제1장 연구개발과제 개요

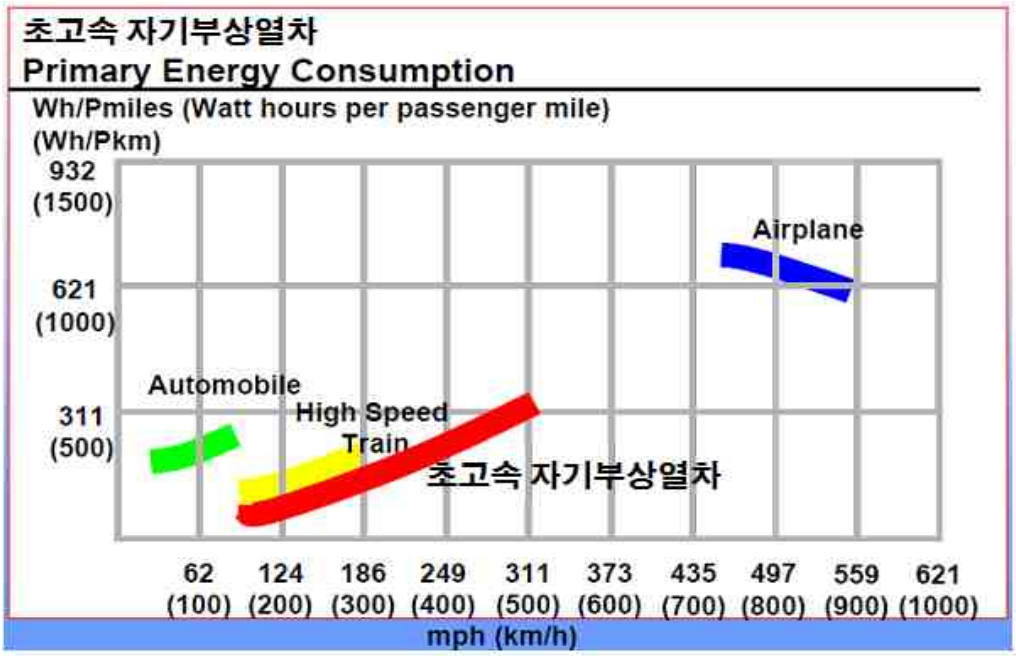
제1절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 필요성

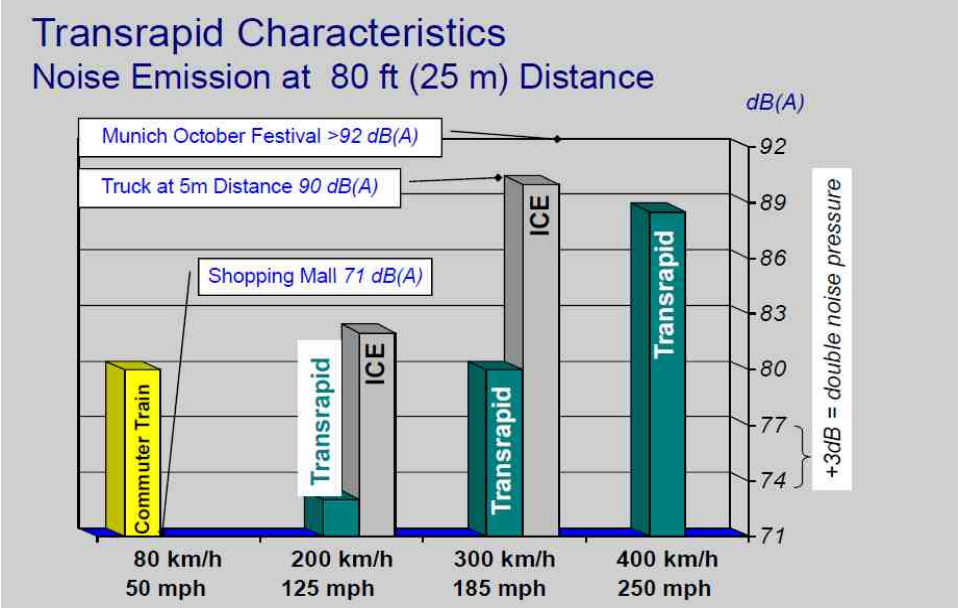
가. 국내외 환경변화 현황 분석

지구온난화 및 원유 공급 감소 또는 고갈로 에너지 효율성 높고 저탄소 녹색성장을 주도할 수 있는 철도산업에 대한 관심이 고조되고 있다. 최근 기상이변에 따른 폭우, 폭설, 지진, 태풍등과 같은 악천후에도 지속적으로 운행이 가능한 신교통수단에 대한 필요성 증가하고 있다. 또한, 전 세계적인 경제 위기에 따른 수출경기 둔화에 대한 경기부양책으로 초고속 자기부상철도 등과 같은 SOC에 투자 필요성 대두되고 있다.

이동수단으로서의 고속철도에 대한 수요 증가로 철도에 대한 증속 요구는 나날이 증가되고 있다. 그러나 기존의 바퀴식 철도의 초고속화에는 초고속 주행 시 차량의 탈선 문제, 차량에서 요구되는 대전력 에너지 급전문제, 초고속 주행 시 철도기준에서 정하는 안전거리 내에서의 제동문제, 고속 주행 시 에너지 효율 저하[그림 1.1.1] 그리고 바퀴와 레일사이의 마찰로 인한 소음문제[그림 1.1.2] 등이 존재하며, 이에 대한 대안으로써 초고속 자기부상열차의 필요성이 증가되고 있다.



[그림 1.1.1] 교통수단별 속도대비 소요에너지 비교표



[그림 1.1.2] 운송시스템별 소음 비교

나. 국가 정책과의 부합성

(1) “저탄소 녹색성장” 국가 비전 선포 (2008.8)

경제를 우선시했던 정책에서 기술혁신을 통해 에너지 효율을 높이고 대외 경쟁력을 강화시키는 방향으로 선회하고 있다. 따라서 경제만이 아닌 환경과 경제가 상생할 수 있는 방안을 모색하여야 한다.

(2) 국가기간교통망계획 및 국가철도망계획구축

6대 추진 전략 중 “네트워크형 인프라의 구축전략”에 부합하고 있다. 이와 관련하여 개방 및 다핵연계형 국토구조 형성을 위한 종합기간 교통망 구축, 합리적인 수송분담과 연계를 통한 통합교통체계 구축, 반일생활권의 국가기간교통망 구축 및 자립형 지역발전 지원을 위한 교통체계를 구축하고 있다.

또한, 전국토의 대도시 이동 속도를 대폭 향상시킨 고속화된 철도망을 달성하였는데, 향후 전국을 X자형으로 연결하는 초고속 국가철도망을 구축하고, 수송수요가 높은 구간에 대해 기존선을 초고속화 추진하는 계획이 있다.

(3) 교통체계 효율화법과의 연관성

교통체계효율화법은 크게 국가교통시설투자 효율화, 교통체계 지능화, 교통기술의 진흥, 국가교통위원회 설립 및 운영에 관한 사항으로 이루어지는데, 고속 성능이 우수하고 친환경적인 초고속 자기부상열차는 이에 부합하는 대안으로써 활용될 수 있을 것이다.

다. 초고속 추진기술 개발 및 단거리 시험선 구축의 필요성

상기에 서술한 초고속 자기부상철도 기술의 핵심은 추진과 부상이다. 그 중 속도 500km/h이상의 추진력을 구현하기 위해서는 기존 휠레일 방식의 철도와는 근본적으로 다른 추진방식을 적용해야 한다. 초고속 자기부상철도의 추진에 사용되는 모터는 선형동기모터(Linear Synchronous Motor : LSM)로써 궤도에 설치된 장계자 고정자(Long

stator)로부터 대용량의 추진전력을 공급받게 된다.[그림 1.1.3] 이 때 차량의 정확한 위치를 파악함으로써 차량 대차에 부착된 전자석과 궤도의 고정자 자속을 일치시켜 추진력을 발생시키게 된다.



[그림 1.1.3] 초고속 자기부상철도 추진시스템(LSM)

이와 같은 초고속 자기부상철도 추진시스템의 핵심기술을 구현하기 위해서는 초고속 자기부상철도에 특화된 Long stator용 LSM을 설계하는 기술과 이를 구동시킬 수 있는 대용량의 추진인버터 제어기술 및 추진전력 설계 및 제작 기술 등이 필요하며, 이를 증명할 수 있는 시험선이 필요하다. 따라서 본 과제에서는 초고속 자기부상철도의 핵심기술 중 추진기술에 대해서 550km/h의 추력을 구현할 수 있는 핵심 기술을 개발하고, 이를 증명할 수 있는 초고속 자기부상철도용 단거리 시험선을 구축하여 개발된 기술의 성능을 평가하고자 한다.

2. 연구개발의 목적

앞서 언급한 것과 같이 550km/h 급의 초고속 자기부상철도의 추진시스템 핵심기술을 개발하고 이를 평가하기 위한 단거리 시험선을 구축하는 것을 연구개발의 목적으로 하며, 이를 달성하기 위한 세부 목표는 다음과 같다.

- 초고속 LSM 설계 및 제어 기술 개발
- 초고속 추진 및 전력시스템 기술 개발
- 초고속철도 가이드웨이 기술개발 및 단거리 시험선 구축



[그림 1.1.4] 초고속 자기부상열차 및 단거리 시험선 개발 조감도

제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

1. 연구개발의 정의

본 연구개발의 정의는 550km/h 급 초고속 자기부상철도 추진시스템의 핵심기술을 개발하고 이에 대한 성능을 평가하기 위한 단거리 시험선을 구축하는 것이다.

2. 연구개발의 범위

연구개발의 범위가 [표 1.2.1]에 나타나 있다. 초고속 자기부상철도 추진시스템의 핵심기술인 LSM 설계기술, 인버터 제어기술, 전력장치 설계기술 등이 포함되어 있으며 이에 대한 성능을 평가하기 위한 단거리 시험선을 구축하는 것이 주된 연구개발의 범위이다.

[표 1.2.1] 연구개발 범위

분야	세부 항목	개발 결과	핵심기술 여부
550km/h 급 초고속 자기부상철도용 추진 핵심기술 개발	Long Stator LSM 설계 기술 개발	요구 추력 및 효율 달성	○
	LSM 추진 인버터 제어 기술 개발	요구 최고 속도 및 가속도 달성	○
	추진 전력시스템(컨버터 및 인버터) 기술 개발	전력컨버터 및 인버터 요구 효율 달성	○
	위치검지 시스템 기술 개발	요구 위치 정밀도 달성	
	전력 감시 장치 기술 개발	전력 감시장치 성능 목표 달성	
	에너지 세이버 기술 개발	에너지 세이버 성능 목표 달성	
초고속 자기부상철도용 단거리 시험선 구축	단거리 시험선 및 검수고 구축	가이드웨이, 전력실, 제어실 및 유지보수 설비 구축	○
	가이드웨이 성능 분석	가이드웨이 동적 성능 해석	
시스템 엔지니어링 기술 개발	시스템 인터페이스 기술 개발	시스템 요구사항 및 통합데이터베이스 구축	
	상시 계측시스템 구축	상시 계측시스템 구축	

3. 연구개발의 특징

본 연구에서 550km/h의 속도 구현이 가능한 초고속 자기부상철도 추진시스템 기술 중 LSM 설계기술, 추진인버터 제어기술 및 추진 전력시스템 기술을 개발하고 성능을 평가하는 것이 주된 내용이다. 이를 위하여 실제 크기의 차량에 대해서 요구속도(550km/h) 및 요구가속도(1.1m/s^2)를 위한 추력을 구현할 수 있도록 LSM을 설계하고 제작, 적용하여 성능을 평가하였다. 또한 550km/h급의 초고속 자기부상철도에 사용되는 LSM을 구동시키기 위한 추진 전력시스템 기술 및 추진제어 기술을 개발하고 단거리 시

험선에 적용하여 성능을 평가하였다. 그리고 단거리 시험선 구축을 통하여 초고속 자기부상철도의 기본적인 모든 기능을 구현하고 개발된 핵심기술의 적용 및 성능 평가가 가능하도록 하였으며, 향후 연구개발의 확장 및 심화에 능동적으로 대처할 수 있도록 하였다.

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내 기술개발 현황

초고속 자기부상철도에 대한 본격적인 연구는 한국철도기술연구원에서 2009년부터 시작하였다. 이때는 초고속 자기부상철도와 부상 및 추진원리가 동일한 초고속 튜브트레인 시스템에 대한 추진, 부상, 차량, 급전, 신호, 인프라 기술에 대한 전반적인 선행 기획연구가 이루어졌다. 2010년부터 2012년까지 국가 R&D 과제로 진행된 '루프형 LSM 소형시험장치 및 차량 궤도시스템 간의 인터페이스 연구'에서는 LSM 추진 및 상전도흡인식(Electric Magnetic Suspension : EMS) 기술을 소형시험장치에 구현하여 성공적으로 운행시킴으로써 실질적인 기초기술을 확보할 수 있었다.



[그림 1.3.1] 루프형 LSM 소형시험장치 및 차량 궤도인터페이스 시험장치

2. 국외 기술개발 현황

가. 일본

2015년 4월 일본이 개발 중인 초고속 자기부상열차 MLX L0가 48km의 야마나시 시험선에서 시속 603km를 기록함으로써 육상교통수단으로는 가장 빠른 세계신기록을 수립하였다. 이로써 종전 일본 초고속 자기부상철도가 가지고 있던 581km/h 기록을 갱신하였으며, 일본의 자기부상철도 기술의 우수성을 전 세계적으로 알리는 계기가 되었다.



[그림 1.3.2] 일본 초고속 자기부상철도 세계신기록 속도(603km/h) 달성

일본은 초고속 자기부상철도 방식으로 2027년까지 동경-나고야 노선, 2045년까지 나고야-오사카 노선을 완공하여 시속 500km의 상용운행속도로 운행할 계획을 가지고 있으며 현재 공사가 활발히 진행 중에 있다. 또한 2014년에 완공된 48km의 야마나시 시험선(향후 동경-나고야 노선의 일부로 활용 예정)에서 계속적인 주행테스트를 수행하고 있으며 이 테스트를 통해 여러 가지 기술적인 문제를 해결하고 성능을 향상시키는 작업을 진행 중에 있다.

일본 초고속 자기부상열차는 초전도를 이용하여 추진 및 부상을 하는 것이며, 초전도 특성을 향상시키기 위하여 기존의 저온 초전도 방식 이외에 고온 초전도를 적용하는 기술에 대한 연구를 꾸준히 진행하고 있다. 또한 차량의 공기저항을 감소시키기 위하여 오리부리 모양의 특이한 형상의 차량 전두부 형태를 채용하고 있으며, 노선 특성상 터널이 많고 이에 따라 발생하는 미기압파를 해결하기 위하여 터널 진입과 진출부에 터널 포트레이트 버퍼를 설치하고 있다. 차상 전력 공급을 위해 기존에는 디젤 연료를 이용하는 가스터빈을 사용하였으나, 매연 등의 문제로 인해 비접촉 유도 급전식으로 변경하였다. 일본은 야마나시 시험선에서의 장기적인 테스트를 통해 주행시의 소음, 지상진동, 자기장 영향, 환경오염 문제 등에 대한 문제를 지속적으로 해결하고 있다.

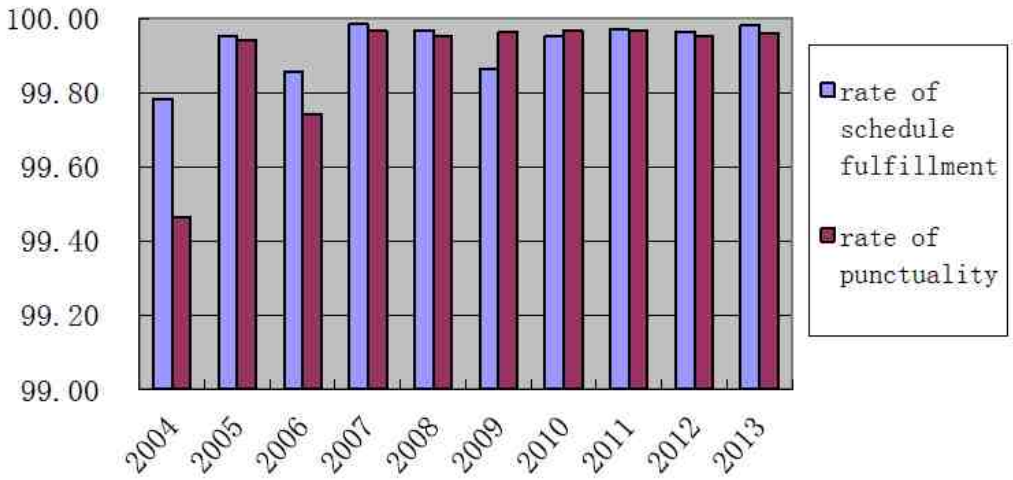


[그림 1.3.3] Chuo Shinkansen 노선도

또한 일본은 특히 초고속 자기부상철도기술의 해외 진출도 적극적으로 모색하고 있다. 2013년 일본의 아베 수상이 미국 오바마 대통령과 회담시 일본의 초고속 자기부상열차에 대한 기술 지원 및 워싱턴 DC-발티모어 노선 건설시 50억 달러의 초기 비용 지원을 제안한 바 있다. 후속 조치로 2014년 아베수상과 미대사관 등이 초고속 자기부상열차를 시승하는 등 일본은 자국의 초고속 자기부상철도 기술의 해외 진출에 열의를 보이고 있으며, 이를 통해 국가 경제 도약을 꾀하고 있다.

