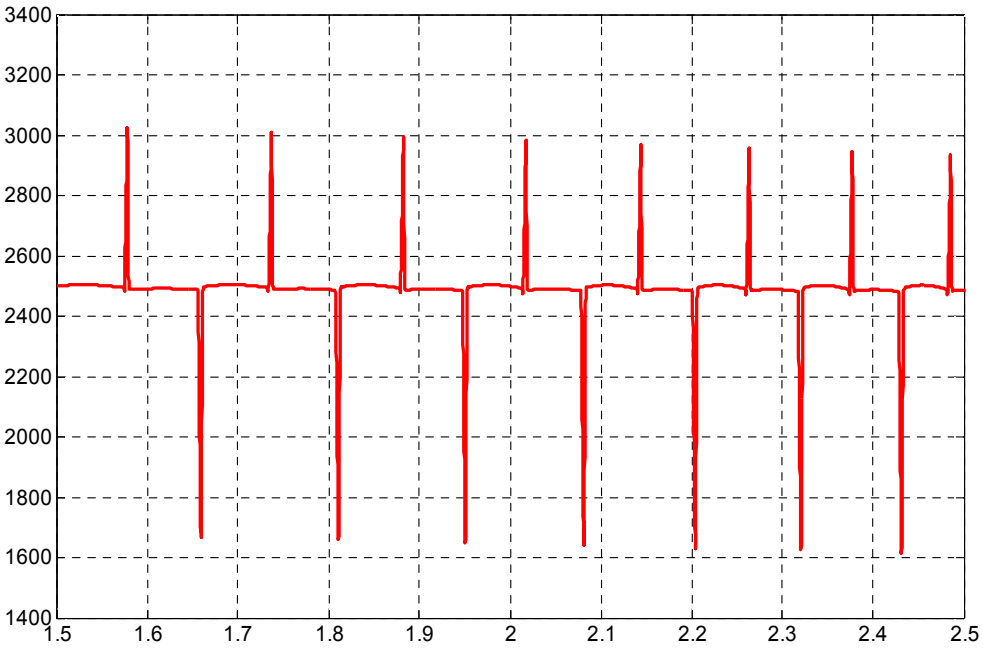


(a) 역기전력

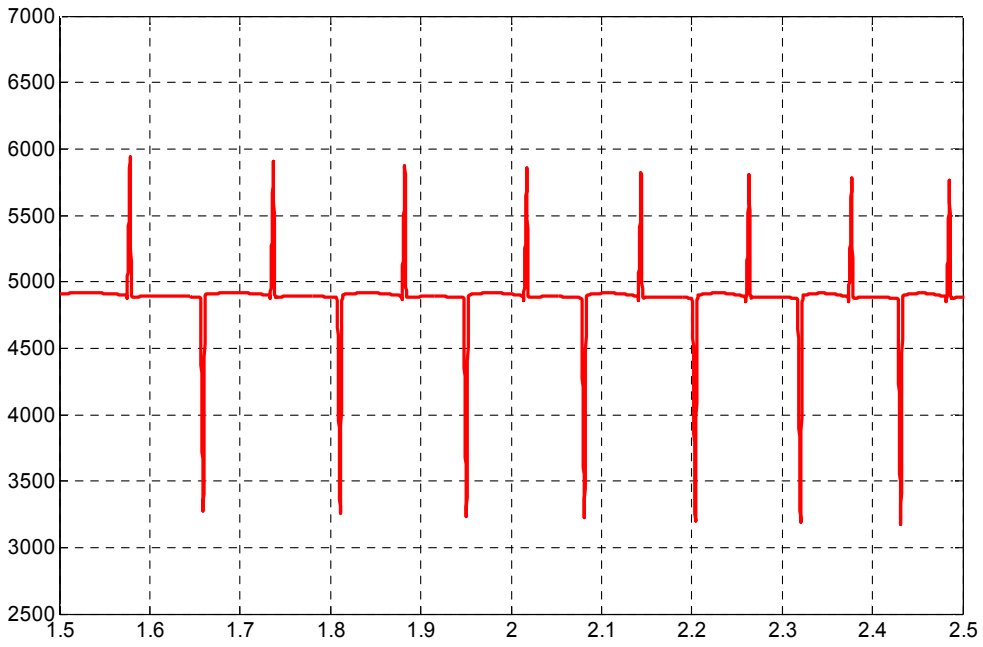


(b) 상전류

그림 3.2.3.9 상전류 및 역기전력 (보상 기법 적용 후)



(a) 발생 토크



(b) 발생 추력

그림 3.2.3.10 발생 토크 및 추력 (보상 기법 적용 후)

3.2.3.3. 축소모형 알고리즘 적용 실험

가. 실험 구성

그림 3.2.3.11은 LPM시스템의 추진 제어 알고리즘 검증 및 상권선 적층에 의한 토크 리플 저감 기법의 검증을 위한 실험 장치의 구성을 나타낸다. 실험 장치는 크게 LPM과 전력변환부, 제어부, LPM을 일정속도로 운행하거나 일정 위치에 고정된 상태로 유지 및 발생 추력을 검출하는 다이나모미터로 구성되어 있다.

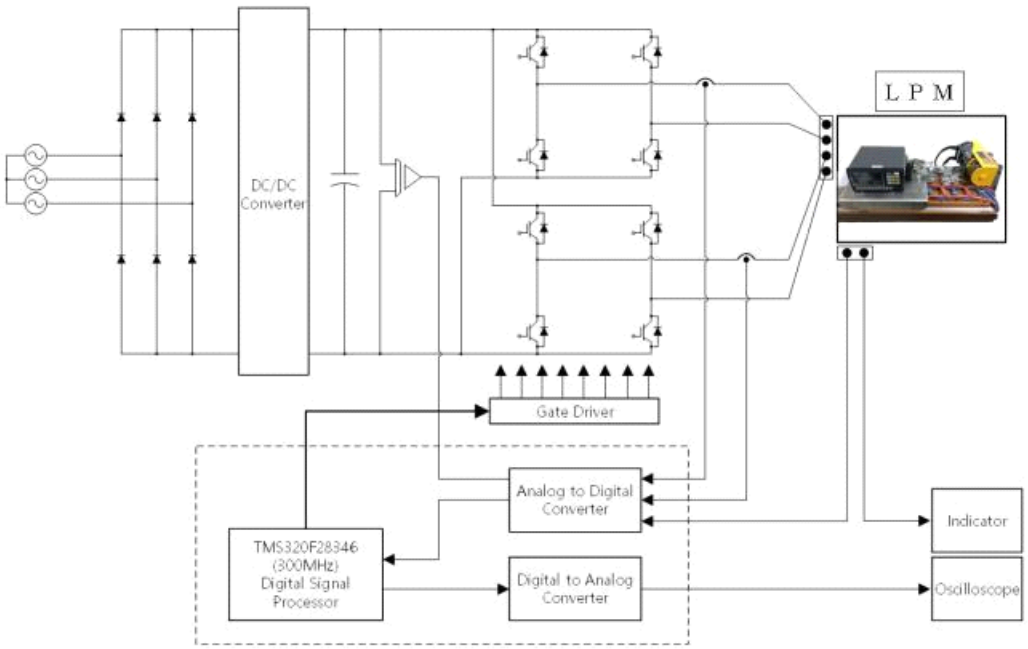


그림 3.2.3.11 실험장치 구성도

(1) 전력변환부

전력변환부는 3상의 교류 전압을 공급받아 직류 전압의 형태로 정류하기 위한 다이오드 정류기(Diode Rectifier), 정류된 직류전압을 LPM에서 필요로 하는 크기의 직류전압으로 변압하기 위한 DC/DC 컨버터(Converter), 직류전원단의 전압 리플을 감소시키기 위한 평활용 커패시터 및 전압형 풀 브릿지 인버터 2대로 구성된다.

다이오드 정류기는 3상의 교류 380[V]를 공급받아 다이오드를 사용하여 직류 형태로 정류하며 DC/DC 컨버터(Converter)를 사용하여 LPM의 직류전원단 전압인 20[V]로 변압하여 공급한다.

직류전원단의 전압 리플 감소를 위한 평활용 커패시터의 용량은 35[V]-1,200[μF]급 커패시터 35개를 직병렬로 연결하여 42,000[μF]를 사용한다.

사용되어진 인버터는 전압형 풀 브릿지 인버터 2대로 각각 인버터의 최대 출력 용량은 8

[kW]이다. 각 인버터의 정격 전류는 150[A]이며 최대 전류는 300[A]이다. 사용되어진 스위칭 소자는 LS산전의 150[V]-500[A]급의 MOSFET(Metal Oxide Silicon Field Effect Transister) 4개로 이루어진 모듈(Module)을 사용하며 내부 기생저항 성분은 1.8[$m\Omega$]이고 스위칭 주파수는 10[kHz]를 사용한다.

(2) 제어부

제어부는 사용되어진 센서로 측정된 전류 및 전압 정보를 DSP(Digital Signal Processor)에서 인식 가능한 형태 디지털 신호로 변환하는 ADC(Analog to Digital Converter), DSP 내의 디지털 값을 갖는 변수들을 오실로스코프(Oscilloscope)를 사용하여 사용자가 관찰 가능하도록 변환하는 DAC(Digital to Analog Converter), 주 연산장치인 DSP로 구성된다.

주 연산장치는 텍사스 인스트루먼트사의 고속 DSP인 TMS320C28346를 사용하였다. TMS320C28346은 300[MHz]의 클럭(Clock) 속도로 TMS320C28x 프로세스 계열 중 가장 고속의 300MFLOPS(Million Floating-Point Operations Per Second)의 연산이 가능하며 초고속 32비트(bit) 부동소수점(Floating Point) 연산이 가능하다. 또한 내장 ADC 모듈이 존재하지 않음으로 외부 ADC 사용이 요구된다.

ADC는 사용되어진 각종 센서에서 측정된 아날로그 값의 정보를 DSP에서 사용 가능한 디지털 값으로 변환하여 출력한다. 센서에서 측정된 아날로그 값들은 시스템에 존재하는 잡음을 제거 및 선로 길이에 따른 전압 강하 성분을 제거하기 위하여 전압 팔로워(Voltage Follower), 차동 증폭기(Differential Amplifier) 및 저역통과필터(Low-pass Filter)를 순차적으로 통과하여 ADC IC에 전달된다. ADC에 사용된 IC는 텍사스인스트루먼트社의 ADS8558이 사용되었으며 12비트의 분해능을 보유하고 있다.

DAC는 DSP 내부 연산 값들을 오실로스코프를 통하여 사용자가 관찰 가능하도록 출력하기 위하여 사용되며 디지털 값을 갖는 변수를 아날로그 값으로 변환하여 오실로스코프에 전달한다.

(3) 다이나모미터

LPM을 구속 또는 고정 속도로 이동시키기 위하여 다이나모미터를 구성하여 실험하였다. 회전 기기에서 부하전동기에 해당하는 전동 윈치(Electric Winch)는 180[W]의 전동기를 사용하여 와이어를 분당 8[m]의 속도로 구동하며 최대 용량은 50[kg]이다. 대차와 전동 윈치 와이어 사이에는 발생 추력을 측정하기 위하여 변형에 따라 전기적 저항 값이 가변되는 스트레인 게이지(Strain gage)를 이용하여 양단에 작용 중인 힘을 전기적 신호로 변환하는 센서인 로드 셀(Load Cell)이 사용되며 카스코리아사의 UMM을 사용하였다. 사용되어진 로드 셀의 최대 측정 용량은 2[kg]으로 힘으로 환산 시 19.61[N]이다.

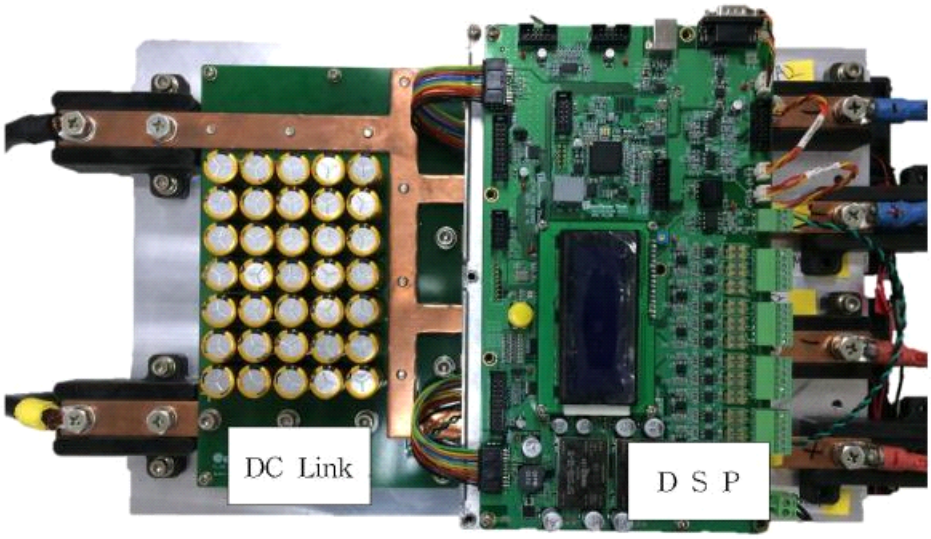


그림 3.2.3.12 제어부 및 전력부

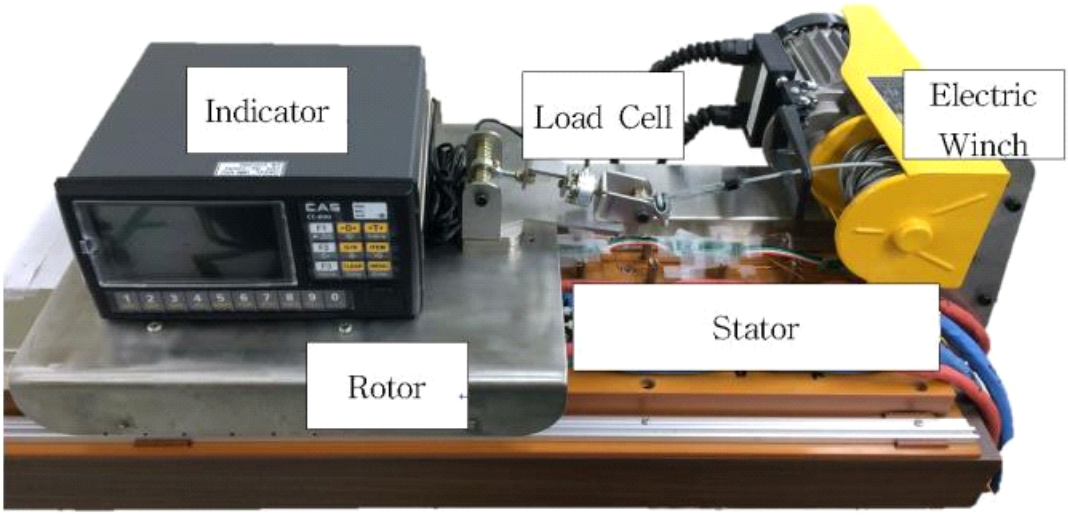


그림 3.2.3.13 다이나모미터

나. 실험결과 및 검토

그림 3.2.3.14는 대차의 위치에 따라 출력되는 홀센서의 신호를 검출하여 현재 대차의 각 위치의 연산 값과 각 위치 정보를 바탕으로 연산된 스텝 값을 나타내며, 정해진 홀센서 신호에 따라 현재 대차의 위치정보를 연산하며 연산된 값에 따라 스텝 값이 연산됨이 확인된다. 하지만 모의실험에서 홀센서의 장착위치가 정확하여 위치 편차로 인한 각도 오차를 고려하지 않았지만 실제 실험에서는 홀센서 장착위치의 편차로 인한 각도 오차가 발생함을 확인하였다. 따라서 장작위치 편차로 인한 각도 오차는 전류 인가의 기준이 되는 스텝연산의 오차로 나타나며 이러한 스텝 오차는 전류 인가 상의 전환 시점에 오차로 이어진다. 따라서 역기전력이 평탄한 값을 갖는 고정자 권선에 인가되어야할 상전류가 조기에 또는 지연되어 인가된다. 이러한 상전류 전환 시점의 오차는 발생 추력의 감소 및 추력에 함유된 리플 성분의 증가로 이어진다.

그림 3.2.3.15는 회전자인 대차의 이동에 따라 영구자석에서 발생한 자속이 고정자 권선에 쇄

교하며 발생하는 역기전력의 측정치이다. 이때 발생하는 역기전력은 주기가 0.2275[sec] 일 경우, 기계각속도로 환산 시 27.6182[rad/s]에서 A상 역기전력의 최대치는 약 18.2[mV]이며 B상 역기전력의 최대치는 약 24.8[mV]이다. 따라서 식 3.2.3.5에 따라 속도 당 발생역기전력의 비인 역기전력 상수를 각 상별로 구하면 A상 역기전력 상수는 898[$\mu V/rad/Wb$]이며 B상 역기전력 상수는 659[$\mu V/rad/Wb$]이다. 또한 식 3.2.3.6에 따라 역기전력 상수는 토크 상수와 같음으로 A상 토크 상수는 898[$\mu V/Wb/A$]이며 B상 토크 상수는 659[$\mu V/Wb/A$]이다. 또한 모의실험에서 값이 완벽히 평탄한 구간을 갖는 역기전력을 사용하여 모의실험을 진행한 반면 실제 역기전력은 그림 3.2.3.15의 (b)와 같이 역기전력의 값이 완벽히 평탄하지 않다. 이러한 차이점은 모의실험에서의 발생 추력과 실제 발생 추력의 오차를 발생시킨다.

그림 3.2.3.16은 연산되어진 스텝 정보에 따라 각 상에 인가되는 상전류를 나타내며 스텝 1에서 고정자 A상 권선에 양의 지령 전류만큼의 전류, 스텝 2에서 고정자 B상 권선에 양의 지령 전류 값의 전류, 스텝 3에서 고정자 A상에 음의 지령 전류 값의 전류, 스텝 4에서 고정자 B상에 음의 지령 전류 값의 전류가 스텝별로 정확히 인가됨을 확인하였다.

그림 3.2.3.17은 상권선 적층에 따른 토크 리플 보상 기법 적용 전의 발생 추력으로써 각 상 권선에 동일하게 정격 정류인 150[A]를 인가하였을 경우의 발생 추력을 나타낸다. 발생 추력의 측정은 전동 윈치를 사용하여 LPM의 회전자인 대차를 일정 속도 이동시키며 이동 중 정격 전류를 인가하여 LPM의 대차와 전동윈치 사이에 작용하는 힘의 크기를 로드 셀을 사용하여 측정하였다. 로드 셀에서 출력되어진 전압화 된 추력 정보는 인디케이터를 통하여 수신되며 수신된 값을 다시 RS232-C 통신을 사용하여 PC로 수집 및 가공하였다. 토크 리플 보상 기법 미적용 시 발생 추력은 스텝에 따라 편차가 크게 발생하는 것이 확인되며 총 발생 추력 값의 평균은 3.89[N]이고 추력의 리플율은 약 77[%]이다. 토크 리플 보상 기법 미적용 시의 모의실험 결과 스텝 1 위치 및 스텝 3 위치에서 발생하는 추력은 약 3.1[N]이고 스텝 2 및 스텝 4 위치에서 발생하는 추력은 약 4.23[N]으로 총 발생 추력 값의 평균은 3.665[N]이다. 따라서 실제 실험으로 추출한 발생 추력의 평균과는 0.225[N]으로 약 6[%]의 차이가 발생하며 이러한 차이는 모의실험 시 완벽히 평탄한 값을 갖는 역기전력 파형의 사용 및 홀센서의 장착 편차에 따른 위치 오차를 무시함으로 발생한 추력 리플의 영향이다.

그림 3.2.3.18은 상권선 적층에 따른 토크 리플 보상 기법 적용 후의 발생 추력을 나타낸다. 따라서 앞서 유도한 토크 상수를 사용하여 고정자 상권선 별 각각의 지령 전류를 생성하며 생성되어진 지령전류로 고정자 A 및 B상 권선에 인가되는 전류의 크기를 상이하게 제어하였을 경우의 발생 추력이다. 발생 추력의 측정은 보상 전의 측정 방법과 동일하게 측정하였으며 지령 토크는 0.1[Nm]이고 추력으로 환산 시 약 3.14[N]이다. 보상 기법 적용 시 평균 추력 값은 3.11[N]이고 추력의 리플율은 약 48[%]이다. 따라서 모의실험 결과인 약 3.14[N]과 실제 실험에서 발생한 평균 추력의 차이는 0.03[N]으로 약 1[%]의 차이를 보인다. 보상 기법 적용 전과 후의 스텝에 따른 발생 추력의 편차는 발생 추력의 리플 측면에서 약 77[%]에서 약 48[%]로 29[%]의 리플율 감소가 확인된다. 따라서 유도된 역기전력 상수 및 토크 상수를 사용하는 상권선 적층에 따른 발생 토크 리플 저감 기법이 발생 추력 리플 저감에 효과적임을 확인하였다.

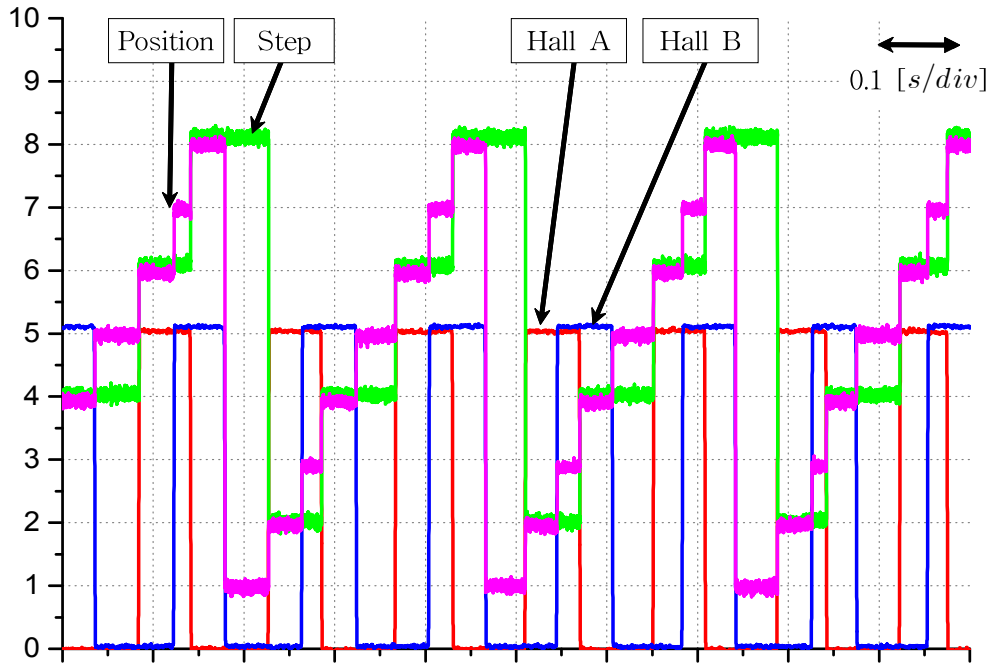
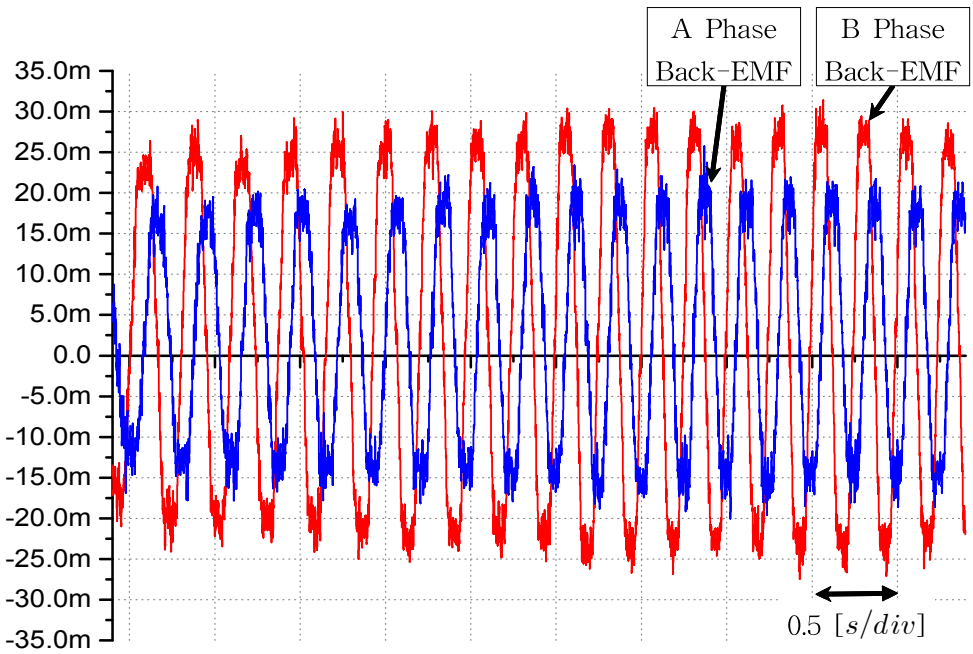
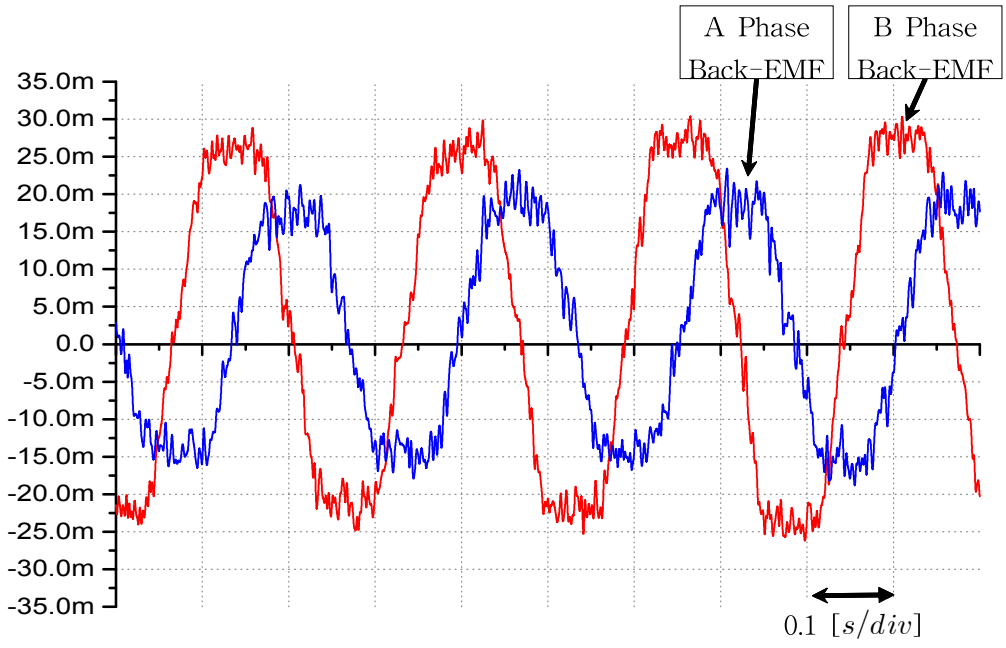


그림 3.2.3.14 홀센서 신호에 따른 위치 연산 및 스텝 연산

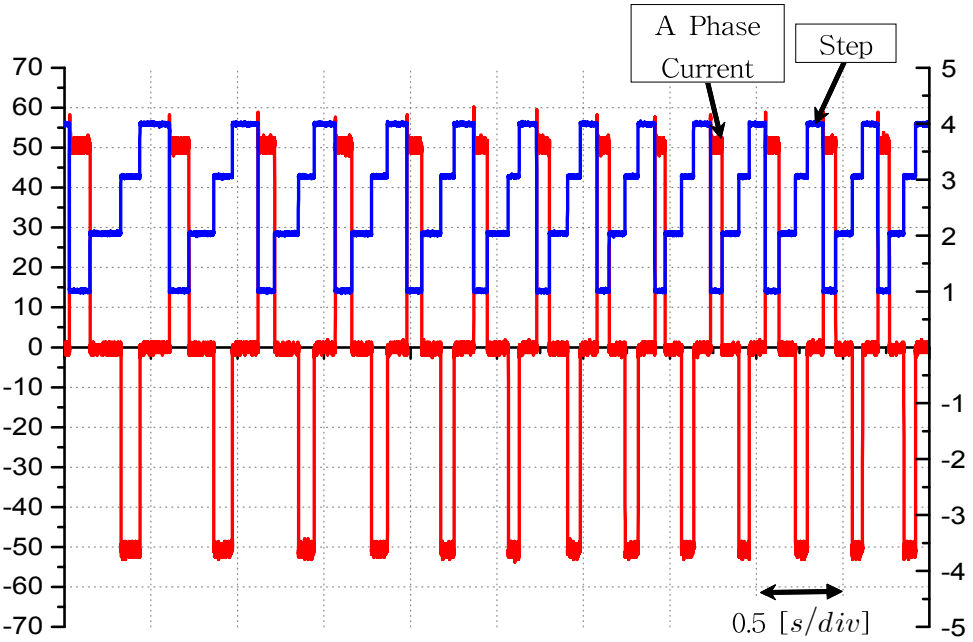


(a) 발생 역기전력

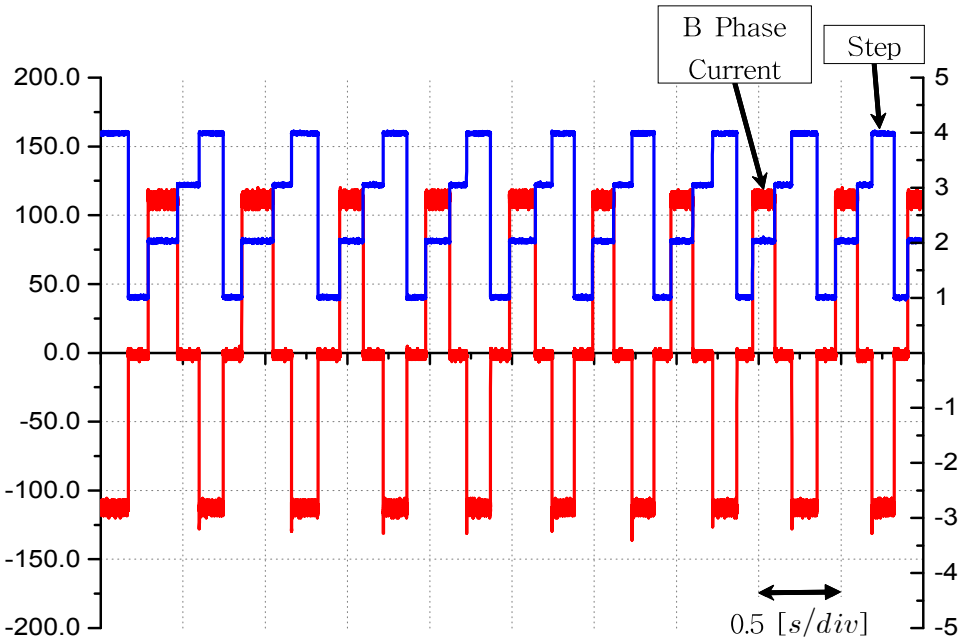


(b) 발생 역기전력 (구간 확대)

그림 3.2.3.15 발생 역기전력



(a) 스텝에 따른 A상 전류



(b) 스텝에 따른 B상 전류

그림 3.2.3.16 스텝에 따른 상전류 인가

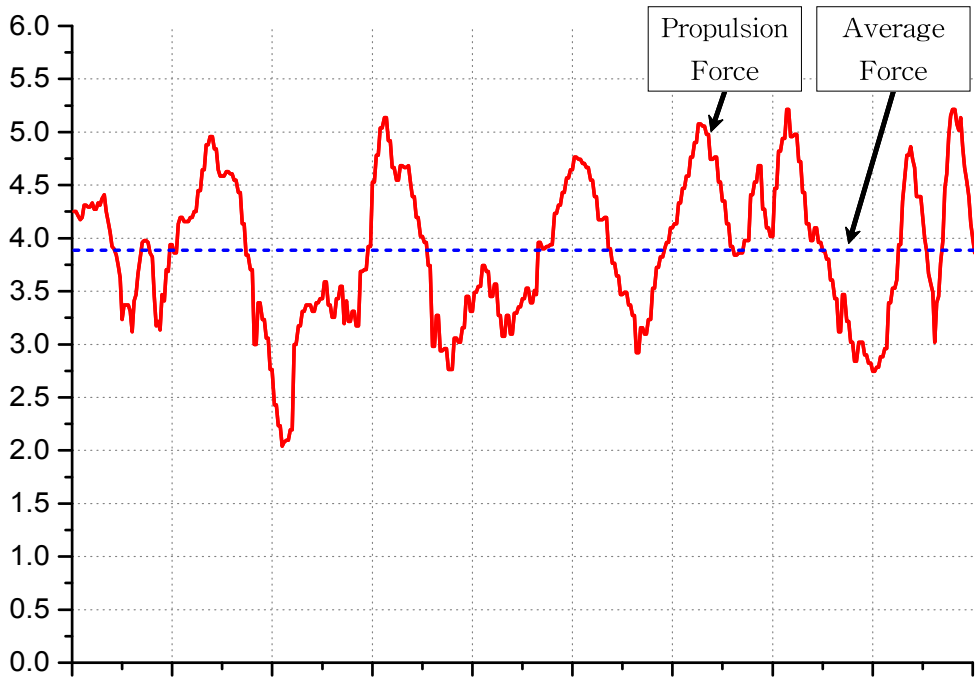


그림 3.2.3.17 상권선 적층으로 인한 발생 토크 리플 보상 전 발생 추력

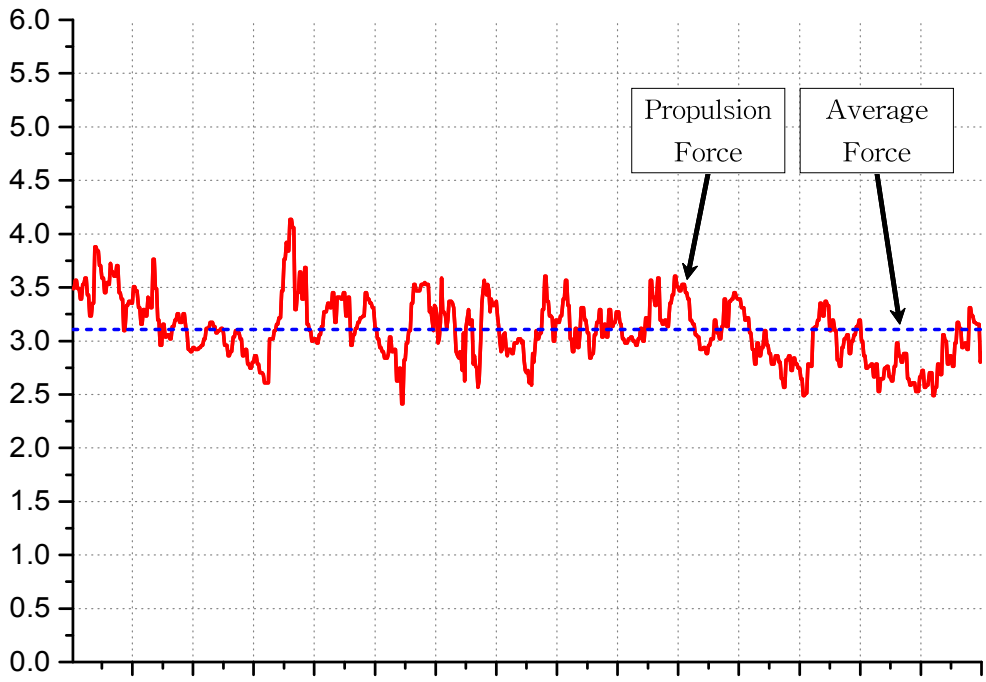


그림 3.2.3.18 상권선 적층으로 인한 발생 토크 리플 보상 전 발생 추력

3.3. 실모형 LPM 추진시스템

3.3.1. 실모형 LPM 추진시스템 설계 및 제작

3.3.1.1. 지상 LPM 추진시스템 설계 및 제작

가. 지상 코일 설계

리니어펄스모터는 지상코일로부터 발생되는 전기적인 펄스신호와 이동자에서 발생하는 일정한 자기장의 힘으로 추진력을 얻게 되는 장치이다. 따라서 그 주요 구성은 이동자 및 지상코일이라 할 수 있다. 또한 이동자는 코어와 코일 부분으로 구성된다. 아래 그림 3.3.1.1은 향후 설계 제작될 이동자와 지상코일의 개념적인 그림이다.

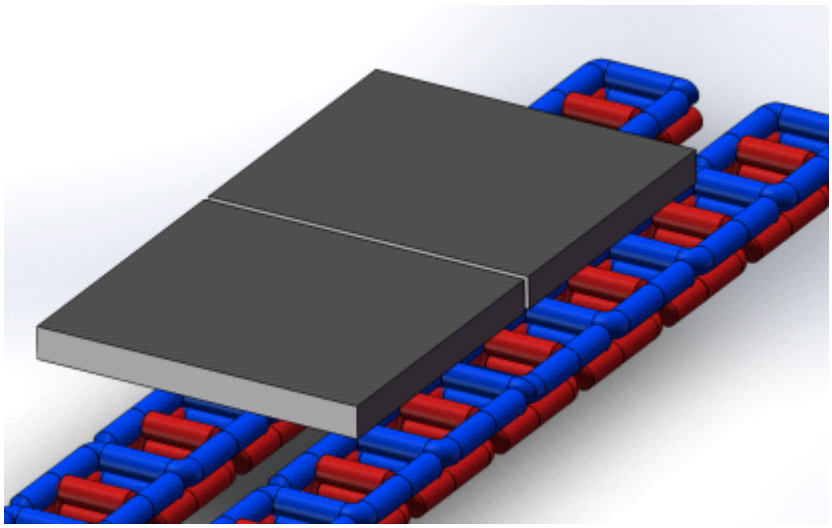


그림 3.3.1.1 이동자 및 지상코일

지상코일은 펄스 형태의 전류를 통전하여 이동자에 전진 또는 정지 할 수 있는 힘을 발생시키는 장치이다. 지상코일 권선의 구조는 2층권 형태를 가지면 각 이동자 극에 대하여 상•하층 권선이 엇갈리는 구조를 가진다. 현재 지상코일에 통전하는 전류의 세기는 2,000[A] 내외를 기준으로 한다. 아래 그림 3.3.1.2는 지상코일의 기본 구조이며, 표 3.3.1.1은 지상 코일의 상세 사항을 나타낸다.

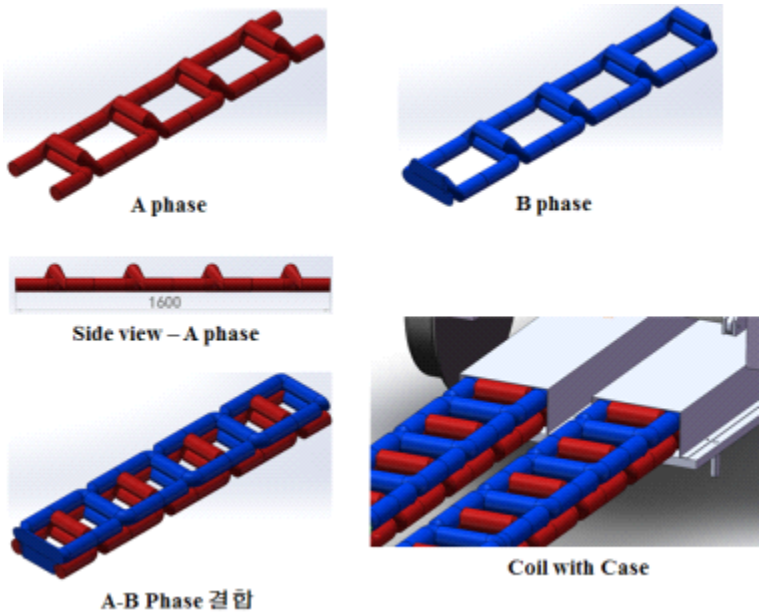
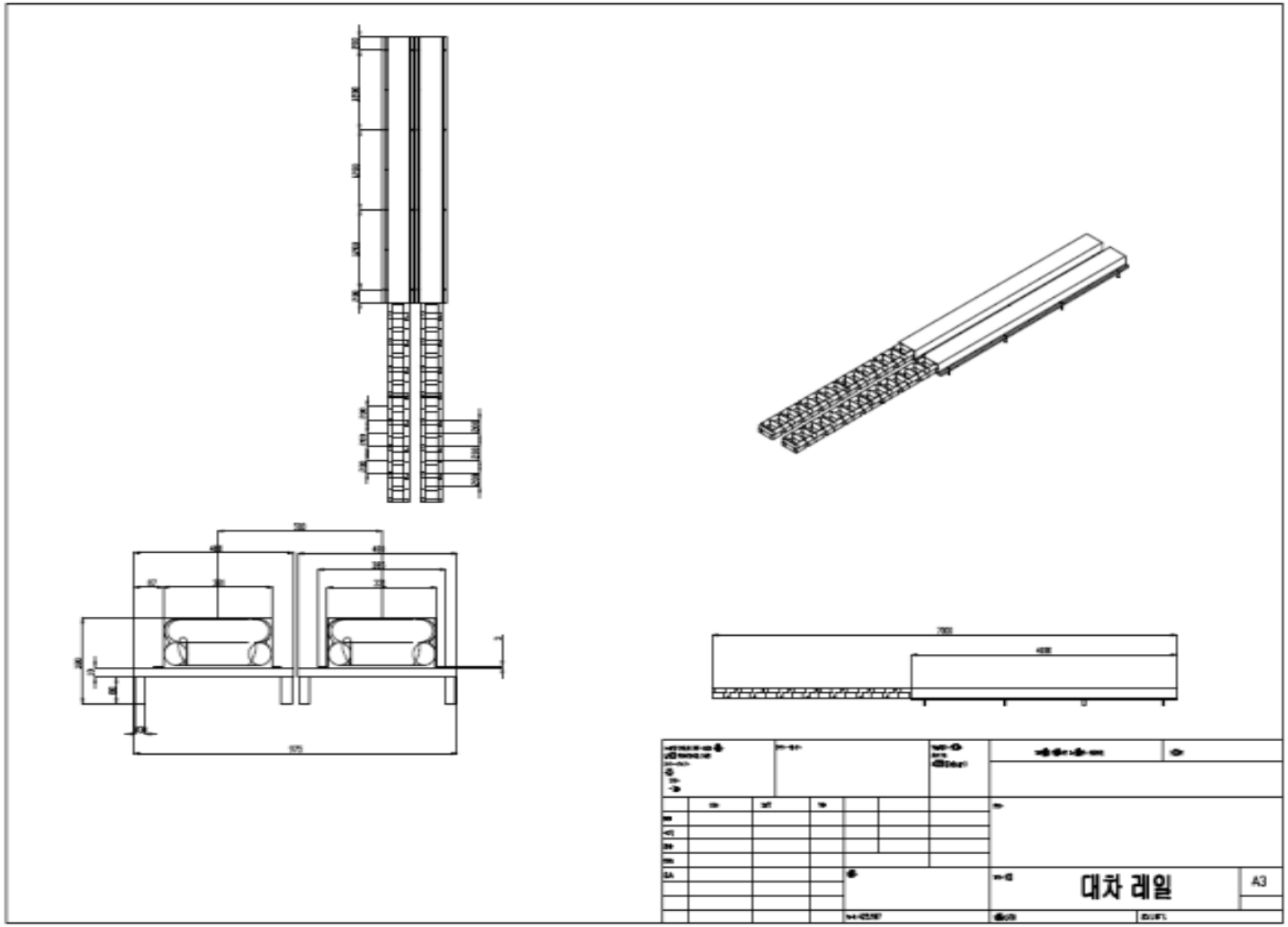


그림 3.3.1.2 지상 코일 기본 구조

표 3.3.1.1 지상 코일 상세 사항

항목	세부 사항
재질	Litz 와이어
전류 [A]	2,000
Wire 직경 [mm]	16[mm]*2
길이 [m]	100
구성	A/B 상 2열 구조

나. 설계 도면



다. 시험선 현장 설치

LPM 추진시스템 시험선은 한국철도기술연구원 특동에 위치한 시험선 현장에 설치하였다. 지상 코일은 설계된 도면을 기반으로 그림 3.3.1.3과 같이 2상 2열 구조로 설치하였다.

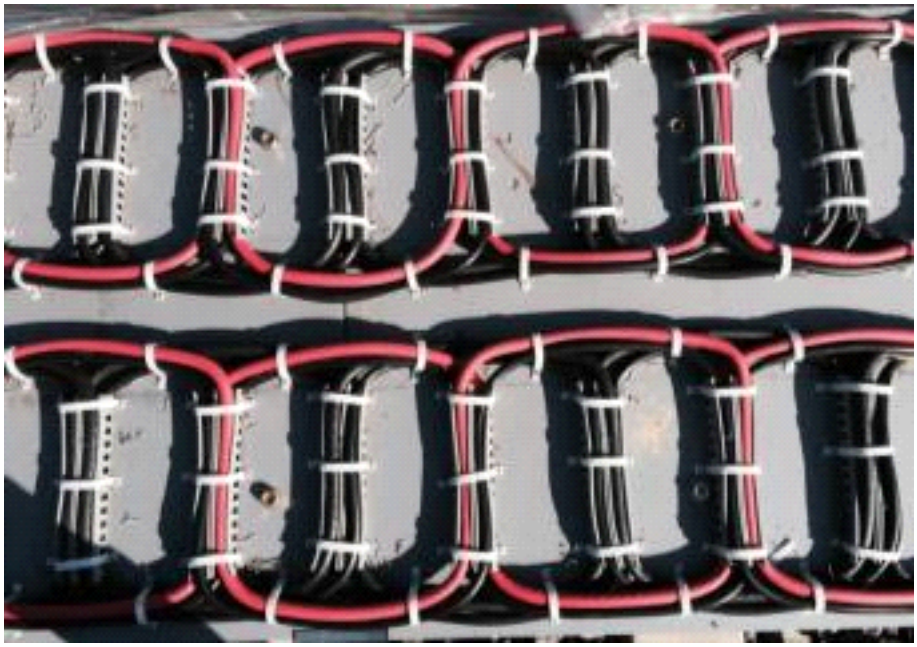


그림 3.3.1.3 2상 2열 구조의 지상 코일

LPM 추진시스템 시험선에 설치된 지상코일은 그림 3.3.1.4와 같다. 그림 3.3.1.4(a)와 같이 약 128m구간에 설치되었으며, 그림 3.3.1.4(b)와 같이 지상 코일 덮개를 설치하여 지상 코일과 실대차에 설치될 차상 전자석과의 물리적 간섭 영향을 최소화하였다. 또한, 향후 실대차 위치 센싱을 위한 위치센서가 지상 코일 2열 중간에 설치될 수 있도록 보호 덮개를 설치하였다.



(a) 지상 코일 설치 (b) 지상 코일 덮개 설치

그림 3.3.1.4 LPM 추진시스템 시험선 지상코일 설치

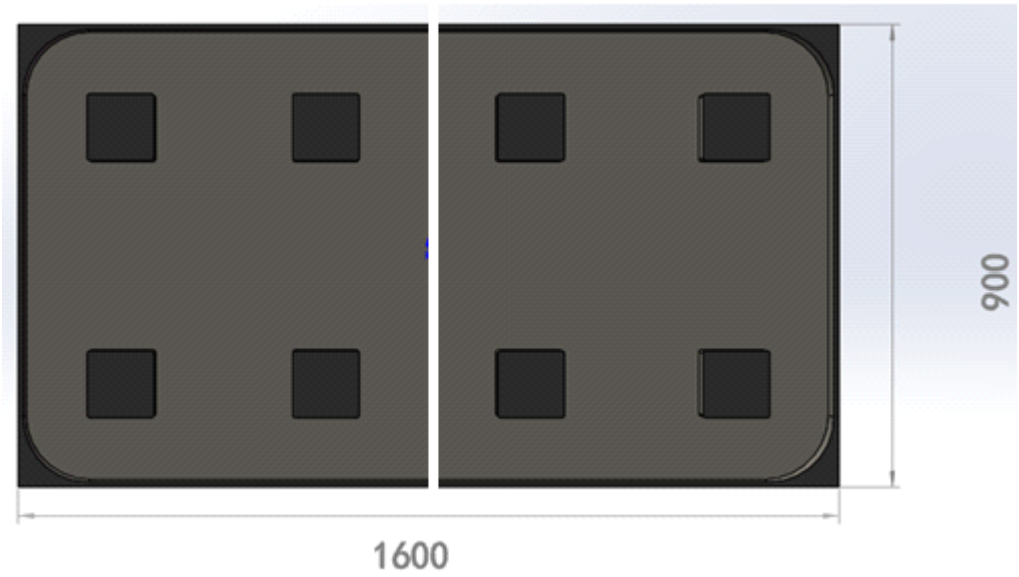
3.3.1.2. 차상 계자용 전자석 설계 및 제작

가. 전자석 기본 설계

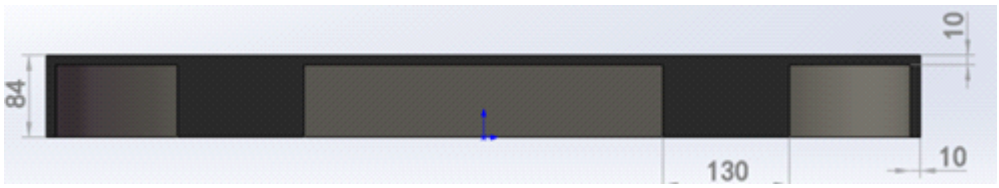
(1) 이동자 코어 설계

이동자는 코어 및 코일로 구성되며, 코일에는 DC전류가 공급되어 일정한 자기장을 만들게 된다. 본 과제에서는 실대차의 요구운행속도(10-15[km/h])에 맞는 속도를 낼 수 있는 차상 전자석을 설계한다. 우선 기본적으로 이동자를 구성하는 극수를 8극으로 하여 제작한다. 이러한 이동자의 크기는 대차가 위치하여 운행 될 레일의 간격 및 실대차의 크기를 고려하여 아래와 같은 기본적인 치수를 가지게 된다. 또한 향후 곡선부분 주행 시 원활한 운행을 위하여 이동자는 전/후 2부분으로 나뉘게 되며, 이 중심부분의 이격을 이용하여 곡선부 주행 시 대차가 받게 되는 레일과의 마찰력을 최대한 줄이는 구조를 가지게 된다.

그림 3.3.1.5는 이동자 코어의 기본 치수이다.



(a) 이동자 코어 평면도



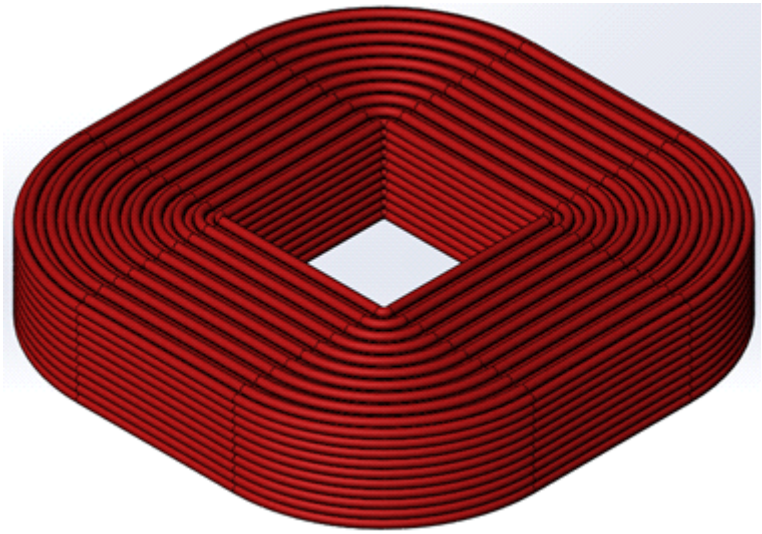
(b) 이동자 코어 측면도

그림 3.3.1.5 이동자 코어 기본 치수

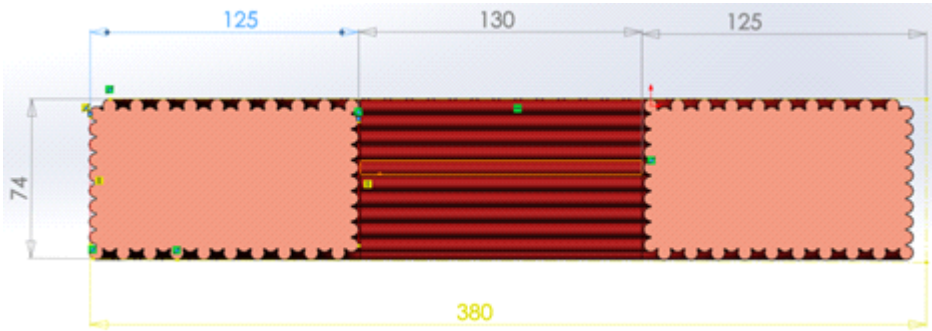
(2) 이동자 코일 설계

이동자 코일은 코어주위에 권선되어 자기장을 발생시키는 주요한 구성품이다. 코일의 재원은 전자기 해석을 통하여 상세 턴수 및 치수가 결정하였다. 현재 코일에 의해 발생되어야 하는 기전력은 약 20[kA·Turns] 내외를 기준으로 한다.

그림 3.3.1.6은 기본 이동자 코어 치수에 맞게 케이블을 이용하여 100턴 정도 권선 되었을 때의 치수이다.



(a) 이동자 코일 3D 도면



(b) 설계 치수

그림 3.3.1.6 이동자 코일 기본 치수

나. 설계 사양

이동자 권선 및 코어의 설계 사양은 다음 표 3.3.1.2와 표 3.3.2.3과 같다.

표 3.3.1.2 이동자 권선 설계 사양

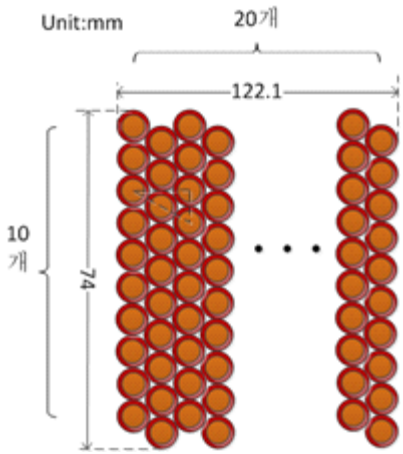
항목	세부 사항
재질	Copper
MMF	20 [kA·turns]
턴수	200
전류 [A]	100
구성	동선

표 3.3.1.3 이동자 코어 설계 사양

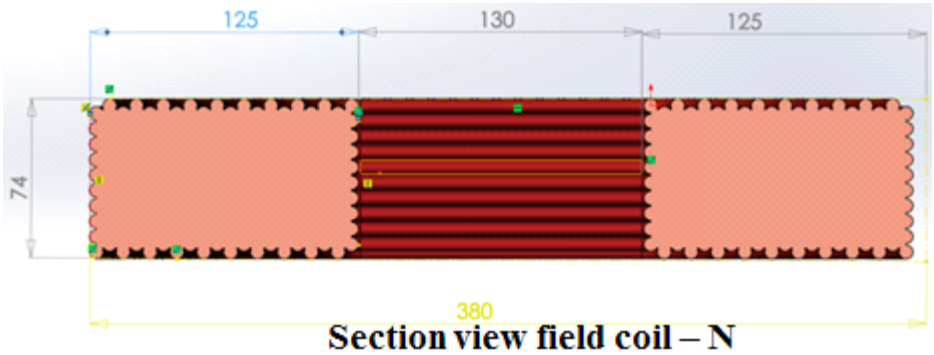
항목	세부 사항
재질	규소강판
극수	8
크기 [mm]	1600 * 900
구성	적층

다. 설계 도면

(1) 이동자 코일



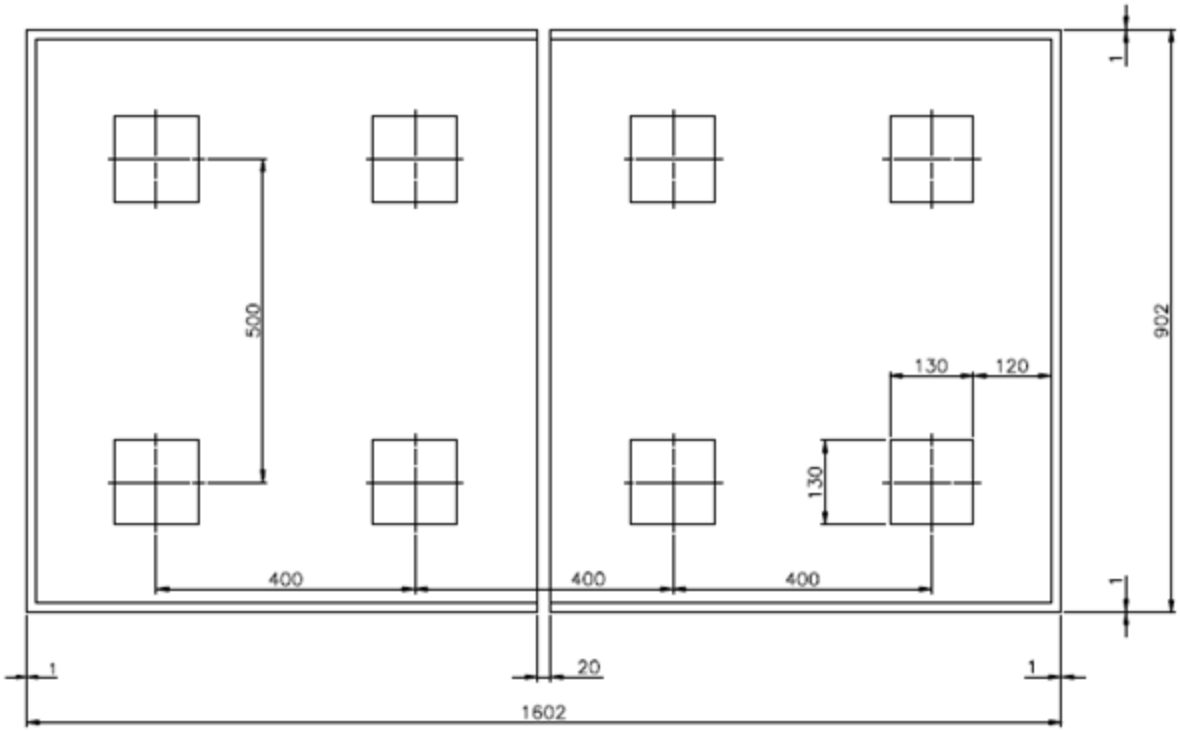
(a) 권선 구조



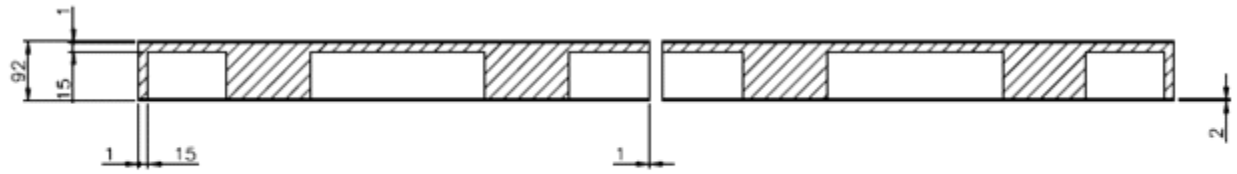
(b) 1극 구조

그림 3.3.1.7 이동자 코일 설계 도면

(2) 이동자 코어



(a) 이동자 코어 평면도



(b) 이동자 코어 측면도

그림 3.3.1.8 이동자 코어 설계 도면

라. 제작 사진

설계도면을 기준으로 제작된 이동자 코일은 그림 3.3.1.9와 같다. 총 8극의 전자석을 제작하였으며, 이동자 코어와 조립하여 실제 실대차에 실장된 것은 그림 3.3.1.10에서 확인할 수 있다.



(a) 1극 코일 구조 (b) 총 8개 제작

그림 3.3.1.9 이동자 코일 제작 사진



그림 3.3.1.10 차상 전자석 제작 및 실대차 취부

3.3.1.3. 차상 전원용 전원공급장치 설계 및 제작

가. 유도집전 방식

(1) 기본 원리

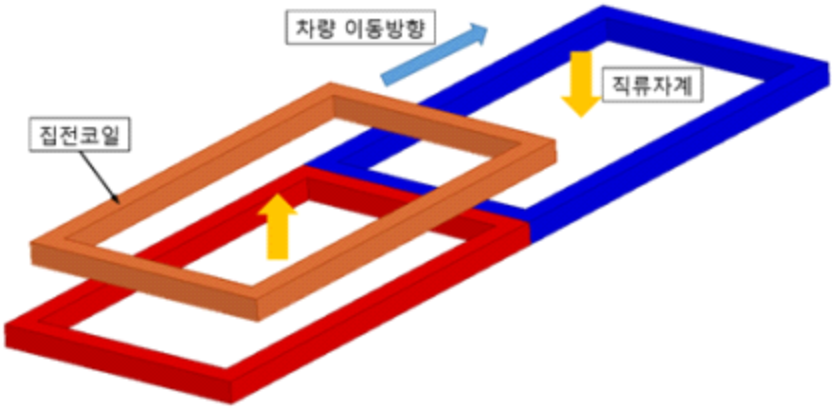


그림 3.3.1.11 기본 구성도

그림 3.3.1.11과 같이 유도급전 방식과 동일한 원리로 집전이 이루어지며, 집전코일이 차량의 이동방향에 따라 직류자계 안에서 역기전력이 집전코일에 발생한다. 이를 차상 전원으로 활용하는 방식이다. 기본적인 디자인은 차상 전자석 맨 앞과 맨 뒤에 집전을 위한 코일을 별도로 두어 차량이 이동함에 따라 전원을 공급한다. 차량 전자석 및 집전 코일의 구성도, 집전 코일의 세부적인 구성은 다음 그림 3.3.1.12와 같다.

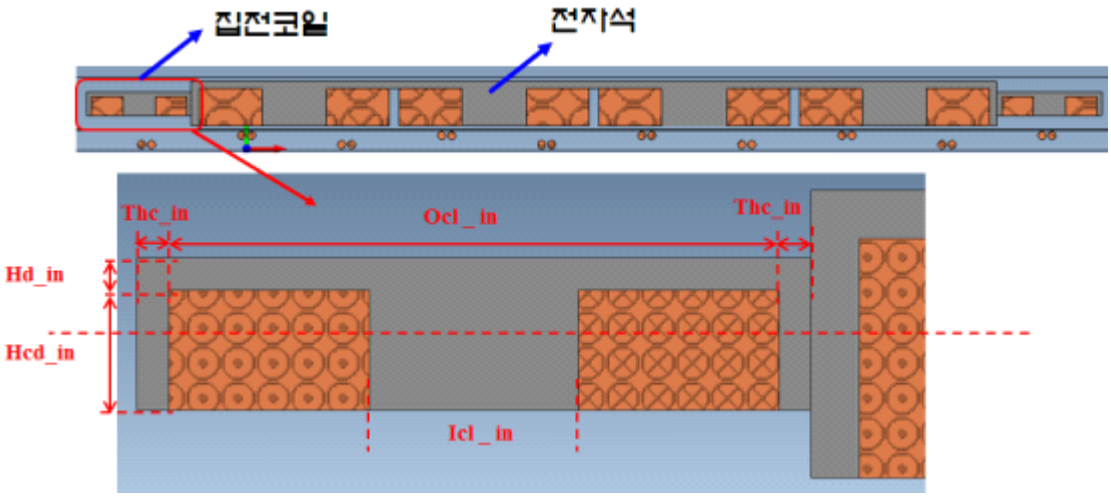


그림 3.3.1.12 전자석 및 집전코일 구성도

① 집전 코일 디자인에 따른 유기전압 관계

ⅰ) CASE 1

위 그림에서 집전코일의 디자인에 따른 시뮬레이션 결과를 살펴보면 다음과 같다. 디자인에 사용된 각 파라미터는 다음 표 3.3.1.4와 같다.

표 3.3.1.4 파라미터 : CASE 1

항목	값	항목	값
Thc	10 mm	Ocl	190 mm
Hd	10 mm	Icl	65 mm
Hcd	37 mm	Turns	50

결과를 살펴보면 다음 그림 3.3.1.13과 같다.

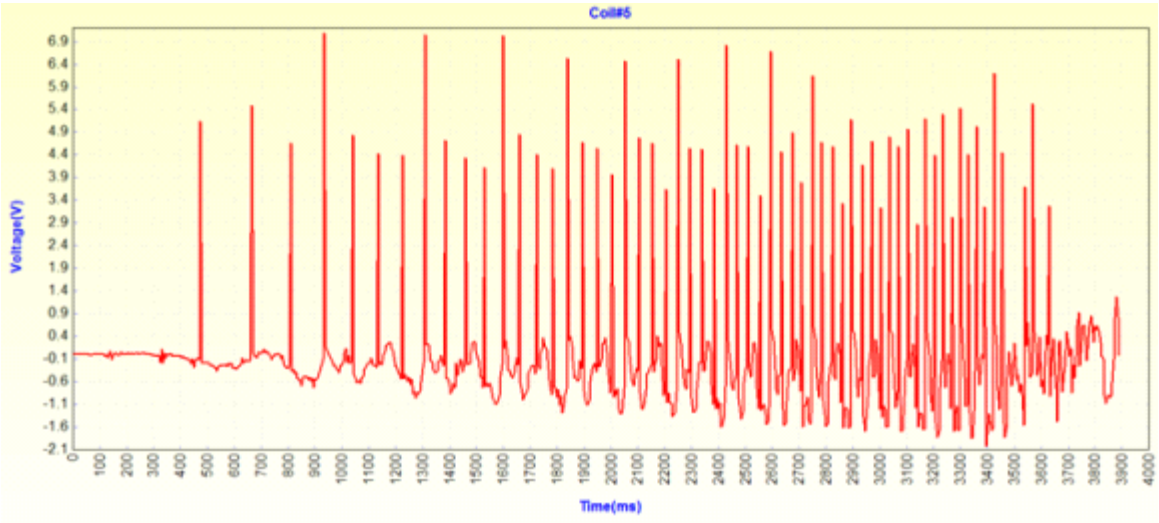


그림 3.3.1.13 유도 전압 : CASE 1

유도 전압이 AC형태로 중간중간 크게 +전압으로 튀는 형상을 보인다. 평균 유효 전압은 0.82V로 차상 전원으로 사용하기에는 부족하다.

ii) CASE 2

부족한 유도전압을 증가시키기 위해 다음 표 3.3.1.5와 같이 집전 코일의 디자인을 변경하였다.

표 3.3.1.5 파라미터 : CASE 2

항목	값	항목	값
Thc	10 mm	Ocl	95 mm

Hd	10 mm	Icl	32.5 mm
Hcd	74 mm	Turns	50

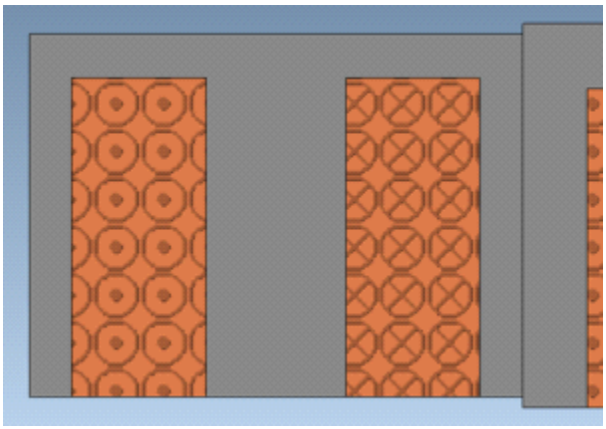


그림 3.3.1.14 집전 코어 형상 디자인 : CASE 2

시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

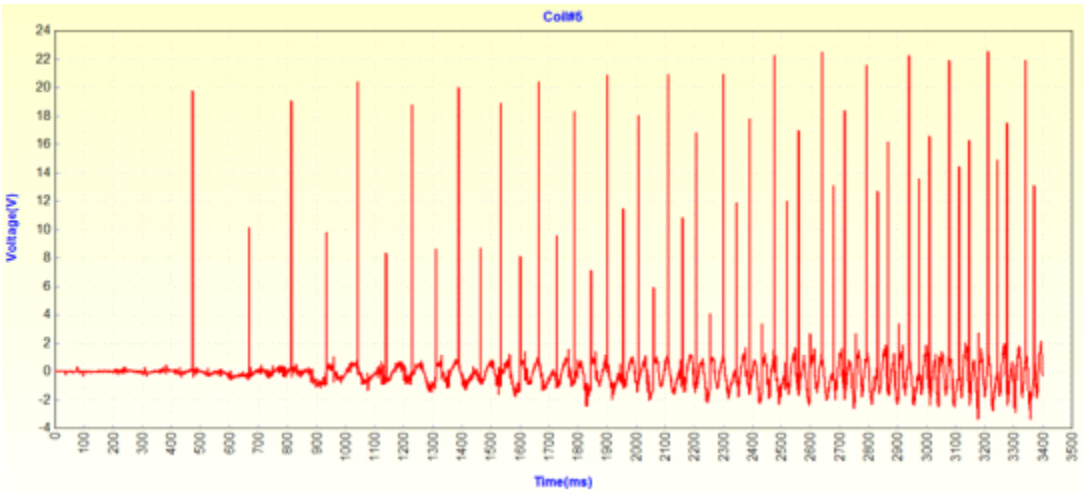


그림 3.3.1.15 유도 전압 : CASE 2

유도전압이 AC형태를 띄고 있으나, CASE 1보다 규칙적으로 +로 향하는 전압이 크며, 그 이유는 CASE 1 디자인보다 지상 코일에 의해 생성되는 자기장의 flux를 집전 코일이 더 많이 받아들일 수 있기 때문이다.

iii) CASE 3

CASE 2와 동일한 디자인으로 차이점은 지상 코일과 최대한 가깝게 위치하였다.

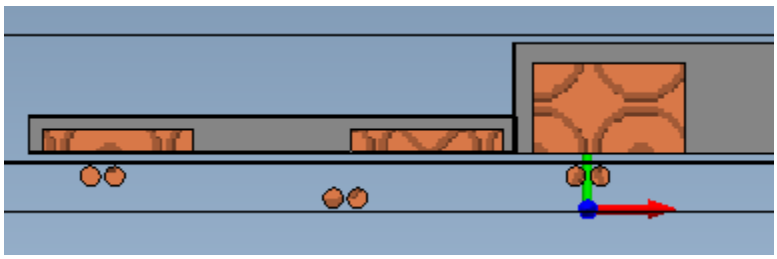


그림 3.3.1.16 집전 코어 형상 디자인 : CASE 3

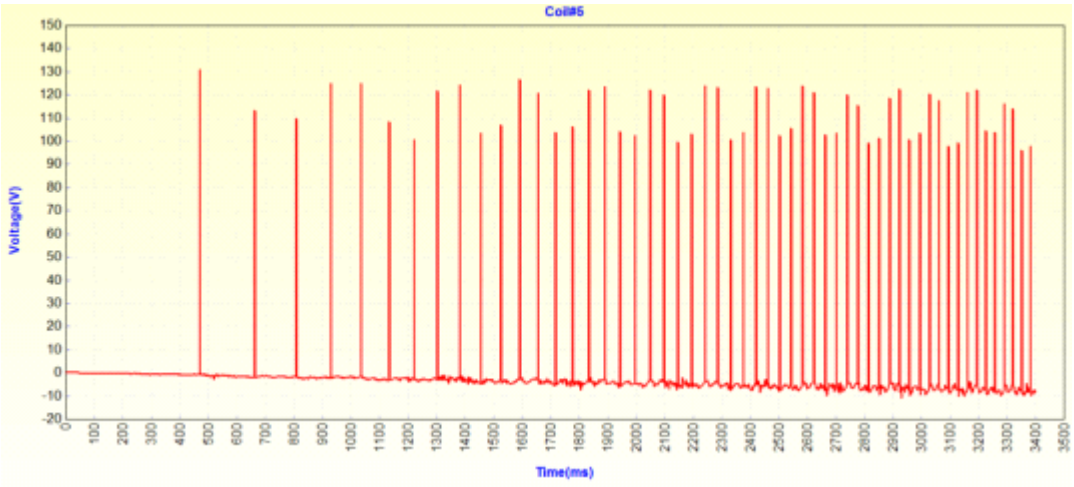


그림 3.3.1.17 유도 전압 : CASE 3

CASE 2와 비교하여 평균 유효 전압이 2.86V까지 다소 상승한 것을 확인할 수 있다.

② 모의 실험

시뮬레이션 결과를 토대로 모의 실험을 수행하였다.

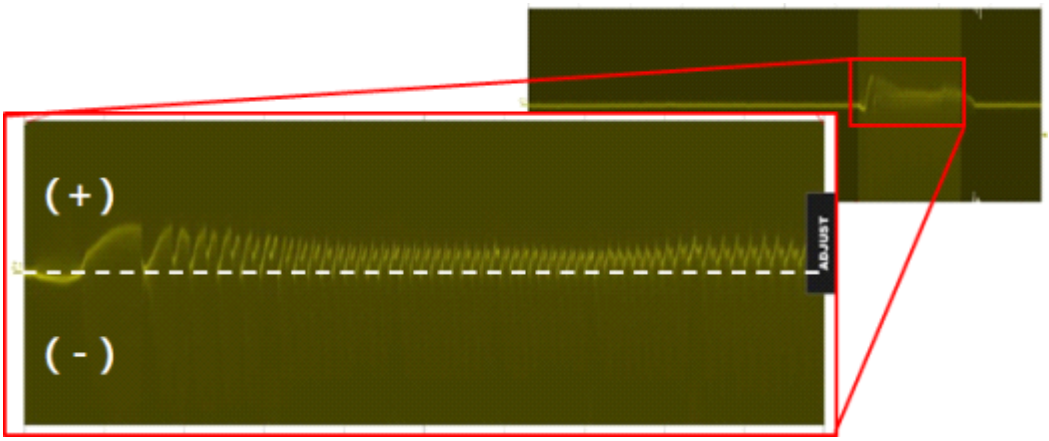


그림 3.3.1.18 제안한 유도급전 장치의 실험파형(역기전력 특성)

결과를 살펴보면, 전체적으로 sinusoidal한 형태를 갖지만, 권선 방식과 위치에 따라 + 방향으로만 발생함을 확인할 수 있다. 이는 복잡한 추가 전력변환장치 없이 간단한 정류 회로만으로 차량에 필요한 DC 전력을 생성가능하며, 독일의 Transrapid, 일본의 MLX와 같은 자기부상 방식이 아닌 차륜지지방식으로 공극이 일정하여 레귤레이터 등의 추가적인 장치가 불필요하다.

③ 결론

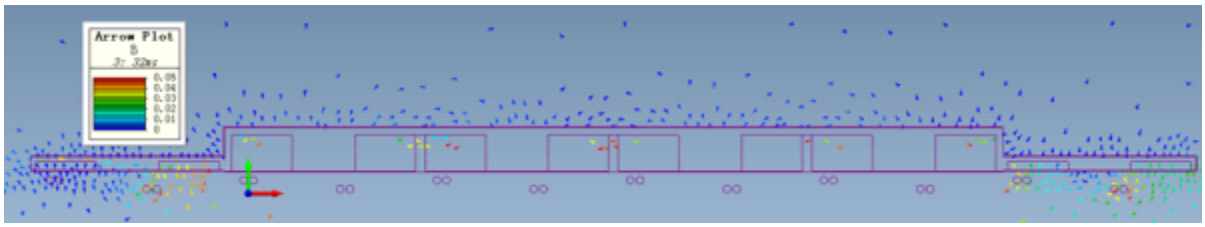


그림 3.3.1.19 차상 전자석 및 집전 코어의 시뮬레이션 결과

유도전압은 다음 식과 같이 차량의 속도에 비례하여 발생한다.

$$E = n\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

시뮬레이션에서는 정지상태에서 출발하여 최고속도 3.3m/s(약 12km/h)까지의 결과이며, 따라서 100km/h까지 속도가 상승한다면 시뮬레이션 결과(2.86V)보다 약 10배 큰 30V 정도의 전압을 만들 수 있다. 또한, 권선 설계 및 코어 구조에 따라 80V~100V까지 전압을 생성할 수 있다. 이러한 경우, 리니어 발전기와 달리 복잡한 전력변환장치 없이 간단한 정류기만으로 차상의 배터리를 충전할 수 있을 것으로 보인다.

(2) 설계 사양

유도 집전 장치의 설계 사양은 다음 표 3.3.1.6과 같다.

표 3.3.1.6 유도 집전 장치 설계 사양

항목	세부 사항
코어 재질	규소강판
크기	274*214*67 mm
출력전압	DC84V ~ 115V
구성	전자석 앞뒤 각 1개 위치 (총 2조)

(3) 설계 도면

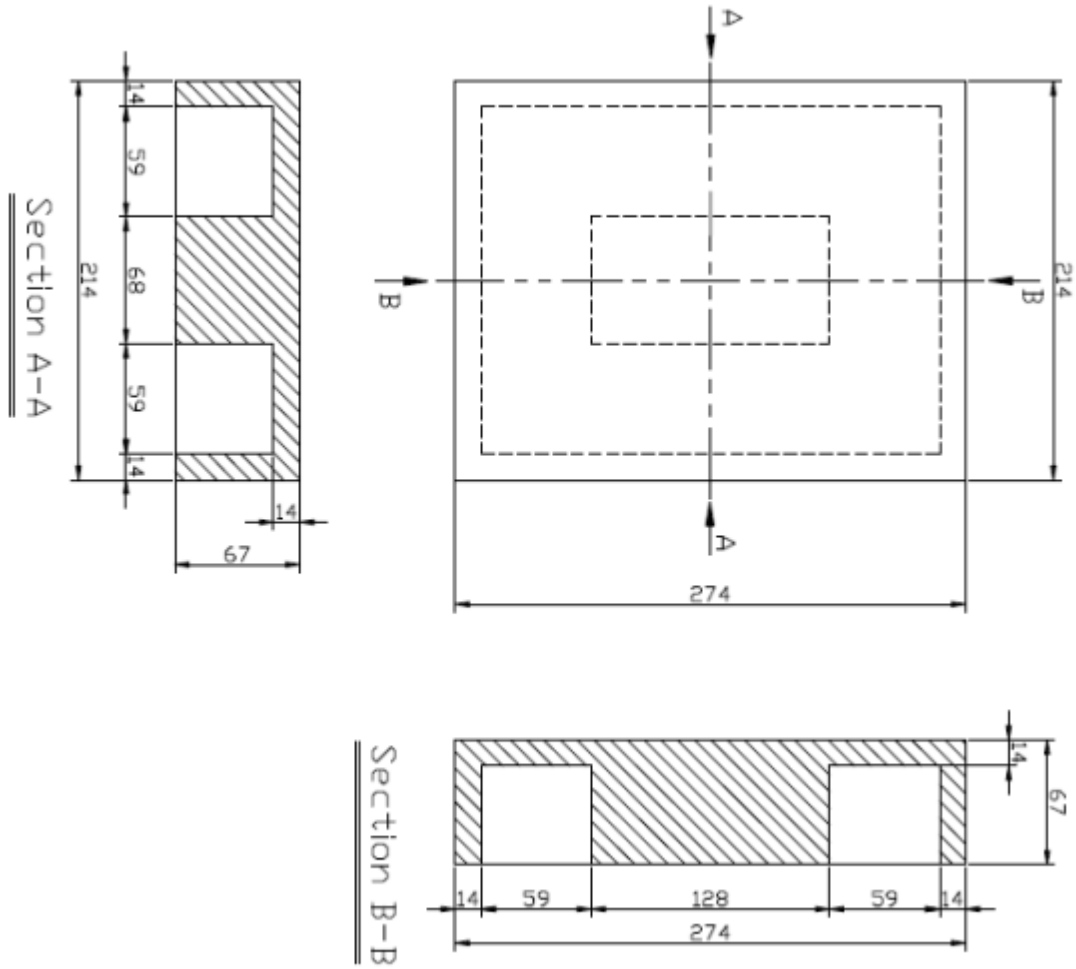


그림 3.3.1.20 유도 집전 장치 설계 도면

(4) 제작 사진

2열의 지상코일에 맞추어 배열될 수 있도록 2조의 유도 집전 장치를 설계 도면에 의거하여 제작하였으며, 설치된 유도 집전 장치는 그림 3.3.1.21과 같다.

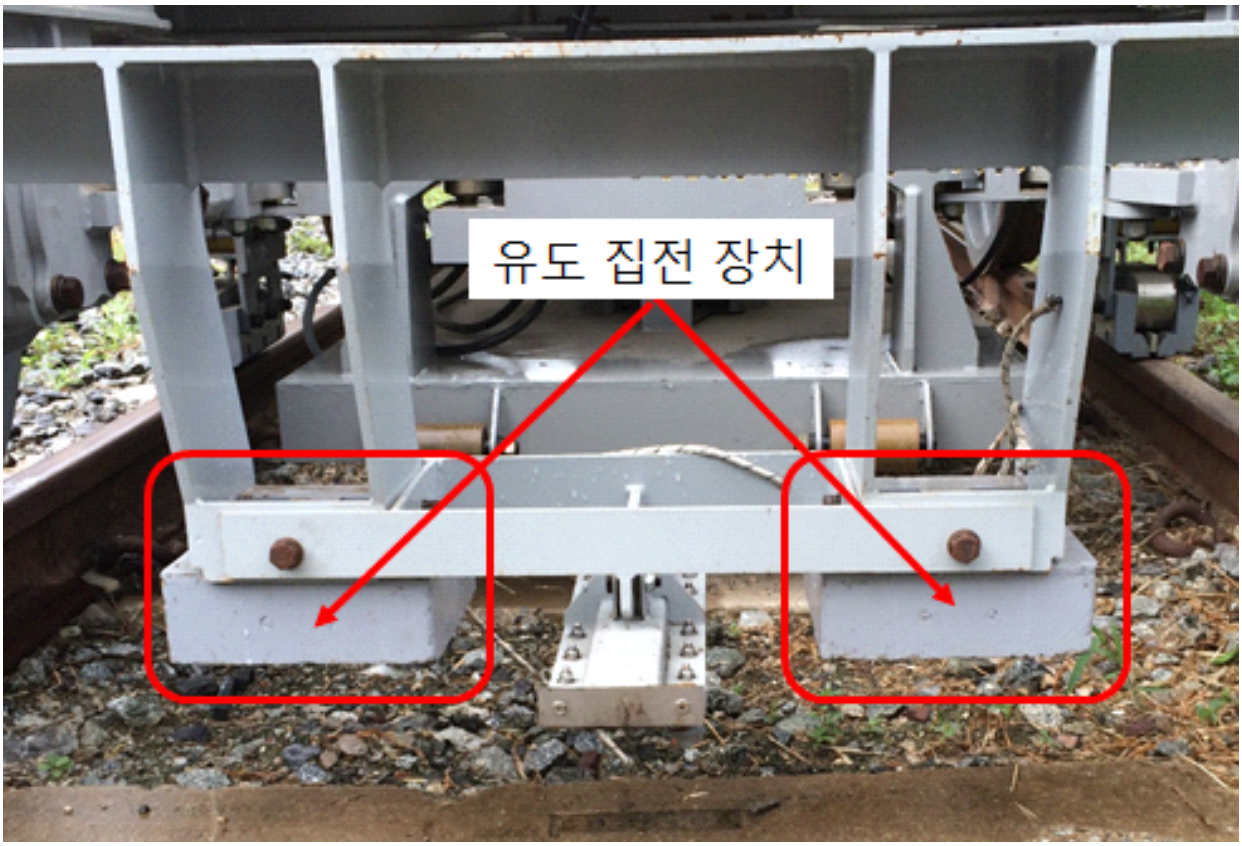


그림 3.3.1.21 제작된 유도 집전 장치

나. 제어 전원 및 차상 전자석 전원 공급 장치

차상에는 각종 전자부품 및 전자석을 위한 전원 공급 장치가 필요하다. 특히 LPM 추진시스템에서 지상 코일과 차상 전자석 간의 상호작용으로 추력을 발생시키기 위해서는 차상에의 안정적인 전원공급은 중요한 요소라 할 수 있다. 차상 전원 공급 장치로는 기본적으로 배터리를 사용한다.

차상 전원은 주로 전자석에서 에너지를 소모하기 때문에 전자석 사양에 따라 전원 공급 시스템 사양이 결정된다. 전자석의 세부적인 설계 사양은 앞의 3.3.1.2장에서 살펴볼 수 있다.

(1) 세부 설계 사양

① 충전기

기본 전원 공급 장치의 충전기 부분 세부 설계 사양은 다음 표 3.3.1.7과 같다.

표 3.3.1.7 충전기 세부 설계 사양

항목	내용	세부 사항	비고
입력사양	정격 입력 전압	DC84V ~ 115V	
	정격 입력 전류	150A	
	원격제어 방식	RS-232	
	로컬 제어방식	수동 변경	
출력사양	정격 출력 전압	DC10V ~ 120V	고정 설정 가능
	정격 출력 전류	5A ~ 100A	고정 설정 가능
	정격 출력 전력	12kW	
	출력 효율	정격 부하시 83% 이상	
	리플 (rms)	500mV 이하 (5Hz~1MHz)	
	병렬 시 최대사용률(current)	85%~90% 4EA 동시연결	
	출력노이즈(Vp-p)	500mV 이하 (20MHz)	
보호회로	입력과전압 보호회로	110% 이내	
	출력과전압 보호회로	105% 이내	
	출력과전류 보호회로	+0.2A 이내	
	Foldback 보호회로	부하 short circuit	
	온도 보호회로	경고 표시	
	Power Supply Fail 보호기능	병렬연결시 Power Supply Fail 보호	
Display	전압	0.1V 단위	
	전류	0.1A 단위	
냉각방식		강제 공냉식	

② DC/DC 컨버터

기본 전원 공급 장치의 DC/DC 컨버터 부분 세부 설계 사양은 다음 표 2.3.3.5와 같다. 또한, 시스템 구성도는 그림 3.3.1.22와 같다.

표 3.3.1.8 DC/DC 컨버터 세부 설계 사양

항목	세부사항	비고
입력 전압	DC 80 ~ 120 [V]	
입력 전류	최대 DC 600 [A]	
출력 전압	DC 10V ~ 200 [V]	고정 설정 가능
출력 전류	5A ~ 200 [A]	고정 설정 가능
보호등급	IP20	
사용율	50%ED	40KW
냉각방식	공냉식	
크기	500x270x600	
무게	75kg	
효율	95%	
HMI	○ Windows XP 이상 버전에서 동작 ○ 무선통신(블루투스)을 통한 데이터 전송방식 ○ 배터리 입력 전압 84V이하로 떨어졌을 때, 배터리 과방전 보호를 위해 입력 차단	

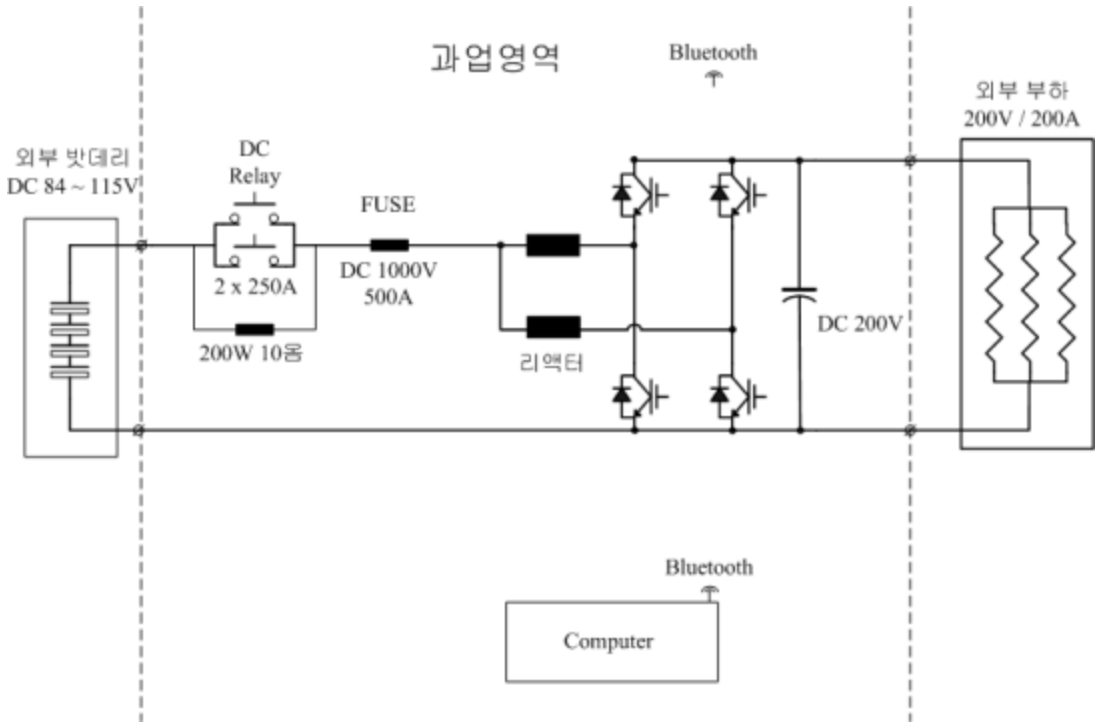


그림 3.3.1.22 DC/DC 컨버터 시스템 구성도

③ 축전지

기본 전원 공급 장치의 축전지 부분 세부 설계 사양은 다음 표 2.3.3.6과 같다.