나. 중국

초고속 자기부상철도가 세계 최초로 상용화된 중국은 2004년 상하이 푸동공항과 롱양역간 18km 구간이 개통된 이후로 10년 넘게 초고속 자기부상철도를 성공적으로 운행하고 있다. 하루에 115번씩 열차를 운행하여 2014년까지 누적거리는 약 12.3백만km이고 누적이용승객은 36.7백만명에 이른다. 중국의 초고속 자기부상열차는 태풍, 대설 등과 같은 기상 악조건에도 지연이나 중단 없이 운행을 수행하여 정시율 99.9% 이상을 달성하고 있다. 또한 현재까지 한건의 인명피해를 초래한 대형 사고가 발생하지 않고 있어 안정적인 교통의 한 축을 훌륭하게 감당하고 있다.



[그림 1.3.4] 중국 초고속 자기부상철도 운행 정시율

또한 중국은 10년 넘게 초고속 자기부상철도를 상용 운행하면서 운행 및 유지보수 관련된 기술을 상당부분 축적하였으며, 차량의 독자 모델을 제작하여 운행하는 등 일부 핵심기술도 상당부분 확보한 것으로 판단된다.



[그림 1.3.5] 중국에서 제작한 Transrapid

다. 독일

독일의 경우 성공적으로 개발된 Transrapid의 적용 노선을 지속적으로 모색하고 있다. 현재 가장 가능성 있는 적용 라인은 스페인령인 Tnenerife섬 남북의 약 65km 노선이다. 계획상 운행 최고속도는 270km/h이고 6개의 중간역을 설치할 예정인데 투자금액은 약 3~3.5배만 유로가 예상된다. 현재 1단계 적용가능성 검토 연구가 완료되었으며 2단계를 수행할 예정이다. 본 프로젝트는 유럽에서 초고속 자기부상철도 실용화 관련하여 가장 구체적으로 진행되고 있는 프로젝트 중 하나이다.



[그림 1.3.6] Tnenerife 노선

이와 별도로 독일은 Transrapid의 성능을 향상시키기 위한 노력 및 연구개발을 지속적으로 수행하고 있다. 연구개발의 주된 방향은 승차감 개선, 소음 및 진동 저감, 에너지 소비 감소 및 제작/설치/유지보수 비용 저감 등이다. 우선 가이드웨이 이음매 단차로 인해 승차감이 악화되는 것을 방지하기 위하여 가이드웨이 단차를 미리 예측하여 부상제어에 반영하는 기술에 대한 연구가 수행되고 있다. 그리고 최근 급속도로 발전한 배터리 기술을 적용하여 차상 전력 공급장치의 성능을 개선하고자 하는 연구도 수행중에 있다. 부상 기술에 있어서는 부상코일, 선형 파워 발전기, 간극 측정용 코일, 부상제어기 등이 포함된 일체화된 하나의 마그넷을 개발하여 크기를 줄임으로써 무게 및 가격 감소를 도모하고자 하고 있다. 안내 기술과 관련하여 안내마그넷이 에디커런트 브레이크 기능도 동시에 할 수 있도록 하는 기술을 적용하여 균등한 제동힘 발생을 가능하게 해서 기존 브레이크 장치를 없애도록 하는 기술도 검토 중에 있다. 추진과 관련해서는 최근에 개발된 소형의 성능 좋은 인버터를 가이드웨이에 삽입한 형태의 신개념의 가이드웨이 구조를 개발하여 성능을 향상 시키는 방법을 연구 중에 있으며, 운행제어 및 안전 관련해서는 위성 GPS신호를 이용한 열차 위치 추정 및 운행 제어 기술의 도입하는 기술도 개발하고 있다.

제4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

1. 연구개발의 우수성

본 연구개발의 우수성은 실제 크기의 초고속 자기부상 차량 및 단거리 시험선을 제작하고 이에 대해서 550km/h 급의 추진력 확보가 가능하도록 다음과 같은 핵심 추진시스템 기술을 개발하고 성능을 평가한 것에 있다.

- LSM 설계 및 제작 실현
- 인버터 제어기술 개발 및 평가를 통한 성능 검증
- 인버터, 컨버터 등의 추진전력시스템 기술 개발
- 단거리 시험선 구축을 통한 핵심 기능 구현 및 성능 평가
- 향후 성능 향상 및 시제품 개발을 위한 기초 기술 및 인프라 확보

2. 연구개발의 차별성

본 연구에서는 LSM 추진효율에 직접적으로 연관이 있는 차량 위치 정보를 보다 정밀하게 추정하기 위하여 LSM 방정식을 이용한 자속위치 관측기를 개발하였다. 본 관측기는 차량의 자속위치정보 (2ms~5ms 주기로 무선으로 updata), 차량 토크 및 부하 토크를 입력으로 차량의 속도와 위치를 추정하는 기술이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \dot{\hat{x}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \end{bmatrix} F_{Tot} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \left(y - \hat{y} \right)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

< 관측기 설계 >

$$\tilde{x} = x - \hat{x}$$

$$\dot{\tilde{x}} = (A - LH)\tilde{x}$$

$$\begin{cases} s^3 + s^2 l_1 + s l_2 + l_3 = 0 \\ (s + \omega_n)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n{}^2) = 0 \end{cases}$$

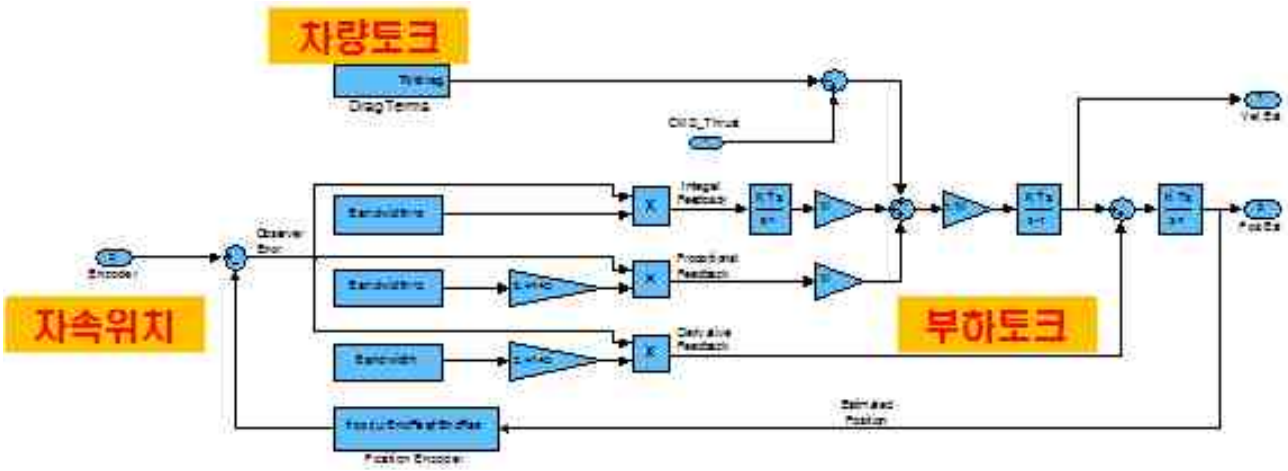
$$l_1 = (2\xi + 1)\omega_n$$

$$l_2 = (2\xi + 1)\omega_n{}^2$$

$$l_3 = \omega_n{}^3$$

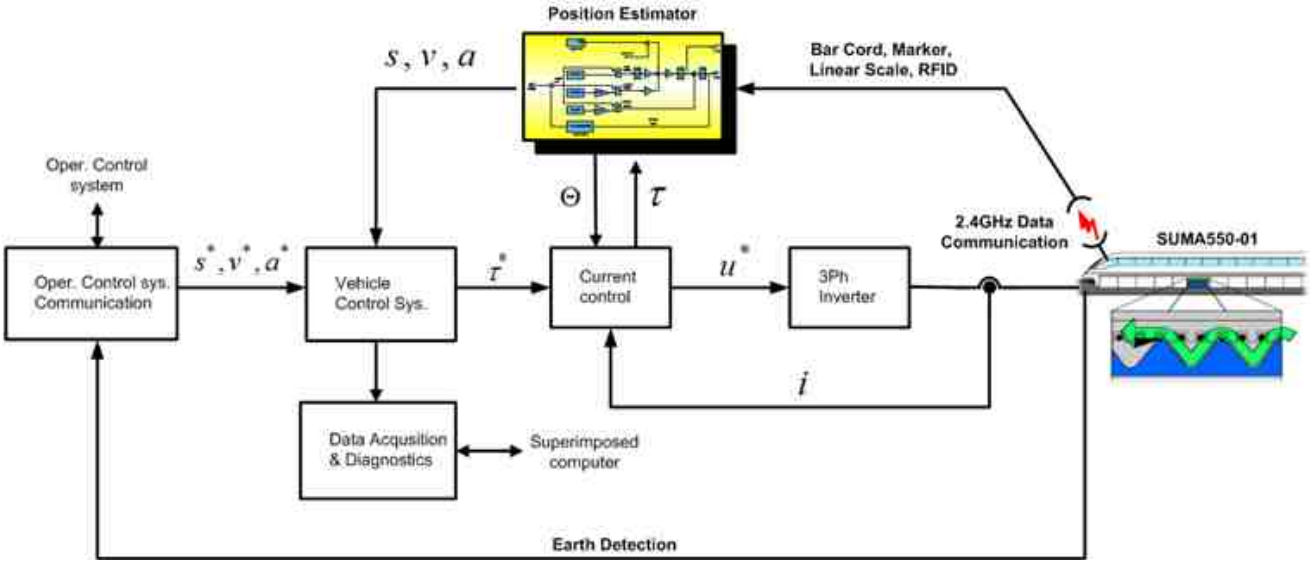
< 관측기 파라메터 선정 >

[그림 1.4.1] 차량 위치 추정 관측기 설계기술



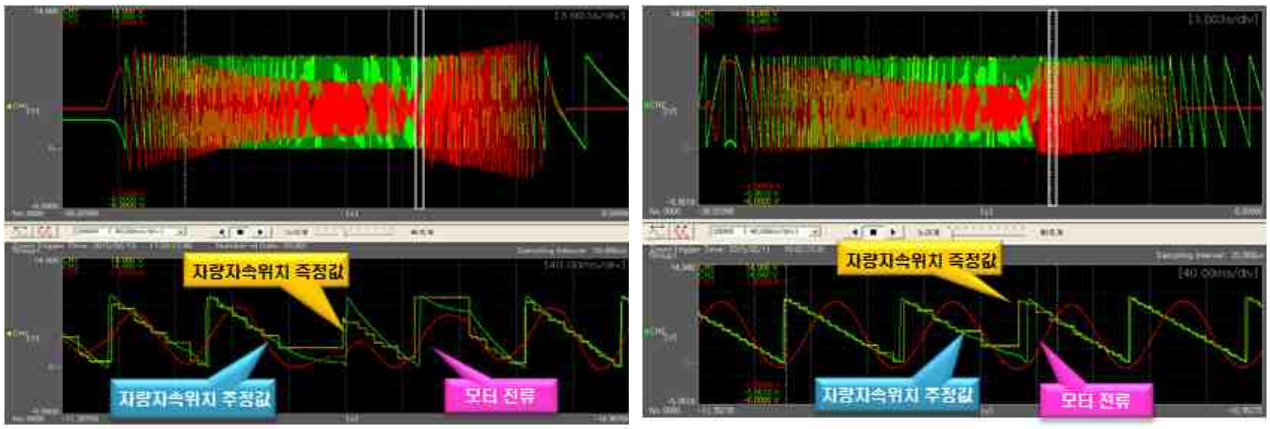
[그림 1.4.2] 차량 위치 추정기 설계를 위한 모델 구축

앞서 설계된 관측기를 적용한 LSM 추력 제어기는 벡터제어기로서 LSM 이동자의 자속 위치추정기에 의한 차량 전류제어 알고리즘을 적용하였다.



[그림 1.4.3] 자속 추정기 기반 초고속 자기부상철도 추진제어기 블럭

개발한 자속위치 추정기를 실제 차량에 적용하여 시험한 결과가 다음 그림에 나타나 있다. 시험 방법은 차량을 최대 속도로 가속 후 최대 감속도로 감속시 차량 자속위치 측정값, 차량자속위치관측기 추정값 및 LSM 전류를 측정하는 것이다. 시험 결과에서 볼 수 있듯이, 차량 자속위치 관측기 추정값을 적용할 경우 LSM의 전류가 개선됨을 확인할 수 있고, 이는 추진성능 및 효율 향상에 영향을 미치게 된다.



[그림 1.4.4] 차량 위치 추정 자속 추정기 적용 전후 결과

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

초고속 추진시스템 핵심기술개발 및 단거리 시험선 구축을 위한 주요 연구 분야는 다음과 같이 각 년차별 연구목표 및 주요 연구내용으로 구분하여 나타내었다.

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	시스템 통합 및 총괄 관리 계획 수립	▪ 초고속 자기부상 철도시스템의 하위시스템 분류 및 정의 ▪ 하위시스템별 개발 및 기술 확보 계획 수립 ▪ 시스템 개발 종합 계획 수립
	시스템 인터페이스 설계 항목 도출 및 시스템 요구사항 추적 관리	▪ 시스템 성능 해석 및 시뮬레이션 항목 도출 ▪ 시스템 인터페이스 요구사항 분석 및 관리환경 구축
	성능 계측 시스템 구축 계획 수립 및 발주	▪ 성능 계측시스템 구축 계획 수립 ▪ 시험장치 및 계측시스템 사양 제시 ▪ 지상 계측시스템 설계 및 구매 발주
	가이드웨이 기술 조사 및 분석	▪ 해외 가이드웨이개발 사례 조사 ▪ 선로구축물 설계하중 정의 ▪ 가이드웨이 요구성능 정의 ▪ 선로구축물 설계기준 작성
	초고속철도 단거리 시험선 설계 및 공사 발주	▪ 부지선정, 실시설계 (감리) 발주/계약 ▪ 설계시행 및 공정/계약 관리 ▪ 단거리 시험선 노반, 궤도, 전력, 유지보수설비/제어실 공사발주, 계약
	3MVA급 고효율 고신뢰성의 전력시스템 설계	▪ 변전소 보호시스템 및 감시장치 설계 ▪ 전력 컨버터 설계 ▪ 에너지 세이버시스템 설계
	3MVA급 Long Stator LSM 인버터 설계	▪ 고정밀 Positioning System 기술조사 및 분석 ▪ LSM용 인버터 분석 및 설계 ▪ 출력용 변압기 설계 ▪ 추진시스템 전력감시장치 설계
	Long Stator LSM 최적화 설계	▪ LSM 기술 분석 및 요구사항 정립 ▪ 자기등가 해석을 통한 LSM 기초설계 플로우 정립 ▪ Long Stator LSM 설계
	Long Stator LSM 인버터 제어알고리즘 분석	▪ Long Stator LSM 제어기술 조사 및 분석 ▪ LSM 제어기술 개발을 위한 시뮬레이션 모델개발 ▪ 인버터 제어기술 분석

2차년도	시스템 통합 및 총괄 관리 계획 이행	▪ 사업 수행 일정/예산/성과 점검 및 관리 ▪ 물리/기능 아키텍쳐 정의
	구성품 요구사항 추적 관리	▪ 구성품 요구사항 추적관리 환경 구축 ▪ 구성품 설계사양 DB화 ▪ 구성품 설계사양과 시스템 요구사항간 추적성 확보
	성능 계측시스템 구축 및 Lab Test	▪ 계측시스템 하드웨어 및 소프트웨어 개발 ▪ Lab Test를 통한 계측시스템 성능 확인
	가이드웨이 성능 시뮬레이션	▪ 동하중에 의한 가이드웨이 성능 해석 및 평가
	단거리 시험선 공사	▪ 시험선 노반, 궤도 공사 ▪ 유지보수설비/제어실 공사
	3MVA급 고효율 고신뢰성의 전력시스템 제작 및 보완	▪ 변전소 보호시스템 및 감시장치 제작 및 보완 ▪ 전력 컨버터 설계/제작 ▪ 에너지 세이버시스템 설계/제작
	1MVA급 Long Stator LSM 인버터 제작 및 보완	▪ 고정밀 Positioning System 요구사항 제시 ▪ LSM용 인버터 제작 및 보완 ▪ 출력용 변압기 제작 및 보완 ▪ 추진시스템 전력감시장치 구축
	Long Stator LSM 최적화 해석 및 시작품 보완	▪ 유한요소법을 통한 설계 파라미터들의 영향에 따른 성능분석 ▪ 유한요소 해석결과를 LSM 제작 및 시작품 보완
	Long Stator LSM 인버터 제어알고리즘 시뮬레이션 및 검증	▪ LSM 제어기술 개발을 위한 시뮬레이션 모델개발 ▪ 시뮬레이션을 통한 알고리즘 검증 ▪ 제어기 제작 및 기능시험
3차년도	시스템 통합 및 총괄 관리 이행	▪ 사업 수행 일정/예산/성과 점검 및 관리 ▪ 시스템 사양서 작성
	시스템 인터페이스 조정	▪ 시스템 인터페이스 성능 검증 및 평가 ▪ 시스템 인터페이스 관리 및 조정
	시험평가 추적 관리	▪ 시운전 항목별 절차서 DB화 ▪ 요구사항과 시운전 항목간 추적성 확보
	성능 계측 시스템 구축	▪ 단거리 시험선에서의 성능시험을 위한 상시 계측시스템 구축 ▪ 계측시스템 시험 가동

	가이드웨이 성능 해석 및 검증	▪ 자기부상열차-가이드웨이 상호작용을 고려한 동해석 기법 개발 ▪ 자기부상 레일의 궤도틀림 메키니즘 분석
	초고속철도 단거리 시험선 구축 완료	▪ 시험선 공사 및 품질관리 ▪ 시험선 공사 완료 ▪ 시험선 및 각 설비 품질검사 및 시험 운영
	3MVA급 고효율 고신뢰성의 전력시스템 구축 및 시험	▪ 변전소 보호시스템 및 감시장치 제작 및 시험 ▪ 전력 컨버터 제작 및 조합시험 ▪ 에너지 세이버시스템 제작 및 조합 시험
	1MVA급 Long Stator LSM 인버터 시험 (In Lab.)	▪ 고정밀 Positioning System 특성시험 및 설치 방안 수립 ▪ LSM용 인버터 조합 시험 ▪ 추진시스템 - 전력감시장치 연계시험 (공장시험)
	LSM 제어 성능시험을 위한 가이드웨이 계측차 설계 및 LSM 제어정수 추출 해석	▪ LSM 제어 성능시험을 위한 가이드웨이 계측차(가이드웨이 계측차) 설계 및 해석 ▪ LSM 제어정수 추출 해석 ▪ LSM 제작모델 특성 해석 및 고정자 권선 배치 검토
	R-L부하대상 LSM 인버터 전류제어알고리즘 시험	▪ 제어기 하드웨어 Firmware 개발 ▪ 제어기의 각종 기능 S/W 개발 및 모니터닝 시스템 구축 ▪ R-L 부하대상 전류제어프로그램 시험
4차년도	시스템 통합 및 총괄 관리 이행	▪ 사업 수행 일정/예산/성과 점검 및 관리 ▪ 시스템 통합관리 DB 구축 및 추적성 설정
	시스템 인터페이스 성능 평가 및 설계 확정	▪ 시험선 시험 운행을 통한 시스템 인터페이스 성능 검증 및 평가 ▪ 시스템 인터페이스 설계안 최종 확정
	시스템 성능 시험 및 평가	▪ 시운전 시험 실시 및 성능 계측 ▪ 성능 평가 및 보완
	성능 계측 시스템 운영	▪ 성능 계측시스템 구축 및 운영 ▪ 계측시스템에 의한 결과 분석 ▪ 시스템 고장진단 및 고장정보체계 운영
	가이드웨이 해석 기술 고도화	▪ 부상제어 기법 최적화 ▪ 가이드웨이 구조물 최적화

	초고속철도 단거리 시험선 유지관리 지침(안) 수립	▪ 해외 자기부상 구조물 유지보수방법 분석 ▪ 유지보수 주기산정 기법 ▪ 유지관리 지침서(안) 작성
	3MVA급 고효율 고신뢰성의 전력시스템 시험 및 평가(단거리 시험선)	▪ 변전소 보호시스템 및 감시장치 시험 및 평가 ▪ 전력 컨버터 시험 및 평가 ▪ 에너지 세이버시스템 시험 및 평가
	1MVA급 Long Stator LSM 인버터 시험 및 평가(단거리 시험선)	▪ 고정밀 Positioning System 시험 및 분석 ▪ LSM용 인버터 시험 및 평가 ▪ LSM용 인버터 설계기술 정립
	자기부상열차 추진용 LSM 성능 측정 및 LSM 설계기술 정립	▪ 가이드웨이 계측차 성능측정 및 해석 ▪ 자기부상열차 추진용 LSM 성능측정 및 해석 ▪ LSM 설계기술 정립

제1절 시스템 엔지니어링 기술개발

1. 개요

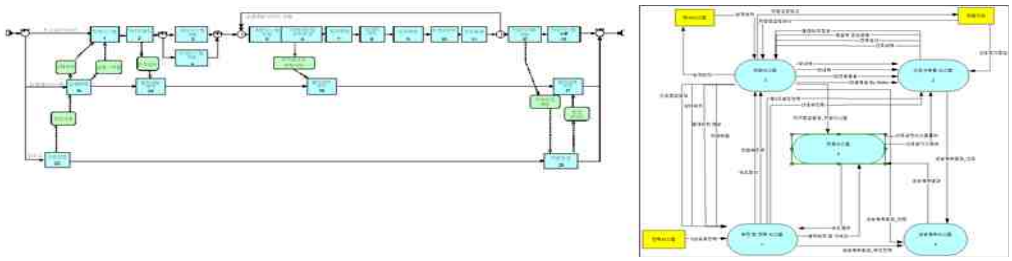
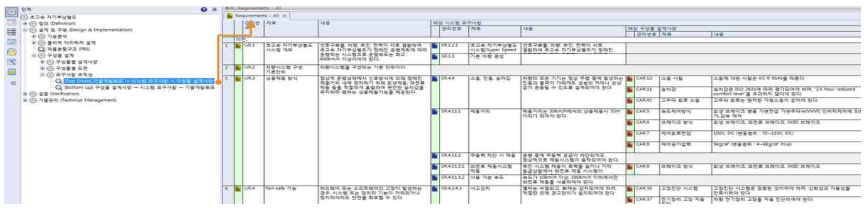
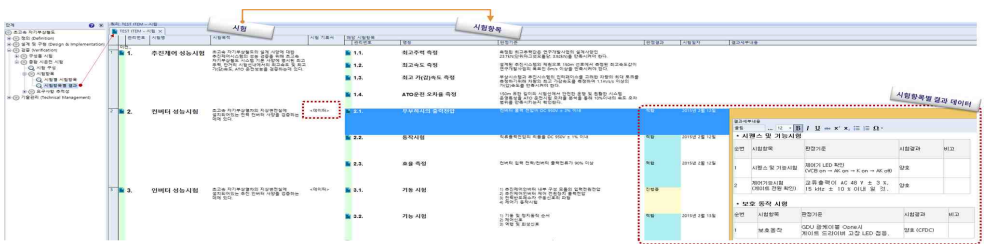
초고속 철도 시스템의 차량은 추진방식으로 바퀴식, 자기부상식 등 여러 방법을 고려할 수 있으나. 핵심기술로서 요구되는 추진시스템은 현재의 바퀴식(휠-레일방식)으로는 그 원리상 초고속용으로 요구되는 급가속과 같은 초고속 주행에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 따라서 자기부상 및 추진기술의 도입이 필요하다. 그러나 국내의 자기부상 및 추진 기술은 아직 중저속형에만 머물러 있으며, 초고속에 대한 기술은 아직 많은 성숙이 필요하다. 지금까지 시도되지 않은 새로운 기술에 대한 도전은 많은 불확실성을 초래할 가능성이 있으므로 시스템 엔지니어링 프로세스와 방법론의 적용이 요구된다. 본 보고서에서는 초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업의 연차별 연구개발 프로세스에 따라 적용된 시스템 엔지니어링 방법론과 실제 전산지원도구를 활용하여 이를 구축해나간 세부 내용에 대해 기술한다.

2. 목표

초고속 자기부상철도시스템의 개발을 위하여 시스템 엔지니어링 프로세스에 입각하여 개발 절차 및 전략을 수립하고, 각 프로세스 단계에서 입력물과 산출물을 정의한다.

초고속 자기부상철도는 기계부품, 전기・전자 및 제어, 정보통신, 소재, 토목 및 건설 등의 기술이 집약된 시스템으로서 각 기술 간의 인터페이스와, 시스템에 대한 운영 요구사항과 기본사양을 종합적으로 검토 및 관리하는 시스템을 통합을 구현한다.

3. 개발 내용 요약

연구목표	초고속 자기부상철도의 시스템엔지니어링은 개발 단계에서부터 고객의 요구사항을 만족시키는 양질의 제품을 제공할 목적으로 필요한 기능을 정의하고, 요구사항에 대한 추적성을 부여하여 설계 종합 및 시스템 타당성을 검증해 나아가는데 초점을 두고 있다.
연구내용	▪ 시스템엔지니어링 프로세스 테일러링(Tailoring) 및 관리계획 수립 ▪ 상하위 요구사항 및 구성품 설계사양 추적관리 체계 구축 ▪ 논리적/물리적 아키텍처를 통한 인터페이스 분석 ▪ 시스템 성능 평가 통합 관리
수행과정	▪ 시스템엔지니어링 데이터베이스 스키마 정의 및 구현 ▪ 상위 요구사항 DB화 및 추적관리 ▪ 논리적/물리적 아키텍팅을 통한 시스템 인터페이스 설계항목 분석 ▪ 구성품 요구사항(설계사양) DB화 및 시스템 요구사항과의 추적관리 ▪ 시스템 인터페이스 성능평가 및 설계확정 ▪ 구성품 시험항목 및 시운전 시험 절차서 DB화 및 요구사항과의 추적관리 ▪ 구성품 시험 및 시운전 시험 결과 DB화
연구결과	▪ 논리적/물리적 아키텍처 분석  ▪ 요구사항(설계사양) 추적관리 체계 구축  ▪ 시스템 성능평가 통합 관리 

4. 상세 개발 내용

가. 시스템 통합 및 총괄 관리 계획 수립(1차년도)

(1) 초고속 자기부상 철도시스템의 하위시스템 분류 및 정의

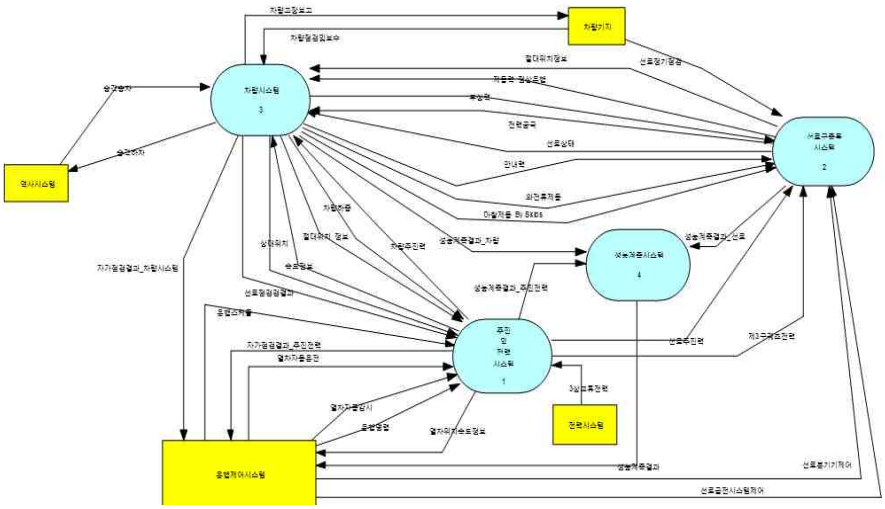
(가) 개요

초고속 자기부상열차 시스템을 하위 시스템으로 분류하여 각각의 시스템을 구분하고, 세분화하여 시스템간의 연관관계를 파악하였다.

(나) 하위시스템 간 상호관계 연구

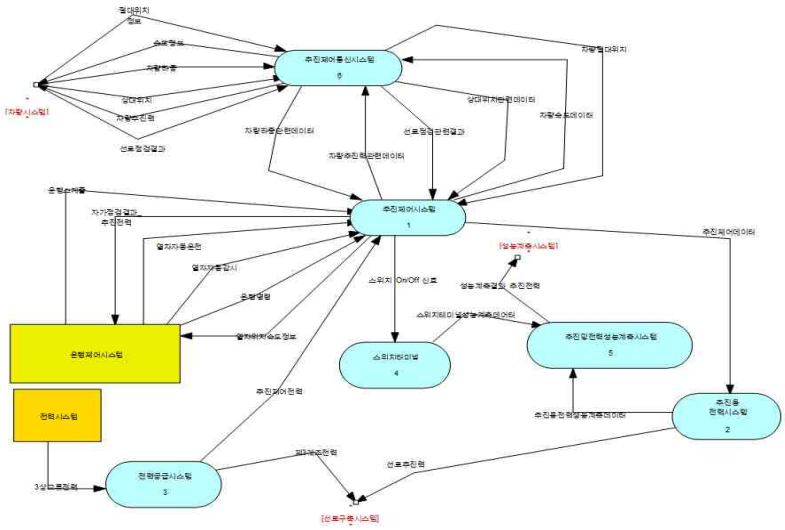
시스템 사양서 및 설명서를 통해 초고속 자기부상열차 시스템 분석, 물리적 시스템도(Physical Architecture Diagram)를 활용하여 하위시스템 분류 및 상호관계를 연구한 내용은 다음과 같다.

① 초고속 자기부상철도 시스템(Level 0)



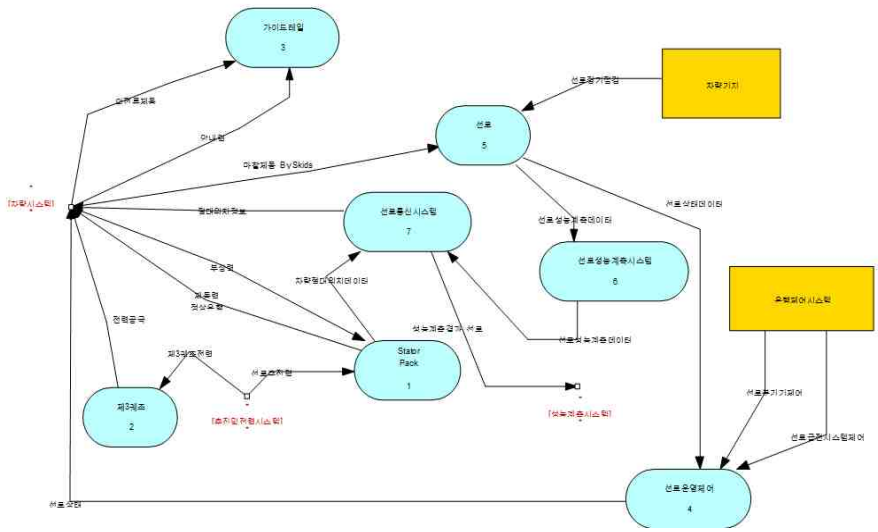
[그림 2.1.1] 하위시스템 분류초고속 자기부상철도 (Level 0)

② 추진 및 제어시스템 (Level 1)



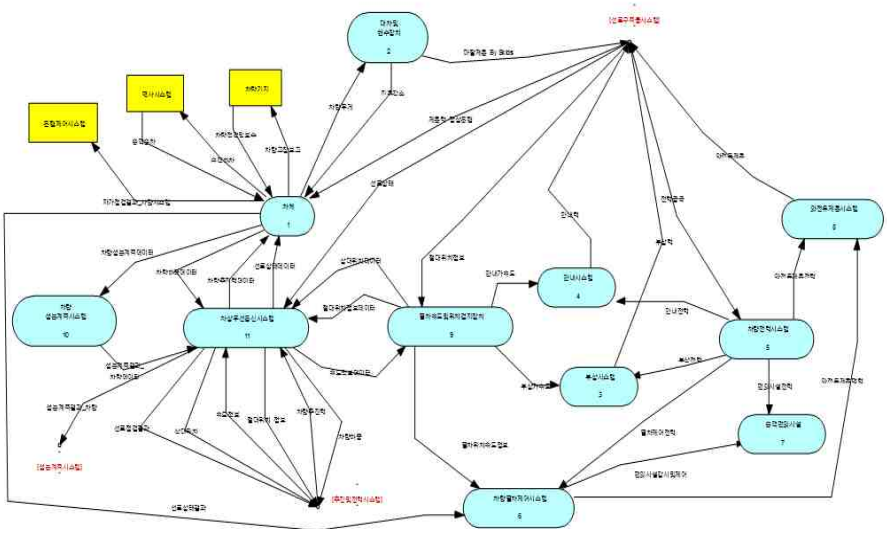
[그림 2.1.2] 추진 및 제어시스템 (Level 1)