표 3.3.1.9 축전지 세부 설계 사양

내 용	세부 사항
축전지 종류	리튬이온
셀 유형	파우치타입
공칭전압/용량	51.8V / 62Ah
방전 Cut-off 전압	42V
충전종지전압	57.4V
최대방전전류	300A
연결	선직렬, 후병렬
최대 Capa	직렬 1,000V, 병렬 5,000Ah
안전성 인증	국제인증(UL 혹은 CE)
설치 형식	19” Rack
BMS	BMS 포함
무게	39kg
Module 사이즈(mm)	445(W) * 553(D) * 126(H)

(2) 설계 도면

① 축전지 + BMS (Battery Management System)

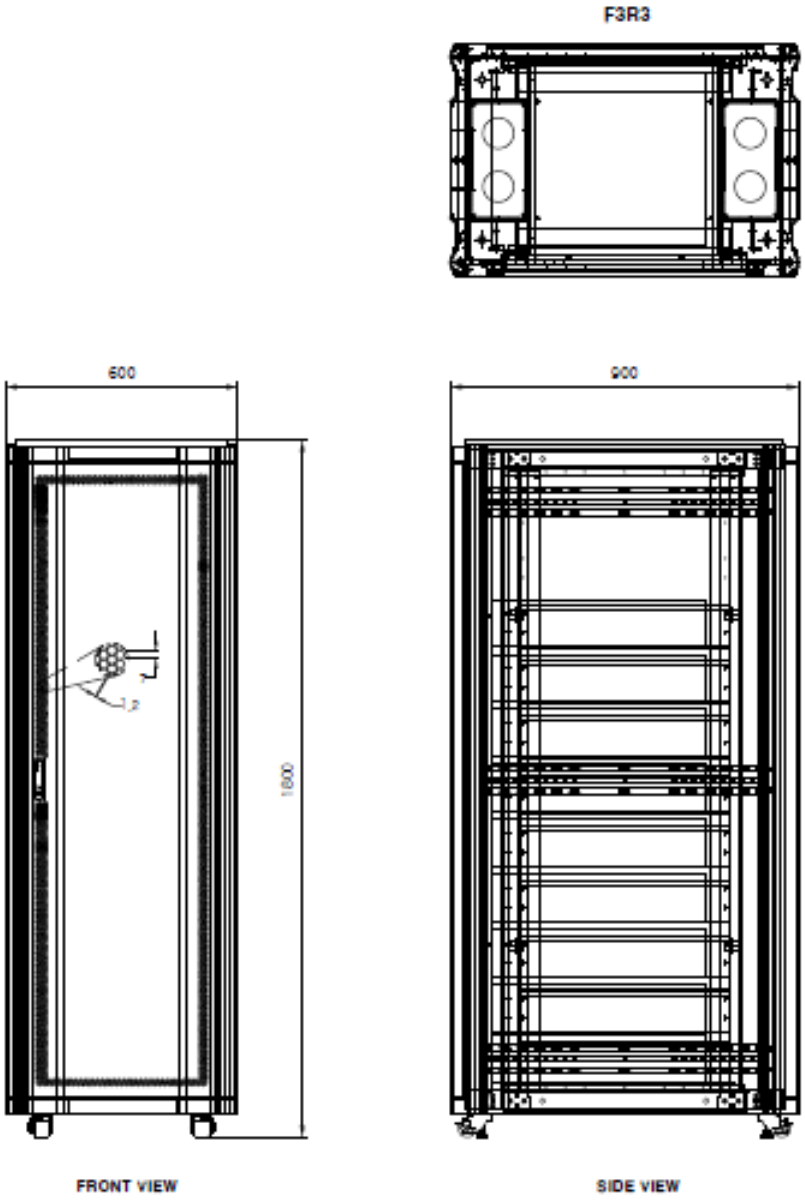


그림 3.3.1.23 축전지 + BMS 설계 도면

② 충전기 + DC/DC 컨버터

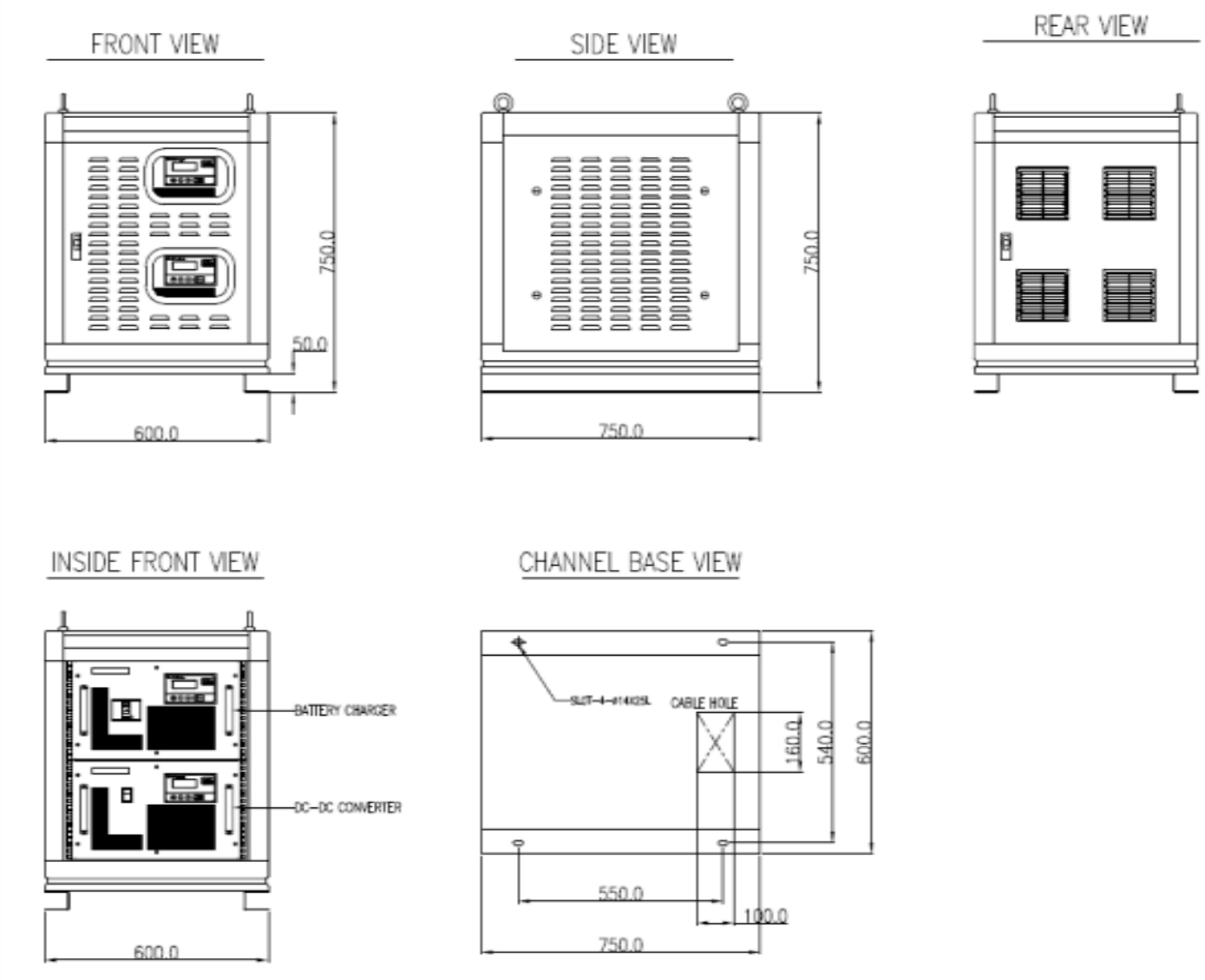


그림 3.3.1.24 충전기 + DC/DC 컨버터 설계 도면

(3) 제작 사진

설계 사양 및 설계 도면을 토대로 제작된 충전기/컨버터/축전지는 아래 그림 3.3.1.25와 같다.



그림 3.3.1.25 제작된 충전기/컨버터/축전지

3.3.1.4. 지상 대전류 공급용 전력변환장치 모듈 시작품 설계 및 제작

가. 개요

지상 대전류 공급용 전력변환장치는 컨버터, 인버터, 냉각장치, 위치센서, 브레이크 시스템, 표시장치 등의 6가지 구성품으로 이루어져 있으며, 이들 6가지 구성품들의 조합된 기능으로 실대차를 운행할 수 있도록 설계 및 개발 되었다. 각 구성품의 기능 및 역할은 다음과 같다.

(1) 컨버터

AC 3상 440V를 입력받아서 DC 200V/2000A의 양질의 직류전원을 인버터에 공급한다. 또한 AC입력전압, 전류, DC출력전압, 전류의 검출값을 인버터에 공급하여 운행 중의 전원상태를 모니터링 할 수 있게 하여준다.

(2) 인버터

컨버터로부터 DC 200V/2000A의 양질의 직류전원을 공급받아서 구동 동력인 LPM 추진용 전류를 발생시킨다. 또한 위치센서로부터 위치센서의 정보를 받아서 실대차의 위치에 따른 LPM 추진 동력용 전류를 교번 발생시킴으로서 실대차를 운행할 수 있게 하여준다. 그리고 컨버터와 인버터의 운전정보를 표시장치로 전송하고 표시장치로 부터의 운전 명령을 송신 받아서 운전명령에 따른 실대차 운행을 시킨다.

(3) 냉각장치

컨버터와 인버터의 메인 스위칭 소자의 방열을 담당하는 구성품으로서 메인스위칭 소자의 온도상승을 주위온도 대비 최대 Δt 40도 이하가 될 수 있도록 방열을 시켜준다.

(4) 위치센서

실대차의 위치정보를 검출한다. 이 검출된 정보를 인버터에 전송하여 인버터가 실대차의 위치정보를 바탕으로 LPM 추진 전류를 발생할 수 있도록 하여준다.

(5) 브레이크 시스템

실대차에 탑재되어서 바퀴의 동작을 검출하고 zigbee 무선통신을 통하여 인버터의 운전정보를 송신받고, 이 정보를 바탕으로 실대차에 장착된 브레이크를 자동 동작 시킨다.

(6) 표시장치

인버터로부터 컨버터와 인버터의 운전정보를 송신받고, 실대차에 장착된 GPS 정보를 송신받아, 이 정보를 기반으로 실대차의 운행정보 및 컨버터와 인버터의 운전정보를 그래픽형태로 표시하고 실대차의 운행 명령을 인버터로 전송하여 최종적으로 실대차를 운용자가 편리하게 운행할 수 있게 하여 준다.

나. 설계 디자인

LPM 추진장치는 AC 3상 440V를 공급받아 실대차를 운행할 수 있도록 컨버터, 인버터, 위치센서, 브레이크 제어시스템, 표시장치를 구성하여 각 구성품 간의 원활한 인터페이스가 이루어질 수 있도록 전기적인 특성과 구조적인 형상을 고려하여 구성하였다. 특히 컨버터, 인버터의 외함은 방열을 위하여 히트파이트(heat pipe)를 적용한 공냉구조로서 단품들의 배치를 고려하여 설계/제작하였다.

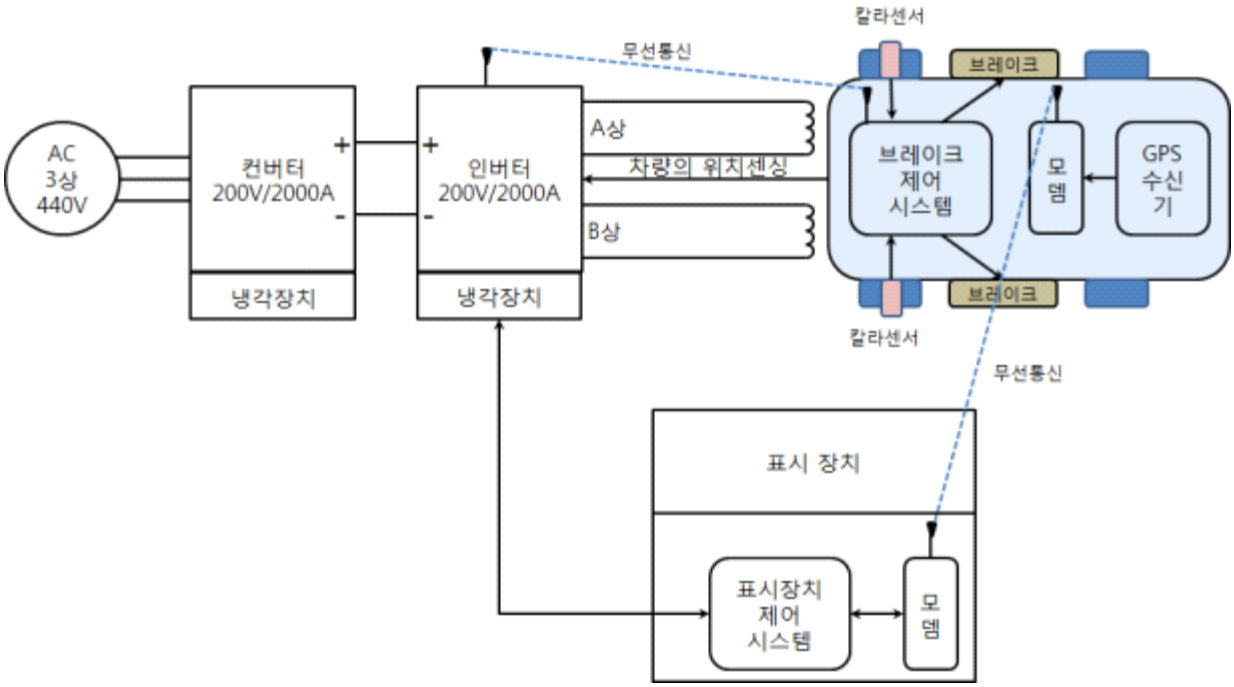


그림 3.3.1.26 시스템 구성도

(1) 컨버터

LPM 추진을 위해서는 인버터에 안정된 직류전원 DC 200V를 공급해야만 한다. 컨버터는 3상 440V의 상용전원을 DC 200V로 변환하는 데 그 목적이 있다. 주로 응답 특성이 좋은 다이오드 및 DC-DC 컨버터 방식, 전력품질이 좋은 능동형 필터 방식, 효율이 좋은 위상제어 정류방식 등이 있다. 본 과제에서는 효율이 가장 높고 비용과 공간을 절감할 수 있는 위상제어 정류기 방식을 통해서 전력을 변환한다.

① 컨버터 1 SET 구성도

- Thyristor / Thyristor 스너버
- 환류 다이오드/ 환류 다이오드 스너버
- 필터 인덕터
- 필터 커패시터
- SCR 컨트롤러/ 드라이버

② 컨버터 구성도

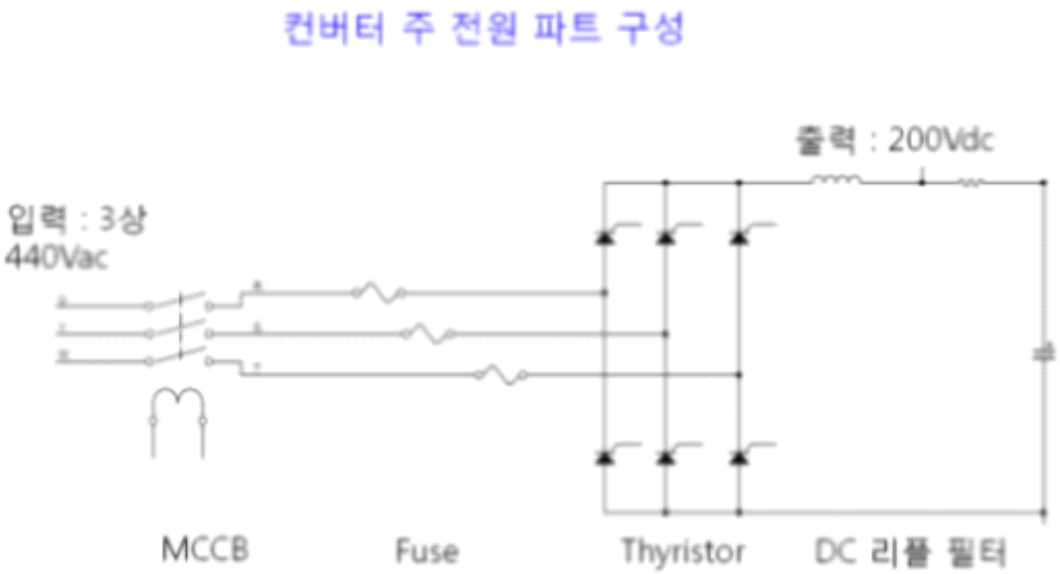


그림 3.3.1.27 컨버터 주 전원 생성부

컨버터는 AC 3상 440V를 입력 받아 DC200V/2000A의 안정적인 공급한다. 위의 주요소자는 메인 전력 스위칭 소자로서 사이리스터(Thyristor)를 사용하였고, 환류 다이오드와 필터용 인덕터, 필터용 커패시터 등이 있다. 각 소자의 특징 및 선정 기준은 아래와 같다.

ⅰ) Thyristor와 스너버

사이리스터(Thyristor)의 본래 명칭은 SCR(Silicon Controlled Rectifier)로서 전력용 반도체 소자 중의 하나이다. 주로 대전력 교류를 직류로 변환하는 역할을 담당한다. SCR을 이용해 직류로 변환하기 위해 일반적으로 4개 또는 6개의 SCR을 단위로 적용된다. 3개의 전극으로 구성되며 애노드(Anode, A), 캐소드(Cathode, K), 게이트(Gate, G)의 3개의 단자를 가진 3극 정류소자이다. 내부적인 등가회로를 보면N-P-N-P 4개의 전극으로 이루어져 있는 소자이고 양방향의 전압 차단을 할 수 있으며 전류 제어는 단방향만 가능하다. 순바이어스 전압일 때 게이트 트리거에 의해서 ON 동작을 시킬 수 있고 역바이어스 전압에 의해서 자동으로 OFF가 된다. 사이리스터를 정류기로 많이 사용하는 이유 중에 하나가 바로 이러한 역바이어스 특성이다. 자동으로 OFF가 되기 때문에 상-하의 SCR이 동시에 켜지는 암단락 자체가 발생할 수 없는 소자이다. 내부의 CHIP 온도를 정격 온도의 80% 정도로 관리 해주고, 부하 단락이 발생하지만 않는다면 반영구적으로 사용할 수 있는 소자이다. SCR을 사용할 경우 대부분 0.1㎌ 정도의 스너버 커패시터를 병렬로 연결하여 dv/dt 특성을 개선한다. 이러한 스너버의 적용으로 주변으로의 EMI 방사를 낮출 수가 있다. 점검할 때는 테스터기(DMM - Digital Multi-Meter)가 필요하며 측정 모드는 저항이다. 테스터 리드의 적색(양극) 리드를 캐소드에 흑색(음극) 리드를 애노드에 두고 측정하면 정상적일 경우 수㏁이 나타난다. 불량일 경우는 0Ω이거나 1Ω 미만의 값이 나타난다. 불량일 경우 교체하여야 한다. 게이트와 캐소드의 저항값은 정상일 때 약 5~30Ω 이 나타난다.

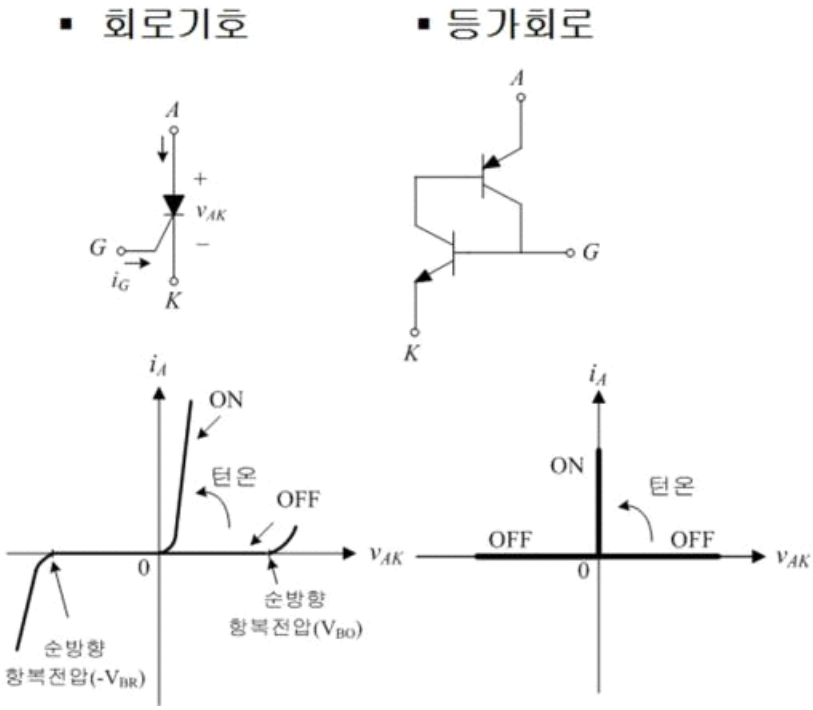


그림 3.3.1.28 Thyristor의 기호와 등가회로

ii) Thyristor의 용량 산출

LPM에서 400kW를 사용하여 견인을 할 경우로 용량을 산출한다. MCC-16IO2 소자의 사양서 중에 해당되는 내용을 먼저 참고한다.

표 3.3.1.10 MCC-16IO2 소자 주요 사양

Parameter	Unit	Spec.	Description
Vrt	V	0.85	최소의 전류를 흘렸을 때의 전압 강하
rt	mΩ	0.3	다이오드를 통과하여 흐른 전류와, 발생하는 전압강하의 비율의 역수
Vtm	V	0.85	발생할 수 있는 전압 강하 최대값

- 입력 전압 440V, 3∅, 입력 무효전력 600kVA (한 상당 200kVA)

- 한 상에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}\,V} = \frac{200{,}000}{\sqrt{3}\times 440} = 800\text{A}$$

- 800A를 흘렸을 때의 전압 강하는 다음과 같다.

$$V_f = V_{rt} + r_t \times I = 0.85 + 0.0003 \times 800 = 1.09\text{V}$$

- 발생한 전압 강하와 해당 전류를 곱하면 도통 손실이 된다.

$$P = V \times I \times D = 1.09 \times 800 \times 0.3 = 261\text{W}$$

- 주파수는 60Hz 밖에 되지 않는 저주파이므로 스위칭 손실은 고려하지 않는다.
- 하나의 패키지에 두 개의 SCR이 들어 있어서 SCR의 손실은 최대 523W가 된다.
- SCR이 총 3EA이므로 최종 손실은 1.6kW가 되며 충분히 냉각 가능한 용량이다.

iii) 환류 다이오드(free wheeling diode)

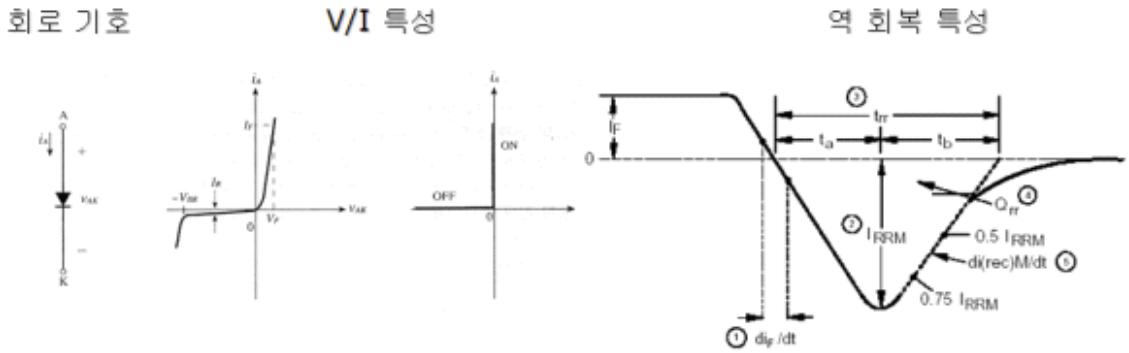


그림 3.3.1.29 다이오드의 특성곡선

전류를 한 방향으로만 흐르게 하고, 그 역방향으로 흐르지 못하게 하는 성질을 가진 반도체 소자이다. 2극 진공관의 의미를 표시하는 경우도 있다. 다이오드의 전류를 한 방향만으로 흐르게 하는 작용을 정류라고 하며, 교류를 직류로 변환할 때 쓰인다. 다이오드에는 이 정류용 다이오드가 흔히 쓰이지만 그 밖에도 여러 가지 용도가 있다. 일정 전압을 유지하고자 역방향으로 전류를 흘릴 수도 있는 제너 다이오드가 있고 논리 회로를 구성하는 소자 등의 스위칭(switching)에도 다이오드가 많이 사용된다. 빛을 내는 발광 다이오드나 전압에 의하여 정전 용량이 바뀌는 가변 용량 다이오드 등도 있다. SCR을 사용하여 정류를 할 때 경부하 조건으로 운전을 하게 되면 다이오드의 역회복 특성에 의해서 출력전압이 음(-)의 전압이 나타나게 될 수가 있다. 이러한 특성을 개선하기 위해서는 경부하시 SCR의 역전류를 다른 곳으로 보내주어야 한다. 환류 다이오드는 이러한 역전류를 흘려줄 패스를 만들기 위해서 사용된다. SCR 정류기의 후단에 위치한 환류 다이오드도 있고, 인덕터의 전류를 역으로 흘려주는 경우도 있으며, 고속 스위칭 소자의 역전류를 흘려주는 경우도 있다.

iv) 필터 인덕터

저항, 콘덴서 등과 같은 수동소자로서 전기회로를 이루는 가장 기본적인 부품 가운데 하나이다. 구리나 알루미늄 등을 절연성 재료로 싸서 나사 모양으로 여러 번 감은 솔레노이드를 주로

사용한다. 즉, 도선을 감은 코일로 가장 기본적인 회로 부품이자 회로 소자이다. 기호는 자기적인 결합을 뜻하는 리키지(linkage)의 머리글자를 따서 L로 표시한다. 전류의 변화량에 비례해 전압을 유도함으로써 전류의 변화를 제한하는 기능을 한다. 이때 회로에 흐르고 있는 전류의 변화에 따라 전자기 유도로 생기는 역기전력의 비율, 또는 권선에 흐르는 시간의 변화량과 권선에 발생하는 기전력의 비를 인덕턴스라고 한다. 다이오드 정류기, SCR 정류기 등의 정류방식에서는 스위칭 주파수가 높지 않기 때문에 정류된 전압의 리플 전압과 리플 전류가 크다. 이는 부하측에 전달되는 전력의 품질이 나쁘다는 것을 뜻한다. DC필터 인덕터는 이러한 이유로 리플 전류를 줄이는 목적으로 사용된다. 대부분의 대전력용 인덕터는 커패시터처럼 상용품으로 공급되지 않고 있다. 그 이유는 설비 사양에 따라서 리플 전압- 전류 컷오프 주파수 등의 특성을 맞추어서 사용해야 하기 때문이다.

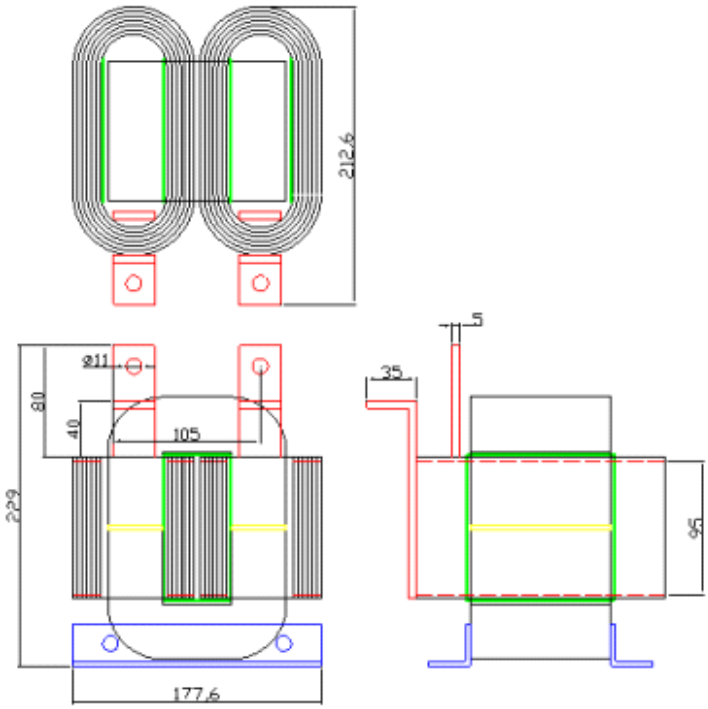


그림 3.3.1.30 DC필터 인덕터 초안

v) 필터 커패시터

커패시터는 전하를 축적하기 위한 회로소자이다. 2개의 얇은 도체의 판 사이에 유전체 (폴리에틸렌, 운모)등을 끼워 넣어서 만든다. 저항, 인덕터와 같이 전기 회로의 기초가 되는 수동 소자이다. 제작하는 도체의 면적이 넓을수록 정전용량 C가 크고 좁은 공간에서 최대한의 면적을 확보하기 위해서 두 도체 필름을 코일의 형상으로 감아서 제작한다. 인덕터와는 다르게 커패시터는 전압의 변화를 제한하는 역할을 한다. 커패시터와 인덕터는 서로 비슷한 역할을 할 수 있는데 DC 필터링을 하는데 쓰이게 되면 같은 공간에서 커패시터의 볼륨이 훨씬 적다. 커패시터는 이러한 이유로 인덕터보다 많이 사용이 되며 상용품으로도 널리 공급이 되고 있다. 커패시터는 설계를 하지 않고 맞는 제품을 구입하여 사용하면 된다. 커패시터는 전하를 축적하는 작

용 외에 교류 전류만을 흐르게 하는 작용이 있으므로 이것을 이용해 직류와 교류가 섞여 있는 전류에서 교류를 분리하는 데에도 쓰인다. 다이오드 정류기, SCR 정류기 등의 정류방식에서는 스위칭 주파수가 높지 않기 때문에 정류된 전압의 리플 전압과 리플 전류가 크다. 이는 부하 측에 전달되는 전력의 품질이 나쁘다는 것을 뜻한다. DC 필터 커패시터는 인덕터와 같은 이유로 리플 전압을 줄이는 목적으로 사용된다.

③ 제작도면

컨버터는 야외에 설치되는 조건을 고려하여 강설 및 강우에도 문제가 없는 방식으로 설계하였다. 외함 설계도면은 그림 3.3.1.31과 같다.

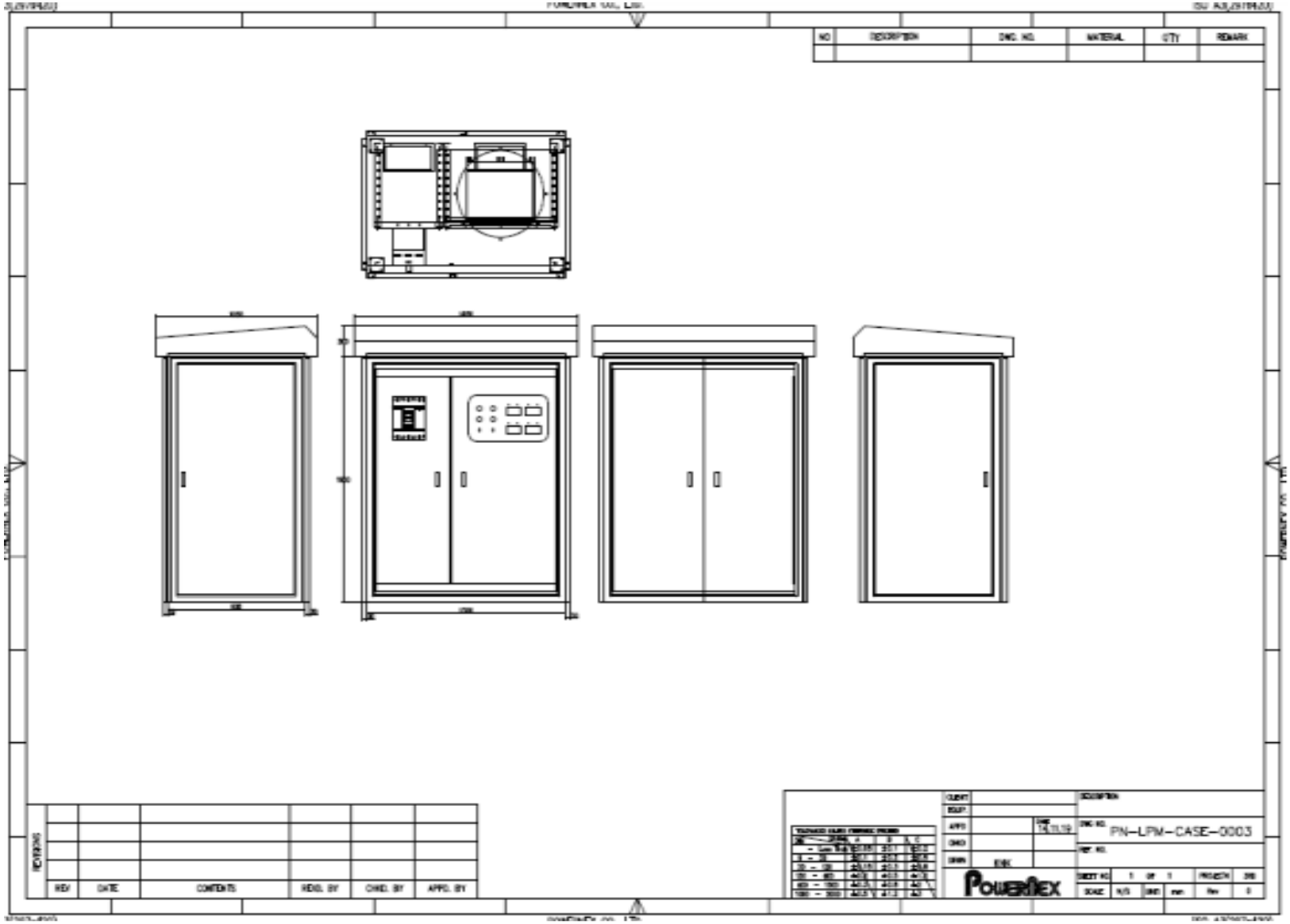


그림 3.3.1.31 컨버터 함체 도면

④ 설계 자료

ⅰ) 부하특성 분석

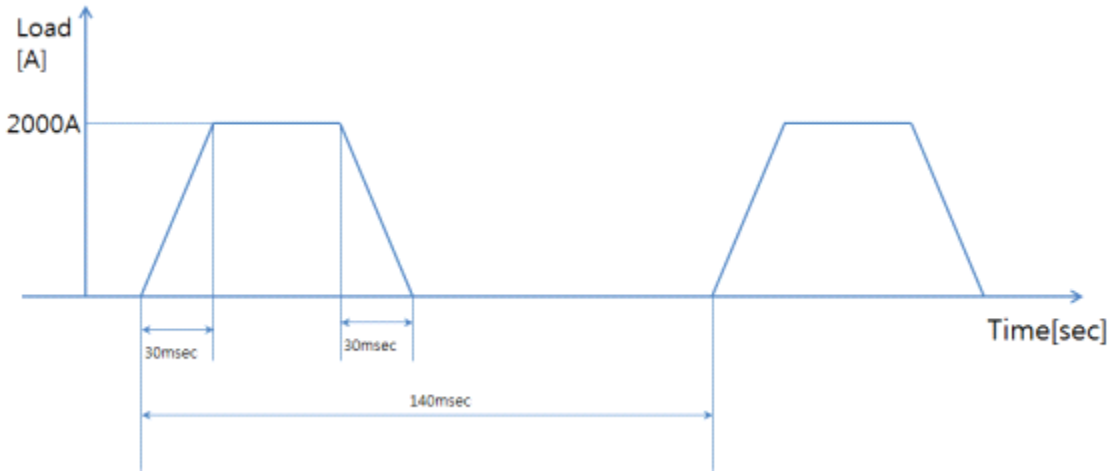


그림 3.3.1.32 컨버터의 부하 특성

대차의 최대 속도를 20 km/h로 가정하였을 때 한상에 흐르는 최대 주파수는 6.96 Hz 이므로 최대 부하 변동율을 시간은 140 msec로 산정하여 컨버터를 설계하였다

ⅱ) 컨버터 제어 기술

KPP7312 칩은 12bit분해능의 위상각제어 전용칩으로서 3개를 탑재하여 각 상별로 독립적인 아날로그, 디지털 신호를 처리할 수 있는 정밀 위상제어 칩이다. 현장의 전력상황을 고려하여 안정적이며 다양한 옵션기능을 통합하여 위상제어 모듈의 기본과 추가 기능을 갖추고 있다.

- Zero Cross 검출 분해능 : 5KHz이상 라인전압과 대등한 노이즈 혼입에도 0점이 흔들리지 않는 회로, 노이즈세력 대응 필터링 기능을 갖춘 220-440V직결 제로크로스 검출 방식
- 고주파 유도로, 인버터 등의 노이즈환경에서 신뢰성
- 기존 상간전압을 이용한 제어방식과 다르게 뉴트럴을 중심으로 제어가능
- 부하가 이상이 생겨도 나머지는 정상동작하며 언발란스된 입출력제어 가능
- 오실레이터 발진주파수 오차내의 안정된 타임베이스
- 트리거 시점과 게이트 구동펄스의 동기화를 통한 12bit의 분해능 구현
- 50/60Hz 전원주파수 자동판단, 두 주파수의 공배수 마스터클럭 사용
- 정상/역상 자동 판별 운전(초기 배선작업 시에는 일치시켜야 함)
- 전류제한 및 과전류 정지 보호 동작
- 히트싱크 과열차단 보호 동작

(2) 인버터

인버터는 LPM 추진 동력 발생장치이다. 따라서 인버터는 실대차의 위치를 정확히 인식하여 지상의 표시장치로 부터의 운행 지령 명령을 받아 LPM의 추진 동력을 발생 시켜서 실대차의 운행 제어가 원활히 될 수 있도록 하는데 그 목적이 있다. 주 전력변환용 스위칭 소자의 선정 및 드라이브 장치 설계, 제어 장치 및 보조전원 장치, 제어 알고리즘 구축 등이 이러한 목적을 이루기 위한 중요한 요소가 된다.

① 인버터 1 SET 구성품

- IGBT
- IGBT 드라이브
- DC Link Capacitor
- Aux power
- Controller
- 통신부

② 인버터 구성도

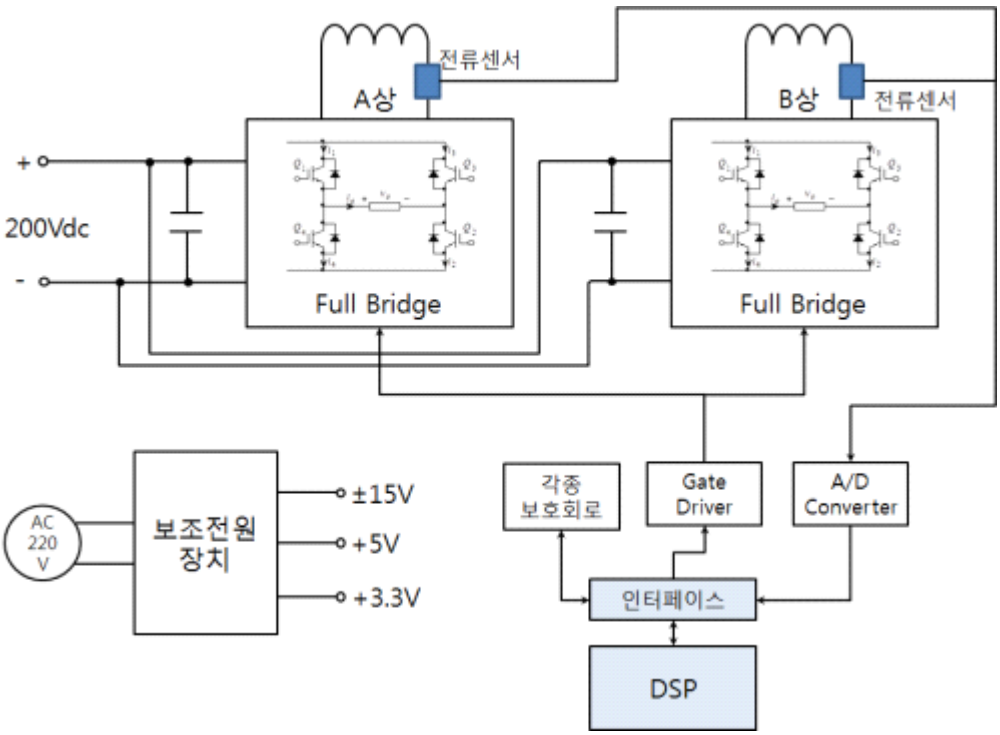


그림 3.3.1.33 인버터 구성도

인버터는 2상의 코일을 제어하기 위하여 2개의 단상용 Full Bridge 토플로지를 사용하였다. 주요 스위칭 소자는 Infineon사의 2,400A급 IGBT인 FZ2400R12HE4_B9를 선정 하였다.



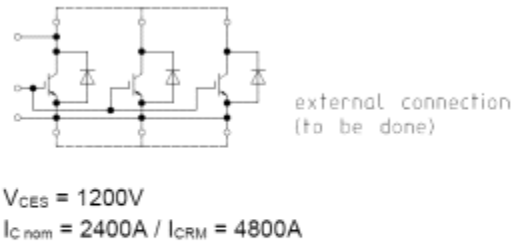


그림 3.3.1.34 스위칭 소자와 등가회로

메인 CPU는 TI사의 16bit급 CPU인 MC56F8345를 선정하여 원활한 제어 알고리즘을 구축할 수 있도록 하였다. CPU의 상세한 특징은 아래와 같다.

Efficient 16-bit 56800E family controller engine with dual Harvard architecture
Up to 60 Million Instructions Per Second (MIPS) at 60MHz core frequency
Single-cycle 16 × 16-bit parallel Multiplier-Accumulator (MAC)
Four 36-bit accumulators, including extension bits
Arithmetic and logic multi-bit shifter
Parallel instruction set with unique DSP addressing modes
Hardware DO and REP loops
Three internal address buses
Four internal data buses
Instruction set supports both DSP and controller functions
Controller-style addressing modes and instructions for compact code
Efficient C compiler and local variable support
Software subroutine and interrupt stack with depth limited only by memory
JTAG/EOnCE debug programming interface

그림 3.3.1.35 CPU 특징

CPU를 포함한 제어보드는 IGBT 게이트 신호와 출력 전류 및 각종 보호회로 동작을 수행한다. 제어보드의 구성도는 아래와 같다.

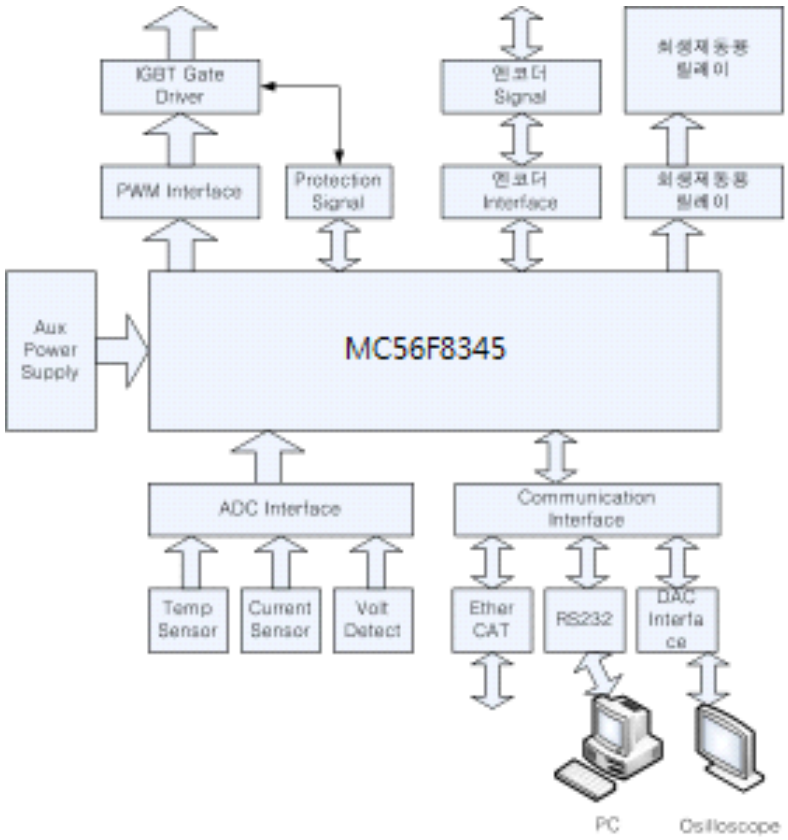


그림 3.3.1.36 CPU보드 구성도

제어보드의 게이트 신호를 받아서 IGBT를 드라이브 하여 입력 전력을 스위칭으로 제어할 수 있게 된다. 즉 LPM의 A상 및 B상 코일에 대전력을 공급하여 차량을 움직일 수 있게 하는 것이 전력변장치의 드라이브 보드이다. 드라이브 보드의 구성도는 아래와 같다.

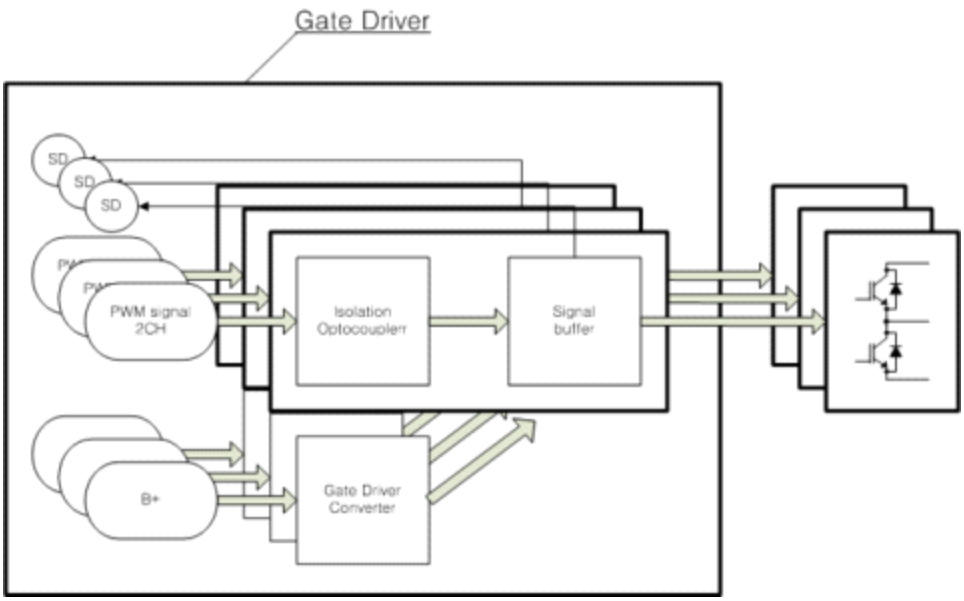


그림 3.3.1.37 드라이브 보드 구성도

또한 인버터 내에 제어보드 및 IGBT드라이브 전원, 출력 전류검출을 위한 전원, 각종 보호회로의 동작을 위한 보조 전원이 필요하다. 본 과제에서 보조전원은 주전력 전원인 AC 3상 440V 전원과는 별개로 AC 단상 220V를 별도로 받아서 안정적인 인버터에 안정적인 전원을 공급한다. 보조전원 보드의 구성도는 아래와 같다.

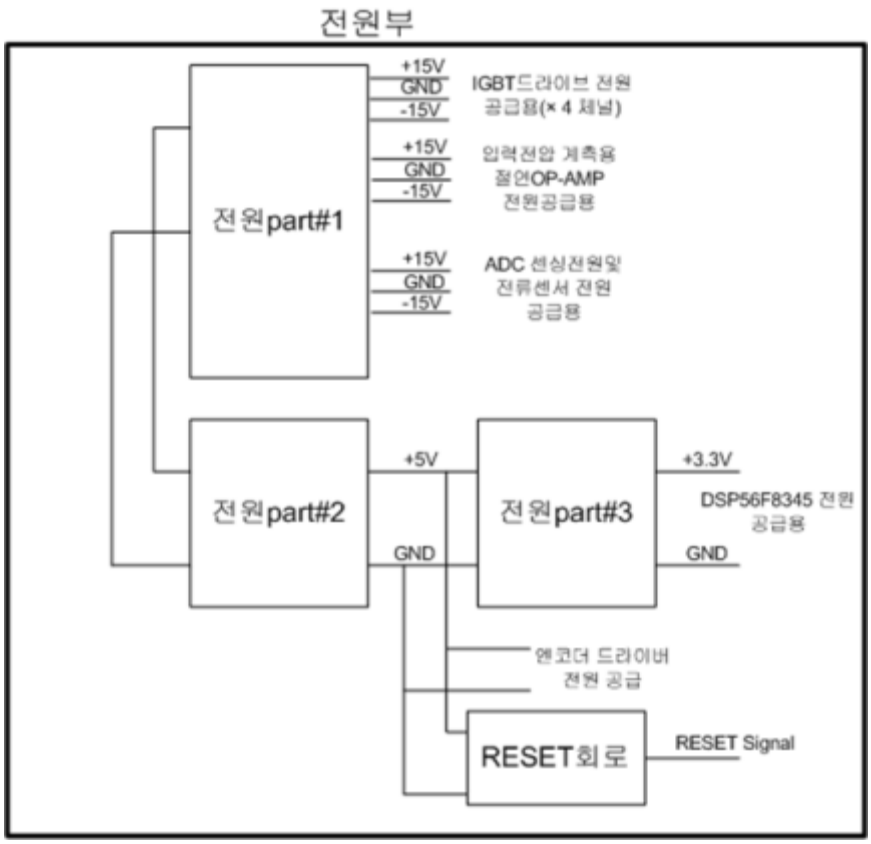


그림 3.3.1.38 보조전원보드 구성도

③ 제작도면

인버터는 컨버터와 마찬가지로 야외에 설치되는 조건을 고려하여 강설 및 강우에도 문제가 없는 방식으로 설계하였다. 외함 설계도면은 그림 3.3.1.39와 같다. 또한, 인버터 내부 회로 제작도면은 그림 3.3.1.40과 같다.

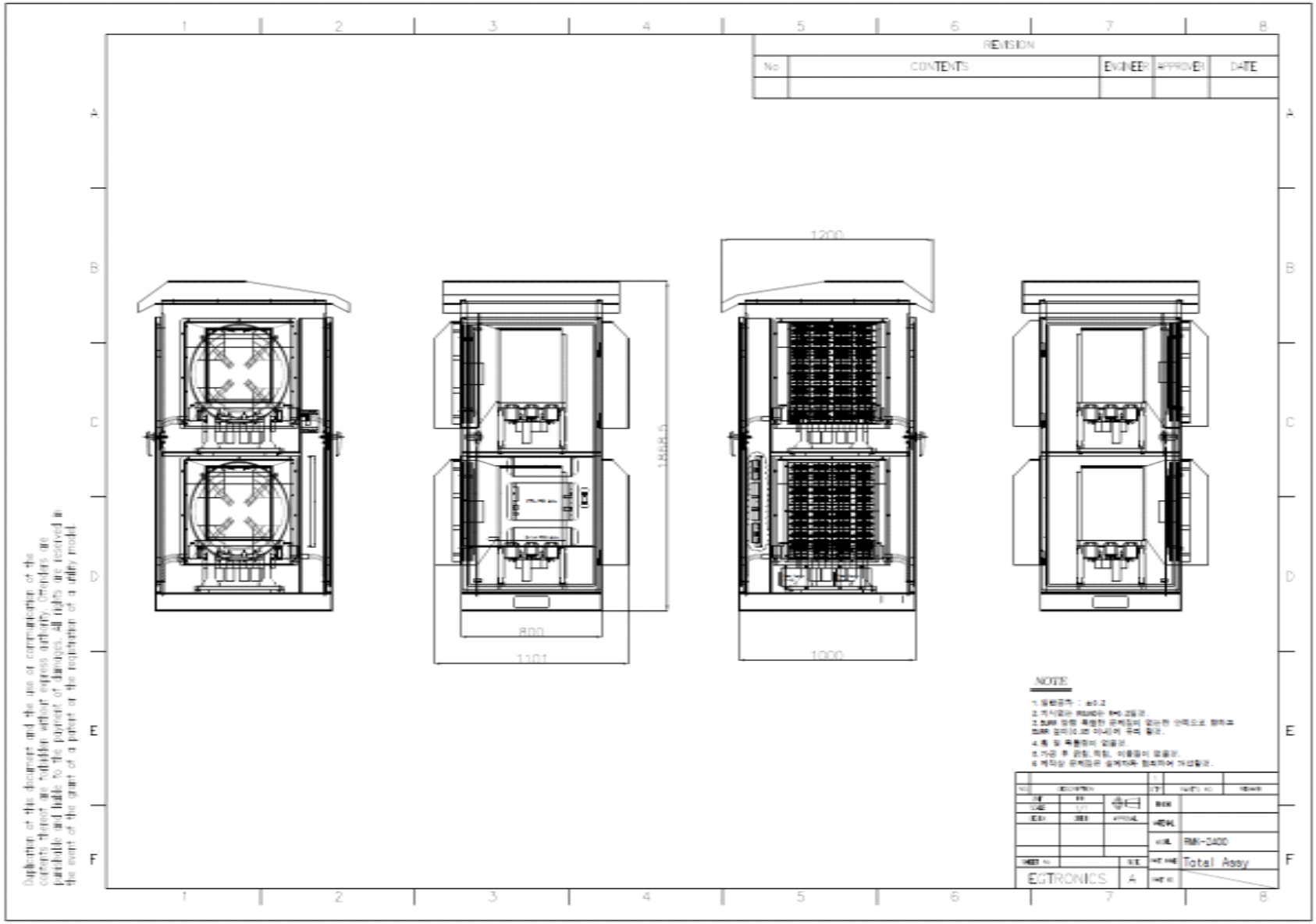


그림 3.3.1.39 인버터 제작도면

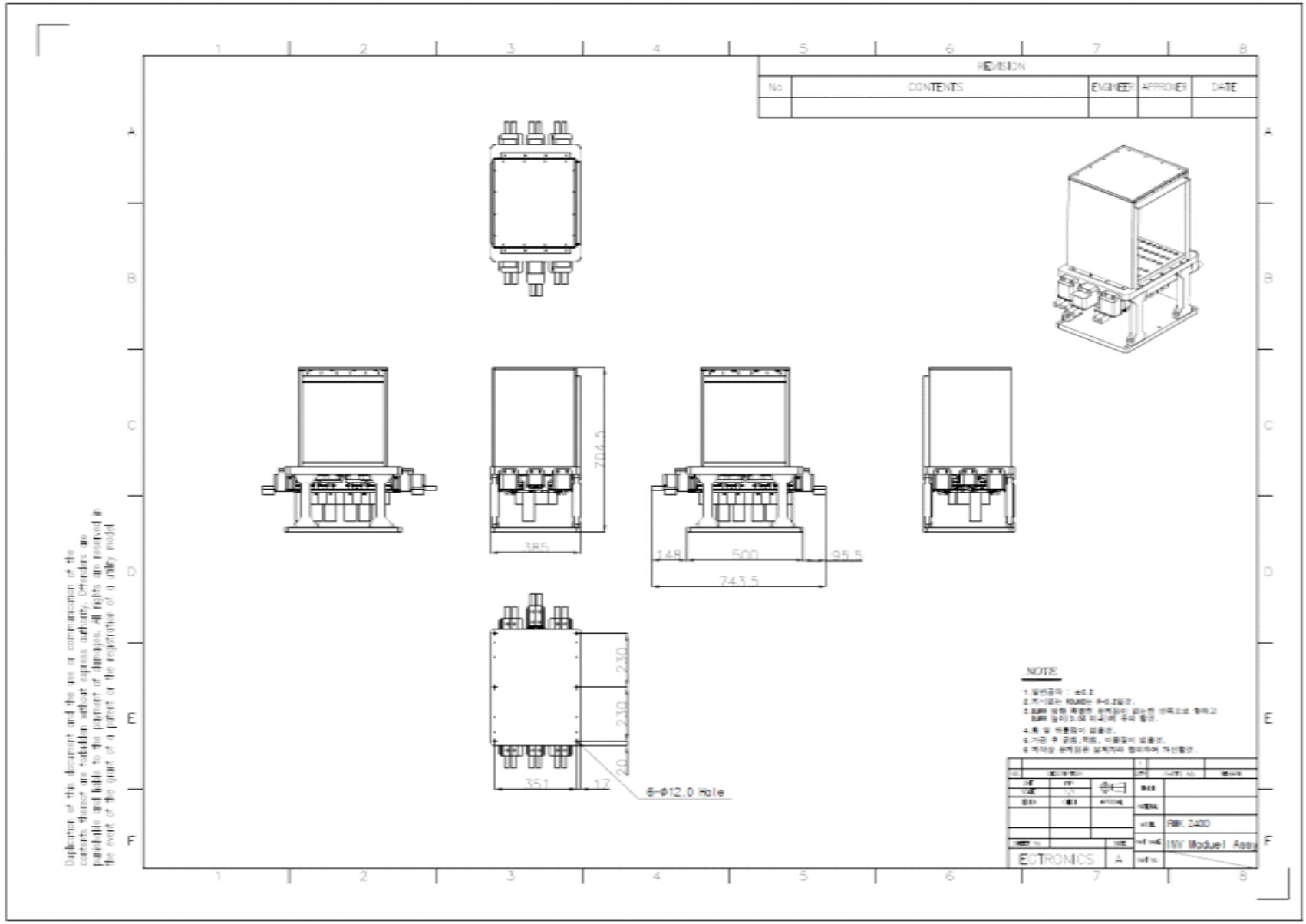


그림 3.3.1.40 인버터 내부 제작도면

④ 설계 자료

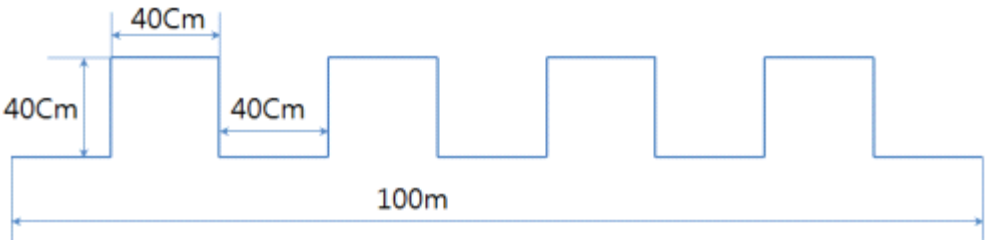


그림 3.3.1.41 추진코일 배치간격

ⅰ) DC Link 전압의 검토

- 한마디 개수 = 10000/40 = 250개
- 총 seg 개수 = 250개 * 4 = 1000 seg
- 총 배선길이 = 1000 seg*(40+10(공율반경고려))=50000Cm=500 m
- 배선 저항 값 = 0.16mΩ/m * 500m = 80mΩ
- 2000A 흘리는데 필요한 전압(L은 고려 안한값) V=2000*0.08=160V

따라서 인버터의 입력 전압을 200V 하였을 때 2000A 는 충분히 흘릴 수 있는 전압이다.

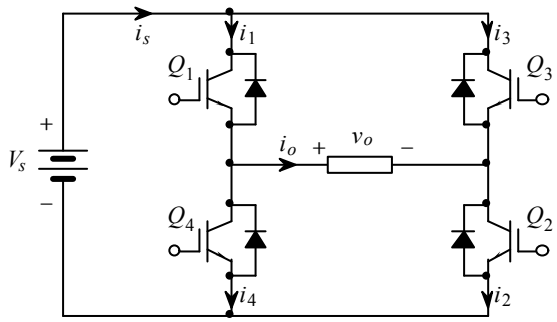
ⅱ) 대차 속도 20km 일때 추진코일의 주파수 계산

- 초속 = 20000m/3600sec = 5.56 m/sec
- 1회전의 거리 = 80cm
- Rps = 5.56/0.8 = 6.96 Hz

ⅲ) 인버터 제어 기술

LPM은 기본 토플로지를 단상 Full Bridge로 하여 A상과 B상의 두 개의 코일을 구동시킴으로서 차량을 전진 또는 후진 제어를 할 수 있게 한다. Full Bridge의 동작 특성은 다음과 같다.

- Full Bridge Inverter에서 가장 간단한 스위칭 기법은 구형파 출력전압을 만드는 것이다.
- 스위칭 소자 Q1과 Q4 및 Q2와 Q3는 동시에 턴온될 수 없다.
- 스위칭 소자 Q1, Q2, Q3, Q4의 스위칭 조합에 따라 부하에 걸리는 전압은 아래와 같다.



(a) Full Bridge 인버터 회로

스위칭 소자 턴-온	스위칭 소자 턴-오프	출력전압 Vo
Q1, Q2	Q3, Q4	Vo = +Vs
Q3, Q4	Q1, Q2	Vo = -Vs
Q1, Q3	Q2, Q4	Vo = 0
Q2, Q4	Q1, Q3	Vo = 0

(b) 스위칭 조합에 따른 출력 전압

그림 3.3.1.42 Full Bridge 인버터 구성

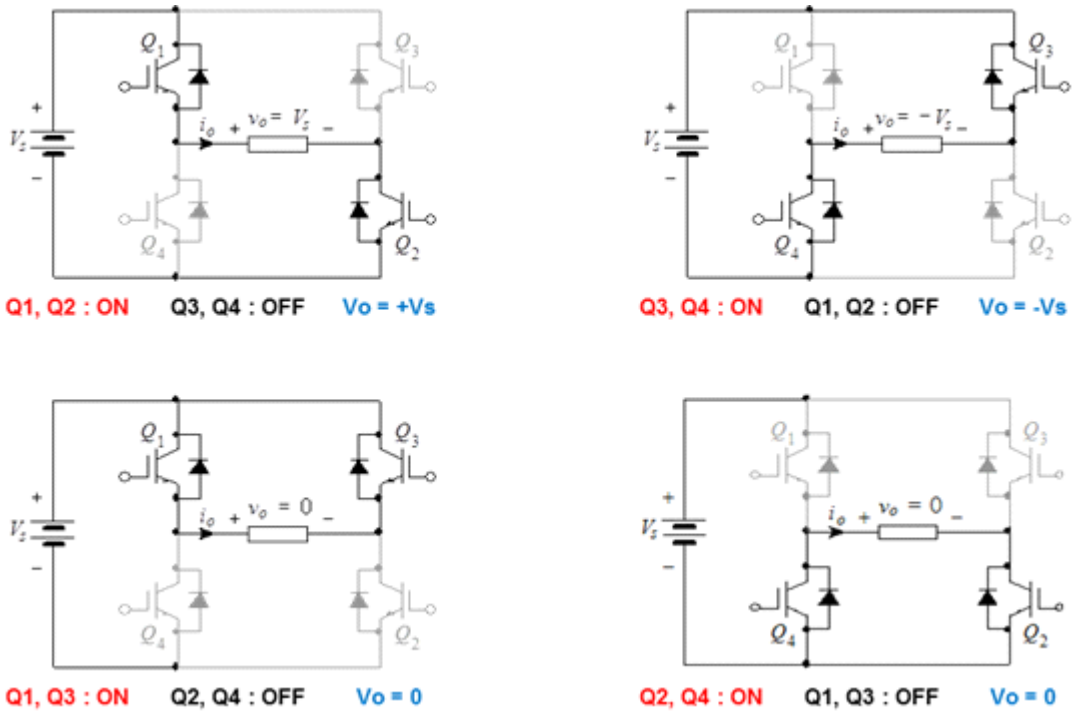


그림 3.3.1.43 Full Bridge 인버터 스위칭 조합에 따른 등가회로

R-L직렬부하이고 출력전압이 구형파가 인가되는 Full Bridge Inverter에서 스위칭 소자 Q1, Q2가 턴-온이고 Q3, Q4가 턴-오프 시 부하 양단 전압 Vo = +Vs이고 양(+)의 방향으로 전류가 증가되고 스위칭 소자 Q3, Q4가 턴-온이고 Q1, Q2가 턴-오프시 부하 양단 전압 Vo = -Vs이고 음(+)의 방향으로 전류가 증가된다.

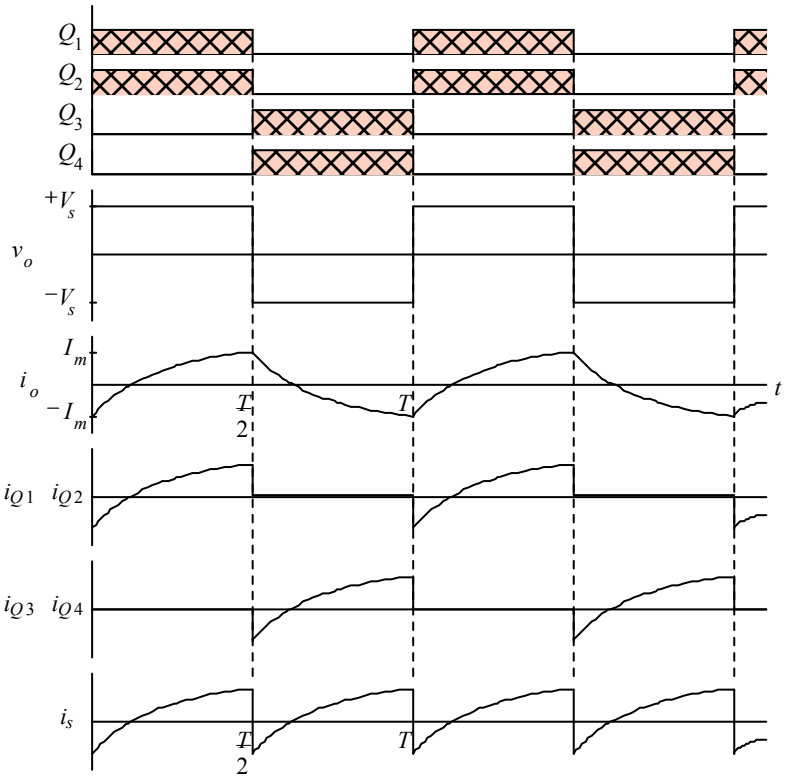


그림 3.3.1.44 Full Bridge 인버터 구형파 신호에 따른 각부 파형

이를 토대로 제작 사항에 맞게 설계하여 PSIM을 통하여 시뮬레이션을 한 결과는 아래와 같다.

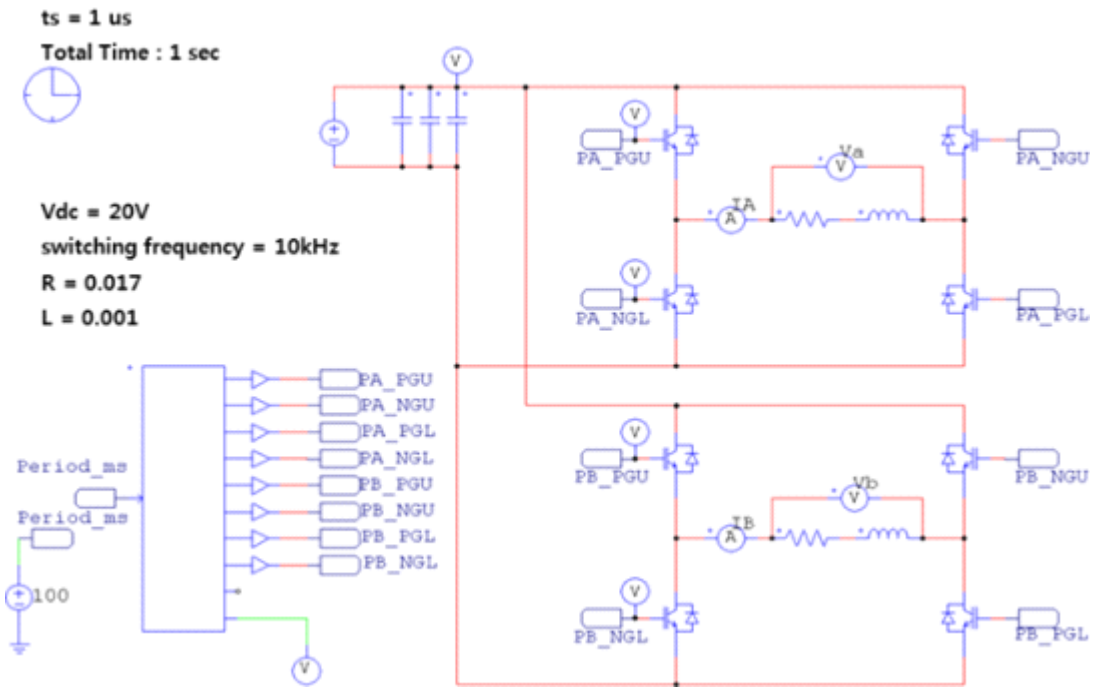


그림 3.3.1.45 Full Bridge 인버터 PSIM Schematic

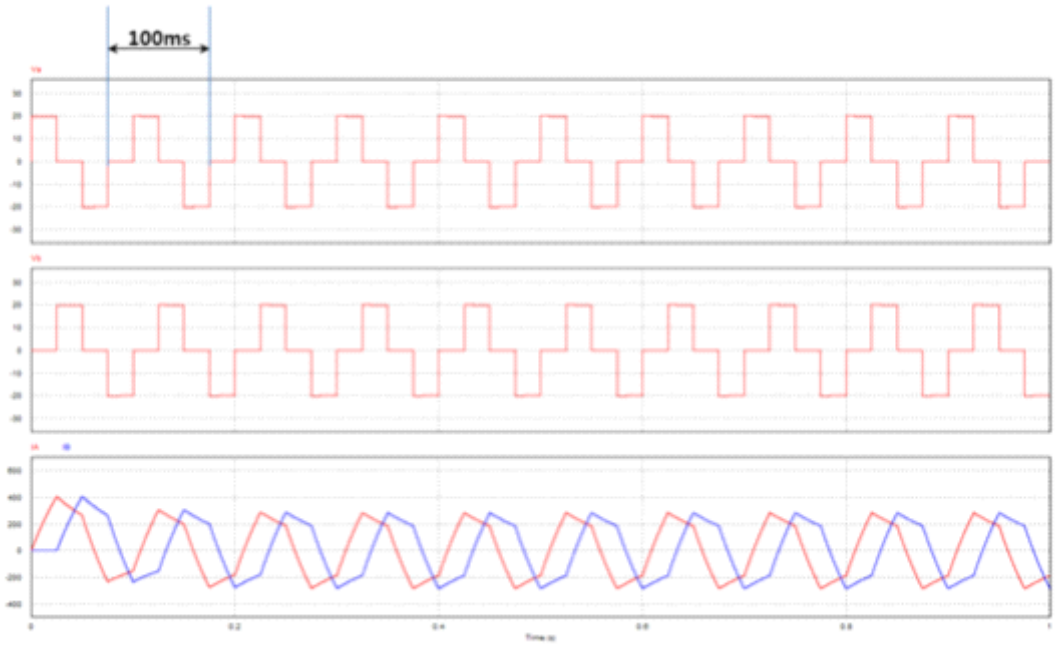


그림 3.3.1.46 Full Bridge 인버터 PSIM wave form

(3) 냉각장치

LPM 추진을 위한 전기에너지의 운동에너지로의 변환 과정은 전력 반도체의 손실을 수반하는 과정이라고 볼 수 있다. 전력 반도체의 손실은 열로서 나타나게 되고 온도 상승을 야기하게 된다. 전력 반도체의 온도 상승을 방치하게 되면 정격 온도를 넘게 되어 고장이 발생하게 된다. 냉각장치는 컨버터/인버터에 적용된 전력 반도체의 온도를 정격 온도 이내로 유지하는 데 그

목적이 있다.

① 냉각장치 1set 구성품

- 2kW급 컨버터 냉각장치 1EA
- 10kW급 인버터 냉각장치 2EA

② 냉각장치 구성도

소용량의 경우 FAN을 사용한 강제 공냉 방식을 주로 사용하며 오염물질의 유입으로 인하여 유지/보수가 어려운 단점이 있다. 중-대 용량은 수냉식과 자연냉각 방식을 주로 사용한다. 수냉식은 반도체의 온도를 여유 있게 설계할 수 있으며 장비가 컴팩트하지만 외부에 별도의 칠러나 에바콘이 추가된다. 자연냉각 방식은 강제 공랭식과 수냉식의 혼합형으로 두 가지 방식의 단점을 보완하고 장점을 부각시켰다고 볼 수 있다. 히트 파이프 내부 냉매의 잠열을 활용하여 부온도 특성을 통해서 순환이 되며 공랭식에 비해 유지/보수가 쉽고 수냉식보다 컴팩트하다. 철도 차량의 환경에서는 유지/보수가 쉽고 컴팩트한 자연 냉각방식이 가장 적합하다고 볼 수 있다.

③ 설계 자료

전력 설비에서 반도체를 냉각하는 방열판의 설계는 매우 중요한 요소이다. 냉각 성능을 잘못 산출하게 되면 정격으로 연속 운전 시에 과열로 인한 알람이 발생할 수도 있으며, 반대의 경우는 과도한 설계로 인하여 냉각 시스템의 전체 볼륨과 비용의 불필요한 상승이 따르게 된다. 주변 온도와 주변의 냉각 사양을 고려하여, 냉각핀과 SCR의 접합부의 온도 상승을 계산하고 이에 걸맞은 적절한 냉각기를 설계해야 한다. MCC- 16IO2 소자의 사양서를 참고하면, 냉각 시스템을 설계하는 절차는 다음과 같다.

표 3.3.1.11 냉각장치의 용량산출

Parameter	Unit	Spec.	Description
Tvj op	°C	125	SCR 접합의 정상동작 온도 최대값
Rth J-C	°C/kW	31	접합과 소자의 베이스 프레임간의 열 저항 값
Rth C-H	°C/kW	10	소자의 베이스 프레임과 방열판간의 접촉 열 저항 값
발열량 Q	W	523	소자의 손실 계산치
최대 주변온도	°C	50	설비 내부 방열판 주변의 분위기 온도
목표온도	°C	100	전력 반도체의 내부 접합의 최대 온도

ⅰ) 방열판의 온도와 SCR 베이스 프레임의 온도 차이를 계산한다.

$\Delta T_1 = R_{thC-H} \times Q =$ 10 × 0.523 = 5.2°C

ⅱ) SCR 베이스 프레임의 온도와 SCR 접합부의 온도 차이를 계산한다.

$\Delta T_2 = R_{thJ-C} \times Q =$ 31 × 0.523 = 15.7°C

ⅲ) 방열판의 온도와 SCR 접합부의 온도 차이를 계산한다.

$\Delta T_3 = \Delta T_1 + \Delta T_2 =$ 20.9°C

ⅳ) 목표 온도를 선정한다. 125 °C 소자이므로 80%를 유지하는 100°C로 선정한다.

ⅴ) 방열판의 온도와 방열판 핀간의 온도 차이를 계산한다.

ΔT(설계) = 목표온도 - ΔT_3 - 주변온도 = 100 - 20.9 - 50 = 29.1°C

ⅵ) 소자의 손실 523W, 주변 최대 온도 50°C의 조건 하에서 방열판의 설계 온도는 위와 같이 29.1°C 가 된다.

방열판은 523W X 3 = 1569W의 발열을 상기조건에서 접합온도를 100 °C를 유지하는 조건으로 설계가 된다. 온도상승 한도 내에서 십분 안정이 되며, 문제가 되지 않는다. 여유율을 고려하여 2kW급으로 설계를 한다. 제안된 설계에서 각 부분의 온도를 정리하면 아래와 같다.

표 3.3.1.12 컨버터 주요부에 대한 온도

Parameter	Spec.	ΔT	Unit
방열판 냉각핀 온도(주변온도)	50	0	°C
방열판 온도	79.1	29.1	°C
베이스 프레임 온도	84.3	5.2	°C
SCR 접합부 온도(목표온도)	100	15.7	°C

(4) 위치센서

LPM은 차량에 탑재된 전자석에 의한 동기형 제어 방식으로 차량의 정확한 위치를 검출한다는 것은 고정밀 제어를 할 수 있다고 말할 수 있다. 따라서 차량의 고정밀 위치를 제어하기 위해서는 차량의 위치를 정확히 검출할 수 있는 위치센서의 역할이 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 과제에서의 위치센서 차량이 아닌 철로에 위치센서를 설치하여 차량의 위치를 인버터로 전송하는데 그 목적이 있다. 차량 추진을 위한 대전력의 영향을 받지 않고 주위의 노이즈 등에도 오작동 하지 않는 위치센서 설계/제작 설치는 LPM 추진 장치 시스템에서 상당히 중요한 요소이다.

① 위치센서 1 SET 구성도

- 자속 감시용 Hall 센서
- 센서 불량 Detector
- 신호 증폭기
- 신호 트랜시버
- 전원부

② 구성도

ⅰ) 추진 코일과 대차의 자석 배치도

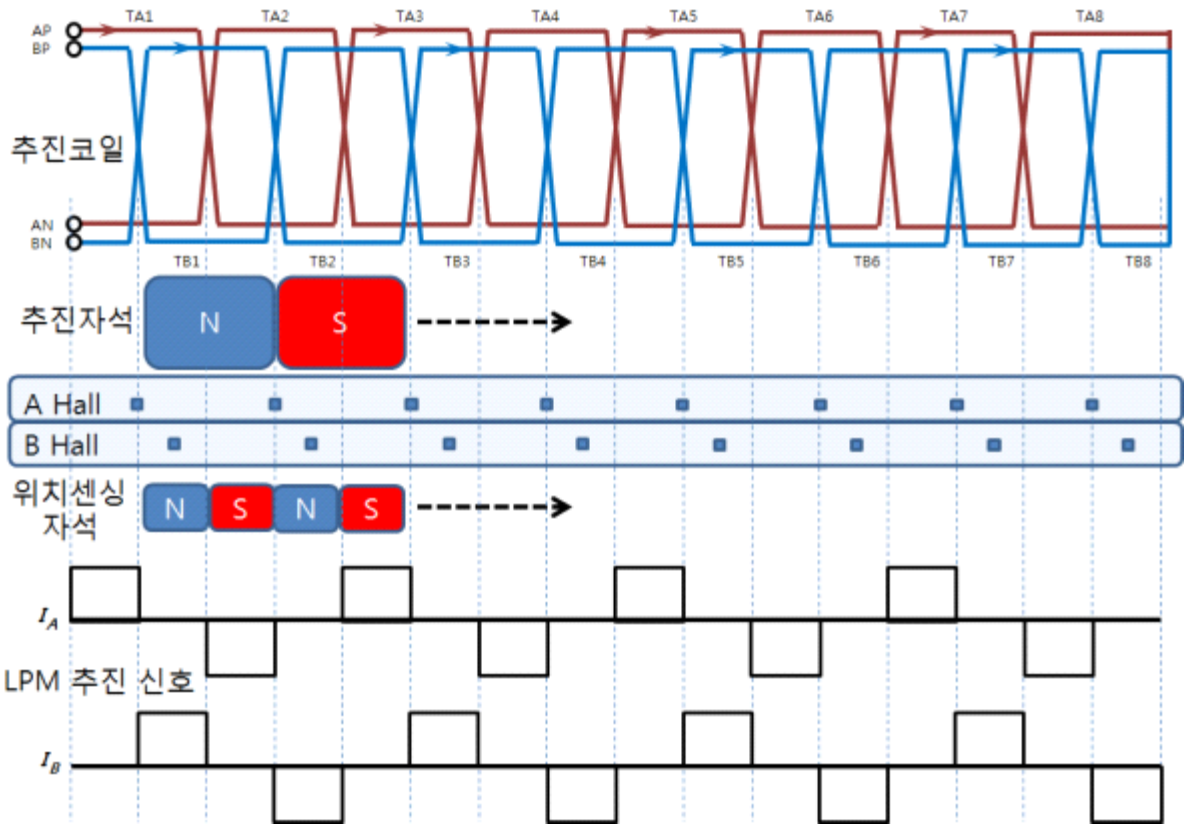


그림 3.3.1.47 추진 코일과 추진 파형

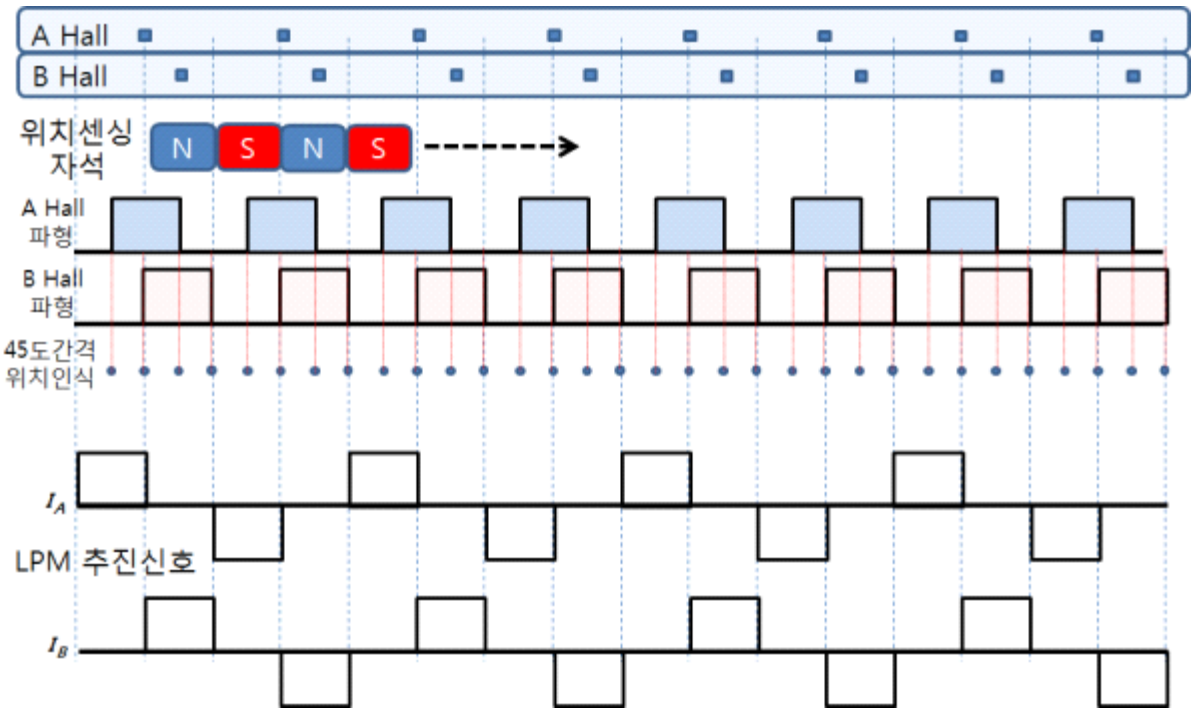


그림 3.3.1.48 위치 검출용 홀센서 파형과 위치인식방법

그림 3.,3.1.47에서 A 홀센서의 위치를 추진 코일의 위치와 동일하게 배치하고, B 홀센서 위치를 45도 어긋나게 배치하면 그림 3.3.1.48과 같이 대차 이동위치를 45도 간격으로 인식할 수 있게 된다. 이것을 카운트하여 90도 마다 LPM 추진신호를 발생시킬 수 있도록 한다.

ii) 홀센서 소자 선정

대차에 실장된 위치검출용 자석에 반응하여 위치펄스를 출력할 수 있는 Allegro사의 'A3295 홀센서'를 선정하였다. A3295의 주요 기능 및 특징은 다음과 같으며, 내부 블록도는 그림 3.3.1.49와 같다.

- Resistant to physical stress
- Superior temperature stability
- Output short-circuit protection
- Operation from unregulated supply
- Reverse battery protection
- Solid-state reliability
- Small package size
- Internal pull-up resistor optional

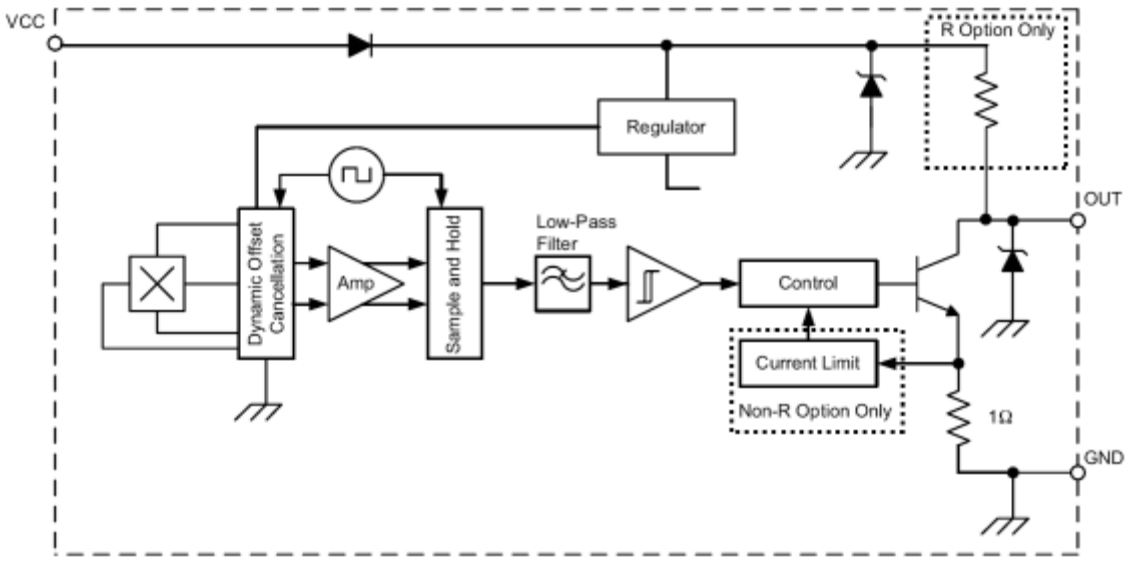


그림 3.3.1.49 A3295 내부 블록도

iii) Hall 센서의 구동 원리 및 등가 회로

아래의 그림과 같이 홀 소자는 휘스톤브리지 어레이 저항처럼 등가적으로 표현 할 수 있다. Hall 센서의 표면에 자속(magnetic flux)를 투과 시키면 등가 평형이 변경되어 저항값이 변하는 특징을 이용하여 자속의 세기를 측정 할 수 있다.

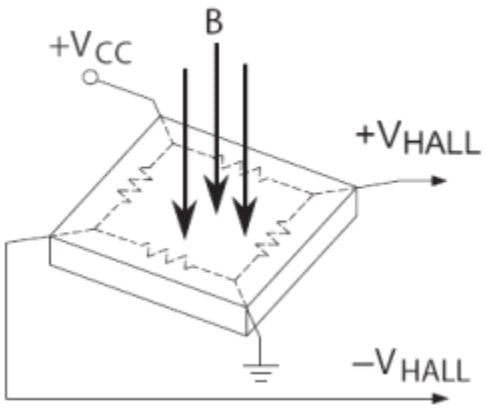


그림 3.3.1.50 A3295 등가 회로도

A3295는 자속밀도에 따른 출력 특성은 자속밀도에 비례하여 값이 나타나지 않고 그림 3.3.1.51과 같이 B_{OP} B_{RP} B_{HYS} 폭을 가지고 Switch Low과 Switch High 값으로 나타나는 특징을 가지고 있다. 따라서 자속밀도 양을 측정하는 용도로는 적합하지가 않고 어느 일정량의 자속밀도 존재 유무의 파악하는 용도로의 사용이 유리하다.

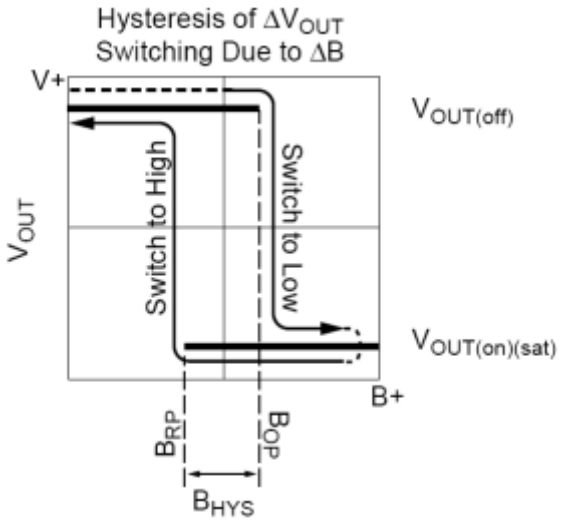


그림 3.3.1.51 자속밀도에 따른 출력전압

(5) 브레이크 제어 시스템

브레이크 제어 시스템은 차량에 탑재되어 차량의 움직임을 브레이크 제어 시스템이 독자적으로 감지하여 차량의 정상적인 움직임에서 비정상적인 움직임의 감지시 차량의 브레이크를 동작하여 차량을 보호하고자 하는데 그 목적이 있다. 브레이크 시스템은 차량의 무게와 정지 속도 등을 고려하여 브레이크 토크 등을 선정함으로서 고장없이 지속적인 성능을 유지하게 설계/제작을 하고자 한다.

① 브레이크 제어 시스템 1 SET 구성품

- 브레이크 드라이브
- 컬러센서 검출부
- 전원부
- 제어부
- 통신부

② 구성도

브레이크 제어 시스템은 차량 바퀴의 컬러센서를 검출해서 차량의 동작상태를 파악한다. 차량의 동작상태를 판단하여 차량의 이상 동작시 브레이크 동작여부를 결정하여 브레이크를 동작 또는 해제 시킨다. 또한 차량 내에서 자체적으로 Battery를 공급받아 DC 120V/100A 출력하는 전원에서 자체적으로 +12V 생성한다. 다만 브레이크의 동작전원은 DC120V의 전원으로 구동시킨다.

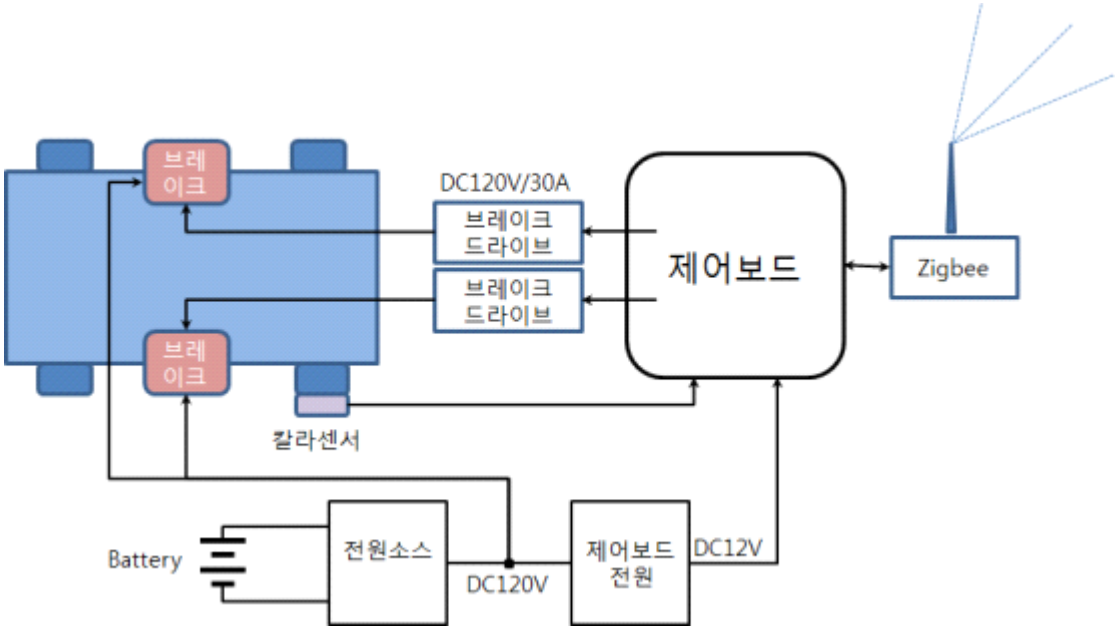


그림 3.3.1.52 브레이크 제어 시스템 구성도

③ 제작도면

브레이크 제작도면은 그림 3.3.1.53과 같다.

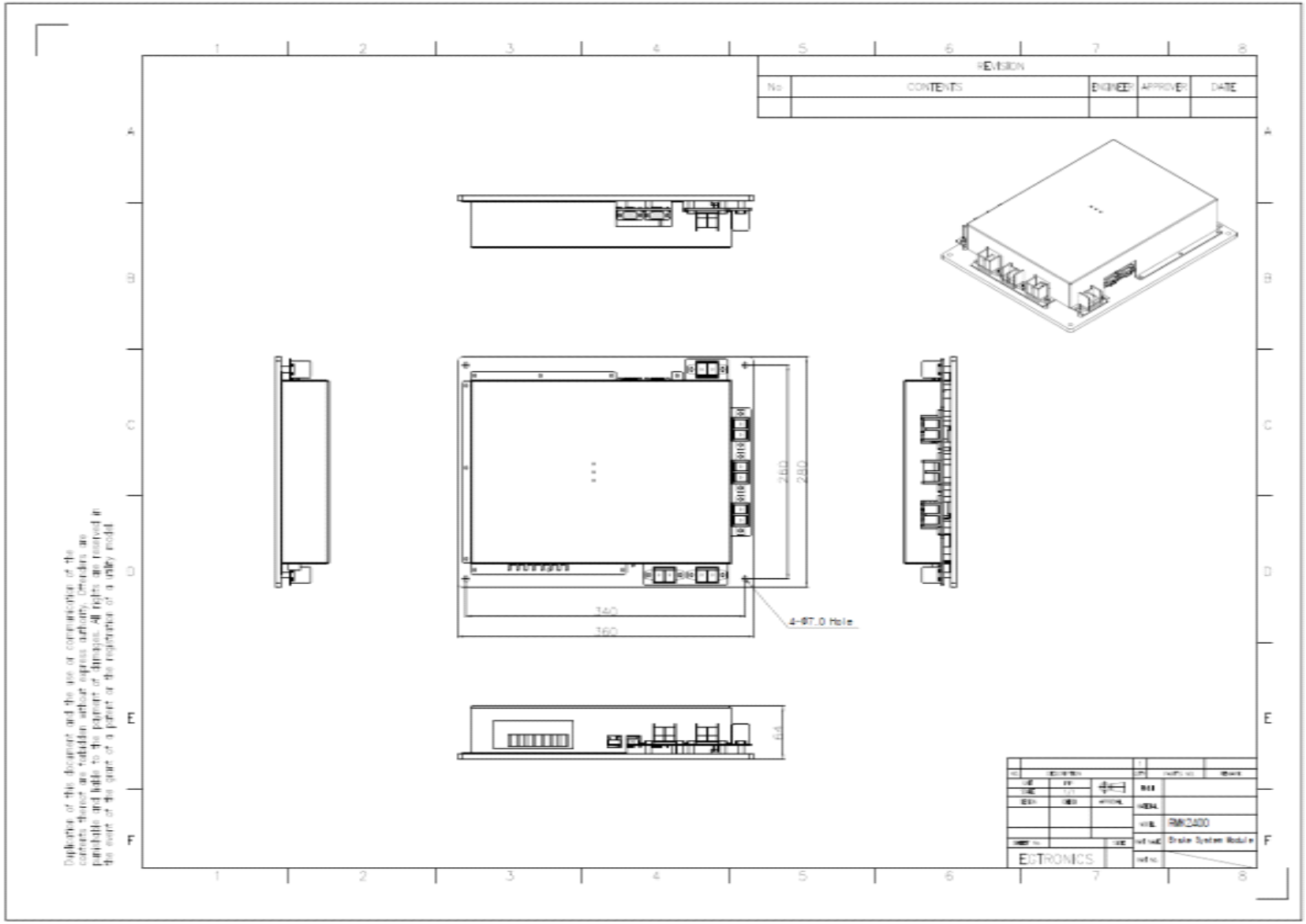


그림 3.3.1.53 브레이크 제어시스템 제작도면

④ 설계 자료

아래 그림 3.3.1.54의 동작알고리즘과 같이 브레이크 제어 시스템은 바퀴의 컬러센서를 검출하여 차량의 운행상태 정보 즉, 차량의 정지, 우측운행, 좌측운행 등의 방향정보와 속도 정보를 판단할 수 있다. 이것으로 대차의 운행 상태가 이상 동작으로 판단되면 브레이크를 동작 시키게 된다.