③ 선로구축물시스템 (Level 1)



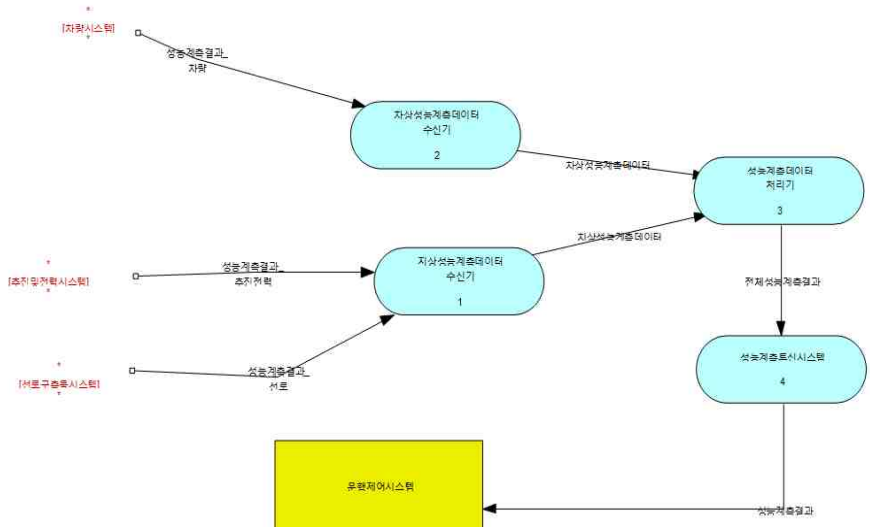
[그림 2.1.3] 선로구축물시스템 (Level 1)

④ 차량시스템 (Level 1)



[그림 2.1.4] 차량시스템 (Level 1)

⑤ 성능계측시스템 (Level 1)



[그림 2.1.5] 성능계측시스템 (Level 1)

나. 시스템 인터페이스 설계 항목 도출 및 요구사항 관리 환경 구축(1차년도)

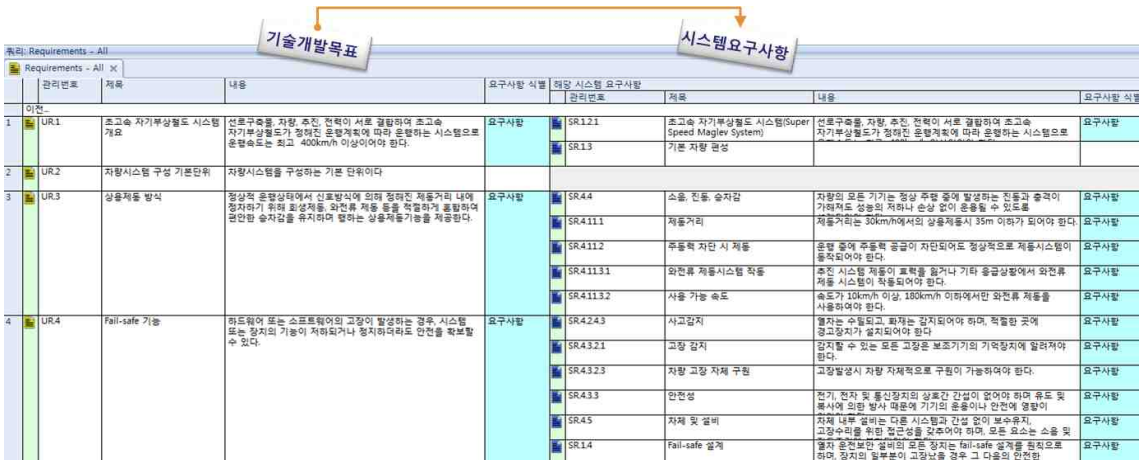
(1) 요구사항 관리 환경 구축

요구사항 정의 및 분석은 사용자가 제시한 운용 요구사항을 시스템 요구사항으로 변경하고, 차량 및 구성품에 할당하여 각 분야의 업체들이 자신들에게 할당된 요구사항을 명확히 인식하여 개발을 진행할 수 있도록 하는 것이다. 또한 각 업체들의 의견을 수렴하여 누락된 요구사항을 반영하여 시스템 요구사항의 완전성을 높이는 업무도 매우 중요하다. 요구사항이 정의된 후에는 요구사항에 대한 추적성을 관리하여 누락되는 요구사항이 없도록 관리하는 것이 중요하다.

초고속 자기부상철도 시스템의 이해관계자 요구사항인 기술개발목표와 이를 기반으로 도출된 개발자 입장의 시스템 요구사항을 분석 및 관리하는 업무 트리는 [그림 2.1.6]과 같다.



[그림 2.1.6] 정의(요구조건 관리) 프로세스 업무 트리



[그림 2.1.7] 요구조건 추적성 관리 화면

(2) 시스템 인터페이스 요구사항 분석 및 관리환경 구축

[그림 2.1.8]과 같이 초고속 자기부상철도 시스템의 기술적인 인터페이스 요구사항을 식별, 세부속성(목표, 산출물, 분류, 관련기관, 완료일 등)을 관리하는 환경을 구축하였다.



[그림 2.1.8] 시스템 인터페이스 관리 화면

다. 시스템 통합 및 총괄 관리 계획 이행

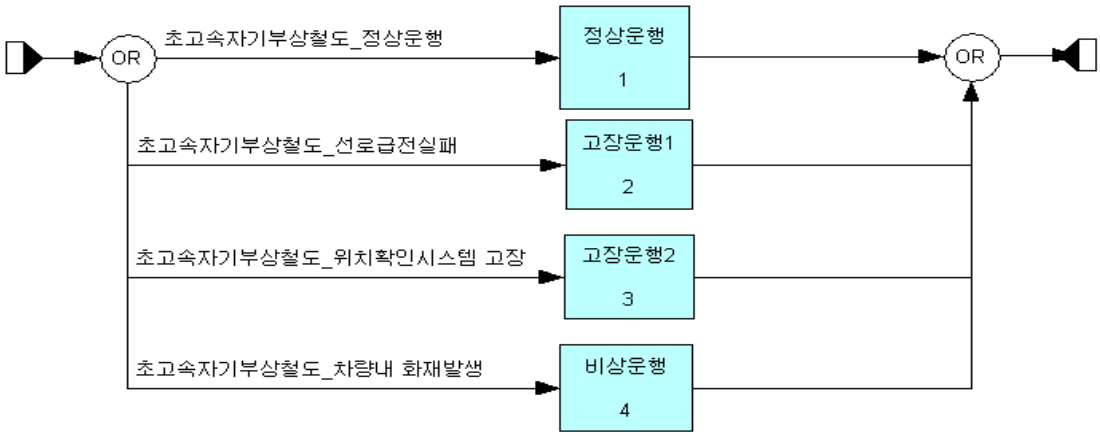
(1) 물리/기능 아키텍쳐 정의

(가) 시스템 기능분석

① 최상위 수준 기능 정의

본 절에서는 초고속 자기부상철도 시스템에 대한 본격적인 기능분석 진행 과정에 대해 설명한다. 기능분석의 첫 단계는 최상위 수준의 기능을 정의하는 것이다. 자기부상철도 시스템에서 최상위 수준의 기능은 운행이다. 그리고 비정상적인 상황에 대한 운행 시나리오를 검토하게 된다. 이와 유사한 개념으로 초고속 자기부상철도 시스템의 최상위 수준 기능을 정상 운행으로 가정하고 비정상적 상황에 대한 고려를 통해 고장 시나리오 2건과 비상운행 시나리오 1건을 가정하였다.

자기부상철도의 운행 시나리오는 매우 다양한 상황을 고려할 수 있으나 아직 국내에서는 초고속 자기부상열차의 운영에 대한 경험이 없고 본 사업의 목표는 상업운전을 고려하고 있지 않기 때문에, 자기부상열차의 기술적 특성에 근거한 가장 단순한 비정상적 시나리오만을 고려하였다.



[그림 2.1.9] 초고속 자기부상철도 시스템 최상위 기능

▪ 정상운행 시나리오 : 초고속 자기부상철도 시스템이 정상적인 기능을 제공하며

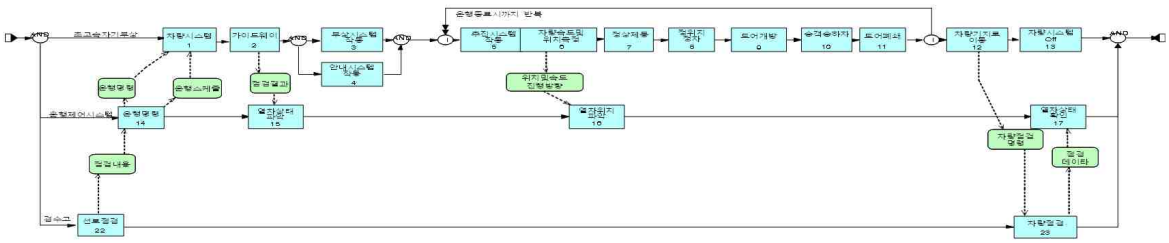
외부적으로도 운행에 지장을 초래하는 경우가 발생하지 않은 상황에 대한 시나리오이다.

- 고장운행 시나리오1 : 초고속 자기부상철도 전력 시스템에서 문제가 발생하여 선로급전이 불가능한 상황을 가정한 시나리오이다.
- 고장운행 시나리오2 : 초고속 자기부상철도 통신 시스템에서 문제가 발생하여 차량의 위치 확인 시스템이 고장난 경우를 가정한 시나리오이다.
- 비상운행 시나리오 : 시스템의 고장은 발생하지 않았으나 차량 내 화재가 발생하여 정상적인 운행을 할 수 없는 상황에 대한 시나리오이다.

② 하위 수준 기능 전개

㉮ 정상운행

정상운행은 운전상의 문제가 발생하지 않는 일반적인 운행상황을 의미하며, 무인운전 개념을 적용하였다. 정상운행 중 시스템은 운행제어 시스템의 지시에 의해 구동되며 자가 점검을 인력의 개입 없이 수행하며, 운행과정 동안 운행제어 시스템에 의해 차량의 위치 및 속도가 모니터링 된다.



[그림 2.1.10] 정상운행 시나리오의 EFFBD

정상운행은 초고속 자기부상열차 시스템(차량 및 선로 포함)과 운행제어시스템, 검수고 등 3개 기능 쓰레드(thread)로 구분된다. 기본적으로 차량시스템은 초기 기동 시 운행제어시스템으로부터 운행명령과 운행스케줄을 전달받는다.(1번 기능) 또한 가이드웨이 시스템은 초기 기동 시 자체 점검을 수행하여 이상 유무를 판단한 점검결과를 운행제어시스템에게 제공한다.(2번 기능) 시스템의 초기 기동이 성공적으로 종료되면 부상 시스템과 안내 시스템이 동시에 작동을 하게 되므로 이는 AND 게이트로 연결되어 있다.(3번, 4번 기능)

본 시스템은 선로에 대한 점검 및 고장 상태 파악이 매우 중요하므로 선로의 상태는 가이드웨이 기동 시 내부 점검(built-in test)하는 것 이외에도 검수고에서 별도 선로 점검을 수시로 수행하는 것을 원칙으로 하였다. 따라서 운행제어시스템은 최초 시스템 기동 시 검수고로부터 선로 점검 결과를 확인하도록 기능을 구성하였다.(22번 기능)

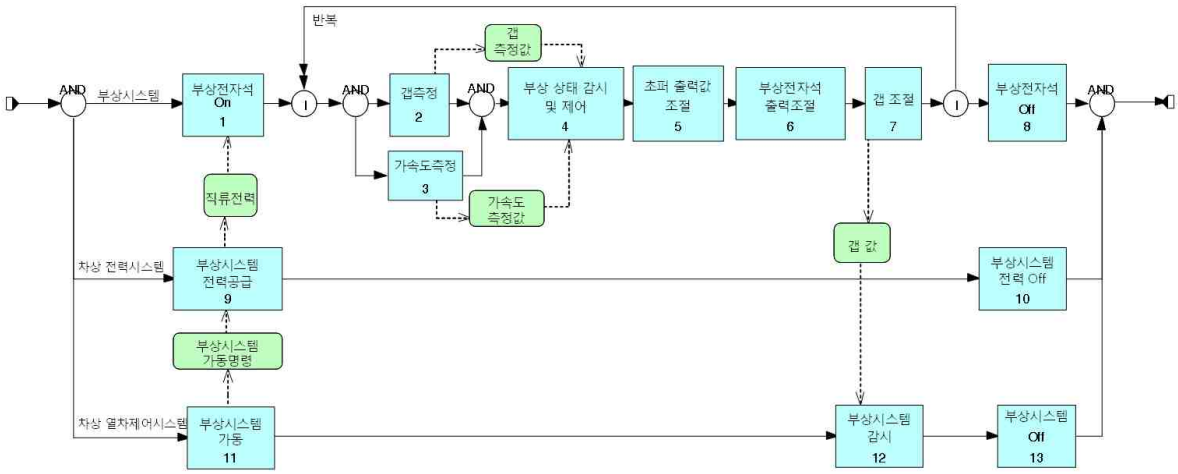
이후 초고속 자기부상철도 시스템은 정상운행을 수행하게 된다. 정상운행의 기본 절차는 추진 시스템을 작동하여 차량이 이동하게 되고(5번 기능), 차량의 속도 및 위치정보를 지속적으로 운행제어시스템에 전달할 필요가 있다.(6번 기능) 이는

시스템의 안전을 위해서도 필요하지만 선형동기전동기(LSM)를 사용하는 초고속 자기부상열차의 기술적 특성상 정밀한 차량 위치 파악이 중요하기 때문이다. 차량이 역사(또는 정지위치)에 근접하면 적절한 시점에 정상제동이 발생되어야 한다.(7번 기능) 그 후 정위치 정차를 하면 도어를 개방하고, 승객 승하차가 이루어진 후 도어를 폐쇄한다. (8~11번 기능) 정상운행이 이와 같은 시퀀스가 지속적으로 반복됨으로서 수행된다. 운행이 종료되면 차량기지로 이동(12번 기능)하고 차량 시스템은 종료되게 된다.(13번 기능) 차량이 차량기지로 이동하면 차량기지에서는 정해진 기능점검을 수행하게 된다. 차량에 대한 기능점검 데이터는 운행제어시스템으로 보내 관리된다.(17번, 23번 기능)

㈏ 부상 시스템 작동

부상 시스템의 개념적인 작동 원리는 선로에 철제의 자성체를 배치하고 그 자성체 수직하향으로 차량의 전자석을 위치시키는 것이다. 차상 전력장치로부터 직류를 부상 전자석에 공급하여 전자석을 여자하면 선로의 철제 자성체와 전자석 간에 흡인력이 작용하게 되어 차량을 부상시키는 기능을 가지게 된다.

선로와 전자석 사이에 부상높이인 공극(Air Gap)을 항상 일정하게 유지시켜 주기 위해서 센서로 공극을 전자석이 레일에 가까이 가면 전력을 낮춰 공극을 유지하고 멀리 떨어지면 전력을 높여 공극을 유지시킨다.



[그림 2.1.11] 부상시스템 작동에 대한 EFFBD

초고속 자기부상철도 시스템의 부상 시스템은 차상 열차제어 시스템으로부터 최초 부상시스템 가동 명령이 발생되면서 기동이 시작된다.(11번 기능) 부상 시스템 가동 명령이 차상 전력시스템으로 입력되면 차량 전력 시스템은 부상 시스템에 대한 전력 공급 기능을 작동시킨다.(9번 기능) 차량 전력 시스템의 전력 공급기능에 의해 직류전력이 부상전자석으로 입력되고 부상 전자석에 자력이 발생되어 차량이 부상된다.(1번 기능)

초고속 자기부상철도 시스템의 부상은 흡인식이기 때문에 부상공극이 적어질수록 부상력이 크게 되어 차량의 부상 전자석은 부상레일에 붙게 되고 부상공극이 커지면 부상력이 급격히 감소되어 차량은 완전히 낙하하게 되는 불안정 시스템(unstable system)이다. 따라서 부상 공극을 측정하여 지속적으로 부상력을 제어해 주는 부상력 제어가 필요하다. 차량 부상에 대한 측정은 공극 측정과 수직가속도에 대한 측정이 필요하다.(2번, 3번 기능) 부상 공극 뿐만 아니라 차량이 수직방향으로 어떤 가속도로 상승하거나 하강하는지에 대한 데이터가 부상 제어에 필요하기 때문이다.

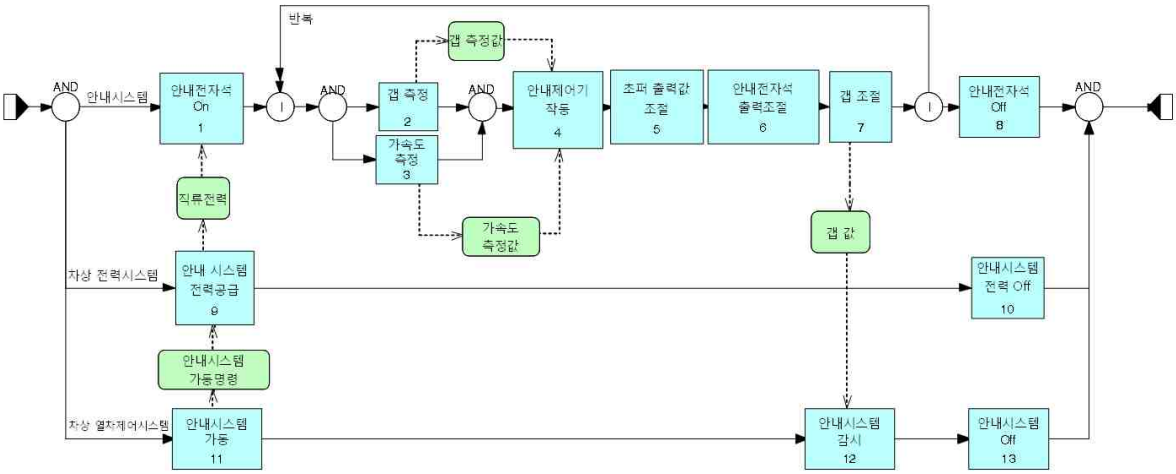
측정된 부상공극과 수직가속도 데이터를 기반으로 부상 상태를 감시하고 제어하는 알고리즘에 따라 부상 제어기는 초퍼 출력값을 조절하게 된다.(5번 기능) 조절된 초퍼 출력값은 궁극적으로 부상 전자석으로 입력되는 전류량을 조절하게 되고 이에 따라 부상전자석의 부상력이 조절되면서 부상 공극의 조절이 이루어진다.(6번, 7번 기능)

차상 열차제어 시스템은 조절된 공극이 특정 수치내에 존재하는지를 판단하여 지속적인 부상 시스템 감시를 수행하게 된다.(12번 기능)

부상 시스템의 작동 중단은 차상 제어 시스템에서 부상 시스템 off 명령을 발생시키면 이에 따라 차상 전력 시스템에서 부상 시스템의 전력공급을 차단하고 부상 전자석이 off 되는 과정을 통해 이루어진다.(8번, 10번, 13번 기능)

㉰ 안내 시스템 작동

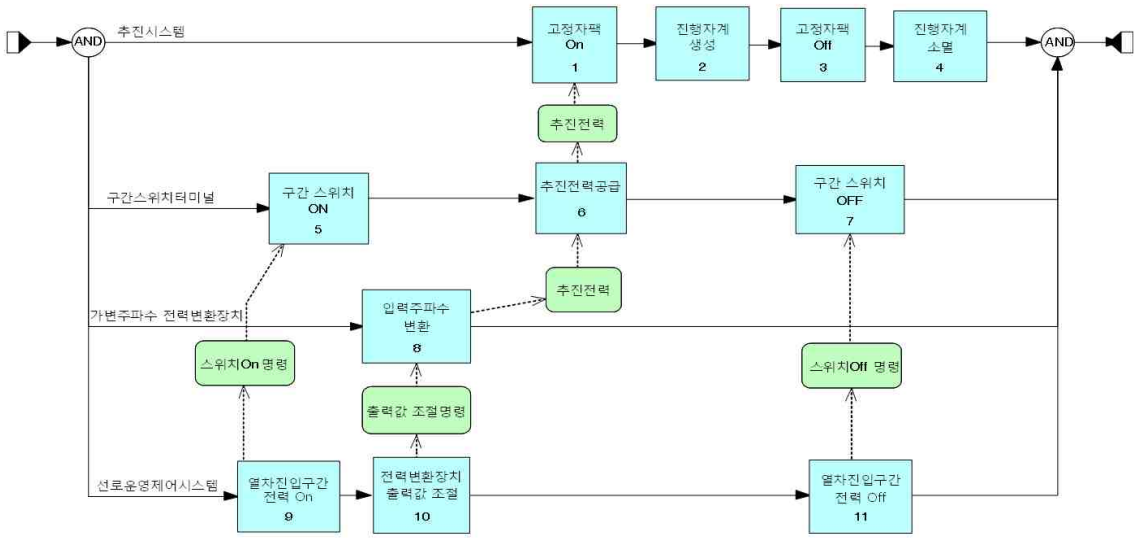
두 개의 전자석이 선로의 양쪽 측면에 안내레일과 대응하도록 설치되어 차량이 진행할 때 곡선부에서 노반과 충돌하려고 하거나 대기환경에서의 바람 등의 영향으로 차량이 구조물과 접촉할 수 있는 경우를 방지하기 위한 역할을 한다. 선로와 전자석 사이에 공극(Air Gap)을 항상 일정하게 유지시켜주기 위해서 센서로 공극을 전자석이 안내 레일에 가까이 가면 전력을 낮춰 공극을 유지하고 멀리 떨어지면 전력을 높여 공극을 유지시킨다.



[그림 2.1.12] 안내 시스템 작동에 대한 EFFBD

㉮ 추진 시스템 작동

시험용 초고속 철도시스템의 추진 시스템은 기본적으로 선형 동기 전동기(LSM)의 구조를 갖는다. 회전자(부상전자석)에 차상에서 직류전력을 공급하여 N극과 S극을 갖는 구조를 형성하며 삼상교류가 가해진 선로에 설치된 고정자 코일에서 발생하는 진행자계를 회전자가 추종하여 추진력이 발생한다. 속도제어는 인버터에 의한 3상 교류전원의 주파수 및 전압제어장치, 가변주파수 전력변환장치로 제어한다.



[그림 2.1.13] 추진 시스템 작동에 대한 EFFBD

추진 시스템의 동작은 추진 시스템과 구간 스위치 터미널, 가변 주파수 전력변환장치, 선로운영제어 시스템 간의 기능 조합을 통해 이루어진다. 우선 추진 시스템이 동작하기 위해서는 열차가 존재하는 구간에 대한 전력 인가가 필요하다. 선로 운영제어 시스템이 열차가 현재 존재하거나 향후 진입하게 될 구간을 판단하여 구간 스위치 터미널에 전력 공급 명령을 전달하면 구간 스위치 터미널이 해당 구

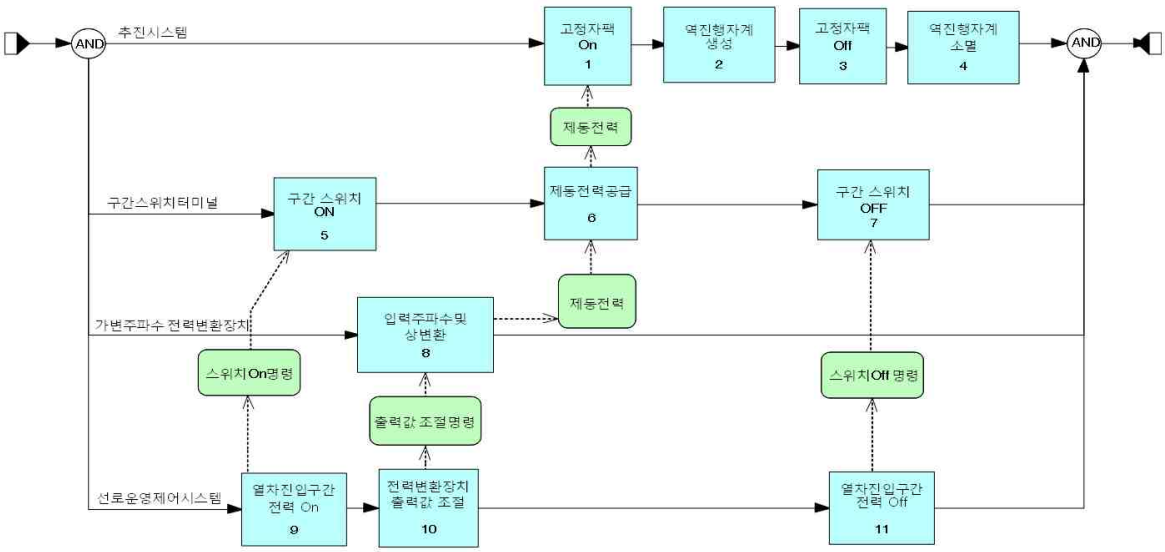
간에 대한 전력을 공급한다.(5번, 9번 기능) 이 개념은 단거리 시험선에서는 특별히 중요하지 않지만, 향후 여러 구간으로 나뉘어지게 될 상업 시스템을 고려하면 중요한 부분이기 때문에, 본 기능분석의 범위에 포함시켰다.

그 다음에는 선로 운영제어 시스템에서 전력변환장치의 출력값을 조절하는 명령을 가변 주파수 전력변환장치에 하달한다.(10번 기능) 가변 주파수 전력변환장치는 입력 주파수를 변환한 추진 전력을 생성하여 구간 스위치 터미널에 전달한다.(8번 기능) 가변 주파수 전력변환장치에 의해 발생된 추진 전력은 구간 스위치 터미널에 의해 해당 고정자팩에 인가되고 진행자계를 생성하여 추진력을 발생시킨다.(1번, 2번, 6번 기능)

차량이 해당 선로를 지나면 선로 운영제어시스템은 해당 구간에 대한 전력을 차단하는 명령을 구간 스위치 터미널에 전달한다.(11번 기능) 전력 차단 명령을 받은 구간 스위치 터미널은 해당 구간의 스위치를 off하게 되고(7번 기능), 해당 구간은 고정자팩이 off되어 진행자계는 소멸한다.(3번, 4번 기능)

㈐ 정상 제동 작동

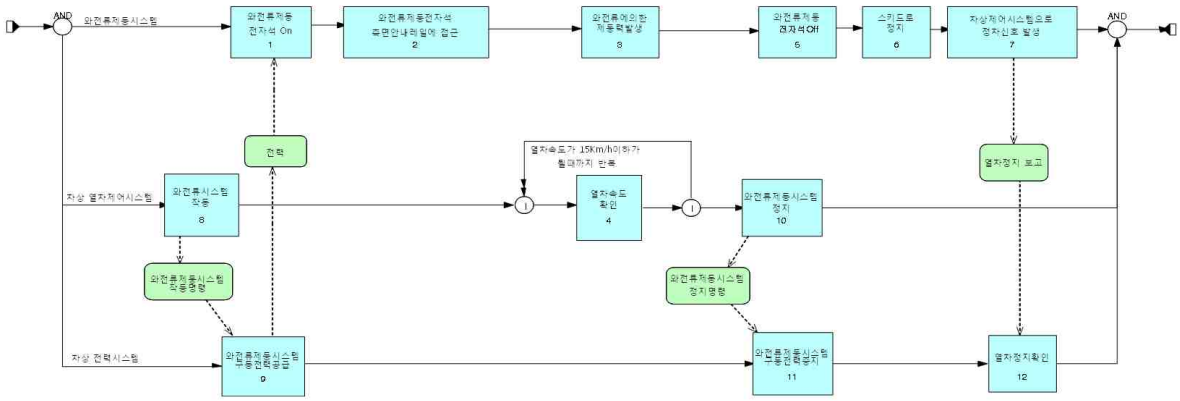
추진 시스템의 정상 제동은 가변 주파수 전력변환장치로 제어한다. 추진 시스템의 메카니즘과 동일하되 추진 전력이 아닌 제동 전력을 인가함으로서 역진행자계를 생성하여 제동력을 발생시키는 원리이다. 비상 제동은 물리적 마찰 제동을 사용한다.



[그림 2.1.14] 정상 제동에 대한 EFFBD

㉮ 와전류 제동 작동

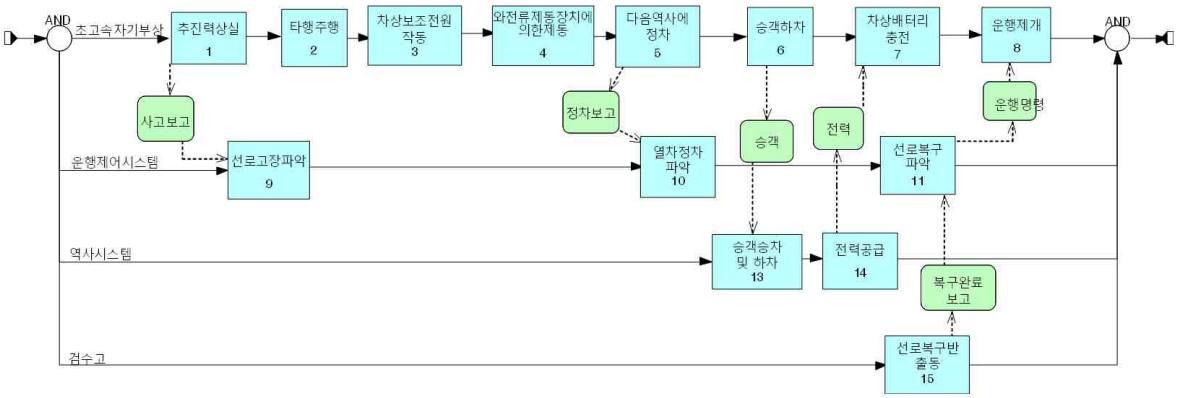
자기부상열차의 각 차량에는 2개의 와전류 제동 전자석이 차량 중간부분의 좌우 양측에 있다. 역상제동에 실패하거나 기타 응급상황에서만 와전류 제동 시스템이 작동된다. 열차속도가 약 150km/h보다 낮을 때, 와전류제동 자석은 Y방향의 상대부상 지지대에서 변위가 생겨나 측면 안내레일에 근접하면 와전류가 발생하여 제동력이 생긴다. 속도가 10km/h에 가까울 때 와전류제동 제어시스템은 닫히고 Skid로 정지한다.



[그림 2.1.15] 와전류 제동에 대한 EFFBD

㉯ 고장 운행 1

선로의 작동 고장으로 선로로의 전력공급이 실패했을 경우이다. 진행자계의 상실로 정상운행이 불가능할 경우, 운행하는 열차가 지정한 정차역에 안정적으로 정차하는데 목적이 있다. 또한, 정차 후 고장차량의 승객을 안전하게 다른 열차로 환승시키거나 역사로 대피시킨다.