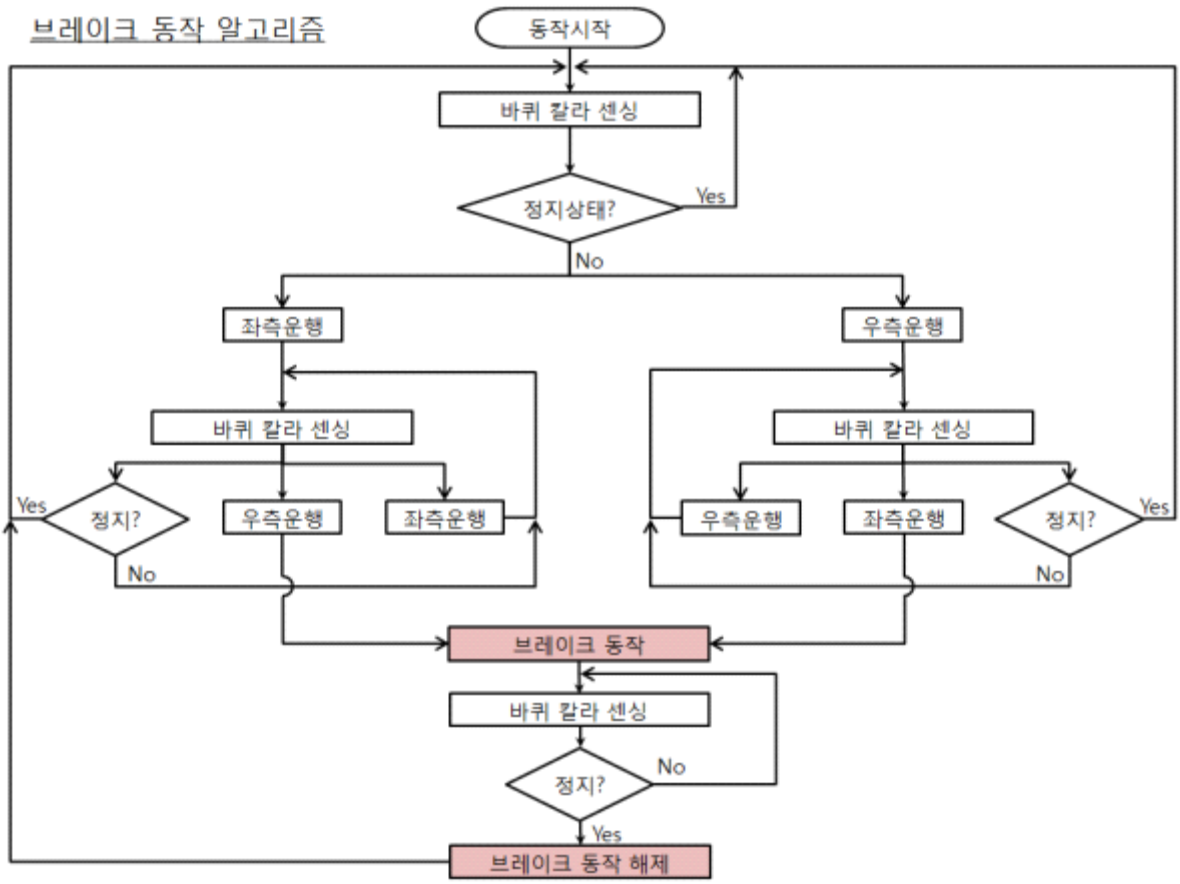


그림 3.3.1.54 브레이크 동작 알고리즘

(6) 표시장치

LPM 추진을 시험하는 과정에서 컨버터/인버터/노선/차량 등의 상태를 한눈에 알아볼 수 있는 화면이 필요하고 이는 표시장치를 통해서 그 목적을 이룰 수가 있다. 표시장치에는 시험에 필요한 여러 가지 데이터를 표시할 수 있도록 하였다. 또한 GPS를 기반으로 한 효과적인 무선 원격 위치 관제 체계를 구현한다. 민간에서 활용중인 '위치기반 서비스(LBS)'의 상용기술을 연구원에서 구축하고자 하는 LPM 열차 위치표시부분에 적용시키게 되면, 기술개발과정에서 필요한 설비의 원격 모니터링 및 기술 홍보에 적극적으로 활용을 할 수 있고, LPM 차량 기술성능을 극대화 시켜 효과적인 과업 수행을 보장하게 된다. 입출력 전압, 전류, 전력, 주파수 등의 전기적인 운전조건을 표시한다. 또한 주행 속도, 주행 거리, 차량의 위치 등 기계적인 운전조건도 표시한다. 특히 GPS 송수신 모뎀을 통한 차량의 실시간 위치 추적이 가능하며 차량 주변의 맵까지 함께 확인할 수가 있다.

① 표시장치 1 SET 구성품

- GPS 송수신 안테나
- GPS Data 처리용 DRM
- 위치 관제 서버/ 노트북
- 22“ 모니터
- 인터페이스 컨트롤러

② 구성도



그림 3.3.1.55 표시장치 화면구성

표 3.3.1.13 위치표시 제어서버의 구성품

제조회사	HP	등록년월	2013년 06월
제품분류	서버	케이스 형태	DeskTOP 형
케이스(랙) 크기		전원 공급기	460 W
전원 공급기 개수	1개		

CPU, 메인보드			
터보부스트		하이퍼스레딩	
제품 종류	인텔	CPU 종류	제온
CPU 코드명	샌디브릿지	CPU 넘버	E5-2403 (1.8GHz)
CPU 소켓	1366	코어 개수	쿼드(4)코어
CPU 개수	1개	최대 CPU 개수	4개
메인보드 칩셋			
기억장치 특징			
Unbuffered		Registered (Buffered)	
ECC		non ECC	
메모리 용량	8GB	메모리 종류	
메모리 슬롯	12개	메모리 최대용량	
하드 용량	500G × 2	하드 인터페이스	
하드 인터페이스		하드 핫플러그 지원	지원
광학 드라이브			
네트워크 특징			
기가비트	○	듀얼랜	
쿼드랜	○		
단자			
IEEE1394		운영체제	
보증기간	3년		
KC 인증	HPK-HSTNS-2133		

제품 사양

		XiR M8600 / XiR M8668
		UHF Band 1
채널수		1,000
출력		1-25 W
주파수 범위		403-470 MHz
크기(H x W x L)		53.3 x 175.3 x 205.7 mm
무게		1.8 kg
소모 전류	대기	0.81 A 이하
	수신 @ 정격오디오	2 A 이하
	전송	1-25 W: 11.0 A 이하
	전원	13.8 VDC

수신부: XiR M8600 / XiR M8668

	UHF Band 1
주파수 범위	403-470 MHz
채널 간격	12.5 kHz
주파수 안정도 (-30°C, +60°C, +25°C 기준)	± 0.5 ppm
아날로그 감도 (12dB SINAD)	0.22 uV
디지털 감도	5% BER : 0.3 uV
상호변조도 (TIA603D)	75 dB
인접채널 선택도 (TIA603D)	50 dB
스퓨리어스 억압 (TIA603D)	75 dB
정격 오디오	3 W
음성왜율 @ 정격 오디오	3% 이하
FM 잡음	-40 dB
오디오 응답 특성	+1, -3 dB
부차적 전파발사 강도 (TIA603D)	-57 dBm

송신부: XiR M8600 / XiR M8668

		UHF Band 1
주파수 범위		403-470 MHz
채널 간격		12.5 kHz
주파수 안정도 (-30°C, +60°C, +25°C 기준)		± 0.5 ppm
출력		1-25 W
최대 주파수 편이		± 2.5 kHz
FM 잡음		-40 dB
스프리어스 발사 강도		-36 dBm < 1 GHz / -30 dBm > 1 GHz
인접채널 누설 전력		60 dB @ 12.5 kHz
오디오 응답 특성		+1, -3 dB
음성 왜율		3% 이하
전파형식	아날로그	음성 : 8K50F3E
	디지털	데이터 : 8K50FXD 음성 : 8K50FXE
디지털 보코더 유형		AMBE+2™
디지털 프로토콜		ETSI TS 102 361-1, -2, -3



그림 3.3.1.56 GPS 위치추적(DMR)

표 3.3.1.14 주요 하드웨어 구성품

품 명	규 격	단위	수량	비 고
서버	GPS제어용	식	1	
모니터	22“	대	1	
GPS Data처리용 DMR	차량용(DMR 인증용)	식	1	Data케이블
이동식 Rack장치	차상용	식	1	
AC-DC 전원장치	DMR 전원	식	1	
소프트웨어(DB포함)	통제프로그램/운용프로그램	식	1	

표 3.3.1.15 이동식 Rack 장치

사 양	수량	비고
규격: 24″ Deep 14U Roto Shock Rack(군사규격 준수) 컬러: 블랙 무게: 94.15 lb 42.71 kg 충격 방지: Built-in Shocks	1식	

표 3.3.1.16 AC-DC 전원장치

사 양	수량	비고
AC/DC전원: 220V, 60Hz 12V/8A 전기안전: EK 인증 제품 크기: 19″ 2U 용량 : 96W 2식 이중화	1식	

표 3.3.1.17 DBMS

사 양	수량	비고
한글 MS SQL Server Standard 2008 R2 시스템적용가능 OS : Windows XP, 7, Windows Server 2008 운영제어관리 소프트웨어 : 단말기 운영제어, GPS Mapping 관리 매니지먼트 소프트웨어 : 시스템관리 운영 제어 네트워크 접속 소프트웨어 : RoIP제어 및 제어장치 관리용 유저라이센스 : 동글 키트 및 정품인증 옵션 : 녹취, LOG, SMS/SDS전송	1식	

Short Massage 전송

위치표시 Map (구글 또는 별도의 일러스트 제작)

위치주기 설정 및 로그 접속 메뉴바

③ 설계 자료

ⅰ) 폴링 단말기 송, 수신 위치보고 주기

폴링단말기는 기지국에 무리를 주지 않는 방향에서 그룹무전 발신 또는 개발 발신 무전시 전송하는 방식을 기본으로 하여 DB화하여 궤적을 정보화 한다. 자동과 수동이 선택되어 자동 설정 시 10분 또는 특정 이벤트 발생 시 작동한다.

ⅱ) 폴링 단말기 적정수량 제시(최적화 수량)

폴링단말기는 1초에 3~4 데이터를 처리를 바탕으로 자동모드시 순차적으로 폴링을 요청한다. 기본 방향은 임의의 지정된 주기에 자기위치 전송값을 기본으로 하고 자동 폴링구조는 데이터 전송 부하에 무리를 주지 않는 방향에서 제공한다.

ⅲ) PC와 연결된 폴링단말기 연결케이블

운영서버에서 접속되는 포트서버는 TCP/IP로 정품 케이블을 사용하여 폴링단말기의 고정 및 랙함에 설치되어 필요시 훈련 및 전술체계에서도 이동 가능하도록 제공한다.

ⅳ) 화면표시장치의 화면 구성 및 운용방안

별도의 DB내에 궤적 정보 분석, 로그파일이 생성되고 위치정보 조회를 위한 별도의 메뉴가 제공된다. 단말기 이동정보 및 자료 DB화 저장/분석 가능 하며 모든 정보는 서버로 전송되어 상호 동기화되어 운용이 가능하다.

v) SMS 사용시 송.수신 기능

SMS메시지가 송출된 단말기는 위치전송이 연속으로 전송되어 현재의 위치 값이 GPS MAP에 표출된다.

vi) 단말기 위치 외부 전시 (자체, 외부기기 연동)

단말기는 차량용 단말기로 정면 헤더 부분이 랙장치에 취부 되어 단말기의 상태가 표시되도록 한다. 별도의 전원장치와 일체형으로 구성되어 19인치 랙 형으로 부착이 가능하다.

vii) 사용되는 지도MAP은 제안사에서 제공

GPS개발 범위내의 지도 DB와 MAP 엔진 및 그에 따른 Map API는 제안사에서 제공하며, 지도상 위치표시는 고객이 요구하는 형태로 표시가 가능하다. 지도확대/축소 시에도 표시된 형태는 식별이 용이하도록 배율이 같도록 구현된다.

viii) 표시장치서버 구성 및 Customizing

표시장치 프로그램은 PC Client App 형태로 제작이 된다. 메뉴는 현황관리, 정보(TRS ID)관리, 지도관리, 경로추적, 상황일지 등 부대요구사항에 맞게 Customizing을 원칙으로 한다. 특히 현황관리 및 연계정보 등을 포함하여 Customizing이 되도록 한다.

다. 각 구성품의 상세 스펙

(1) 인버터

표 3.3.1.18 인버터 제작사양

Classification	Items	Unit	Spec.	Remarks
SYSTEM VOLTAGE	Nominal input Voltage	V	200V	
	Operating input Voltage	V	170 ~ 230V	
POWER OUTPUT	Max. DC Input Voltage	V	230V	
	Max. Output Power	kW@Vdc@sec@rpm	400@200@10@0~420	
	Rated Output Power	kW@Vdc@min@rpm	300@200@20@0~420	
	Max. Output Current	Arms@Vdc@sec	2000 @ 200 @ 10	
	Rated Output Current	Arms@Vdc@min	1500 @ 200 @ 20	
	Max. Output Frequency	Hz	7	
	Switching Frequency	kHz	10	

Classification	Items	Unit	Spec.	Remarks
COOLING	Cooling Method	-	Forced air cooling	
	Coolant Inlet Temperature	℃	50	
	Operating Temp.	℃	-20~40	
	Storage Temp.	℃	-40~85	
MECHANICAL SPEC.	Location		지상	
	Size (L*W*H)	liter	?	Housing only
	Weight	kg	?	
	Vibration Class	G	3	
	Protection Class	-	IP54	
I/O INTERFACE	Communication	-	RS485,Ethernet.,Zigbee	
	Temp. Sensors	-	Thermistor	Inverter
	Position Sensor	-	Hall sensor	
CONTROL BOARD	Operating Voltage	V	12V	
	Quiescent Current	mA	1↓	
DC-LINK Cap.	Capacitance	mF	10	
PROTECTION		-	Basic Protection	

(2) 컨버터

표 3.3.1.19 컨버터 제작사양

Classification	Items	Unit	Spec.	Remarks
SYSTEM VOLTAGE	Nominal input Voltage	V	440V	
	Operating input Voltage	V	352 ~ 528V	
POWER OUTPUT	Max. Output Power	kW@Vdc@sec	400@200@10	
	Rated Output Power	kW@Vdc@min	300@200@20	
	Max. Output Current	Arms@Vdc@sec	2000 @ 200 @ 10	
	Rated Output Current	Arms@Vdc@min	1500 @ 200 @ 20	
COOLING	Cooling Method	-	Forced air Cooling	
	Coolant Inlet Temperature	℃	50	
	Operating Temp.	℃	-20~40	
	Storage Temp.	℃	-40~85	

Classification	Items	Unit	Spec.	Remarks
MECHANICAL SPEC.	Location		지상	
	Size (L*W*H)	liter	?	Housing only
	Weight	kg	?	
	Vibration Class	G	3	
	Protection Class	-	IP54	
I/O INTERFACE	Temp. Sensors	-	Thermistor	Converter
PROTECTION		-	Basic Protection	

(3) 냉각장치

표 3.3.1.20 냉각장치 제작사양

Items	Unit	Spec.	Remarks
형 식		Heat. Pipe	
총 열 교환량	W	1200	
열 저 항	℃/W	0.033 이하	
온도 상승폭	℃	40 이하	
Cooling Method	-	Forced air cooling	
제품 수명	년	20 이상	
사이즈(L*W*H)	mm	500 × 800 × 800 이내	
Location		지상	
Weight	kg	30 이내	
Vibration Class	G	3	

(4) 위치센서

대차의 위치를 정확히 감지하여 A, B신호로 인버터에 전달할 수 있어야 한다.

(5) 브레이크 제어 시스템

① Color Sensor에 의한 실대차 위치 인식부

- 구동전원 DC 10~30V를 공급하여야 한다.

- Color Sensor를 인식하여 실대차의 움직임을 파악 후, 브레이크 시스템은 자동으로 동작하여야 한다.

② 마그네트 브레이크 구동부

- 마그네트 브레이크의 구동 전원(120V/5A)을 On/Off 제어할 수 있어야 한다.

- 구동 전원 On/Off 제어용 릴레이를 좌/우 각 1조를 갖추어야 한다.

(6) 표시장치

표 3.3.1.21 표시장치 제작사양

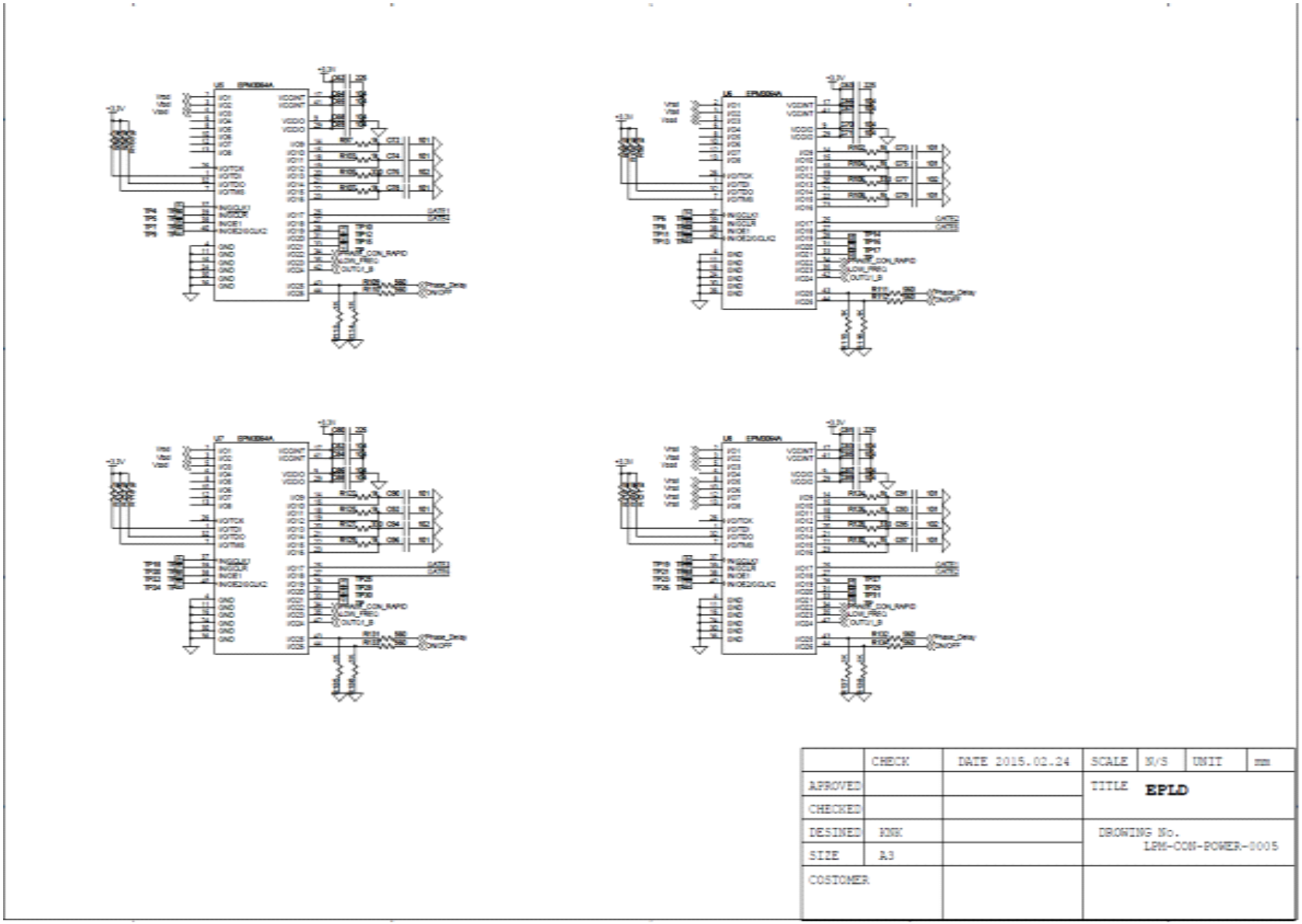
Items	Unit	Spec.	Remarks
형 식		GPS	
Tolerance	m	10	Vertical
	m	10	Horizontal
POWER	W	1	
Coverage	km	1	
Bandwidth	Hz	VHF ~ UHF	
Response Time	msec	1	
Map Resolution	pixel	1024 X 640	

라. 설계 및 제작

(1) 컨버터

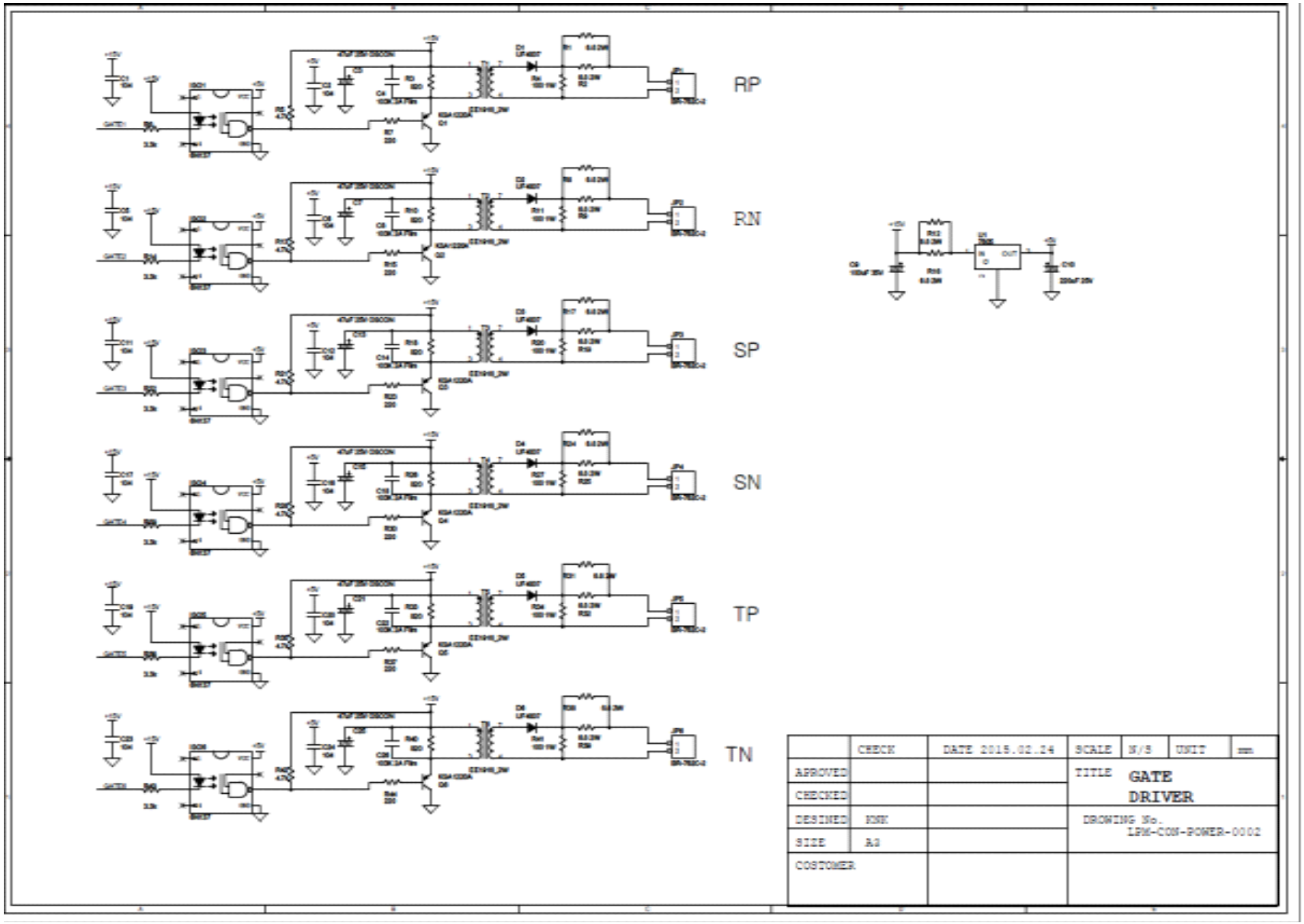
① 도면

ⅰ) EPLD

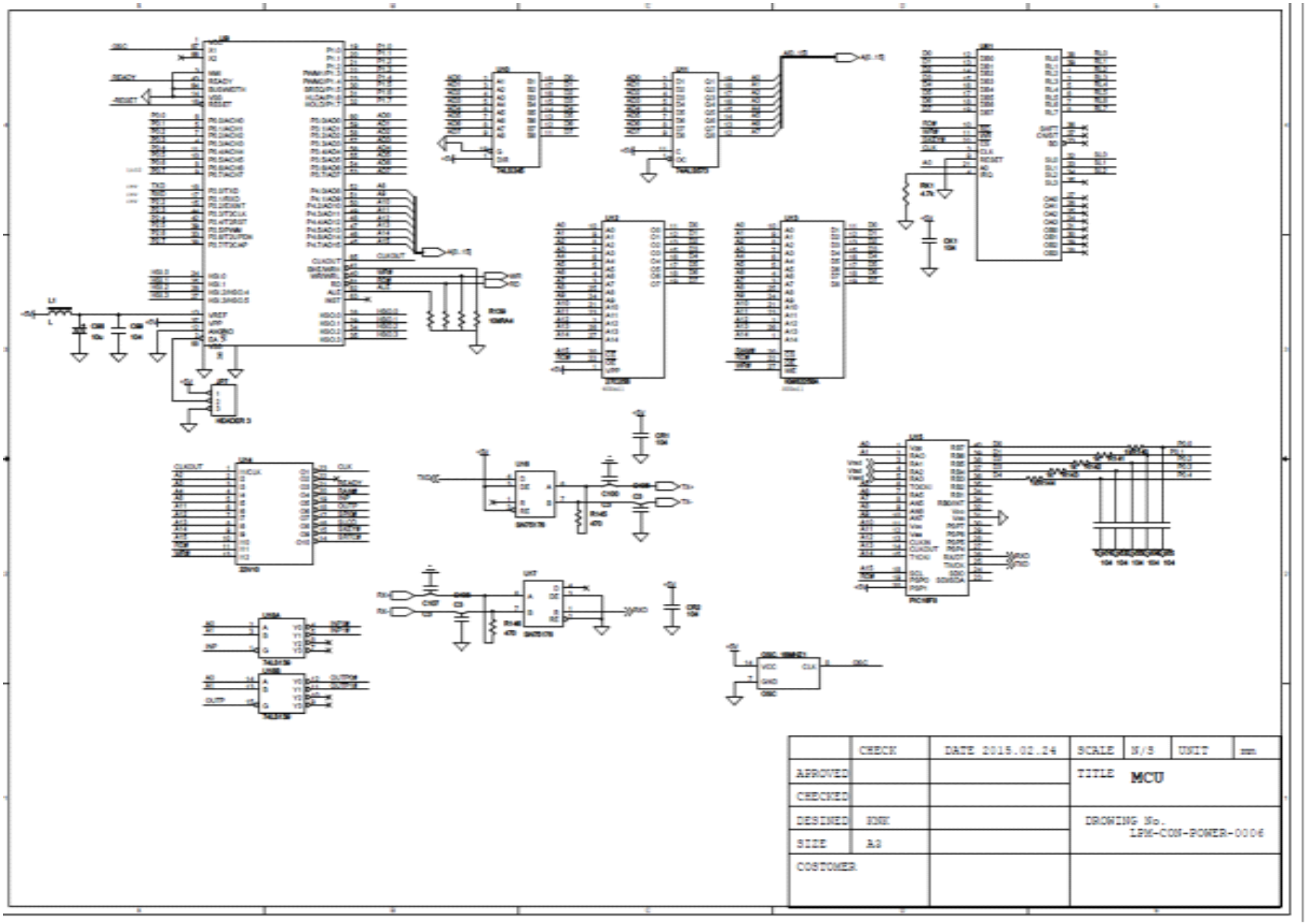


	CHECK	DATE 2015.02.24	SCALE	N/S	UNIT	mm
APPROVED			TITLE	**EPLD**		
CHECKED						
DESINED	KNK		DROWING No.	LRM-COM-POWER-0005		
SIZE	A3					
COSTOMER						

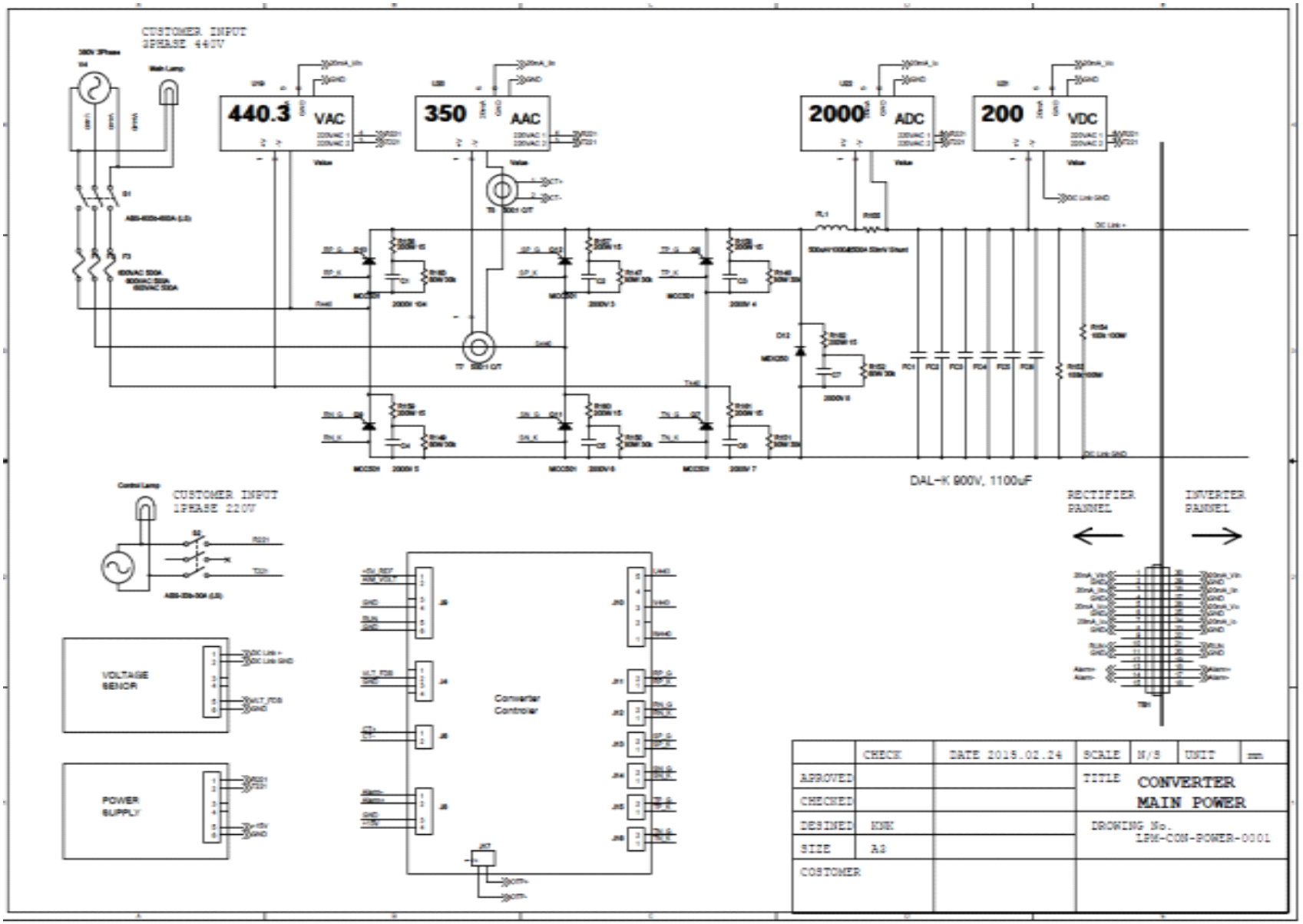
ii) GATE DRIVER



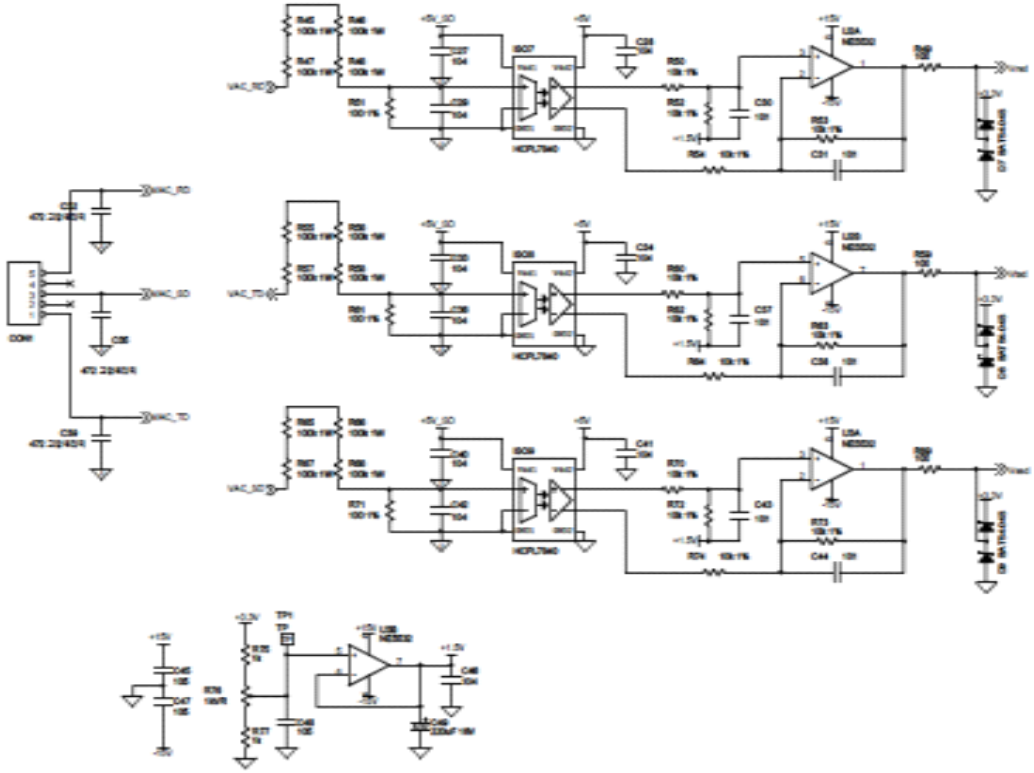
iii) Micom


CHECK
DATE 2015.02.24
SCALE 1/1
UNIT mm
APPROVED
CHECKED
DESIGNED KNK
SIZE A3
COSTOMER
TITLE MCU
DRAWING No.
LPM-CON-POWER-0004

iv) Power

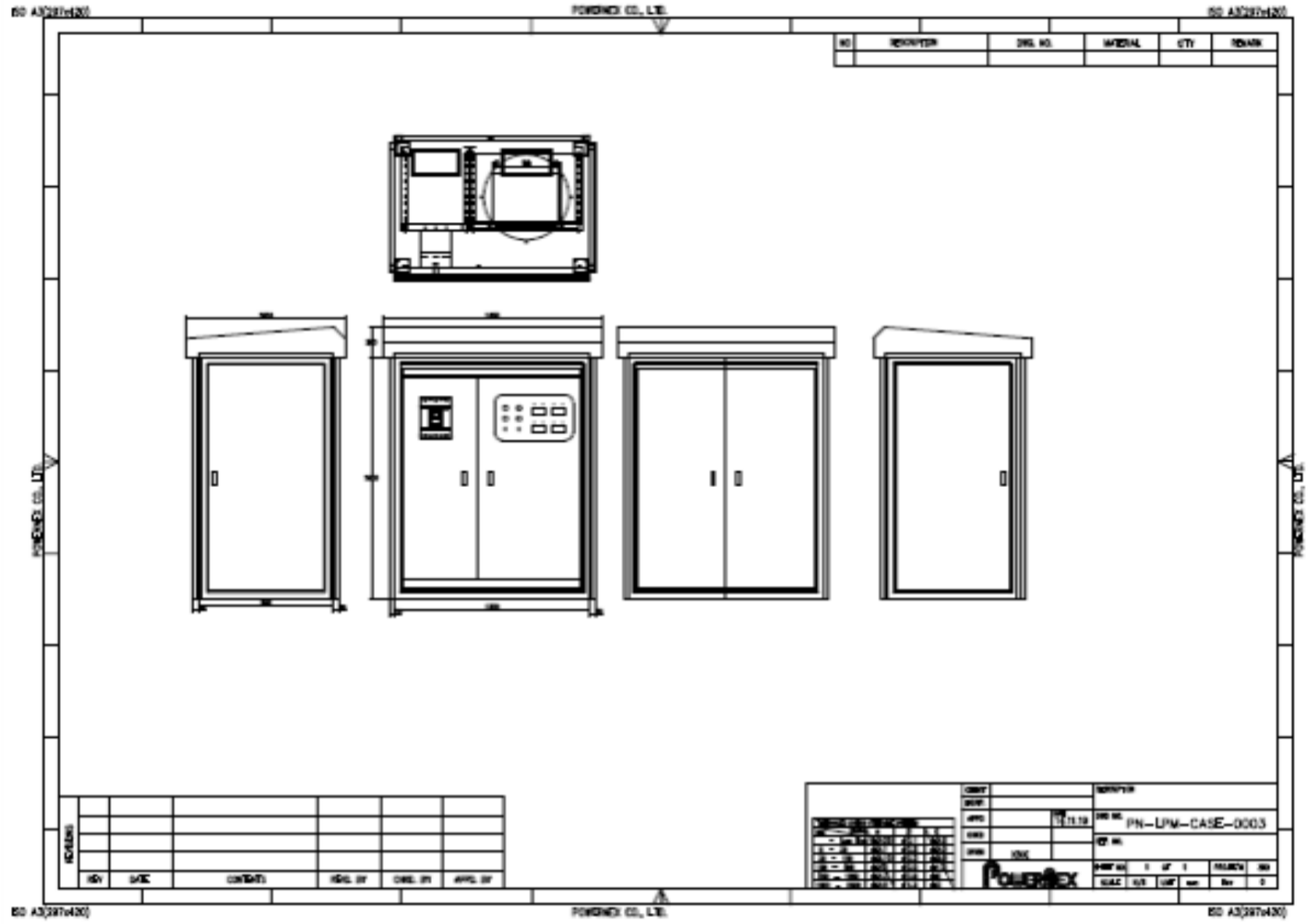

CUSTOMER INPUT
3PHASE 440V
440.3 VAC
350 AAC
2000 ADC
200 VDC
DAL-K 900V, 1100uF
CUSTOMER INPUT
1PHASE 220V
VOLTAGE SENOR
POWER SUPPLY
Converter Controller
RECTIFIER PANNEL
INVERTER PANNEL
CHECK
DATE 2015.02.24
SCALE N/S
UNIT mm
APPROVED
CHECKED
DESIGNED KNU
SIZE A3
COSTOMER
TITLE CONVERTER MAIN POWER
DROWING No. IPM-CON-POWER-0001

v) Zero cross



	CHECK	DATE 2015.02.24	SCALE N/S	UNIT mm
APPROVED			TITLE ZERO CROSS	
CHECKED				
DESIGNED	KNK		DROWING No. LPM-CON-POWER-0003	
SIZE	A3			
COSTOMER				

vi) 케이스 외함



② 제품 사진

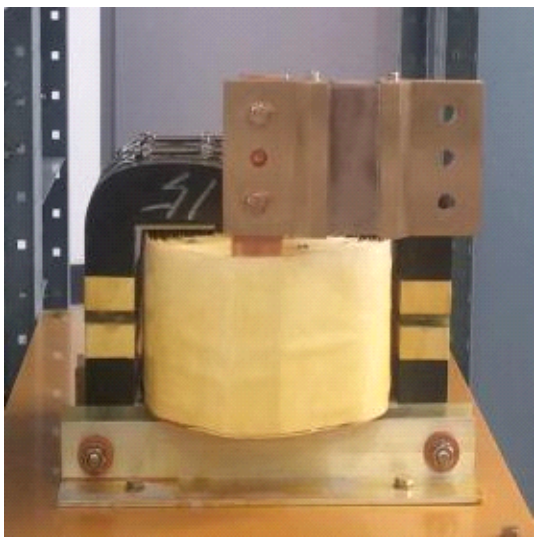
ⅰ) 부품별 사진



(a) FAN



(b) SCR



(c) DC Inductor



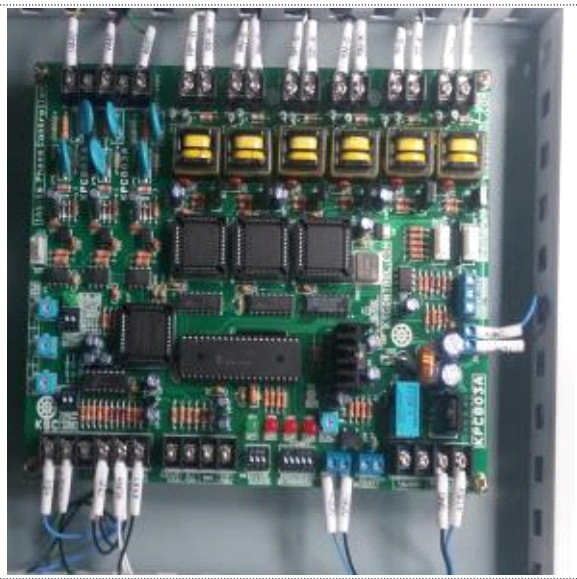
(d) Resistor



(e) Battery



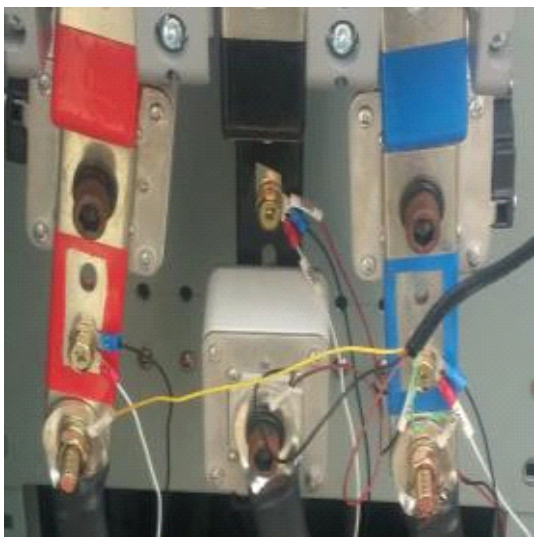
(f) Battery Case



(g) Controller



(h) MCCB



(i) FUSE



(j) SMPS



(k) Capacitor



(l) Converter Case

그림 3.3.1.57 컨버터 구성부품

ii) 부품설치 및 배선 사진



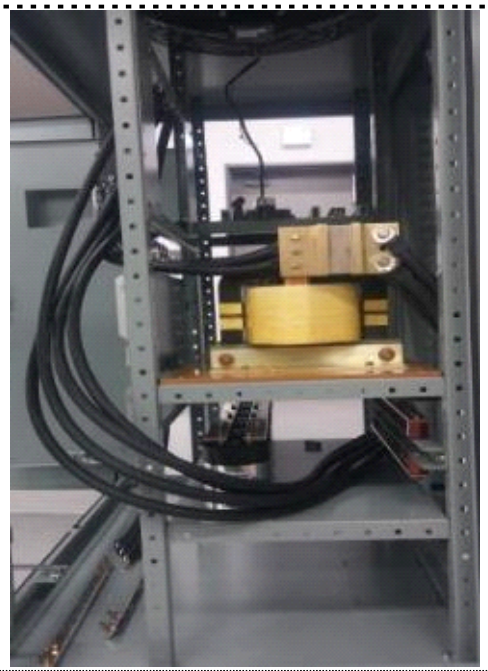
(a) 부품설치



(b) 배선-1



(c) 배선-2



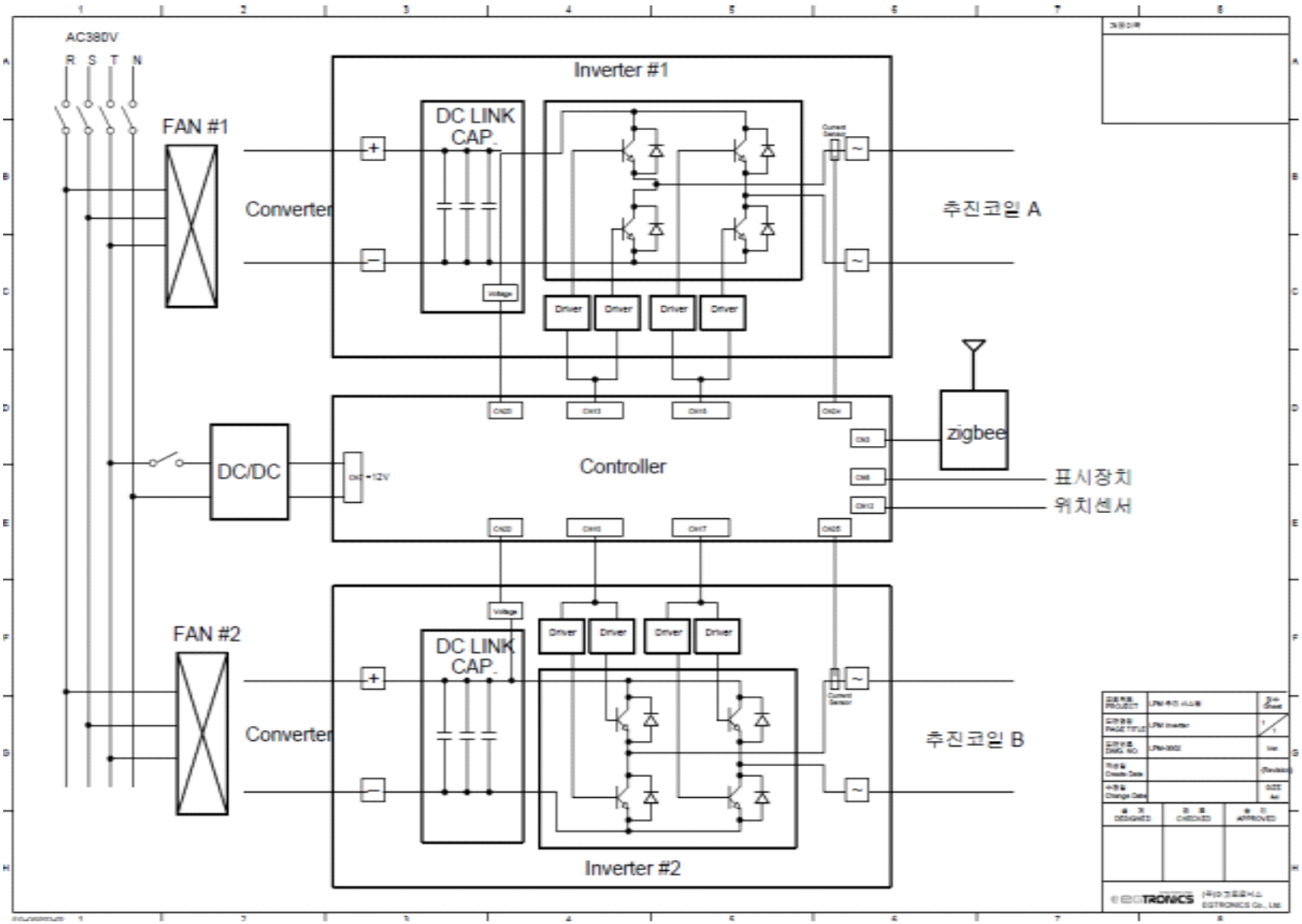
(d) 배선-3

그림 3.3.1.58 컨버터 구성품 설치

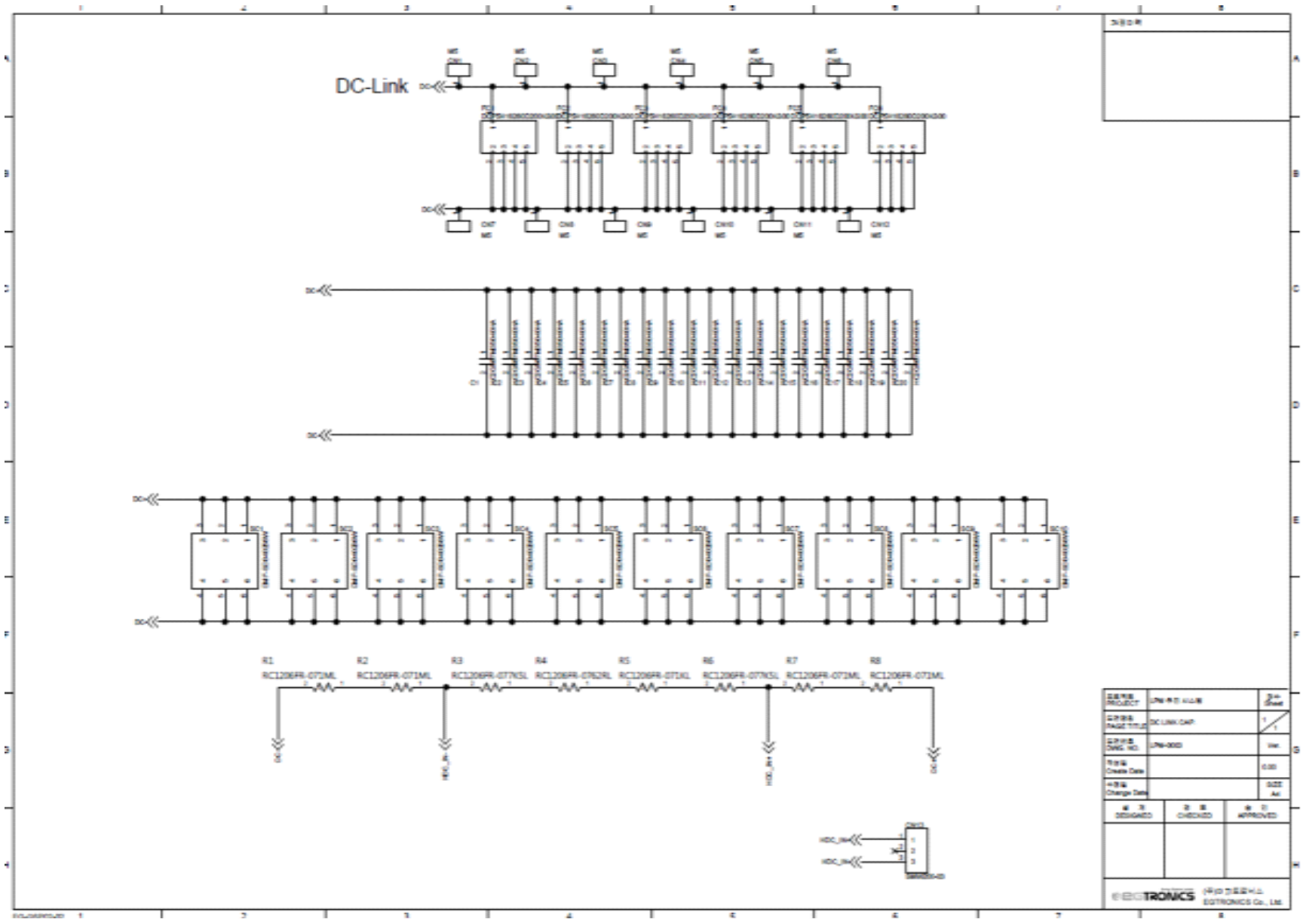
(2) 인버터

① 도면

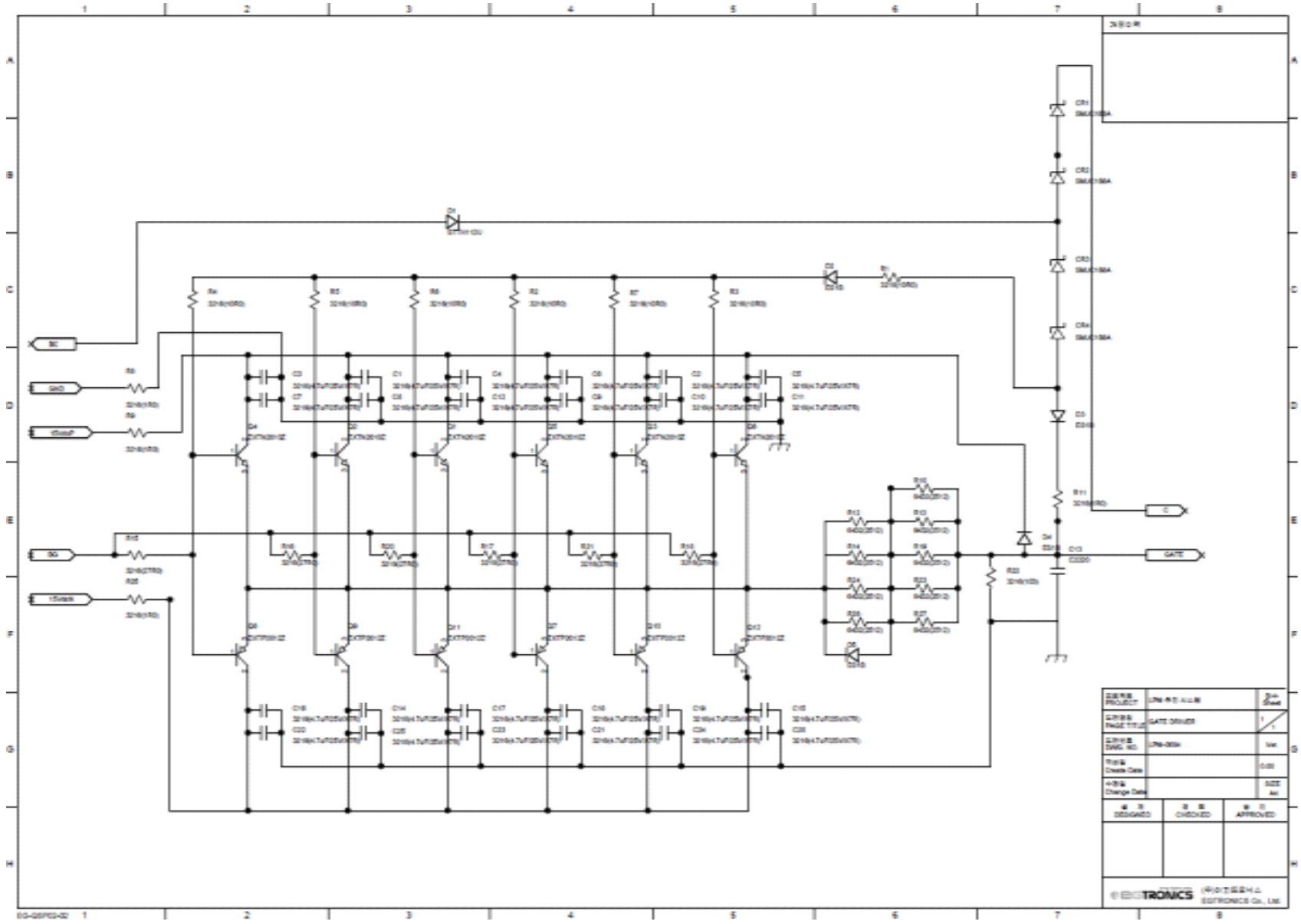
ⅰ) Inverter


AC380V
R S T N
FAN #1
FAN #2
Converter
Converter
DC/DC
Inverter #1
Inverter #2
DC LINK CAP
Driver
Controller
zigbee
추진코일 A
추진코일 B
표시장치
위치센서

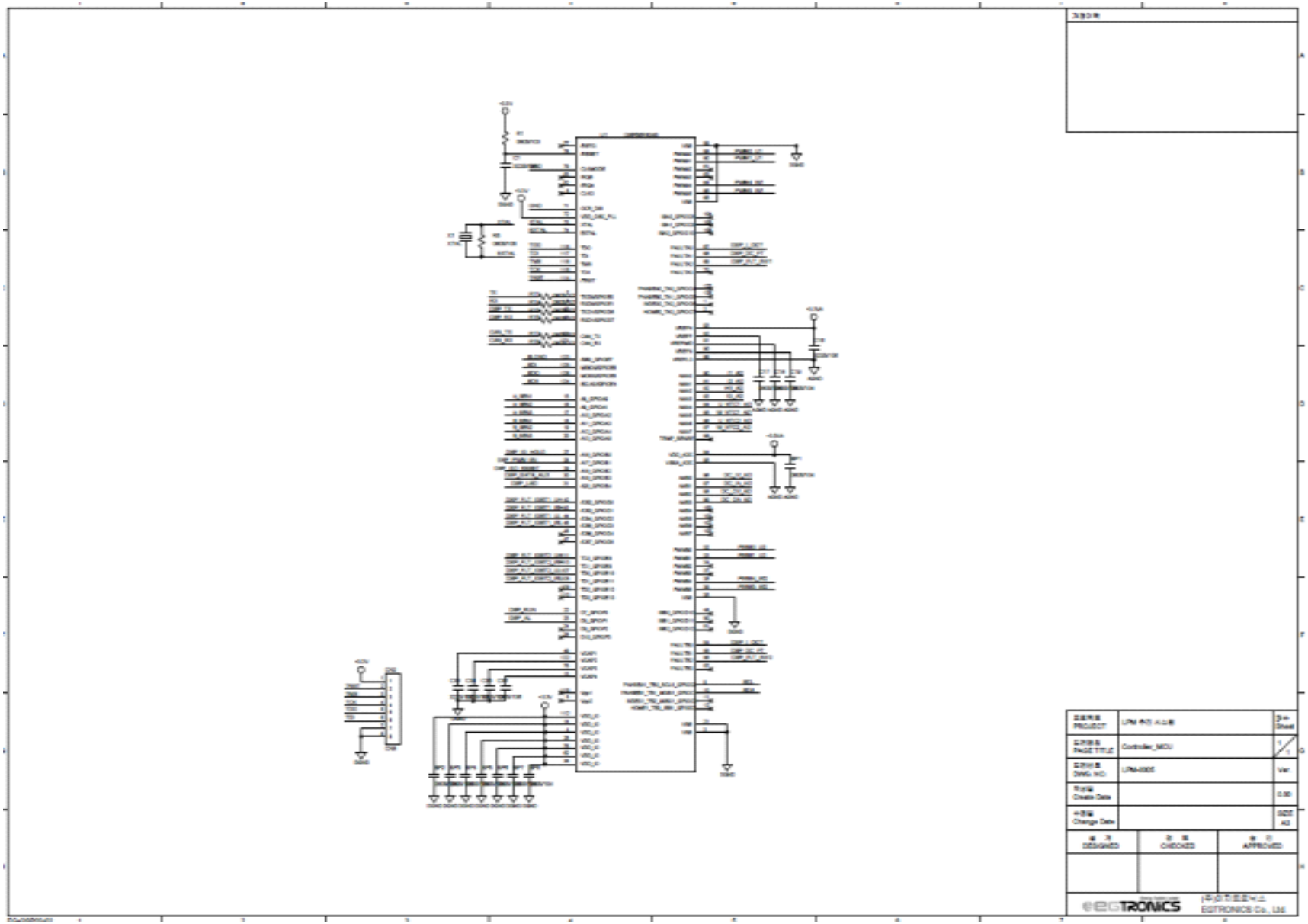
ii) DC Link Cap



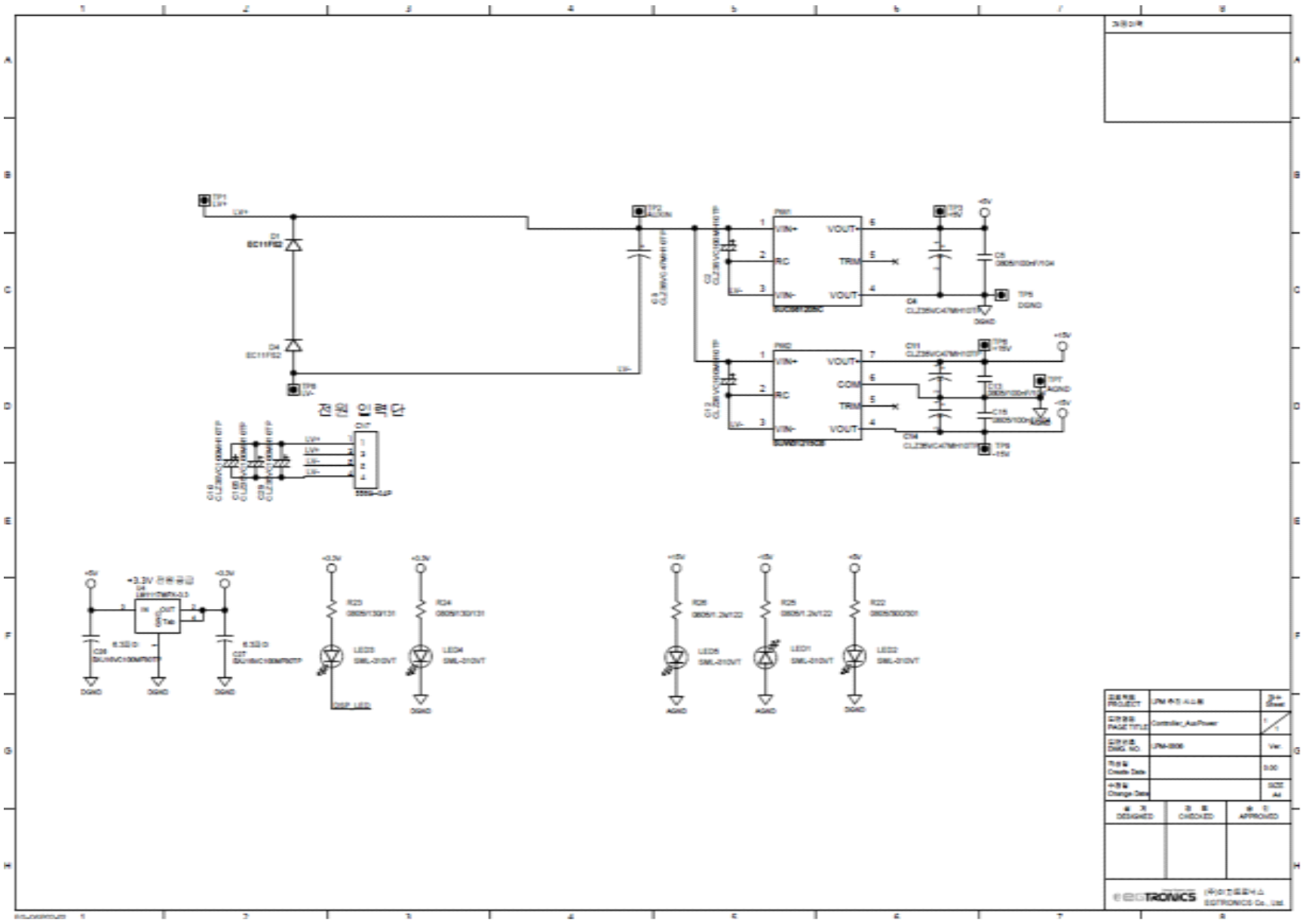
iii) Gate Drive



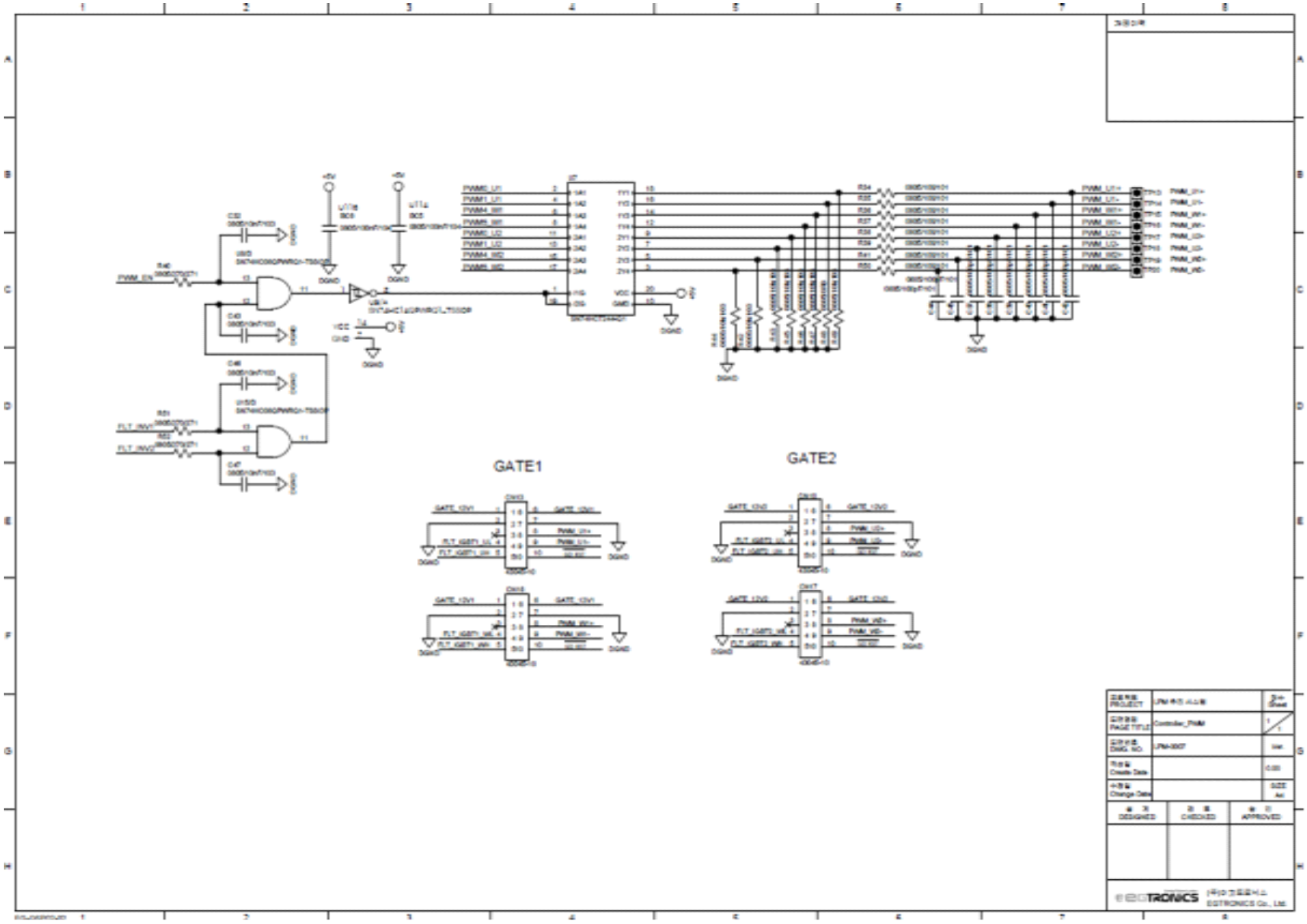
iv) MCU



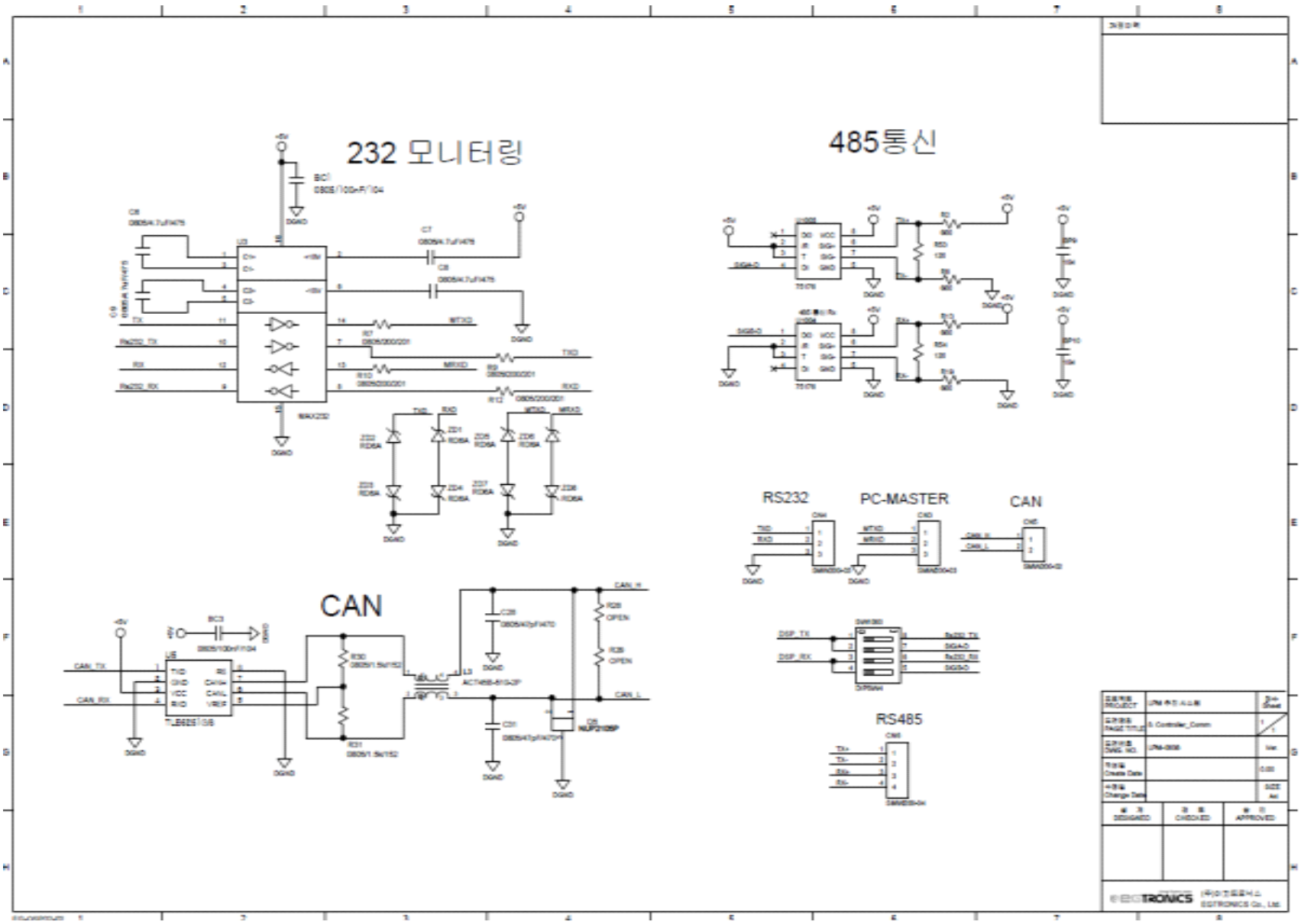
v) Aux. power



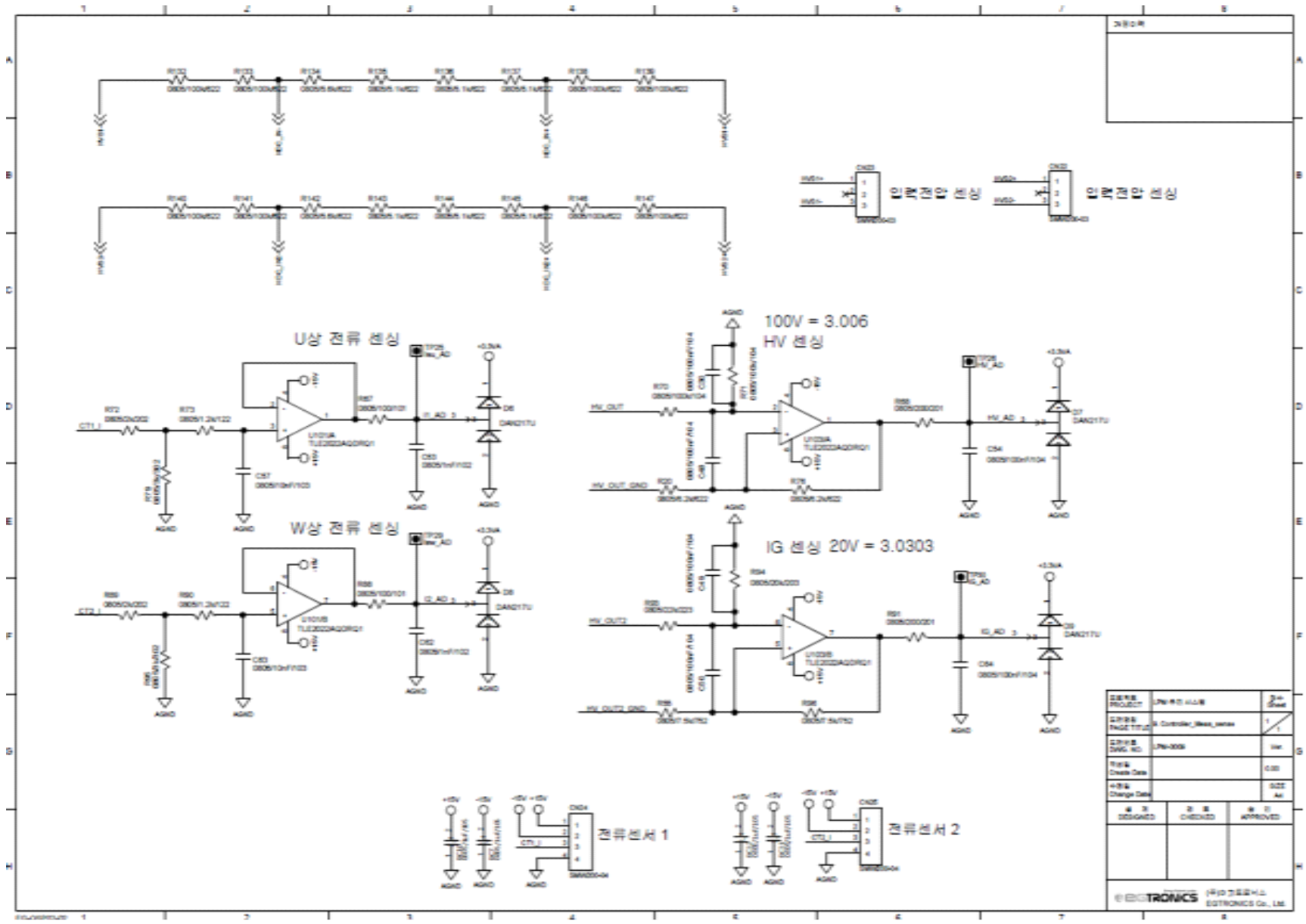
vi) PWM



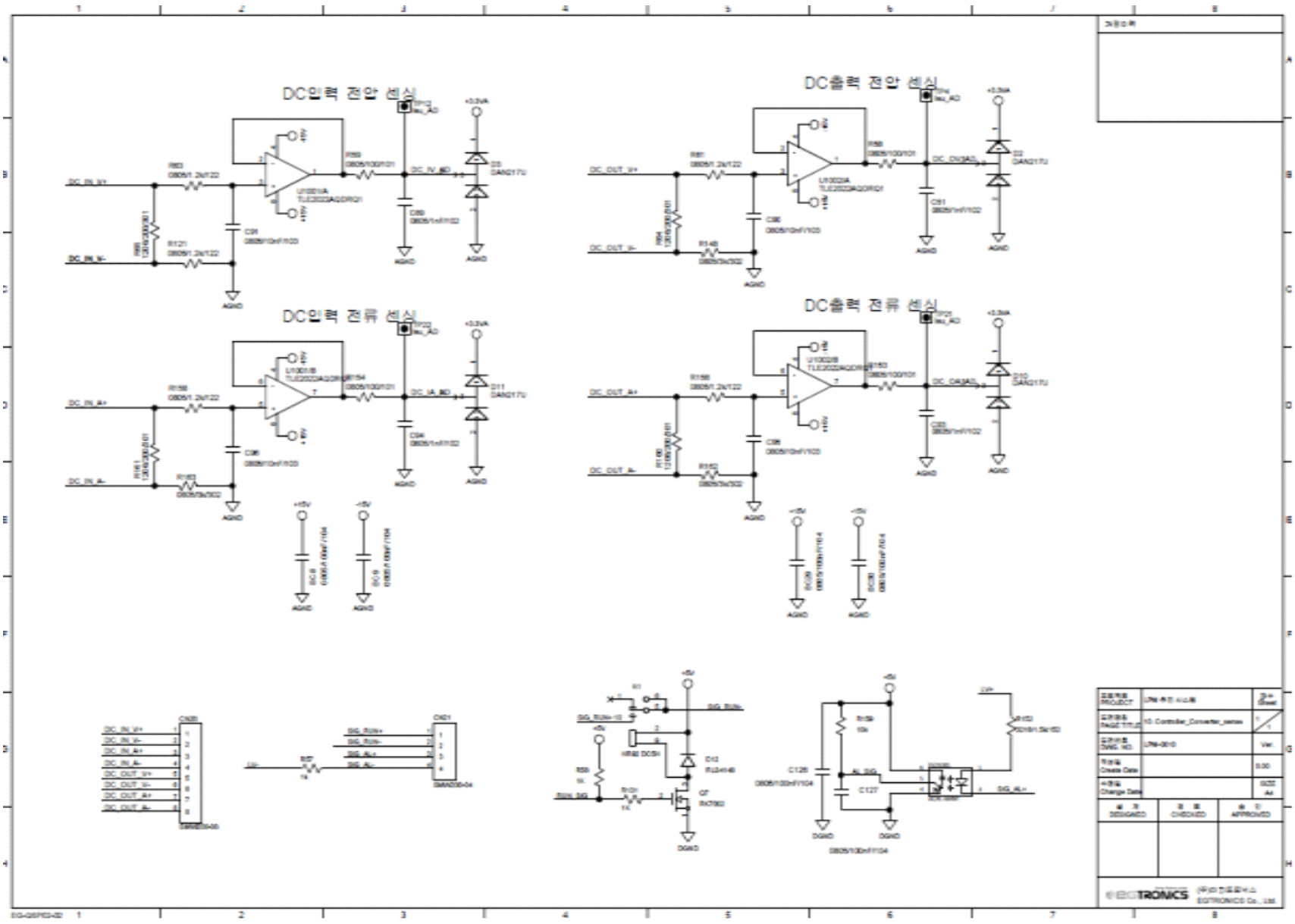
vii) Communication



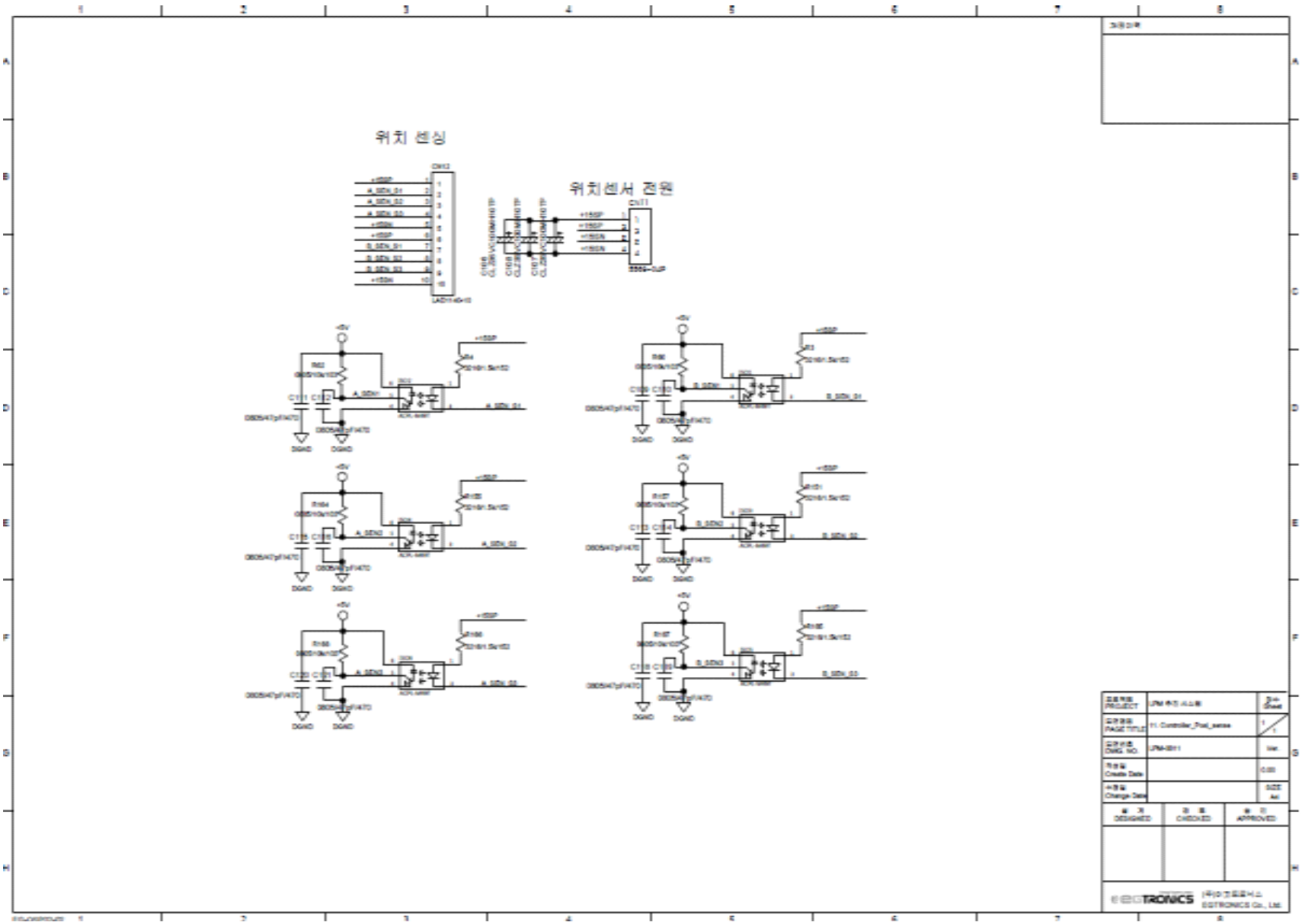
viii) 계측 Sense



ix) Converter Sense



x) 위치 Sense

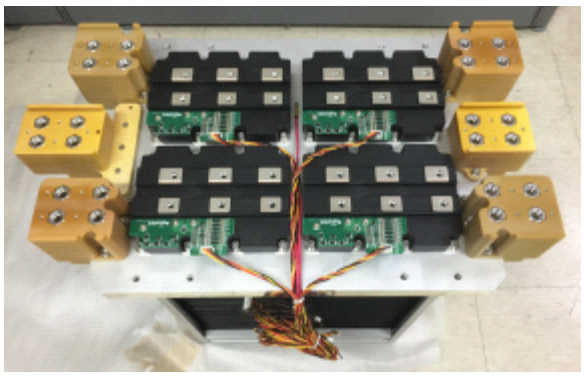


② 제품 사진

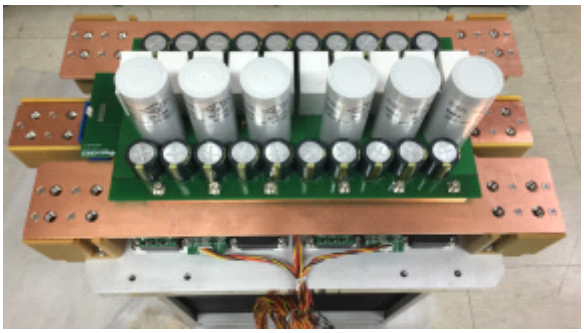
ⅰ) 부품별 사진



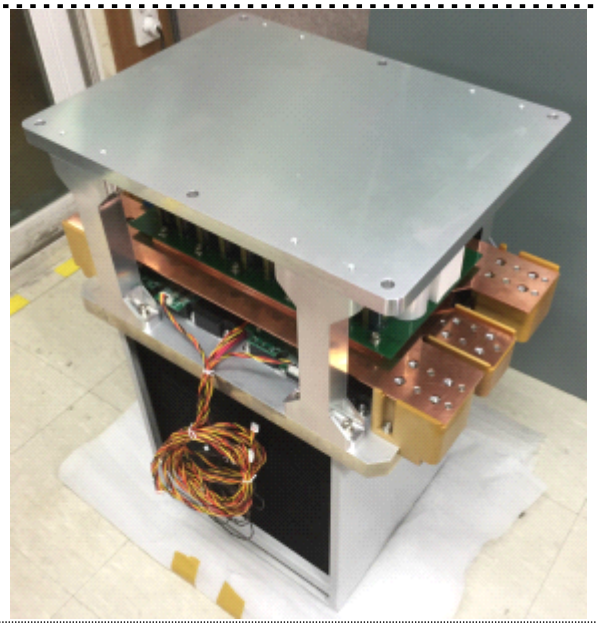
(a) IGBT



(b) IGBT & 드라이브 & 단자대



(c) 동판 & DC Link Cap.