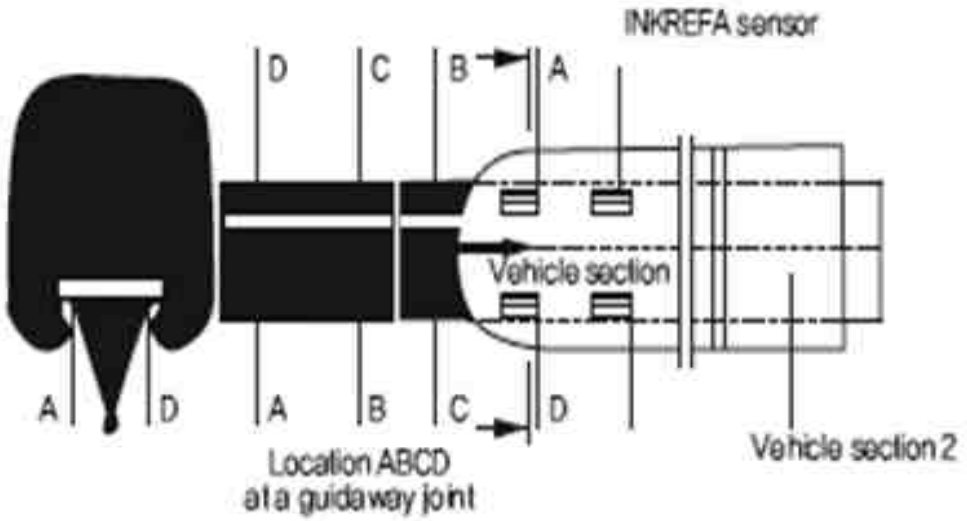


[그림 2.1.16] 고장 운행1의 EFFBD - 선로 전력공급 실패

㉮ 고장 운행 2

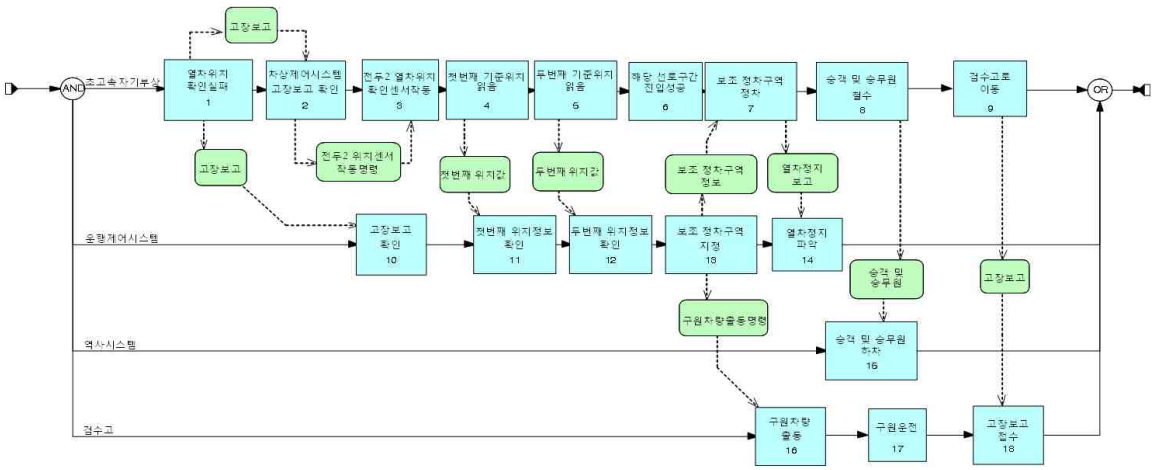
차량시스템의 위치확인장치의 고장으로 정상운행이 불가능한 경우이다. 위치확인 기능은 열차의 위치확인상태, 열차의 위치, 열차의 속도, 열차와 관련된 진행방향, 궤도와 관련된 진행 방향 및 열차방향 등의 정보를 운영제어시스템으로 제공한다. 위치확인 시스템에서 확정된 위치와 속도는 계획된 열차의 운행속도 감시 및 제어, 선로에 있는 열차를 추적할 때 필요하다.

자기부상열차 위치확인 시스템에는 총 8개의 위치확인 채널이 있으며, 각각 열차의 양단에 위치확인1, 위치확인2로 위치해 있다.



[그림 2.1.17] 위치확인1

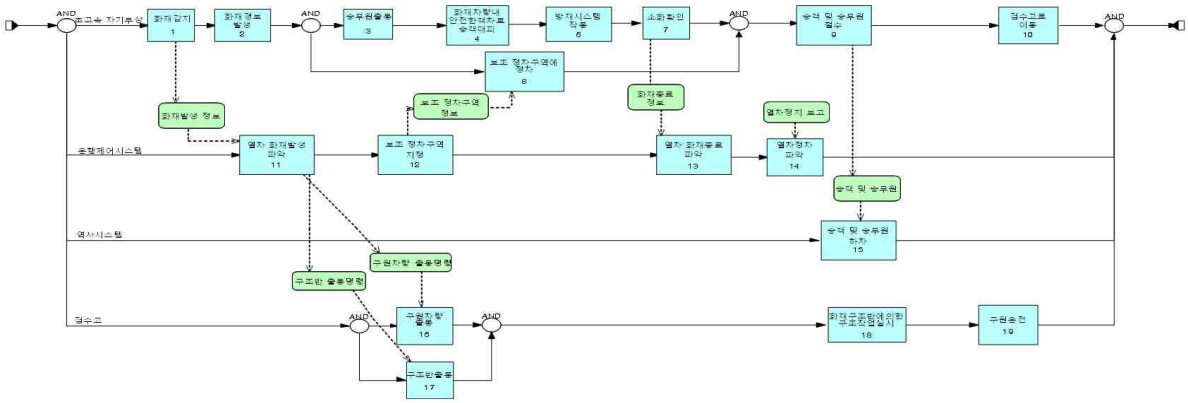
정상 시에는 차상 열차운행제어 시스템은 열차의 위치확인1만 사용한다. 그러나 고장 시에는 열차진행은 필요한 위치 데이터를 제공하기 위해 열차 위치확인2를 사용한다. 열차정지 후 승객과 승무원을 대피시키고 구원운전으로 열차를 이동한다.



[그림 2.1.18] 고장 운행2의 EFFBD - 위치확인장치의 고장

㉶ 비상 운행

차량 내 화재가 발생한 경우이다. 경보는 차안의 설비를 통해 차안의 승무원 및 운행 제어 센터에 전달된다. 우선, 불을 끄는 일은 차안에 있는 승무원에 의해 진행되며 운행 제어 시스템은 열차를 정차시킬 보조 정차지점을 결정한다. 객차와 객차가 연결된 곳의 방화문은 화재가 발생한 객차를 격리시키고, 열차가 계속해서 최소 다음 정차지점에서 운행하여 승객과 승무원이 열차로부터 철수할 수 있게 한다. 방화문이 작동되고 소화장치가 가동된다. 차량기지는 정차 지점으로 구원 및 구조 서비스를 사전에 준비하여 계획적으로 화재구조 작업을 진행시킨다. 모든 작업 종료 후 열차는 구원운전으로 이동시킨다.



[그림 2.1.19] 비상 운행의 EFFBD - 차량 내 화재 발생

(나) 물리적 아키텍처 설계 및 인터페이스 분석

① 본 사업의 아키텍팅 목적

아키텍처는 한마디로 정의하기 어려우며 시스템의 특성이나 사업의 양상에 따라 구체적인 내용을 적절히 조정해야 하는 개념이다. 아키텍처의 관심 영역은 시스템 상부 계층에 있는 시스템 환경 및 외부시스템을 포함하는 상부 시스템으로부터 시스템계층 그리고 시스템의 바로 하부 계층에 있는 하부 시스템(구성품)까지를 포함하는 상부구조이다. 또한 아키텍처는 시스템의 설계 및 진화를 지배하도록 요소, 인터페이스, 그리고 제약사항의 관점(내용)에서 본질적이고 일관되도록 표현되는 구조이다.

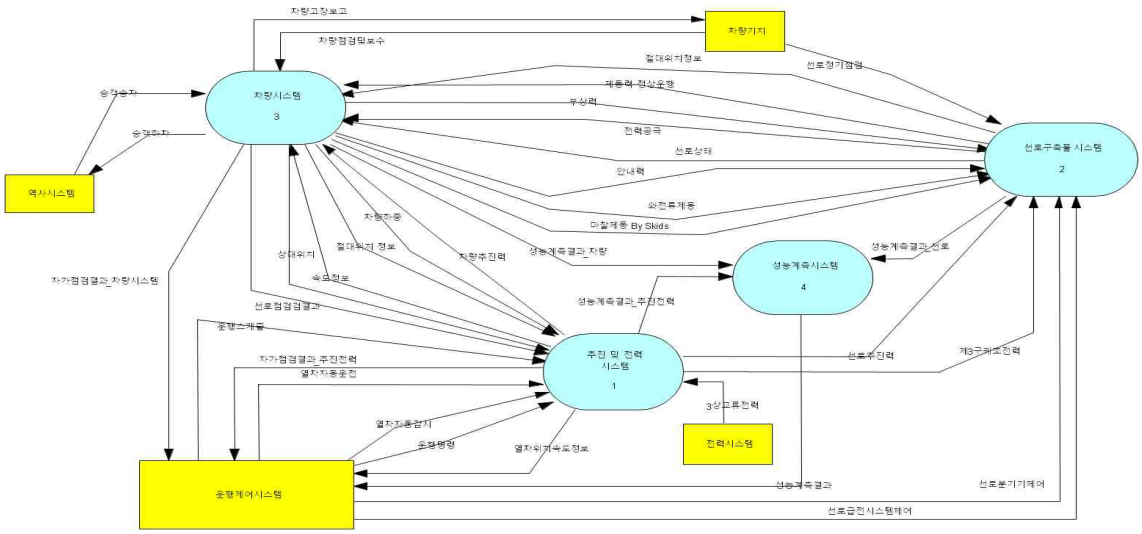
초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업은 아직 대상 시스템의 명확한 개념이 잡혀있지 않고, 오히려 기술개발 과정을 통해 초고속철도시스템의 개념을 조금씩 정의해나가야 하는 특성이 있다. 현재 본 사업의 구조는 자기부상열차의 핵심 기술인 부상 시스템과 추진 시스템, 선로 시스템의 담당기관과 부서가 각기 달리 배정되어 있기 때문에, 시스템 전체에 대한 기술적인 사항의 Context를 일목요연하게 정리한 자료가 없는 상황이다. 따라서 시스템 아키텍처를 정의함에 의해 시험용 초고속 철도시스템의 전체 개념을 기술적으로 정의하고자 한다. 이러한 목적을 만족하기 위해서는 시험용 초고속 철도시스템 각 구성파트의 세세한 기술사항에 집중하기 보다는 시스템 전반을 빠짐없이 조망하는 것에 집중할 필요가 있다.

다시 말해서 본 사업에서 수행되는 시스템 아키텍팅은 구성품 세부 수준에 대한

상세한 아키텍처와 인터페이스를 정의하기보다는 상위 수준의 아키텍처와 인터페이스를 정의하는데 주력하며, 향후 기술이 검증되어가는 과정에서 초고속 자기부상열차에 대한 아키텍처의 성숙도를 높이는 것을 목적으로 한다.

② 시스템 수준 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)

시험용 초고속철도시스템을 한 단계 하위로 상세 수준을 높이면 4개의 서브 시스템으로 나뉜다. 세부 내용은 다음과 같다.



[그림 2.1.20] 초고속 자기부상철도 시스템 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)

시스템 수준 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)에서 정의된 인터페이스는 다음과 같다.

[표 2.1.1] 아키텍처 정의에 대한 다양한 정의 비교

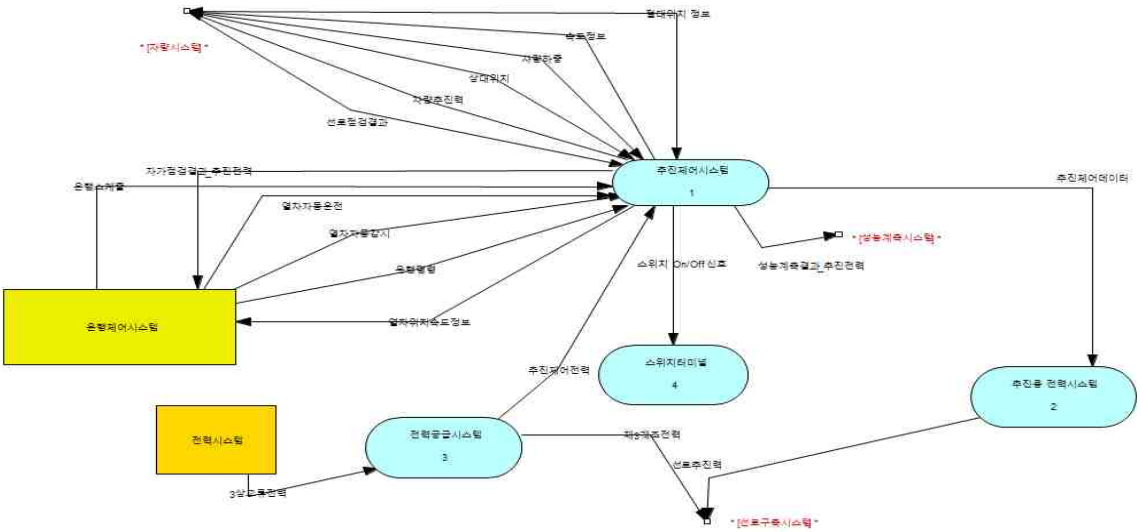
인터페이스	송신	수신
선로점검결과	차량 시스템	추진 및 전력 시스템
상대위치	차량 시스템	추진 및 전력 시스템
속도정보	추진 및 전력 시스템	차량 시스템
절대위치 정보	차량 시스템	추진 및 전력 시스템
차량하중	차량 시스템	추진 및 전력 시스템
차량 추진력	추진 및 전력 시스템	차량 시스템
성능계측결과_추진전력	추진 및 전력 시스템	성능계측시스템
성능계측결과_선로	선로구축물 시스템	성능계측시스템
선로추진력	추진 및 전력 시스템	선로구축물 시스템
제3궤조전력	추진 및 전력 시스템	선로구축물 시스템
성능계측결과_차량	차량 시스템	성능계측시스템
마찰제동 by Skid	차량 시스템	선로구축물 시스템
와전류 제동	차량 시스템	선로구축물 시스템
안내력	차량 시스템	선로구축물 시스템
선로상태	선로구축물 시스템	차량 시스템
전력공급	선로구축물 시스템	차량 시스템

인터페이스	송신	수신
부상력	차량 시스템	선로구축물 시스템
제동력_정상운행	선로구축물 시스템	차량 시스템
절대위치 정보	선로구축물 시스템	차량 시스템
승객승차	역사시스템	차량시스템
승객하차	차량시스템	역사시스템
차량고장보고	차량시스템	차량기지
차량점검 및 보수	차량기지	차량시스템
선로정기점검	차량기지	선로구축물시스템
자가점검결과_차량시스템	차량시스템	운행제어시스템
운행스케줄	운행제어시스템	추진 및 전력시스템
자가점검결과_추진전력	추진 및 전력시스템	운행제어시스템
열차자동운전	운행제어시스템	추진 및 전력시스템
열차자동감시	운행제어시스템	추진 및 전력시스템
운행명령	운행제어시스템	추진 및 전력시스템
열차위치속도정보	추진 및 전력시스템	운행제어시스템
3상교류전력	전력시스템	추진 및 전력시스템
성능계측결과	성능계측시스템	운행제어시스템
선로분기기제어	운행제어시스템	선로구축물시스템
선로급전시스템제어	운행제어시스템	선로구축물시스템

④ 하위 수준 아키텍처 정의

㉮ 추진 및 전력 시스템

추진 및 전력 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)은 다음과 같다.



[그림 2.1.21] 추진 및 전력 시스템 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)

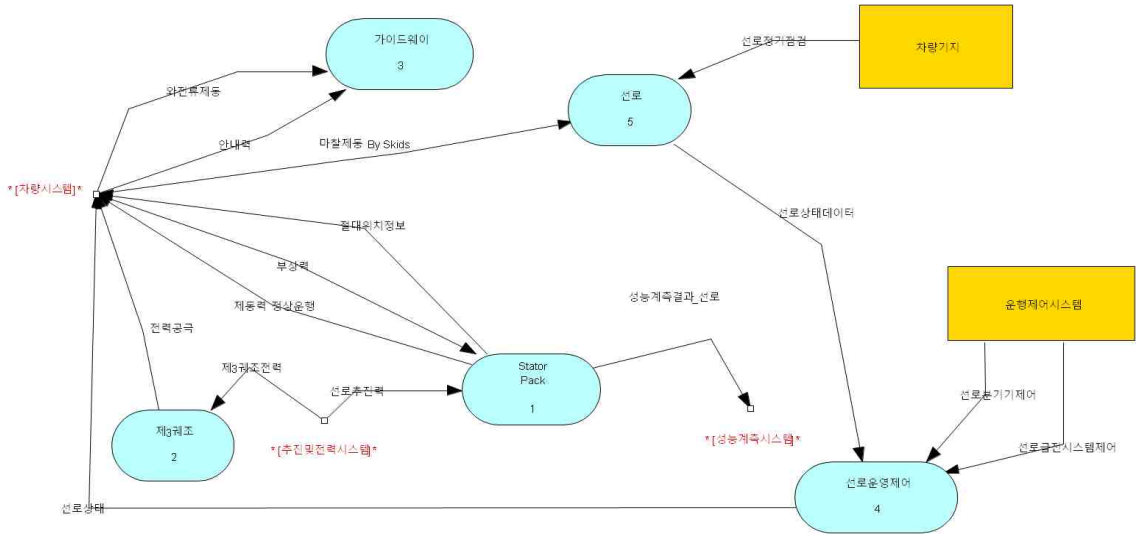
추진 및 전력 시스템 수준 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)에서 정의된 인터페이스는 다음과 같다.

[표 2.1.2] 추진 및 전력 시스템 수준 인터페이스

인터페이스	송신	수신
절대위치 정보	차량시스템	추진제어시스템
차량하중	차량시스템	추진제어시스템
상대위치	차량시스템	추진제어시스템
선로점검결과	차량시스템	추진제어시스템
속도정보	추진제어시스템	차량시스템
차량추진력	추진제어시스템	차량시스템
운행스케줄	운행제어시스템	추진제어시스템
열차자동운전	운행제어시스템	추진제어시스템
열차자동감시	운행제어시스템	추진제어시스템
운행명령	운행제어시스템	추진제어시스템
자가점검결과_추진전력	추진제어시스템	운행제어시스템
열차위치속도정보	추진제어시스템	운행제어시스템
스위치 On/Off 신호	추진제어시스템	스위치터미널
3상교류전력	전력시스템	전력공급시스템
추진제어전력	전력공급시스템	추진제어시스템
제3궤조전력	전력공급시스템	선로구축시스템
추진제어데이터	추진제어시스템	추진용 전력시스템
선로추진력	추진용 전력시스템	선로구축물시스템
성능계측결과_추진전력	추진제어시스템	성능계측시스템

㉯ 선로구축물 시스템

선로구축물 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)은 다음과 같다.



[그림 2.1.22] 선로구축물 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)

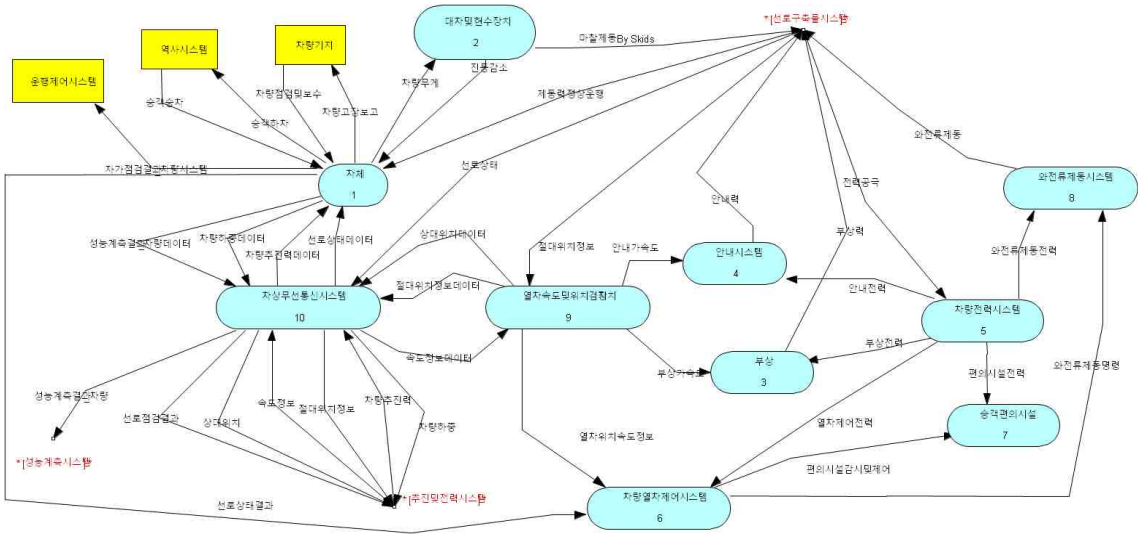
선로구축물 시스템 수준 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)에서 정의된 인터페이스는 다음과 같다.

[표 2.1.3] 선로구축물 시스템 수준 인터페이스

인터페이스	송신	수신
와전류제동	차량시스템	가이드웨이
안내력	차량시스템	가이드웨이
마찰제동 By Skids	차량시스템	선로
절대위치정보	Stator Pack	차량시스템
부상력	차량시스템	Stator Pack
제동력 정상운행	Stator Pack	차량시스템
전력공급	제3궤조	차량시스템
제3궤조전력	추진 및 전력시스템	Stator Pack
선로추진력	추진 및 전력시스템	제3궤조
성능계측결과_선로	Stator Pack	성능계측시스템
선로상태데이터	선로	선로운영제어
선로정기점검	차량기지	선로
선로분기기제어	운행제어시스템	선로운영제어
선로급전시스템제어	운행제어시스템	선로운영제어

㉰ 차량 시스템

차량 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)은 다음과 같다.



[그림 2.1.23] 차량 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)

차량 시스템 수준 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)에서 정의된 인터페이스는 다음과 같다.

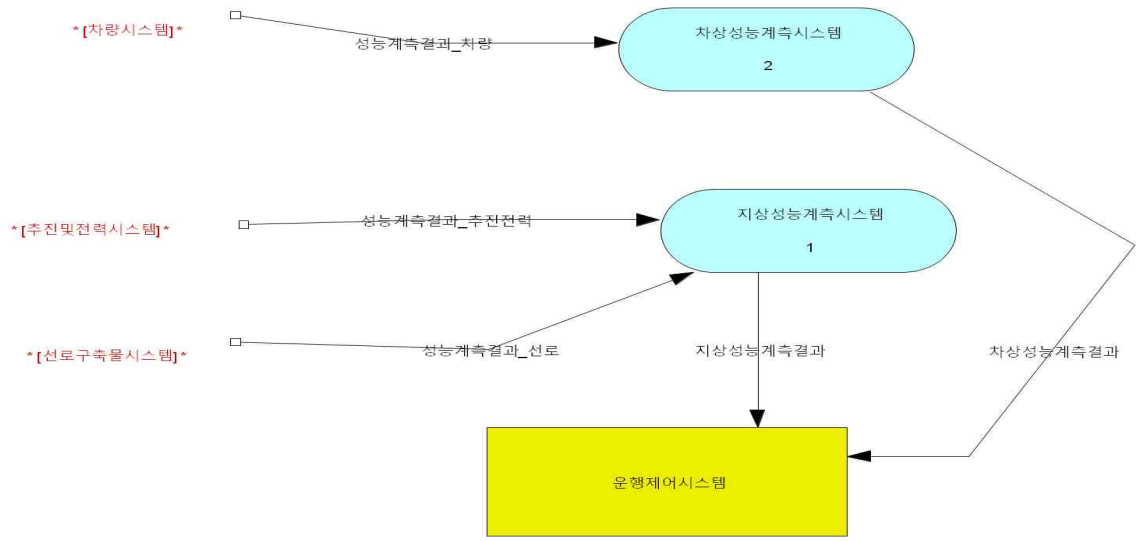
[표 2.1.4] 차량 시스템 수준 인터페이스

인터페이스	송신	수신
차량고장보고	차체	차량기지
차량점검 및 보수	차량기지	차체
승객하차	차체	역사시스템
승객승차	역사시스템	차체
자가점검결과_차량시스템	차체	운행제어시스템
성능계측결과_차량데이터	차체	차상무선통신시스템
차량하중데이터	차체	차상무선통신시스템
차량추진력데이터	차상무선통신시스템	차체
선로상태데이터	차상무선통신시스템	차체
성능계측결과_차량	차상무선통신시스템	성능계측시스템
선로점검결과	차상무선통신시스템	추진 및 전력 시스템
상대위치	차상무선통신시스템	추진 및 전력 시스템
속도정보	추진 및 전력 시스템	차상무선통신시스템
절대위치정보	차상무선통신시스템	추진 및 전력 시스템
차량추진력	추진 및 전력 시스템	차상무선통신시스템
차량하중	차상무선통신시스템	추진 및 전력 시스템
속도정보데이터	차상무선통신시스템	열차속도 및 위치검지장치
절대위치정보데이터	열차속도 및 위치검지장치	차상무선통신시스템
상대위치데이터	열차속도 및 위치검지장치	차상무선통신시스템
선로상태	선로구축물시스템	차상무선통신시스템
제동력정상운행	선로구축물시스템	차체
차량무게	차체	대차 및 현수장치

인터페이스	송신	수신
진동감소	대차 및 현수장치	차체
마찰제동 By Skids	대차 및 현수장치	선로구축물시스템
절대위치정보	선로구축물시스템	열차속도 및 위치검지장치
열차위치속도정보	열차속도 및 위치검지장치	차량열차제어시스템
안내가속도	열차속도 및 위치검지장치	안내시스템
부상가속도	열차속도 및 위치검지장치	부상
안내력	안내시스템	선로구축물시스템
부상력	부상	선로구축물시스템
안내전력	차량전력시스템	안내시스템
부상전력	차량전력시스템	부상
전력공급	선로구축물시스템	차량전력시스템
열차제어전력	차량전력시스템	차량열차제어시스템
편의시설감시 및 제어	차량열차제어시스템	승객 및 편의시설
편의시설전력	차량전력시스템	승객 및 편의시설
와전류제동	와전류제동시스템	선로구축물시스템
와전류제동전력	차량전력시스템	와전류제동시스템
와전류제동명령	차량열차제어시스템	와전류제동시스템

㉮ 성능계측 시스템

성능계측 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)은 다음과 같다.



[그림 2.1.24] 성능계측 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)

성능계측 시스템 수준 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)에서 정의된 인터페이스는 다음과 같다.

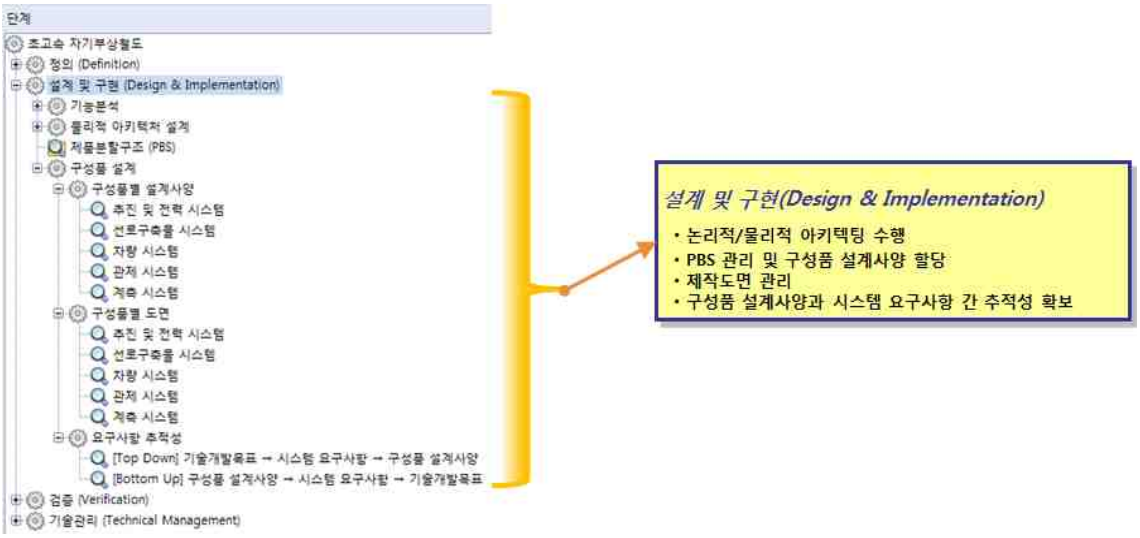
[표 2.1.5] 성능계측 시스템 수준 인터페이스

인터페이스	송신	수신
성능계측결과_차량	차량시스템	차상성능계측시스템
성능계측결과_추진전력	추진 및 전력시스템	지상성능계측시스템
성능계측결과_선로	선로구축물시스템	지상성능계측시스템
지상성능계측결과	지상성능계측시스템	운행제어시스템
차상성능계측결과	차상성능계측시스템	운행제어시스템

라. 구성품 요구사항 추적 관리

(1) 구성품 요구사항 추적관리 환경 구축

설계 및 구현 프로세스는 초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업의 요구사항을 기반으로 한 설계사항들을 관리하는 프로세스이다. 연구개발일정에 따른 기술적인 구현사항에 따라 업데이트된 PBS를 반영하여 이를 기준으로 해당 구성품 설계사양 및 도면을 조회하는 업무 환경을 추가적으로 구현하였다. 구성품 PBS 및 설계사양은 해당 서브시스템(추진 및 전력 시스템, 선로구축물 시스템, 차량 시스템, 관제 시스템, 계측 시스템)을 기준으로 분류 및 조회된다.[그림 2.1.29]



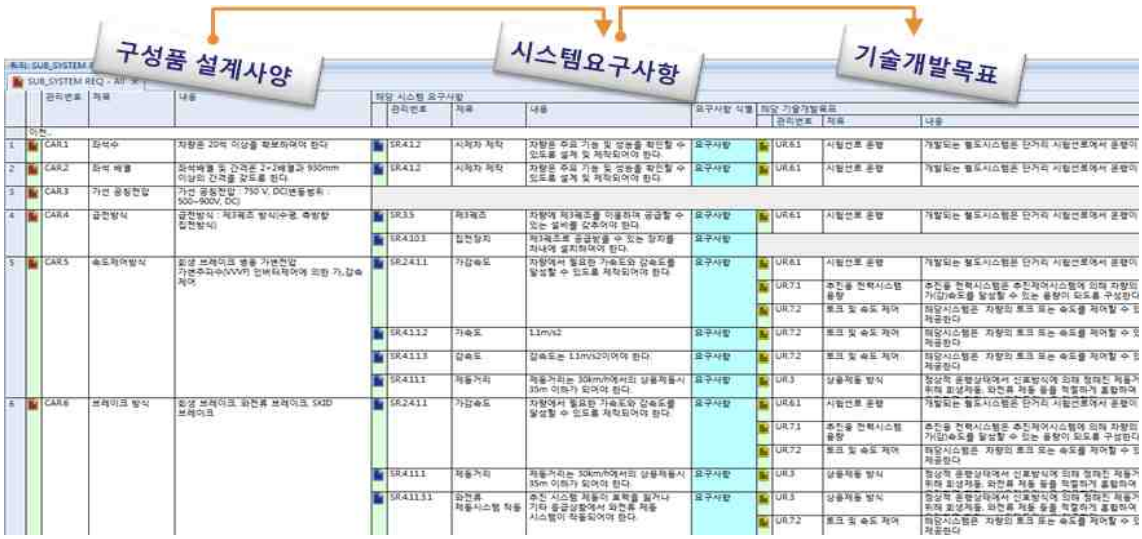
[그림 2.1.25] 설계 및 구현 프로세스 업무 트리

(2) 구성품 설계사양과 시스템 요구사항 간 추적성 확보

[그림 2.1.26]과 같이 구성품 설계사양과 시스템 요구사항 간 추적관리를 통해 시스템 요구사항의 하위 설계 반영여부를 조회하고, 추적성 누락사항을 식별하였다.



[그림 2.1.26] 요구사항 추적성 조회(Top Down) 화면



[그림 2.1.27] 요구사항 추적성 조회(Bottom Up) 화면

마. 시스템 인터페이스 조정

(1) 시스템 인터페이스 성능 검증 및 평가

(가) 시스템 아키텍팅을 통한 인터페이스 검증 지원

시스템에 대한 인터페이스 분석을 통해 외부 또는 상위 레벨 상호작용 시스템, 플랫폼 그리고 제품에 대한 기능 및 물리적 인터페이스를 정량적인 관점에서 정의해야 하며, 기능 및 물리적 인터페이스는 기계적, 전기적, 열적, 데이터, 제어, 절차 그리고 다른 상호작용도 포함한다. 인터페이스는 또한 내부/외부 관점에서 검토될 수 있다. 내부 인터페이스는 착수된 시스템에 대해 설정된 범위내의 요소를 다룬다. 이러한 인터페이스는 일반적으로 시스템 개발자에 의해서 식별되고 통제된다. 반면에 외부 인터페이스는 시스템에 설정된 범위 외의 실체의 연관성을 포함한다.

시스템 인터페이스 분석은 인터페이스 요구사항이 엔지니어링 분야 및 해당 인터페이스 표준의 영향을 받게 되는 개발 초기 단계부터 시작된다. 이러한 인터페이스 요구사항은 외부 인터페이스의 요건분석과 내부 인터페이스의 시스템 기능 및 물리적 설계에 의해 개발되고, 변경 및 구체화된다. 인터페이스 규격을 작성하는 방법으

로서 독립적인 인터페이스 규격서(IRS: Interface Requirement Specification)로 작성되는 경우와 구성품 규격서에 인터페이스 규격을 포함해서 작성하는 경우가 있다.

구현된 구성품이 상위로 통합되는 과정에서 인터페이스에 대한 검증이 진행된다. 인터페이스 검증이란 시스템/구성품의 제반 인터페이스에 대해 구분된 종류 또는 범주별 세부 인터페이스를 검토하고, 각 인터페이스의 연결과 기술적 설명의 적합성 검토를 통해 서로 일치하지 않는 인터페이스를 식별하고 수정하는 활동을 말한다.

(나) 시스템 아키텍처 보완 개요

시스템 아키텍처는 설계를 지배하는 기본 틀로서 연구개발 과정에서 지속적으로 보완되어야 하며, 특히 본 연구개발사업과 같은 초기 기술의 개발 및 검증 단계에서는 아키텍처가 변화될 가능성이 높기 때문에 관리 및 정련(refine)이 중요하다. 3차년도에서는 크게 관제시스템이 기존의 추진 및 전력 시스템으로부터 분리되어 서브시스템의 구성이 4개에서 5개로 변화되었으며, 그 외에는 기존에 복잡하게 표기되어 시인성이 떨어지던 다이어그램의 구성을 변경하는데 주력하였으며 그 내용은 다음과 같다.