(d) 인버터 받침대 설치

그림 3.3.1.59 인버터 구성부품

ii) 설치 사진



(a) 함체내부



(b) 인버터와 제어보드 설치



(c) 인버터 #1, 인버터 #2 설치



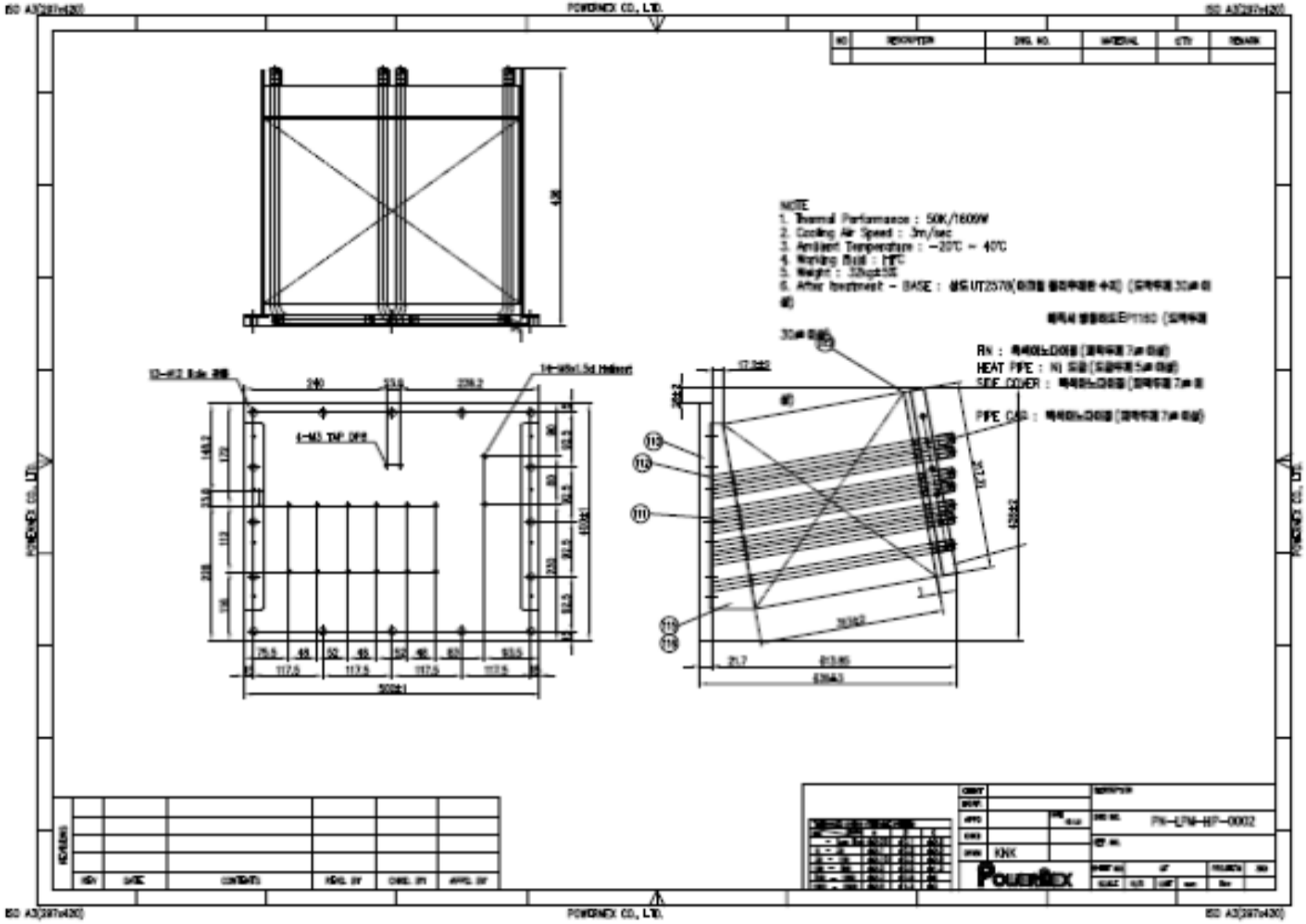
(d) 함체 외형

그림 3.3.1.60 컨버터 구성품 설치

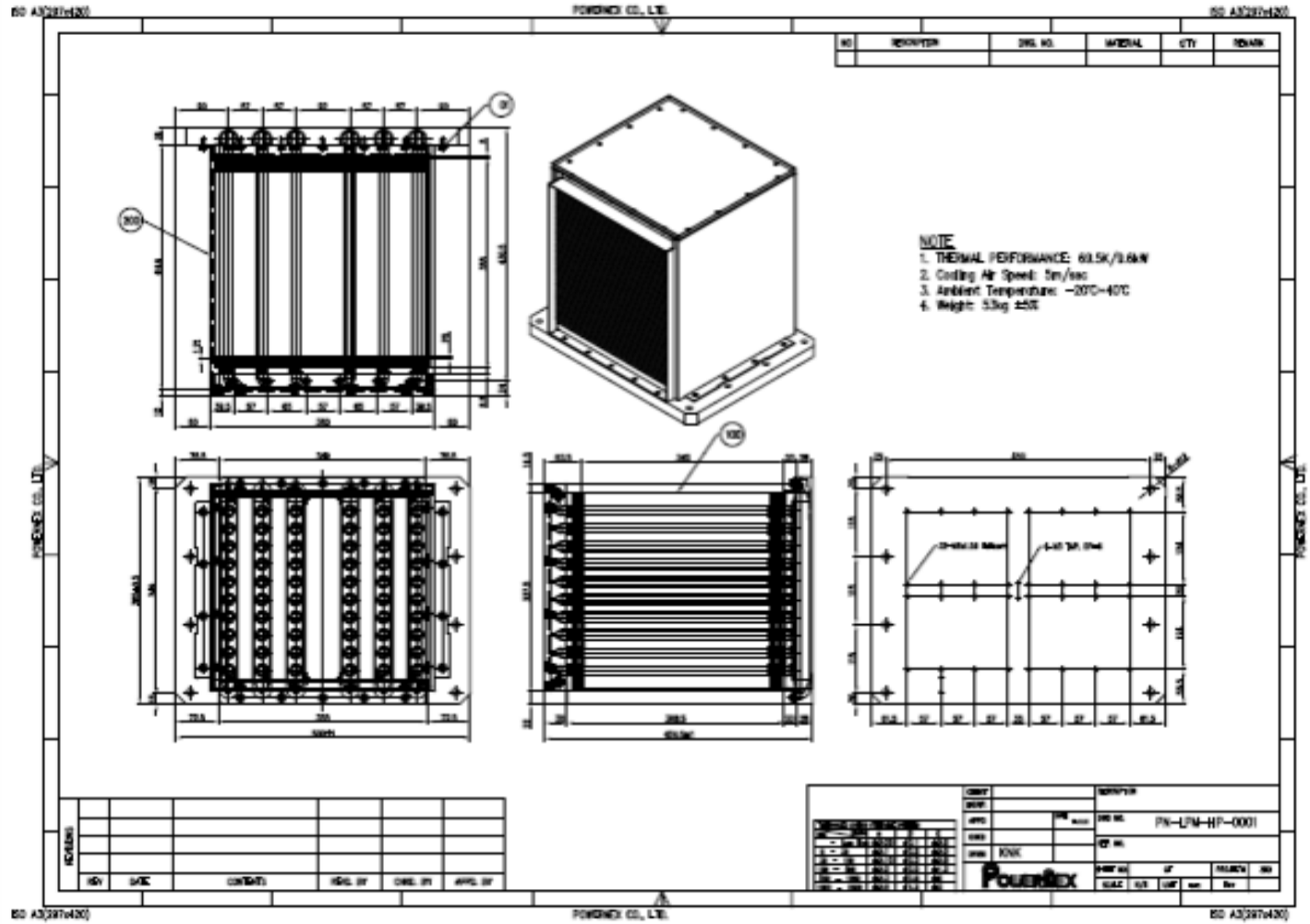
(3) 냉각장치

① 도면

i) 컨버터 냉각장치 도면

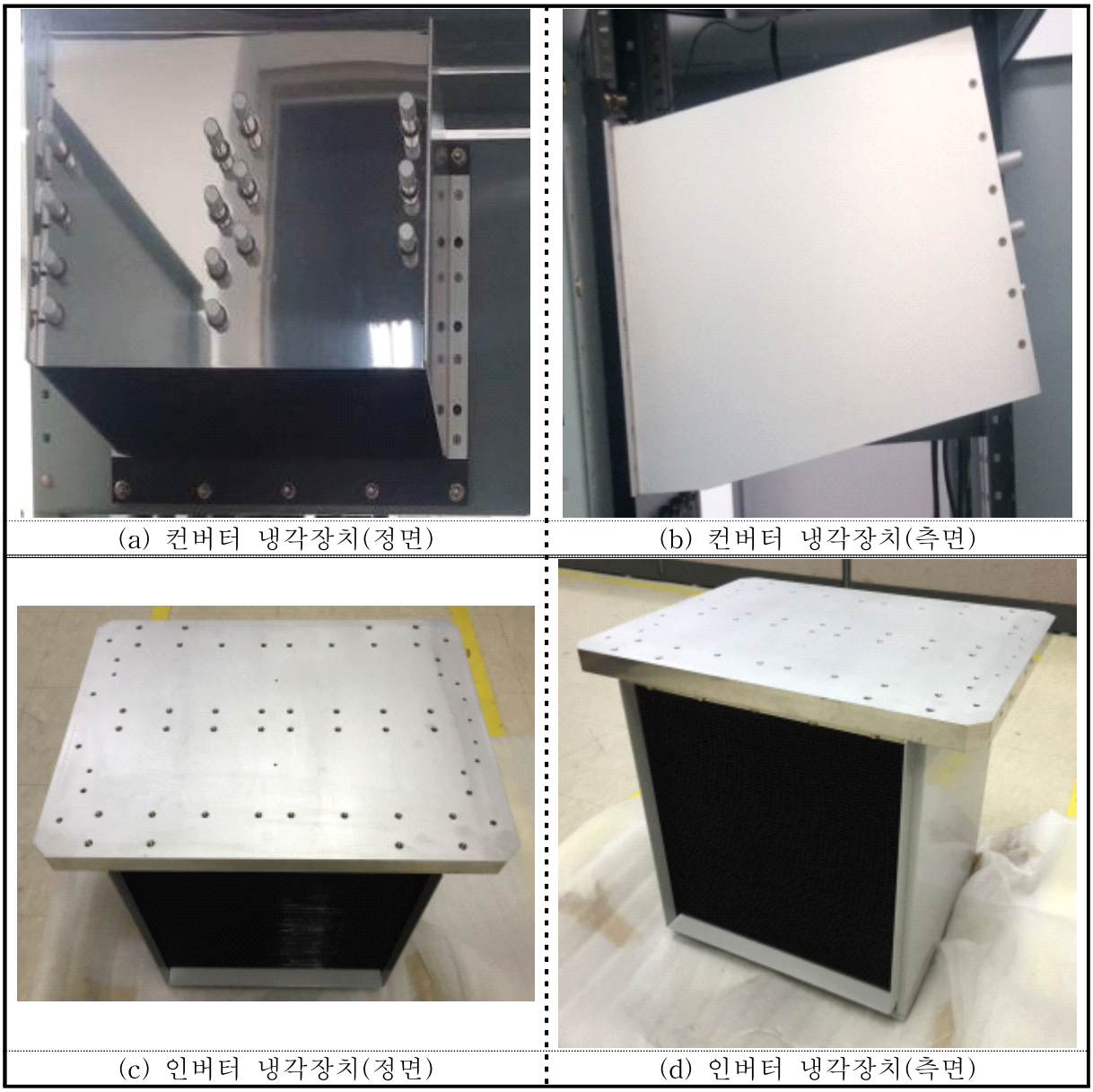

NOTE
1. Thermal Performance : 50K/1600W
2. Cooling Air Speed : 3m/sec
3. Ambient Temperature : -20℃ ~ 40℃
4. Working fluid : 물
5. Weight : 32kg±5%
6. After treatment - BASE : 분체 UT2570(하얀색 불화우레탄 수지) (도막두께 30㎛ 이상)
RN : 흑색아노다이징 (도막두께 7㎛ 이상)
HEAT PIPE : Ni 도금 (도막두께 5㎛ 이상)
SIDE COVER : 흑색아노다이징 (도막두께 7㎛ 이상)
PIPE CAP : 흑색아노다이징 (도막두께 7㎛ 이상)
4-M3 TAP DEP
KNK
PN-LTM-HP-0002
PowerBox

ii) 인버터 냉각장치 도면



② 제품 사진

ⅰ) 부품별 사진



(a) 컨버터 냉각장치(정면)

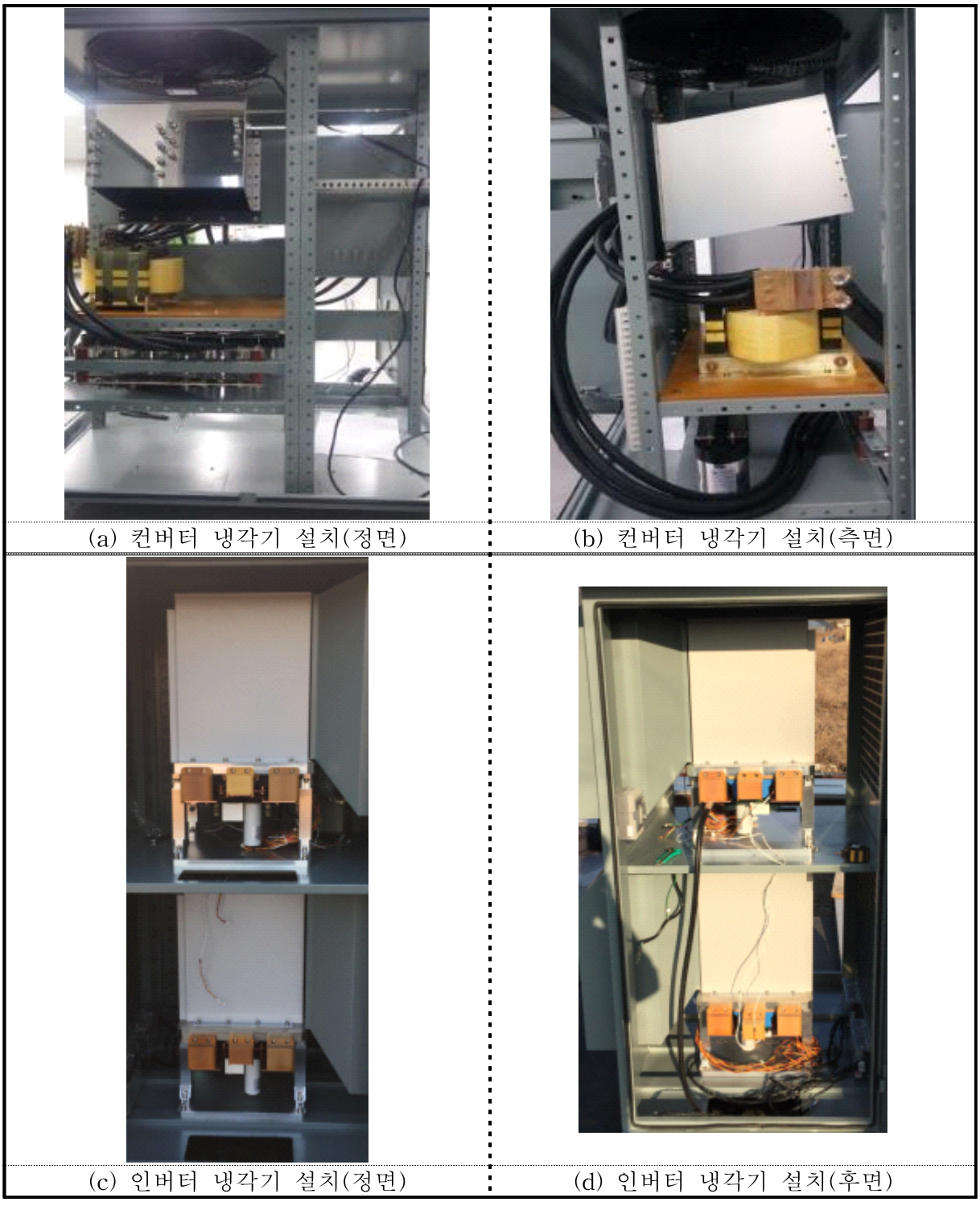
(b) 컨버터 냉각장치(측면)

(c) 인버터 냉각장치(정면)

(d) 인버터 냉각장치(측면)

그림 3.3.1.61 냉각장치 구성부품

ii) 설치 사진



(a) 컨버터 냉각기 설치(정면)

(b) 컨버터 냉각기 설치(측면)

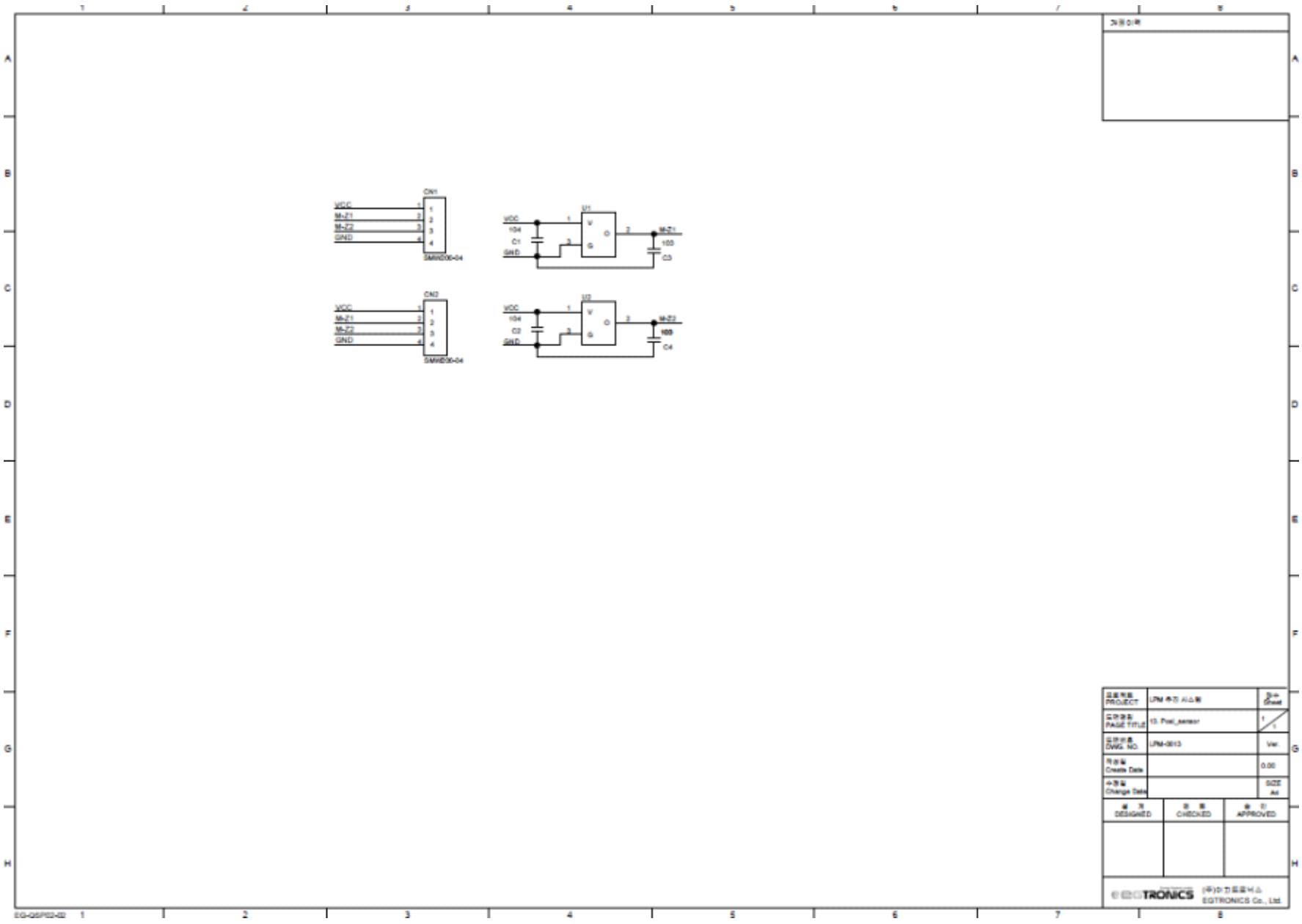
(c) 인버터 냉각기 설치(정면)

(d) 인버터 냉각기 설치(후면)

그림 3.3.1.62 냉각장치 구성품 설치

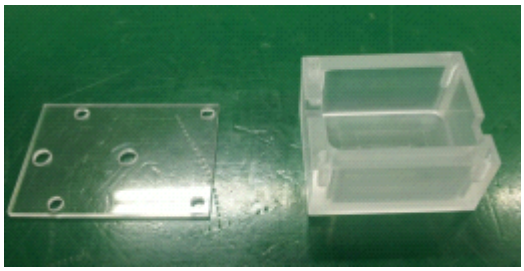
(4) 위치센서

① 도면

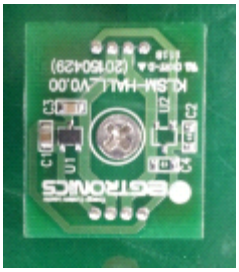

CN1
VCC
M-Z1
M-Z2
GND
SMW200-04
U1
VCC
104
C1
GND
M-Z1
100
C3
CN2
VCC
M-Z1
M-Z2
GND
SMW200-04
U2
VCC
104
C2
GND
M-Z2
100
C4
PROJECT
UPM 추가 시스템
PAGE TITLE
ID Pod_sensor
DWG. NO.
UPM-0013
Create Date
Change Date
SIZE
A4
DESIGNED
CHECKED
APPROVED
TRONICS
EQTRONICS Co., Ltd.

② 제품 사진

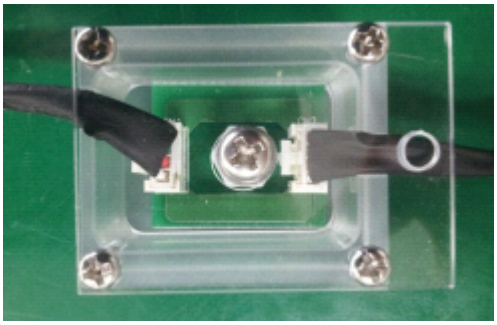
ⅰ) 부품별 사진



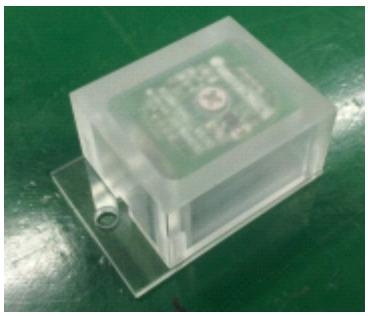
(a) 위치센서 케이스



(b) 위치센서 보드



(c) 위치센서 케이스 조립(후면)



(d) 위치센서 케이스 조립(정면)

그림 3.3.1.63 위치센서 구성부품

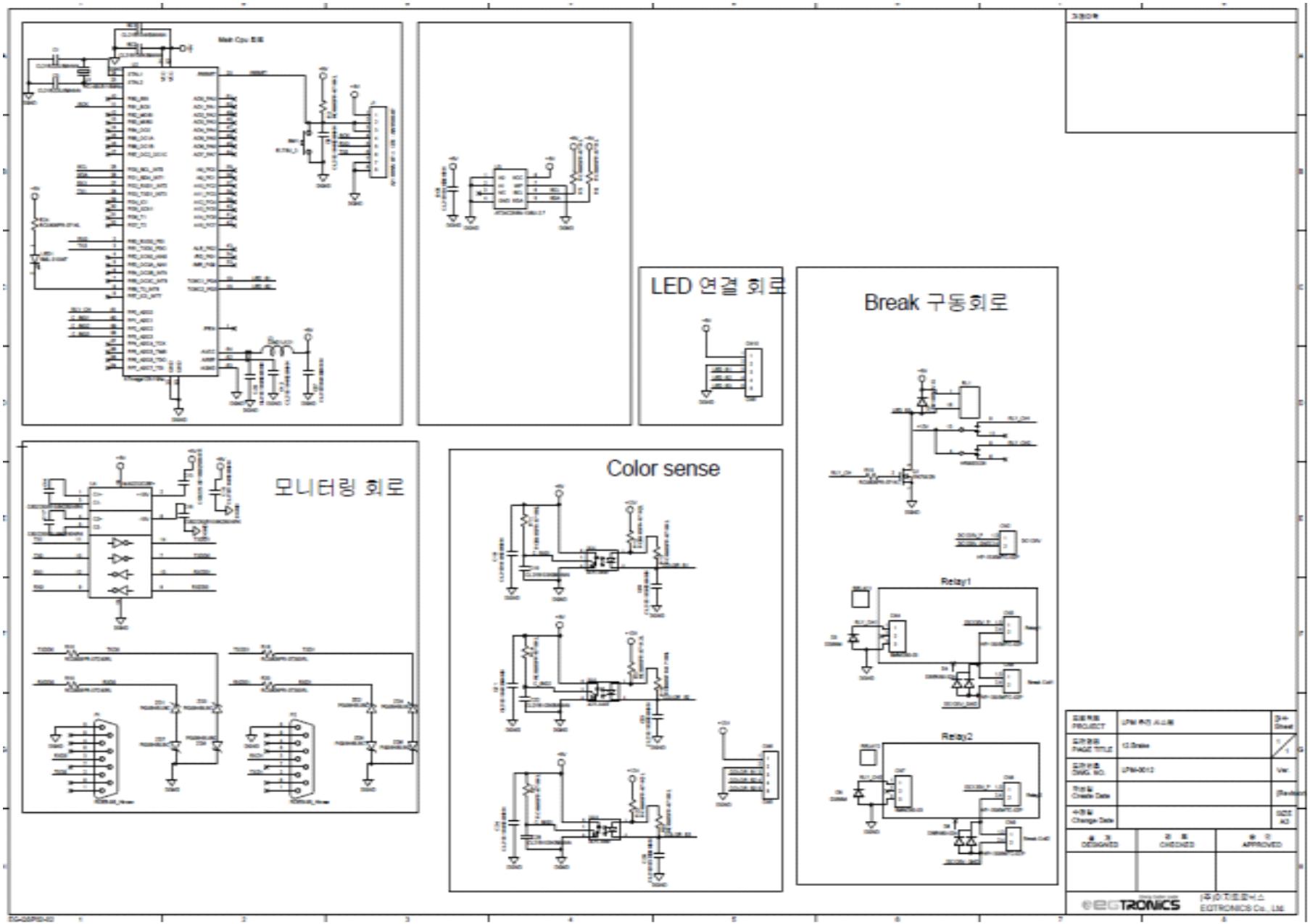
ii) 설치사진



그림 3.3.1.64 위치센서 구성품 설치

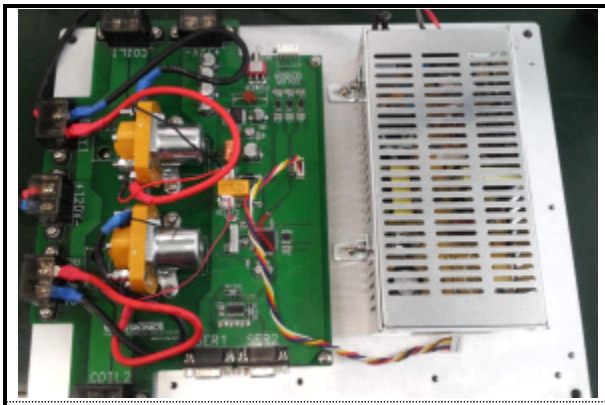
(5) 브레이크 제어시스템

① 도면


LED 연결 회로
Break 구동회로
모니터링 회로
Color sense
Relay1
Relay2

② 제품 사진

ⅰ) 부품별 사진



(a) 내부



(b) 케이스 조립

그림 3.3.1.65 브레이크 제어시스템 구성부품

ⅱ) 설치사진

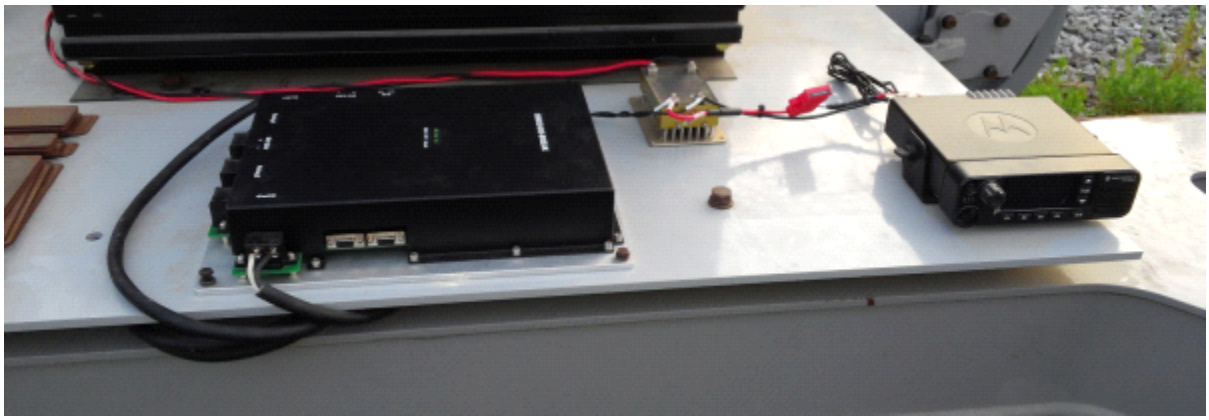


그림 3.3.1.66 브레이크 제어시스템 구성품 설치

(6) 표시장치

① 제품 사진



(a) Workstation



(b) Monitor



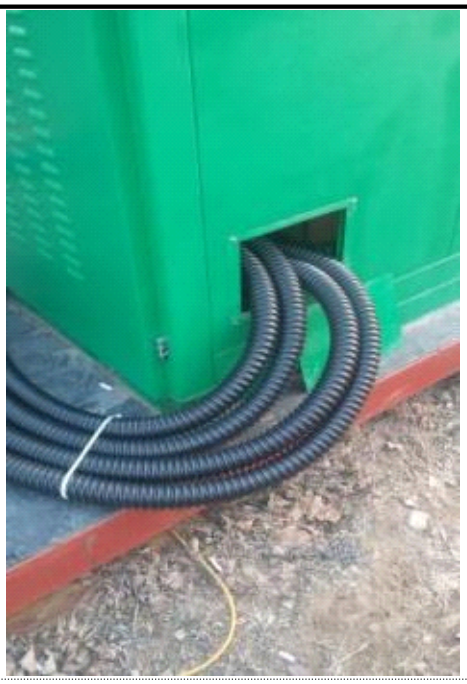
(c) Digital Transceiver



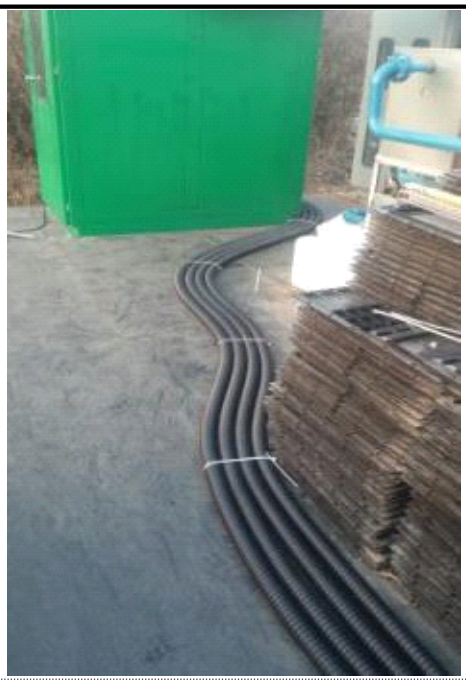
(d) GPS Data 처리용 DMR

그림 3.3.1.67 표시장치 구성품 설치

(7) 제품 현장설치



(a) 전력선 배선 (1)



(b) 전력선 배선 (2)



(c) 현장설치

그림 3.3.1.68 제품 현장설치

마. 시험 결과

(1) Lab Test

LPM를 추진 시스템을 구축하기 전에 추진구동드라이브의 동작여부 체크를 위해 시험실 시험(Lab test) 실시하였다. 인버터의 구동드라이브에 대해 기본 동작 제어회로를 탑재하고, 저전압 직류전원과 부하를 접속하여 타당성 여부를 검토하였다.

- IGBT와 Power Stage에 제어부(Control PCB)와 게이트 드라이브(Gate Drive PCB)를 연결
- 컨버터의 직류 출력단에 저전압 DC Power Supply(100V 이하)를 연결하고, 자체 전류제한이 가능한 DC 전자로드를 접속하여 전원과 부하로 구성
- 상위제어기(host PC)를 통해 지령값을 제어부에 전달하여 제어

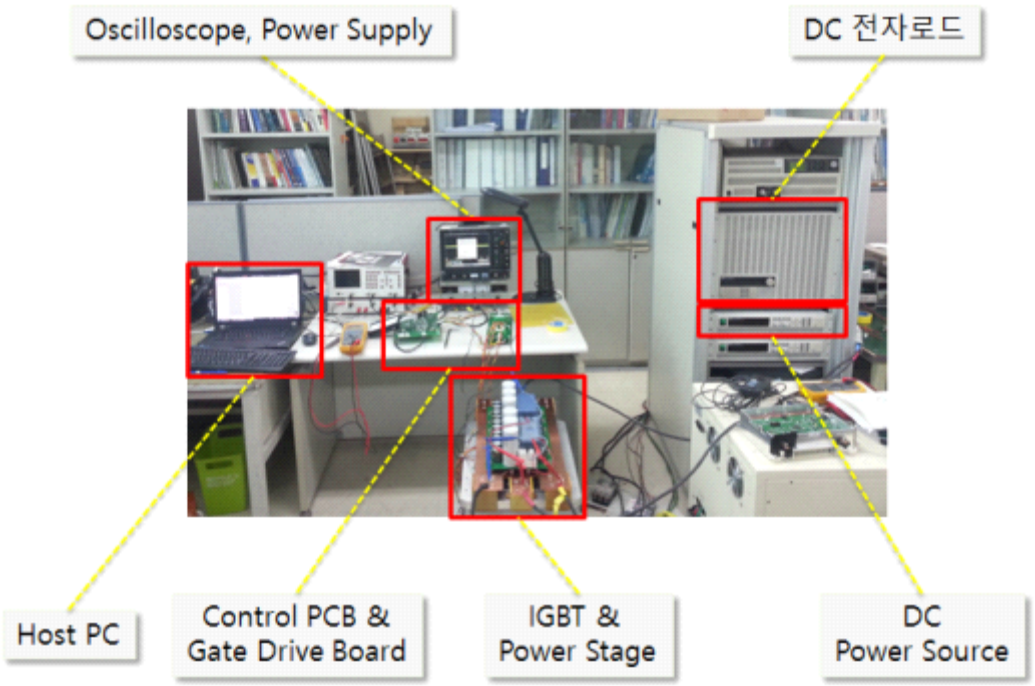


그림 3.3.1.69 Lab Test 환경

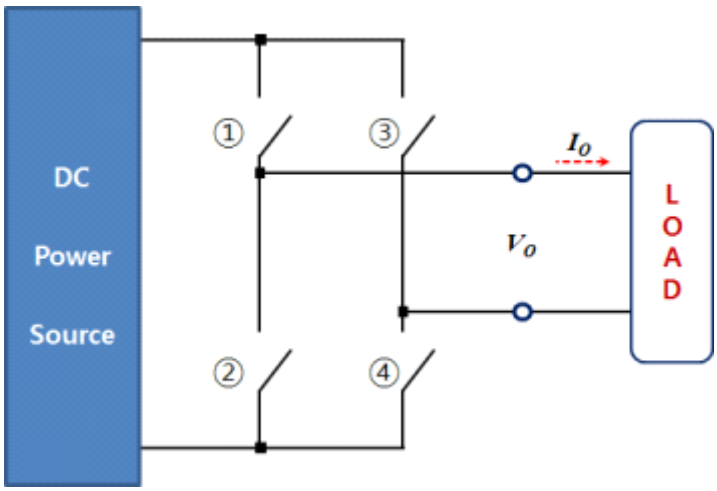


그림 3.3.1.70 스위치 회로

- 코일에 전력을 인가하기 위해 50%의 듀티를 가진 스위칭을 위해 4개의 스위치(① ~ ④)에 인가되는 신호 패턴은 다음과 같음
- 전류제어를 위해 PWM 신호 인가를 4개의 스위치 중 상위 스위치에만 인가를 하고, 하위 스위치는 ON/OFF의 역할만 수행
- 스위칭 소자가 정상적으로 ON/OFF 및 PWM 스위칭이 되는지 확인하기 위하여 다음과 같은 패턴으로 스위칭을 실시

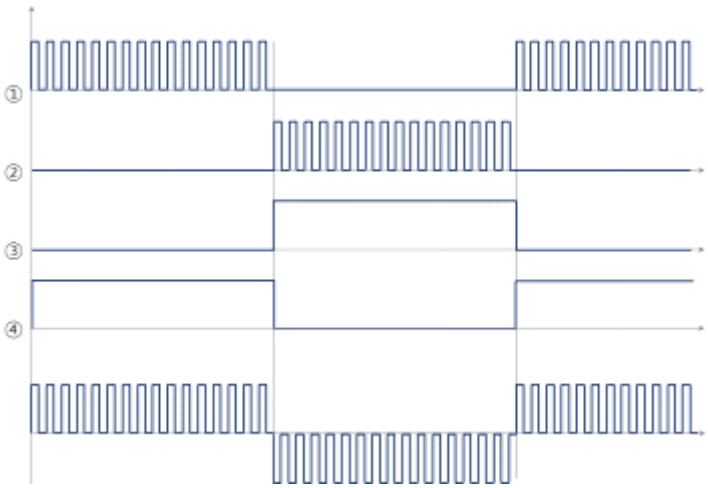


그림 3.3.1.71 스위치들의 신호와 출력전압 파형

- DC 전자로드를 부하로 연결하고 DC Power Supply에서 20V를 인가하였을 때 출력전압과 전류의 파형을 나타내면 다음과 같음

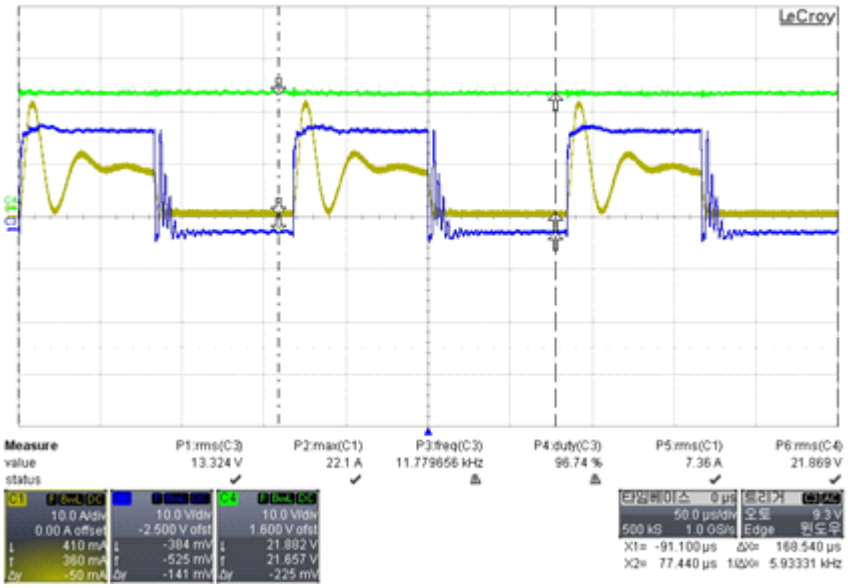


그림 3.3.1.72 전자로드에 PWM 신호 인가시

- 전자로드의 내부에서 스위칭으로 인해 스파이크성 리플이 발생함을 알 수 있음
- 실제 코일은 인덕터 성분이 크고 저항성분이 없으며 스위칭에 의한 로드 밸런싱이 없으므로 인덕터과 저항을 직렬연결한 부하에 스위칭을 한 결과 다음과 같음

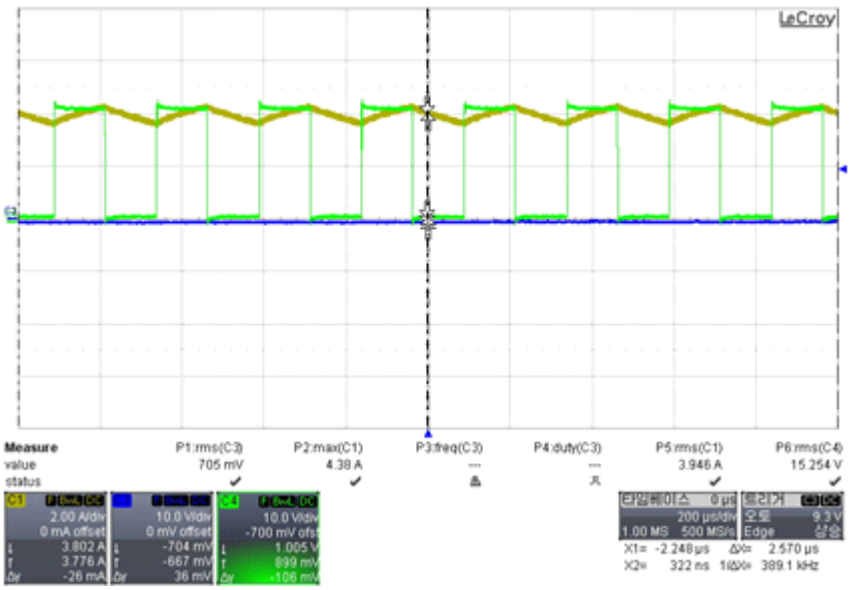
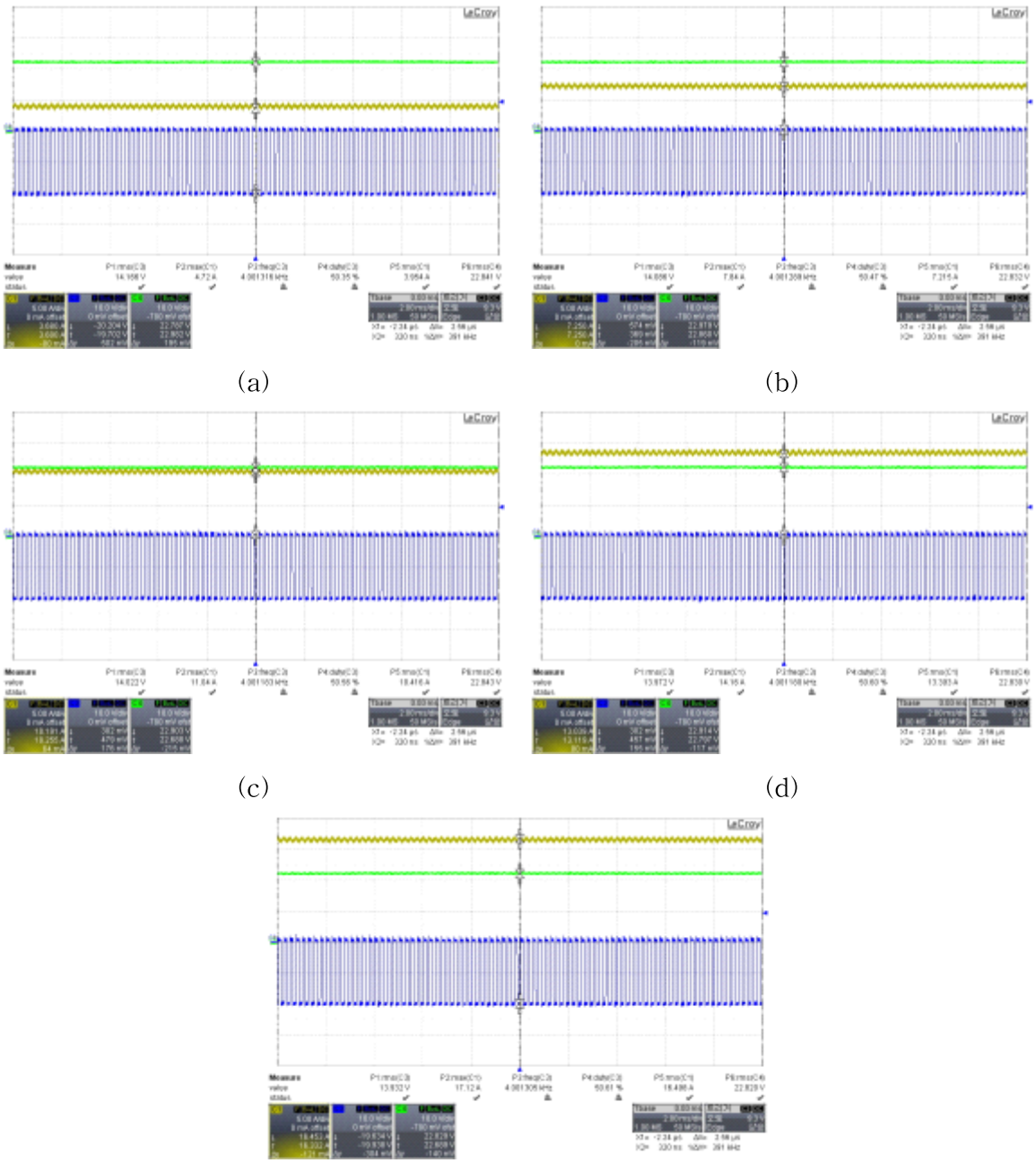


그림 3.3.1.73 인덕터-저항 직렬부하에 PWM 신호 인가시

- 전류제어기를 구성하여 Feedback Loop를 한 경우



(a) (b)

(c) (d)

(f)

그림 3.3.1.74 궤환제어기의 전류지령치 변화에 따른 파형

(2) LPM 구동시스템 시험

LPM를 추진하기 위해서는 먼저 대차의 추진자석의 위치에 따른 정확한 위치검출이 되어야 하고 이에 따른 추진 펄스파형을 인가되어야 한다. 또한 대차의 가감속을 위하여 신속한 토크 제어를 할 수 있도록 LPM 코일에 원활한 전류제어가 되어야 한다.

① 홀센서에 의한 위치검출 파형

아래 파형에서 대차의 움직임에 따라 A상과 B상의 홀센서 출력 파형이 정확히 교차되면서 나오고 있다. 이 A, B상의 신호를 4채배하여 대차의 위치를 45도 간격으로 인식하여 운전할 수 있게 된다.

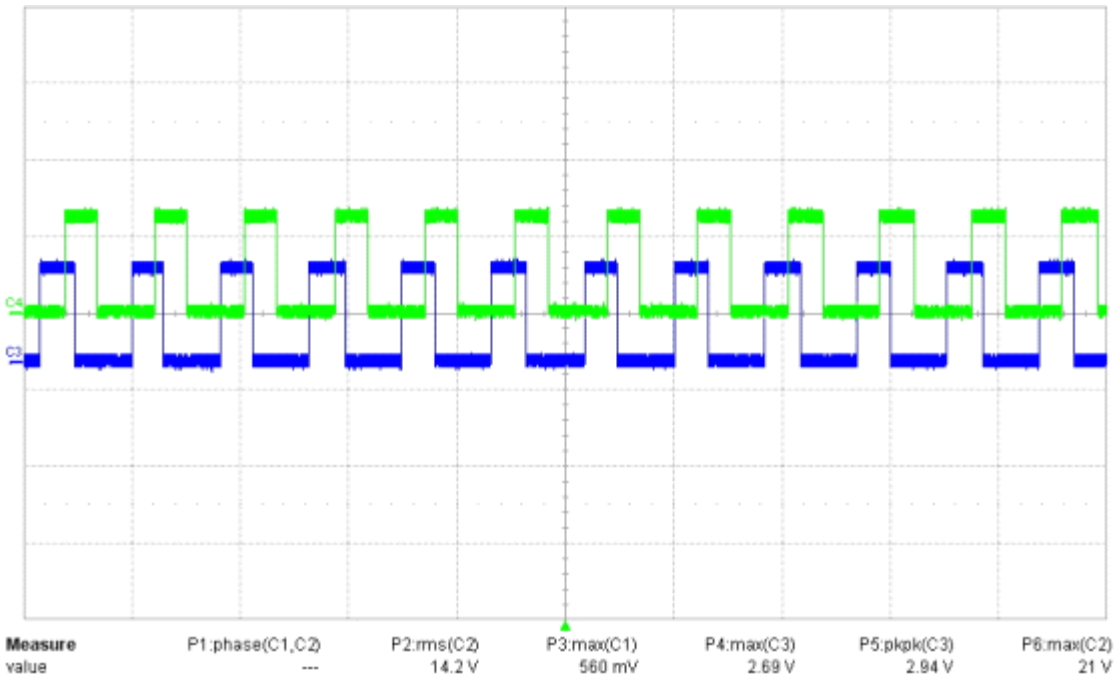


그림 3.3.1.75 대차 위치변동에 따른 홀센서 출력 A, B상

② PWM에 따른 전류제어파형

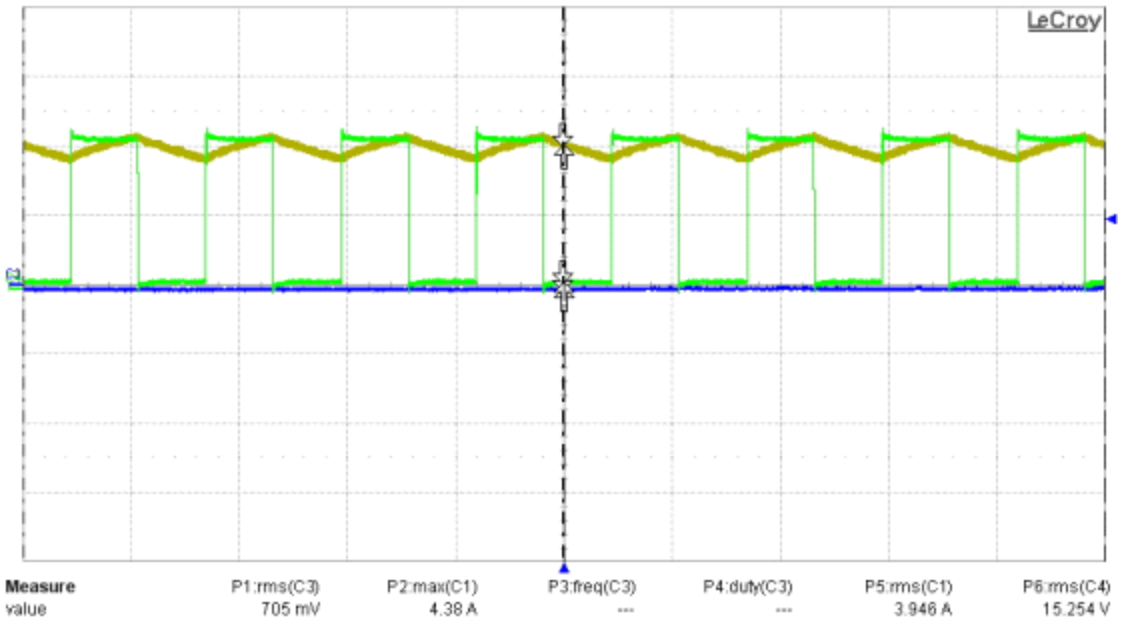


그림 3.3.1.76 PWM에 따른 전류제어파형

③ 전류제어 명령에 따른 PWM과 전류파형

아래 파형들은 전류제어 명령(reference)에 따라서 연속모드로 전류가 제어되고 있음을 보여주는 파형이다.

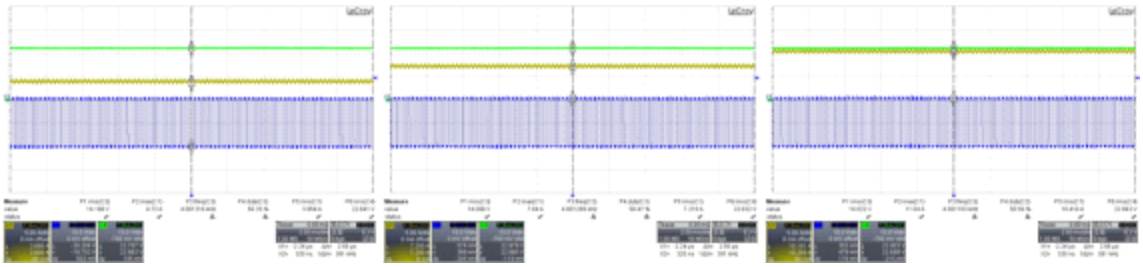


그림 3.3.1.77 전류제어 명령에 따른 PWM과 전류파형

④ 대차 추진제어 펄스파형

대차의 위치에 따른 추진제어 펄스파형 아래와 같이 원활히 되고 있음을 알 수 있다.

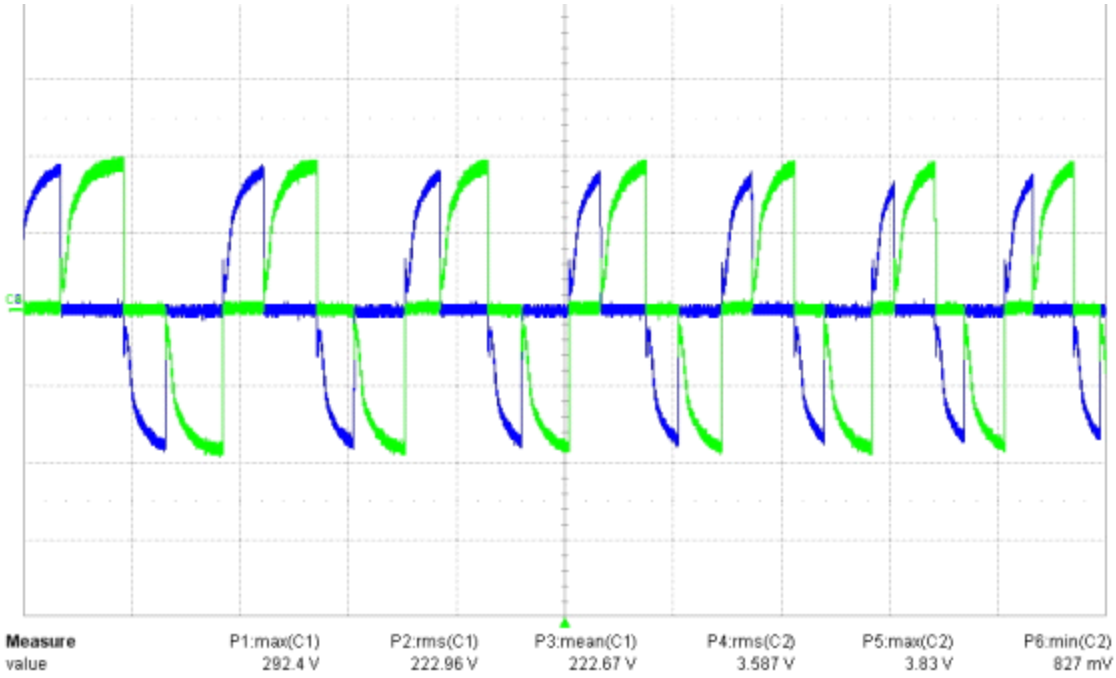


그림 3.3.1.78 추진코일의 A상과 B상의 2상 제어파형

⑤ 정지 상태의 RST상 SCR게이트와 컨버터 출력전압 파형

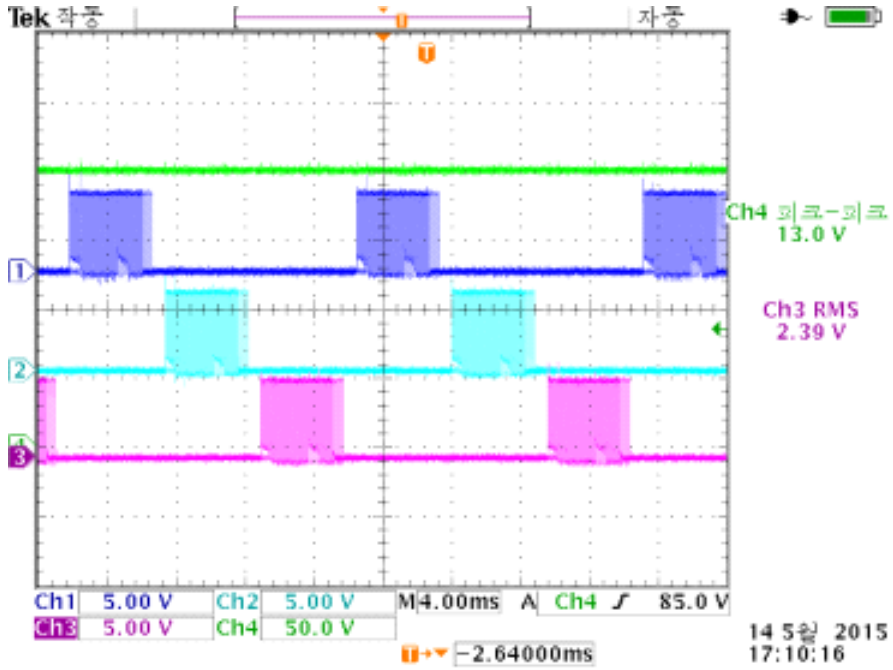


그림 3.3.1.79 정지상태의 SCR게이트 파형과 출력파형

⑥ 추진상태의 RST상 SCR 게이트파형과 컨버터 출력파형

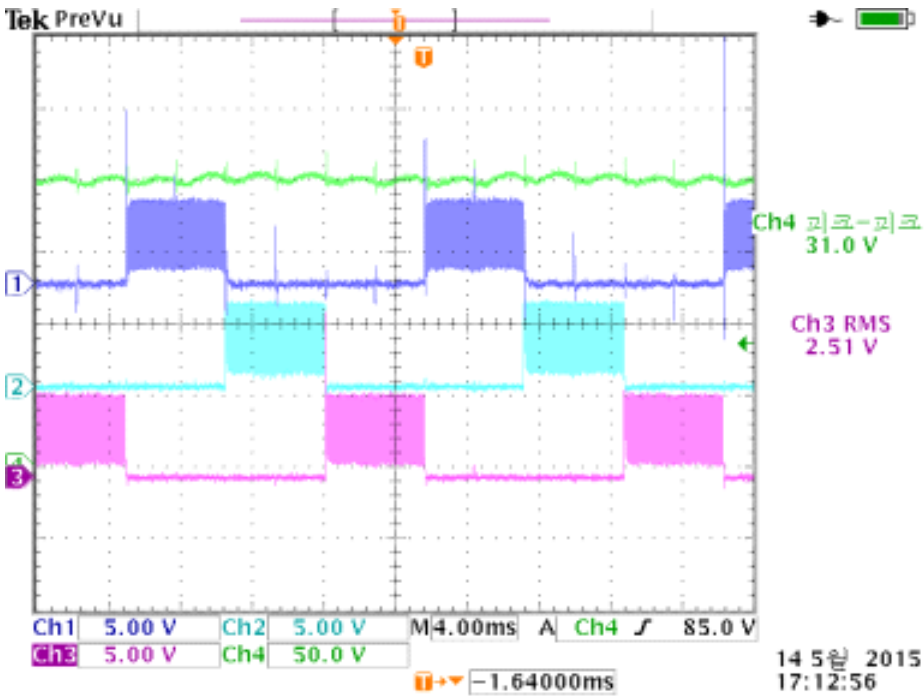


그림 3.3.1.80 추진상태의 SCR게이트 파형과 출력파형

⑦ 온도 상승시험의 온도 데이터 파형

레코더 온도 001 ~ 010은 추진코일의 온도를 나타내고 401 ~ 409는 함체 외기온도,컨버터 상

층온도, SCR방열판 온도, 컨버터 입력 버스바 온도, 컨버터 출력 버스바 온도, 인버터 상층온도, IGBT 방열판 온도, 인버터 입력 버스바 온도, 인버터 출력 버스바 온도를 나타낸다.

추진 코일의 온도가 60℃ 이상 도달시 인버터 컨버터의 온도는 외기온도인 28.4℃에서 최고 온도인 컨버터 출력 버스바 온도가 42.0℃ 이므로 ΔT 13.6℃ 으로 우수하게 방열되고 있다.

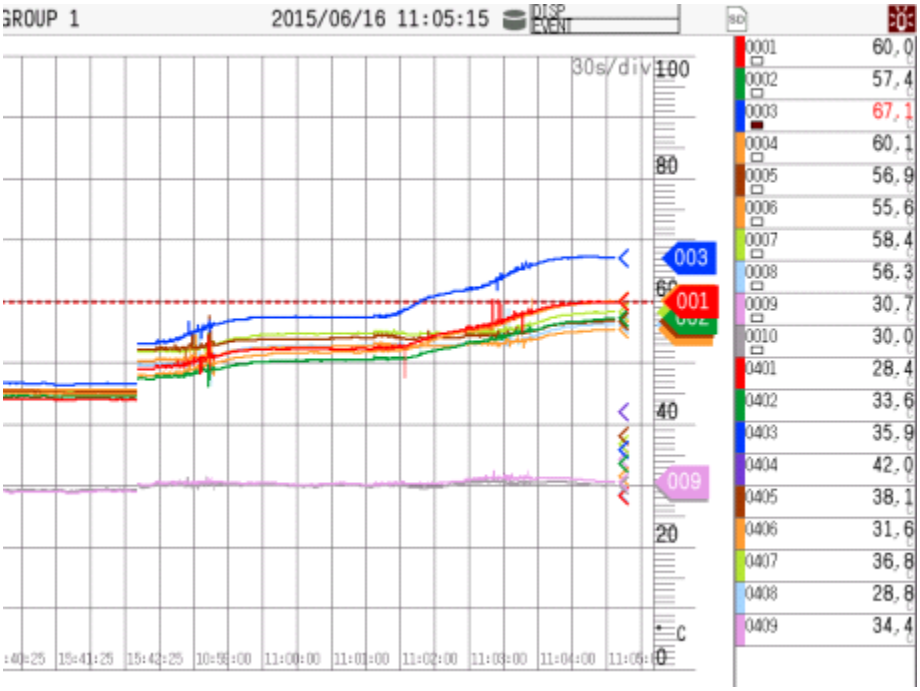


그림 3.3.1.81 온도 상승시험

⑧ 조합 시험 데이터 레코더 파형

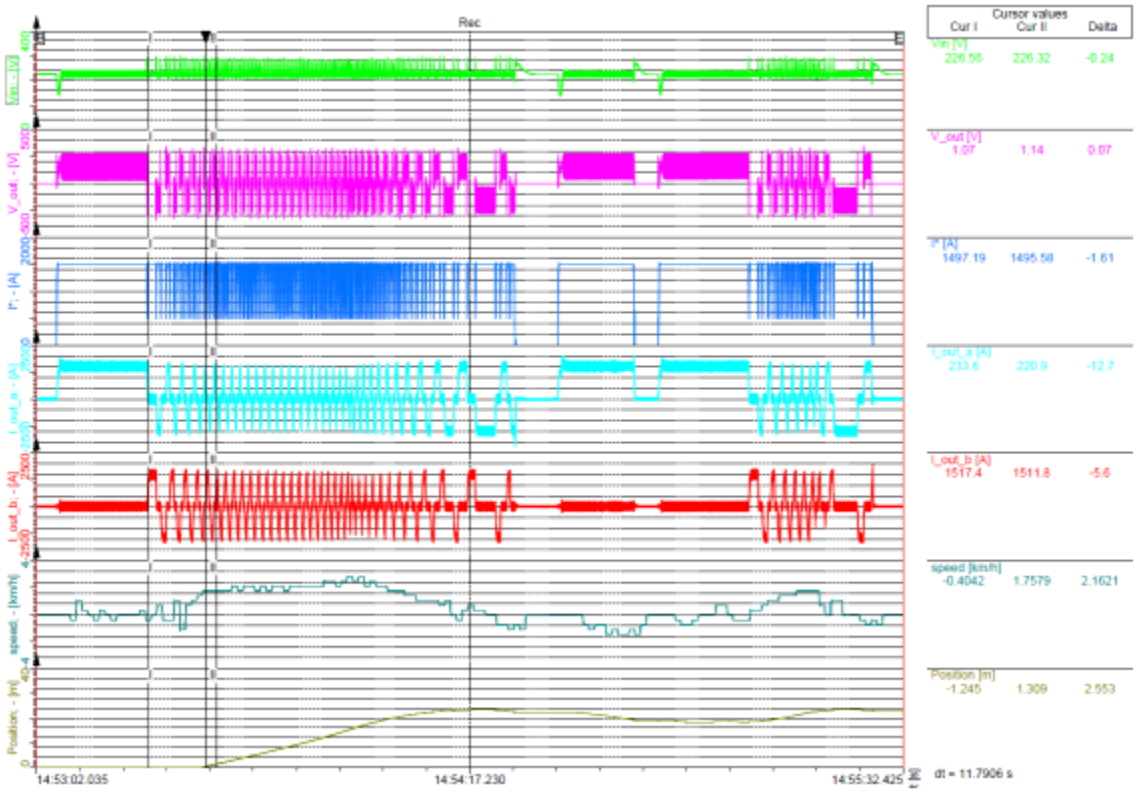


그림 3.3.1.82 조합시험시의 데이터 레코더 파형

1번 녹색 : 컨버터 출력전압

2번 핑크 : 인버터 출력전류

3번 파랑 : 출력전류 지령치

4번 하늘색 : A상 출력전류

5번 빨강색 : B상 출력전류

6번 녹갈색 : 속도

7번 갈색 : 차량 위치

차량의 운행에 따른 가감속제어와 추진전류의 제어가 양호하다.

⑨ 소음측정 데이터

인버터와 컨버터의 운전에 따른 소음 측정시 최대소음은 70.6dB 로서 규정치 85dB 이하로서 양호한 상태이다.



그림 3.3.1.82 소음 측정

3.3.1.5. 실대차 제작 및 시스템 통합

가. 개요

대차는 리니어펄스모터 추진장치를 장착하여 주행하는 대차로서 주요 구성품은 윤축조립, 축상조립, 대차프레임 조립, 조향장치 조립, 회전장치 조립, 지지프레임 그리고 축전지 지지박스 조립 등으로 구성되어 있다.

일반 철도차량의 대차에 적용된 차축은 하나의 차축에 두 개의 차륜을 압입하는 일체형 차축이나, 본 과제에서는 하나의 차륜에 하나의 차축을 적용하는 액슬레스 차축을 채용하는 것이 특징이며, 본 시스템은 곡선통과 시 곡선통과 성능 향상 및 소음저감에 강점을 갖고 있다.

본 제안 대차의 주요 구성은 그림 3.3.1.83 및 그림 3.3.1.84와 같다.

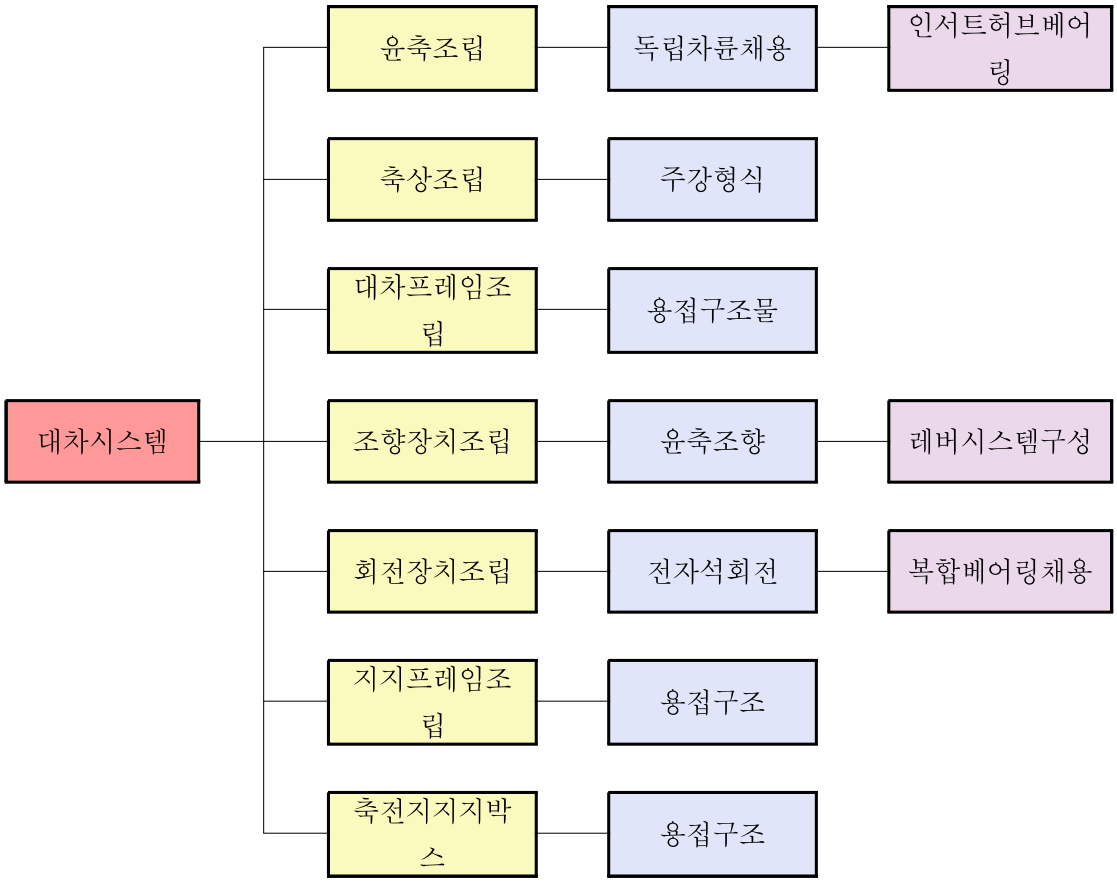


그림 3.3.1.83 대차 주요 구성

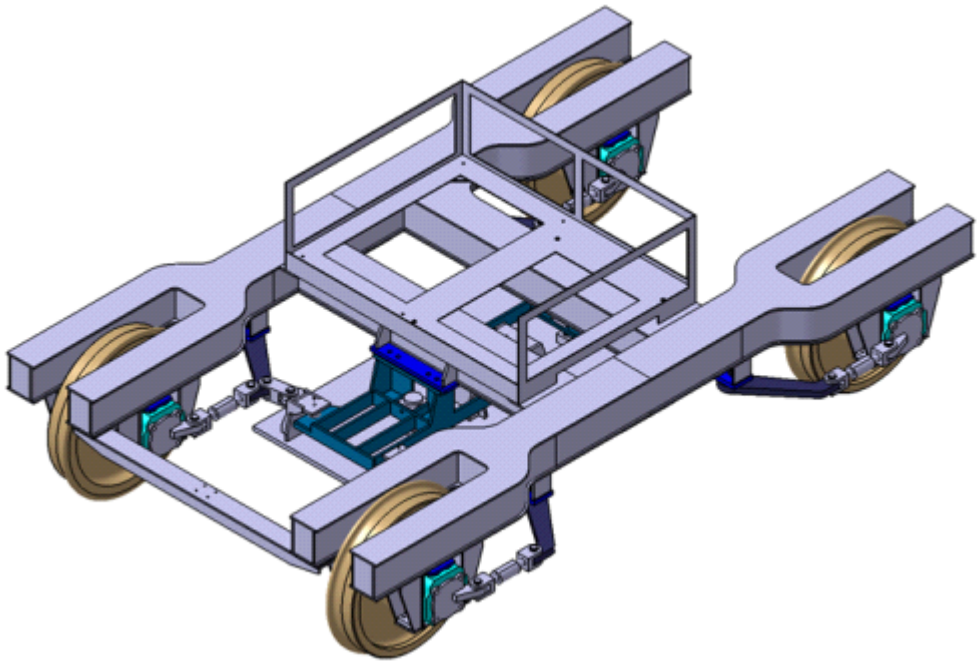


그림 3.3.1.84 대차의 주요 구성품 조립도

나. 주요 제원

대차의 주요 제원은 다음 표 3.3.1.22와 같다.

표 3.3.1.22 대차 주요 제원

대차형식	독립차륜 형식
조향형식	전자석과 연계한 강제조향
베어링형식	인서트휠허브 베어링(Insert wheel bearing)
궤간	1,435mm
대차프레임 높이	레일상면에서 대차프레임 상면까지 661mm
대차길이	3,170mm
대차너비	1,900mm
축간거리	2,430mm
차륜경	660mm

다. 특징

대차는 독립윤축 및 조향장치를 채용하여서 곡선반경이 아주 작은 구간에서도 주행이 용이하다는 특징이 있다. 본 과제에서 설계한 대차에서 채용한 독립윤축 및 조향장치 시스템은 다음과 같다.

(1) 독립윤축

대차에서 채용한 독립윤축의 구조는 그림 3.3.1.85에 나타난 바와 같이 차륜에 베어링이 적용된 시스템으로서 차축이 회전하는 것이 아니라 차축은 고정되어 있는 반면에 차륜이 차축에 대하여 회전하는 시스템으로 되어 있다. 따라서 차량이 곡선구간 통과 시 곡선통과 성능 향상으로 차륜 마모저감 및 휠스킬소음 발생 저감 등에 효과가 있다. 또한 윤축은 액슬레스 형식이므로 일반 철도차량의 대차와 달리 한 대차에 4개가 적용된다.

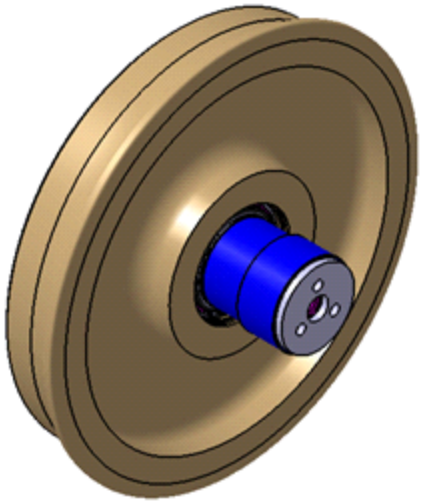


그림 3.3.1.85 독립윤축의 구조

(2) 조향장치

대차에서 채용한 조향장치는 강제조향 방식으로서, 조향장치의 구조는 그림 3.3.1.86에 나타난 바와 같이 2개의 리니어펄스모터 상판과 액슬박스 사이에 레버들로 연결된 시스템이다. 대차에 취부된 리니어펄스모터는 트랙에 설치된 그라운드 코일과의 흡인력에 의하여 추진하는 시스템이다. 따라서 리니어펄스모터와 그라운드 코일사이에 흡인력이 항상 상호 작용하므로 대차가 곡선구간 진입 및 통과 시 2개의 리니어펄스모터 곡선반경방향으로 회전운동을 하며 상호 일정 각을 이루게 되며, 동시에 2개의 리니어펄스모터에 연결된 조향장치의 각 레버가 움직이고 또한 그로 인하여 대차에 연결된 레버가 윤축을 곡선반경 방향으로 조향시키는 구조이다.

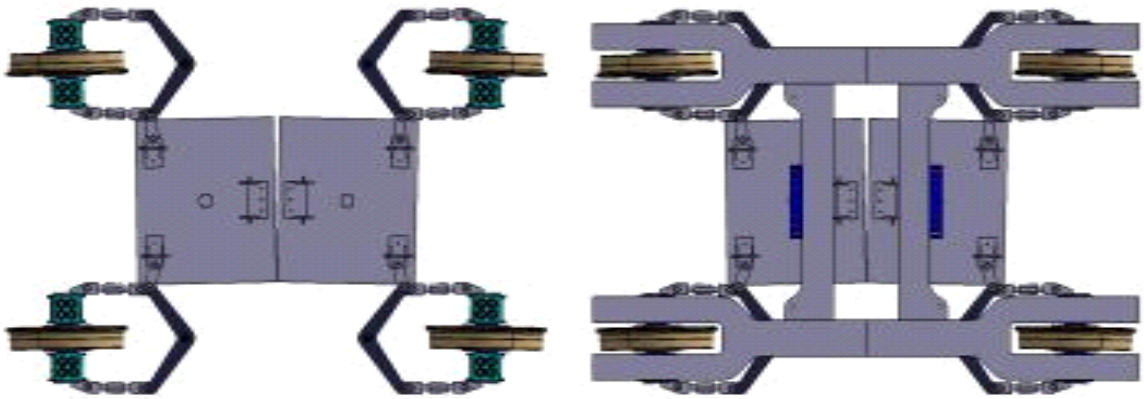


그림 3.3.1.86 곡선구간에서 조향장치의 거동

라. 구조

대차는 독립윤축, 액슬박스, 대차프레임, 조향장치, 회전장치 그리고 축전지 지지박스 등으로

구성되었으며 각 구성품에 대한 구조 및 특징은 아래와 같다.

(1) 윤축

윤축은 그림 3.3.1.86에 나타난 바와 같이 차륜, 차축, 인서트허브 베어링, abutment 그리고 엔드캡으로 구성되어 있다. 차륜은 일체형 압연 차륜으로 직경 660mm이며 특별히 열처리된(Hardened and Tempered) 탄소강을 사용하고, 차륜 허브(Hub)에는 인서트허브베어링(Insert hub bearing)이 조립될 수 있는 구조로 되어 있다. 또한 차륜 답면 형상은 그림 3.3.1.87에 나타난 바와 같이 이미 기존 독립차륜형식에 적용한 프로파일을 채택하였다.

베어링은 인서트허브베어링 형식으로서 베어링의 외륜부가 차륜부와 냉간 압입방식으로 조립되고 내륜부는 차축에 헐거운 끼움방식으로 조립되는 구조이다. 또한 베어링에 그리스 씰이 적용되어 외부로부터 먼지나 이물질의 침투를 방지하였다.

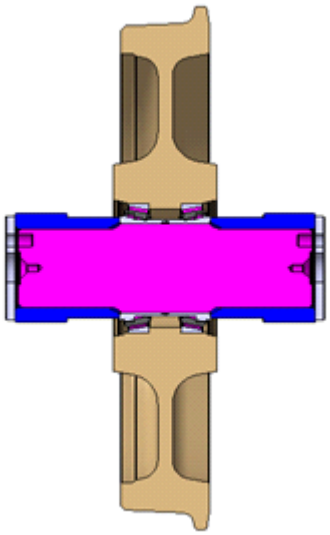


그림 3.3.1.86 윤축의 구조

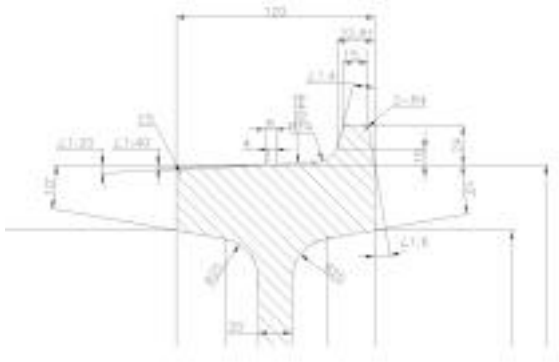


그림 3.3.1.87 차륜 답면 형상

차축은 액슬레스 형식으로 기존 철도차량의 윤축과 같이 2개의 차륜에 하나의 차축으로 이루어진 형태가 아니고 하나의 차륜에 하나의 차축이 적용된다.

(2) 액슬박스 조립

액슬박스 조립은 그림 3.3.1.88에 나타난 바와 같이 액슬박스, 프론트 커버 그리고 볼트랜스퍼 베어링으로 구성되어 있다. 액슬박스 조립은 조향장치와 연결되어 곡선구간 통과 시 조향장치의 거동 의하여 차축과 함께 곡선 반경방향으로 움직이는 구조이며, 또한 페데스탈 구조로서 대차프레임과 길이방향과 횡방향으로 움직임이 5mm로 제한되었다.

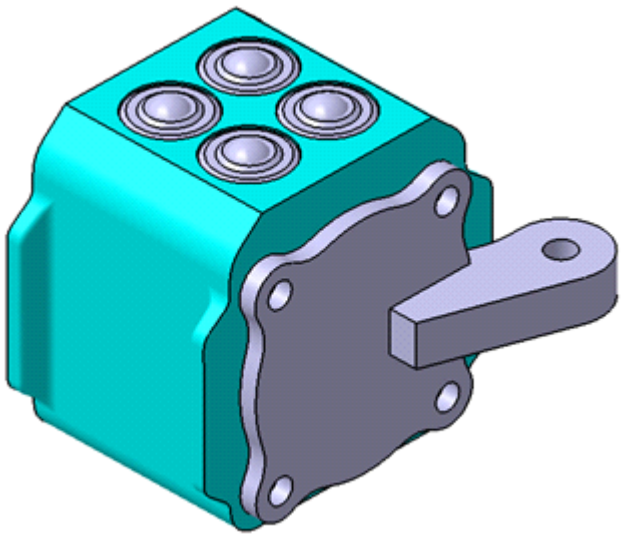


그림 3.3.1.88 액슬박스 조립 구조

(3) 대차프레임 조립의 구조

대차프레임 조립은 그림 3.3.1.89에 나타난 바와 같이 H자 형식 용접구조형식으로서 두 개의 사이드프레임과 2개의 트랜솜으로 구성되어 있다. 그림에 나타난 바와 같이 사이드프레임이 액슬레스형식의 차축을 적용할 수 있는 구조로 되어 있으며, 트랜솜 하부에는 리니어펄스모터가 취부 조립될 수 있는 구조로 있다. 또한 사이드프레임 하부는 페데스탈 구조로 되어 있어 액슬박스의 움직임을 제한하는 구조로 되어 있다.

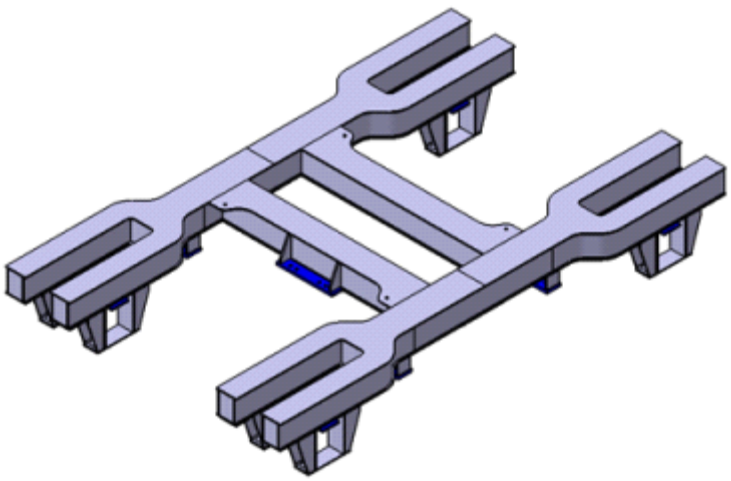


그림 3.3.1.89 대차프레임 조립 구조

대차프레임의 단부에는 지상으로부터 전기를 받아서 배터리를 충전시키는 충전코일장치를 취부 조립할 수 있는 빔이 설치되어 있으며, 트랜솜 상부에는 축전지 및 충전기를 설치할 수 있

는 구조로 되어 있다.

대차는 주행 중에 발생하는 진동에 직접 노출되는 구성품으로 대차프레임이나 각종 브라켓은 이들 진동에 충분한 강도나 내구성을 확보하는 구조로 되어 있다.

(4) 조향장치 조립의 구조

조향장치의 기능은 앞에서 언급한 바와 같으나, 구조는 그림 3.3.1.90에 나타난 바와 같이 4개의 레버, 3개의 핀 그리고 대차프레임에 취부된 하나의 회전축으로 구성되어 있다. 리니어펄스모터가 곡선구간에서 움직이면 리니어펄스모터의 상부 판과 연결된 레버가 움직이면서 대차프레임에 취부된 회전축을 중심으로 각 레버가 움직이는 구조로 되어 있다.

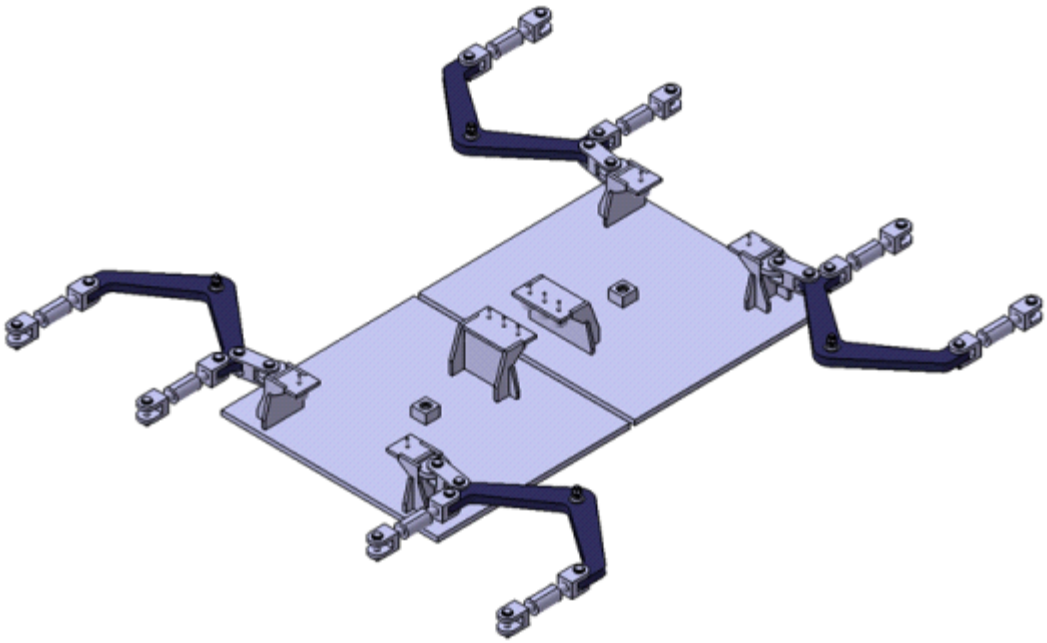


그림 3.3.1.90 조향장치 조립 구조

(5) 회전 및 견인장치 조립의 구조

대차는 리니어펄스모터 추진시스템에 의하여 구동되므로 리니어펄스모터의 구동력을 대차프레임에 전달하는 장치와 대차가 곡선구간 통과 시 리니어펄스모터 곡선을 따라 거동하므로서 대차프레임과 리니어펄스모터 사이에 회전하는 장치가 필요하다.

회전 및 견인장치는 그림 3.3.1.91과 그림 3.3.1.92에 나타난 바와 같이 지지프레임, 볼트랜스퍼 베어링, 복합베어링, 회전축 그리고 베어링 브라켓으로 구성되어 있다.

회전장치는 그림 3.3.1.91에 나타난 바와 같이 대차가 곡선구간 통과 시 2개의 리니어펄스모터 곡선을 따라 거동하므로서 지지프레임의 복합베어링에 조립된 축이 회전하고 2개의 리니어펄스모터 상판에 취부된 각 볼트랜스퍼 베어링이 회전축을 중심으로 회전하는 구조이다.

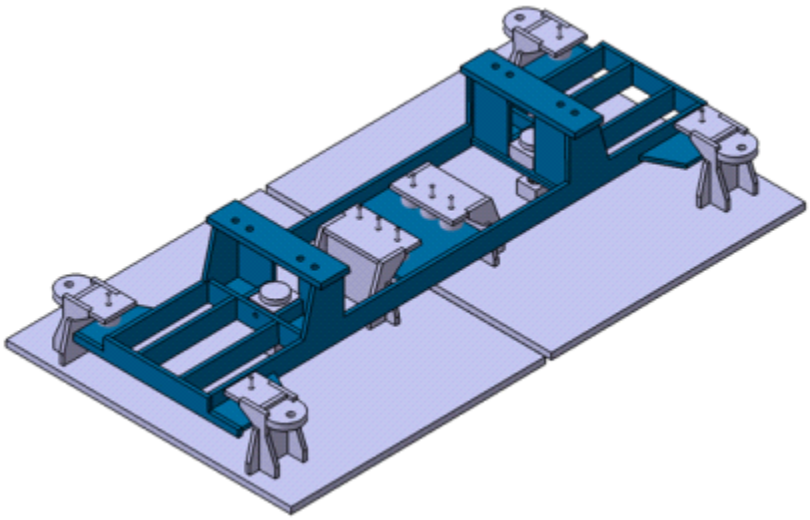


그림 3.3.1.91 회전장치 조립 구조

견인장치는 그림 3.3.1.92에 나타난 바와 같이 2개의 리니어펄스모터 추진력을 회전축, 복합베어링, 지지프레임, 지지프레임 브라켈 그리고 대차프레임에 전달되는 구조로 되어 있다.

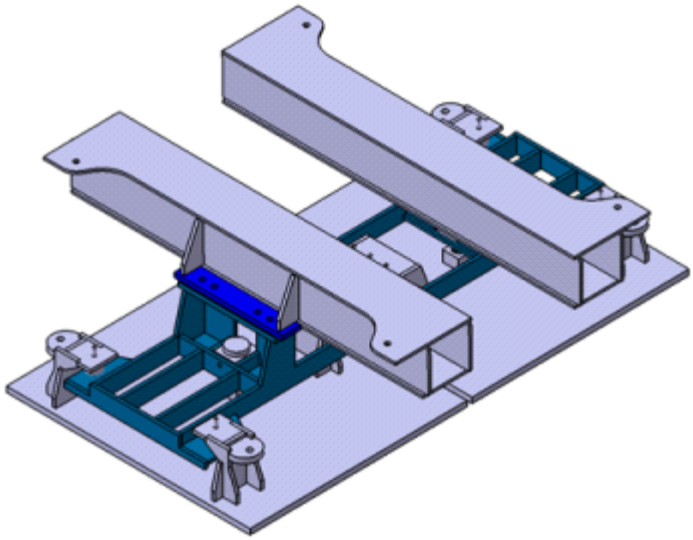


그림 3.3.1.92 견인력 전달 구조

마. 설계 요구사항

(1) 대차프레임

- 대차프레임은 H형식 용접구조 방식으로 되어 두 개의 사이드프레임과 크로스 빔으로 구성되어 있음.
- 대차프레임의 사이드프레임은 one wheel one axle 형식의 윤축에 적합한 구조임.
- 운송 등이 필요한 경우 대차와 전차석조립체를 분리하거나, 함께 운반할 수 있는 구조임.

- 대차프레임 하부에는 전자석조립체가 취부 조립될 수 있는 구조임.
- 대차프레임 상부는 밧데리 및 DC컨버터를 설치할 수 있는 구조임.
- 대차프레임의 양단부에는 지상으로부터 전기를 받아서 밧데리를 충전시키는 충전코일장치를 취부 조립할 수 있는 구조임.
- 사이드 프레임과 센타 크로스 빔 조립은 운행 중 가능한 한 응력 집 중이 없도록 설계 제작함.
- 전자석조립체가 취부되는 대차프레임이나 각 종 브라켙은 주행으로 발생되는 진동에 대하여 충분한 강도를 확보함.

(2) 윤축 및 베어링

- 차륜은 일체형 압연 차륜으로 직경 660mm이며 특별히 열처리된(Hardened and Tempered) 탄소강임.
- 차륜 허브(Hub)에는 인서트허브베어링(Insert hub bearing)이 조립될 수 있는 구조임.
- 차축은 one wheel one axle 형식임. 즉 기존 철도차량의 윤축과 같이 2개의 차륜에 하나의 차축으로 이루어진 형태가 아니고 차륜 하나에 차축이 하나로 구성된 형식으로서 각 차륜이 독립적으로 굴러가는 형식임.
- 차륜의 답면 형상은 독립차륜형식에 적합한 프로파일 적용함.
- 베어링은 인서트허브베어링 형식으로서 차륜의 허브에 압입되는 구조이며, 베어링에는 이물질 침투를 방지하기 위하여 씰을 적용함.

(3) 액슬박스

- 액슬박스는 대차프레임에서 작용하는 하중을 지지하며, 액슬박스내에는 대차하중을 지지하는 차축 및 abutment ring이 있으며, abutment ring과 차축은 볼트에 의해 일체 구조이다.
- 대차가 곡선구간 통과 시 액슬박스는 조향장치에 의하여 대차프레임에 대하여 길이방향으로 운동할 수 있는 구조이다.
- 대차를 들어올릴 때 액슬박스는 윤축을 들려올릴 수 있는 구조이다.

(4) 조향장치

- 대차가 곡선구간 통과 시 윤축이 곡선을 추정할 수 있도록 전자석과 액슬박스사이에 조향장치를 적용한다.
- 조향장치는 링크구조로 설계하되 전자석조립체의 회전운동에 의하여 액슬박스의 운동 그리고 윤축이 최종적으로 곡선구간을 조향하는 시스템으로 한다.

(5) 회전 및 견인기능

- 대차가 곡선구간 통과 시 전자석조립체가 곡선을 따라 거동하므로서 대차프레임과 전자석조립체사이에 회전기능을 할 수 있는 시스템을 적용 한다.
- 전자석조립체는 트랙에 설치된 전력공급장치로부터 전기를 받아 추진하므로서 대차에 전자석조립체의 추진력을 수용하는 견인기능의 장치가 적용 된다.

(6) 충전코일장치 취부

- 충전코일장치는 트랙으로부터 전기를 받아서 밧데리에 전기를 공급하는 장치로서, 대차프레임 양 단부에 설치된다.
- 대차프레임 양 단부에는 충전코일장치가 취부될 수 있도록 엔드빔을 설치한다.

(7) 밧데리 및 DC/DC 컨버터 취부

- 전자석조립체에 전류를 공브하는 밧데리 및 DC/DC 컨버터가 대차프레임 상부에 설치되므로 대차프레임 중앙 상부에는 밧데리 및 DC/DC 컨버터를 취부할 수 있는 구조물을 설치한다.

바. 설계 도면

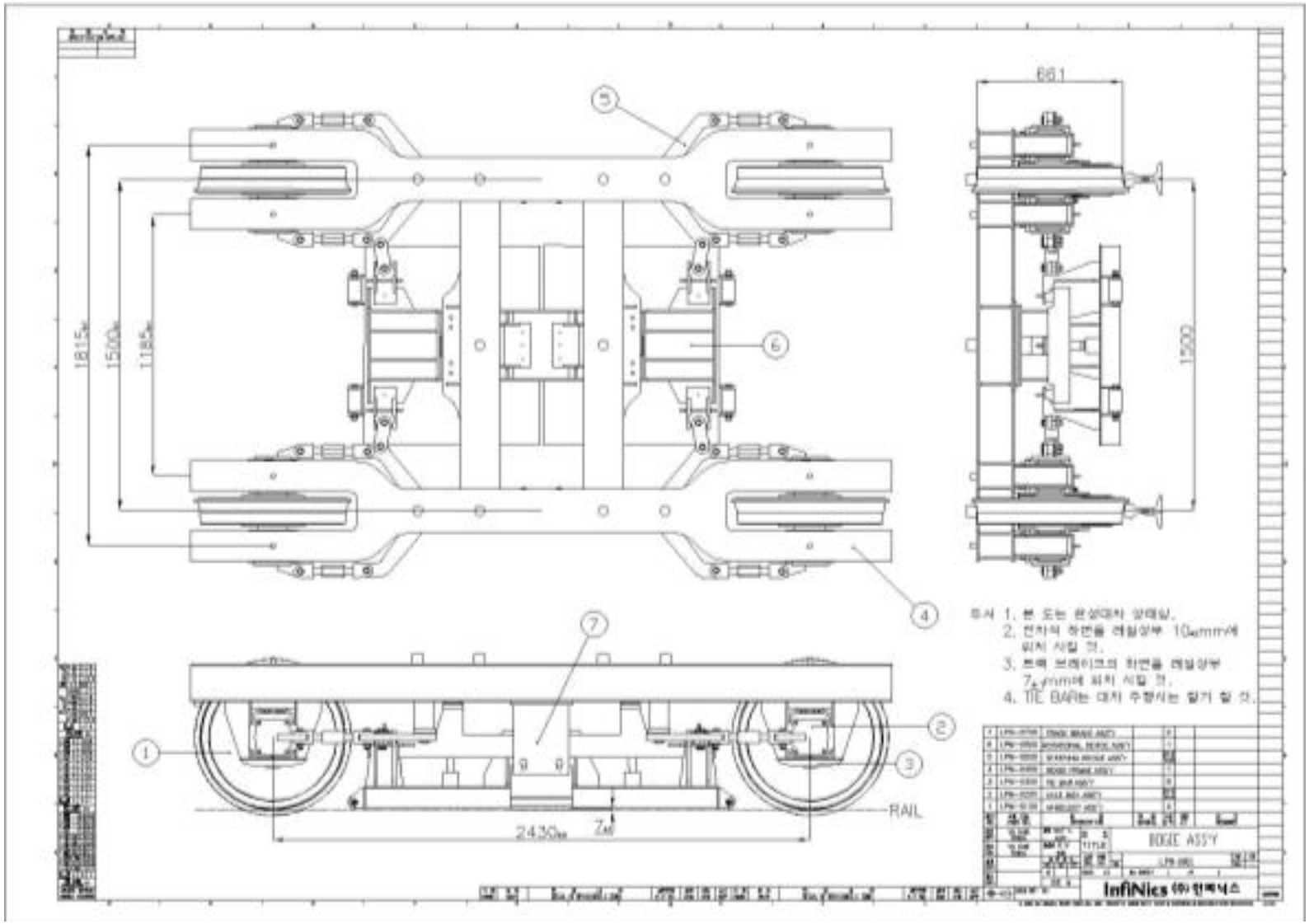


그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (1/6)

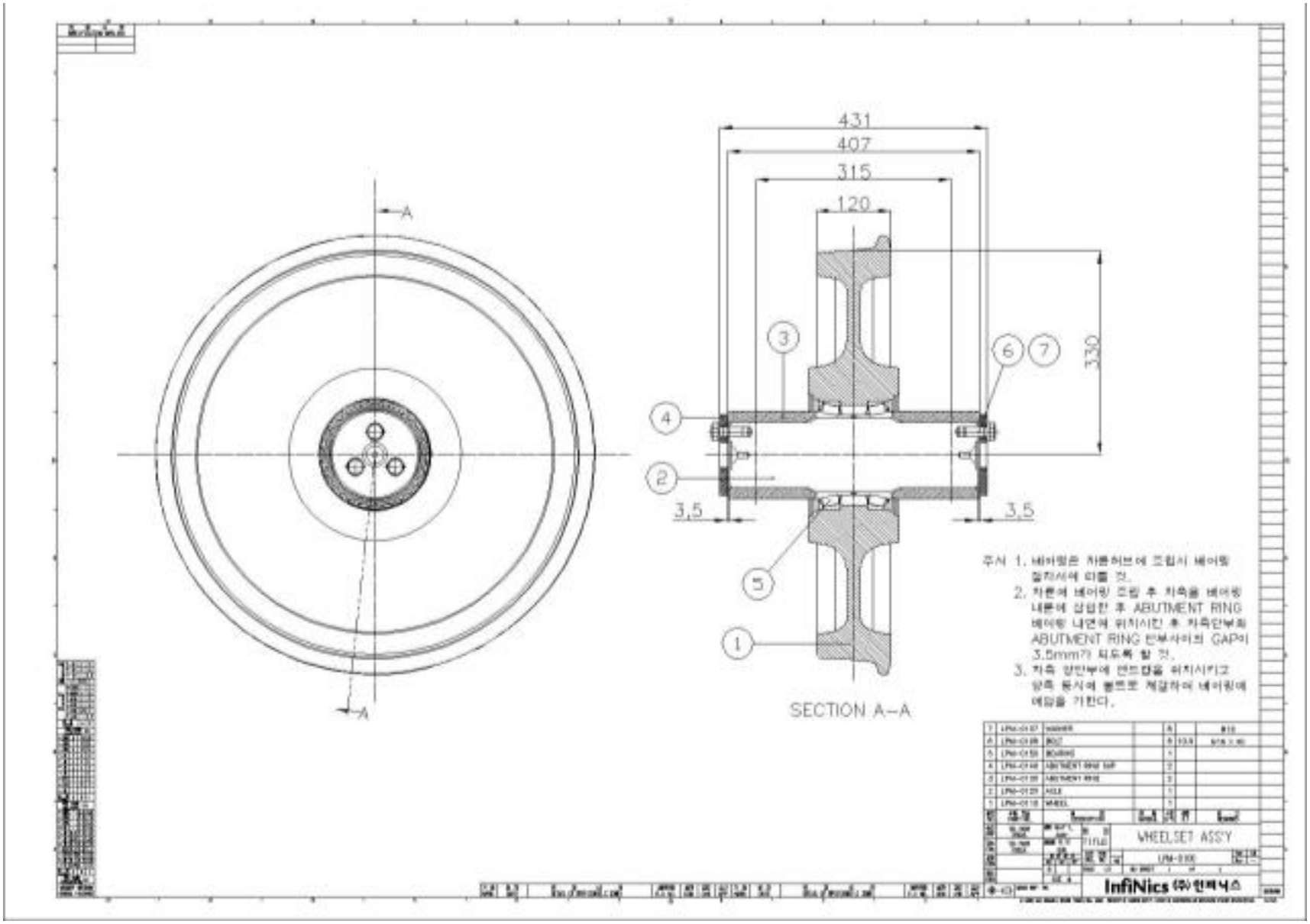


그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (2/6)

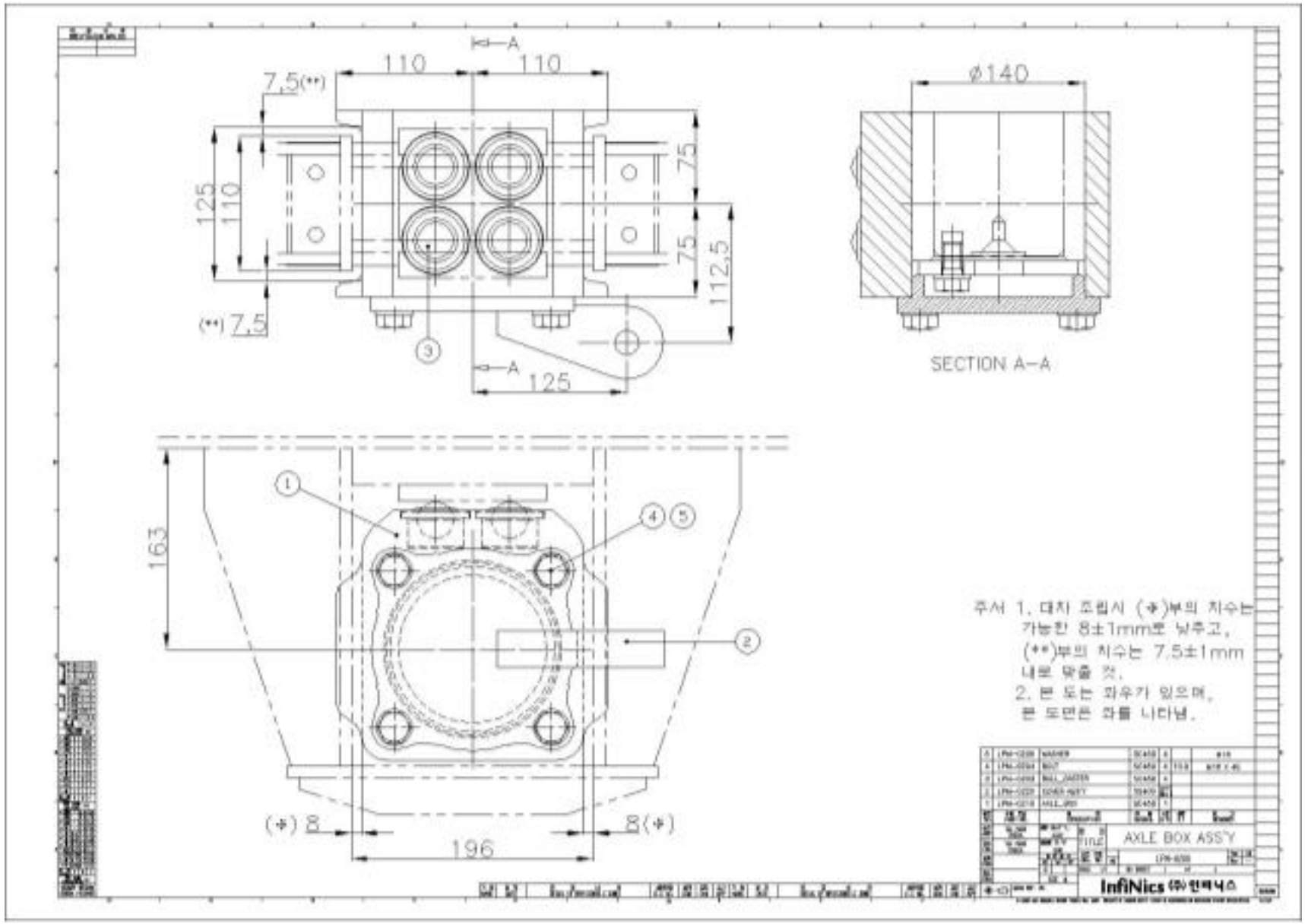


그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (3/6)

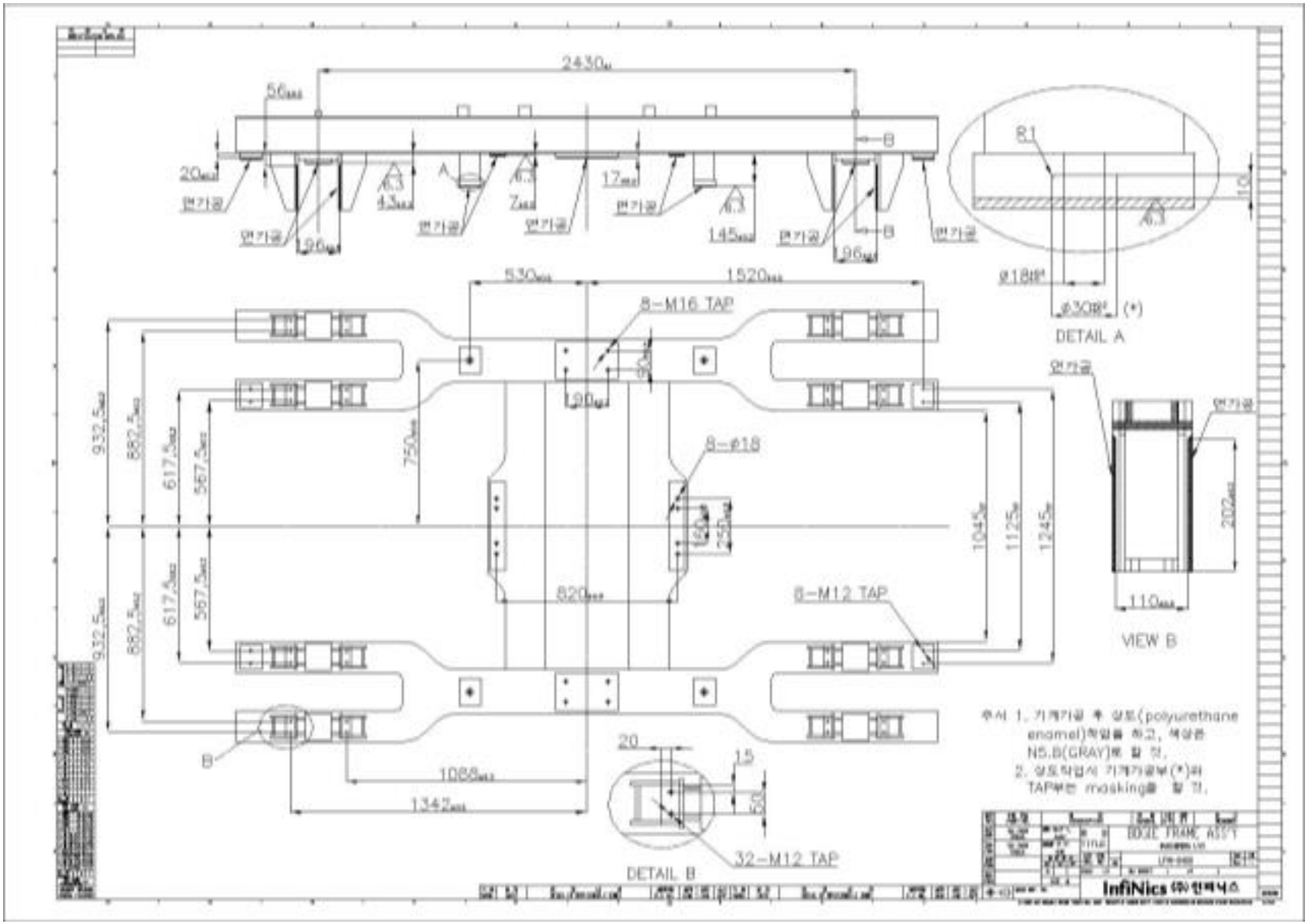


그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (4/6)

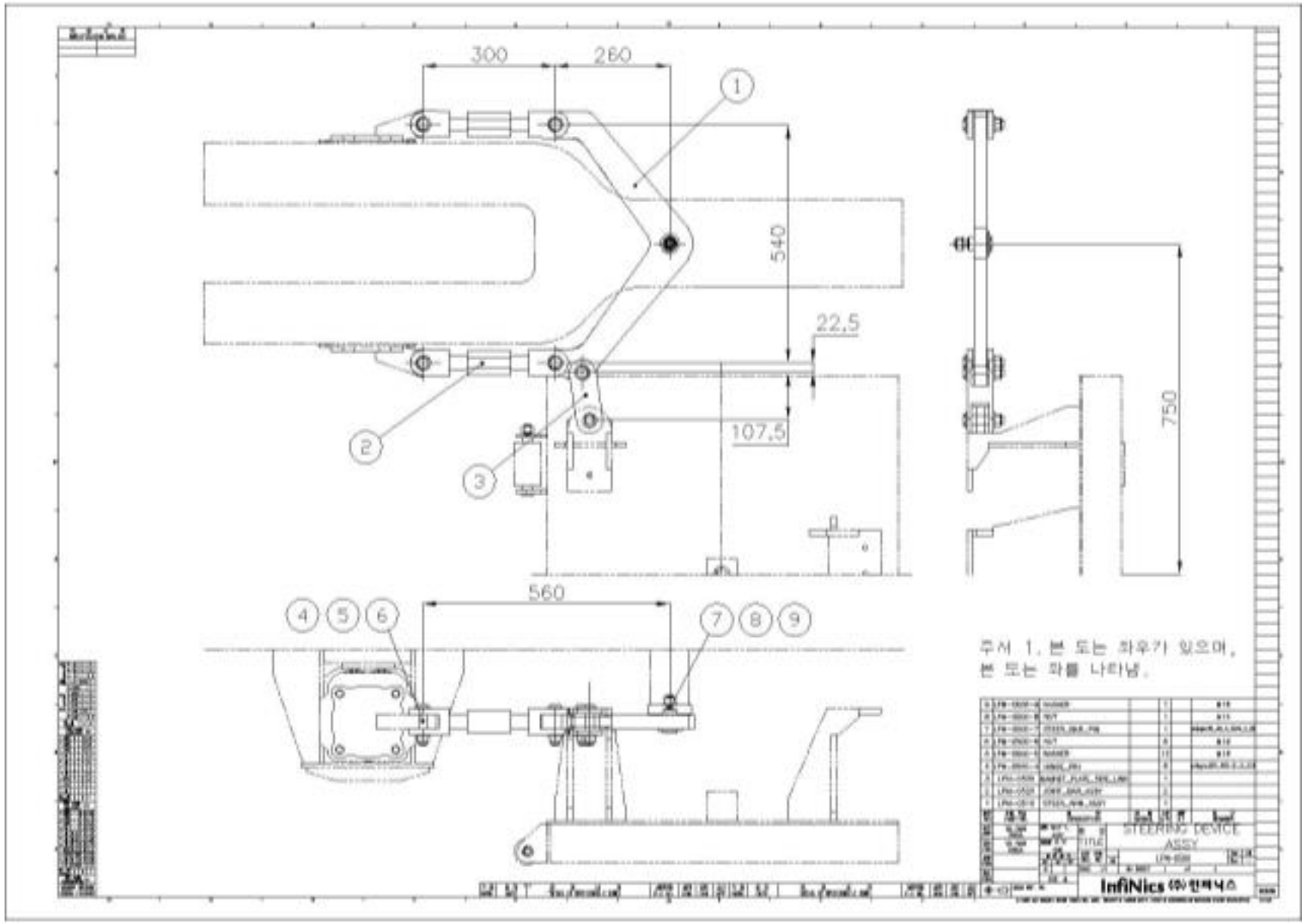


그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (5/6)

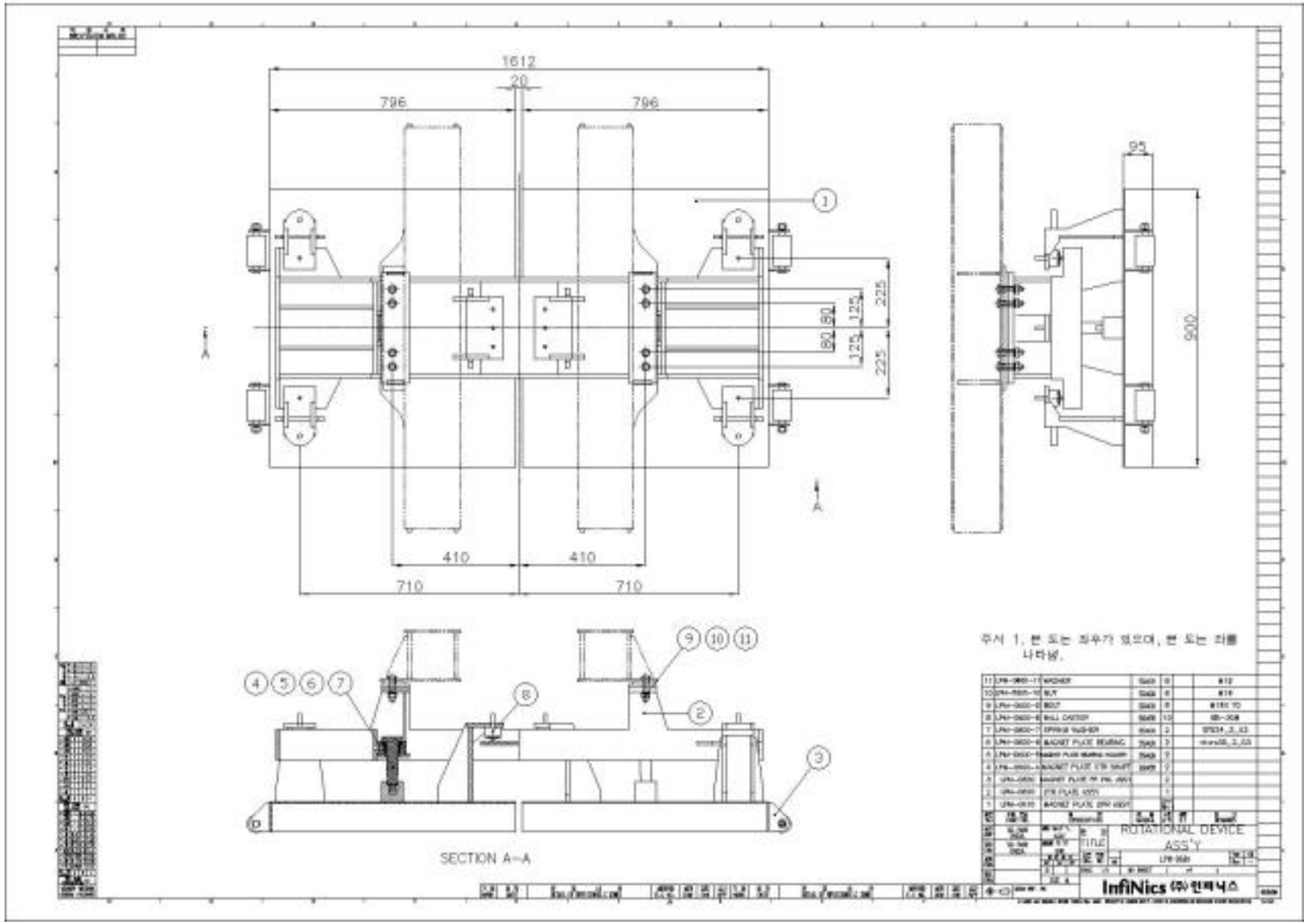
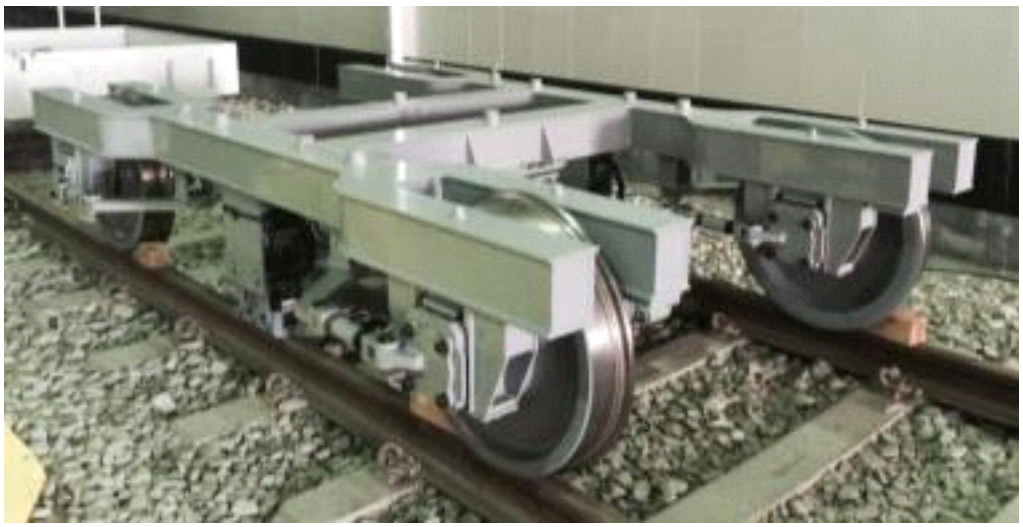


그림 3.3.1.93 실대차 설계 도면 (6/6)

사. 제작 사진

설계 사양 및 설계 도면을 토대로 제작된 실대차는 아래 그림 3.3.1.94(a)와 같다. 또한, 차상 장치가 설치된 실대차 및 지상코일의 모습은 그램 3.3.1.94(b)와 같다.



(a) 제작된 실대차



(b) 차상 장치가 탑재된 실대차 및 지상 코일

그림 3.3.1.94 실대차 및 지상 코일

3.3.2. 실모형 LPM 추진시스템 해석 모델 구축

3.3.2.1. LPM 동작 원리 및 구조

리니어 모터(Linear Motor)는 일반 회전형 모터를 축 방향으로 잘라서 펼쳐놓은 형태이다. 회전 운동을 하는 일반 회전형 모터는 출력 값이 토크(Torque) 형태로 변환되지만 선형 운동을 하는 리니어 모터는 출력 값이 추력(Lateral Force)로 변환된다. 리니어 모터는 선형 유도 전동기(LIM), 선형직류전동기(LDM), 선형동기전동기(LSM)등이 있으며, LIM은 유도기, LDM은 직류기, LSM은 동기기에서 그 구동 원리를 찾을 수 있다. 본 연구의 LPM의 경우는 BLDC 전동기에서 그 구동원리를 찾을 수 있다.

BLDC 전동기는 회전자의 위치 정보를 이용하여 직류 전동기의 정류자와 브러시 기능을 반도체 스위치로 대체한다. BLDC 전동기의 구조는 그림 3.3.2.1과 같다. BLDC 전동기는 회전자 표면에 영구자석을 가지며, 고정자에 전기자 권선을 갖는다.

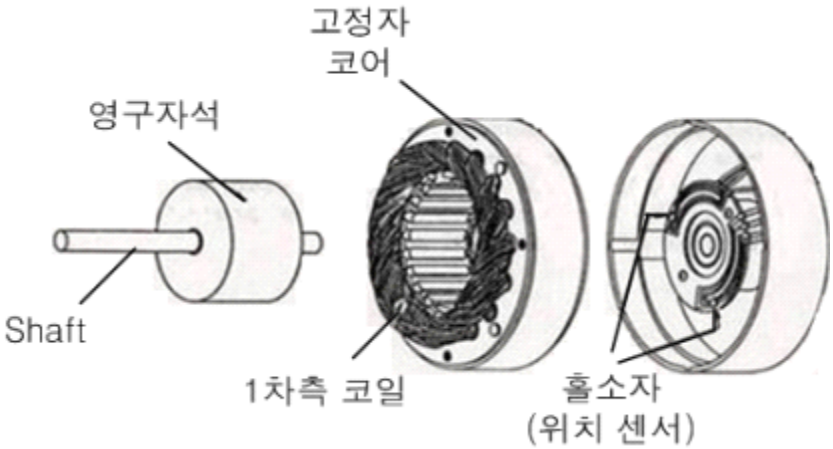


그림 3.3.2.1 BLDC 전동기의 구조

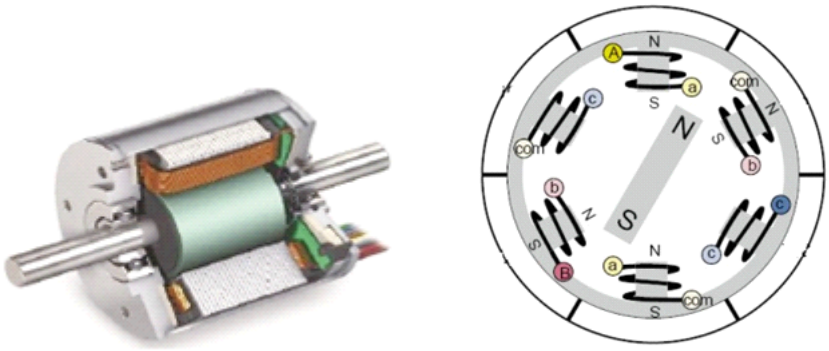
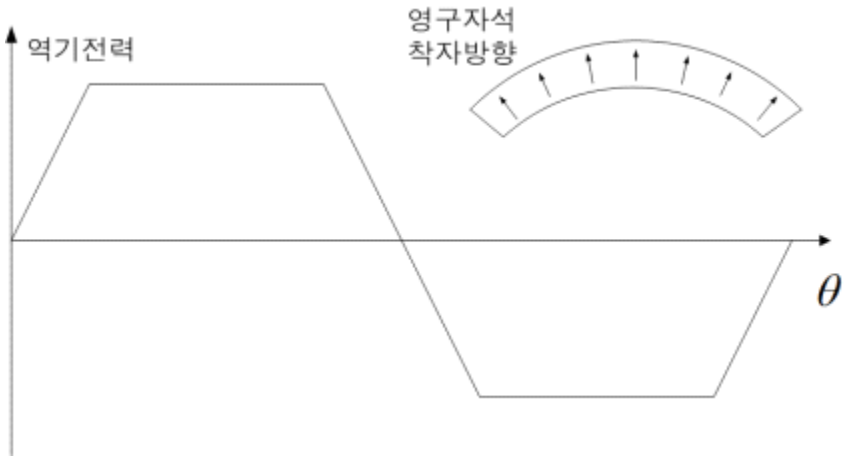
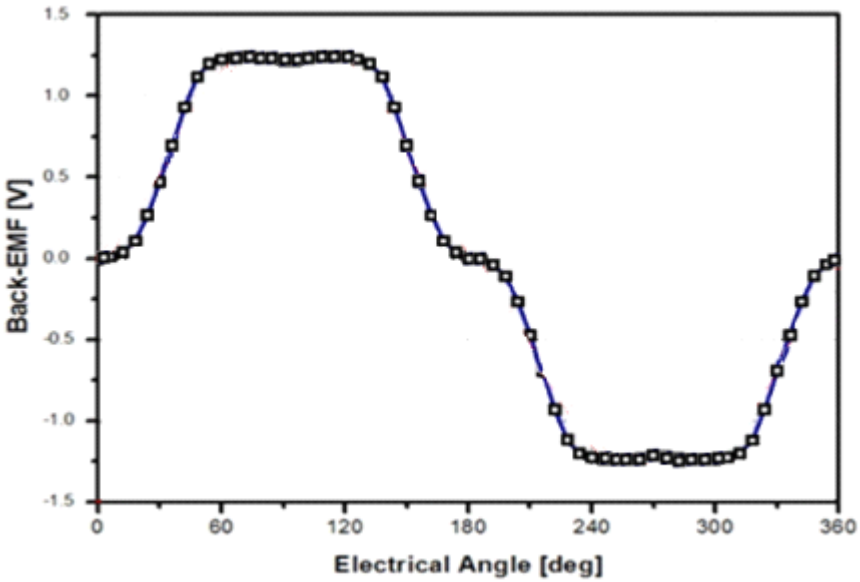


그림 3.3.2.2 BLDC 전동기의 고정자 권선 (집중권)



(a) 영구자석의 착자방향 및 이론적 역기전력 파형



(b) 실제 역기전력 파형

그림 3.3.2.3 BLDC 전동기의 착자방향과 역기전력 파형

BLDC 전동기의 회전자는 그림 3.3.2.3과 같은 방사 방향으로 균일하게 착자되어 BLDC 전동기의 무부하 역기전력은 근사 사다리꼴로 나타난다.

BLDC 전동기에서 정류자와 브러시의 기능을 전력용 반도체 스위칭 소자로 구현하기 위해서는 필수적으로 회전자의 위치를 알아야 하며, 홀 소자(Hall Element)와 같은 자속 검출 센서를 사용하여 회전자에서 발생되는 자속을 검출하여 회전자의 위치를 알아낸다. 홀 소자는 전기각 120° 간격으로 배치되어 있으며 이러한 신호로부터 회전자의 위치를 6개 구간으로 구별한다. 홀 소자 정보를 이용하여 60°마다 스위치의 도통 순서를 바꾸어 권선에 인가되는 전류 방향을 바꿔주면 일정한 방향으로 토크가 발생하여 회전하게 된다.

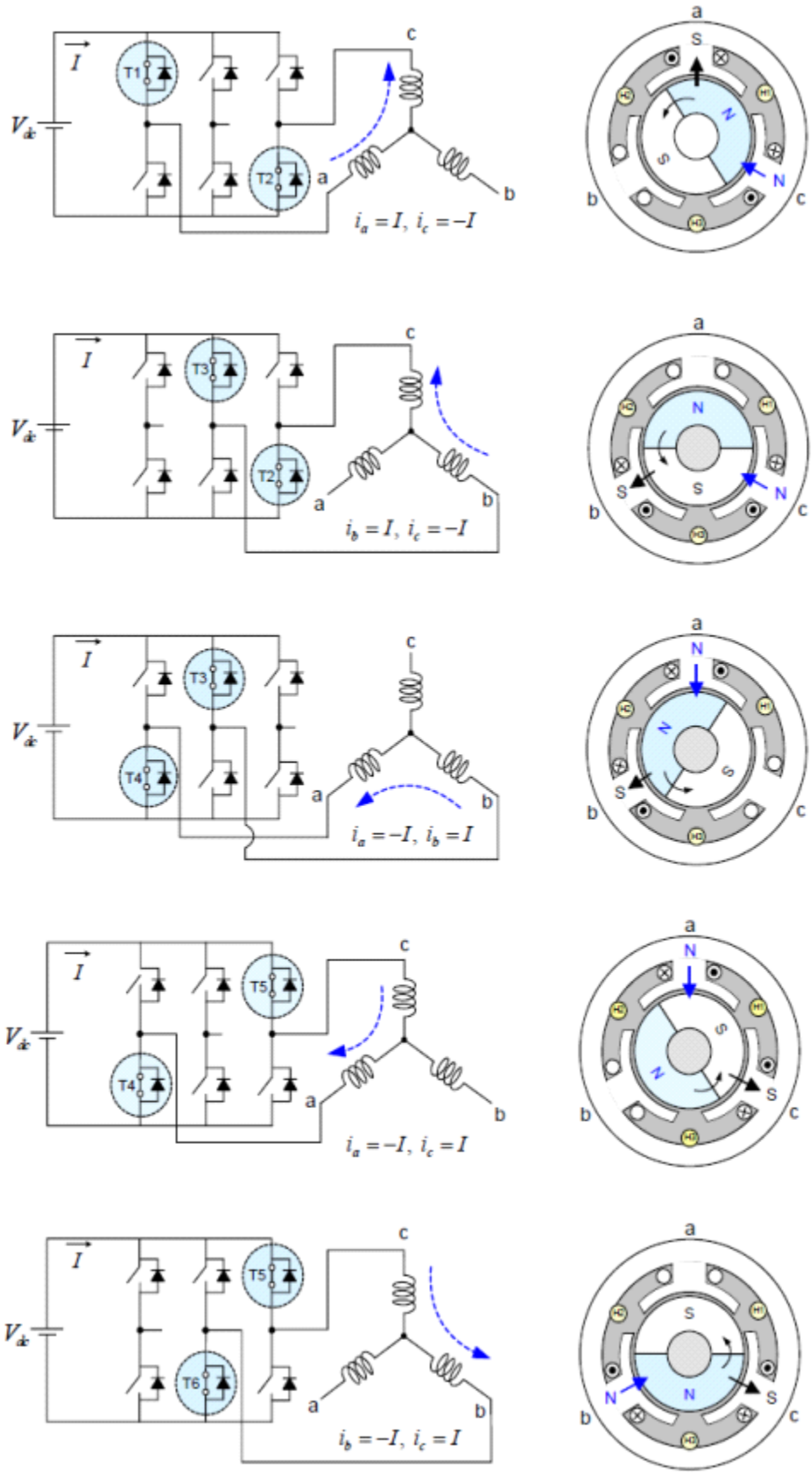


그림 3.3.2.4 3상 2극 BLDC 전동기의 구동 과정

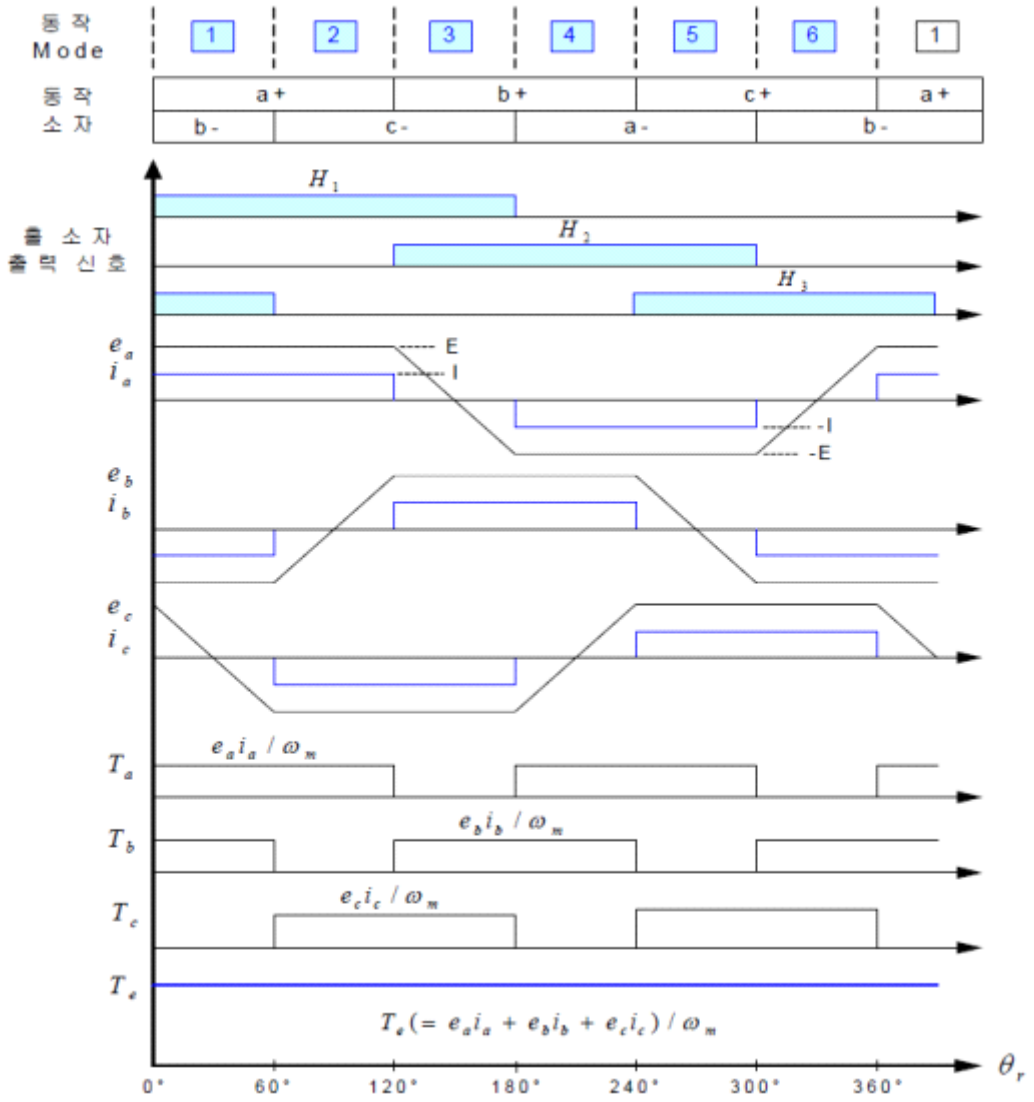


그림 3.3.2.6 3상 2극 BLDC 전동기의 구동 원리

BLDC 전동기의 스위칭 시퀀스(Sequence)는 6개 구간으로 구성되며 역기전력과 홀 소자의 검출 신호 및 이 신호에 따른 각 상의 전류와 토크는 그림 3.3.2.5와 같다. 그림 3.3.2.5에서 나타내는 원리로 고정자에서 극성을 가지게 되고, 회전자 영구자석의 위차와 각각의 동작 모드에 따른 고정자에서의 극성 관계에 따라 회전자에 척력과 인력의 방향이 결정되고 이 방향으로 회전방향이 결정된다. 이러한 원리로 회전자의 위치에 따른 a, b, c 상의 전류 인가 스위칭 시간을 제어해 준다면 동일한 방향의 토크를 발생시킬 수 있다.

3.3.2.2. LPM 설계

가. 자기 등가 회로 및 기초 설계

(1) 자기 등가회로

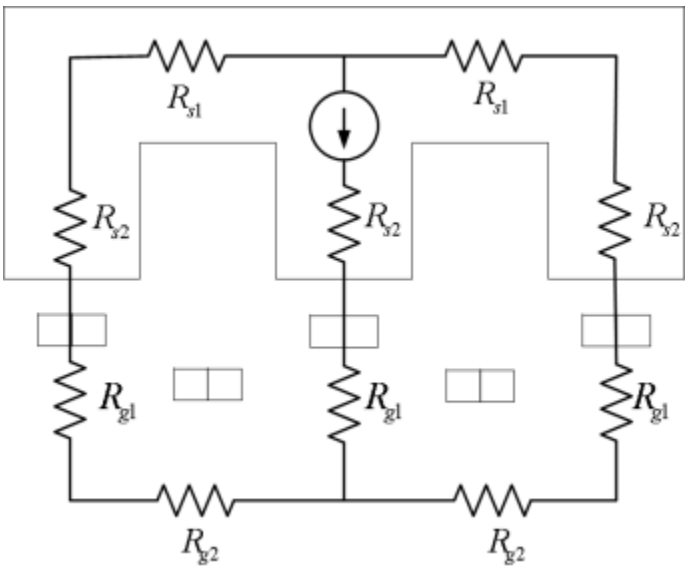


그림 3.3.2.7 철도차량용 LPM 시스템
자기등가회로

그림 3.3.2.7은 철도차량용 LPM 시스템의 자기등가회로를 나타낸다. R자기저항 R_s, R_g 는 고정자, 공극을 포함한 공심형 자로의 자기저항을 나타낸다. 일반적인 자기부상열차는 고정자 또한 철심형 구조를 가지고 있어 고정자 철심의 자기저항도 포함되지만 철도차량용 LPM의 경우 고정자는 공심형 또는 비자성체의 철심형 구조를 가지고 있어 고정자 철심의 자기저항을 따로 표기해 주지 않아도 된다.

자속원의 자속 밀도는 코일의 권선 직사각형의 형태라 가정하였을 경우

$$B_0 = kI/r_1{}^*2 + kI/r_2{}^*2$$

B_0 [T]: 자속원에서의 자속 밀도

r_1 [mm]: 코일 피치거리/2

r_2 [mm]: 적층 길이/2

으로 나타낼 수 있다. 자속원에서 발생하는 자속 밀도와 자기등가회로를 통하여 공극 자속 밀도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B_{gf} = \frac{\frac{(R_{g2}+R_{g1}+R_{s2}+R_{s1})}{2}}{\frac{(R_{g2}+R_{g1}+R_{s2}+R_{s1})}{2}+R_{g1}+R_{s2}} B_0 \quad [\mathrm{T}]$$

자기저항은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$R = \frac{l}{\mu S} \qquad [\Omega]$$

설계치수가 아직 정해지지 않았기 때문에 정확한 수치는 자기저항 값을 구하기 힘들지만 철심과 공심에서의 자기 저항 비는 간단한 가정으로 구해줄 수 있다. 자기저항에서의 단면적 S는 모두 같다고 가정한다. 그러할 경우 다음과 같이 자기 저항값을 구할 수 있다.

$$R_{s1} = \frac{\frac{1}{2} l_{s1}}{\mu_0 \mu_r S} \qquad R_{s2} = \frac{\frac{1}{2} l_{s2}}{\mu_0 \mu_r S}$$

$$R_{g1} = \frac{l_{g1}}{\mu_0 S} \qquad R_{g2} = \frac{l_{g1}}{\mu_0 S}$$

길이에 대한 l_{s1}, l_{s2}, l_{g2} 값들은 아래 전자석 형상 설계에서 구해질 수 있으며 l_{g1}다. 위와 같은 관계가 구해지면 유효 공극 자속이 정해진다.

$$B_{gf} = \frac{\frac{(\frac{1}{2}\frac{l_{s1}}{l_{g1}\mu_r} + \frac{1}{2}\frac{l_{s2}}{l_{g2}\mu_r} + l_{g1} + l_{g2})}{2}}{\frac{(\frac{1}{2}\frac{l_{s1}}{l_{g1}\mu_r} + \frac{1}{2}\frac{l_{s2}}{l_{g2}\mu_r} + l_{g1} + l_{g2})}{2} + l_{g1} + l_{g2}} B_0 \qquad [\mathrm{T}]$$

공극 자속 밀도 B_{gf} 결정 후 계자의 기자력과 공극자속밀도같의 관계를 고려하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N_f I_f = \frac{g'(1 + k_{sat}) B_{gf}}{\mu_0}$$

μ_0 : 진공의 투자율

g' : 유효공극길이 [mm]

$g' = k_{cart} g$

k_{sat}: 포화 계수

N_f : 계자 극당 턴 수 [turn]

I_f : 계자 전류 [A]

유효 공극 길이를 구할 때 사용되는 카터 계수 k_{cart}는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$k_{cart} = \left[1 - \frac{2w_s}{\pi\tau_s}\left\{\arctan\left(\frac{w_s}{2g}\right) - \frac{g}{w_s} ln\left(1 + \frac{1}{4}\left(\frac{w_s}{g}\right)^2\right)\right\}\right]^{-1}$$

계자의 기자력 $F_n(F_n = N_f I_f)$이 정해지면 적층길이 L_{stk}[mm]은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$L_{stk} = \frac{2F_n}{\mu_0 \alpha_p \tau N_{poles}}\left(\frac{g'(1+k_{sat})}{N_f I_f}\right)^2 \qquad [\text{mm}]$$

(2) LPM 전자석 형상 설계

① 이동자 형상 설계

그림 3.3.2.8은 철도차량용 LPM 구조의 기본 형상 및 기초 설계 파라미터들을 나타낸다. LPM의 경우 지상 코일의 극 피치와 이동자의 극피치의 간격을 같게 둔다. 철도차량용 LPM은 2극의 전자석 구조를 가지며, LPM의 극수가 늘어나면 그림과 같은 형상이 극쌍수만큼 반복된다. 본 연구에서는 2극의 전자석 구조를 가진다고 가정하였다.

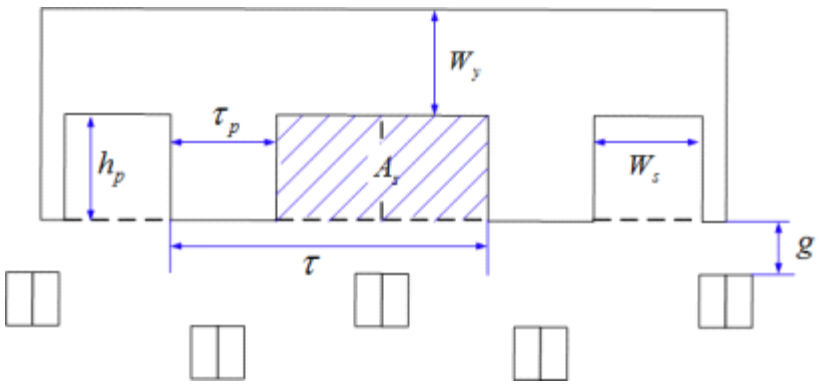


그림 3.3.2.8 LPM 기본 형상 및 치수

공극길이 g가 작을수록 더 적은 전력으로 차량을 부상시킬 수 있으나 점착식 구동 LPM 추진시스템의 경우 지상 권선의 구조 및 실대차의 구조로 인하여 공극 길이의 최소화에 한계를 가진다.

이동자의 계자 기자력이 $N_f I_f$으로 계산되었다면, 부상전자석의 슬롯 면적 A_s

[mm^2]를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$A_s = \frac{2N_f I_f}{k_{sf} J} \quad [\text{mm}^2]$$

여기서 k_{sf}는 부상전자석의 슬롯 점적률을, J는 계자 권선의 전류밀도[A/mm^2]를 각각 의미한다.
부상전자석의 슬롯 폭[W_s]은 다음 식으로 구한다.

$$2W_s = \tau - \tau_p \quad [\text{mm}]$$

부상전자석의 슬롯 높이는 슬롯 면적을 슬롯 폭으로 나눠서 구한다.

$$h_p = \frac{A_s}{2w_s} \quad [\text{mm}]$$

요크 두께 w_y는 극 폭 τ_p의 절반 정도를 취해주면 적당하다.

$$w_y = \frac{1}{2}\tau_p \quad [\text{mm}]$$

② 고정자 형상 설계

철도차량용용 LPM의 고정자 형상 설계는 정격속도 v_b에서 LPM의 무부하 역기전력 E_0를 구하면서 시작된다. E_0는 한 주기 동안의 공극 자속밀도 파형을 모두 계산하여 구하지만, 초기값은 아래 식을 통해 근사적으로 계산한다.

$$E_0 = \pi\sqrt{2}\, N_c k_w \Phi_p f_b \quad [\text{V}]$$

$N_c = Z_c p$로 슬롯당 도체수 Z_c에 극쌍수 p를 곱한 값이고, 권선계수 $k_w = 1$이다. 슬롯당 도체수 Z_c는 최초에는 1로 설정하여 계산하고 차 후 필요에 따라 턴수를 증가시킨다. 또한, 계자의 기자력에 의한 극당 자속 Φ_p[Wb]는 다음 식으로 계산된다.

$$\Phi_p \approx \frac{4\sqrt{3}}{\pi^2} B_F \tau L_{stk}$$

정격 주파수 f_b는 정격 속도 v_b(m/s)를 극피치 τ의 2배로 나누어 구한다. 고정자의 극피치는 이동자의 극피치와 동일하게 설계한다.

$$f_b = \frac{v_b}{2\tau} \quad [\text{Hz}]$$

정격 속도 v_b에서의 무부하 역기전력 E_0를 구했으면, 요구 추력 F_x를 내기위해 필요한 상전류 I_a를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$I_a = \frac{F_x v_b}{2E_0} \quad [\text{A}]$$

나. LPM 구동 원리

(1) LPM 구동 원리



그림 3.3.2.9 철도차량 추진용 LPM 구동 시스템

철도차량 추진용 LPM은 그림 3.3.2.9와 같은 구조를 가진다. 열차 선로와 차체에 모두 권선을 가지고 있으며, 열차 선로에 있는 권선을 지상 전기자 권선(고정자 권선), 차체에 있는 권선을 차상 계자 권선이라 칭한다. 지산 건기자 권선을 철심히 없는 공심형 구조이며, 차상 계자 권선은 철심이 있는 철심형 구조이다. LPM에서 이동자(Mover)와 고정자(Stator) 형상을 치와 슬롯 구조로 이루어져 있다. 이동자의 이동속도는 입력 펄스의 주파수에 비례하여 결정된다. 이동자는 입력 펄스 신호에 동기되어 이동하며, 직선 추력은 이동자의 변위에 따라 이동자와 고정자 사이의 퍼미언스 값이 변화하여 발생하기 때문에, 이동자와 고정자 사이에 일정한 공극을 유지해야 한다. 본 연구과제의 LPM 구동 시스템은 점착형 구동방식을 사용함으로써 일정한 공

극이 유지되어 퍼미언스 값이 변화하지 않는다.

LPM은 자로 구성에 따른 분류로 HB, VR, PM type으로 나눠지며, 각각의 구조는 그림 3.3.2.10, 3.3.2.11, 3.3.2.12, 3.3.2.13과 같다.

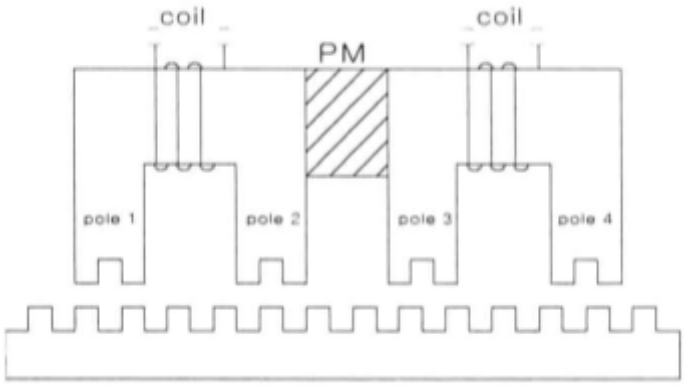


그림 3.3.2.10 HB type single side LPM

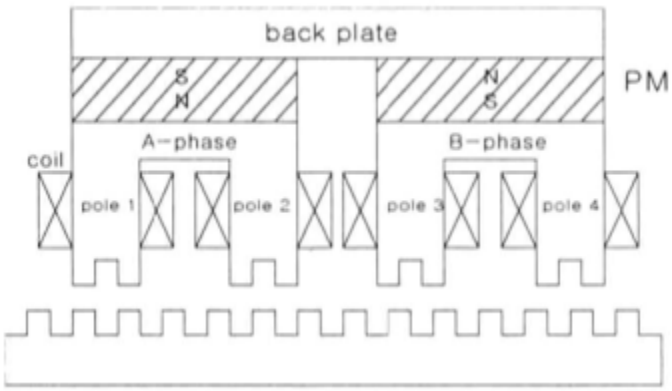


그림 3.3.2.11 HB type single side LPM

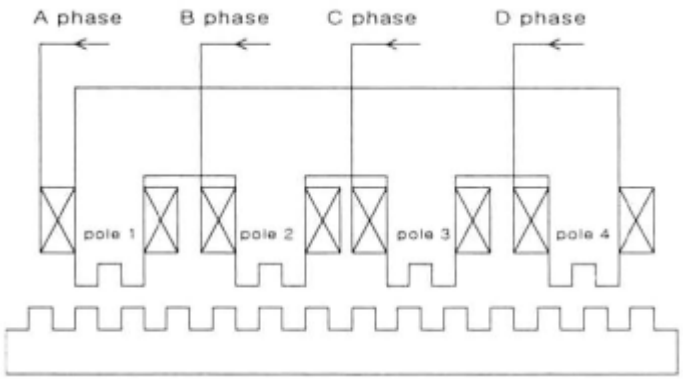


그림 3.3.2.12 VR type single side LPM

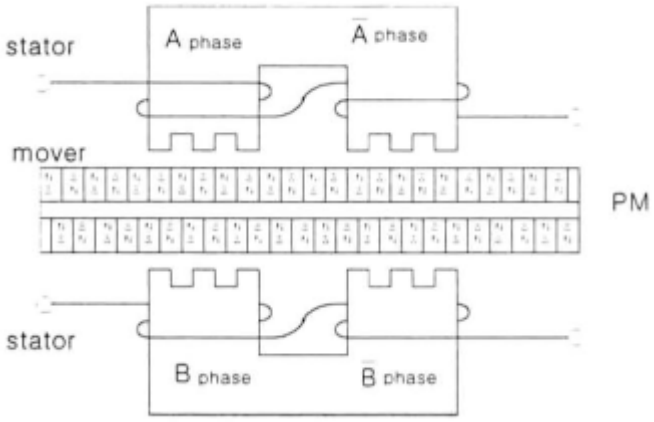
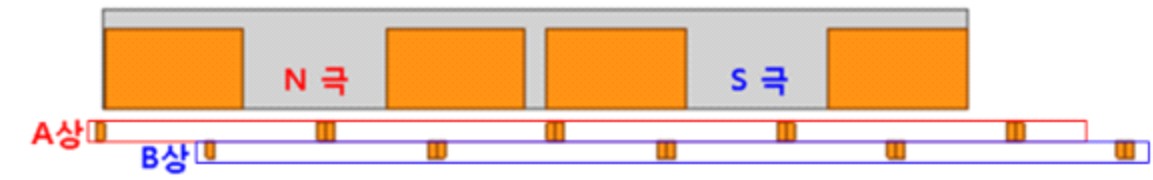


그림 3.3.2.13 PM type double side LPM

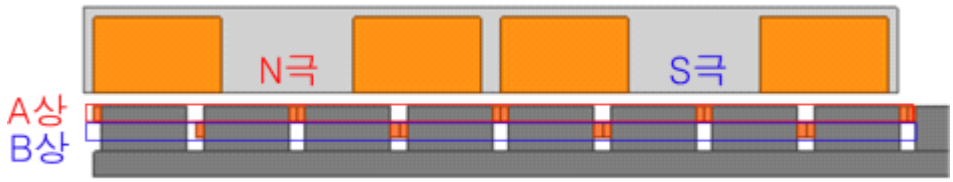
표 3.3.2.1 LPM의 자로 구성에 의한 분류

종류	장점	단점
가변 릴럭턴스형 (VR type)	-구조가 간단함 -관성이 작아 응답성이 좋음 -소음이 적고 고속 운전이 가능함	무여자 시 보자력이 없음
영구자석형 (PM type)	-한계 추력이 영구자석 성능에 비례함 -면적당 추력비가 HB, VR형의 3배임	착자 및 제작 기술이 어려움
하이브리드형 (HB type)	-자속의 1/2을 영구자석이 부담하여 소비 전력이 작음 -교번자계이므로 바이폴라 구동이 가능하며 효율이 좋음	소음, 진동이 있음

다. 2D 유한요소 해석 모델 설계

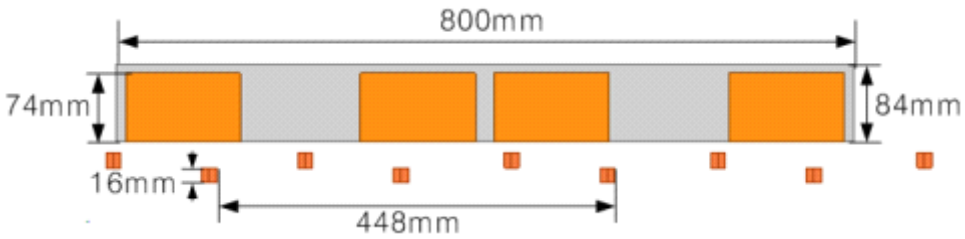


(a) 공심형(Coreless type) 모델

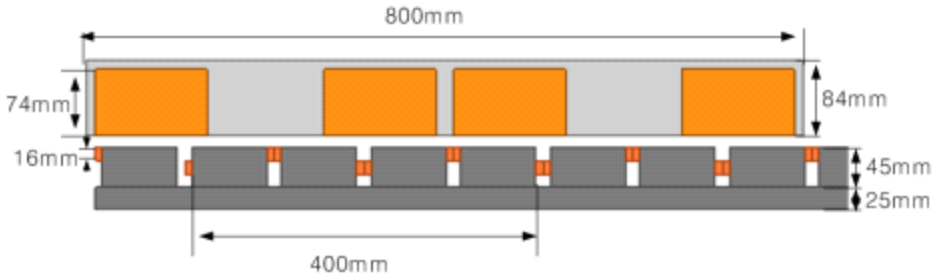


(b) 철심형(Core type) 모델

그림 3.3.2.14 2D 유한요소 해석 모델



(a) 공심형(Coreless type) 모델



(b) 철심형(Core type) 모델

그림 3.3.2.15 2D 유한요소 해석 모델 설계 파라미터

그림 3.3.2.14는 2D 유한요소 해석 모델을 나타내며 그림 3.3.2.15는 2D 유한요소 해석 모델 설계 파라미터를 나타낸다. 유한요소 해석은 해석 및 시험결과의 비교를 위하여 공심형(Coreless type) 모델과 철심형(Core type) 모델에 대하여 해석을 하였다. 설계 파라미터는 설계 도면을 바탕으로 하였다. 실제 실차 모델의 경우 8극의 구조를 가지나, 4개의 반복되는 구조가 전,후,좌,우의 대칭 구조를 가지므로 1/4 모델로 설계하였다.

유한요소 모델의 설계 파라미터는 앞 절에서의 설계 도면 및 치수를 바탕으로 설계하였다. 지상 권선의 경우 유한요소 특성의 정확도를 위하여 사각형 형태로 표현하였으며, 2층 구조를 감안하여 1:2 구조를 가지는 직사각형의 형태로 해석 모델을 설계하였다.설계 도면에서의 이동자 및 지상 코일은 철심형 구조를 가지나, 지상 코일의 철심은 비자성체이므로 유한요소 모델에서는 공심형으로 나타내었다. 이동자의 권선 방향은 그림 3.3.2.14의 그림과 같이 극성을 나타내도록 권선방향을 가지며 고정자의 권선 방향은 그림 3.3.2.16과 같다.

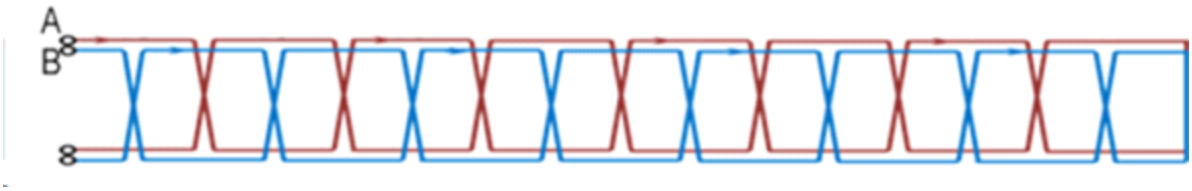


그림 3.3.2.16 2D 유한요소 해석모델 지상 권선 권선 방향

이동자 권선에는 직류 전류가 흐르며 고정자 권선의 전류는 앞 절에서 설명하였듯이 운전 모드에 따라 그림 3.3.2.17과 같다.

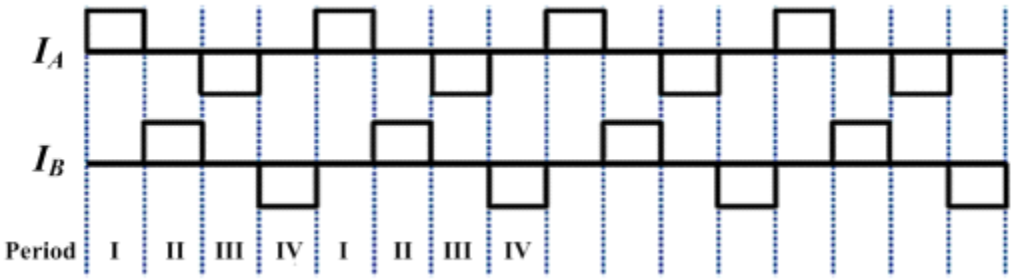


그림 3.3.2.17 운전 모드에 따른 고정자 권선 전류 파형

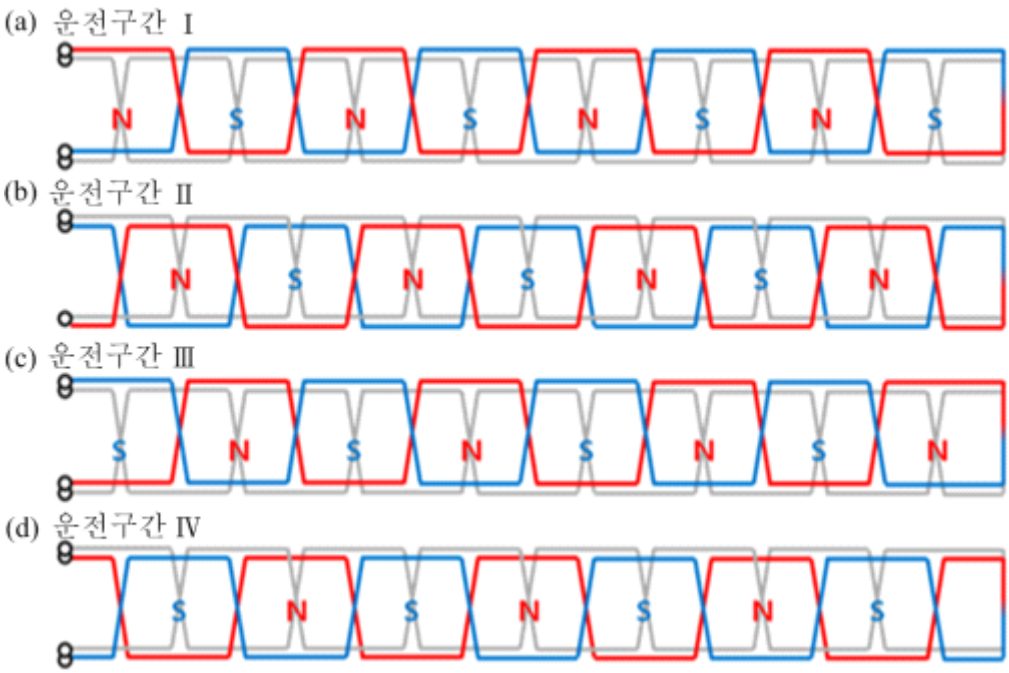
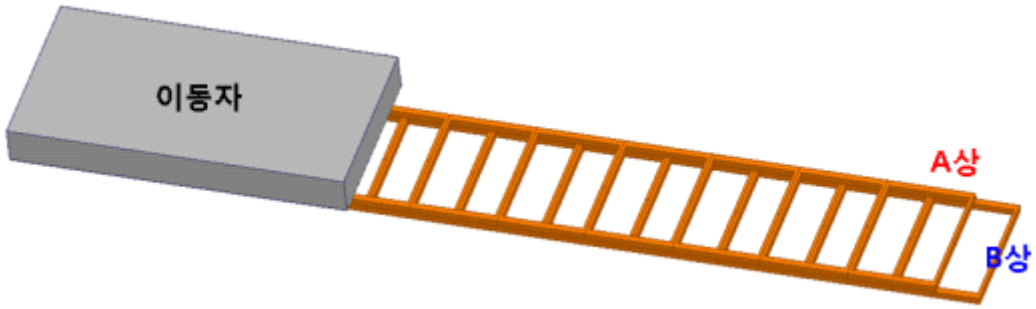
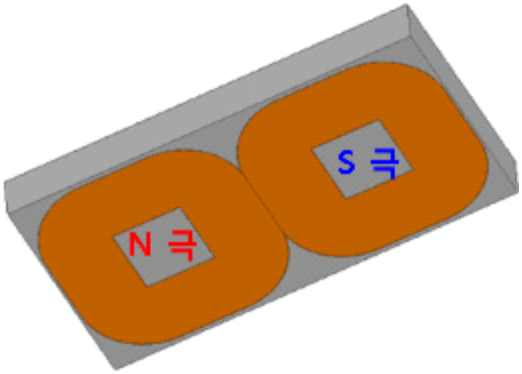


그림 3.3.2.18 A,B상 전류에 따른 지상 권선 극성 변화

라. 3D 유한요소 해석 모델 설계



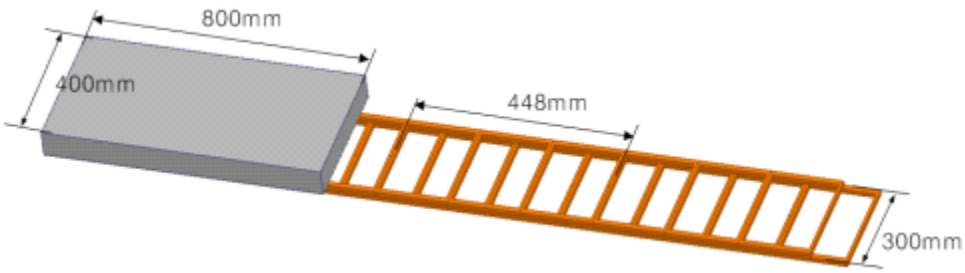
(a) 3D 유한요소 해석 모델



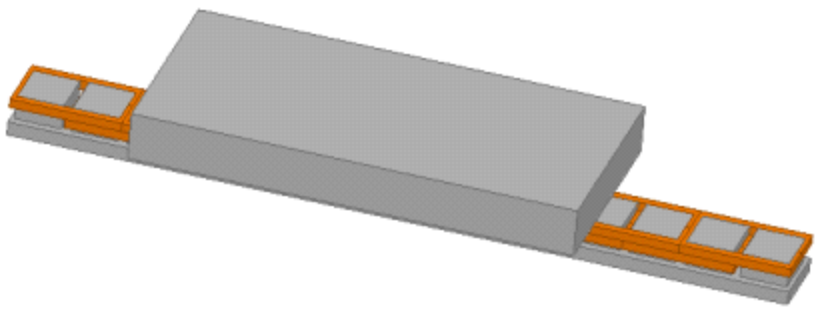


(b) 3D 유한요소 해석 모델 이동자 (c) 3D 유한요소 해석 모델 이동자 권선

그림 3.3.2.19 3D 유한요소 해석 모델 설계



(a) 공심형(Coreless type) 모델



(b) 철심형(Core type) 모델

그림 3.3.2.20 3D 유한요소 해석모델 3D 유한요소 해석모델

그림 3.3.2.19는 3D 유한요소 해석 모델을 나타내며., 그림 3.3.2.20은 3D 유한요소 해석모델 설계 파라미터를 나타낸다. 설계 치수 및 이동자, 지상 권선의 권선 방향은 2D 모델과 같다. 또한, 2D 모델과 마찬가지로 지상 권선의 해석모델은 해석결과 및 시험결과와의 비교를 위하여 공심형 및 철심형의 두가지 모델을 각각 사용하였다.

마. 펄스파 입력을 위한 외부회로

LPM 축소 모델의 전자계 해석을 위해서는 고정자 권선에 인가되는 2상 펄스 전류 파형을 시뮬레이션 상에서 구현해야 한다. 그림 3.3.2.21은 2상 펄스 전류 파형을 시생성하기 위한 전력변환 회로를 나타낸다. 전력변환 회로는 3상 BLDC 전동기의 회로를 기반으로 하였다. Pulse Voltage Source 회로에서 메인 회로의 스위치 제어 신호를 생성하며, 펄스 전류의 펄스폭과 주파수 등을 제어한다. 펄스 전류의 펄스폭과 주파수는 그림 3.3.2.22에 나타낸 파라미터 값을 조정하여 제어할 수 있다.

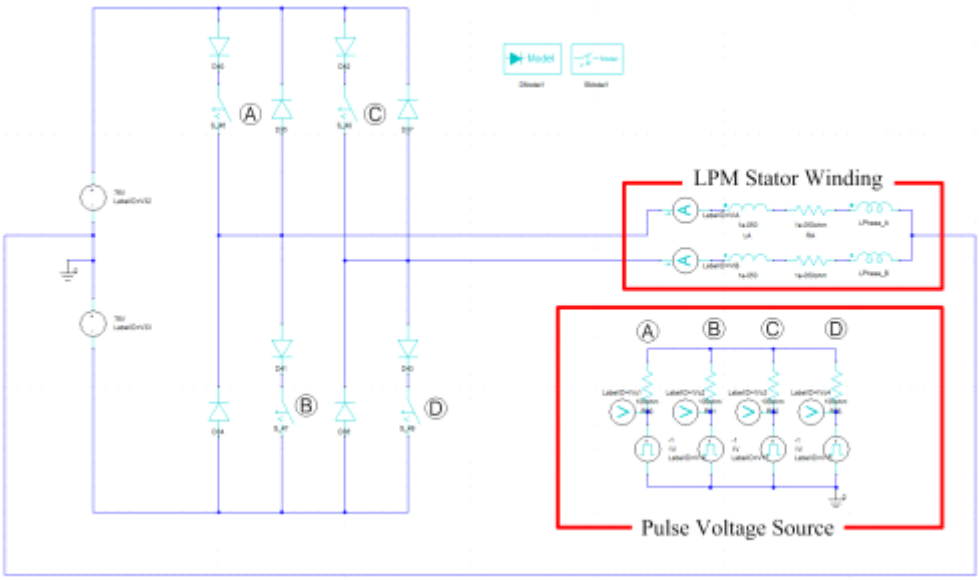


그림 3.3.2.21 2상 펄스 전류 생성을 위한 전력변환 회로

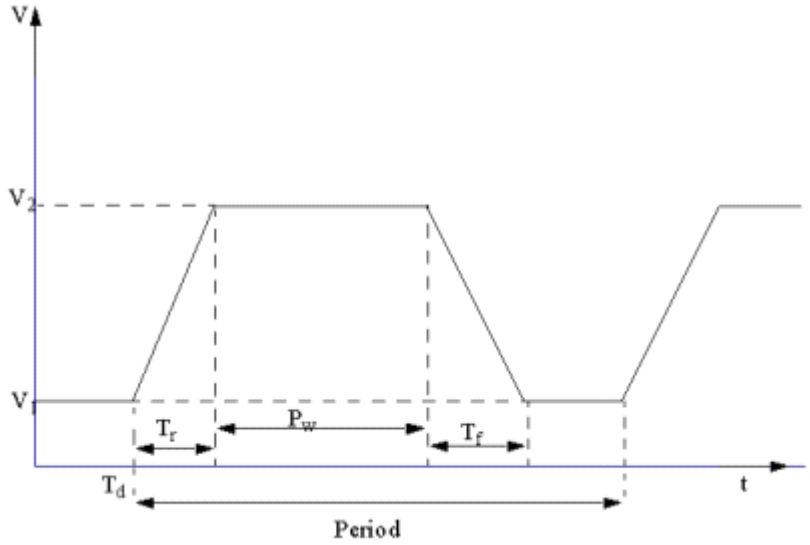


그림 3.3.2.22 펄스파 형태 결정 요소

V_1 : Initial voltage in Volts

V_2 : Peak Voltage in Volts

T_d : Initial delay time

T_r : Rise time

T_f : Fall time

P_w : Pulse width

Period : Pulse period

차량 속도 v[m/s]가 주어지면 펄스파의 주기 Period는 다음의 식을 통하여 계산할 수 있다 여기서 τ는 극 간격[m]을 의미한다.

$$\text{Period} = \frac{2\tau}{v} \text{ [sec]}$$

T_d와 P_w값은 통전 방식에 의해 결정되며, T_r와 T_f으로 설정하여 전자계 해석을 수행하였다.

3.3.2.3. 최종 연구성과 및 적용실적

가. 2상 펄스 파 입력을 위한 외부회로 연동 및 입력 전류

각각의 모델에 맞는 펄스파의 제어 정수를 입력하기 위해서는 지상코일의 극 피치 및 이동속도가 필요하다. 앞 절에서와 같이 T_r,T_f는 0으로 입력을 하며 따로 제어를 해주어야 하는 값은 T_d, P_w, Period 값이 해당된다.

표 3.3.2.2 스위치 타이밍의 파라미터 값

	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ
period [s]	0.896	0.896	0.896	0.896
Td [s]	0	0.448	0.224	0.672
Tr [s]	0	0	0	0
Pw [s]	0.224	0.224	0.224	0.224
Tf [s]	0	0	0	0

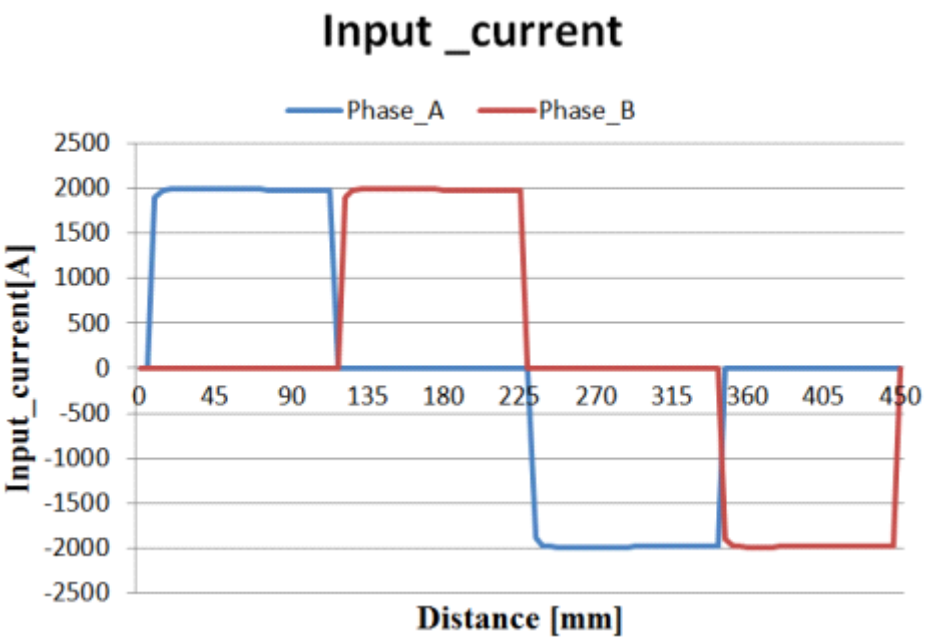
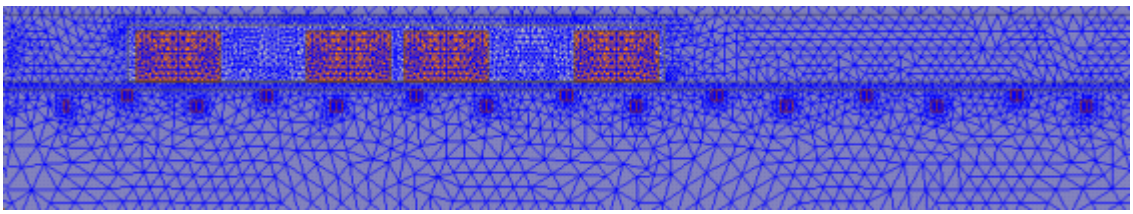


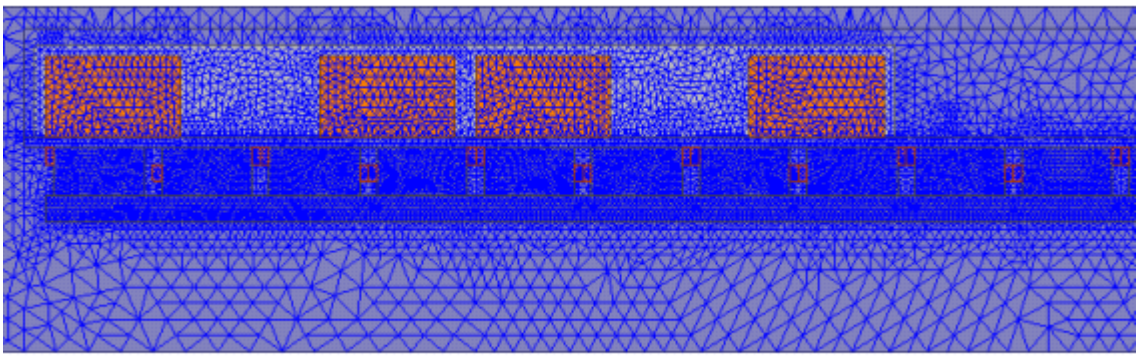
그림 3.3.2.23 외부회로를 통한 2상 펄스파

나. 2D 유한요소 해석모델 해석 결과

그림 3.3.2.24는 2D 유한요소 해석모델의 요소 분할도를 나타낸다. 유한요소의 개수는 공심형에서는 11758개, 철심형에서는 39553개이며 자속 밀도가 높은 이동자의 철심과 LPM의 성능에 큰 영향을 미치는 비퍼미언스값을 결정하는 공극부위는 유한요소의 밀도를 높였으며 성능에 큰 영향을 미치지 않는 부분은 유한요소의 밀도를 낮추어 해석의 효율성을 높였다.



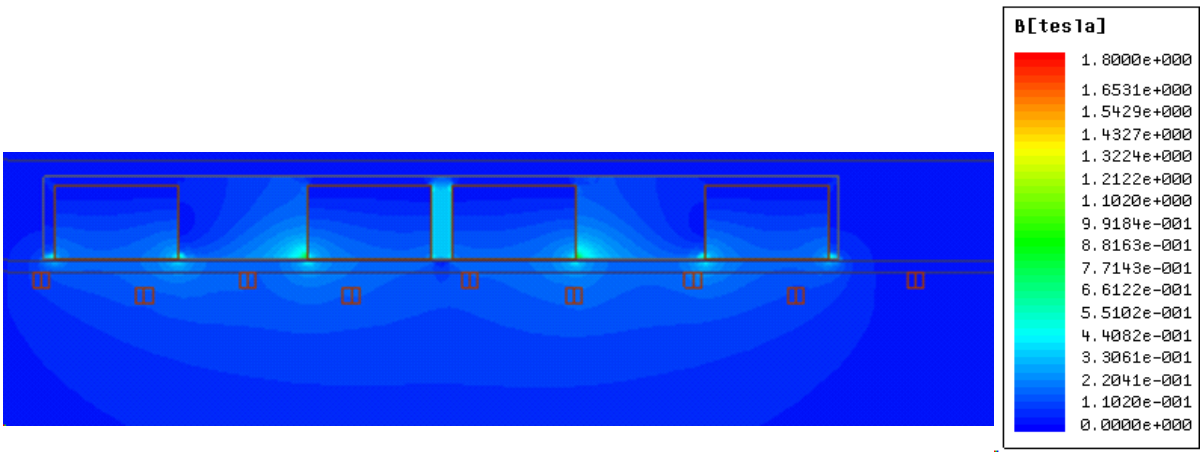
(a) 공심형 지상코일과의 해석모델



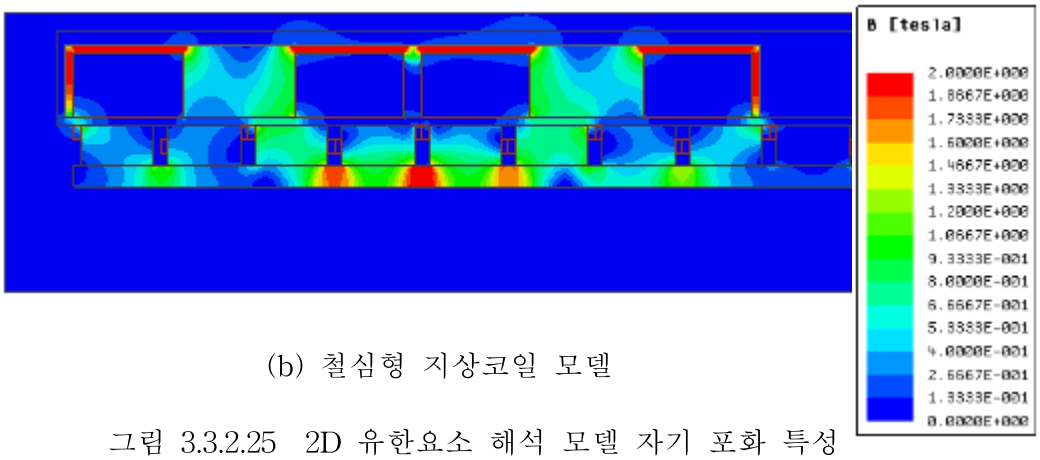
(b) 철심형 지상코일과의 해석모델

그림 3.3.2.24 2D 유한요소 해석모델 요소 분할도

또한 철심형 구조를 가지는 이동자 및 지상 권선의 경우 공심형일 경우 보다 철심의 높은 열전도율에 열포화로 인하여 자기 포화에 취약한 특성을 가진다. 그러므로 이동자 권선에 200A를 인가하였다고 가정하여 자기 포화 특성을 해석해 보았다. 자기 포화 특성 해석 결과는 그림 3.3.2.25와 같다.

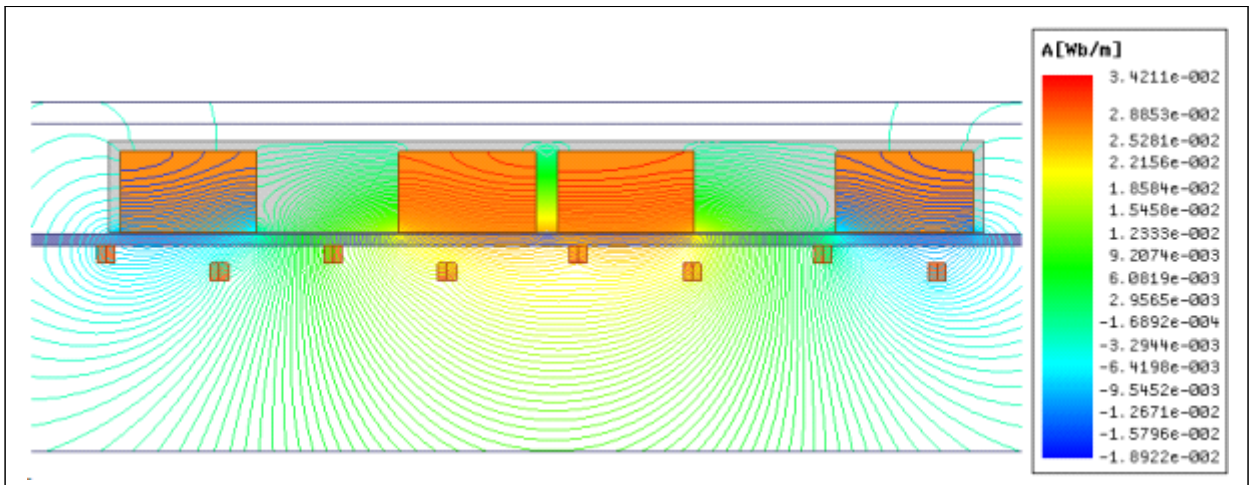


(a) 공심형 지상코일 모델

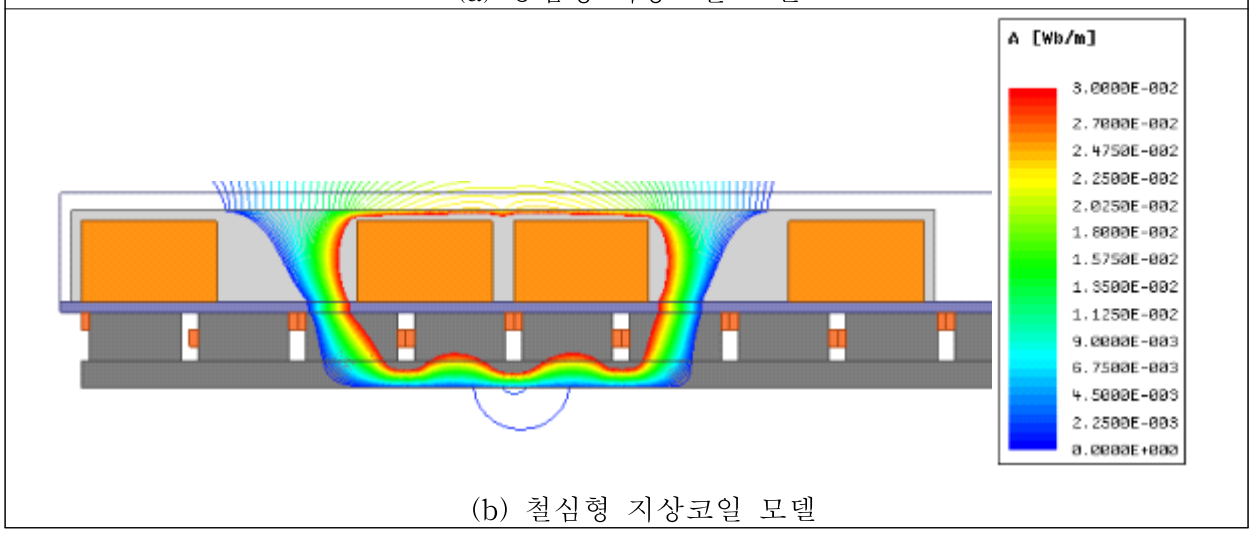


(b) 철심형 지상코일 모델

그림 3.3.2.25 2D 유한요소 해석 모델 자기 포화 특성



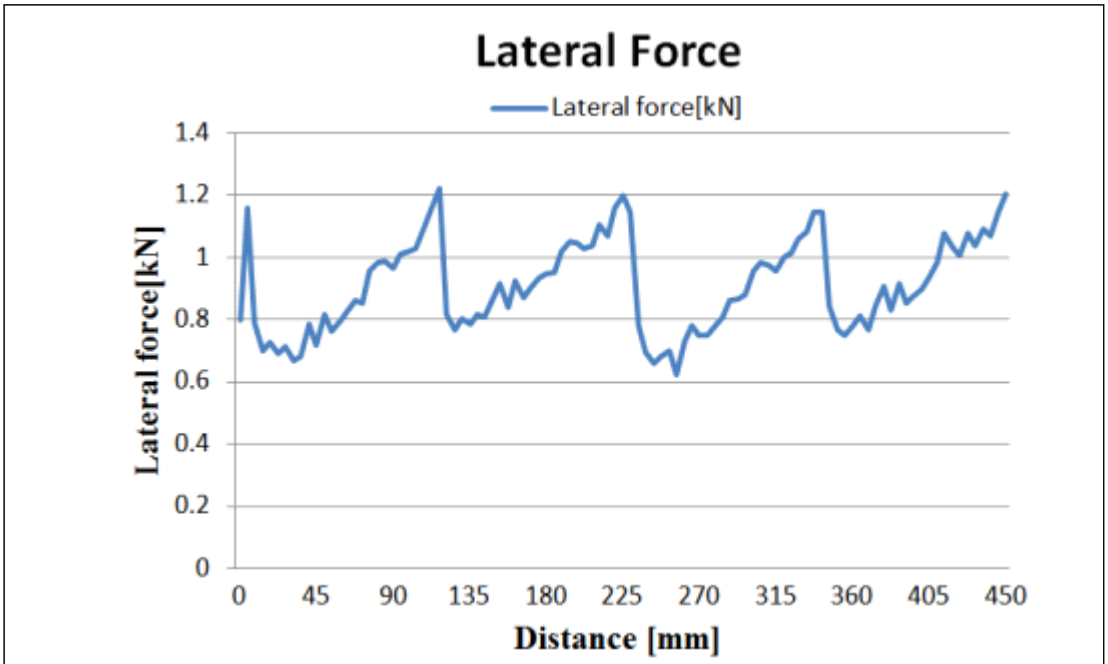
(a) 공심형 지상코일 모델



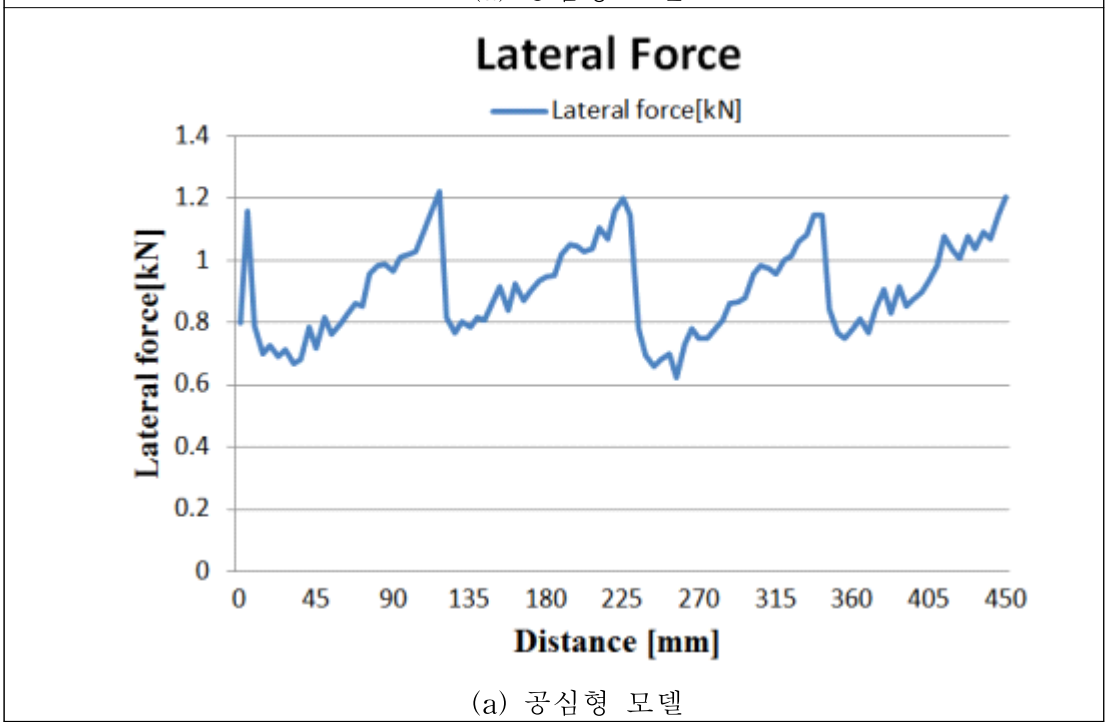
(b) 철심형 지상코일 모델

그림 3.3.2.26 2D 유한요소 해석 모델 자속 선도

그림 3.3.2.26은 2D 유한요소 해석 모델 자속 선도 특성을 나타낸다. 그림 3.3.2.25에서 나타내듯이 철심형 구조를 가지는 지상 코일 상단부는 대부분의 자속이 철심을 통과하는 반면 공심형 구조를 가지는 지상 코일 하단부는 일반적인 공기중의 자속 분포를 가진다. 이때 철심형 구조를 가지는 경우 자속 포화가 일어나게 되어 자성체의 역할 하지 못하게 되며, 효율이 감소하여 추력 감소가 일어나게 된다.

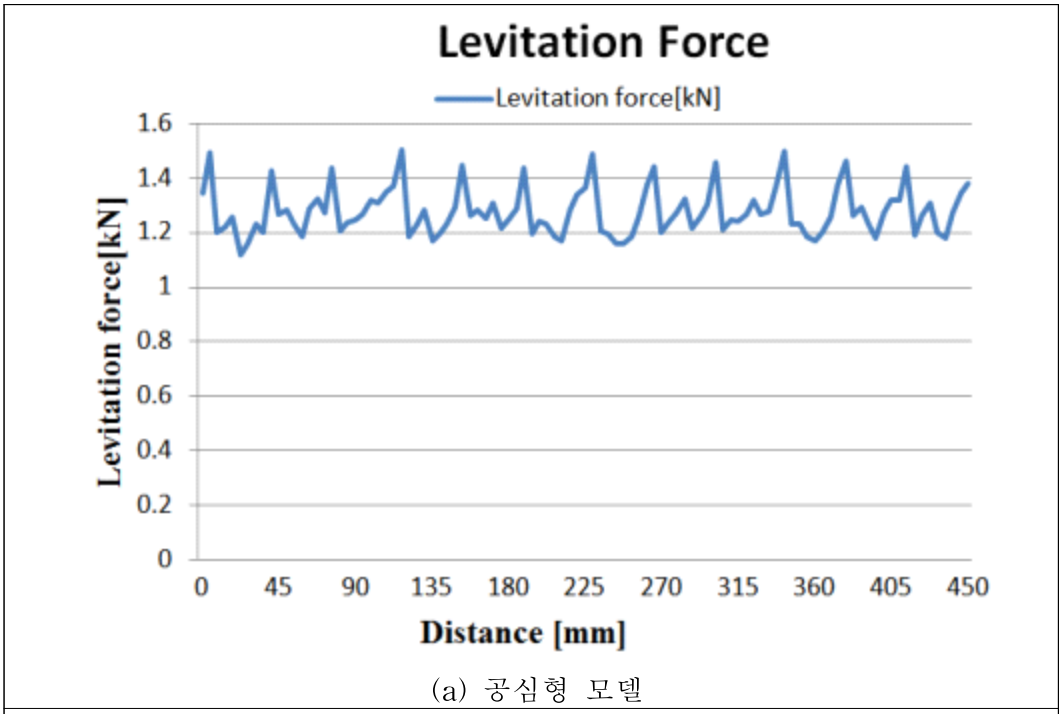


(a) 공심형 모델

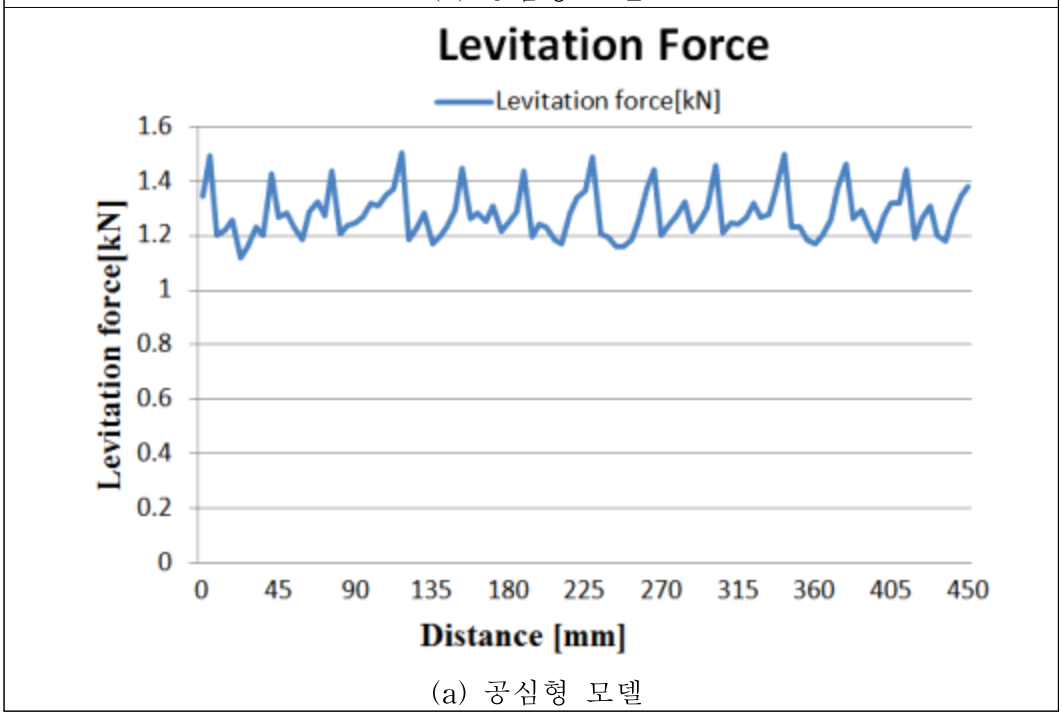


(a) 공심형 모델

그림 3.3.2.27 2D 모델의 추력 특성



(a) 공심형 모델



(a) 공심형 모델

그림 3.3.2.28 2D 모델의 부상력 특성

그림 3.3.2.27은 2D 유한요소 해석 모델의 추력 특성을 나타내며 그림 3.3.2.28은 2D 유한요소 해석 모델의 부상력 특성을 타나낸다. 표 3.3.2.3은 2D 모델의 추력 및 부상력 특성을 나타낸다. 추력의 경우 공심형은 평균 907.6N을 가지며 철심형은 평균 981.38 N을 가진다. 유한요소 모델은 1/4모델이며 전체 모델을 가정하였을 경우 공심형과 철심형 각각 3730.4N 및 3925.5N을 가진다.

표 3.3.2.3 2D 모델의 추력특성

	1/4해석모델	평균	단위
공심형 모델	907.6	3730.4	N
철심형 모델	981.38	3925.5	N

요구 추력 평균값은 5kN으로 가정되었으나, 이는 부상력이 존재하지 않는다는 가정하에 있었으며, 부상력이 존재함에 따라 주행 저항 및 기동 저항값이 줄어들게 되어 리플률이 많아 공심형 및 철심형 모두 충분한 요구성능을 만족할 것으로 보인다.

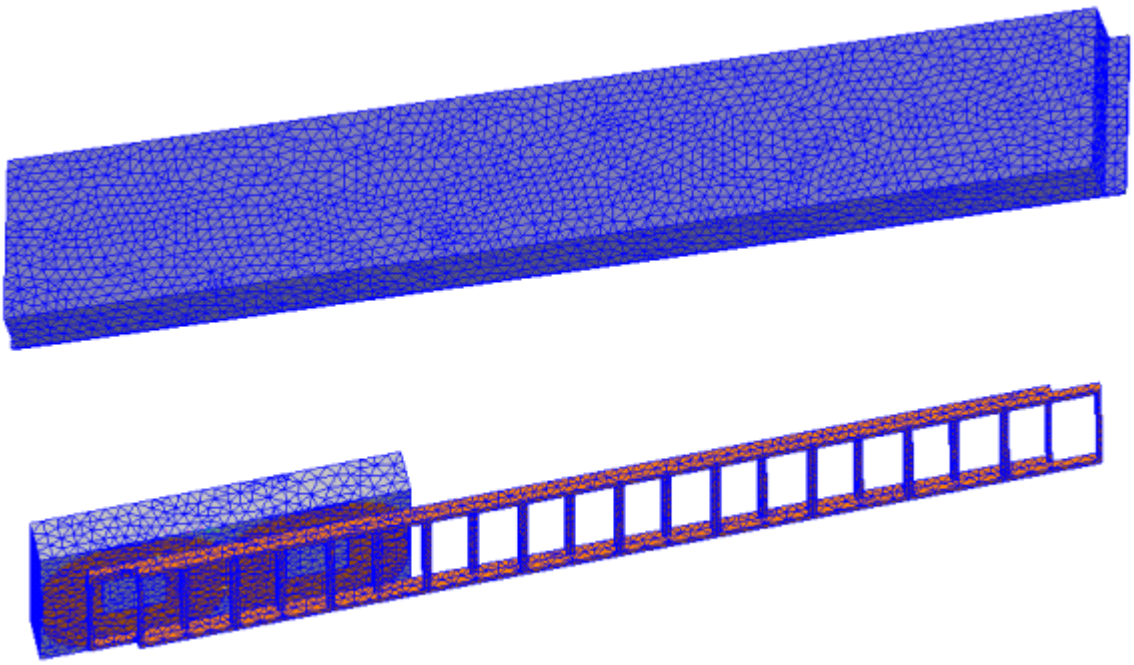
LPM의 입력 전류는 정현파 구현시보다 제어가 힘든 단점을 가지지만, 전력 변환기에서 정현파 전류를 만들기 위해서는 마이크로 스텝 구동 방식을 적용해야 하며, 1주기 동안 10회 이상의 스위칭이 필요하다. 또한 철도차량 추진을 위한 대전력의 LPM 구동 시에는 스위칭 소자의 용량이 커야하며, 이러한 대용량의 스위칭 소자는 스위칭 소자는 스위칭 주파수가 1~3kHz 정도로 느린 편이며 스위칭 손실도 매우 크다. 따라서 차량이 고속으로 주행할 경우에는 스위칭 속도를 따라가지 못하는 경우가 발생할 수 있으며 많은 스위칭 손실이 발생한다.

LPM 고정자 권선에 펄스파 전류를 인가하는 경우에는 평균 추력이 정현파 전류 인가시보다 다소 감소하고 리플이 커지는 단점이 있다. 그러나 전력 변환기의 스위칭 소자는 1주기 동안 1회의 ON-OFF만 필요로 한다. 따라서 스위칭 손실이 매우 적고 차량의 고속 주행이 가능하다는 장점이 있다.

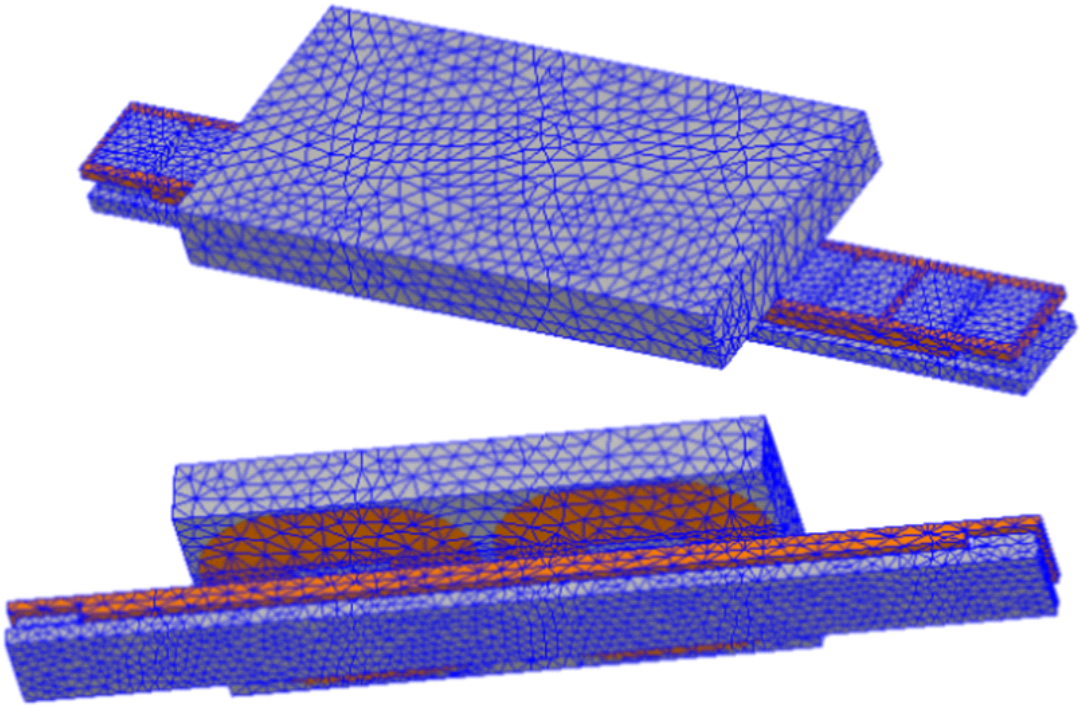
철도차량은 관성이 크기 때문에 LPM의 추력 리플은 승차감에 큰 영향을 주지 않는다 따라서 철도차량 추진용 LPM 구동 방식은 시스템 전체의 효율을 고려하여 선택해야 할 것이다. 특히 전력변환기의 스위칭 손실이 시스템 전체 효율에 큰 영향을 미칠 경우에는 마이크로 스텝 구동방식보다는 단일 펄스 구동 방식을 채택해야 할 것이다.

다. 3D 유한요소 해석모델 해석 결과

그림 3.3.2.29는 3D 유한요소 해석모델의 요소 분할도를 나타낸다. 3D 유한요소 모델에서 유한요소 개수는 공심형 지상코일의 경우 165,892개이며 철심형 지상코일의 경우 그 절반 정도인 75,324개로 분할하였다. 유한요소의 분포 밀도는 2D와 거의 동일하게 두었으며 지상권선 하단부의 경우 상단부보다 높은 분포밀도를 가진다. 유한요소법을 통한 특성해석을 하였을 때, 계자의 자로를 포함하는 지상 권선을 하단부의 유한요소 분포가 중요하기 때문이다. 하지만, 2D 모델의 경우 지상 권선 하단부의 분포밀도와 상단부의 분포 밀도와 동일하여도 성능에 큰 차이를 두지 않으나 3D 모델의 경우 2D 보다 지상 권선의 상단부의 분포밀도가 매우 낮아 정확도에 큰 영향을 미치기 때문이다.

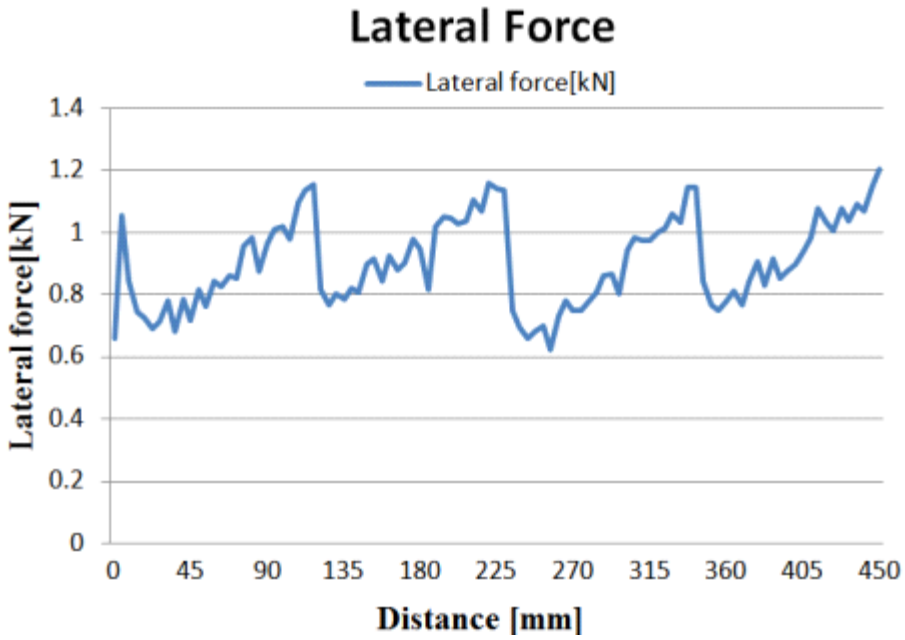


(a) 공심형 지상코일 모델

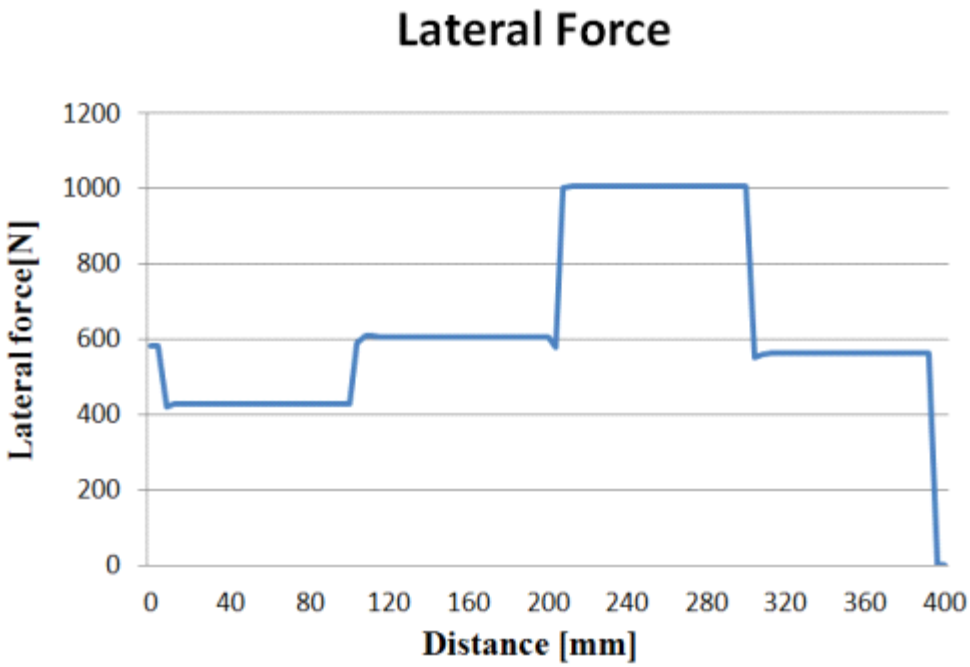


(b) 철심형 지상코일 모델

그림 3.3.2.29 3D 유한요소 해석모델 요소 분할도



(a) 공심형 지상코일 모델



(b) 철심형 지상코일 모델

그림 3.3.2.30 3D 유한요소 해석 모델 추력 특성

표 3.3.2.3 3D 유한요소 해석 모델 추력 및 부상력 특성

	평균	단위
공심형 지상코일 모델	903.5	N
철심형 지상코일 모델	1007.7	N

라. 유한요소 해석 모델 신뢰성 검증

본 연구에서 자기등가회로를 통한 기초설계 값과 유한요소 해석 결과를 통하여 신뢰도 검증을 실행한다. 자기등가회로를 통한 기초 설계에서 무부하 역기전력은 한 주기 동안의 공극 자속밀도 파형을 모두 계산하여 구하지만, 초기값은 근사적으로 계산한다. 본 연구에서의 실차 모델은 본 연구에서의 자기등가회로를 통한 기초설계가 이루어지지 않았기 때문에 몇가지 가정을 통해서 신뢰성을 검증하도록 한다. 공극 자속밀도 B_{gf} 1.2T로 가정하며 기존의 설계모델의 파라미터(τ 400mm, L_{stk} 450mm, N_c 200turn, k_w 1)를 사용하여 추력을 구해낸다. 자기등가회로를 통한 추력은 다음의 식으로 구해질 수 있다.

$$
\begin{aligned}
F_x &= \frac{2E_0 I_a}{v_b} \\
&= \frac{\pi\sqrt{2}\,N_c k_w \phi_p f_b I_a}{v_b} \\
&= \frac{4\sqrt{3}\,\sqrt{2}\,N_c k_w B_{gf} \tau L_{stk} f_b I_a}{\pi v_b} \\
&= \frac{4\sqrt{3}\,\sqrt{2}\,N_c k_w B_{gf} L_{stk} I_a}{2\pi}
\end{aligned}
$$

위의 수식을 통해서 본 연구 실차 모델의 추력 F_x는 1117.7N의 이론값을 가지게 된다. 해석값 2D 유한요소 모델 981.38N과 3D 유한요소 모델 1007.7N의 추력과 12.19%, 9.84%의 오차율을 가진다. 2D 모델의 경우 기존의 오차율 목표치 10%에는 미치지 못하지만 이는 앞선 설계 파라미터에 맞추는 과정에서 생기는 추가적인 오차율이라 생각되며, 최적화 설계과정을 거친다면 오차율의 감소는 목표치에 도달할 것으로 보인다.

표 3.3.2.4 자기등가회로를 통한 기초 설계 및 유한요소 해석 결과 비교

	자기등가회로 기초설계	2D 유한요소모델	3D 유한요소 모델
추력	1117.7 N	981.38 N	1007.7 N
오차율	-	12.19 %	9.84 %

마. 실차 모델 특성 해석 실험

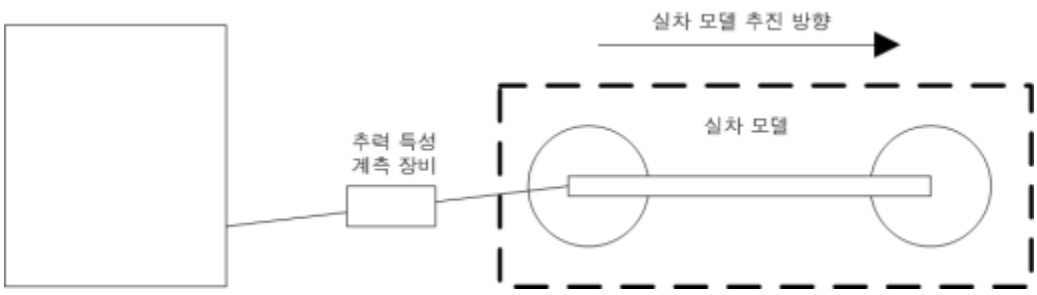
그림 3.3.2.32는 추력 특성 계측 장비로서 그림 3.3.2.33의 그림과 같이 실험이 이루어진다.



그림 3.3.2.32 추력 특성 계측 장비



(a) 추력특성 계측 실험 장비



(b) 추력특성 계측 실험 모식도

그림 3.3.2.33 추력 특성 계측 실험

그림 3.3.2.33에서 나타낸 것과 같이 대형 크레인을 실차모델 후방과 연결하여 끌어당기는 힘을 측정한다. 실차 모델과 대형 크레인 연결 부위에 끈을 연결하고 중앙에 계측 장비를 설치하여 실차 모델이 추진을 할 경우 이에 따른 힘을 측정을 한다. 그러나. 실차모델의 연결 부위와 대형 크레인의 연결 부위의 높이가 달라 계측되는 힘은 추력과 부상력으로 분산된다.

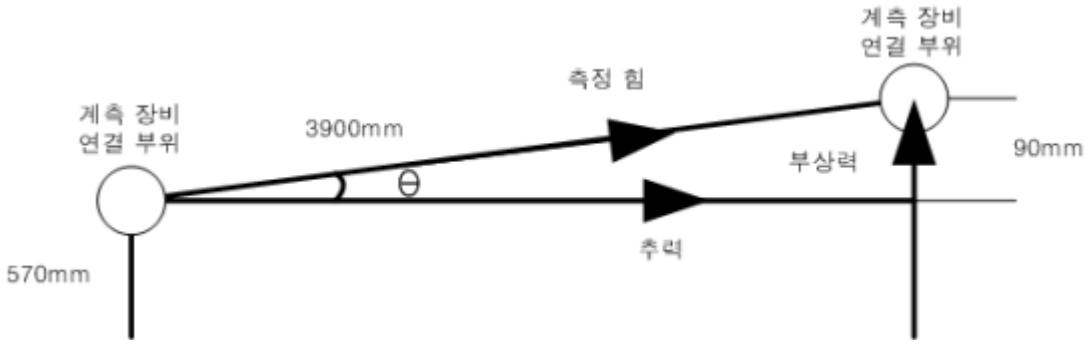


그림 3.3.2.34 추력 특성 실험 계측 값 분산도

그림 3.3.2.34는 추력 특성 실험에서 계측되는 힘의 분산도를 나타낸다. 측정 힘 F, 추력 F_x, 부상력 F_y라 가정하였을 경우

$$\sin\theta = \frac{9}{390}$$

$$\cos\theta = \sqrt{1-(\frac{9}{390})^2}$$

$$F_x = F * \cos\theta = F * \sqrt{1-(\frac{9}{390})^2}$$

$$F_y = F * \sin\theta = F * \frac{9}{390}$$

으로 나타내어 진다. 수식에서 확인할 수 있듯이 측정 힘의 대부분은 추력으로 분산이 되며 측정힘의 2%정도만이 부상력으로 분산된다. 그러므로 측정힘의 분산정도는 오차 범위내에 존재한다고 가정할 수 있다.

유한 요소 해석을 통한 2D, 3D 모델 추력, 자기 등가회로를 통한 추력, 실제 측정값의 추력은, 981.38 [N], 1007.7 [N], 1117.7 [N], 1400 [N]이다. 계측 값과 각각의 오차율은 표 3.3.2.5에서 나타내어 진다.

표 3.3.2.5 자기등가회로를 통한 기초 설계 및 유한요소 해석 결과 비교

	추력	오차율	계측 값
자기등가회로 기초설계	1117.7 [N]	20.16 [%]	1400 [N]
2D 모델 해석 값	981.38 [N]	29.90 [%]	
3D 모델 해석 값	1007.7 [N]	28.02 [%]	

이러한 오차의 원인으로는 우선 실험 방법에서의 오차 원인과, 실제 선로 코어의 재질 비확

실성에서 이루어진다. 실험 방법 및 외란에 의하여 측정되는 값의 오차가 생길 수 있으며, 유한요소 해석 모델에서의 선로 코어는 가장 많이 사용되는 S08재질로 가정하여 해석이 이루어졌다. S08 재질로 이루어 졌을 경우 그림 5.3에서도 확인 할 수 있듯이 선로와 이동자(Back-yoke 부분)에서 자기포화가 일어나 성능이 떨어지게 된다. 현재의 실차 모델의 재질은 S08의 포화 자속 밀도 보다 높은 값을 가지는 것으로 예상된다. 실제 측정값과 해석 값의 오차를 줄이기 위해서는 정확한 계측 방법에 대한 연구와 재질에 대한 연구가 필요하며 재질에 대한 연구는 실차 모델의 선로에서의 자기 값을 측정함으로서 추가적인 연구가 필요하다.

3.3.2.4. 결론

LPM 실차 모델의 성능 특성 해석을 위한 2차원 유한요소 해석과 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석의 타당성을 위하여 두 모델간의 특성 해석 값을 비교하였다.

유한요소 해석을 통한 출력 특성을 확인하기 위해서는 해석 모델에 펄스 전류를 인가해야 하므로, 별도의 외부 전력변환 회로를 만들어 펄스 전류를 생성하였다. 외부 전력변환 회로는 구동원리가 유사한 3상 BLDC 전동기를 기반으로 하였으며 극피치, 속도 및 통전방식에 따라 제어 파라미터를 계산하여 입력해 주었다. 외부 전력 변환 회로를 통하여 지상 코일에 2000A의 전류가 펄스 파형으로 인가됨을 확인 하였고 그 이후 특성 해석 결과를 비교하였다. 2차원 모델과 3차원 모델의 평균 추력은 각각 0.9kN, 1kN이 발생하였고 소수점 자리에서 차이를 보이며 큰 차이를 보이지 않았다. 유한요소 해석 특성 해석 값은 유한요소 해석모델이 1/4모델이므로 약 추력 3.6kN, 4kN힘을 가질 것으로 추정된다. 계측 값의 경우 5.6kN이 측정되었지만 이는 해석 모델에서의 자기포화로 인한 추력 감소로 생기는 오차이다. 계측 값과 해석 값의 오차를 줄이기 위해서는 실험 방법 및 실체 실차모델에서의 고정자 재질 연구가 필요할 것으로 예상된다. 재질 연구 방법은 선로에 전류 인가 후 가우스 미터를 사용하여 생성되는 자속 밀도 값을 측정하여 재질의 성분을 역 추적 하는 방법을 사용하는 것이 가장 효율적일 것으로 예상된다. 이러한 추후의 연구가 이루어 진다면 자기 포화로 인한 성능 감소 및 해석 값과 계측 값 사이의 오차율 감소의 효과를 가지고 올 것으로 예상된다.

LPM의 경우 2상 전류를 입력하므로 3상 전류를 이용하는 LSM보다 큰 리플률을 가지며, 리플률이 강한 경우 진동이 심하여 주행시 승차감에 영향을 줄 수 있다. 그러나 관성력이 큰 철도차량의 특성으로 인하여 승객의 승차감에 큰 영향은 없다.

LPM의 구동 방식은 크게 단일 펄스 구동 방식과 마이크로 스텝 구동 방식으로 나눌 수 있으며, 마이크로 스텝 구동 방식으로 정현파에 가까운 전류를 생성할 수 있다. 그러나 정현파 전류를 인가하였을 경우 기본 펄스파보다 성능이 우수하게 나타나나 전력변환기의 스위칭 손실을 고려할 경우, 철도차량 추진용 LPM으로는 펄스파 모델이 더 유리할 수 있다.

3.3.3. 철도차량용 LPM 추진시스템 성능평가

3.3.3.1. LPM 추진시스템 성능평가 요약

앞에서 설계 및 제작된 LPM 추진시스템의 성능평가를 수행하였다. 주요 성능평가는 4가지 항목에 대하여 수행되었으며, 그 결과는 표 3.3.3.1과 같이 요약할 수 있다.

표 3.3.3.1 LPM 추진시스템 성능평가 요약

성능평가 항목	목표치	달성치	달성여부
지상 LPM 추진시스템 평가 (견인력 측정)	5kN 이상	5.6kN	달성
차상 계자용 전자석 성능평가 (차상자기장 측정)	1.2T 이상	1.08T (180A 시)	달성 (200A 공급시)
차상 전원용 전원공급장치 성능평가 (차상 전원장치 부하시험)	5kW 이상	40kW 이상	달성
지상 전력변환장치 성능평가 (전력량 측정)	200kW급	200kW 이상	달성

3.3.3.2. 지상 LPM 추진시스템 평가

LPM 추진시스템의 견인력 시험을 위하여 대차에 제동을 체결하고 있는 동차를 연결하고 대차를 구동할 때, 대차와 동차 사이에 작용하는 인장력과 구동 드라이브 각 부 파형을 측정하였다. 대차에는 구동전원으로 배터리를 사용하고 이를 충전하기 위한 충전기와 DC/DC 컨버터(100V 200A)가 탑재되어 있다.

견인력 측정을 위한 시험 환경은 그림 3.3.3.1과 같다.



(a) 동차와 LPM 추진 대차 연결



(b) 동차 연결부



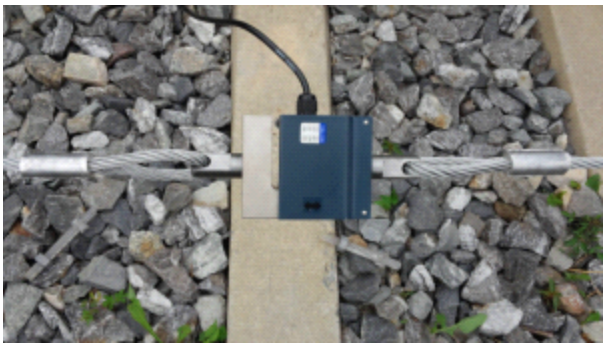
(c) 동차와 LPM 추진 대차 연결



(d) 배터리, 충전기, DC/DC컨버터 탑재



(e) 데이터 및 온도기록계



(f) 견인력 측정 센서

그림 3.3.3.1 견인력 측정을 위한 환경

인장력은 1ton 범위의 로드셀과 지시계을 이용하여 측정하였다.

정지상태에서 대차를 구동시켜 초기 기동되는 견인력이 그림 3.3.3.2에서 볼 수 있듯이 최대 약 571.2kg·f 즉 5597.8N으로 측정되었다. 이는 성과지표의 목표 추진력 5.0 kN 이상 인 것에 상회하는 결과를 도출한 것이다. 다만, 성과목표에 기술된 35 km/h에서의 추력을 5.0 kN 인 것을 입증하기 위해서는 4 ton 중량의 대차를 5.0 kN의 힘으로 지속적으로 가속하여 35 km/h에 도달할 수 있는 길이의 주행구간(필요한 주행거리는 가속거리 및 정지거리를 포함하여 최소한 300 m 가량의 거리가 필요 함)이 갖추어져 있지 않아 이를 확인하지는 못하였다. 그러나 5.6 kN의 힘으로 35 km/h 까지 가속하려면 50 kW 정도의 출력이 필요하므로 지상코일 구동 인버터의 용량(200 kW)으로 충분하다.



그림 3.3.3.2 견인력 측정값

3.3.3.3. 차상 계자용 전자석 성능평가

차상 계자용 전자석의 성능을 평가하기 위하여 3축의 Hall type 자기 센서와 지시계로 구성된 자계측정기를 사용하여 차상 계자와 지상 전기자 사이 공극의 자속을 측정하였으며, 측정 개요는 그림 3.3.3.3과 같다. 이때, 차상 계자전류는 180A를 공급하였으며, 지상 전기자 코일은 1,980 A의 전류를 공급하였다.

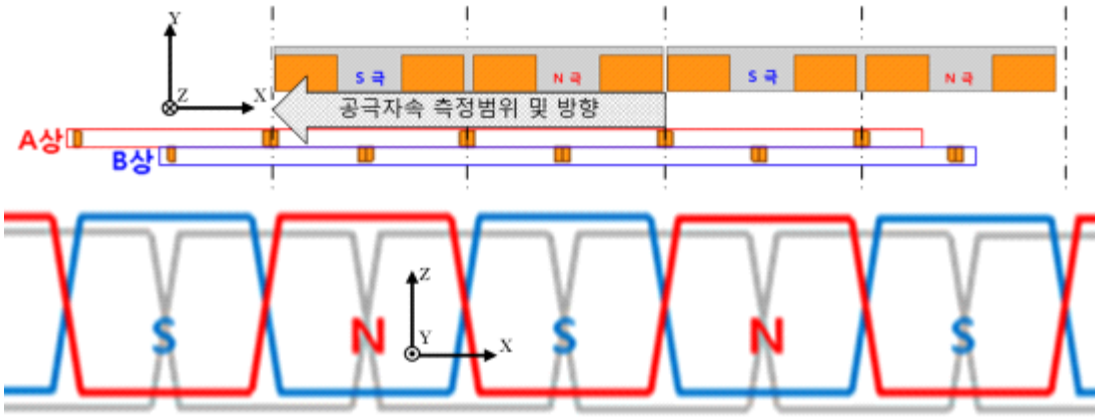


그림 3.3.3.3 공극 자속 측정 개요



(a) 자계 측정기 (b) 공극자속 측정 (c) 지상코일 자속측정

그림 3.3.3.4 공극 자속 측정 사진

측정시에 차상 계자전류는 자석의 온도상승에 따라 계획된 200 A를 공급하지 못하고 정격의 90%인 180A를 공급하였으며, 지상 전기자 코일은 1,980 A의 전류를 공급하며 정지상태에서의 자속을 측정하였다. 측정된 자속에서 y 방향과 x 방향만이 추진력으로 작용하므로 수평성분인 z 성분을 제외한 공극자속은 1.08T로 측정되었다. 즉 90%의 전류로 성과지표 1.2 T의 90%에 해당하는 1.08 T의 자속이 발생하였으므로 정격전류인 200A를 공급하는 경우 1.2T가 됨을 알 수 있다.

표 3.3.3.2 공극자속 측정 결과

	x[T]	y[T]	벡터합
N극	0.16	0.56	0.59
S극	-0.17	-0.47	0.49
발생자속총량(N-S)	0.33	1.03	1.08

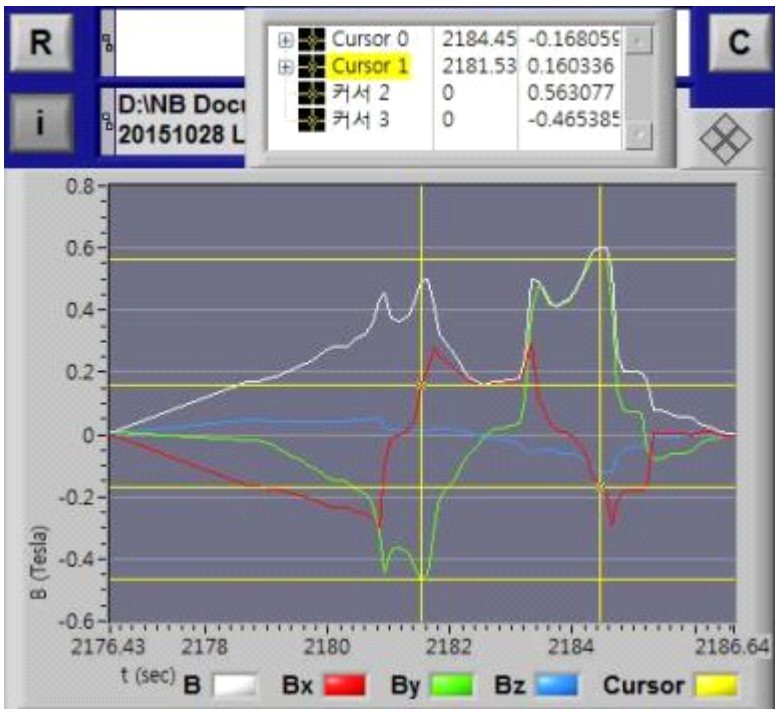


그림 3.3.3.5 공극자속 측정 결과

3.3.3.4. 차상 전원용 전원공급장치 성능평가

가) 유도급전방식 집전코일 성능평가

유도급전방식 집전코일의 성능평가를 위하여 집전코일에 100Ω의 직렬저항을 설치하여 저항에 흐르는 전류값을 측정하였으며 전류값은 오실로스코프를 사용하여 기록하였다.



a) 집전전류 측정　　b) 집전모듈 및 전류센서

그림 3.3.3.5 공극자속 측정 결과

측정은 시속 14.4km/h 까지 실시하였으며, 이때 100Ω의 저항기를 통한 45mA의 전류가 측정되어 집전된 에너지는 0.2 W × 2 모듈 = 0.4 W가 집전되어 LPM 추진시스템을 통한 선형발전이 가능함을 확인하였고, 차상시스템에서 사용가능한 전원을 공급하기 위해서는 집전모듈의 최적화와 함께 LPM 지상전기자의 스위칭에 따르는 최적 집전 위치의 선정등이 필요함을 확인하였다.

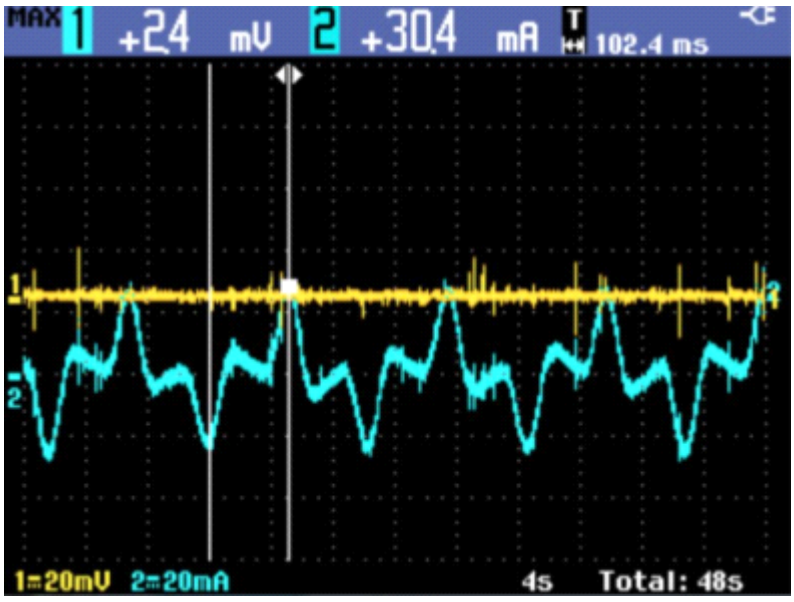


그림 3.3.3.6 차상 전원용 집전모듈의 전류 파형
(속도 = 14.4 km/h)

나) 차상 전원용 전원공급장치 성능평가

차상 전원용 전원공급장치의 성능평가를 위하여 부하시험을 실시하였다. 부하시험은 차상 계자 전자석의 온도상승에 따르는 저항증가를 보상하도록 하기 위하여 정전류 제어 모드로 설정하였으며 차상 계자 전자석에 200A를 공급하며 부하전압 및 전류의 출력 상태를 시험하였다. 시험은 전원공급장치를 기동하여 차상 계자 전자석을 여자시킨 상태에서 전원공급장치의 원격제어패드 장치에 표시되는 Battery로부터의 입력전압(V_Battery)과 출력전압(V_Load) 및 출력전류(I_Load)를 1분간격으로 약 5분간 측정하였다. 그림 3.3.3.7에 차상 전원공급장치의 구성 및 초기측정값과 최종 측정값을 나타내었으며, 표 3.3.3.3에 시험결과를 나타내었다.



(a) 전원공급장치 구성 (b) 시험개시 (c) 시험 종료

그림 3.3.3.7 차상 전원공급장치 부하시험

표 3.3.3.3 차상 전원장치 부하시험 결과

time [s]	V_Bat [V]	I_Load [A]	V_Load [V]	Output [kW]	코일저항 [Ω]
0	101.3	200.0	215.8	43.2	1.0790
60.0	98.5	200.0	221.0	44.2	1.1050
100.0	97.3	200.0	223.5	44.7	1.1175
180.0	95.4	200.0	227.8	45.6	1.1390
240.0	94.6	200.0	230.3	46.1	1.1515

시험결과에서 알 수 있는 바와 같이 차상 전원공급장치가 차상 계자 전자석을 여자시키고 있는 동안 계자 전자석의 온도가 상승하며 코일의 저항값이 증가하고 있으며, 배터리 전압은 감소하고 있으나, 차상 전원공급장치의 정전류 제어 특성으로 코일의 온도상승을 보상하기 위한 출력전압의 증가가 이루어지고 부하전류는 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

또한, 본 시험결과로부터 차상 전원장치는 40 kW 이상의 출력을 가지고 있음을 알 수 있으며, 이는 “차상 전원용 고효율 전원공급시스템 모듈 시작품” 성과목표로 당초 설정한 성과지표가 차량 보조전원장치의 출력 5kW 인것에 비하여 상회하는 성과를 도출한 것이다.

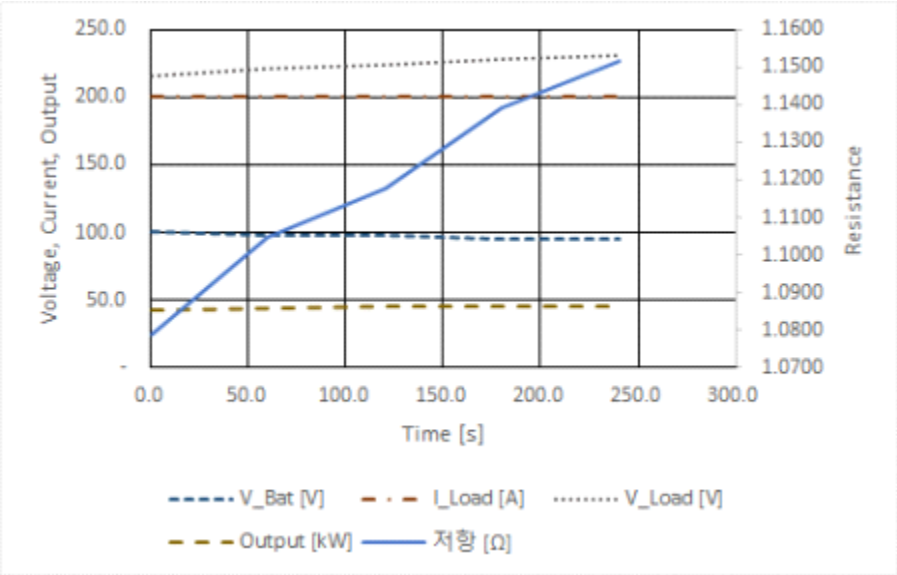


그림 3.3.3.8 차상전원공급장치 정전류 특성시험 결과

3.3.3.5. 대전류 공급용 전력변환장치 성능평가

전력변환장치는 입력측에 컨버터와 실제 A/B상의 지상 코일에 전류를 공급하는 인버터로 구성되어 있다. 인버터는 약 128m 길이의 Test-Bed구간에 설치된 지상 코일에 전류를 공급하는데, 공급 범위는 0~2,000A까지이다. 그림 3.3.3.9는 1,800A를 공급할 때 모니터링시스템에 표시된 정보화면이다.



그림 3.3.3.9 A상에 전류 1,800A 공급 시 모니터링 화면

이 경우, 컨버터 입력전력은 419V×982A=411kW이며, 컨버터 출력전력(인버터 입력전력)은 209V×1565A=327kW이다. 따라서, 이 경우 컨버터의 효율을 약 80%로 생각할 수 있으며, 인버

터도 마찬가지로 80% 효율을 가지고 있다고 생각하면, 인버터의 출력전력은 327kW×0.8=261kW가 된다.

그림 3.3.3.10은 최대 전류 2,000A를 공급할 때, A상 출력 전압/전류를 측정한 파형이다. 출력 전압에 측정 노이즈 성분으로 인해 정확한 값을 확인하기 어렵지만, 최저전압이 100V인 경우로 계산하여도 인버터 출력전력은 100V×2,000A=200kW로 목표 성능치(200kW급)에 만족함을 알 수 있다.

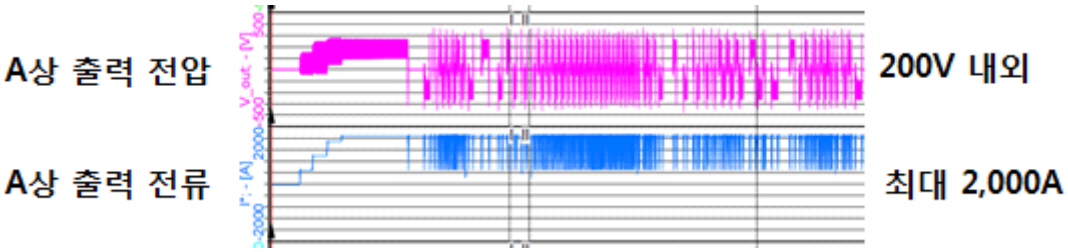


그림 3.3.3.10 A상에 전류 2,000A 공습 시 출력 전압/전류 측정 화면

3.4. LPM BOM 시스템 구축

3.4.1. LPM BOM 시스템 구축(안)

3.4.1.1. BOM 시스템 개발

가. BOM 시스템 개발

실대차 모델 LPM 추진시스템의 BOM 체계를 구축하기 위해 전용 LPM BOM Manager 프로그램을 개발하였으며, 실대차 모델 구성 부품 조사 및 데이터 업로드를 통하여 시스템을 구축하였다.

프로그램 운영환경	프로그램 개발환경
OS : MS Windows 8.0 .Net FrameWork 4.5	OS : MS Windows 7.0 .Net FrameWork 4.5
DATABASE : MySQL Server MySQL Connector	DATABASE : MySQL Server MySQL Connector
LPM : LPM Bom Manager Setup File	개발 Tool : Visual Studio 2013 개발 Lamguage : C#

그림 3.4.1.1 BOM 프로그램 구성

LPM BOM Manager 프로그램은 BOM Tree, Part List, 부품정보, 고장정보 및 문서정보를 관리할 수 있도록 구성하였다.

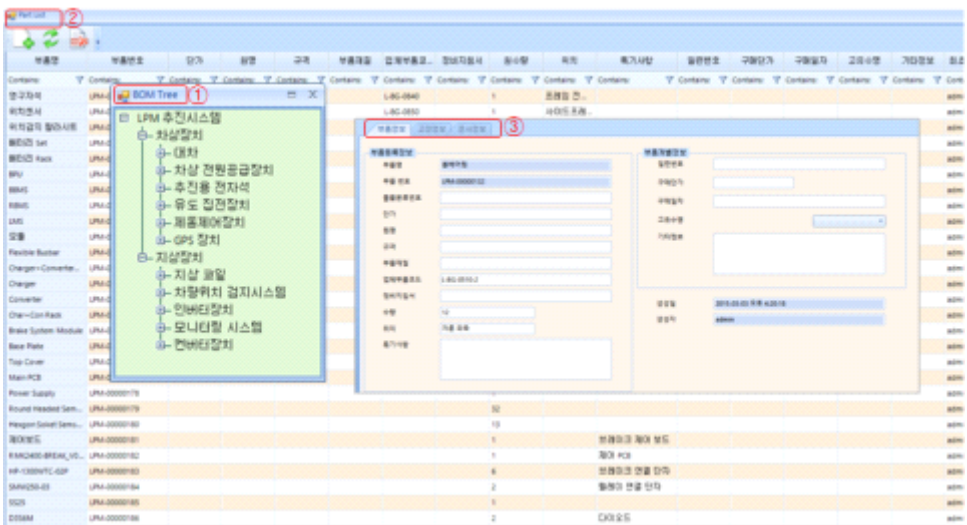


그림 3.4.1.2 LPM BOM Manager 프로그램 화면

LPM BOM DB는 BOM Master, 부품정보, 장치정보, 문서정보, 고장정보, 사용자정보, 고유수명정보의 Table로 구성되어 있다.

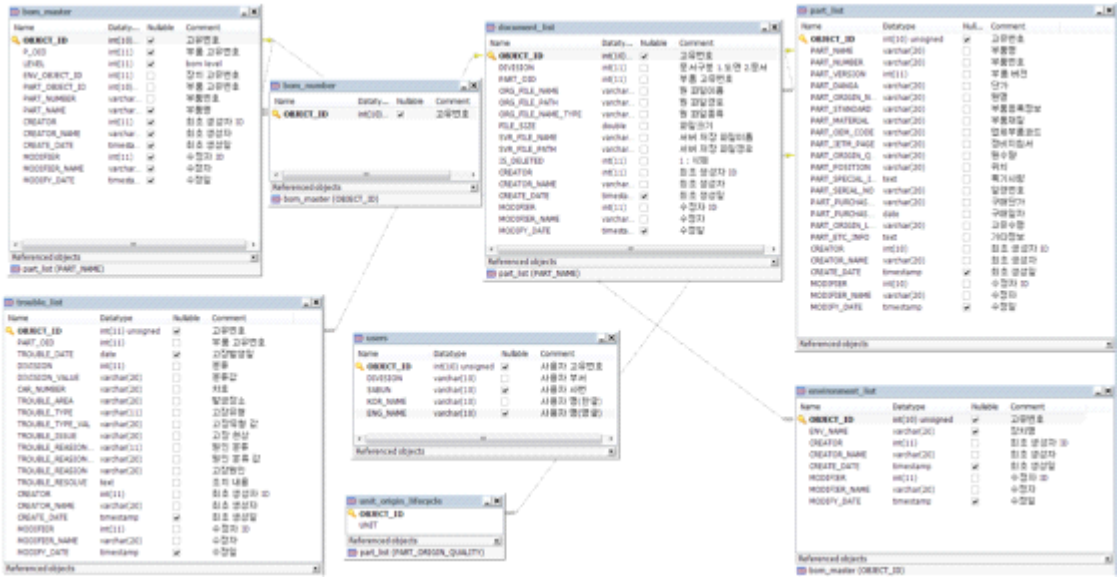


그림 3.4.1.3 LPM BOM DB Logical Diagram

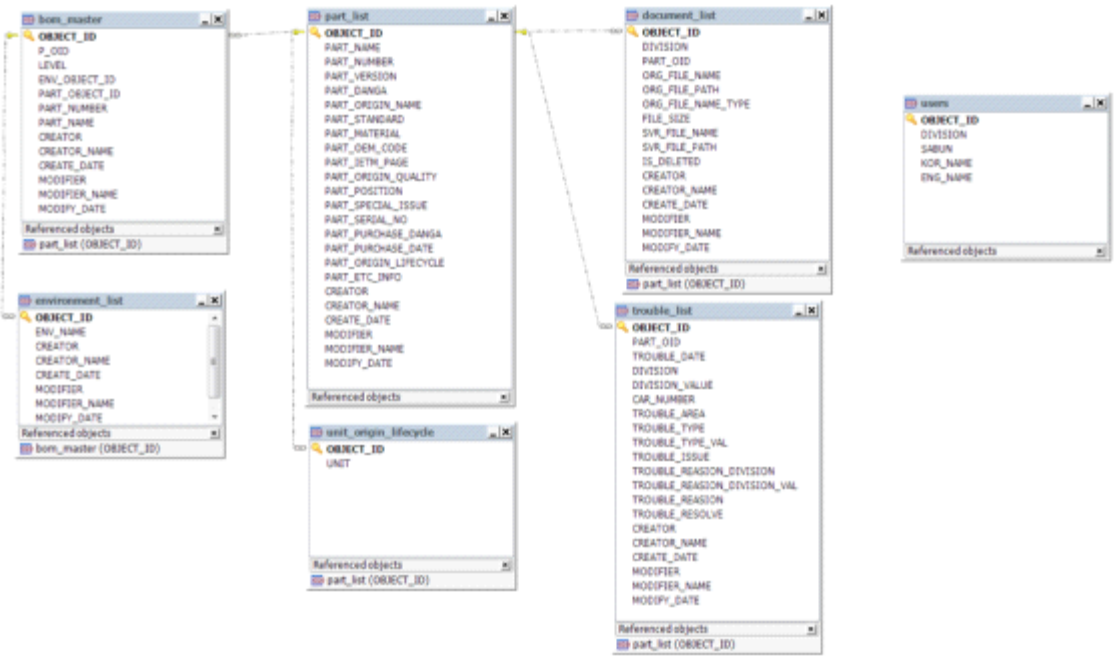


그림 3.4.1.4 LPM BOM DB Physical Diagram

나. 실대차 모델 장치 분류

실대차 모델의 장치는 설치 위치에 따라 크게 차상장치와 지상장치로 분류하였으며, 세부 장

치는 부품의 기능 및 위치에 따라 분류하였다.

차상장치는 실대차 모델에 설치된 장치로 대차, 전자석 전원공급장치, 추진용 전자석, 유도집전장치, 제동제어장치, GPS장치로 구성되어있다. 지상장치는 지상코일, 차량위치 검지시스템, 인버터장치, 컨버터장치, 모니터링시스템으로 구성되어 있다.

차상장치	지상장치
대 차	지상 코일
차상 전원공급장치	차량위치 검지시스템
추진용 전자석	인버터장치
유도 집전장치	모니터링 시스템
제동제어장치	컨버터장치
GPS 장치	

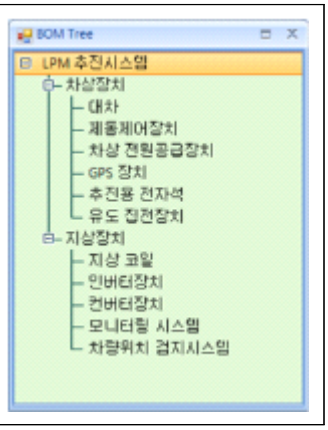


그림 3.4.1.5 실대차 모델 장치 분류

다. BOM 시스템 구성

BOM Table은 부품에 대한 기본 정보와 도면, 사진 및 회의록 등의 문서를 입력 할 수 있도록 하여 부품에 대한 정보를 제공할 수 있도록 하였고, 부품에 대한 데이터의 수정, 삭제 및 추가를 할 수 있도록 구성하였다.

부품 LEVEL은 0~7LEV까지 BOM tree를 구성되어 있으며, 기본적인 데이터 정보는 BOM 부품명, BOM 부품번호, 부품버전, 단가, 원명, 부품등록정보, 부품재질, 업체부품코드, 정비지침서, 원수량, 위치, 특기사항, 일련번호, 구매단가, 구매일자, 고유수명, 기타정보, 문서정보 등을 포함하고 있다.

LPM 추진시스템의 시작품에 대한 고장이력 관리를 할 수 있도록 고장일, 장소, 고장유형, 고장현상, 고장원인 및 고장조치내역을 관리할 수 있도록 시스템에 고장정보를 입력하여 관리할 수 있도록 시스템이 구축 되었다.

3.4.1.2. 실대차 모델 BOM 시스템 구축

가. BOM 시스템

LPM BOM Manager 프로그램은 실대차 모델의 LPM 추진시스템에 대한 BOM 시스템으로 적용부품에 대한 부품관리, 고장관리 및 각종 정보관리를 하는 시스템이다. 최초 사용자 로그인을 통하여 시스템을 사용 할 수 있으며, 사용자 추가 버튼을 이용하여 사용자를 추가 할 수 있도록 하였다.

이 시스템을 이용하여 BOM Tree를 구성하고 각 부품에 대한 정보를 입력하여 관리할 수 있으며, Data 수정 및 삭제가 가능한 시스템 이다.

나. LPM BOM Manager 프로그램 설명

(1) LogIn

Login 후 전체 Editor Button들이 활성화, 사용자 추가 후 사용자 로그인 가능

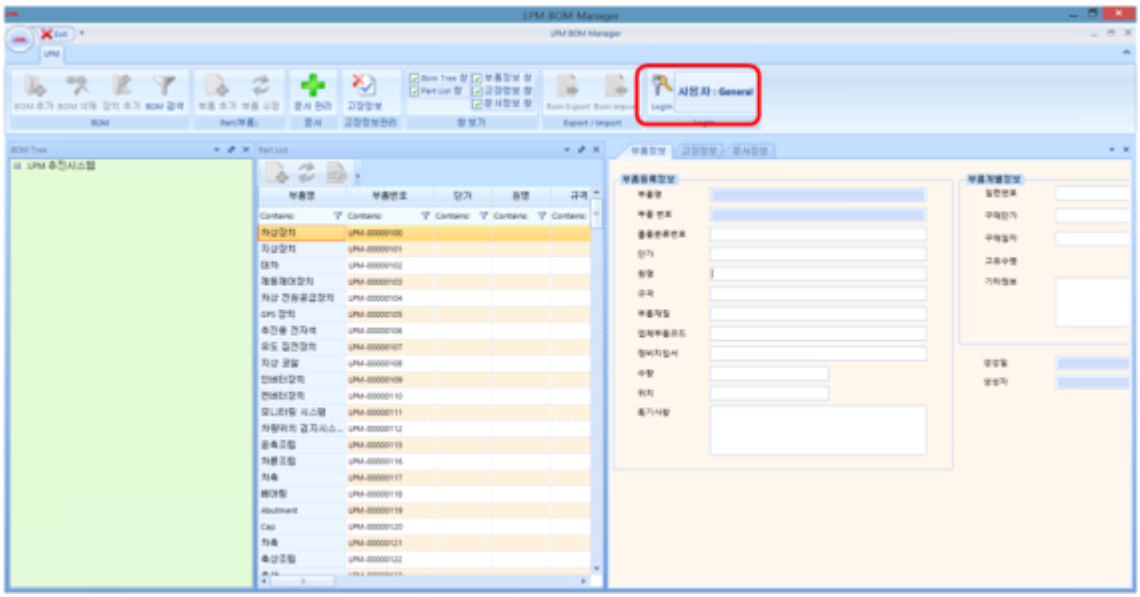


그림 3.4.1.6 LogIn

(2) 기본화면

BOM Tree의 선택 BOM Part에 따라 관련 정보들 표기

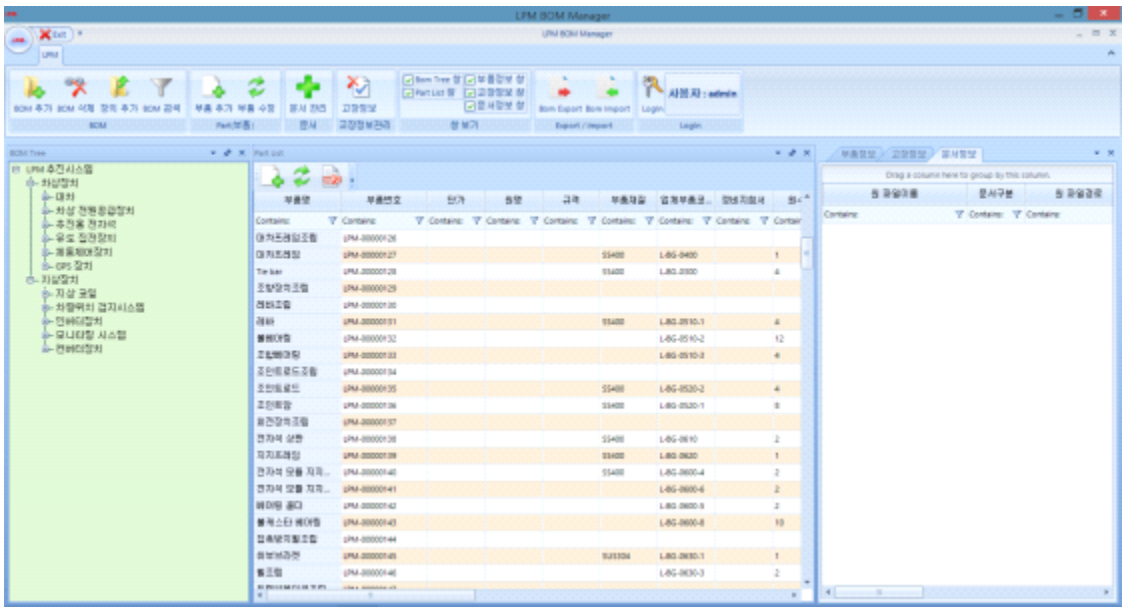


그림 3.4.1.7 LPM BOM Manager 기본화면

(3) 부품추가

부품 기본정보를 입력한다. BOM 부품번호는 자동 생성되므로 수정할 수 없다.

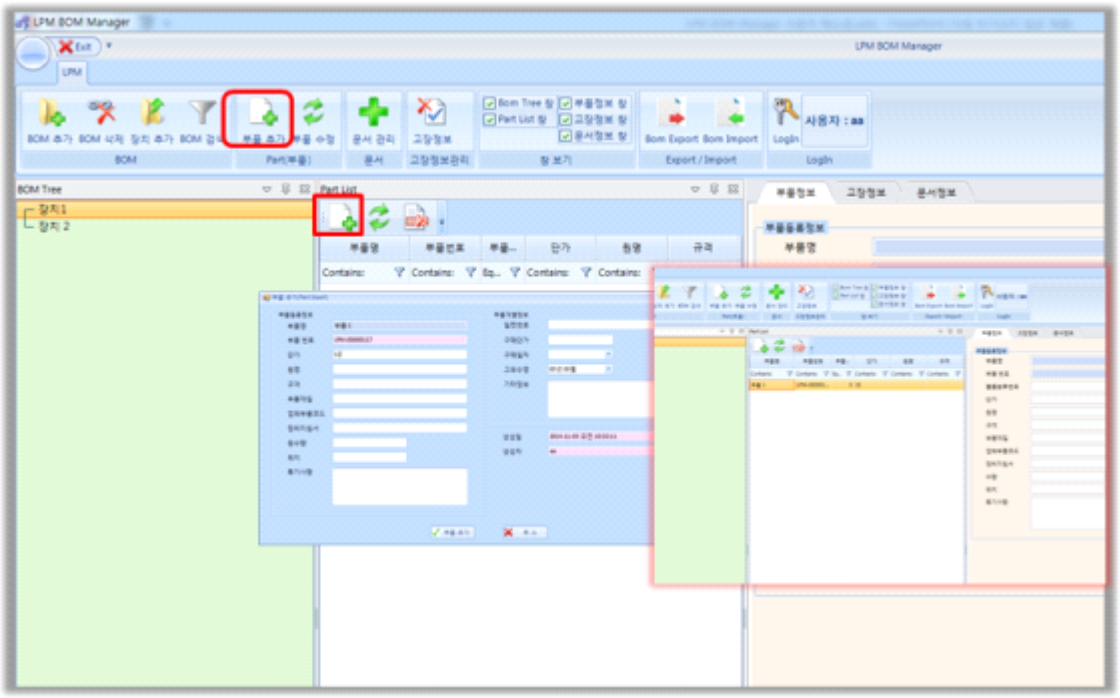


그림 3.4.1.8 부품 추가

(4) 부품 변경

부품 정보를 수정할 수 있다.

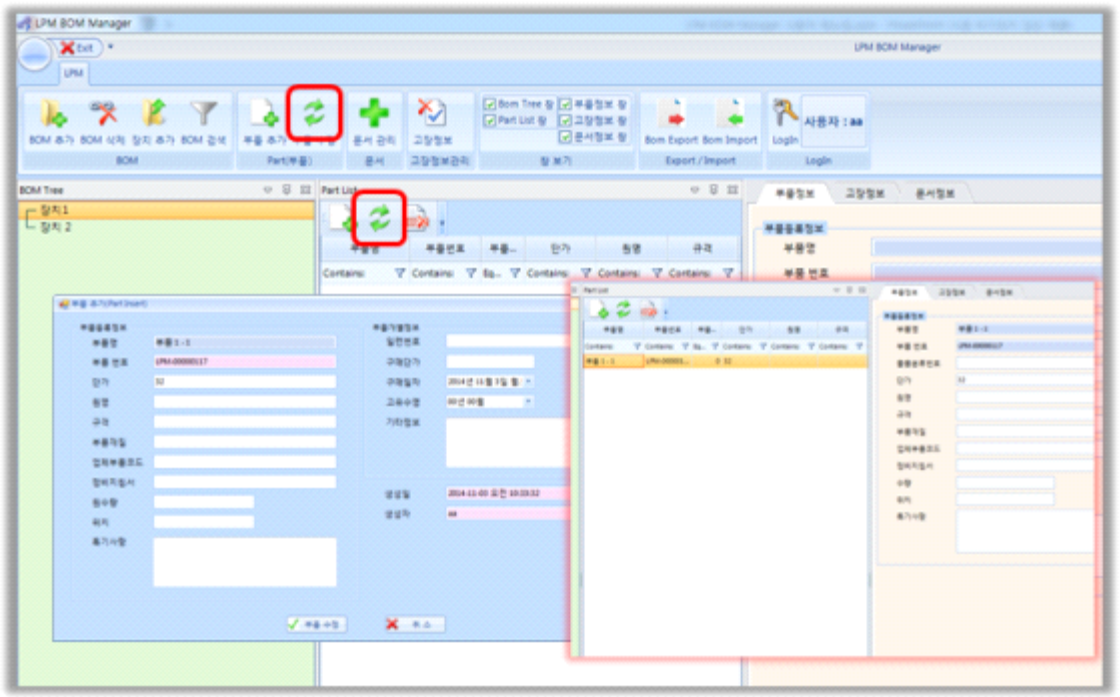


그림 3.4.1.9 부품 정보 변경

(5) 차상장치 BOM Tree

차상장치의 부품에 대한 정보 표시

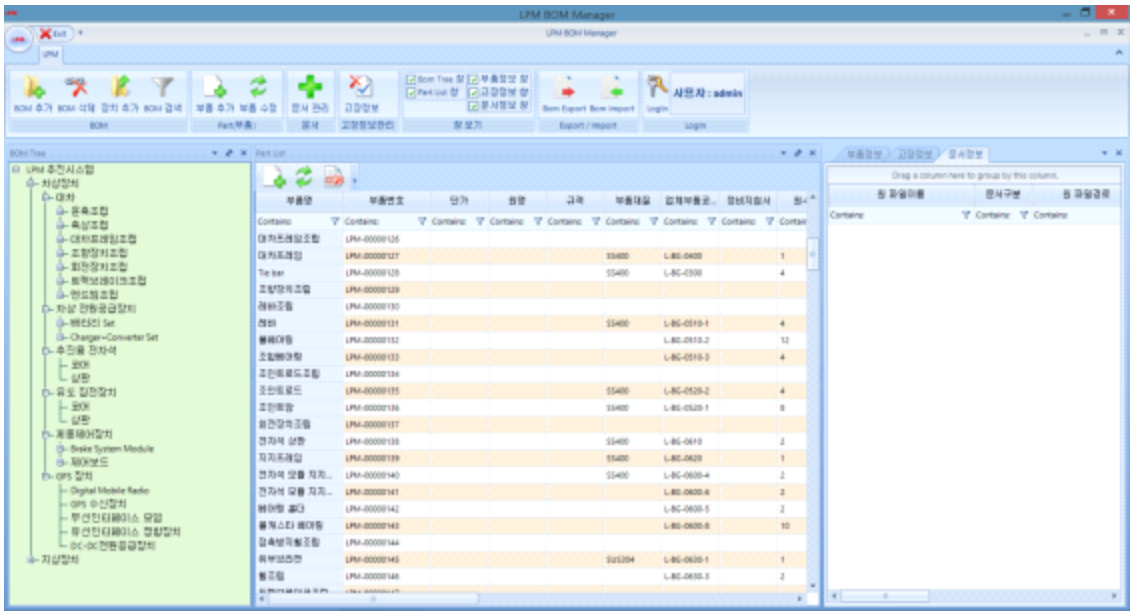


그림 3.4.1.10 차상장치 BOM Tree

(6) 지상장치 BOM Tree

지상장치의 부품에 대한 정보 표시

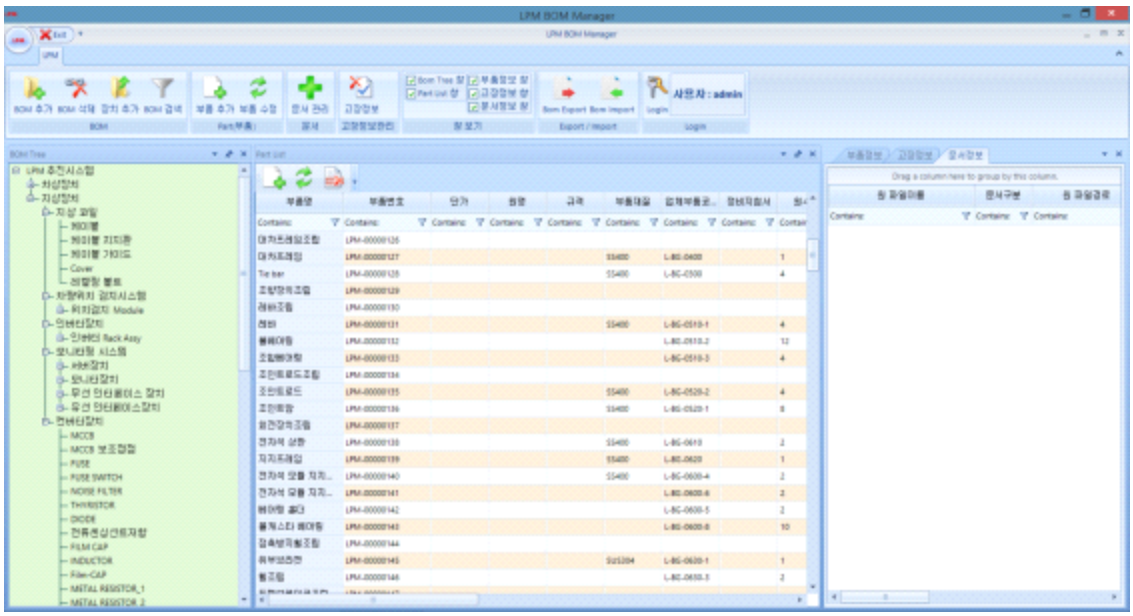


그림 3.4.1.11 지상장치 BOM Tree

3.4.2. 유지보수 체계 구축

3.4.2.1. 검사 분류 및 방법

가. 유관기관 유지보수체계 현황

전국의 주요 도시에 도시철도가 건설되어 운영되고 있으며, 대중교통으로서 중요한 역할을 하고 있다. 또한 안전하고 편안한 도시철도를 만들기 위해 예방정비에 많은 비중을 두어 전동차 유지보수 및 관리를 하고 있다.

표 3.4.2.1은 국내 주요 도시철도운영기관 유지보수체계 현황을 나타내었다.

표 3.4.2.1 국내 도시철도운영기관 유지보수체계 현황

기 관		경정비		중정비	
		일상검사	월상검사		
서울도시철도		7일검사	4월검사(4만Km)	4년검사(40만Km) 20년검사(리모델링) : 20년	
서울 메트로	구형	3일	2월(4만Km)	2년(30만Km)	4년(60만Km)
	신형	3일	3월(5만Km)	3년(50만Km)	6년(100만Km)
코레일 (수도권 전철)	저항	1,000Km (평균3일)	2월(3만Km)	2년(30만Km)	4년(60만Km)
	VVVF	1,500Km (평균4일)	3월(4.5만Km)	3년(54만Km)	6년(108만Km)
	신규반입	2,500Km (평균5일)	4월(6만Km)	4년(72만Km)	8년(144만 Km)
부산	1호선	48시간	3월	2년(30만Km)	4년(60만Km)
	2~3호선	72시간	3월	3년(40만Km)	6년(80만Km)
대구도시철도		72시간	3월(4만Km)	3년(40만Km)	6년(80만Km)

나. LPM 검사 분류별 정비체계 방안

(1) 검사 분류별 정비

검사는 장애 예방을 목적으로 하는 예방정비로 정기검사와 비정기 검사로 분류할 수 있으며, 정기검사는 검사주기와 주행거리를 기준으로 정기적으로 수행하는 검사를 말하며, 비정기 검사는 전동차의 이상상태 발생 또는 우려가 예상될 때 원상회복을 시키거나 전동차 개조 또는 수선 등을 목적으로 특별한 계획에 의해 시행하는 검사를 시행한다.

표 3.4.2.2 검사종별 정비

검사종류		검사주기 (주행거리)	검사내용	비고
정기검사	일상검사	○일	정해진 검사주기에 이르렀을 때 전동차 해당 장치의 외관상태 및 동작 상태를 확인하는 검사	경정비
	월상검사	○개월 (○만Km)	정해진 검사주기에 이르렀을 때 전동차 해당 장치의 외관상태 및 동작 상태를 확인하고 기기청소와 주요 소모품을 보충, 교환하고 주요장치의 기능을 확인하는 검사	경정비
	년간검사	○년 (○○만Km)	정해진 검사주기에 이르렀을 때 영구결합 부분을 제외한 전동차 모든 장치의 부품을 분해, 수선 및 교환하는 검사	중정비
비정기검사	임시검사	필 요 시	전동차의 이상 상태 발생 시 또는 발생우려가 예상될 때 이상 부위를 원상회복시키기 위하여 시행하는 검사	경정비 중정비
	인수검사	필 요 시	신규제작 또는 주요부위를 개조하여 도입된 전동차의 상태, 기능 등을 확인하는 검사	경정비
	차륜교환검사	필 요 시	차륜외경이 사용한도에 도달하거나 또는 차륜의 균열, 파손 등으로 차륜을 교환하기 위하여 시행하는 검사	중정비
	특별검사	필 요 시	전동차 개조 또는 수선 등을 목적으로 특별히 계획에 의해 시행하는 검사	경정비 중정비

정기적으로 검사주기 또는 주행거리 도달시 일상검사(○D), 월상검사(○M), 년간검사(○Y)를 시행하여 정해진 검사주기에 따라 장치별 외관상태 및 동작상태를 확인하고 주요 소모품을 보충, 교환하고 기기의 기능을 확인 검사하는 정기검사를 수행 한다. 또한 필요에 따라 비정기검사를 시행한다.

(2) 검사방법

검사 방법은 일정기간을 정해서 정비하는 예방정비와 고장이 발생하고 나서 행하는 사후검사(비정기적) 방법으로 나눌 수 있으며, LPM 추진시스템 또한 예방정비를 목적으로 유지보수 관리를 시행할 필요가 있다.

정기검사의 주기 설정은 차량 사용조건, 사용년수 등을 고려하여 안전성, 경제성, 기술성 요인들을 최적화시킨 주기로 결정하여야 하며, 근래에는 전동차 제작 기술, 신뢰성 향상 및 다중계 설치로 인하여 다양한 검사체계 및 검사 주기가 변경되고 있다. 이러한 검사주기는 다년간 운용에 따른 고장 데이터 및 신뢰성 검토를 통하여 주기를 변경하여 시행할 수 있다.

(3) 경정비 업무

경정비 주요 업무는 전동차 운영을 담당하고 있다. 전동차의 안전운행을 위해 출고 및 입고 전후로 점검을 실시하고, 일상검사와 월간검사를 시행하여 년간검사 이전에 필요한 정비 및 소모품 교환을 통해 정상 기능을 유지 할 수 있도록 정비 업무를 수행하며, 운행 중 발생하는 고장 부품에 대한 수선, 교환 등 임시검사 및 특별검사를 수행한다.

일상검사는 각종 기기 등의 외관 및 주요기기의 기능을 확인하는 검사를 시행한다.

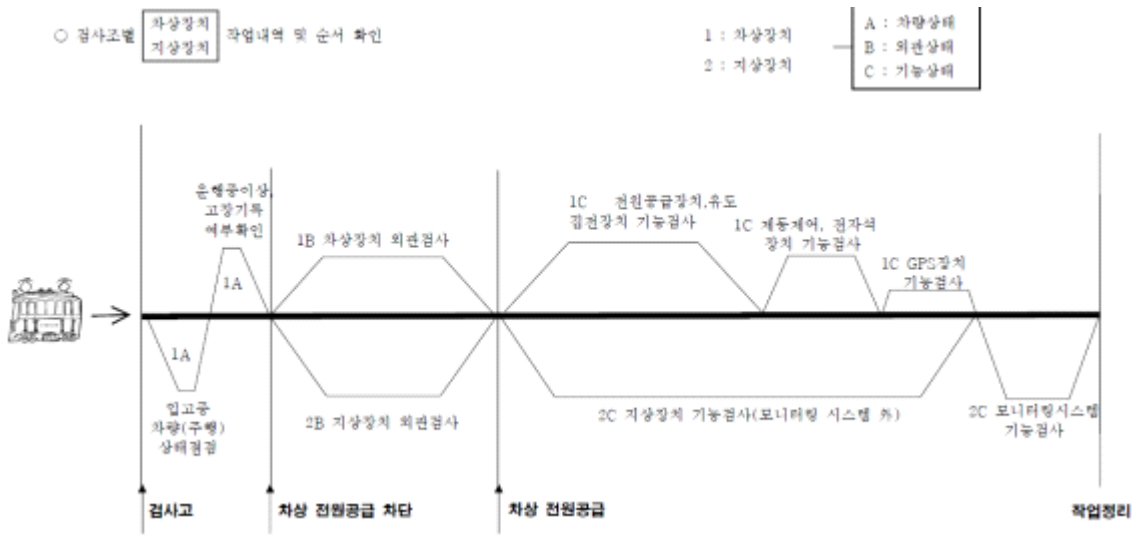


그림 3.4.2.1 일상검사 공정도

경정비 최상위 검사인 4M 검사는 박스내 설치된 장치를 확인하고, 차륜 측정 등 소모품 교환 및 주요 기능 시험을 실시하며, 점검이 완료 된 후 구내시운전을 실시하여 이상여부를 확인 하는 검사한다.

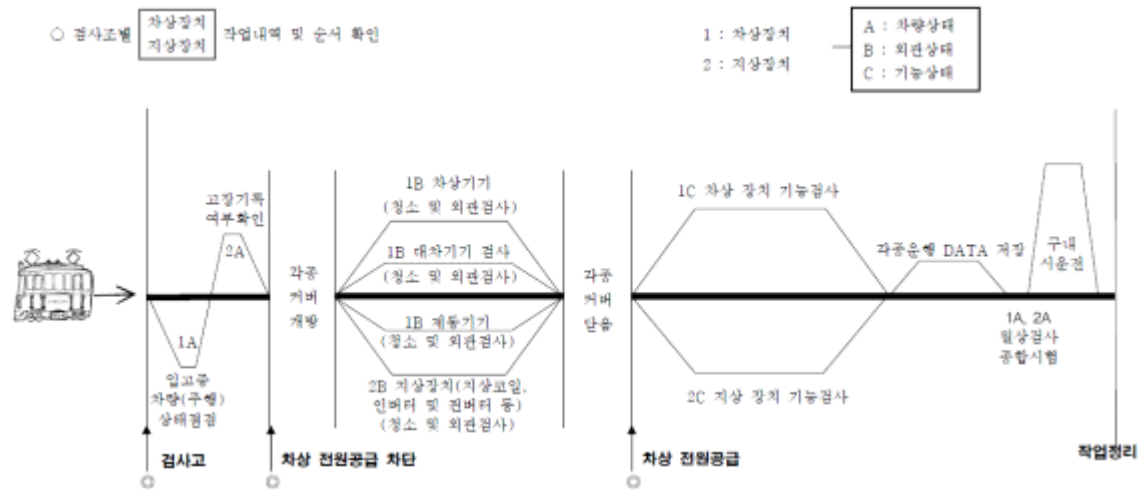


그림 3.4.2.2 월상검사 공정도

(4) 중정비 업무

중정비 주요업무는 영구 결합 부분을 제외한 모든 장치의 부품을 분해, 수선 및 교환하여 다음 정기검사 까지 각 장치의 기능이 정상적으로 유지될 수 있도록 정비하는 업무를 수행한다.

중정비의 년간검사시 모든 부품이 점검되고 단품별 시험을 실시하여 성능을 점검하고 조정하며, 다음 검사 주기내에 고장이 발생하지 않도록 소모품을 교환하고, 탐상 등을 실시하여 주요 부위의 크랙 등을 검사하며, 새롭게 조립된 부품들에 의한 차량 성능이 정상적으로 동작하는지 시운전을 실시하여 정상적인 기능을 수행할 수 있도록 정비한다.

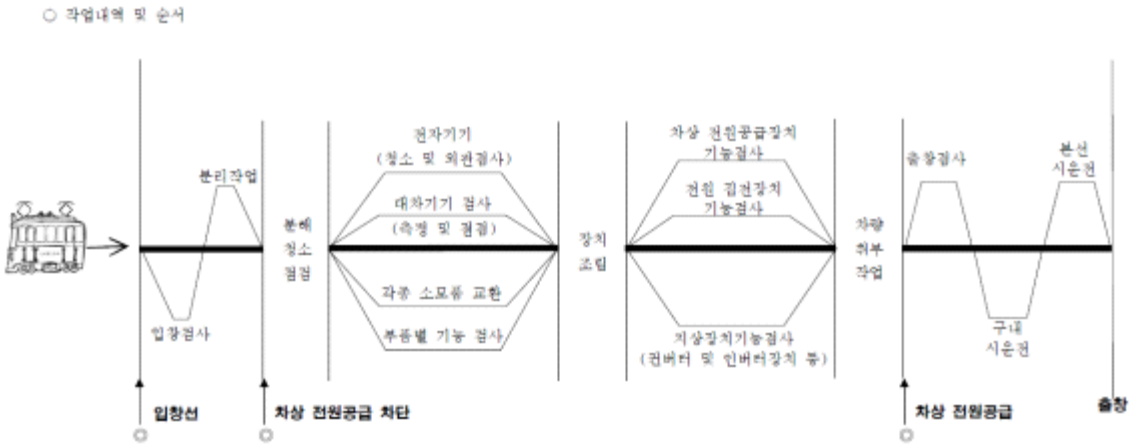


그림 3.4.2.3 연간검사 공정도

3.4.2.2. LPM 실대차 모델 유지보수(안)

가. 검사기준

실대차 모델의 LPM 추진시스템은 운전실, 옥상, 실내, 대차, 상하기기로 구분되어 있지 않고 LPM 기반의 추진시험을 확인하기 위한 최소한의 장치로 구성되어 있다. 또한 기존 도시철도 전동차와 달리 인버터장치와 LPM(고정자)가 차량이 아닌 지상에 설치되어 차상장치와 지상장치의 검사를 구분하여 차량을 운용하는 경정비 수준의 검사에 대하여 아래 표와 같이 설정하였다.

(1) 차상장치

순서	기 기 명	일상검사		월상검사	
		외관상태	동작상태	외관상태	동작상태
1	대차	○		○	
2	윤축조립	○		○	
3	차륜조립	○		○	
4	축상	○		○	

순서	기 기 명	일상검사		월상검사	
		외관상태	동작상태	외관상태	동작상태
5	Ball caster bearing	○		○	
6	축상 카바	○		○	
7	대차프레임	○		○	
8	Tie bar	○		○	
9	조향장치	○		○	
10	회전장치	○		○	
11	전자석 상판	○		○	○
12	전자석 모듈 지지프레임	○		○	○
13	트랙브레이크	○	○	○	○
14	엔드빔	○		○	
15	위치센서	○		○	
16	차상 전원공급장치	○	○	○	○
17	배터리 Set	○	○	○	○
18	Charger	○	○	○	○
19	Converter	○	○	○	○
20	추진용 전자석	○		○	○
21	유도 집전장치	○	○	○	○
22	Brake System Module	○	○	○	○
23	Base Plate	○		○	
24	Top Cover	○		○	
25	Main PCB	○		○	
26	Power Supply	○		○	
27	제어보드	○		○	
28	GPS 장치	○		○	○
29	Digital Mobile Radio	○		○	○
30	GPS 수신장치	○		○	○
31	무선인터페이스 모뎀	○		○	○
32	유선인터페이스 정합장치	○		○	○
33	DC-DC 전원 공급장치	○		○	○

(2) 지상장치

순서	기 기 명	일상검사		월상검사	
		외관상태	동작상태	외관상태	동작상태

순서	기 기 명	일상검사		월상검사	
		외관상태	동작상태	외관상태	동작상태
1	지상 코일	○		○	○
2	케이블	○		○	
3	케이블 지지판	○		○	
4	케이블 가이드	○		○	
5	Cover	○		○	
6	레벨링 볼트	○		○	○
7	차량위치 검지시스템	○		○	○
8	위치검지 Module	○		○	○
9	위치센서 PCB			○	
10	인버터장치	○		○	○
11	인버터 Rack Assy			○	○
12	방열장치	○		○	○
13	제어보드			○	○
14	커패시터 보드			○	○
15	드라이브 보드			○	○
16	PWM 보드			○	○
17	어답터 보드			○	○
18	AC FAN	○		○	○
19	Power Supply			○	○
20	모니터링 시스템	○		○	○
21	서버장치	○		○	○
22	모니터장치	○		○	○
23	무선 인터페이스 장치	○		○	○
24	DMR subrack	○		○	○
25	DMR(Digital Mobile Radio)	○		○	○
26	Magnectic Antenna	○		○	○
27	RF Feeder Cable Kit	○		○	○
28	유선 인터페이스장치	○		○	○
29	프로토콜 변환정합장치	○		○	○
30	컨버터장치	○		○	○

나. 세부 검사시행기준

실대차 모델 LPM 추진시스템의 정기검사(경정비 : 일상검사, 월상검사, 중정비 : 년간검사)를 시행하기 위하여 검사대상 기기에 대한 항목별 세부 검사기준 수립이 필요하다. 실대차 모델 LPM 추진시스템의 장치별 세부 검사기준을 아래와 같이 정리하였다.

(1) 차상장치 세부 검사기준(안)

점검장치	점검상태	점 검 내 용
1. 대차	외관상태	1) 외관의 변형, 손상여부 확인
		2) 각종 장치의 취부상태 및 외관의 변형, 손상 여부 확인
2. 윤축	외관상태	1) 외관의 균열, 손상, 파손 및 열화여부 확인
		2) 누유여부 확인
3. 차륜	외관상태	1) 차륜답면의 찰상, 박리, 구루빙, 후랜지의 마모 여부 확인
4. 축상 저널부	외관상태	1) 커버의 열화흔적 및 열기발생 여부 확인
5. 조향장치	외관상태	1) 조향장치 외관의 균열, 변형, 손상여부 확인
		2) 조향레버 및 핀 취부상태 확인
		3) 습동부 주유
6. 회전장치	외관상태	1) 외관의 변형, 송상여부 확인
		2) 회전장치와 조향장치의 조립 상태 확인
7. 트랙 브레이크	외관상태	1) 기기 외관의 균열, 변형, 손상여부 확인
		2) 브레이크 마모상태 확인
	동작상태	1) 제동, 완해시 브레이크 동작상태 확인
8. 위치센서	외관상태	1) 센서의 취부 상태 및 외관상태
	동작상태	1) 위치센서 검지 상태 확인
		2) 위치센서 검지 오차 확인
9. 배터리 set	외관상태	1) 외함의 변형, 손상 및 커버 잠금장치 이탈여부 확인
		2) 누액 및 파손여부 확인
		3) 케이블 및 단자대 이완여부 확인
		4) 차단기 외관의 변형, 손상여부 및 취부상태 확인
	동작상태	1) 축전지 전압 적정 현시여부 확인
		2) 공급전압 편차 점검
		3) 배터리 상대 온도차 확인(5℃ 이내)
10. Charger + Converter set	외관상태	1) 외함의 변형, 손상여부 및 커버 잠금장치 이탈 여부 확인
		2) 표시 및 설정 조정부 상태 확인
		3) 케이블 단자대 이완여부 확인
	동작상태	1) 입출력 전압 및 전류 상태 확인

점검장치	점검상태	점 검 내 용
		2) 알람 경보 등 설정 상태 확인
		3) 배기팬 동작 상태 확인
11. 추진용 전자석	외관상태	1) 추진용 전자석 외관, 손상 및 변형 여부 확인
		2) 취부 볼트 및 접속케이블 이완여부 확인
	동작상태	1) 추진용 전자석의 동작상태 확인
12. 유도 집전장치	외관상태	1) 추진용 전자석 외관, 손상 및 변형 여부 확인
		2) 취부 볼트 및 접속케이블 이완여부 확인
	동작상태	1) 유도 집전장치의 동작상태 확인
13. 제동제어 장치	외관상태	1) 외함의 변형, 손상 여부 확인
		2) 각종 커넥터 연결 상태 확인
	동작상태	1) 제동 체결 및 완해 동작 상태 확인
		2) 외부 장치와의 인테페이스 동작 상태 확인
14. GPS 장치	외관상태	1) 외함의 변형, 손상 여부 확인
	동작상태	1) 위치 및 통신 동작 상태 확인

(2) 지상장치 세부 검사기준(안)

점검장치	점검상태	점 검 내 용
1. 지상코일	외관상태	1) 외관의 열화, 변형, 손상 여부 확인
		2) 케이블 접속상태 및 외관의 열화, 손상여부 확인
2. 차량위치 검지 모듈	외관상태	1) 기기 외관의 변형, 손상여부 및 취부상태 확인
3. 인버터 함	외관상태	1) 외함의 변형, 손상여부 및 잠금장치 이탈여부 확인
		2) 각종 차단기 외관의 변형, 손상여부 및 취부상태 확인
		3) 각종 계전기류 외관의 변형, 손상 및 고정나사 이완여부 확인
		4) 각종 배선의 열화, 단락, 단선 여부 확인
		5) 각종 단자대 접속상태 및 고정나사 이완여부 확인
		6) 기타 각종 기기 외관의 변형, 손상여부 확인
	동작상태	1) 인버터 동작여부 확인
		2) 인버터 제어장치 동작여부 확인
		3) 인버터 함 배기팬 동작 여부 확인
4. 컨버터 함	외관상태	1) 외함의 변형, 손상여부 및 잠금장치 이탈여부 확인

점검장치	점검상태	점 검 내 용
		2) 각종 차단기 외관의 변형, 손상여부 및 취부상태 확인
		3) 각종 계전기류 외관의 변형, 손상 및 고정나사 이완여부 확인
		4) 각종 배선의 열화, 단락, 단선 여부 확인
		5) 각종 단자대 접속상태 및 고정나사 이완여부 확인
		6) 기타 각종 기기 외관의 변형, 손상여부 확인
	동작상태	1) 컨버터 동작여부 확인
		2) 컨버터 제어장치 동작여부 확인
		3) 컨버터 함 배기팬 동작 여부 확인
5. 서버장치	외관상태	1) 외관의 변형, 손상 및 고정볼트 이완여부 확인
		2) 기기 오염여부 확인
	동작상태	1) 전면부 전원 및 동작 LED 정상 점등여부 확인
		2) 시스템 시험 시 행선안내정보 정상 출력 여부 확인
		3) 운영서버2 접속 시 정상 연결여부 확인
6. 모니터장치	외관상태	1) 외관의 균열, 변형, 손상여부 확인
		2) 취부 브라켓트 고정볼트 이완여부 확인
	동작상태	1) 고장표시장치 정상 동작상태 확인
		2) 고장기록 확인, 저장 및 삭제
		3) 점검메뉴에 의한 일상검사시험 확인
		4) 팬(FAN) 동작상태 및 이음여부 확인 - 5호선
7. 무선인터페이스장치	외관상태	1) 외함의 오염, 변형, 취부상태 확인
	동작상태	1) 전원 및 동작상태 확인
		2) 전면 LED 점등 및 동작상태 확인
8. 유선 인터페이스장치	외관상태	1) 외함의 오염, 변형, 취부상태 확인
	동작상태	1) 전원 및 동작상태 확인
		2) 전면 LED 점등 및 동작상태 확인

(3) 표준작업 절차서

검사기준에 따라 검사종별 검사를 시행하고, 각 장치별 세부 검사기준에 따라 검사를 수행하여 예방정비를 수행한다.

또한, 고장 부품의 수선 및 중정비 업무 수행을 위한 부품별 분해, 청소, 수선, 교환, 조립 및 시험 등에 대한 부품별 표준작업 절차가 마련되어야 한다. 표준작업 절차는 해당 부품을 정비할 수 있도록 공정(분해, 청소, 교환, 조립 등), 작업 및 시험절차, 검사기준, 필요 장비 및 공구

등이 포함되어 표준작업 절차에 따라 정비를 수행할 수 있도록 하여야 한다.

다. 장치별 유지보수 매뉴얼

(1) LPM(인버터, 컨버터, 위치센서, 브레이크제어시스템, 표시장치)

Ⅰ. 안 전(SAFETY)

⚠ 장비를 사용하기 전에 읽으십시오. 감전이나 부상의 위험이 있으므로 반드시 이 지침에 따라 작업하시기 바랍니다.

○ 장비에 이상에 있거나 전력 전달부 또는 소자의 손상이 관찰될 경우 장비의 작동을 금지합니다. 작업자는 절연이 확인된 안전용구를 착용하고 장비 확인에 임해야 합니다.

○ 전원장치 내/외부의 주요 고압 부근에 사용자의 안전을 위하여 안전 커버나 고압 위험 문구가 부착된 곳은 각별한 주의를 기울여야 합니다.

○ 장비내부의 콘덴서는 장비의 전원이 차단된 후에도 잔류 충전이 남아 있으므로 확인 후 점검 작업을 해야 합니다.(전면 전압계기판 확인, 멀티메터로 부위별 확인)

○ 젖은 손이나 땀이 많은 신체 부위로 장비내부와 접촉하지 마십시오.

○ 전기관련 전문지식과 장비운전/점검 내용을 숙지한 작업자만 직접 관리해야 합니다.

기 호			
⚠	전기 감전 위험 주의		인덕터(Inductor, L)
⚠	주의, 경고문	▶|	다이오드(Diode)
⎓	DC (직류)		트랜스포머(Transformer)
~	AC (교류)	⏚	접지(Ground, Earth)
	저항(R)	🌡	온도 관리 포인트
⏛	퓨즈(Fuse)		SCR
⊣⊢	캐패시터(Capacitor)		

1.1. 안전 관련 점검 사항

1.1.1 일반 안전관련

□ 작업자는 절연이 확인된 안전용구를 착용하고 장비 확인에 임해야 합니다.

□ 전원장치 내/외부의 주요 고압 부근에 사용자의 안전을 위하여 고압 위험 문구가 부착된 곳은 각별한 주의를 기울여야 합니다.

□ 장비내부의 콘덴서는 장비의 전원이 차단된 후에도 잔류 충전이 남아 있으므로 확인 후 점검 작업을 해야 합니다. (전면 전압계기판 확인, 멀티메타로 부위별 확인)

□ 젖은 손이나 땀이 많은 신체 부위로 장비내부와 접촉하지 마십시오.

□ 전기관련 전문지식과 장비운전/점검 내용을 숙지한 작업자만 직접 관리해야 합니다.

1.1.2. 전원 관련 주의사항

□ 파워 출력 케이블은 대 전류용 전선이므로 운전 중에 만지거나 흔들지 마십시오.

□ 고압이 걸리는 전선은 임의로 접촉하면 안 됩니다.

□ 점검을 위하여 장비 도어를 여실 때는 차단기를 내린 후에 내부 콘덴서의 잔류 충전전류가 사라진 후(10분 이상, 멀티메타로 확인) 작업해야 합니다.

□ 물기가 많은 상태에서는 건조 후에 작업해야 합니다.

□ 누수가 발생하여 작업할 때에는 분전반에 있는 차단기를 내려야 합니다.

□ 감전사고 예방을 위하여 절연 장갑을 착용하여 주십시오.

□ 신호용의 낮은 전압일지라도 대지전위에 따라 고압으로 작용할 수 있어 위험하니 함부로 만지지 마십시오.

□ 신체의 정전기가 심한 경우에는 제어회로나 입출력 신호선에 닿지 않도록 주의 해야 하며, 작업시에 정전기 밴드(Earth Band)를 착용해야 합니다.

□ 장비의 도어를 개방한 상태에서 운전하지 마십시오.

□ 고온 다습하고 직사광이 내려 쪼이는 장소는 피하십시오.

□ 주광성 벌레나 기타 해충들의 서식이 가능한 상황을 피하십시오.

□ 불규칙 이상 소음이 발생할 시에는 점검을 하여주십시오.

1.1.3. 전기 감전 사고 발생 시 응급 처치

□ 먼저 전원스위치를 내리고 감전자를 안전한 장소로 이동시킵니다.

□ 구급차가 도착하기 전에는 긴급조치사항으로 환자를 관찰한 뒤 의식이 없거나 호흡, 심장의 정지 또는 출혈이 심한 경우 필요에 따라 인공호흡, 심장마사지 및 지혈을 시켜 줍니다.

□ 사고자가 의식을 잃어 감전 부에 계속 접촉하여 감전되는 상황에서는 절대 사고자

를 직접적으로 접촉하면 안됩니다. 함께 감전될 우려가 있습니다. 이 때 사고자를 감전부에서 떨어뜨리는 방법은 즉시 전원을 차단하거나, 바닥 면에서 뛰어올라 한 발로 사고자를 차서 떼어내는 방법 등이 있습니다.

1.1.4. 장비 내,외부 점검

□ 전원장치 내/외부의 통전부 동판의 양극단간 절연거리가 미확보 된 부분이 없는지 점검합니다.

- 전압부 기본 간격 6mm (고 내절연은 10mm 이상)
- 주전원 입력 휴즈 사이의 절연 간격
- 전원 및 신호 케이블의 절연 피복에 스크래치나 벗겨진 부분이 없는지 외관 체크를 합니다.

□ 입력 전력선 연결부에 안전 커버를 확인하십시오.

□ 상황 표시 램프가 작업자의 시야에서 가려진 곳은 없는지 확인합니다.

□ 장비내부의 누수 등으로 인한 누전 위험성을 확인합니다.

□ 접지선의 연결상태가 양호한지 확인합니다.

II. 장비 작동 (OPERATING)

2.1 컨버터 조작

다음은 장비의 설치 이후 최초의 전원 투입절차입니다. 장비에 전원을 인가하기 전 반드시 점검을 실시하고 이상이 없을 경우에 전원 장비의 전원을 인가해야만 합니다. 전기 계통 검사는 전기 안전 교육을 받은 전기 설비 담당자가 안전에 유의하여 점검을 실시합니다.

아래의 항목은 각 단계별로 이상이 없을 경우에 다음 절차로 진행합니다.

2.1.1 전기 계통 점검

① 장비의 모든 스위치가 'OFF'되어 있는지 확인.

② 전기 안전 기준에 부합한 전력라인 공사와 포설이 이루어졌는가.

③ 메인 파워의 선간, 상간, 그라운드 지락 검사

④ 메인 파워의 누전은 없는지 여부 확인

⑤ 메인 파워의 R, S, T 의 상순서가 전원장비의 상순서와 일치하는가?

2.1.2 구성 항목

① 주전원 차단기

② CUSTOMER 의 주전원 3상 440V 표시용 램프

③ CUSTOMER 의 제어전원 3상 380V 표시용 램프

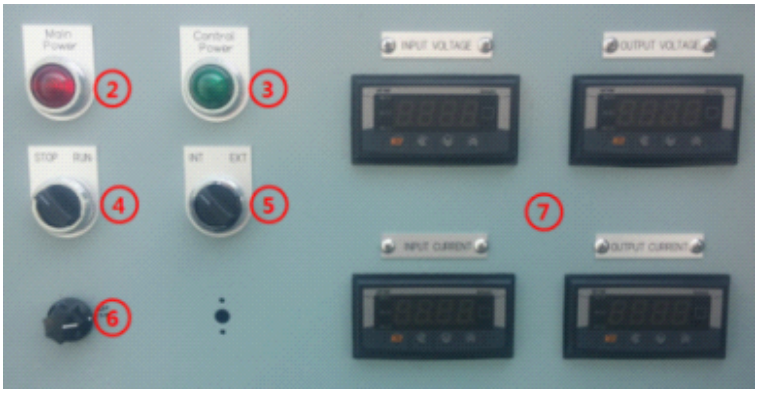
④ 운전/정지 스위치

⑤ 내부/외부 운전 선택 스위치

⑥ 전압 조정용 볼륨

⑦ DC 전압 계기판





2.1.3 부팅 순서

① CUSTOMER의 1차 전원이 투입되어있는지 컨버터 전면부의 SOURCE 램프를 확인한다.

② 전면부의 SOURCE 램프가 꺼져 있으면 1차 전원을 투입한다.

③ 제어전원 차단기를 투입한다.

④ 5초 후 주 전원 차단기를 투입한다.

⑤ 5초 후 배터리 차단기를 투입한다.

2.1.4 운전/정지 순서

① 운전/ 정지 스위치를 운전으로 돌린다.

② 전면 계기판에 DC 전압이 200V까지 상승하는 것을 확인한다.

③ DC 200V가 아니라면 볼륨을 조정하여 전압을 200V로 맞춘다.

④ 배터리 차단기를 투입한다.

⑤ 컨버터 사용이 끝나면 운전/정지 스위치를 정지로 돌린다.

2.1.5 차단 순서

① 배터리 차단기를 내린다.

② 주전원 차단기를 내린다.

③ 제어전원 차단기를 내린다.

④ 컨버터 사용이 끝나면 운전/정지 스위치를 정지로 돌린다.

⑤ CUSTOMER 의 1차 전원을 차단한다. 전면부의 SOURCE 램프가 꺼진 것을 확인한다.

※ 부팅 운전, 정지, OFF 순서는 반드시 준수해야 합니다.

2.2 화면표시장치 작동

2.2.1 구성 항목

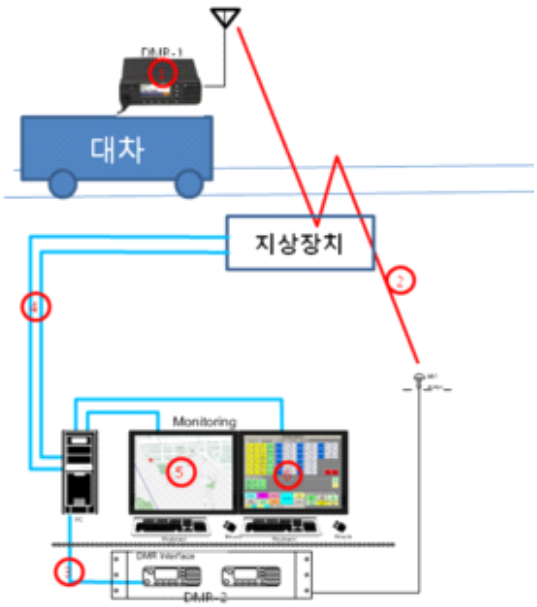
① DRM : GPS 수신장치.

② GPS 정보 수신

③ GPS 수신정보와 표시장치간의 인테페이스

④ 지상장치와 표시장치간의 연동

⑤ 표시장치 모니터.



2.2.2 작동 방법

① 추진력을 설정한다.(0 ~ 100%)

② 다음 정차 위치를 설정한다.(0 ~ 100m)

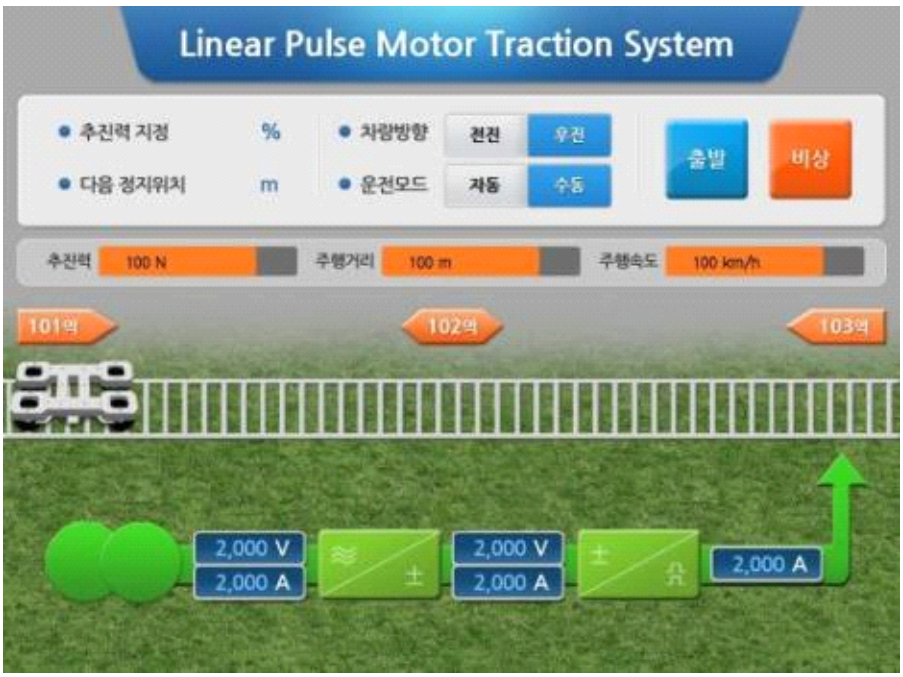
③ 차량방향을 설정한다.(전진, 후진)

④ 운전 모드를 선택한다.(자동, 수동)

⑤ 출발 버튼을 클릭한다.(설정된 추진력 값으로 해당 위치만큼 전진해서 멈춘다.

⑥ 운전 자동모드를 선택하면 101역/ 102역/ 103역을 왔다 갔다 반복하며, 해당역에 잠시정차를 한다.

⑦ 비상은 비상제동, 즉 정지를 지상장치에 요청한다.



III. 유지/관리(MAINTENANCE)

3.1 관리 및 점검 항목

컨버터의 관리 및 점검은 반드시 1차 전원을 차단한 후 실시한다.

항목	월간 점검	년간 점검	작업내용 및 관리 기준
도어의 결속부위		○	도어의 개스킷과 접지라인 확인
볼트 체결상태		○	록타이트 확인. 필요시 조임.
신호선의 배선 풀림		○	배선 결속이 느슨하거나 빠진 것은 없는가
전기 소자의 체결상태		○	볼트, 블록의 고정이 안정적인가
컨트롤보드의 컨넥션		○	센서 커넥션, 신호 라인의 체결상태
신호선의 상태	○		신호선이 꺾인 부위, 피복이 벗겨진 부위
냉각팬, 필터 청소	○		냉각팬, 필터의 먼지 제거
금속 먼지	○		코일 주변의 호스나 물체에 금속 먼지막이 형성되면 전원이 일어날 수 있으므로 항상 청결히 유지함.
내부 청소	○		금속 먼지의 유입은 장비의 장애를 일으키므로 진공청소기 등을 이용하여 청소함.

			※ 에어 분사금지
출력 BUSBAR	○		체결상태가 좋은가
이물질 제거	○		이물질, 곤충 서식 제거

(2) Battery 유지보수 매뉴얼(Sopra UPB)

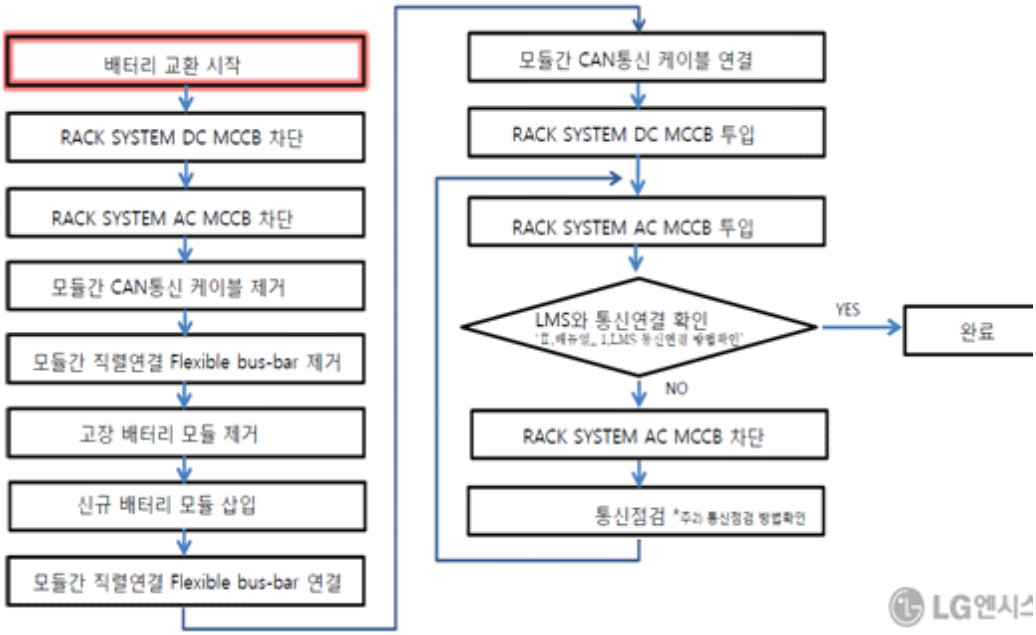
Ⅰ. 유지보수

1. 배터리 교환

정전 시 백업용으로 사용되는 배터리는 고장발생시 교환이 필요합니다. UPB RACK SYSEM에서 배터리를 1개라도 제거 시 백업회로에 문제가 발생되므로 가능한 빠른 시간 내에 교환해주어야 합니다.

순서는 다음과 같습니다.

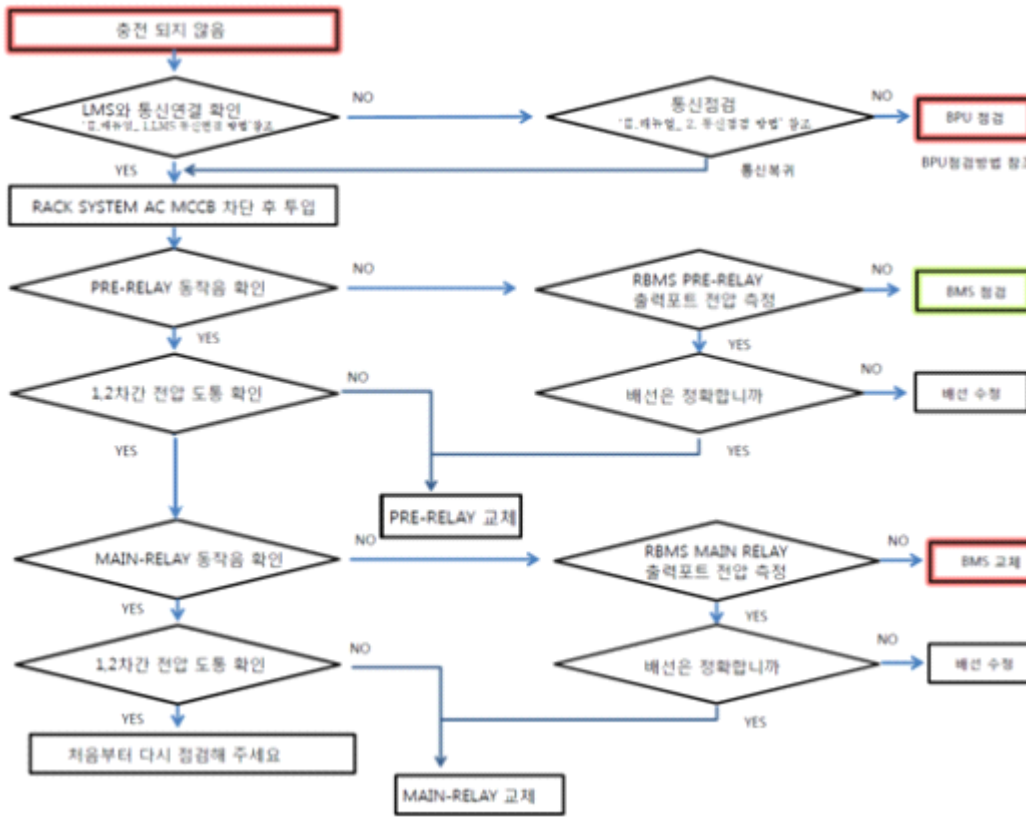
※ 배터리 교체 전 신규배터리는 반드시 기존 RACK SYSTEM의 정상배터리와 전압을 동일하게 맞춰야 함. → Portable Charger 이용



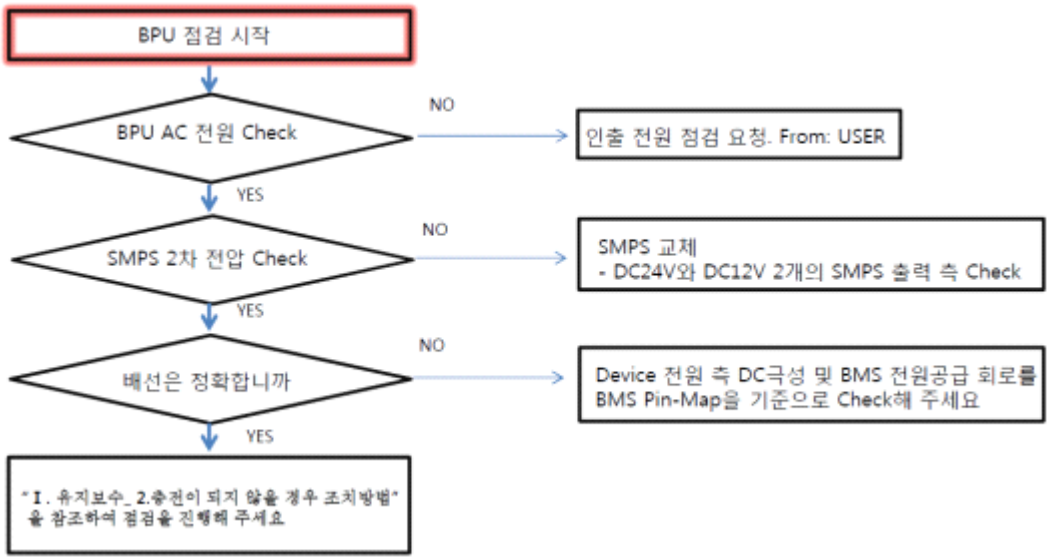
2. 충전이 되지 않을 경우 조치방법

충전이 진행 되어야 할 상황에서 충전이 되지 않을 경우 조치방법 순서입니다.

※ BMS교체가 필요한 상황에서의 차후 조치는 LG엔시스 엔지니어의 기술지원이 필요합니다!



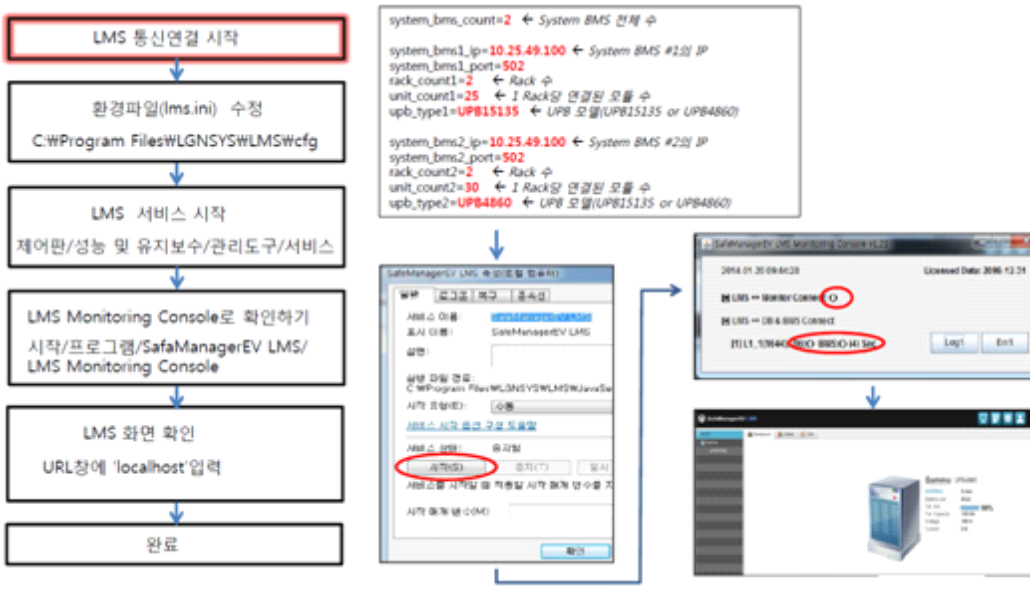
3. 충전이 되지 않을 경우 조치방법_BPU



II. 매뉴얼

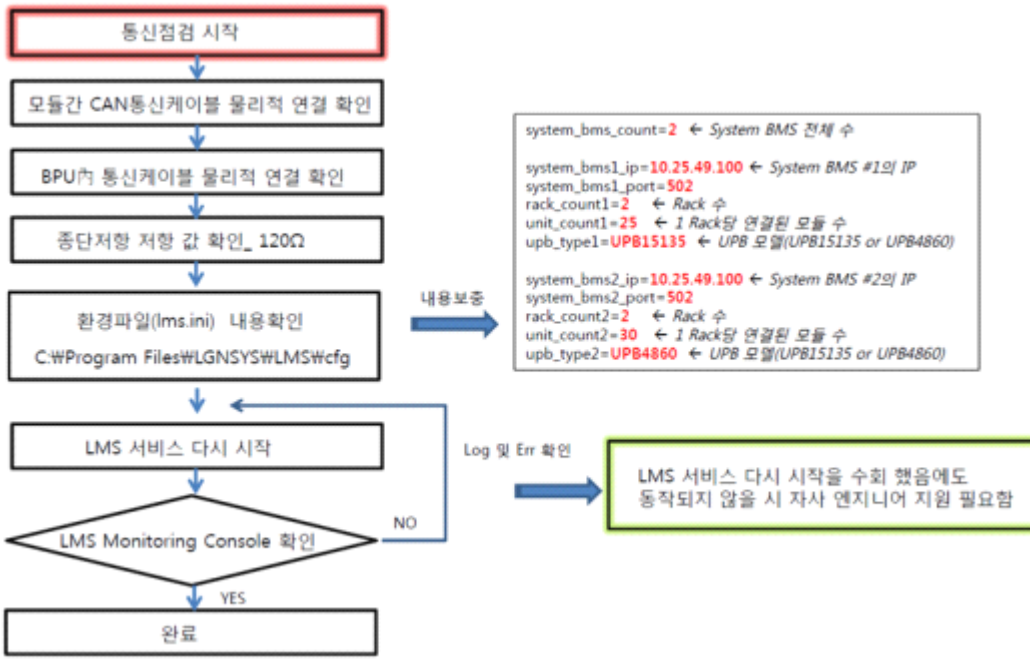
1. LMS 통신 연결방법

LMS Start-up에 대한 순서입니다.



1. LMS 통신 점검방법

통신연결이 되지 않을시 조치순서입니다.



III. 별첨

1. LMS LOG Data 취득

BMS 및 LMS 이상발생시 원인분석을 위한 Log Data 취득 순서 입니다.



2. Sopra UPB 정기점검 기준서

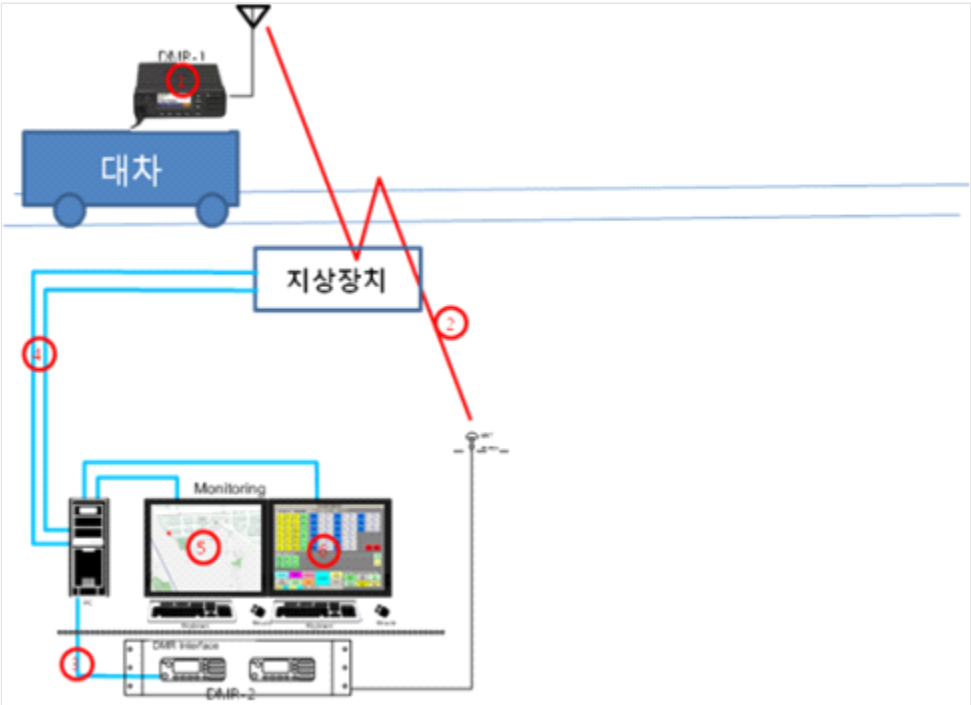


PART	도해	점검항목	점검기준	점검도구	점검방법	비고
LMS	3	전압	System, RACK, MODULE 표시 전압 확인	LMS	육안점검	기록 후 실측값과 비교
		온도	MODULE별 온도 확인(편차10℃ 이내)	LMS	육안점검	
MCCB	1	상태	투입상태 일 것		육안점검	
단자대	2	온도	상간 온도차 5℃ 이내	열화상 카메라	계측기 점검	
		전압	AC : 공급전압±7% DC : UPS Float 전압과 동일	테스터기	계측기 점검	AC,DC 각각 측정, LMS값과

			(±계측기 편차%)			비교할 것
배터리	4	온도	상대 온도차5℃ 이내	열화상 카메라	계측기 점검	배터리단자커버 OPEN 후 측정
		전압	LMS와 전압 편차 : ± 계측기 편차%	테스터기	계측기 점검	MODULE별 측정
		상태	누액 및 파손되지 않을 것		육안점검	

(3) 표시장치 운용 매뉴얼

① Server 구성



- 구성 세부 항목

① DMR : GPS 수신 장치

② GPS 정부 수신

③ GPS 수신정보와 표시장치간의 인터페이스

④ 지상장치(convert/invert) 와 표시장치간의 연동

⑤⑥ 표시장치 화면

② 프로그램의 기동 방법

i) Config.ini 파일을 OPEN 하여 serial port 번호를 맞게 설정한다.

=== comport 번호 설정

COMP_PORT=com4

Comport 정보는 내컴퓨터 → 속성 → 하드웨어/장치관리자 → 포터 정보에 USB serial 정보가 나와 있다.

ii) Winserial.exe 를 실행한다.

iii) LPMTS.exe를 실행한다.

③ 표시장치 운영방법



i) 표시장치 작동 방법 (자동 수동운전)

- 수정 버튼을 누른다.
- 추진력값을 설정한다.(0 ~ 100%)
- 다음 정차 위치를 설정한다.(0 ~ 100m)
- 차량방향을 설정한다.(전진, 후진)
- 운전 모드를 선택한다.(자동, 수동, 매뉴얼)
  - 출발 버튼을 클릭한다.(설정된 추진력 값으로 해당 위치만큼 전진해서 멈춘다)

• 운전 자동모드를 선택하면 101역/ 102역/ 103역을 왔다 갔다 반복하며, 해당역에 잠시정차를 한다.

• 비상은 비상제동, 즉 정지를 지상장치에 요청한다.

ii) 표시장치 작동 방법 (매뉴얼 운전)

- 운전 모드에서 매뉴얼 모드를 선택한다.
- 작은창이 팝업된다.
- 오토 전후진, 매뉴얼 파형 선택을 할 수 있다.
- 출발 버튼을 눌러서 차량을 운전한다.

iii) 제동거리 설정



- 프로그램에서 마우스 오른쪽 버튼을 클릭한다.
- 제동거리 설정 메뉴를 선택한다.
- 수정버튼을 눌러서 제동거리를 수정한다.
- 저장 버튼을 눌러서 제동거리 변경값을 저장한다.

ⅳ) 프로그램의 종료

- 프로그램에서 마우스 오른쪽 버튼을 클릭한다.
- 종료 버튼을 선택하여 프로그램을 종료한다.

ⅴ) 표시장치 표시 내용

- 지상장치에서 수신된 정보를 이용하여 추진력, 주행거리, 주행속도 입력전압/전류, invert 전압/전류, convert 전압/전류를 표시장치에 표시한다.
- 지상장치(convert/invert)에서 장애가 표시되면 지상장치의 녹색 color가 적색으로 변하여 장애를 표시 한다.

④ 지상장치와 표시장치간의 프로토콜

지상장치(인버터)와 표시장치간의 프로토콜을 정의한다.

ⅰ) 하드웨어 정의

- 통신 방식 : UART 38400,8,1,n
- 드라이브 : RS485 4wire
- Pin Assignment :

Pin 번호	표시장치	인버터	사용컨넥터	비 고
1번	RX+	TX+	SMW200-04	
2번	RX-	TX-		
3번	TX+	RX+		
4번	TX-	RX-		

- 통신 주기
- Max 200msec

ⅱ) 데이터 정의

- 정보 요청 및 명령(표시장치 → 인버터)

시작문자	코맨드	명령 데이터	끝 문자	체크섬
0x02	'R'		0x03	
1byte	1byte	11byte	1byte	1byte

* 체크섬은 시작문자와 끝문자를 제외하고 코맨드와 데이터를 더하고 남은 나머지

값이다.

- 명령 데이터 Format

출발/정지 명령	추진력 지령값		정지위치		차량 방향	비상제동 명령	INV 알람 clear
1 : 출발 0 : 정지	6	4	5	F	0 : 전진 1 : 후진	1 : 비상 0 : 정상	1 : clear
ASCII값 0x31 or 0x30	Ex) 100% Hex값 => 0x64 ASCII : 0x36 0x34		Ex) 95m Hex값 => 0x5F ASCII : 0x35 0x46		ASCII값 0x30 or 0x31	ASCII값 0x31 or 0x30	ASCII값 0x31 or 0x30
1byte	2byte		2byte		1byte	1byte	1byte
총 8byte							

- 추가 항목

기존 명령 데이타 Format에서 추가항목 3byte 추가

자동운전/ 매뉴얼운전	오토 전/후진 매뉴얼 파형진행	매뉴얼 파형값
1 : 자동운전 0 : 매뉴얼운전	1 : 오토 전/후진 0 : 매뉴얼 파형진행	0 : A상, 1 : B상 2 : /A상, 3 : /B상
ASCII값 0x31 or 0x30	ASCII값 0x30 or 0x31	ASCII값 0 ~ 3
1byte	1byte	1byte
총 3byte		

- 동작설명

가장 먼저 표시장치에서 자동운전/매뉴얼 운전을 선택함

• 자동운전 선택시

▷ 기존의 표시장치의 운행명령에 따른 자동운전모드/수동운전모드를 수행함

▷ 여기서 자동운전모드는 정해진 자동 운전영역 구간을 자동으로 1회 왕복 운행함.

▷ 그리고 수동운전 모드는 현 위치에서 표시장치에 표시된 정지 위치까지 1회 운행함.

• 매뉴얼 운전 선택시

▷ 기존 표시장치의 운행명령을 무시하고 다음명령인 오토 전/후진,매뉴얼 파형진행 명령과 매뉴얼 파형값, 그리고 기존 명령인 출발/정지 명령과 추진력 지령값, 전

진/후진 명령에 따라서 완벽한 매뉴얼 조작이 가능하도록 함.

• 조작 순서

추진력 0 셋팅, 출발/정지 에서 정지 선택을 한 후

▷ 매뉴얼 운전 선택 후 → 전진/후진 선택 → 출발선택 → 추진력(전류값)선택 → A

▷ A → 오토 전/후진 선택시 → 자동으로 전진 또는 후진함

▷ A → 매뉴얼 파형진행 선택시 → 매뉴얼 파형값에 따른 전류파형이 일정하게 출력됨.

- 정보 응답(인버터 → 표시장치)

시작문자	코맨드	응답 데이터	끝 문자	체크섬
0x02	r		0x03	
1byte	1byte	byte	1byte	1byte

* 체크섬은 시작문자와 끝문자를 제외하고 코맨드와 데이터를 더하고 남은 나머지 값이다.

- 응답 데이터 Format(총: byte)

AC 입력전압				AC 입력전류				컨버터 출력전압			
0	1	F	4	0	3	E	8	0	0	C	8
Ex) 500V Hex값 => 0x01F4 ASCII : 0x30 0x31 0x46 0x34				Ex) 1000A Hex값 => 0x03E8 ASCII : 0x30 0x33 0x45 0x38				Ex) 200V Hex값 => 0x00C8 ASCII : 0x30 0x30 0x43 0x38			
4byte				4byte				4byte			

컨버터 출력전류				추진 코일 전류				추진력 지령값	
0	7	D	0	0	7	D	0	6	4
Ex) 2000A Hex값 => 0x07D0 ASCII : 0x30 0x37 0x44 0x30				Ex) 2000A Hex값 => 0x07D0 ASCII : 0x30 0x37 0x44 0x30				Ex) 100% Hex값 => 0x64 ASCII : 0x36 0x34	
4byte				4byte				2byte	

차량위치	컨버터 알람	인버터 알람	INV_OV	INV_OC	Conv_UV
3 2	1 : 알람 0 : 정상	1 : 알람 0 : 정상	1 : 알람 0 : 정상	1 : 알람 0 : 정상	1 : 알람 0 : 정상
99.9m = 999 ASCII값 0x3E7	ASCII값 0x31 or 0x30	ASCII값 0x31 or 0x30	ASCII값 0x31 or 0x30	ASCII값 0x31 or 0x30	ASCII값 0x31 or 0x30
4byte	1byte	1byte	1byte	1byte	1byte
총 29byte					

3.5. LPM 추진시스템 실용화 검토

3.5.1. 철도종합시험선로 Test-Bed 구축(안)

3.5.1.1. 종합시험선로 현황

가. 건설목적

철도 핵심 분야별 부품단위,구조단위 성능평가와 구조간 인터페이스 성능평가가 가능한 철도 종합시험선로 건설하고, 국내·외 적용 및 개발 중인 철도차량/철도용품/시스템의 요구 성능평가에 대한 현장부설 시험을 통한 검증으로 국제 경쟁력 확보

(1) 과업기간

2014.09월 ~ 2018.12월(51개월)

(2) 건설위치

충청북도 청주시 흥덕구 오송읍~세종특별자치시 전동면 일대

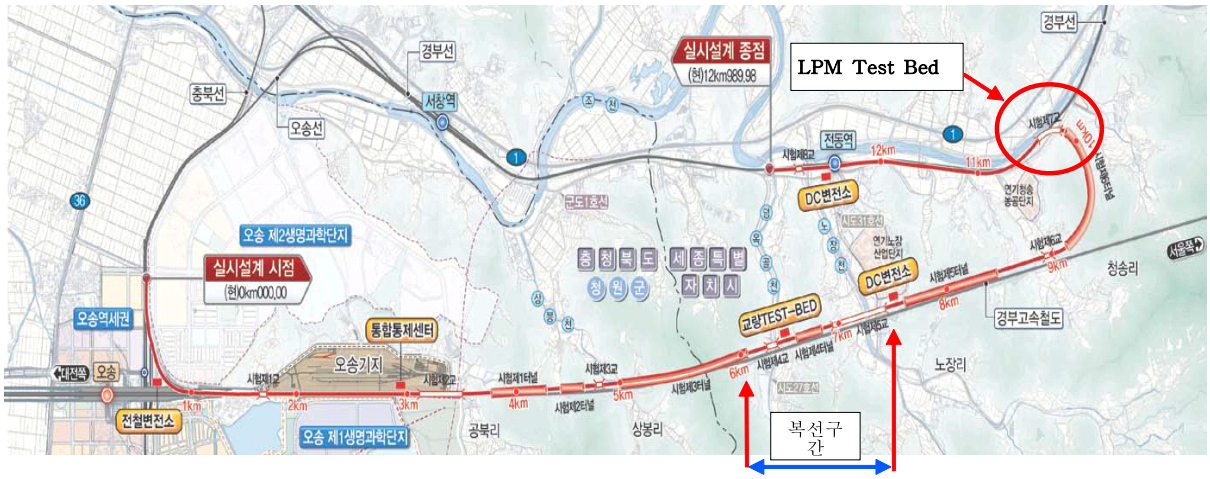
(3) 예정공정표(2015.6월 기준)

구 분	추 진 일 정								
	14년	15년		16년		17년		18년	
	상반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
토공공사		■	■	■	■	■	■	■	■
교량공사			■	■	■	■			
터널공사			■	■	■	■	■		
궤도공사							■	■	■
전력공사							■	■	■

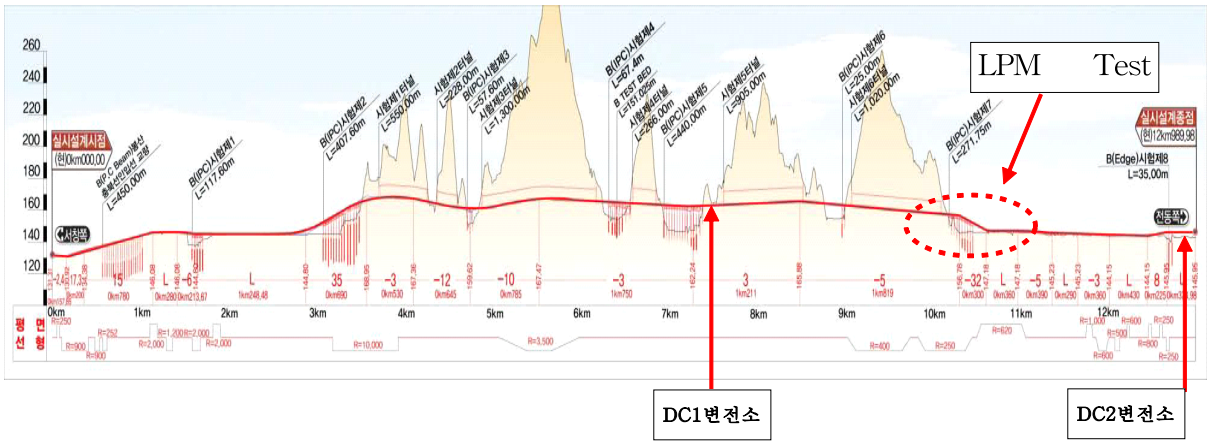
나. 시험선로 노선

(1) 철도종합 시험선로 노선도 및 변전소 위치

① 철도종합 시험선로 평면도



② 철도종합 시험선로 종단면도



③ 철도종합 시험선로 노반구성

구 분		현황
노선연장		12km990
선형조건	최소곡선반경	R=250m
	최급기울기	35‰
노반구성	토공	7km124
	교량	1km597(8개소)
	터널	4km269(6개소)
복선구간	시험4교,시험4터널, 시험5교	6km322~7km722

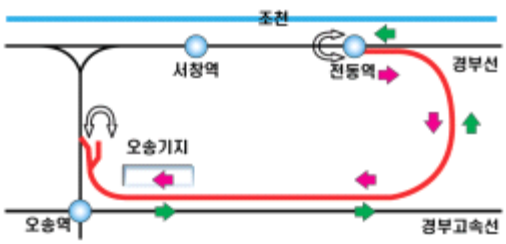
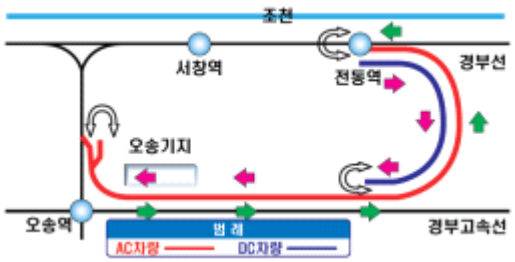
(2) 급전방식 및 열차운행 패턴

① 급전방식



- DC차량 및 DC급전설비 시험이 모두 가능한 구간 선정
- AC급전 시험에 영향을 최소화 할수 있는 구간 선정
- DC 1500V급전설비를 기반으로 DC 750V급전설비 설치공간 확보 됨

② 철도종합 시험선로 열차운행 패턴

고속,일반철도 차량(AC차량)	도시철도 차량(AC/DC차량)
	
-AC급전구간:시점에서 종점부까지	-DC급전구간:6km700~종점부까지 -DC변전소 위치:7km540, 12km530

3.5.1.2. 철도종합시험선로내 궤도구조물

가. 궤도구조물 검토

장래 확장성과 현장부설시험을 위한 시험대상체로의 교체 용이성, 기존선과의 연계성 등을 고려하여 전구간을 자갈궤도로 부설하며, 콘크리트궤도상 시험대상체의 추가 시험이 가능하도록 토공 및 터널 일부 구간에 한해 콘크리트 궤도를 부설하였다.

나. 부설 궤도 현황

(1) 궤도구성 현황

구 분	규 격	연 장	비 고
궤도	자갈궤도	12.716㎞	
	콘크리트궤도	0.270㎞	Rheda2000
	핏트(H-Beam도상)	0.004㎞	과업 종점부(TS-04)
분기기	50㎏,60㎏		TS-01~04, 오송기지 인입선
시험대상체	본선(250㎞/h이상)구간	0.900㎞	

(2) 궤도설계 기준

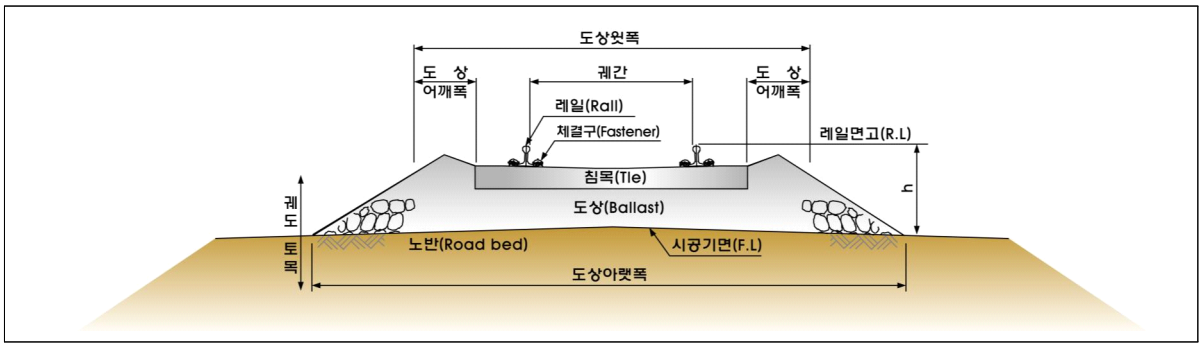
구 분	설계기준	구 분	설계기준
설계속도	・250㎞/h이상 ・구간별 통과속도 반영	궤도시공 높이	・200 < V ≤ 350 : 750㎜ ・120 < V ≤ 200 : 680㎜ ・70 < V ≤ 120 : 630㎜
곡선반경	・본선 최소곡선반경 : 250m ・고속대역구간 : R=3,000m이상 ・저속대역구간 : R=3,000m이상	FPDLF	・본선 200㎞/h이상 : UIC60 ・본선 200㎞/h미만 : KR60 ・측선 : 50㎏N I형
선로기울기	・최급기울기 : 35‰	도상	・자갈도상,콘크리트도상
캔트	・$C = 11.8 \times (V^2 / R) - C'$ V:열차최고속도(㎞/h), R:곡선반경(m) C′ :캔트부족량		

다. 자갈궤도와 콘크리트궤도(Rheda2000) 구조

(1) 궤도구조의 정의 및 요구조건

① 궤도구조 정의

궤도구조는 레일, 침목, 체결장치 등의 궤광과 도상(유도상, 무도상)이 일체화 및 상호작용으로 차량을 직접적으로 지지하는 구조물로서 열차하중을 노반구조물(토공, 터널, 교량)에 광범위하고, 균등하게 전달하는 기능을 수행한다.



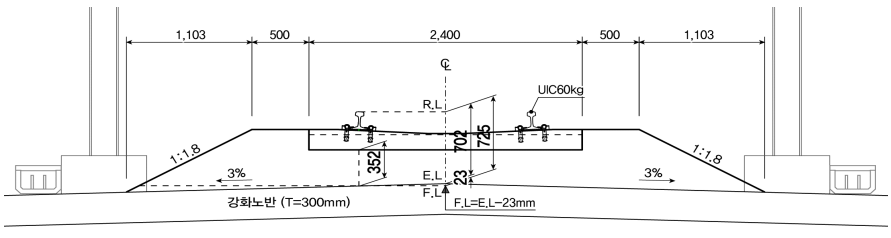
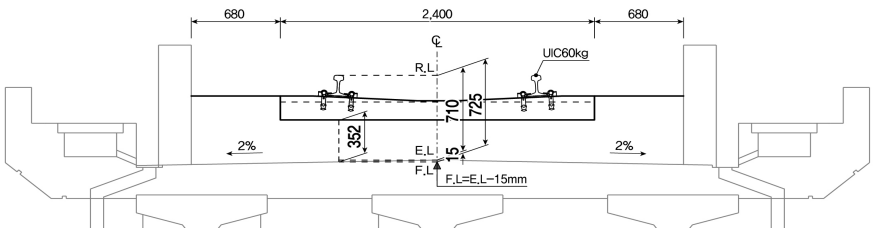
[자갈도상 궤도구조물]

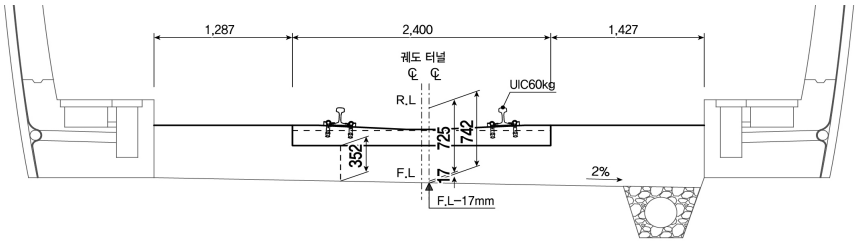
② 궤도구조 요구조건

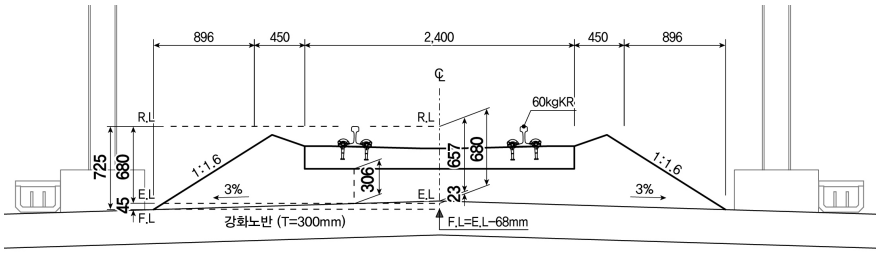
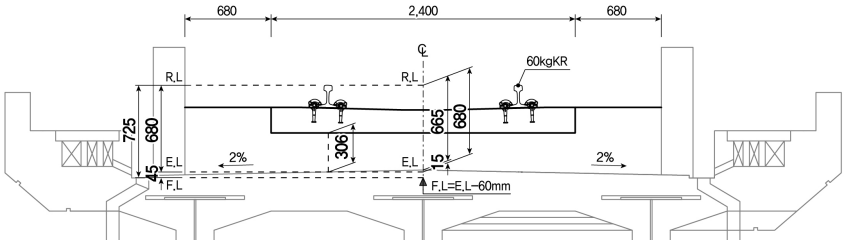
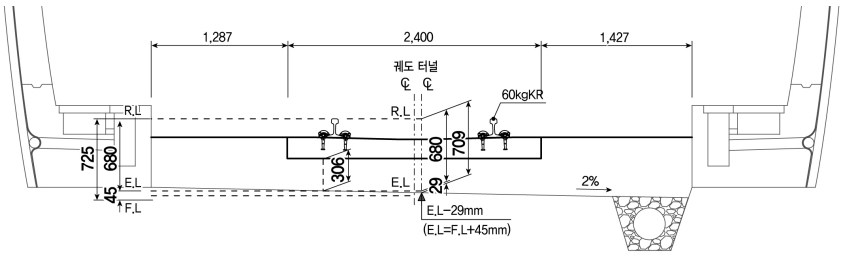
- 열차의 각종 하중을 충분히 견딜 수 있는 내구성 확보
- 각종 시스템(신호회로)이 악천후 조건에서도 기능 유지
- 차량 운행시 동요와 진동이 적고 승차감 확보
- 유지보수가 용이하고 구성 재료의 교환이 간편해야 함.
- 궤도틀림이 적고 열화진행이 완만해야 함.
- 서비스 수명이 길고 경제성이 있어야 함.

(2) 궤도 표준단면도

① 자갈도상 표준단면

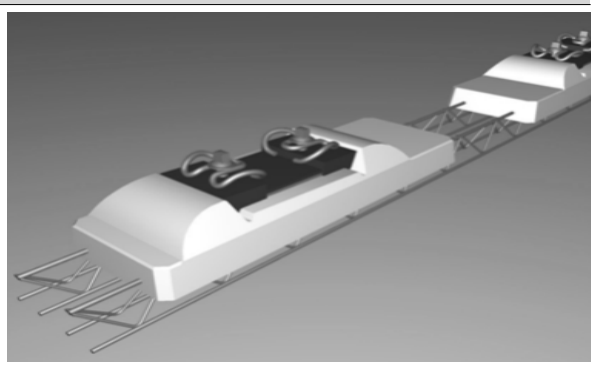
구 분		자갈도상 표준단면도
UIC60 (200km/h이상구간)	토공	
	교량	

	터널	

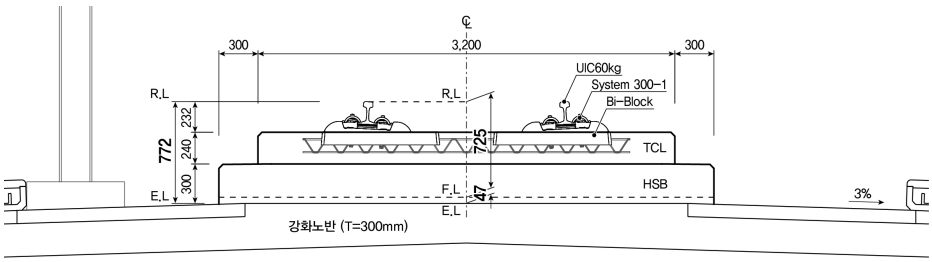
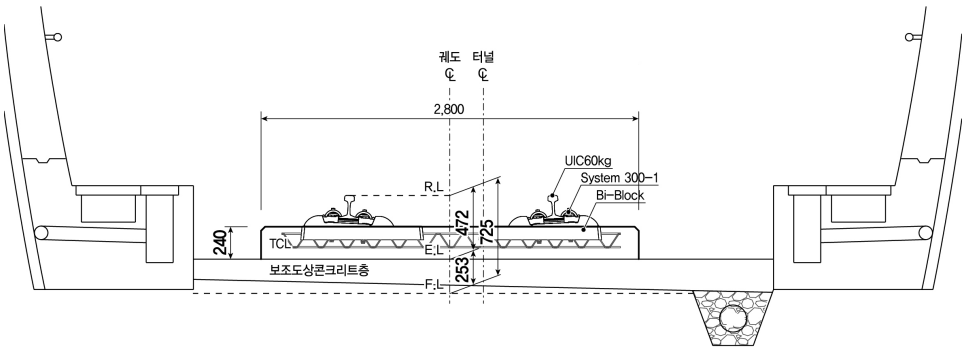
구 분		자갈도상 표준단면도
60kgKR (200km/h미만)	토공	
	교량	
	터널	

② 곤크리트 궤도 표준단면

·Rheda2000 콘크리트 개요도

‘Rheda2000 궤도 부설전경	Rheda2000용 Bi-Block 침목 형상
	

·Rheda2000 콘크리트 개요도

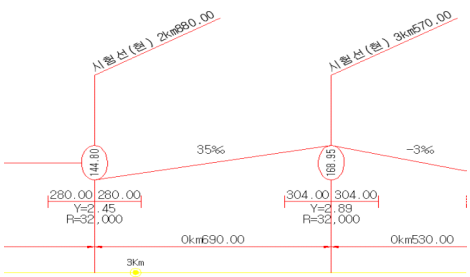
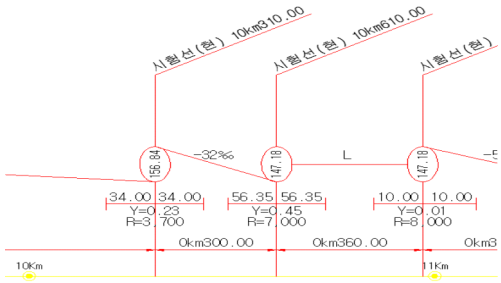
구 분	콘크리트도상 표준단면도
토공구간	
	• 적용구간 : 토공(2km855~2km990, L=135m) • Bi-Block침목(Rheda2000용)+System300-1 • HSB(fck=12MPa) : h=300㎜, TCL(fck=30MPa) : h=240㎜, 단선시공 • 종철근비 : 0.8~0.9%
터널구간 (시험 제5터널)	
	• 적용구간 : 시험제5터널(7km675~7km810, L=135m) • Bi-Block침목(Rheda2000용)+System300-1 • TCL(fck=30MPa) : h=240㎜, 단선시공 • 종철근비 : 0.4~0.5%

3.5.1.3. LPM 시험차량을 위한 Test-Bed 선정

가. 구배기동시험을 위한 구간 선정

(1) 구배기동시험을 위한 종단기울기 및 전원공급 용이성 검토

① 구배 35‰구간과 32.2‰구간 비교

구분	구배 35‰ 구간	구배 32.2‰ 구간
구배		
특징	・종단기울기 35‰ 및 직선구간 ・위치 : 2km880 ↔ 3km570 ・단선구간 ・콘크리트궤도구간(2km855~ 2km990)	・종단기울기 32.2‰ 및 곡선저항 700/250(32.2 + 700/250 = 35‰) ・위치 : 10km310 ↔ 10km610 ・단선구간 ・자갈궤도구간

② 35‰구간과 32.2‰구간의 전원공급 거리 비교

구분	구배 35‰ 구간	구배 32.2‰ 구간
전원 공급 거리	・154kV변전소와 거리 : 2km544 ・DC1변전소와 거리 : 4km315 ・DC2변전소와 거리 : 9km305	・154kV변전소와 거리 : 9km779 ・DC1변전소와 거리 : 2km920 ・DC2변전소와 거리 : 2km070
변전 설비 위치	・154kV변전소 위치 : 0km681 ・DC1변전소 위치 : 7km540 ・DC2변전소 위치 : 12km530	

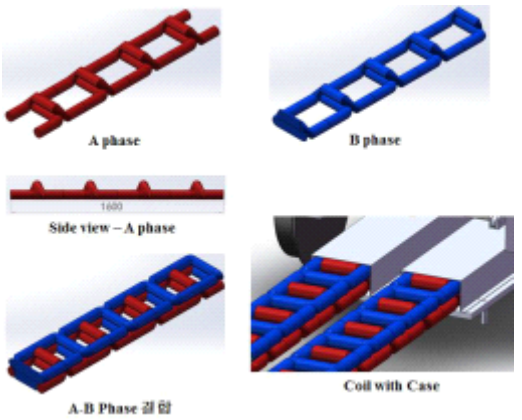
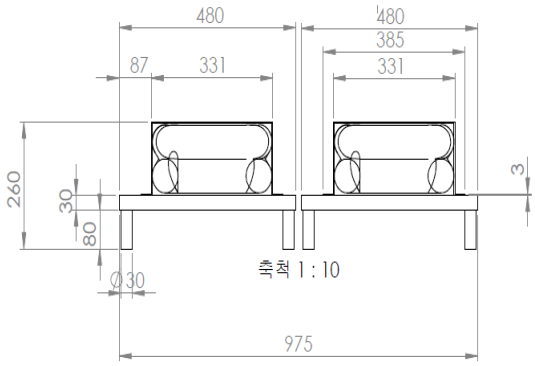
(2) 결론

35‰구간은 LPM차량 구배기동시험을 위해서는 최급기울기로 최적이나, 전원공급 거리가 구배 32.2‰구간에 비해 약 474m 더 떨어져 있어 Test-Bed을 32.2‰구간으로 설정함

나. 지상코일과 궤도구조물간 간섭 검토

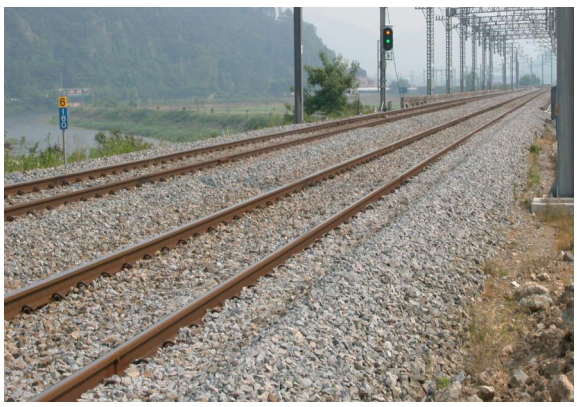
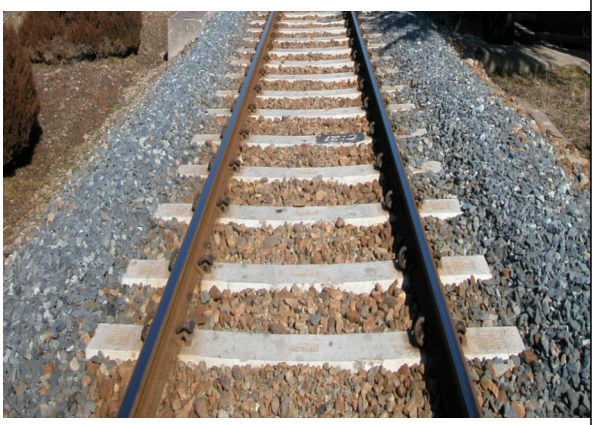
(1) 자갈도상 및 콘크리트도상과 지상코일간 간섭 검토

① 지상코일 세부구조

2상2열 지상코일	
	

② 자갈도상 궤도

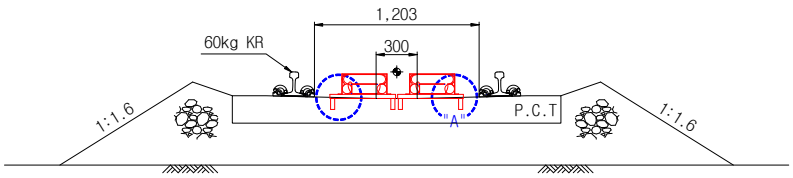
자갈도상 궤도구조는 목침목, P.S강선이 내재된 P.C침목, 다양한 체결장치의 적용이 가능한 광폭침목 상에 50kg, 60kg, UIC60등의 레일을 코일스프링클립 등의 체결장치로 체결하는 형태로 국내/외 광범위하게 사용되고 있는 전통적인 궤도구조이다.

[자갈도상 궤도구조물 사진]

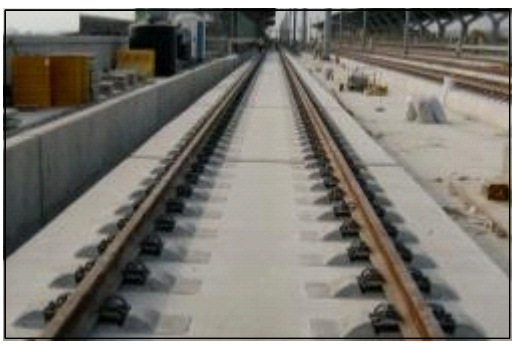
아래그림(a)와 같이 P.C침목 중앙부에 지상코일을 설치하게 되면 지상코일부과 양 레일 최내측의 코일스프링클립(레일체결장치)의 상호 간섭이 발생되지 않아 형상 변경 없이 적용 가능하다. 그러나 P.C침목은 침목중앙에서 150mm 이격한 지점부터 적용 레일에 따라 UIC60레일은 1:20, 60kg레일은 1:40의 경사각을 지닌 상태로 제작되기 때문에 그림 (b)와 같이 지상코일을 침목 중앙부에 설치할 경우 지지하는 외측 앵커볼트가 경사부에 매립된다. 따라서 P.C침목에

코일을 설치할 경우 지상코일 하단의 형상을 침목 경사각에 맞춰 수정제작하거나, 스프링와샤, 너트등을 활용하여 코일지지대와 P.C침목을 일정간격이상 이격시켜 앵커볼트를 체결하여 한다.

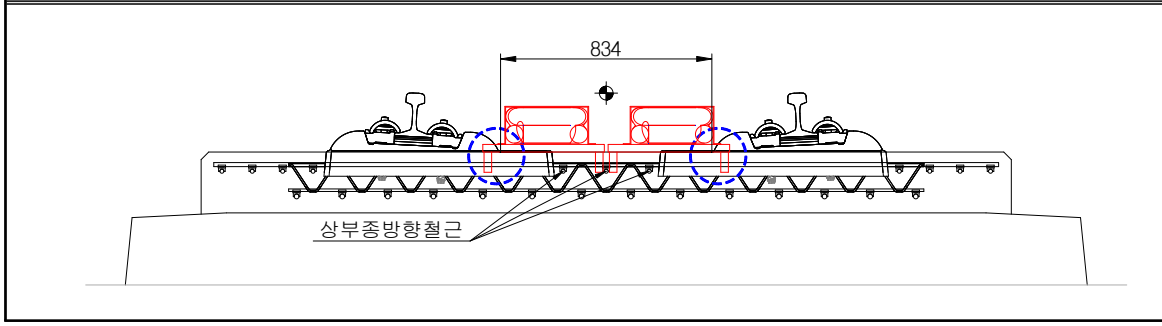
(a) 지상코일 설치단면	(b) 단면상세 "A"
	

③ 콘크리트도상 궤도(Rheda2000)

Rheda2000궤도구조는 독일의 RHEDA역에 640m 연장에 걸쳐 콘크리트궤도를 설치하여 오늘에 이르도록 3억 5천만 톤 이상의 누적 통과톤수를 기록하면서 레일연삭 작업 외에 특별한 보수작업 없이 유지되고 있으며, 기능과 시스템구조 및 시공방식이 꾸준한 투자와 연구에 힘입어 개발과 개량이 성공적으로 이루어져 온 궤도구조이다.

구 분	RHEDA2000 궤도구조 (침목매립 현장타설식)
시공사진	 
체결장치	• System300-1 체결장치
주요특징	• 래티스(Lattice)거더로 연결된 Bi-block침목을 연속 철근보강 콘크리트 슬래브에 매립 후 현장 타설하여 일체화하는 공법.
부설사례	• 대만, 독일, 중국고속철도(국외) 및 호남고속철도(국내)

지상코일 설치단면 (RHEDA2000 궤도)



Rheda2000궤도구조의 경우 궤도 중앙부에 지상코일을 설치하게 되면 위 그림과 같이 Bi-Block침목의 돌출부와 지상코일 외측과의 간섭이 총 141mm 발생하여, 제작되는 형상(안)으로는 적용이 불가할 것으로 사료되므로 코일부의 크기를 Bi- Block침목과 간섭되지 않는 780mm이하로 제작해야 설치가 가능할 것이다. 또한 Bi-Block침목사이의 도상콘크리트층 상부에는 콘크리트 균열을 억제하기 위한 3개의 상부 종방향 철근이 래티스거더와 연결되어 있어 코일형상 변경 및 축소 제작 시 상부 종방향 철근과 저촉이 되지 않고 피복두께 확보가 가능토록 앵커볼트의 체결위치 및 직경등이 수정/변경되어야 할 것이다.

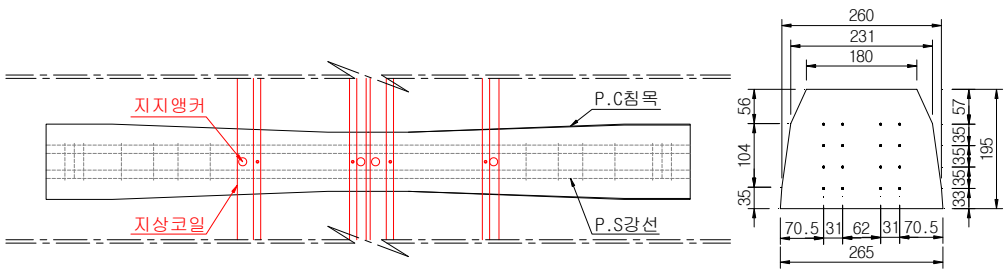
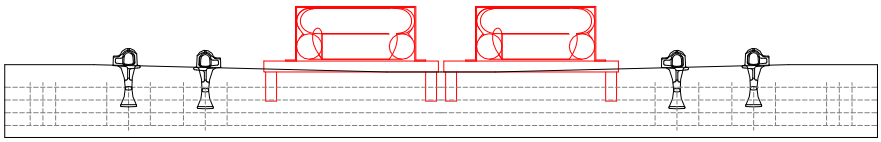
(2) 결론

자갈궤도(P.C침목)과 콘크리트궤도(Rheda2000)의 지상코일과 레일체결장치 및 침목과의 간섭여부를 검토한 결과 자갈궤도는 레일체결장치 및 침목간 거리가 1,203mm로 지상코일의 형상축소 없이 설치가 가능하나, 콘크리트궤도는 레일체결장치 및 침목간 거리가 834mm로서 간섭없이 지상코일을 설치하기 위해서는 코일형상을 축소(780mm)하여야 한다.

다. 지상코일 지지앵커와 P.S강선 및 철근 간섭 검토

(1) 자갈도상 P.C침목

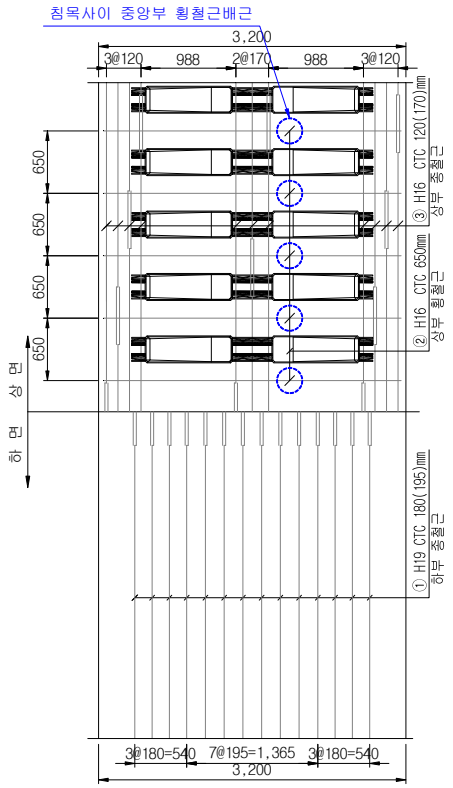
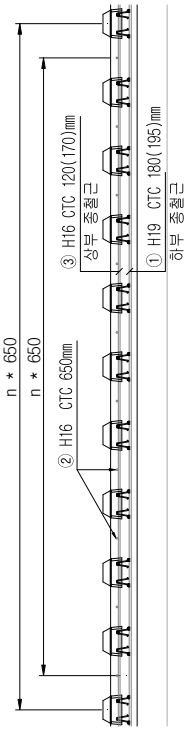
P.C침목은 콘크리트 침목에 철근 대신 프리스트레스를 가한 P.S강선을 내장함으로서 차량하중에 대한 인장력 및 휨저항력을 향상시킨 침목으로 현재 국내 부설되는 50kg, 60kg P.C침목은 Ø2.9mm×3연선의 강선이 침목 중심부에 총 16개로 배열되어 제작된다. LPM추진시스템을 자갈도상에 적용하려면 앵커볼트등을 사용하여 지상코일을 P.C침목에 견고히 고정시켜야 하나, P.S강선이 촘촘히 배치되어 있어 상호간에 저촉되지 않도록 매립위치 및 적용방식등이 결정되어야 한다.

구분	자갈궤도 60kg용 P.C침목
평면도	
단면도	

앵커볼트 직경이 30mm인 지상코일(안)을 P.C침목 중심부에 설치하기 위해서는 위 그림과 같이 침목 정중앙 62mm 틈새에 일렬로 앵커를 매립해야 지장없이 적용되는 것으로 확인되었다. 그러나 지지앵커와 내측 P.S강선과의 이격거리가 16mm로 콘크리트 침목 중앙부 균열 및 전단파괴 방지등을 종합적으로 검토하여 P.C침목의 구조적 안정성이 확보되는 범위에서 앵커의 직경을 축소하는 방안이 필요할 것으로 사료된다.

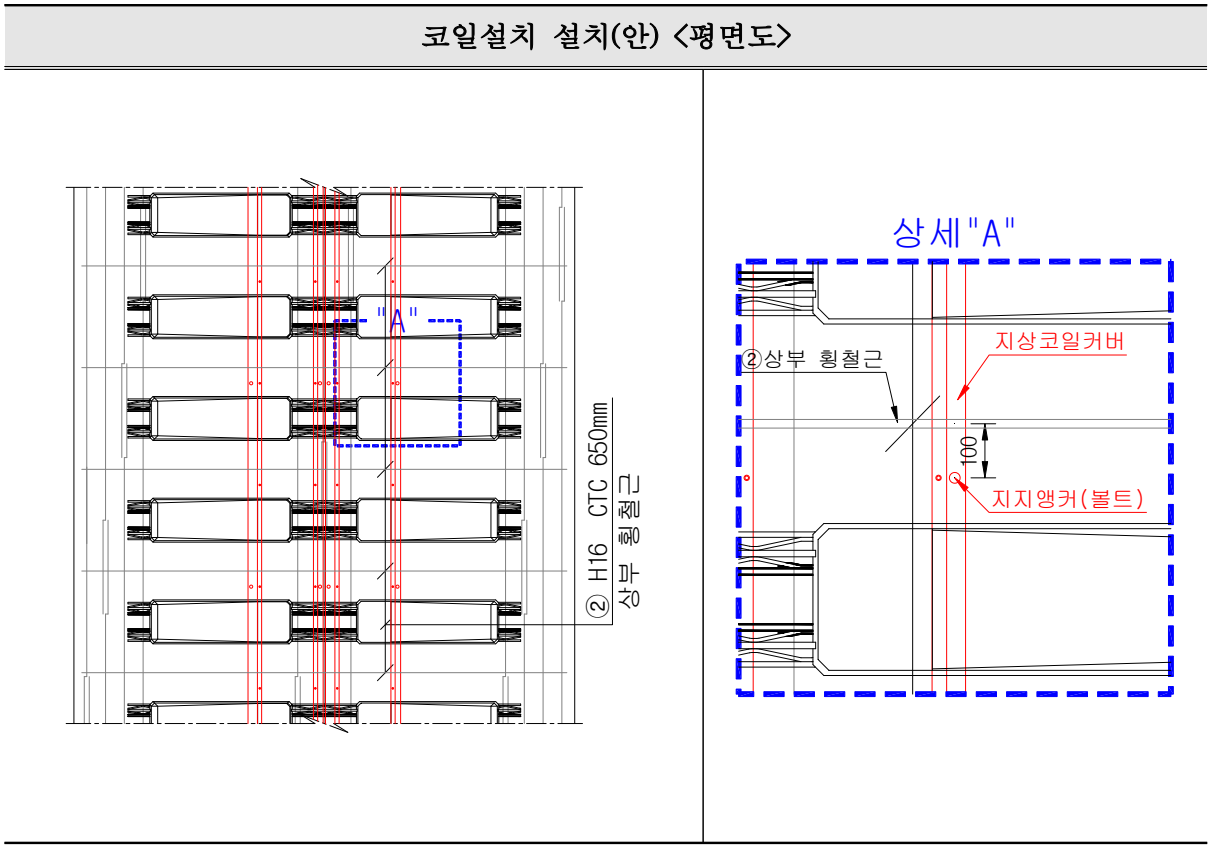
(2) 현장타설형 콘크리트 궤도

현장에서 직접 타설되는 간접매립식과 침목매립식 콘크리트궤도는 온도하중과 수직 및 종/횡방향 하중에 따른 균열억제를 위해 도상콘크리트층(Track Concrete Layer)에 종/횡방향 철근이 격자식으로 배근되어 있어, 지상코일 앵커매립 시 배근된 철근과의 저촉을 피해 설치해야 한다. 종/횡방향 철근과 앵커와의 저촉발생여부 검토를 위해 경부고속철도/호남고속철도등 국내 및 국외의 부설실적이 있고, RHEDA2000, KCT-Ⅱ궤도시스템에 동일하게 적용되는 Bi-Block침목타입의 현장타설식 연속철근보강 콘크리트궤도를 선정하여 검토하였다.

구 분	토공구간 철근배근 (호남고속철도 적용단면)	
	평 면 도	측 면 도
현장타설식 콘크리트궤도 (RHEDA2000/ KCT-Ⅱ, LVT 궤도 등)		

[현장타설식 콘크리트궤도(RHEDA2000) 토공구간 철근배근도]

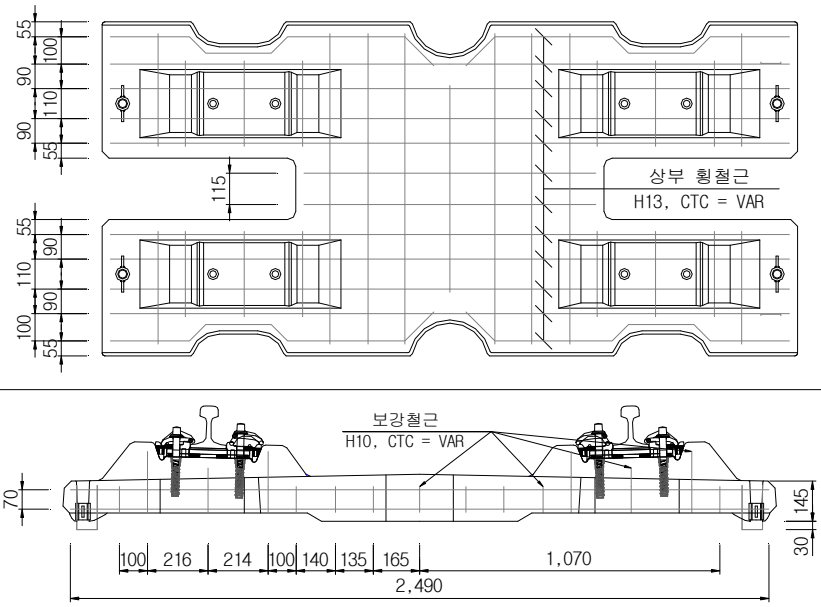
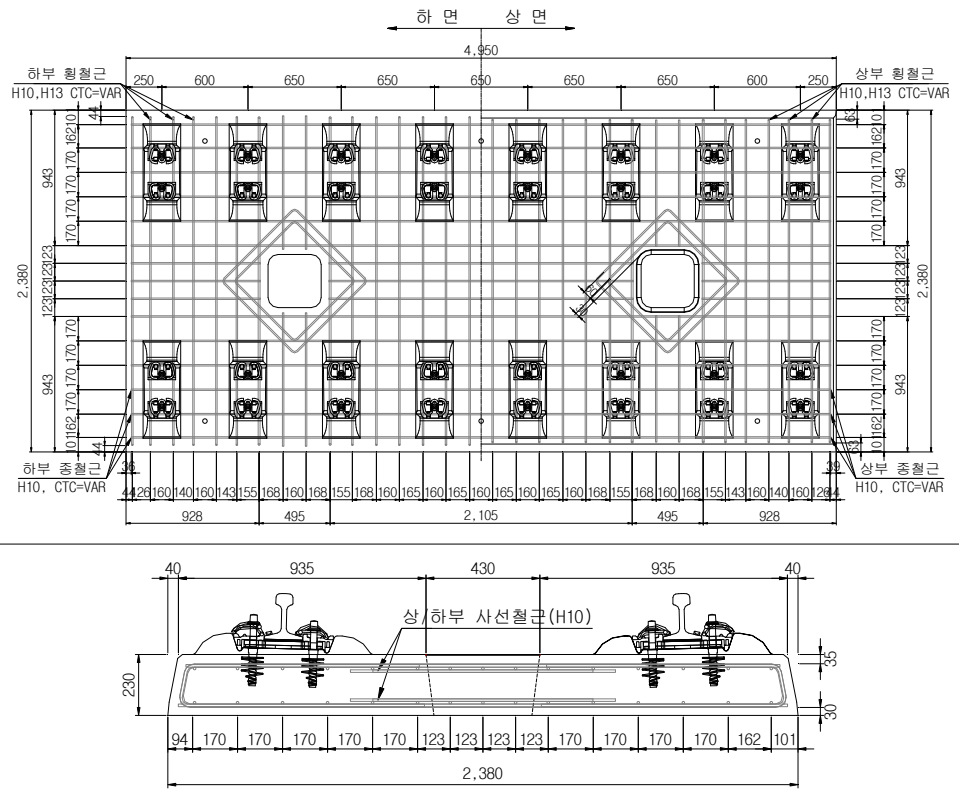
RHEDA2000 및 KCT-Ⅱ궤도상에 지상코일을 설치할 경우 코일부와 Bi-Block침목간 상호간섭발생으로 침목과 침목사이 중앙부에 지지앵커(볼트)를 매립하는 것이 가장 바람직할 것으로 보이나, 침목사이 중앙부에는 상부 횡철근(②)이 1열 배근되어 있으므로 아래 그림과 같이 횡철근 설치지점에서 종방향(열차진행방향)으로 약 100mm 이격하여 앵커를 매립하는 것이 적합할 것으로 검토되었다. 침목매립식인 LVT궤도구조도 RHEDA2000, KCT-Ⅱ궤도와 동일하게 침목과 침목사이 중앙에 횡철근(1열)이 배근되어 있어 횡철근이 배근된 위치와 100mm 이격하여 앵커를 매립해야 한다. 또한 현장타설식/침목매립식 콘크리트궤도의 침목간격은 터널/토공/교량구간 및 현장여건에 따라 625mm~ 650mm로 조정되어 부설되기 때문에 침목간격 및 횡철근 배근간격을 사전협의하여 지지앵커를 침목간격과 동일한 간격으로 매립해야 상부 횡철근과의 저촉없이 코일부 설치가 가능할 것으로 판단된다.



[현장타설식 콘크리트궤도상 지상코일 지지앵커 매립위치 (안)]

(3) 공장제작식 콘크리트 궤도

공장에서 사전제작되는 PST궤도, B2S등과 같은 패널형 콘크리트 슬래브 궤도는 현장타설방식의 도상콘크리트층과 동일하게 패널내에 철근이 격자형으로 배근되어 있다. 콘크리트 슬래브 궤도(패널형)는 Bi-Block/RC침목 없이 일체형으로 제작되며, Bi-block침목과 래티스거더로 인해 상부철근 배근의 제약이 발생하는 침목매립식 현장타설형 콘크리트궤도보다 배근되는 철근 간격이 조밀하게 배치되어 철근과 철근사이의 여유공간이 많은 위치에 앵커를 매립하는 것이 적합할 것으로 보이고, 지지앵커 매립 시 정확한 매립위치 선정을 통해 철근과 앵커볼트 상호간에 저촉되지 않도록 면밀한 검토가 이루어져야 한다. 아래그림은 현재 서울메트로 지하철구간에 부설된 B2S패널과 전라선, 중앙선등 일반철도 구간에 적용되었던 PST-B형(L=4.95m) 패널 내부에 배근된 철근을 도식화 한 것이다.

구 분	공장제작식 슬래브궤도 철근배근 현황
B2S궤도 패널형상	
PST-B형 패널형상	

[서울메트로 지하철구간 콘크리트 슬래브 궤도(패널형) 철근배근도]

B2S궤도와 PST-B형 궤도에서는 사전에 검토된 바와 같이 패널의 일체형 침목과 지상코일의 상호간섭으로 코일의 폭을 축소해야 적용이 가능함을 감안하여 지지되는 앵커와 종방향 철근과의 저촉여부는 생략하고, 현장타설식 콘크리트궤도와 마찬가지로 횡방향 철근과의 이격거리를 고려한 앵커 매립위치(안)을 제시하였다.

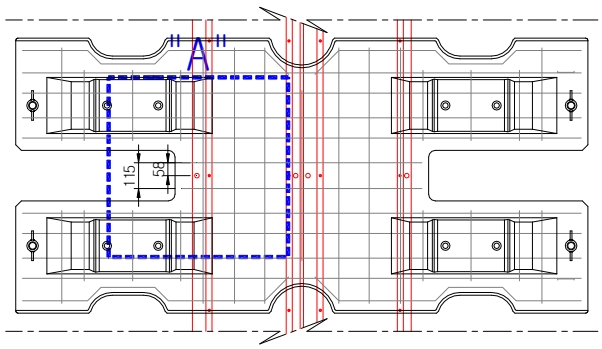
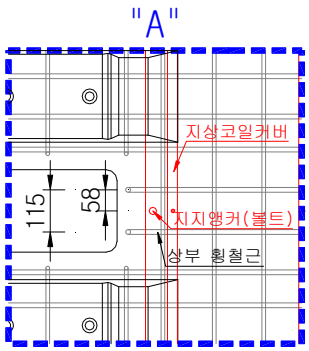
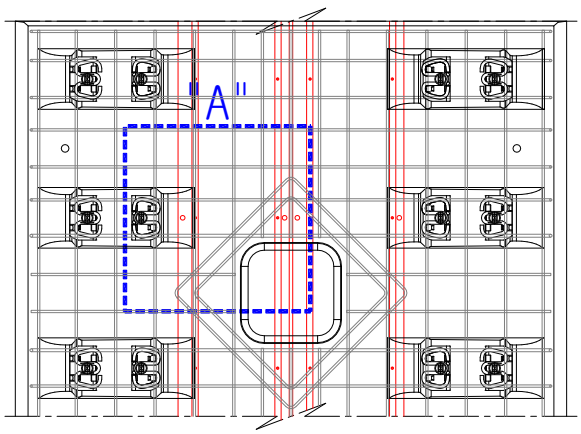
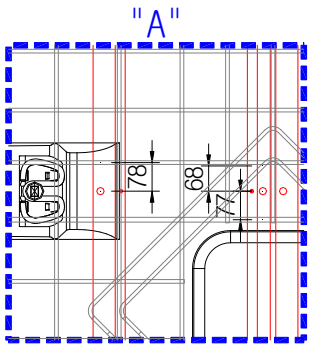
구 분	공장제작식 슬래브궤도 코일설치(안) <평면도>	
B2S (과천선 적용단면)		
PST-B (동해선 적용단면)		

그림 17. 콘크리트 슬래브 궤도(패널형)상 지지앵커 매립위치(안)

지상코일 형상(안)을 B2S궤도/PST-B형 패널에 설치한다고 가정하여 매립된 철근과 저촉이 발생되지 않도록 지지앵커의 설치 가능위치를 확인한 결과 B2S의 경우 레일체결장치 동일한 선상보다는 침목과 침목사이의 중앙부에 설치하는 것이 공간상/시공편의상으로도 가장 적정할 것으로 보이며, 직경 30mm의 앵커를 침목사이에 매립할 경우 인접한 횡철근과 58mm 이격되는 것을 확인하였다. 또한 PST-B형 패널의 경우는 전단포켓부의 균열보강을 위해 D10mm 사선철근이 포켓부 외측에 60mm간격×2열로 배근되어 있어 침목과 침목사이에 앵커 매립시 침목과 동일선상에 설치하는 것보다 종/횡철근과 이격되는 거리가 부족하므로 위 그림과 같이 레일체결장치/침목과 동일선 상에 앵커를 매립하는 것이 적정한 것으로 검토되었다.

(4) 결론

자갈/콘크리트궤도에 지상코일이 설치될 경우 P.C침목의 P.S강선, 도상콘크리트층 또는 슬래브패널 내부에 배근되어 있는 철근과 매립되는 앵커와의 저촉/간섭 여부를 궤도유형별로 검토하였다. 검토결과, 자갈궤도에 부설되는 P.C침목의 경우 지상코일 형상(안)으로도 P.S강선과 저촉되지 않는 것으로 확인되었으나, 이격거리가 미소하여 시공오차 발생등을 감안할 때 침목의 균열/전단파괴에 대한 구조적 안전성이 확보되는 선에서 지지앵커의 직경을 감소할 필요가

있다고 보여진다.

콘크리트궤도는 현장타설식과 공장제작식 2가지 부설형식으로 분류하여 검토하였으며, 콘크리트궤도에 LPM추진시스템을 적용하기 위해서는 지상코일과 침목간의 상호간섭이 발생하여 코일형상의 축소제작이 요구되므로 종방향(열차진행 방향)철근 위치와 매립앵커의 저촉여부는 생략하고 횡방향(열차진행 수직방향)철근과의 저촉여부만을 검토하였다.

현장타설식 콘크리트궤도는 RHEDA2000, KCT-Ⅱ에 적용되는 Bi-Block침목 + 연속철근보강콘크리트, 공장제작식 콘크리트궤도의 경우 B2S, PST-B형(L=4.95m) 슬래브궤도를 선정하여 매립되는 앵커와 내부철근과의 저촉여부를 검토하였다.

RHEDA2000, KCT-Ⅱ궤도는 다른 침목에 비해 상대적으로 길이가 긴 Bi-Block침목으로 인해 침목선상에 앵커를 매립하는 것보다 침목과 침목사이에 매립하는 것이 적절하지만 상부횡철근에 저촉되어 침목사이에서 종방향으로 100mm이격하여 매립하는 방향으로 개선안을 제시하였다.

공장제작식 콘크리트 슬래브 궤도(패널형) 중 B2S궤도의 경우 침목과 침목사이 중앙부, PST-B형의 경우 전단포켓부의 사선철근으로 매립공간이 협소하여 침목과 동일선상에 앵커를 매립하는 것이 가장 적합한 것으로 나타났다.

콘크리트궤도의 철근의 종류 및 배치간격, 콘크리트 단면크기와 재료특성은 도상콘크리트층 또는 슬래브 패널에 작용하는 온도, 종/횡방향하중, 기울기하중, 구속하중등 외부하중에 의한 콘크리트의 휨인장응력/허용균열폭 제어등을 종합적으로 검토하여 결정되므로 같은 콘크리트궤도 시스템이라도 적용구간 내 설계속도, 운행차량, 현장여건, 노반상태등에 따라 철근의 배치형태가 변경될 여지가 크다.

따라서 콘크리트궤도상에 LPM추진시스템을 적용할 경우 앞서 언급한 설계제원(차량, 현장여건등)을 통한 콘크리트궤도의 구조 안정성 검토를 선행한 뒤 결정되는 철근배근현황을 상세하게 검토하여 적정한 앵커의 매립위치를 결정해야 한다.

라. 지상코일 지지앵커 선정

(1) 일반사항

콘크리트용 앵커의 종류는 콘크리트치기 이전에 설치되는 헤드볼트, 헤드스터드, 갈고리볼트 등의 선설치앵커(Cast-in-place anchor)와 굳은 콘크리트에 앵커설치를 위한 천공작업을 거쳐 설치하는 확장앵커 및 언더컷앵커등의 후설치앵커(Post-installed anchor)로 분류된다. LPM차량시스템 지상코일부의 견고한 고정을 위해 사용될 지지앵커는 선설치앵커, 후설치앵커 모두 P.C침목과 도상콘크리트층에 설치 가능하다.

(2) 자갈궤도 P.C침목에 단일앵커(헤드볼트)를 선설치하는 경우

① 인장하중검토

구 분	계산결과(ϕN_n) [kN]				비고
	M24	M20	M16	M12	
앵커 강재강도	105.90	73.50	47.10	25.29	
콘크리트의 파괴강도	25.87	25.87	25.87	25.87	
앵커의 뽑힘강도	224.11	156.24	100.13	66.86	
콘크리트측면 파열강도	-	-	-	-	
∴ 설계 인장강도($\phi N_{n,\min}$)	25.87	25.87	25.87	25.29	
계수 인장하중(N_{ua})	1.70				
판 정 ($\phi N_{n,\min} \geq N_{ua}$)	O.K	O.K	O.K	O.K	

② 전단하중검토

구 분	계산결과(ϕV_n) [kN]				비고
	M24	M20	M16	M12	
앵커 강재강도	55.07	38.22	24.49	13.15	
콘크리트의 파괴강도	51.99	51.99	51.99	51.99	
앵커의 콘크리트프라이아웃강도	77.60	77.60	77.60	77.60	
∴ 설계 전단강도($\phi V_{n,\min}$)	51.99	38.22	24.49	13.15	
계수 전단하중(V_{ua})	5.49				
판 정 ($\phi V_{n,\min} \geq V_{ua}$)	O.K	O.K	O.K	O.K	

(3) 다. 자갈궤도 P.C침목에 단일앵커(확장앵커)를 후설치하는 경우

① 인장하중검토

구 분	계산결과(ϕN_n) [kN]				비고
	M20	M16	M12	M10	
앵커 강재강도	91.88	58.88	31.65	21.75	
콘크리트의 파괴강도	17.78	17.78	17.78	17.78	
앵커의 뽑힘강도	14.05	11.15	5.77	3.38	
콘크리트측면 파열강도	-	-	-	-	
∴ 설계 인장강도($\phi N_{n,\min}$)	14.05	11.15	5.77	3.38	
계수 인장하중(N_{ua})	1.70				
판 정 ($\phi N_{n,\min} \geq N_{ua}$)	O.K	O.K	O.K	O.K	

② 전단하중검토

구 분	계산결과(ϕV_n) [kN]				비고
	M20	M16	M12	M10	
앵커 강재강도	47.78	30.62	16.46	11.31	
콘크리트의 파괴강도	45.75	45.75	45.75	45.75	
앵커의 콘크리트프라이아웃강도	60.97	60.97	60.97	60.97	
∴ 설계 전단강도($\phi V_{n,\min}$)	45.75	30.62	16.46	11.31	
계수 전단하중(V_{ua})	5.49				
판 정 ($\phi V_{n,\min} \geq V_{ua}$)	O.K	O.K	O.K	O.K	

(4) 콘크리트궤도 도상콘크리트층에 단일앵커(헤드볼트)를 선설치하는 경우

① 인장하중검토

구 분	계산결과(ϕN_n) [kN]				비고
	M24	M20	M16	M12	
앵커 강재강도	105.90	73.50	47.10	25.29	
콘크리트의 파괴강도	27.43	27.43	27.43	27.43	
앵커의 뽑힘강도	112.06	78.12	50.06	33.43	
콘크리트측면 파열강도	-	-	-	-	
∴ 설계 인장강도($\phi N_{n,\min}$)	27.43	27.43	27.43	25.29	
계수 인장하중(N_{ua})	1.70				
판 정 ($\phi N_{n,\min} \geq N_{ua}$)	O.K	O.K	O.K	O.K	

② 전단하중검토

구 분	계산결과(ϕV_n) [kN]				비고
	M24	M20	M16	M12	
앵커 강재강도	55.07	38.22	24.49	13.15	
콘크리트의 파괴강도	76.39	76.39	76.39	76.39	
앵커의 콘크리트프라이아웃강도	54.87	54.87	54.87	54.87	
∴ 설계 전단강도($\phi V_{n,\min}$)	54.87	38.22	24.49	13.15	
계수 전단하중(V_{ua})	5.49				
판 정 ($\phi V_{n,\min} \geq V_{ua}$)	O.K	O.K	O.K	O.K	

(5) 콘크리트궤도 도상콘크리트층에 단일앵커(확장앵커)를 후설치하는 경우

① 인장하중검토

구 분	계산결과(ϕN_n) [kN]				비고
	M20	M16	M12	M10	
앵커 강재강도	91.88	58.88	31.65	21.75	
콘크리트의 파괴강도	15.09	15.09	15.09	15.09	
앵커의 뽑힘강도	14.05	11.15	5.77	3.38	
콘크리트측면 파열강도	-	-	-	-	
∴ 설계 인장강도($\phi N_{n,\min}$)	14.05	11.15	5.77	3.38	
계수 인장하중(N_{ua})	1.70				
판 정 ($\phi N_{n,\min} \geq N_{ua}$)	O.K	O.K	O.K	O.K	

② 전단하중검토

구 분	계산결과(ϕV_n) [kN]				비고
	M20	M16	M12	M10	
앵커 강재강도	47.78	30.62	16.46	11.31	
콘크리트의 파괴강도	67.23	67.23	67.23	67.23	
앵커의 콘크리트프라이아웃강도	43.11	43.11	43.11	43.11	
∴ 설계 전단강도($\phi V_{n,\min}$)	43.11	30.62	16.46	11.31	
계수 전단하중(V_{ua})	5.49				
판 정 ($\phi V_{n,\min} \geq V_{ua}$)	O.K	O.K	O.K	O.K	

(6) 결 론

LPM추진시스템의 적용을 위해 P.C침목과 콘크리트궤도 도상층에 지상코일을 지지하는 앵커를 매립할 경우 차량과 지상코일의 추력과 흡인력으로 인해 앵커 돌출부에는 인장력과 전단력을 받게 된다. 앵커에 인장력과 전단력이 동시에 작용할 경우 모든 파괴모드에서 산정된 가장 작은 설계강도와 계수설계하중과의 설계기준에 규정된 $\phi N_n \geq N_{ua,} \phi V_n \geq V_{ua}$, 인장과 전단의 상관관계 검토를 통해 구조물과 지상코일의 안정성 여부를 앵커의 설치방법, 앵커볼트 직경, 궤도유형별로 분류하여 검토하였다.

검토결과, P.C침목을 제작하기 전 단일앵커를 선설치한다고 가정하면 M24, M20, M16헤드볼트를 설치할 경우 인장하중 발생 시 콘크리트의 파괴강도가 지배적인 것으로 나타났으며, M12헤드볼트에서는 앵커 강재강도가 지배강도임을 확인하였다. 앵커 머리부에 전단력이 발생할 경우 앵커직경 20mm이상에서는 콘크리트 파괴강도, 20mm이하에서는 앵커의 강재에서 파괴모드가 우선 발생되는 것으로 확인하였다. M16, M12볼트를 매립하는 경우 $V_{ua} \leq 0.2\phi V_n$에는 만족하지 않아, 전체 인장강도 사용조건에는 불충족하였으나, 인장과 전단의 상관관계 기준에는 만족하여 인장하중과 전단하중을 지지하는데 적절한 것으로 검토되었다.

P.C침목을 제작한 후에 기계식 천공을 통해 확장앵커를 후설치하는 경우 인장하중 발생 시 앵커의 뽑힘강도가 지배적으로 작용하며, 전단하중은 M20을 제외하고 M16, M12, M10에서 앵커의 강재강도가 지배적으로 나타났다. 또한 M16, M12앵커를 매립할 경우 전체 인장강도/전단강도 사용조건에는 만족하지 않았으며, 인장과 전단의 상관관계 기준에는 만족하여 인장하중과 전단하중을 저항하는 목적에 적합한 것으로 나타났다.

콘크리트궤도에서 도상콘크리트층에 확장앵커를 선설치할 경우에 대해 검토한 결과 전단/인장하중 검토 모두 계수하중에 만족하는 것으로 확인하였다. 인장하중에 대해서는 P.C침목상에 선설치앵커를 매립하는 결과와 동일한 양상을 보였고, 전단하중 검토에서는 M24에서는 프라이아웃강도가 가장 지배적으로 나타났다. 전단/인장 상관관계 역시 P.C침목에 헤드볼트를 선설치하는 경우와 동일한 결과를 보였으며 계산한 앵커의 적용이 가능한 것으로 검토되었다.

도상콘크리트층에 확장앵커를 후설치할 경우 또한 자갈궤도 P.C침목과 동일한 양상을 보이는 것으로 확인하였으며, M10, M12, M16, M20 후설치 확장앵커를 도상콘크리트에 매립할 경우 인장하중 및 전단하중의 조합에 만족하는 것으로 확인되었다.

앵커의 매립깊이(80mm) 등 구조계산 시 가정한 물성치가 동일함에 따라 앵커의 직경을 증감시켜도 콘크리트의 파괴강도, 앵커의 프라이아웃강도는 같은 결과값이 산출되었고, 이에 따라 자갈궤도와 콘크리트궤도의 양상이 유사한 것으로 확인되었다. P.C침목 높이가 200mm이고, 도상콘크리트층의 높이는 약 220~ 300mm이므로 80mm의 유효매립깊이는 적정한 것으로 판단되나 궤도시스템에 배근된 철근의 피복두께 확보, 저촉여부등에 따라 변경될 여지가 충분히 있으므로 LPM추진시스템에 적용할 궤도구조를 확정할 경우 상세 구조검토를 통해 적정한 앵커 매립깊이, 앵커의 종류를 결정해야 한다.

결론적으로 검토결과에 따르면 제시한 직경의 선설치헤드볼트와 후설치확장앵커를 자갈궤도와 콘크리트궤도상에 매립하여도 안정성에는 문제가 없는 것으로 확인되었다. 다만, 상기 검토결과는 작용하중을 추력/흡인력에 대해서만 검토한 부분으로 외부하중으로 인한 추가 발생되

는 하중을 종합적으로 고려하여 상세 동적해석, 차량하중에 따른 피로해석 및 실내시험등 추가적인 검토가 필요하다.

마. LPM추진시스템 차량 시험을 위한 Test-Bed 구간 선정

(1) 기본방향

① 동일패턴의 궤도구간을 선정(자갈궤도 또는 콘크리트궤도)

② 전력공급이 용이한 구간 선정(전력공급 최단거리)

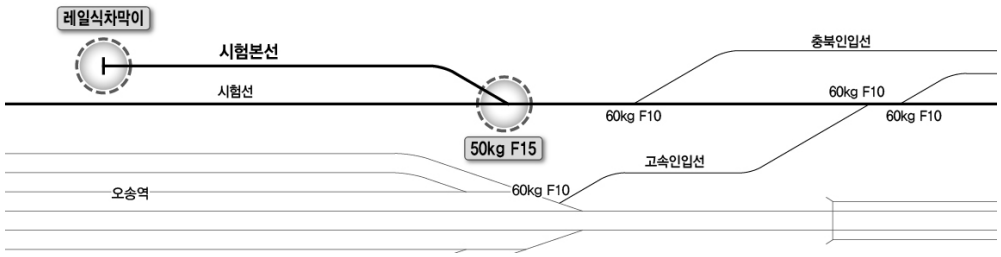
③ 지상코일장치 설치시 문제점이 야기 될 수 있는 분기기 설치 개소 제외

④ 구배기동시험을 위해 최급기울기 구간 선정

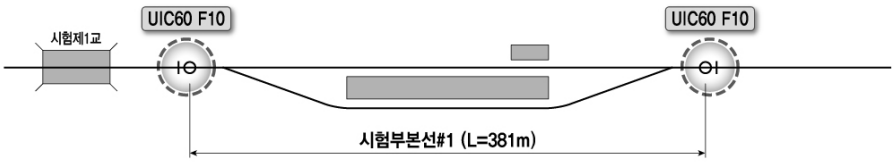
⑤ 속도시험을 위한 최소거리 선정

(2) 배선계획검토(분기기 설치 개소 검토)

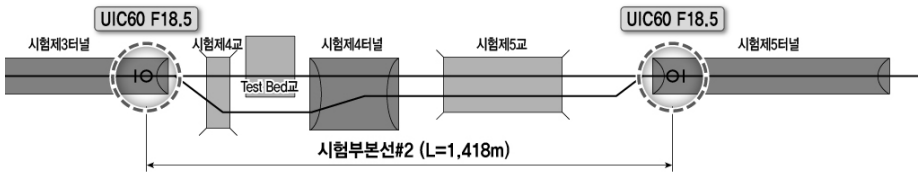
① TS-01 개소

구 분	TS-01 배선계획
배선약도	
시설규모	• 본선 : 1선(시험본선), 분기기 1틀(F15) • 유효장 : 230m • 분기기 부설(50kg, F15, 망간) : 1틀 • 궤도부설(자갈도상, 50kg, PCT) : 0.298km
구 간	• 종합시험선 시점부근(0㎞000~1㎞000)

② TS-02 개소

구 분	TS-02 배선계획
배 선 약 도	
시 설 규 모	• 본선 : 2선(본선 1선, 부본선 1선), 유효장 278m • 승강장 : 섬식(2.5×200) 1개소, 상대식(2.0×40) 1개소 • 분기기 : 2틀(F10) • 궤도부설(자갈도상, UIC60, PCT) : 0.318km • 분기기 부설(UIC60, F10, 노스) : 2틀
구간	• 오송기지 부근(1㎞500~3㎞500)

③ TS-03 개소

구 분	TS-03 배선계획
배 선 약 도	
시 설 규 모	• 본선 : 2선(본선 1선, 부본선 1선), 유효장 1,200m • 분기기 : 2틀(F18.5) • 장래 F26 고속분기기 시험부설 공간 확보(종점 토공부) • 궤도부설(자갈도상, UIC60, PCT) : 1.284km • 분기기 부설(UIC60, F18.5, 노스) : 2틀
구간	• 6㎞000~7㎞800

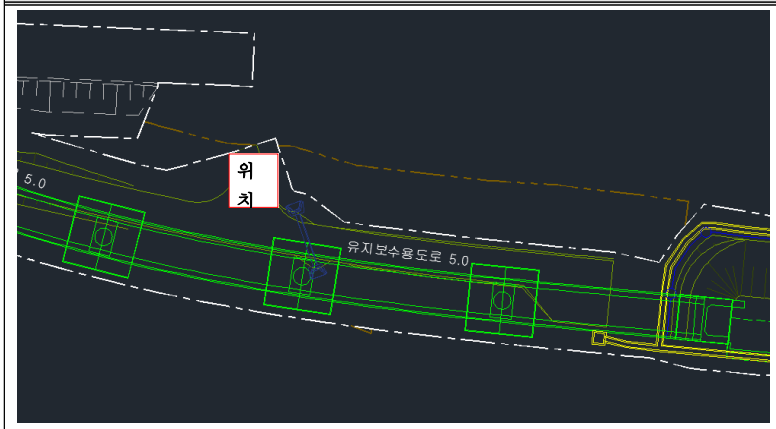
(3) LPM Test-Bed 구간 선정

① LPM Test-Bed 구간 노반평면도



-LPM Test-Bed 구간 : 시험선기점 약 10km~11km
(터널구간 : 200m, 시험제7교 : 270m, 토공구간 : 530m)
-구배 : 32.2‰, 곡선저항 : 700/25

② 지상코일 전원 공급용 전력변환장치 설치 위치

시험제7교 종점부	검토내용
	-위치:교량하부 유지보수 도로 -접근성 용이 -설치부지 확보가능

3.5.2. LPM 추진시스템 전원공급 방안

3.5.2.1. 수전변전소 및 공급전원

가. 개 요

리니어펄스모터(LPM) 추진시스템은 궤도면에 설치하는 지상코일과 차상에 설치하는 전자석(이동자 코일)의 전기적 상호작용에 의한 추진력에 의해 차량이 구동한다. 향후 철도종합시험선로내 Test-Bed을 구축시 설치될 지상코일에 필요한 전력을 안정적으로 공급하는 최적방안을 도출하여 시제품 차량시험을 완활이 추진하는 목적이 있다.

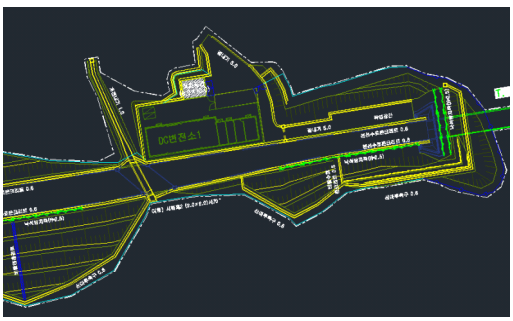
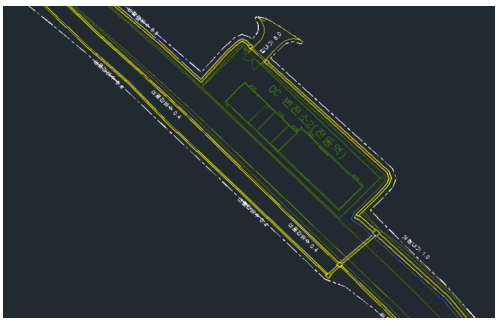
나. 지상코일 급전을 위한 변전소 및 공급전원 선정

(1) 급전변전소 선정

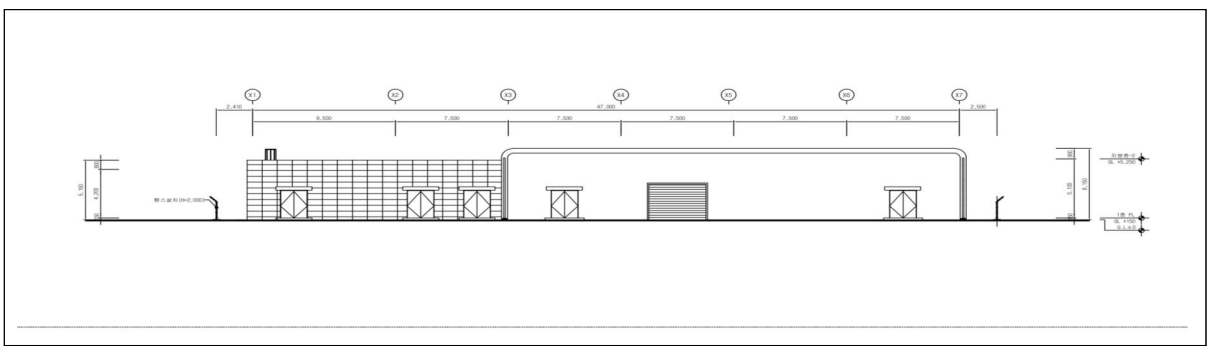
① 철도종합시험선로 노선에는 154kV 수전하는 변전소 1개소와 22.9kV을 수전하는 DC 변전소 2개소로 구성되어 있음

② 지상코일 전원공급점과 가장 가까운 DC변전소2을 전원공급 변전소로 선정

③ DC변전소 2개소 비교표

구분	DC변전소1	DC변전소2
배치도		
특징	-DC변전소1 위치 : 7km540 -접근성 용이 -전력공급점과 이격거리 : 2km920	-DC2변전소 위치 : 12km530 -접근성 용이 -전력공급점과 이격거리 : 2km070

④ DC변전소 건축물 외형



(2) 지상코일 전원공급용 전력변환장치 사양

구 분	정격입력 전압[V]	출 력[kW]		설치위치
		정 격	최 대	
컨버터	AC 440	300	400	DC변전소2 에서 2㎞070 지점
인버터	DC 200	300	400	

(3) 교류급전과 직류급전 비교 검토

구 분	교류급전	직류급전
DC변전소2에서 수전전압	AC 22.9㎸	DC 1,500V
변전소에 예비단자 구성 여부	Test 전원 공급을 위한 22.9㎸ 예비단자가 구비되어 있음. (첨부 #1)	54-F2 HSCB Spare가 있음. (첨부 #2)
전력변환장치에 공급할 전압	컨버터에 AC 440V 공급	인버터에 DC 200V 공급
전원공급 방안	전력변환장치 인근에 변압기 (22.9㎸/440V)를 설치하여 공급	전력변환장치 인근에 직류변환 장치를 설치하여 공급
경제성 및 편의성	변압기와 차단기만 설치하면 되므로 유리함.	정류기용변압기, 정류기, 직류고속도차단기를 설치하여야 하므로 불리함.
검토의견	- DC변전소2에서 공급할 수 있는 전압과 전력변환장치에서 필요로 하는 전압이 달라 별도의 변환설비가 필요함. - 일반적으로 AC변환이 DC변환에 비하여 시공, 유지관리 및 경제성면에서 유리하므로 교류급전으로 선정함.	

(4) 교류 6.6㎸와 22.9㎸ 비교 검토

구 분	6.6㎸	22.9㎸
접지방식	비접지방식(변압기2차측△결선)	중성점 직접 접지방식(Y결선)
장 점	· 통신유도장애가 없다. · 전력계통 운용이 단순하여 유지보수가 용이	· 전압강하 적고 배전용량이 커서 배전 거리를 길게 할 수 있다. · 대지전압이 선간전압에 비해 $1/\sqrt{3}$배로 절연계급을 낮출 수 있다. · 지락사고 검출이 용이하다.
단 점	· 지락사고 검출이 용이치 못함. · 6.6㎸ 계통은 전압강하가 심하고 배전용량이 작다. · 케이블 구간은 충전전류가 커짐에 따라 시스템 보완필요	· 지락사고시 지락전류가 단락전류와 거의 비슷하므로 인접 약전, 통신선에 영향이 크다. · 장거리 지중배전선로에서 충전전류 상승에 의한 대책 필요
적 용	· 단거리 배전, 부하 적은 공간 · 철도공사, 국내 지하철, 일반공장	· 장거리 배전선로, 부하가 많은 개소 · 한전, 포항제철, 일산선(송전선로)
선 정		◎
검토의견	· DC변전소2의 수전전압이 22.9㎸이며, 1단 강압하여 현장의 전력변환장치에 저압(440V) 공급에 유리하고, 6.6㎸에 비해 22.9㎸로 수전 할 경우 선로 손실이 1/4정도 감소되므로 LPM추진시스템의 수전전압은 22.9㎸로 선정함.	

3.5.2.2. 전기설비 및 전원 케이블

가. 설비용량 및 전원 케이블 선정

(1) DC변전소2에는 Test전원 공급을 위한 22.9㎸ 예비단자가 구비되어 있으므로 이를 활용하여 전력을 수전하고자 함.

(2) 변압기 용량 산출

$$\frac{\text{컨버터 정격출력[㎾]}}{\text{역률}} \times \text{여유} = \frac{300}{0.8} \times 1.1 \fallingdotseq 412.5[kVA]$$

∴ 변압기 용량은 제작사 표준용량을 감안하여 450[kVA]로 선정

(3) 교류급전시 검토사항

지상코일 전원공급용 전력변환장치(컨버터)에 공급하는 전압이 440[V]로 저압이므로 변압기(22.9㎸/440V)를 컨버터 인근에 설치하는 것이 공급전압 유지에 유리함.

① 차단기의 정격용량

- 변압기 1차 보호차단기(VCB)의 정격

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{450{,}000(VA)}{\sqrt{3} \times 22{,}900(V)} \fallingdotseq 11.34[A]$$

∴ 변압기 1차 보호차단기는 제작사 표준용량을 감안하여 VCB 630[A]로 선정함.

- 변압기 2차 보호차단기(ACB)의 정격

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{450{,}000(VA)}{\sqrt{3} \times 440(V)} \fallingdotseq 590.47[A]$$

∴ 변압기 2차 보호차단기는 제작사 표준용량을 감안하여 ACB 630[A]로 선정함.

② 케이블의 굵기 및 선종

(가) 케이블 허용 전류표

※ 22.9㎸ 케이블

케이블 종류	굵기 [㎟]	기준전류 [A]	ELP매설[A] 0.75	트러프[A] 0.75	PIT[A] 0.77	비 고
22.9㎸ FR-CNCO -W	60	265	198	198	204	○
	100	352	264	264	271	
	150	432	324	324	332	

※ 0.6/1㎸ 케이블

케이블 종류	굵기 [㎟]	기준전류 [A]	ELP매설[A] 0.75	트러프[A] 0.75	PIT[A] 0.77	비 고
0.6/1㎸ HFCO	185	533	399	399	410	
	240	634	475	475	488	
	300	736	552	552	566	
	400	868	651	651	668	○

(나) 변압기 1차 케이블(22.9㎸)의 굵기 및 선종

- 변압기 1차측 부하전류가 11.34[A]이므로 ELP매설 기준으로 22.9㎸

FR-CNCO-W 60[㎟] 1Cx3으로 선정함.

(다) 변압기 1차 케이블 형식 선정

- 변압기 1차 케이블 형식은 수전전압(22.9㎸), 포설환경 및 최근 기술개발동향 등 을 검토하여 선정한다.

- 적용 기준

·22.9㎸ 케이블은 사용환경에 따라 관로 또는 직매구간은 트리억제형을 사용하고 전력구, 공동구, 덕트, 건물구내 등 화재의 우려가 있는 장소에는 수밀형 저독성 난연케이블을 사용한다. (한전배전선로 설계기준 DS-5100 케이블)

- 케이블 형식 선정

철도종합시험선로 구간은 DC변전소 #2에서 변전소 구내는 Cable Pit를 이용하고 옥외구간은 선로변에 설치되어 있는 공동관로에 포설예정 이므로 케이블 접속개소를 줄이고 시공성을 고려하여 전구간 22.9㎸ 수밀형 저독성 난연케이블 구조를 선정함.

(라) 변압기 2차 케이블(440V)의 굵기 및 선종

- 허용전류에 따른 굵기 : 변압기 2차측 부하전류가 590.47[A]이므로 ELP매설 기준으로 0.6/1㎸ HFCO 400[㎟] 1Cx3

- 전압강하에 따른 굵기 : 변압기 2차에서 전력변환장치까지의 전압강하(%)는 공급 변압기로부터 200m 초과한 거리에 전력변환장치가 있다는 가정 하에 7% 이하로 적용

$$A = \frac{30.8 \times L \times I}{1000 \times e} = \frac{30.8 \times 200 \times 590.47}{1000 \times 7} \fallingdotseq 519.61[㎟]$$

∴ 변압기 2차 케이블(0.6/1㎸)의 굵기는 허용전류 및 전압강하를 고려하여 0.6/1㎸ HFCO 400[㎟] 1Cx3으로 선정함.

(4) 케이블 포설방안

① 변압기 1차 케이블의 경로 및 포설방법

DC변전소2에서 2㎞070 지점에 전력변환장치를 설치할 예정이므로 변전소 구내에서는 Cable Pit를 이용하고, 선로측에서는 선로변에 설치되어 있는 공동관로의 예비공간을 이용하여 케이블 포설

② 변압기 2차 케이블의 경로 및 포설방법

변압기 2차에서 전력변환장치까지는 가까운 거리로 예상되므로 상세설계 시 고려하여야 함.

나. 알루미늄(AL) 케이블 적용 검토

(1) 검토 개요

최근 동 케이블과 비교하여 성능이 크게 차이가 없고 가격에서 저렴한 알루미늄 케이블이 개발되어 사용되고 있는바 이를 검토하여 변압기 1차 케이블(22.9㎸)에 적용여부를 판단하고자 함.

(2) 타기관 적용사례

한국전력공사 : 제품구매 규격화를 하여 2012년부터 구매를 하고 있으며, 현재 국내 전선업체 17개 업체에서 생산을 하고 있음.

(3) 재료 특성 비교

구 분	동	알루미늄	비고
비 중	8.89(g/㎤)	2.73(g/㎤)	
도전율	5.8×10^{7}(℧/m)	3.82×10^{7}(℧/m)	
인장강도	22.7~24.1(kgf/㎟)	5.5~9.5(kgf/㎟)	

(4) 동 케이블(60㎟)과 알루미늄 케이블(95㎟) 특성 비교

성능/규격	동케이블 22.9kV FR-CN/CO-W 60㎟	알루미늄케이블 FR CNCE-W/AL 95㎟	비고
공칭전압[kV]	22.9	22.9	
충격내전압[kV]	150	150	
상시허용온도[℃]	90	90	
단시간 최고허용온도[℃]	130	130	
고장 순시 최고 허용온도[℃]	250	250	
도체 외경 허용공차[㎜]	±0.2	±0.2	
도체 외경[㎜]	9.3	11	
절연층 두께[㎜]	6.6	7.3	
절연층 외경[㎜]	24.5	26.7	
케이블 최대외경[㎜]	39	40	
중성선 소선구성[㎜×개]	1.2×18	1.2×18	
중성선 단면적[㎟]	20	20	
최대 도체저항[Ω/km]	0.305	0.32	
최대 절연저항[MΩ-km]	3,000	3,000	
최대 정전용량[μF/km]	0.1839	0.21	

(5) 경제성 검토

구분	동케이블 22.9kV FR-CN/CO-W 60㎟	알루미늄케이블 FR CNCE-W/AL 95㎟
재료비	14,488[원/m]×2,070[m]×3(조) = 89,970,480원	14,200[원/m]×2,070[m]×3(조) = 88,182,000원
설 치 노 임	{(8.46×249,446)+(8.46×87,805)}/1000 = 2,853[원/m] 2,853[원/m]×2,070[m] = 5,905,710원	{(10.02×249,446)+(10.02×87,805)}/1000 = 3,379[원/m] 3,379[원/m]×2,070[m] = 6,994,530원
합 계	95,876,190원	95,176,530원
증감액	-	699,660원 절감

(6) 검토결과

① 성능 및 특성 검토

- 알루미늄 케이블은 동 케이블 대비 도체 전도율이 낮아 동 케이블과 같은 허용전류를 만족하려면 도체 굵기 및 완성품 외경이 커지므로(제품규격에서 동 60㎟→알루미늄 95㎟), 설치노무비 증가

- 인장강도는 동의 40% 수준이나 관로 내 포설하므로 문제없음.

- 비중이 작아 가벼우며, 운반 및 시공이 용이함.

② 경제성 검토

- 케이블의 길이를 약 2,000m로 예상하여 계산한 결과 재료비와 노무비를 합하여 알루미늄 케이블(95㎟)이 동 케이블(60㎟)에 비하여 약 699천원이 절감됨.

③ 선정

- 리니어펄스모터(LPM) 추진시스템 수전케이블의 길이는 약 2,070m로 동 케이블에 비하여 절감액이 미미하므로, 수전케이블은 동 케이블로 선정 함.

다. 케이블 시스 유기전압 계산

(1) 검토 개요

단심 케이블은 3심 일괄 케이블과 달리 케이블 각 상의 시스(Sheath)층이 서로 절연되어 있어 심선에 전류가 흐르면 이 전류에 비례하는 전압이 시스(Sheath)층에 유기된다. 시스(Sheath)의 전위는 인축의 감전을 고려하여 접지를 통해 일정 전압 이하로 유지해야하며, 접지방식에 따라 순환전류에 의한 케이블 소손, 전력 손실이 발생할 수 있으므로 수전 케이블의 시스(Sheath) 유기전압을 계산하여 결과에 따라 관련규정에 따라 적합한 설비를 하고자 함.

(2) 관련 규정

구분	한국전력공사 배전설계기준(DS-5100)	한국철도 시설공단(KRE-5100)
내용	・22.9㎸-Y 특고압 케이블의 동심중성선은 접속개소 및 단말개소마다 각심을 일괄접지 ・동심중성선과 대지와의 합성저항치는 5[Ω/㎞] 유지 ・접지선 나연동선 38(35)㎟ 이상	・22.9㎸-Y 특고압 케이블의 동심중성선은 접속개소 및 단말개소마다 각심을 일괄접지 ・동심중성선과 대지와의 합성저항치는 5[Ω/㎞] 유지 ・접지선 나연동선 38(35)㎟ 이상 ・케이블 금속시스의 상시유기전압 크기 100V 이하 유지 전력구, 역사, 변전소내에는 50V 이하 ・고압케이블 차폐금속체 접지는 단말처리개소에서 그 한쪽 끝을 공용접지에 연결, 케이블 긍장이 1.5㎞ 이상일 경우는 중간접속부 동테이 절연 후 양단 접지

(3) 허용 시스(Sheath) 유기전압

국 가 별	케이블 금속시스 유기전압(허용기준)	비 고
캐나다	최대 부하전류에서 100V	
영 국	65V	
일 본	50V	
한 국	전력구내 50V, 전력구 이외 100V	지중송전설계기준 ES-1650
	전력구, 정거장 100V 이하, 변전소 50V 이하	한국철도 시설공단(KRE-5100)

(4) 유기전압 계산

① 계산식

$$V_s = jX_m lI = j2\pi fLlI = j2\pi f \times 0.4605 \log\frac{S}{r} \times l \times I \times 10^{-3}[V]$$

여기서, 케이블 : 22.9㎸ FR-CN/CO-W 60㎟/1C (LS산전 케이블 기준)

l : 최대 케이블 거리(DC변전소2에서 전력변환장치 간 약 2.0㎞)

S : 케이블 중심간의 거리(㎜)

- $S = \sqrt[3]{D \times D \times 2D} = \sqrt[3]{2(D)^3} = \sqrt[3]{2} \times D = \sqrt[3]{2} \times 36 \fallingdotseq 45.35[\text{㎜}]$

D : 케이블 외경(36㎜)

r : SHIELD(차폐선)의 평균 반지름(15.9㎜)

I : 도체 허용전류(198A)

f : 상용 주파수(60Hz)

$j2\pi fL$: 도체와 시스간의 상호리액턴스 (Ω/km)

($j2\pi fL = 2\pi \times 60 \times 0.4605 \times \log(\frac{45.35}{15.9}) \fallingdotseq 78.95$)

② 계산 결과

$V_S = 78.95 \times 2.0 \times 198 \times 10^{-3} \fallingdotseq 31.3[\text{V}]$

(5) 유기전압 저감 대책

① 케이블 최대거리(DC변전소2에서 전력변환장치간 약 2.0㎞)에 대하여 편단접지 시 유기전압은 최대 31.3V로 허용 유기전압을 만족함.

② 시스(Sheath)는 한국철도시설공단 설계지침에 따라 단말개소에 일괄 접지하도록 함.

라. 수전설비 형식 검토

(1) 검토 개요

LPM추진시스템의 수전실은 선로변에 설치하는 것이 전력변환장치에 저압(440V)을 공급하기에 유리하므로 신뢰성과 안정성을 고려하여 수전설비 형식 및 변압기를 선정한다.

(2) 수전반 형식 비교

구 분	옥내 큐비클형	옥외 큐비클형	옥외거치 변대형
구 조	천장, 바닥 및 외벽 등 전체를 콘크리트 구조물내에 수용설치 한다.	강제 Frame으로 구성하며 강판내에 차단기 등의 시설물을 수용 설치한다.	휀스를 설치하여 차단기 등 시설물을 옥외에 설치한다.

면적비	100%	100%	130%
내구성	도전부, 절연부, 접촉부가 옥내에 수용되므로 외기의 영향을 받지 않으며 수명이 길다.	충전부가 함내에 수용되어 있으므로 보수 점검시 위험도가 적다.	충전부 전체가 대기에 노출되므로 보수 점검시 위험도가 높다.
보수 점검	각 기기별 실구분을 한 공간내에 수납되며 보수점검이 필요한 개소는 각 개소별 점검이 용이하다.	각 기기별 실구분을 한 공간내에 수납되며 보수점검이 필요한 개소는 각 개소별 점검이 용이하다.	안전 확인을 충분히 한 후 보수 점검을 해야 하며 항시 대기에 노출되어 있으므로 보수점검 정도가 높다.
선 정		◎	
검토의견	LPM추진시스템의 수전실은 전력변환장치에 저압(440V)을 공급하므로 부득이 선로변에 설치하여 2차측 거리를 단축하는 것이 공급전압 유지에 유리하므로, 현 계획단계에서는 옥외 큐비클형을 선정함.		

(3) 변압기 형식 비교

항 목	유입변압기	몰드변압기	아몰퍼스 몰드변압기
형 태			
권선 온도상승 한도[℃]	65	90	80
난연성	○	◎	◎
방폭성	○	◎	◎
무부하손실	보통	낮음	아주 낮음(75%)
옥외사용	◎	○	○
내습성	◎	◎	◎
설치면적	대	중	중

특 징	· 내흡습성, 내오손성 이 우수하다. · 소음이 크다. · 가격이 저렴하다. · 가연성으로 위험성 크다. · 설치면적이 크고 중량이 무겁다. · 절연유의 정기적인 교체가 필요하다.	· 난연성으로 재해 방지에 유리 · 내흡습성,내오손성이 유리 · 설치면적이 작다. · 소음이 유입보다 크다. · 가격이 비싸다.	· 난연성으로 재해방지 에 유리 · 내흡습성, 내오손성 이 유리 · 설치면적이 크다. · 가격이 가장 비싸다. · 규소강판에 비해 무부하 손실이 75% 이상 절감
경제성 (1,000kVA기준)	100%(11,182천원)	210%(23,480천원)	424%(47,476천원)
선 정		◎	
검토의견	· 몰드변압기(표준소비효율변압기)는 난연성으로 안전할 뿐만 아니라 설치면적이 작고 유지보수가 불필요하고, 옥외 큐비클 수납에 유리하여 몰드변압기로 선정함.		

마. 철도종합시험선로 DC변전소2 계통도

(1) 전력변환장치의 안정적 전원을 공급하기 위한 구비조건

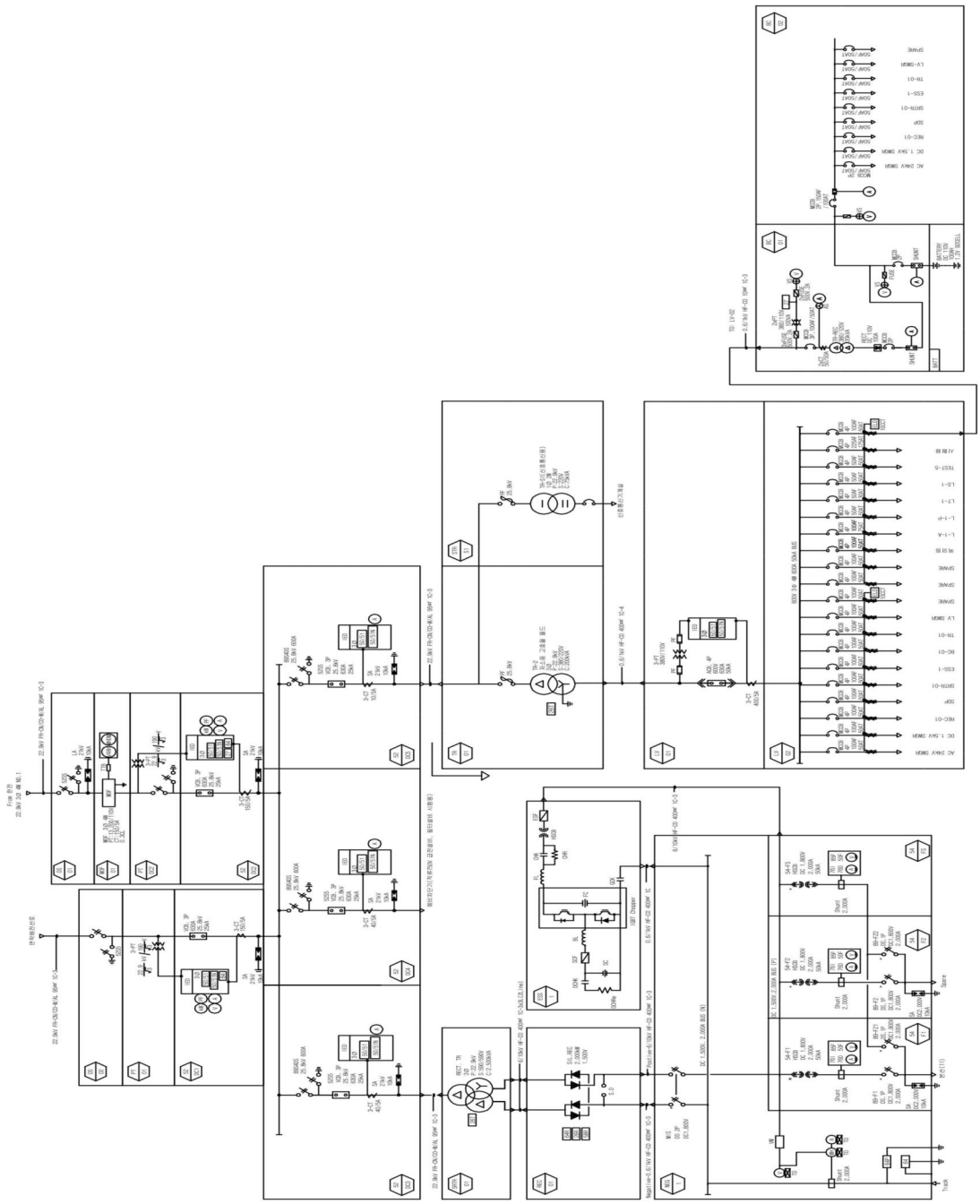
① 한전수전(22.9㎸) 용량에 시험용 변압기 용량 반영

② Main VCB 용량에 시험용 부하 반영

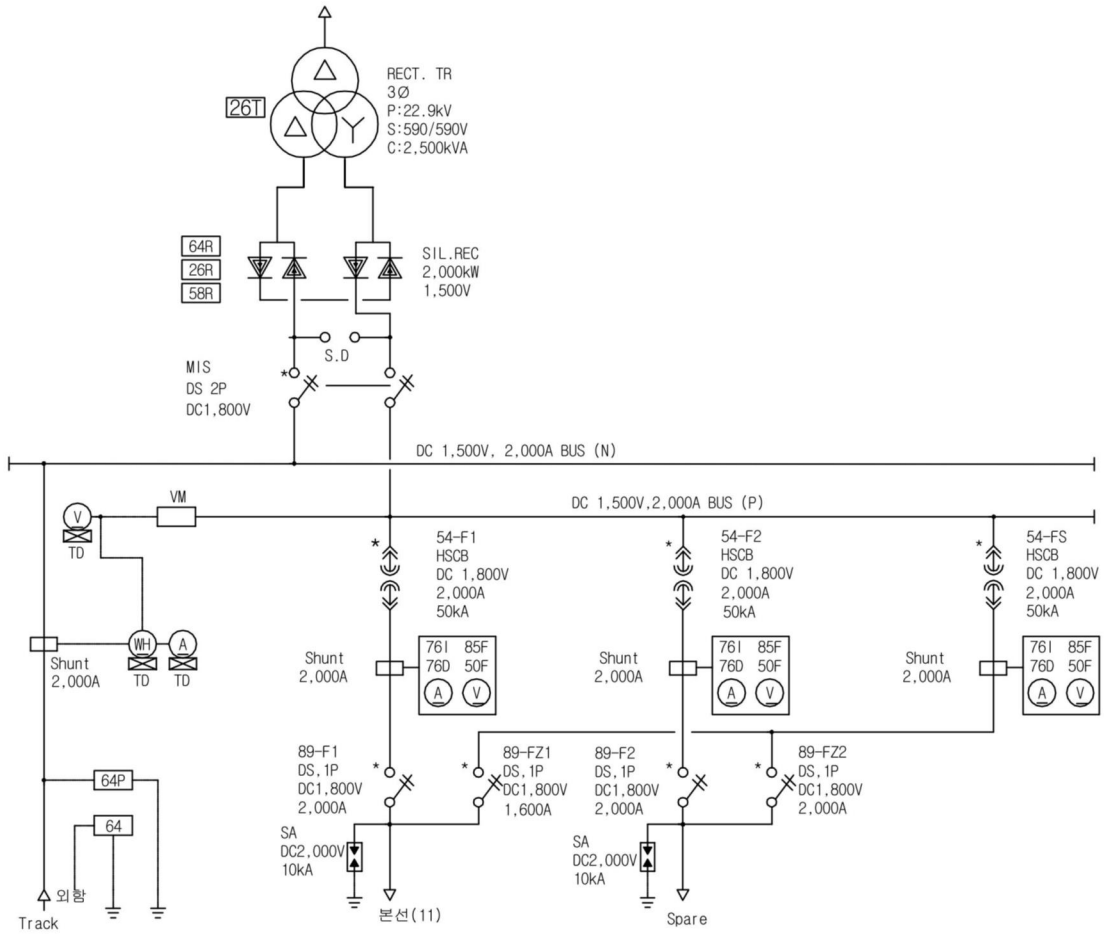
③ Test 분기용(시험용 변압기 1차) VCB 정격용량은 630[A]임

④ 변전소내의 시험용 전원케이블 인출을 위한 Cable Pit 구성

(2) 단선결선도



(3) DC 1,500V 계통도



3.5.2.3. 국내 도시철도의 사례

가. 전기설비

(1) 사용전압

- 한전 수전 및 연락 송전 전력 : 3Φ4W 22.9㎸ 60㎐
- 고압 배전 전력 : 3Φ4W 22.9㎸ 60㎐
- 소내용 전력 : 3Φ4W 380-220V 60㎐
  1Φ2W 220V 60㎐
- 전동차 공급전력 : DC 750V(경전철), DC 1,500V(중전철)
- 변전소, 전기실 제어전원 : AC 220V, DC 110V
- 비상조명전원 : AC 220V, DC 110V

(2) 변전기기 형식

설 비 명		기기 형식	비 고
특고압 배전반		친환경 배전반	
교류차단기		VCB	
변압기	고압배전용	2권선용 (MOLD Type)	
	정류기용	3권선용 (MOLD Type)	
정 류 기		다이오드 (6상 12펄스, 건식 자냉식)	
직류고속도 차단기		DC 750V(경전철), DC 1,500V(중전철)	

(3) 정류기용 변압기 용량

•정류장치는 변압기와 Silicon 정류기로 구성되며 전기적으로 병렬로 연결되며, 부하전류는 변압기 2차 권선과 정류기를 통하여 흐르므로 변압기와 정류기의 저항과 Reactance에 의하여 전압강하가 발생함.
•그러므로 전 부하시에 정류기의 정격 직류전압을 750V로 유지시키기 위해서는 변압기 2차측 단자전압을 전압강하만큼 높게 하여야 함.

① 배전선로 전압강하 계산

•전압강하를 고려하지 않을 경우의 변압기 2차 단자전압(E2)
- $E2 = \frac{750}{1.35} \fallingdotseq 556[V]$

•전압강하를 고려한 경우의 변압기 2차 단자전압(E2)
- 정류장치의 전압강하는 변압기의 Impedance 및 정류기 소자의 직, 병렬개수 등에 따라서 달라지므로 정류장치 Maker측에서 제시되어야 한다. 일반적으로 사용되고 있는 정류기의 부하조건별 전압강하는 아래와 같음.
- 정류기 종류 D종의 경우를 적용하면 변압기 2차 전압 $556 \times 1.06 \fallingdotseq 589[V]$
변압기는 3권선 변압기이고, 정류기는 12Pulse 2중 3상 브릿지 병렬접속이므로 1권선의 2차 단자전압은 589V로 함.

(JEC-178 참조)

CLASS	정류기의 부하조건	전압강하
D	•정격출력에서 연속 •정격출력 150%에서 2시간 •정격출력 300%에서 1분	6%
E	•정격출력에서 연속 •정격출력 120%에서 2시간 •정격출력 200%에서 1분	8%

② 정류기용 변압기 용량

•정류기 정격사항
•정격 출력 : 정상시 시뮬레이션 결과에 의한 RMS 최대전류 987[A]
•정격 출력 전압(Ed) : 750[V]
•정격 출력 전류(Id) : 1,667[A] (정격용량/정격전압=1,250/0.75=1,667)
•정류기 자체 효율 : 98%
•정격 입력 전류(Id') : $\frac{1,667}{0.98} \times \sqrt{\frac{2}{3}} \fallingdotseq 1,389[A]$

③ 변압기 용량의 결정

•변압기 출력(2차) 전압(ES)
여기서, e : 정류장치의 내부전압강하 6% 적용

$$Es = \frac{750 + (750 \times 0.06)}{1.35} \fallingdotseq 589[V]$$

•변압기 2차측 양 권선의 용량(P0)

$$P_0 = \sqrt{3} \times 589 \times \frac{1,389}{1,000} \fallingdotseq 1,417[kVA]$$

∴ 변압기 용량은 표준용량인 1,500[kVA]로 한다.
•변압기 과부하 운전조건
IEC규정에 의하여 변압기 소요용량(1,500kVA)의 150% 과부하에서 2시간, 300% 과부하에서 1분간으로 한다.

(4) 정류기 용량

•제3레일 급전용 정류기의 용량은 부하조건에 따라 결정되며, IEC 146 규정에 따라 100% 부하에서 연속운전, 150% 과부하에서 2시간 운전, 300% 과부하에서는 1분간 운전할 수 있는 용량을 산정토록 한다.
•변전소 정류기 용량 산정 조건 : 시뮬레이션 결과 중 정상시 및 변전소 장애시의 최대 평균전력(RMS) 적용

① 정류기 용량 산정

•정상 상태의 변전소 최대 평균 전력(RMS) : 740㎾(rms최대전류 x 정격전압)
•변전소 장애시 연장급전용 최대 평균 전력(RMS) : 1,113㎾
(rms최대전류 x 정격전압)
•정류기 용량은 정상시와 1개 변전소 장애시 최대 RMS 부하에 전력 공급이 가능하고 부하변동에 따른 여유를 고려하여 기준용량에서 1,250㎾로 선정함.

나. 접지설비

(1) 개 요

•무인으로 운전되는 경량전철의 뇌전류와 서지전류 등에 의한 승객 및 주요 기기의 보호를 위한 접지시스템 구축 •하부 메쉬접지 및 주접지 단자반은 토목에서 시공하고 송변전 분야는 주접단자반에 연결하여 접지시스템 구축

(2) 단독접지와 공용접지의 장단점 비교

접지방법	장 점	단 점
단독접지	•다른 설비에서 문제가 발생한 경우에 해당 접지부분만 제거하면 문제가 해결된다. •뇌전류 혹은 강한 서지로 인한 기기 손상시 단독적으로 시스템을 보호할 수 있다.	•지락사고시에 접지극간 전위상호 간섭이 일어난다. •접지선이 긴 경우 안테나 역할에 의해 Noise의 원인이 된다. •접지극 수를 다수 매설하여야 하기 때문에 접지계통이 복잡해진다. •접지전위의 간섭을 적게 하기 위해서는 접지극간 거리를 멀리하여야 하므로 접지극 매설위치 확보가 곤란하다. •전위기준점 대책을 고려할 필요가 있다.
공용접지	•접지극간의 전위 상호간섭이 없다. •접지계통이 단순하다. •낮은 접지저항을 얻기 쉽다. •전위의 기준점을 잡기가 쉽다. •접지선이 짧아져서 Noise의 발생이 적다. •건축 구조체를 이용할 수 있으며, 이 경우 접지저항을 더욱 낮출 수 있다. •접지극중 하나가 불능 되더라도 타극에 의하여 접지저항치 유지가 된다. •접지극 설치면적이 적고 집합 설치되어 시공비가 싸진다. •지락보호, 접촉전압의 측면에서 유리하다.	•전위상승 파급의 위험이 크다. 접지를 각 기기가 공용하고 있으므로 어떤 기기에 접지전류가 흐르면 이로 인하여 접지전위가 상승 하게 되어 건전한 모든 기기의 전위가 상승할 수 있으므로 대책이 필요하다.

(3) 접지대상 설비

접지대상	내 용	
22.9㎸ 케이블 중성선	•한전측 변압기 중성선으로 3상 4선식 다중 접지 체계로서 계통접 지가 필요함.	
22.9㎸ 설비 외함	•22.9㎸ 특고압반, 변압기 등 외함	
C.T	•C.T 2차측 1극	
P.T	•중성점 접지	
S.A	•VCB 써지 방류	
DC 750V	•판넬 외함 지락보	•급전선 지락보호
케이블 차폐선	•누설전류 보호	•등전위 확보, 정전차폐, 전자차폐
기 타	•각종 판넬 외함 접지 •콘센트 1극 접지	•중성점 전위 안정화 접지 •전자기기 접지

다. 전식방지 대책

(1) 목 적

•전기부식은 레일에서 누설된 전류크기와 토양의 특성(PH, 지전위, 저항율), 레일 및 궤도상태, 금속관로 상태 등이 복합적으로 작용하여 개통 초기에는 발생이 거의 없으나 경년 에 따라 레일의 절연저항 열화로 레일과 주변매설 금속관로에 전식피해가 발생되므로 이에 대한 전식 발생을 방지하고, 전기부식이 발생될 경우의 대책을 설계하여 피해를 최소화하고, 보호대상을 확정하여 추후 전기부식에 대한 분쟁 발생시 증빙자료로 활용하기 위함.

(2) 절연관련 법규 및 설계기준

① 전기설비기술기준의 판단기준(제259조)

•직류식 전기철도용 전차선로의 절연저항은 전차선로의 절연부분과 대지간의 절연저항은 사용전압에 대한 누설전류가 연장 1㎞마다 100㎃를 넘지 않도록 유지하여야 함.

② 철도청 PC침목 설계 시방서

•체결장치를 체결한 침목의 좌우 레일간의 절연저항은 제작공장에서 DC 500V급 절연저항계로 측정하여 5㏁ 이상 이어야 함.

(3) 부식의 원인

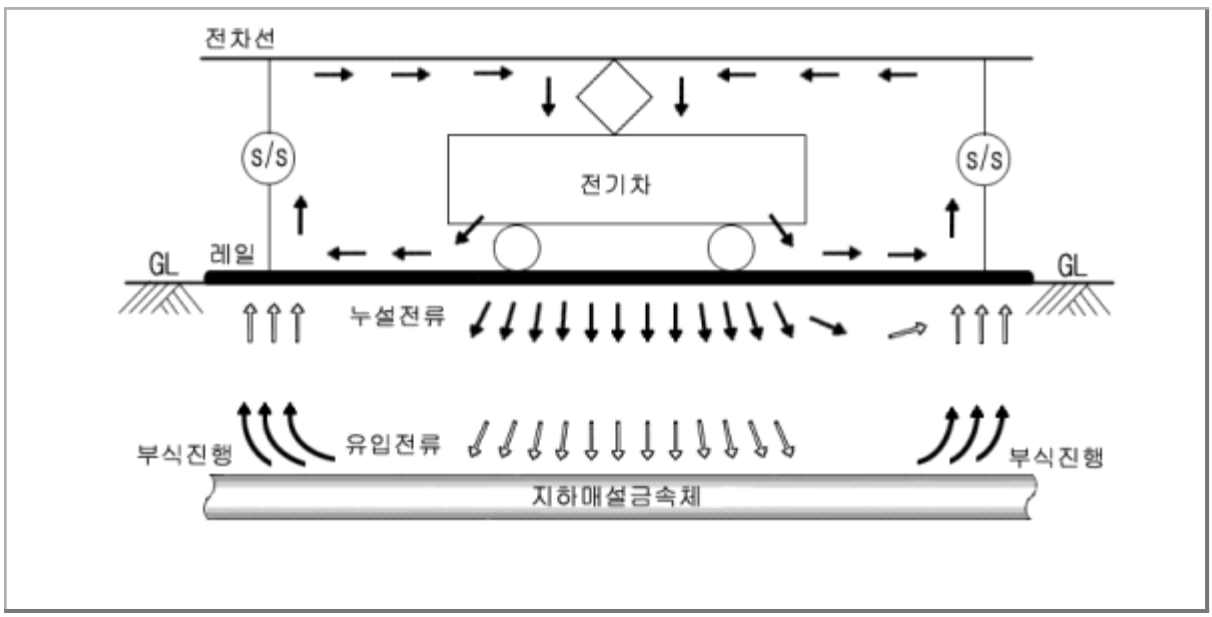
① 자연부식

•지중 매설 금속관로 부식은 습식과 온도에 의해 경년에 따라 완만히 진행되나 토양의 지전위, PH, 저항율의 영향으로 빠르게 진전하게 됨.

② 전기부식

•지중매설 금속관로와 레일의 전기부식은 누설전류 크기와 토양의 특성(PH, 지전위, 대지저항율), 레일 및 궤도상태, 금속관로 상태 등이 복합적으로 작용하여 급속하게 진행
•직류 전차선로의 경우 레일에 근접하는 지중매설 금속체에는 저항이 낮아 레일에 발생되는 누설전류가 이들 금속체에 유입하여 흐르며, 변전소 부근에서 레일로 되돌아간다. 이때 지중 매설된 금속체에는 전지(電池) 작용에 의해서 전류를 유출하며 그 부분이 부식이 되는 전식을 발생시키게 됨.

③ 전기부식 발생도



(4) 누설전류 억제 대책 및 업무 분장

① 주행레일 절연

전식방지 대책	설 계	시 공	시 험	비 고
-주행레일은 절연체결구, 침목은 절연패드 적용하여 대지와 절연할 것.	궤도	궤도	-	
-주행레일 체결구는 절연재료의 Insert를 이용하여 설치하고, 철근에 접촉되지 않도록 시공할 것.	궤도	궤도	-	Insert재질은 아세틸수지 또는 폴리아세틸렌 사용

② 귀로회로의 전기저항 최소화

전식방지 대책	설 계	시 공	시 험	비 고
-전케이블을 레일에 체결시 저항이 최소화 되도록 시공	전기	전기	전기	

③ 제3레일 전차선로의 절연

전식방지 대책	설 계	시 공	시 험	비 고
-제3레일 전차선로는 절연지지대를 사용하여 설치 할 것.	전기	전기	전기	100[MΩ/개당]
-제3레일 전차선로는 지지금구를 고정하기위한 절연 매입전을 시공할 것.	전기 궤도	궤도	-	매입전은 전차선분야에서 공급

④ 케이블절연 및 보호(Positive, Negative, Grounding)

전식방지 대책	설 계	시 공	시 험	비 고
-제3레일 전차선로의 파워레일 및 주행레일에 연결되는 모든 케이블(Positive, Negative)은 적절한 절연 케이블을 사용할 것	전기	전기	전기	케이블은 KSC IEC 규격 제품을 적용하며, 정(+) 급전 케이블 및 부(-)급전 케이블은 DC 1,500V(DC750V) HF-EMSG 케이블 사용

⑤ 변전소 직류배전반 절연

전식방지 대책	설 계	시 공	시 험	비 고
-변전소 직류 PANEL(직류계통의 비접지)은 에폭시로 절연된 바닥에 설치할 것.	전기	전기	전기	절연 저항값은 2.0[MΩ] 이상
-변전소 직류 PANEL에 64계전기(지락과전압계전기)를 설치하여 절연파괴를 감시 하도록 할 것.	전기	전기	전기	

⑥ 도상철근 및 배류케이블 설치

전식방지 대책	설 계	시 공	시 험	비 고
-도상철근을 포설하여 누설전류를 포집할 것.	토목	토목	-	종철근 Ø16, 횡철근 Ø10 사용
-도상철근에서 Cable인출 및 배류케이블을 설치할 것.	전기	전기	전기	인출케이블은 0.6/1㎸ F-GV 150㎟, 배류케이블은 0.6/1㎸ F-GV 150㎟

⑦ 누설전류 모니터링

전식방지 대책	설 계	시 공	시 험	비 고
-측정 단자함을 설치할 것	전기	전기	-	

⑧ 기 타

전식방지 대책	설 계	시 공	시 험	비 고
-차량기지내에 검수고와 외부사이에 귀선용 단로기를 설치할 것.	전기	전기	전기	
-차량기지내의 지하 매설배관은 PLP관을 사용하고 상호 연결부위는 절연조인트를 사용할 것.	토목	토목	-	

라. 회생전력장치 설치 검토

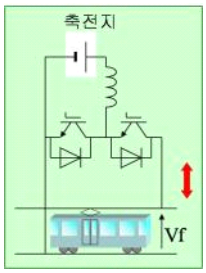
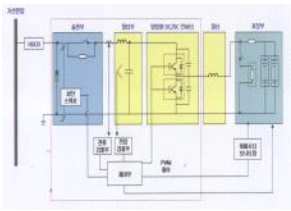
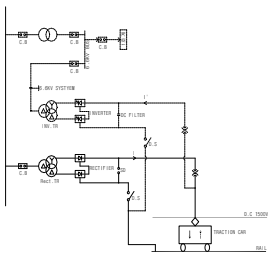
(1) 검토개요

•차량 제동시 발생되는 회생 전력은 인접 역행차량에 사용되나 인접한 역행차량이 없을 경우 가선전압 상승 및 회생실효 됨(가선전압상승→회생제동 차단→공기제동 체결→마찰열 발생) 따라서, 회생전력장치를 설치하여 가선전압 안정화 및 회생실효 방지를 도모하고자 함.
•기대효과 : 에너지 절감, 가선전압 안정, 차량 정위치 및 승차감 향상, 공기제동 감소에 따른 터널환경 개선,유지보수비 절감가능

(2) 회생전력 장치 이용현황

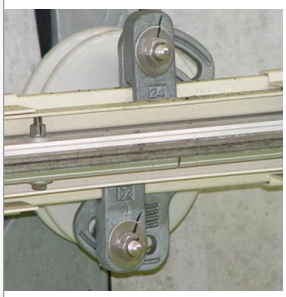
•국내 및 국외에서 보고된 자료에 의하면 회생전력량은 노선 및 차량 특성 등에 따라 다르나 대부분 전체 견인 전력량에 약 40~45% 정도가 되며, 이에 따라 회생 가능거리, 경제성, 안전성 등을 검토하여 시스템을 적용하게 됨.
•기존 시스템은 회생전력이 적을 경우 대부분 차량에서 제동저항을 통해 에너지를 소모시키는 방법으로 운행되고 있으나 최근에는 저장매체에 저장하였다가 역행차량에 공급하는 저장장치가 개발되어 설치하는 추세임.

(3) 회생전력 장치 비교

구 분	에너지 저장장치		회생 인버터
	축전지 방식	슈퍼 캐패시터 방식	
형태			
원리	•제동시 발생하는 회생에너지에 는 가선전압을 상승시키므로, 이를 억제하기 위해서 리튬전지에 충전하고, 전압 저하시는 충전한 회생에너지를 방전하기 위한 쌍방향 쵸퍼 제어	•제동시 발생하는 회생에너지는 가선전압을 상승시키며 이러한 회생에너지를 슈퍼캐패시터에 저장하였다가 역행시 가선전압이 하강하게 되면 저장되었던 에너지를 가선으로 재공급하여 차량에서 소모	•제동시 발생하는 회생에너지를 반도체 소자를 이용한 인버터에서 교류로 변환하여 변전소의 교류 전력공급계통으로 역송전을 실시하여 회생에너지를 소모
특징	•가선전압 안정화 •계통이 간단 •차량의 회생실효 방지 •Peak-cut에 의한 전력비 저감 •정전시 긴급주행이 가능(1편성씩 이동 가능)	•가선전압 안정화 •차량의 회생실효방지 •Peak-Cut에 의한 전력비 저감 •정전시 긴급주행이 가능(1편성씩 이동 가능)	•소비전력 절감효과 기대 •계통이 복잡 •설치 면적 증가 •고조파 대책 필요
설치면적	•약 7.08㎡(77%)	•약 9.23㎡(100%)	•약 20㎡(217%)
시설비	•개소당 약 8억(4천2백만원 /kWh)	•개소당 6.7억(1억8천6백만원/kWh)	•개소당 5~15억

적 용 사 례	•서울지하철9호선	•인천2호선 •대전지하철 •서울지하철9호선	•인천IAT •서울지하철 9호선
검토의견	•최근 차량 성능 향상에 따른 회생전력량 증가로 실제 운행 노선에서의 회생 잉여 전력을 활용하는 추세이며, 전력시뮬레이션을 실시하여 회생전력량에 따른 잉여 전력 및 정부시책에 따른 에너지절감 대책 강구 등을 고려하여 시스템 선정		

마. 경전철의 집전방식 검토

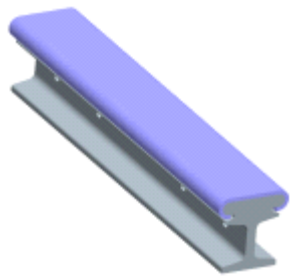
항 목	측면 접동방식	하면 접동방식	상면 접동방식
형태 예시			
구성방식	•전동차의 집전자가 도전레일의 측면을 접동하는 방식	•전동차의 집전자가 도전레일의 하면을 접동하는 방식	•전동차의 집전자가 도전레일의 상면을 접동하는 방식
특성	•지지금구 다소 복잡	•지지금구 다소 복잡	•측면만 절연가능
안전성	•매우 낮음 (도체 완전 노출)	•매우 높음 (도체 완전 차단)	•보통 (도전체 상부 노출)
유지보수	•용 이 함	•다소 어려움	•용 이 함
집전효율	•보통	•보통	•우수
적용	•고무차륜, 자기부상, 모노레일	•철제차륜	•철제차륜, LIM형
적용사례	•의정부 경량전철 •경산 시험선 •자기부상 시험노선	•부산-김해 경량전철 •인천2호선 •우이-신설선	•용인 경량전철
검토의견	•차량 시스템과 일치되며 안전성 및 유지보수성을 감안하여 접촉방식을 선정 함.		

바. 경전철의 급전전압 검토

구 분	DC 750V	DC 1,500V
개 요	•경전철에 주로 사용되는 방식으로 일반적으로 제3레일 가선방식을 사용	•중전철에 주로 사용되는 방식으로 일반적으로 가공전차선 가선방식을 사용
부하전류	100%	50%
사고전류	50%	100%
전압강하	크 다	작 다
전선단면적	100%	50%
변전소간격	2 ~ 3㎞	3 ~ 4㎞
설비크기	작 다	크 다
검토의견	• 경전철의 경우 부하전류가 적어(2량 편성) 전압강하가 작을 뿐 아니라 설비 면적이 작아 토목 구조물 단면적을 최소화 시킬 수 있으며 국내경전철 표준전압인 직류 750V 방식 선정	

사. 제3레일 전차선(Power Rail)의 구성

(1) 급전레일(Power Rail)

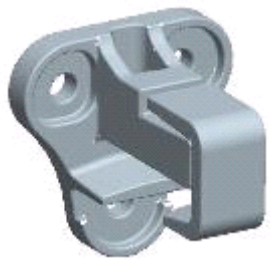


•차량의 집전장치와 접동하며 차량의 부하전력을 공급하는 설비로서 알루미늄 몸체에 STS 접동판을 일체화시킨 구조이다.

종별(공칭단면적) [㎟]	중량[㎏]	비고
알루미늄 : 3,834	124.8	12m
STS : 690	64	

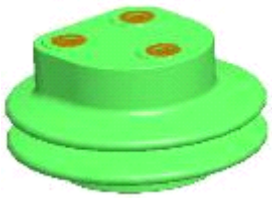
•허용전류 : 3,800A

(2) 지지금구(Claw Supporter & Mover)



• 도전레일을 고정하는 장치로 온도 팽창에 의한 마찰을 최소화 하며 전기적 사고에 대하여 충분히 견딜 수 있어야 한다.
• 표면처리 : 용융아연도금
• 재 질 : Cast Iron

(3) 지지애자(Insulator)



•도전레일을 구조물과 전기적으로 절연하며 전기적, 기계적 충분한 강도를 가지며 습기 및 자외선에 강한 에폭시 계열의 재질을 사용한다.

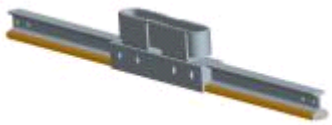
취부길이 [㎜]	날개지름 [㎜]	날개수 [개]
75 ± 1	145Φ	2

(4) 접동완화장치(Ramps, End Approach)



•Air Gap 구간에서 차량의 집전장치가 도전레일과 원활하게 접동이 이루어지도록 경사면을 갖도록 한다.
•저 속 용 : 1:20
•고 속 용 : 1:50

(5) 신축흡수장치(Expansion Joint)



•도전레일이 온도 변화로 인하여 팽창 및 수축되는 것을 흡수하는 설비로서, 도전레일 10본마다 접속개소를 설치한다.

(6) 고정장치(Midpoint Anchor, Fixed Anchor)

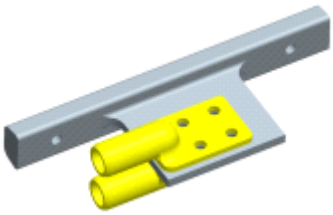


•신축 흡수장치와 신축 흡수장치의 중앙에 설치하여 집전장치의 마찰력 등으로 인하여 이동하지 않도록 도전레일을 고정하는 설비이다.
•표면 처리 : 용융아연도금
•재질 : Cast Iron

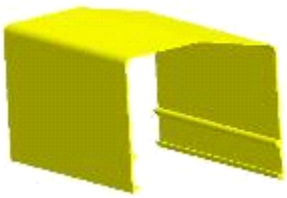
(7) 접속장치(Rail Joint, Fishing Plate)

	•도전레일을 전기적, 기계적으로 연결하며 풀림 방지용 볼트와 너트를 사용하여 접속한다. •단면적 : 1,484 [㎟] •중량 : 1.48 [kg/개] (L=400㎜)

(8) 케이블 접속단자(Cable Terminal Plate)

	•도전레일에 급전케이블을 전기적, 기계적으로 연결하며 풀림방지용 볼트와 너트를 사용하여 접속한다.

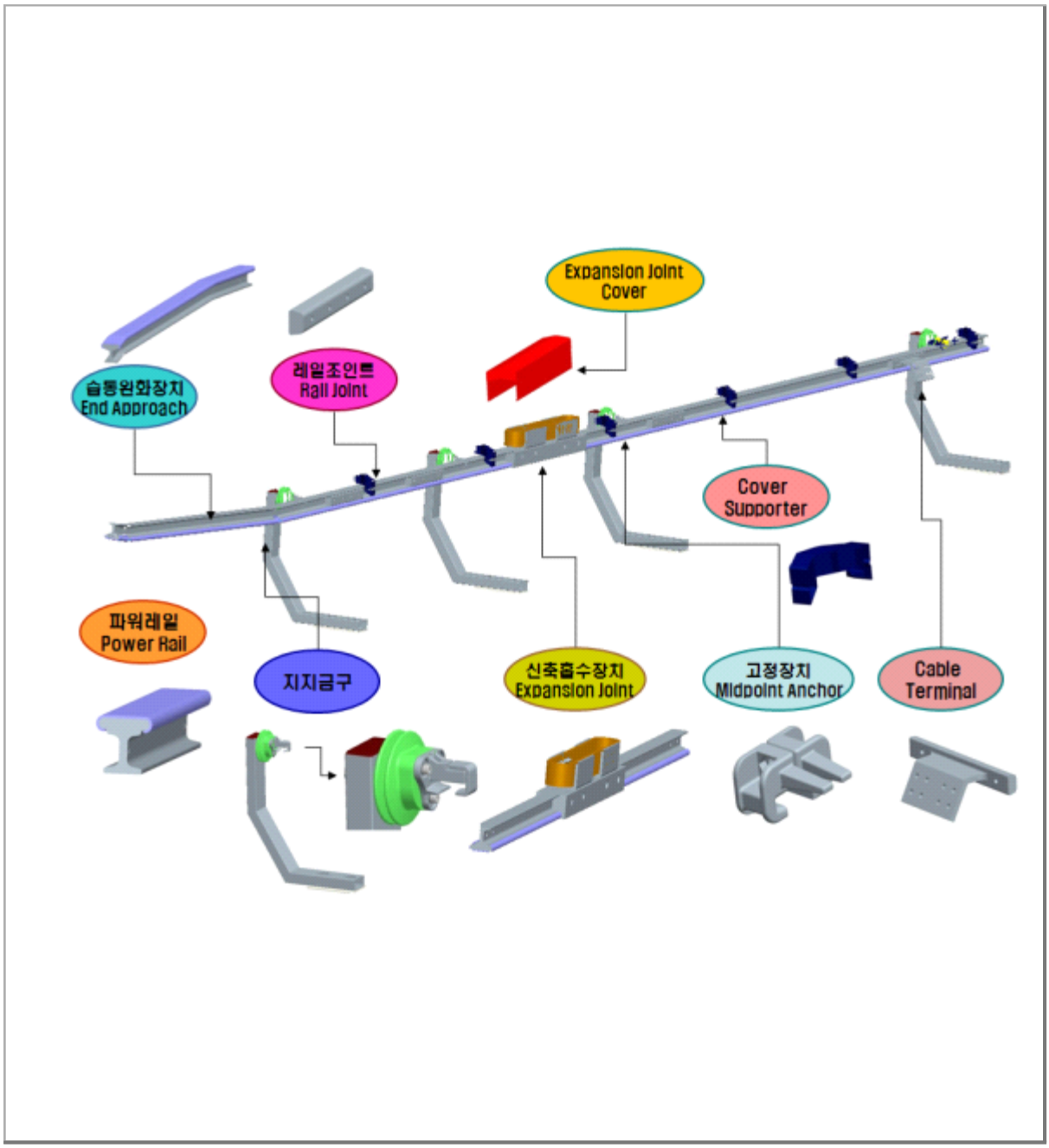
(9) 보호커버(Protection Cover)

	•도전레일의 접촉에 의한 감전사고와 추락물에 의한 접지사고를 방지하기 위하여 도전레일의 상단에 설치한다. •재질 : GRP (난연성 재질) •설치개소 : 본선 및 차량기지 전 구간

(10) 급전케이블(Feed Cable)

•급전변전소로부터 제3레일에 DC 750V 전력을 공급하기 위한 케이블로서, 터널환경에 적합하고 케이블 벤딩이 용이한 무독성 난연케이블(HF-EMSG : Halogen Free-Electric Metro Safe Guard)을 사용한다. •공칭전압 : DC 1,500V •도 체 : 주석 도금 연동선 •절 연 체 : EVA(Ethylene Vinyl Acetate)

(11) 시스템 구성도


Expansion Joint Cover
습동완화장치 End Approach
레일조인트 Rail Joint
Cover Supporter
파워레일 Power Rail
지지금구
신축흡수장치 Expansion Joint
고정장치 Midpoint Anchor
Cable Terminal

3.6. 결과검토 및 향후 과제

3.6.1. 연구개발의 결과검토

본 과제의 추진을 통하여 (1) 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술 연구, (2) 축소형 LPM 추진시스템 제작 및 기본 원리 구현, (3) 실스케일 LPM 추진시스템 모형 및 기본 원리의 검증, (4) LPM BOM 시스템 구축, (5) LPM 추진시스템 실용화 검토를 하여 LPM 추진시스템의 원천기술을 개발하였으며 세부 연구내용 및 그 결과는 다음과 같다.

(1) 철도차량용 LPM 추진시스템 기초기술

○ LPM 추진시스템의 철도적용 타당성 평가

- 국가에서 추진하고 있는 신성장 동력 및 녹색 성장 관련 정책, 철도 관련 정책 및 규제를 탐색하여 LPM 추진시스템 기술개발의 타당성을 정책적, 기술적, 경제적인 측면에서 분석하였음
- 타 선형전동기 및 기존의 철도차량 추진시스템과 비교하여 차량 경량화, 제어 단순성, 열차제어시스템과의 결합 등 시스템 구축 측면 및 경제성 등에서 우수하며, 특히 유지보수 측면에서 기존차량 대비 23% 수준일 것으로 예측

○ 철도차량 추진을 위한 LPM 기초기술 연구

- LPM 추진시스템의 경우 BLDC 전동기에서 구동원리를 찾을 수 있고, 이를 토대로 LPM 추진시스템 모델링 진행
- 고정자 전압방정식은 2극의 회전기기로 생각하여 유도할 수 있으며, 이를 기반으로 토크 방정식 등을 도출하고, 회전기기와 선형기기 사이의 변환을 위한 변환식 유도
- LPM 추진시스템의 역기전력은 그 구조의 특성 상 근사 사다리꼴 형태로 발생하며, 따라서 구형파 전류제어방법이 토크 리플 저감 측면에서 유리
- LPM 추진시스템 모델링을 기반으로 그 특성을 살펴보기 위해 전류제어기를 설계하고 시뮬레이션 모델을 구축
- 실모형 설계 파라미터를 이용하여 시뮬레이션한 결과, 지상 코일에 2,000A를 공급할 경우 발생되는 추력은 약 5kN이 될 것으로 예측

(2) 축소형 LPM 추진시스템

○ 축소형 LPM 추진시스템 개발

- 인버터, CPU보드, 게이트 보드 등 축소형 LPM 추진시스템의 사양을 결정하고, 설계 및 제작 진행
- 전류 제어를 위해서는 대차의 위치정보가 필요하고, 이를 위해 위치센싱용 홀센서 및 대차에 부착된 영구자석을 이용하여 구성

○ 축소형 모델 해석 연구

- 축소형 모델의 파라미터를 이용하여 2차원, 3차원 유한요소해석 모델 구축하여 축소형 모델에 대한 성능 예측
- 역기전력 시뮬레이션 결과와 실측한 데이터를 비교한 결과 그 결과가 유사함을 확인하여 해석 모델의 정확성 검증
- 해석 모델에 전류 200A를 인가하여 추력을 예측한 결과 2차원 모델의 해석결과는 4.65N, 3차원은 5.05N의 추력을 보였고, 실제 실험에서는 전류 150A에서 약 3.9N의 결과를 보임
- 해석 결과와 실제 실험에서의 차이는 지상 코일에 투입한 전류의 차이에서 기인하며, 동일한 전류를 인가하였을 경우 해석 결과와 실험 결과가 근사한 결과를 얻을 것으로 예상

○ LPM 추진시스템 분석 및 토크 리플 저감 연구
- LPM 추진시스템은 지상 코일 권선설치 방식으로 인해 A상과 B상의 역기전력이 동일하게 나타나지 않음
- 이는 공극 길이의 변화로 인하여 각각의 상 권선에 쇄교하는 쇄교자속의 최대치가 다르기 때문임
- 따라서, A상과 B상에 동일 전류를 흘릴 경우, 역기전력의 차이만큼 토크 리플이 발생함
- 토크 리플을 저감하기 위해서는 각 상의 전류를 역기전력의 차이만큼 차이를 두어 인가하여야 하며, 토크 리플을 최소로 하는 전류 제어 기법 제안
- 제안 방법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 모의 실험을 진행하였고, 보상 기법 적용 전과 후의 토크 리플 편차는 약 77%에서 약 48%로 29%의 리플 감소 확인

(3) 실모형 LPM 추진시스템

○ 실모형 LPM 추진시스템 설계 및 제작
- 지상 LPM 추진시스템 설계 및 제작
  ▷지상 코일은 전류가 통전하여 이동자의 자기장과 반응하여 힘을 발생하는 장치임
  ▷ 2상 2열 구조로 설계하였으며, 통전 최대 전류는 2,000A 기준임
- 차상 계자용 전자석 설계 및 제작
  ▷ 차상 전자석에는 DC전류가 공급되어 일정한 자기장을 만들어 지상 코일과 상호작용으로 힘을 발생하는 장치임 (8극으로 제작)
- 차상 전원용 전원공급시스템 모듈 설계 및 제작
  ▷ 차상 계자 전자석 및 기타 전력소모장치에 전원을 공급하기 위한 전원장치 제작
  ▷ 유도집전방식은 집전코일이 차량의 이동방향에 따라 지상코일이 생성하는 직류자계 안에서 역기전력이 유도되는 점을 이용
  ▷ 차상의 각족 전자부품 및 전자석에 전력을 공급하기 위해 배터리 및 배터리 충전을 위한 충전기, 정전류 공급을 위한 전력변환장치를 제작
- 지상 대전류 공급용 전력변환장치 모듈 시작품 설계 및 제작
  ▷ 지상 대전류 공급용 전력변환장치는 컨버터, 인버터, 냉각장치, 위치센서, 브레이크 시스템, 표시장치 등의 6가지 구성품으로 구성
  ▷ 표시장치의 경우 모든 구성품으로부터 정보를 받아 사용자에게 표시해 주며, 사용자

로부터 입력을 받아 LPM 추진시스템을 제어하는 역할을 수행하여 최종적으로 실대차를 사용자가 편리하게 운행할 수 있도록 함

- 실대차 제작 및 시스템 통합

▷ 실대차는 LPM 추진시스템의 차상 장치를 장착하여 주행하는 장치로, 위치검출용 영구자석, 차상 전자석, 배터리, 전력변환장치, 브레이크 시스템 등을 탑재하고 있음

▷ 일반 철도차량의 대차와는 다르게 하나의 차륜에 하나의 차축을 적용하는 액슬레스 차축을 채용하여 곡선구간 통과 시 성능향상 및 소음 저감에 강점이 있음

○ 실모형 LPM 추진시스템 해석 모델 구축

- 실모형 모델의 파라미터를 이용하여 2차원, 3차원 유한요소해석 모델을 구축하여 실모형 LPM 추진시스템의 성능 예측

- 해석 모델에 전류 2,000A인가할 경우, 2차원, 3차원 모두 추력은 약 3.6kN을 보였으며, 리플은 다소 큰 60%를 갖는 것을 확인하였다. 큰 리플은 진동이 심하기 때문에 주행시 승차감에 영향을 줄 수 있으나, 관성이 큰 철도차량의 특성으로 인하여 승객이 느끼는 승차감에는 큰 영향이 없을 것으로 판단됨

○ 철도차량용 LPM 추진시스템 성능평가

- LPM 추진시스템의 성능평가는 4가지 항목에 대하여 진행되었으며, 그 결과는 다음 표와 같음

성능평가 항목	목표치	달성치	달성여부
지상 LPM 추진시스템 평가 (견인력 측정)	5kN 이상	5.6kN	달성
차상 계자용 전자석 성능평가 (차상자기장 측정)	1.2T 이상	1.08T (180A 시)	달성 (200A 공급시)
차상 전원용 전원장치 성능평가 (차상 전력 공급량 측정)	5kW 이상	40kW이상	달성
지상 전력변환장치 성능평가 (전력량 측정)	200kW급	200kW 이상	달성

(4) LPM BOM 시스템 구축

○ LPM BOM 시스템 구축(안)

- 실대차 모델의 장치는 크게 차상장치와 지상장치로 분류하였음

- 차상장치는 실대차 모델에 장착된 장치로 대차, 전자석 전원공급장치, 추진용 전자석, 유도집전장치, 제동제어장치, GPS장치로 구성됨

- 지상장치는 지상코일, 차량 위치 검지시스템, 인버터 장치, 컨버터 장치, 모니터링 시스템으로 구성됨

- BOM 시스템은 실대차 모델의 구성부품 레벨에 따라 부품 LEVEL을 0~7LEVEL까지 계층구조로 하는 BOM Tree를 구성하였으며, 데이터 정보는 BOM 부품명, 부품번호, 부품버전, 단가, 원명, 부품등록정보, 부품재질, 업체부품코드, 정비지침서, 원수량, 위치, 특

기사항, 일련번호, 구매단가, 구매일자, 고유수명, 기타정보, 문서정보 등을 포함하고 있음

- 또한, 고장이력을 관리할 수 있도록 고장일, 장소, 고장유형, 고장현상, 고장 원인 및 조치내역을 관리할 수 있도록 시스템 구축됨

○ 유지보수 체계 구축(안)

- 서울도시철도공사의 유지보수체계를 기반으로 LPM 추진시스템의 유지보수체계(안)을 구성
- LPM 추진시스템은 기존 도시철도 전동차와 달리 추진을 위한 인버터 장치와 견인전동기 고정자가 차량이 아닌 지상에 설치되어 있기 때문에 차상장치와 지상장치의 검사를 구분하여 차량을 운용하는 경정비 수준의 검사에 대해 설정함
- 또한, 정기검사를 시행하기 위해 검사대상기기에 대한 항목별 세부 검사기준을 수립함
- 고장 부품의 수선 및 중정비 업무 수행을 위한 부품별 표준작업 절차서를 마련하였고, 이를 위해 각 구성품에 대한 유지보수 매뉴얼 작성함

(5) LPM 추진시스템 실용화 검토

○ 철도종합시험선로 Test-Bed 구축(안)

- 철도 핵심 분야별 부품단위, 구조단위 성능평가와 인터페이스 성능평가가 가능한 철도종합시험선로내에 LPM 추진시스템의 Test-Bed구축을 위한 변전설비부터 지상코일 전원공급용 전력변환장치에 전원공급이 용이하고, 구배기동시험이 가능한 시험선로(안)을 구성함
- 자갈궤도와 콘크리트궤도의 지상코일과 레일체결장치 및 침목과의 간섭여부를 검토하엿음
- 자갈궤도는 지상코일의 형상 축소 없이 설치가 가능하나, 콘크리트궤도는 코일 형상의 축소가 필요함
- 지상코일지지 앵커와 P.S강선 배치에 대해 검토한 결과, 자갈궤도에 부설되는 P.C침목의 경우 저촉되지 않는 것이 확인되나, 이격 거리가 미소하여 시공오차 발생 등이 발생할 우려가 있음

○ LPM 추진시스템 전원공급 방안

- LPM 추진시스템의 지상 전력변환장치에는 선로 손실 등을 고려하였을 때, 22.9kV의 교류전원으로 전원을 공급하는 것이 유리할 것으로 판단됨
- 전력변환장치는 440V가 필요하므로 변압기가 필요하며, 변압기 용량을 시제품 제작사양을 기준으로 선정함
- 또한, 케이블 역시 시제품 제작사양을 기준으로 굵기 및 선종을 정하였고, 변전소에서부터 선로변에 설치되어 있는 공동관로를 이용하여 포설 예정임

3.6.2. 연구개발 효과

본 연구를 통해 확보된 LPM 추진시스템의 원천기술은 LPM 추진시스템의 실용화를 위한 기술개발에 적용할 수 있으며, 따라서, 다음과 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

○ 기존 철도의 속도향상을 저해하는 가공전차선 방식의 집전 및 추진장치를 제거하여 에너지 소모량을 저감하여 경제적인 철도시스템 운영이 가능

○ LPM 추진시스템을 기존 철도차량에 적용함으로써 차량의 경량화, 등판능력향상, 터널단면적 축소 등을 통한 인프라 비용 절감이 가능

- 철도 터널 단면 축소를 통한 건설비 절감
- 가공 전차선 설비 저감
- 유지보수 비용의 절감

○ 기존의 추진시스템 방식에서 벗어나 새로운 추진시스템의 개발 활성화에 따른 철도문화 개선 및 국가 경쟁력 향상

- 경전철 속도향상을 통한 타 교통수단과의 경쟁력 확보
- 관련기술을 차량제작사에 이전함으로써 사업화가 가능하고, 대형철도시스템에 접목한 국외사업화로 성과의 국외확산 및 기술적 우위에 따른 대외기술경쟁력 확보

3.6.3. 연구성과 활용방안

LPM 추진시스템은 저심도철도의 급구배 등판 시 부족한 추진력을 보완하는 기술로 적용이 가능하다. 또한, 산악 트램 및 놀이시설의 롤러코스터 등 급구배 추진이 요구되는 타 수송수단에 적용할 수 있어, 세계 테마파크의 시장의 50% 이상을 점유하고 있는 미국 (2007년 매출 12조원, 입장객 3억 4천만명)으로 시장 진출 모색이 가능하다.

또한, 미래 전기철도 추진시스템의 핵심 기술 개발을 통하여 성능 검증 및 효율적 활용에 대한 운영 모델로 활용할 수 있고, 향후 국내외에서 추진되고 있는 비점착 구동 추진시스템을 위한 핵심 기술 및 핵심 장치 개발에 활용이 가능하다. 철도 운영기관에서의 신 비즈니즈 모델 창출에 활용하여, LPM 추진시스템을 적용한 물류운송시스템 개발 시 매립형 궤도를 이용하여 타 지상교통수단에 장애를 주지 않고, 물류운송 네트워크 구축 가능하다.

그 외, 아래와 같은 분야에서 본 연구 성과의 확산이 가능할 것으로 예상된다.

○ 국내 철도기관의 해외 진출시 기술 우위를 선점하기 위한 기술 자료로 확대 활용

○ 고부가가치형 철도 추진시스템으로서 산업체로의 기술이전 가능 및 기술 선점으로 수출 동력화 추진

○ 철도시스템 분야 국가 경쟁력 확보 및 철도차량 분야의 세계시장 선도에 기여

○ 타 운송수단 분야에 대한 기술지원 및 확산에 활용

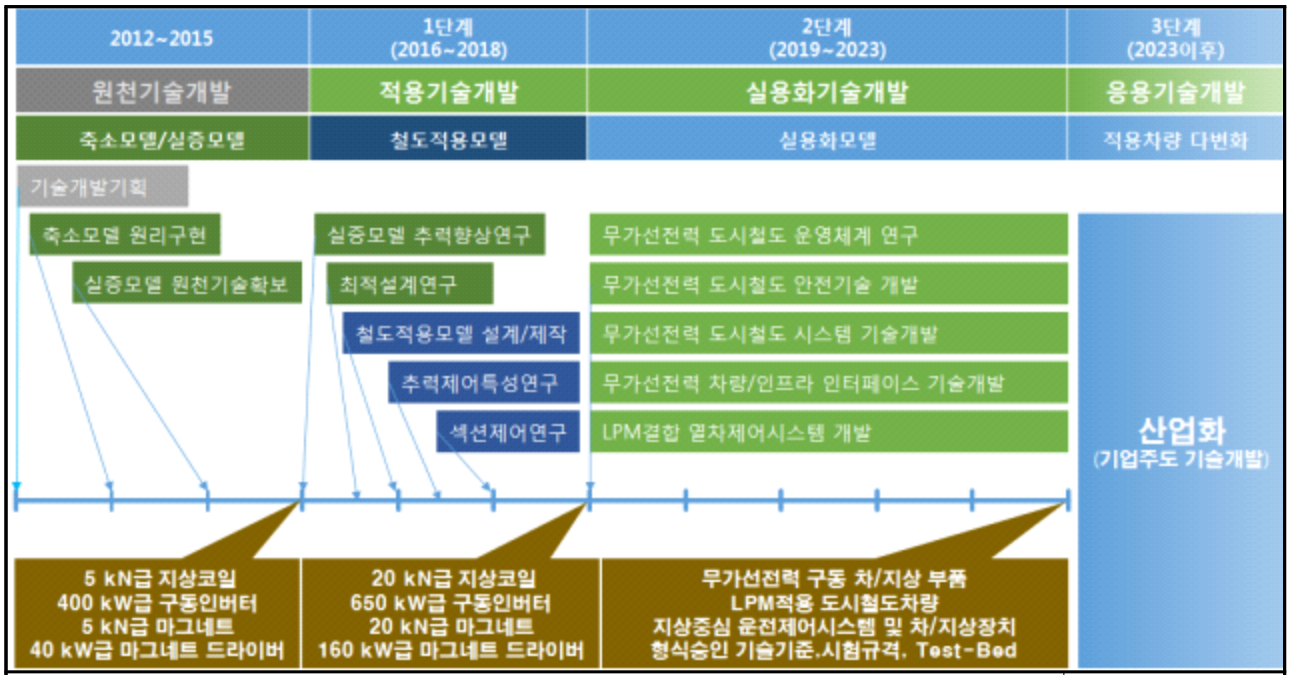
○ 새로운 철도차량 활용의 활성화 기여

3.6.4. 향후 과제

본 과제의 진행을 통하여 5 [kN/대차]급의 실증모델을 구축하였으며, LPM 추진시스템을 철도차량에 적용하기 위한 시스템 구성 및 제어 등의 원리를 구현하고 검증하였으며, 핵심원천기술을 확보하였다. 이를 상용화 시키기 위해서는 적용모델의 구축을 통한 추력의 향상이 가장 요구된다고 할 수 있으며, 도시철도차량과 추력을 비교하면 다음과 같다.

견인력	실증모델	용인경전철	도시형자기부상	중형전동차	대형전동차
	5 kN/대차	20 kN/대차	14 kN/대차	20 kN/대차	30 kN/대차

따라서 본 원천기술개발의 다음 단계로 확보된 원천기술을 실용화 또는 상용화를 실현시키기 위한 적용기술의 개발이 필요하며, 해결하여야 하는 과제로는 핵심장치의 안정화/제품화, 철도차량/지상설비 등 철도시스템내에서의 인터페이스 및 시스템 통합, 실용화 모델 및 테스트 베드의 구축을 통한 안정화, 관련 기술기준 및 형식승인 등 제도적 차원의 사용환경 조성, 운영/유지보수 등의 안전관리체계의 구축 등이 요구된다고 할 수 있으며, 향후 요구되는 개발 로드맵 및 소요예산은 다음과 같다.



국가주도 기술개발			기업주도기술개발
약 22억 집행	약 50억 소요	약 200억 소요	-

참고문헌

[1] 서울시정개발연구원, 교통혼잡지역 신교통수단 도입 타당성조사 및 기본계획수립 연구, 최종보고서, 2001.

[2] 삼안건설기술공사, 쾌적한 도시교통을 위한 경량전철현황, 2002.

[3] 한국철도대학, “경량전철기술”, 한국철도대학, 2005. pp. 5

[4] 김백, “전철전력공학”, 기다리, 2005. pp. 20

[5] 건설교통기술평가원, 전자장 가속방식 활용 철도차량 추진시스템 핵심기술 개발 기획보고서, 2012

[6] 한국철도시설공단, 도시형 자기부상열차 실용화 사업 년차 보고서, 2010

[7] 한국철도기술연구원, 차세대 고속철도기술개발사업 년차 보고서, 2010

[8] 한국철도기술연구원, 초고속튜브트레인 핵심 기술 개발 연구보고서, 2010

[9] 건설교통기술평가원, EMS기반의 초고속 철도시스템 원천기술 개발 기획 보고서, 2011

[10] 이형우, 이영훈, 이창영, 권혁빈, 강부병, 한영재, “초고속 자기부상철도의 추진시스템 기술,” 한국철도학회, 철도저널 한국철도학회지 제11권 제3호,2008. 9, pp.12~16.

[11] 도시형 자기부상열차 실용화사업, “추진제어 알고리즘 구현 및 최적화,” 건국 대학교, 2008.

[12] Hirai, Junji, Tae-Woong Kim, and Atsuo Kawamura. "Position-sensorless drive of linear pulse motor for suppressing transient vibration." Industrial Electronics, IEEE Transactions on 47.2 (2000): 337-345.

[13] Kim, Dong-Hee, et al. "Manufacture and estimation of two phase driver for hybrid type linear pulse motor." Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on. IEEE, 2008.

[14] 張謙, “The Research of a Novel Stator Section Crossing Method of Long Stator LSM Linear Synchronous Motor for High Speed Maglev Vehicles”, 北京交通大學, 2007

[15] Peter Mutschler, Ralph Kennel, “Investigation of Control Methods for Segmented Long Stator LSM Linear Drives” der Technischen Universität Darmstadt,2008

[16] R. Benavides, P. Mutschler,“Controlling a System of Linear Drives”, IEEE PESC, Power Electronics Specialists Conference, 2005

[17] Yoshida. K, Takami. H, Fujii. A, “Smooth Section Crossing of Controlled-Repulsive PM LSM Vehicle by DTC Method Based on New Concept of Fictitious Section” IEEE Trans. Industrial Electronics, 2004

[18] Yoshida. K., Takami. H, Kong. X, Sonoda, A, “Mass Reduction and Propulsion Control for a Permanent-Magnet Linear Synchronous Motor vehicle" IEEE Trans. Industry Application, Volume:37, pp 67~72, 2001

[19] Seki. K, Watada. M, Torii. S, Ebihara. D,“ Discontinuous Arrangement of Long Stator LSM Linear Synchronous Motor for Transportation System", power Electronics and drive systems, volume: 2

pp.697~702, 1997

[20] 김상훈, “DC, AC, BLDC 모터 제어,” 복두출판사.

[21] 설승기, “전기기기 제어론,” 홍룡과학 출판사.

[22] Klaus Heinrich and Rolf Kretzschmar, Transrapid MagLev System, Hestra-Verlag Darmstadt, 1989.

[23] H.-W. Lee, K.-C. Kim, and J. Lee, “Review of maglev train technologies,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 42, No. 7, pp. 1917-1925, 2006.

[24] Chang-Hyun Kim, Han-Wook Cho, Jong-Min Lee, Hyung-Suk Han, Bong-Seup Kim, and Dong-Sung Kim, “Design of hybrid-excited linear synchronous motor for magnetically levitated vehicle”, The 8th LDIA, Netherlands, 2011.

[25] 도시철도기술자료집(7) (이엔지·북)

[26] 도시형자기부상열차 설계보고서

[27] 도시철도공사 정비지침서(5, 6, 7, 8호선)

[28] 도시철도공사 사규(전동차관리규정, 전동차검사규정, 전동차검사규정시행내규)

[29] 이호용 외 다수, 도시철도 CBD 기반의 유지보수 BOM 시스템 개발, 한국철도학회, 제7권 제4호, 2004년

[30] 안태기 외 다수, 전동차 BOM 관리 시스템 개발, 2004년도 대한전기학회 논문집 2004.7.14.-16

[31] 백남욱 외 다수, 철도차량 시스템공학, 골든벨, 2013년

[32] 콘크리트궤도 경쟁력 평가 및 향상방안 연구, 국토해양부, 2010

[33] 선로용품도, 한국철도시설공단, 2009

[34] 철도표준도(노반편/궤도편), 한국철도시설공단, 2009

[35] 콘크리트구조기준, 국토해양부, 2012

[36] 콘크리트용 앵커 설계법 및 예제집(제2판), 한국콘크리트학회, 2010

[37] KS B ISO 898-1 : 2003, “탄소강과 합금강으로 제작한 나사부품의 기계적 성질 - 제1부 : 볼트, 스크루 및 스터드”, 한국표준협회, 2003

[38] KS B 0233 : 2005, “강제볼트 작은나사의 기계적 성질”, 한국표준협회, 2005

[40] 철도종합시험선로 건설공사 설계보고서

[41] 김광현, “리니어 펄스 모터의 연구 동향”, 전력전자학회, 2001

[42] 윤신용, “리니어 펄스 모터의 추력 및 수직력에 대한 특성 해석” ,Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 13. No.4, pp. 142~151 November 1999

[43] 김성현, “리니어펄스모터의 신기술 동향”, 전기학회지 제 48권 2호, 1999

[44] 김동희, “리니어 펄스모터의 추력산정 비교분석”, 전력전자학술대회 논문집. 2002

[45] 김성종, “양측식 리니어 펄스 모터의 자로와 정특성 해석”, 전기학회논문집, 2002

[46] 김동희, “리니어펄스모터의 2상 구동드라이버 제작 및 평가”전력전자학술대회 논문집, 2002

[47] 김일남, “퍼미언스법에 의한 공압 부상형 리니어 펄스모터의 힘 특성 해석”, Jounal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineer Vol. 13, No, pp. 160~169 November 1999

[48] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992.

[49] 加川幸雄, 有限要素法の實際, オーム사, 1982.

[50] 山本行雄. 電磁界解析のための有限要素法, トリケップス, 1986.

[51] S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines, Kluwer Academic Publishers, 1995.

[52] F. Piriou and A. Razek, "Calculation of saturated inductances for numerical simulation of synchronous machines," IEEE Trans. Magn., vol. 19, no. 6, pp. 2628-2631, November 1983.

[53] D. Pavlik, V. K. Garg, J. R. Repp, and J. Weiss, "A finite element technique for calculating the magnet sizes and inductances of permanent magnet machines," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 3, no. 1, March 1988.

[54] Liuchen Chang, "An improved FE inductance calculation for electrical machines," IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 4, pp. 3237-3245, July 1996.

[55] 강규홍, 홍정표, 김규탁, “유한요소법을 이용한 매입형 영구 자석 동기전동기의 인덕턴스 산정 및 속도-출력 특성,” 대한전기학회 논문지, vol. 48B, no. 8, pp. 408-416, August 1999.

[56] 이상엽, 곽상엽, 김재광, 정현교, “고정 투자율법을 적용한 매입형 영구 자석 전동기의 특성 해석,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 941-943, 2004.

[57] G. H. Kang, J. P. Hong, G. T. Kim, and J. W. Park, "Improved parameter modeling of interior permanent magnet synchronous motor based on finite element analysis," IEEE Trans. Magn., vol. 36, no. 4, pp. 1867-1870, July 2000.

[58] I. S. Jung, S. B. Yoon, J. H. Shim, and D. S. Hyun, "Analysis of force in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor," International Conference IEMDC 1997, 1997, pp. MC1-8.1-MC1-8.3.

[59] 정인성, “개선된 수치해석 기법을 이용한 영구 자석형 선형 동기전동기의 특성해석,” 한양대학교 박사학위논문, 1999.

[60] “실험계획법(DOE) 추진방법”, 품질혁신 e-mail 교육 276호, 14page, 2010년

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 기술료사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술 연구개발사업의 3차년도 보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토 교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

ISBN : 979-11-87144-36-6