① 시스템 인터페이스 조정 및 관리

본 기술개발사업의 3단계가 진행됨에 따라 구체화된 기술 구현 사항을 식별하여 적용하고 기존 시스템 아키텍처 모델의 오류를 수정하였다.

② 아키텍처 모델의 간소화 및 효율화

현재 시스템 아키텍처 모델은 시스템 엔지니어링 전산지원도구인 Cradle을 이용하여 구현되었으며 PAD(Physical Architecture Diagram)라는 다이어그램 규칙에 의거하여 작성되었다. PAD는 시스템의 물리적인 아키텍처를 나타내기 위해 내부 구성요소의 이름과 외부환경, 그리고 내부 구성요소 간 또는 내부 구성요소와 외부환경 간의 인터페이스를 간단한 도형과 선으로 도식화하는 방식이며, 인터페이스의 방향성이 표현된다. 그런데 기존의 PAD는 인터페이스 구성 및 표현이 너무 난잡하여 가시성 및 활용도가 떨어졌다. 따라서 내용의 생략을 최소화하면서 인터페이스의 표현을 가능한 간소화하고 효율적으로 표현하여 이를 보는 사람으로 하여금 보다 쉽고 이해할 수 있고 활용하기 용이하게 개선하였다.

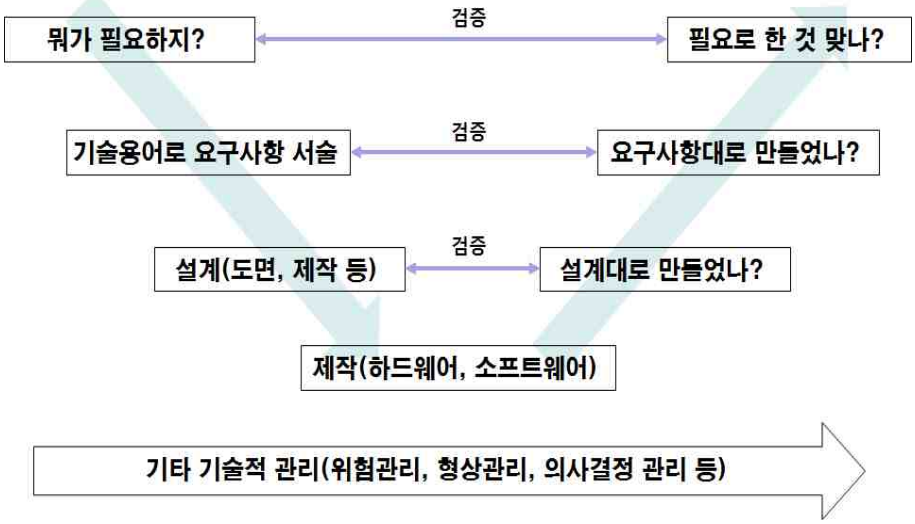
바. 시험평가 추적 관리(3차년도)

(1) 시험평가 추적 관리 환경 구축

(가) 개요

시스템엔지니어링에서 검증 프로세스는 결과물의 최소 단위부터 최종제품단계까지 시스템 엔지니어링 프로세스를 통해 형성된 각각의 사양서를 기준으로 제품이 올바르게 구현되었는가를 검증하는데 관계되는 모든 업무를 말한다. 최소 단위 레벨에서부터 전체 시스템에 이르기까지 Bottom-up으로 통합하고, 각 레벨에서 정의된 요구사항에 대한 검증이 이루어져야 한다.

검증의 목적은 시스템의 최소 단위 레벨부터 전체 시스템 레벨까지 도출된 물리적 아키텍처(소프트웨어와 인터페이스 포함)가 주어진 비용, 일정, 성능요건 및 위험레벨을 충족시키고 있는지를 검토하는데 있다. 나아가 시스템, 하부시스템, 및 하위레벨 구성품이 시스템 요구사항을 충족시키고 있는지를 앞서 설정된 기준(baseline)에 의해 도출된 데이터와 설계 솔루션에 사용된 기술내용을 함께 검증한다. 시스템 요구사항을 검증하는 방법은 요건 및 기능분석과 요구사항 할당에서 규정된 검증 데이터로 한다.

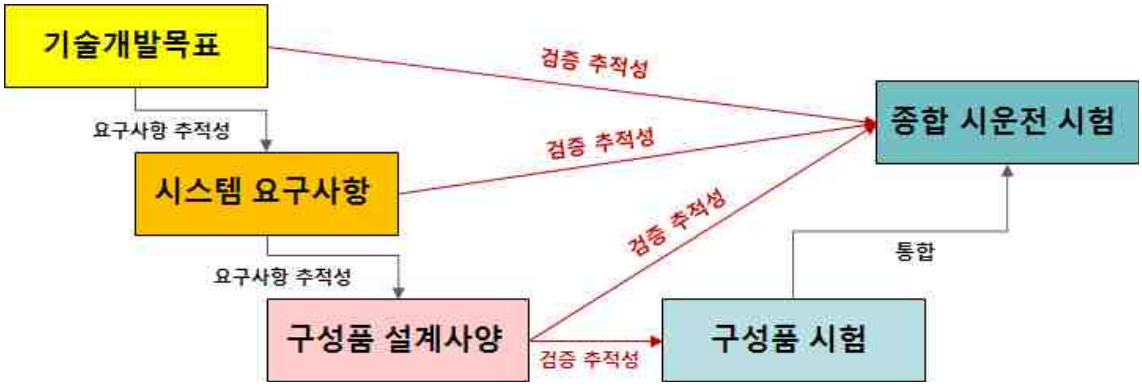


[그림 2.1.28] 시스템 엔지니어링 Vee모델 상의 검증 개념도

초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업은 최고 시속 550㎞/h의 초고속 자기부상철도 설계기술 확보 및 조합성능평가를 위하여 기술적 데모가 가능한 LS-LSM(Long Stator Linear Synchronous Motor) 추진시스템 기반의 단거리 시험선을 구축하는 것을 목적으로 한다. 본 사업은 크게 초고속 자기부상열차에 대한 150m 이상의 실규모 단거리 시험선을 구축하는 1세부과제와 초고속 자기부상 차량 핵심기술을 확보하고 기술 검증을 위한 시험용 차량을 개발하고 성능을 평가하는 2세부과제로 구분된다.

초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업의 검증 체계는 크게 구성품 시험과 종합 시운전 시험으로 구분된다. 구성품 시험은 설계사양에 따른 성능만족여부를 확인하는 각종시험을 의미하며, 대부분의 시험이 단일 차량 및 부품 레벨에서의 기능 및 성능, 인터페이스 등을 확인하는 시험이다. 종합 시운전 시험은 단거리 시험선 내 운

행을 통해 단위 구성품이 조합된 상태에서 시스템 요구사항 및 설계사양에서 제시된 성능을 발휘하는지의 여부를 평가하기 위한 시험이며, 추진제어, 추진전력, 부상제어, 차량/전장품, 신호/통신, 가이드웨이, 종합(차량 및 환경) 분야로 나뉜다.



[그림 2.1.29] 요구사항(설계사양) - 시험 간 추적 관계

3차년도에서는 초고속 자기부상철도 시스템의 성능시험 및 평가 업무를 관리하기 위해 시험이 진행됨에 따라 발생하는 시험 산출물(절차서 및 결과 기록서)을 체계적으로 데이터베이스화하고, 이를 요구사항과 추적관리할 수 있는 환경을 구축하였다.

(나) 업무 트리 구성

초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업의 성능 검증 체계는 크게 구성품 시험과 종합 시운전 시험으로 나뉜다. 이를 기반으로 그림과 같이 업무 트리를 구성, 해당 절차서에 명시된 시험 또는 세부 시험항목, 시험결과, 요구사항/설계사양과의 추적성을 조회할 수 있게 하였다.



[그림 2.1.30] 검증 프로세스 업무 트리

(다) 구성품 시험항목 및 결과 DB화

① 구성품 시험

구성품 시험은 단일 차량 및 부품 레벨에서의 기능 및 성능, 인터페이스 등을 확

인하는 시험으로 구성되며, 구성품 설계사양을 기반으로 이를 검증한다. 본 사업의 구성품 시험은 각각 1세부와 2세부과제로 구분하여 진행되는데, 세부 내용은 다음과 같다.

[표 2.1.6] 구성품 시험별 시험항목 - 1세부

No	구분	장치	시험항목
1	1세부	추진 전력 조합시험 성능시험	▪ 온도상승 시험
			▪ 특성(효율)시험
			▪ 보호시스템 시험
			▪ 환경시험
			▪ 소음시험
2		변압기	▪ 임피던스 전압 및 부하손시험
			▪ 절연저항시험
			▪ 절연내력시험
			▪ 내압시험
			▪ 유도절연저항
			▪ 충격내전압시험
			▪ 온도시험
			▪ 효율 및 전압변동율 시험
			▪ 소음측정시험
			▪ 변압기 단락 강도시험
3		전력컨버터 성능시험	▪ 외관검사
			▪ 구조검사
			▪ 중량측정시험
			▪ 치수검사
			▪ 보호회로 기능시험
			▪ 제어 기능 시험
			▪ 경부하 시험
			▪ 소음시험
			▪ 온도상승시험
			▪ 효율 측정 시험
			▪ 공급 과전압과 과도 에너지 시험
			▪ 절연저항시험
			▪ 내전압시험
			▪ 전자파 시험
			▪ 환경시험
			▪ 검출기 특성시험
			▪ 기동 및 정지시험
			▪ 부하맥동시험
			▪ 부하급변시험
			▪ 전압변동시험
			▪ 방수시험
		전력 컨버터-전자파 시험	▪ 전기적 빠른 과도현상 내성시험
			▪ 서지 내성시험
			▪ 전기자기 전도 내성시험
4		추진 인버터 성능시험	▪ 외관검사
			▪ 구조검사
			▪ 중량측정시험
			▪ 치수검사
			▪ 보호회로 기능시험

No	구분	장치	시험항목
			▪ 제어 기능 시험
			▪ 경부하 시험
			▪ 소음 시험
			▪ 온도상승 시험
			▪ 효율 측정 시험
			▪ 공급 과전압과 과도 에너지 시험
			▪ 절연저항시험
			▪ 내전압시험
			▪ 전자파 시험
			▪ 환경시험
			▪ 검출기 특성시험
		추진인버터-final-전자파시험	▪ 전기적 빠른 과도현상 내성시험
			▪ 서지 내성시험
			▪ 전기자기 전도 내성시험
5		에너지 저장장치 성능시험	▪ 외관검사
			▪ 구조검사
			▪ 중량측정시험
			▪ 치수검사
			▪ 절연 저항 시험
			▪ 상용주파 내전압 시험
			▪ 저항치 측정시험
			▪ 검출기 특성시험
			▪ 광량 시험
			▪ 게이트 출력파형 측정 시험
			▪ 보호회로 동작시험
			▪ 충전시험
			▪ 방전시험
			▪ 전자파 시험
			▪ 환경시험
		에너지저장장치_final-전자파시험	▪ 전기적 빠른 과도현상 내성시험
			▪ 서지 내성시험
			▪ 전기자기 전도 내성시험
6		집전장치 검사	▪ 외관 및 치수검사
			▪ 절연시험 및 내전압 시험
			▪ 동작시험
			▪ 접촉력시험
			▪ 중량검사
			▪ 재료시험
		전차선 설치 후 시험	▪ 전차선 설치후 측정기록
			▪ 전차선로 도통검사
			▪ 전차선로 절연저항 측정
			▪ 전차선로 절연내력 시험
			▪ 전차선로 누설전류 시험
7		LSM	▪ 외관구조검사
			▪ 치수 및 중량 측정검사
			▪ 절연저항시험
			▪ 내전압시험
			▪ 추력시험
			▪ 방수시험
8		SCADA	▪ 설치검사
			▪ 기능검사

No	구분	장치	시험항목
			▪ 소프트웨어검사
9		압력스위치박스 검사	▪ 외관 및 치수검사
			▪ 절연시험 및 통전 시험
			▪ 방수시험 및 누기시험
			▪ 중량검사
10		차단기	▪ 외관 및 치수검사
			▪ 주회로, 보조회로 내압시험
			▪ 주회로, 보조회로 절연저항 측정시험
			▪ 기계적 동작시험
			▪ 전기적 동작시험
			▪ 과전류 트립장치 동작시험
11		가이드웨이 궤광 검측설치 기록	▪ 궤간
			▪ 수평틀림
			▪ 수직 틀림
			▪ 좌우레벨
			▪ 횡방향
			▪ 침목간격
			▪ 침목직각
12		가이드웨이 검사 기록	▪ 가이드웨이 check sheet

[표 2.1.7] 구성품 시험별 시험항목 - 2세부

No	구분	장치	시험항목
1	2세부	차체 구조체 하중시험	▪ 차체 구조해석 결과 보고서로 대체
			▪ 유동해석 결과 보고서 대체
		알류미늄 프로파일	▪ 치수검사 및 열처리 성적서
		차체	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 용접검사
			▪ 누수시험
2		대차 조립치수	▪ 대차구조 및 치수검사
		부상프레임 액상침투 탐상 검사	▪ 부상프레임 액상침투 탐상 검사 보고서
		공기스프링 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 특성시험
			▪ 기밀시험
		랜딩스키드 검사	▪ 공정 및 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 마찰시험
			▪ 경도 및 밀도 시험
3		압력공기통	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 열처리검사
			▪ 수압시험
			▪ 누설시험
4		Pressure switch-MCW11W	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 설정압력 시험 및 조정
		cock with S/Vent	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 누설시험

No	구분	장치	시험항목
			▪ 성능시험
			▪ 절연저항 시험
		PVD-DP5 with Pipe Bracket	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 누설시험
			▪ 유량시험
			▪ 작동압력 시험
		SAFETY V/V-SF10	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 누설시험
			▪ 조정압력시험
		Levelling valve KSL 160L	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 작동시험
			▪ 공기누설
			▪ 불감대시험
			▪ 유량시험
		Levelling valve KSL 160R	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 작동시험
			▪ 공기누설
			▪ 불감대시험
			▪ 유량시험
5		마그네트 드라이버 형식시험기록서	▪ 외관구조 검사
			▪ 외형치수 및 중량측정검사
			▪ 절연저항 및 내전압
			▪ 제어전원 변동성 시험
			▪ 제어 시퀀스 시험
			▪ 보호동작 확인시험
			▪ 추가동작시험
			▪ 저전압 동작시험
			▪ 전원변동 시험
6		보조전원장치 검사	▪ 외관검사
			▪ 구조검사
			▪ 중량측정시험
			▪ 치수검사
			▪ 진동시험
			▪ 소음시험
			▪ 기동 및 정지시험
			▪ 경부하시험
			▪ 부하맥동시험
			▪ 효율시험
			▪ 부하급변시험
			▪ 전압변동시험
			▪ 보호회로동작
			▪ 전자파 적합성 시험
			▪ 공급 과전압과 과도 에너지 시험
7		평활재	▪ 압축강도 시험
			▪ 휨(굴곡)강도 시험
			▪ 산소지수 시험

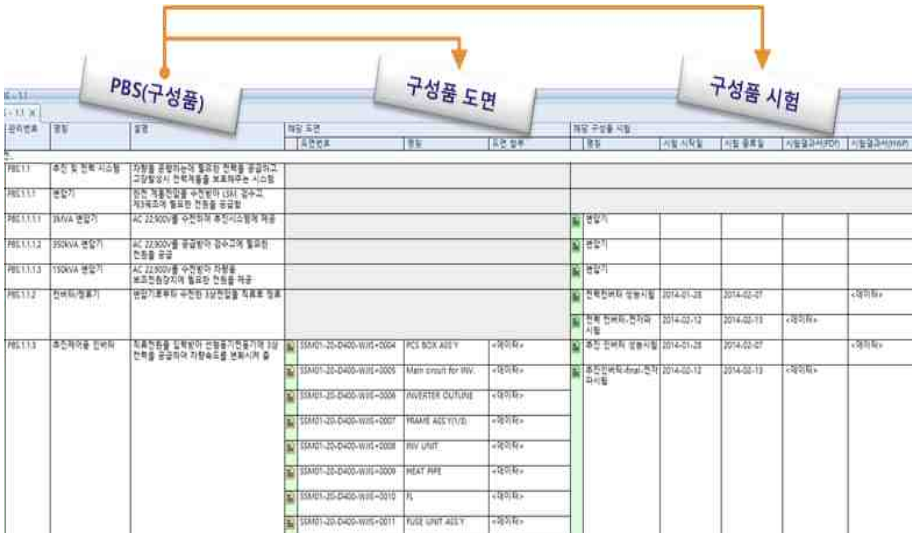
No	구분	장치	시험항목
			▪ 겉보기 비중 시험
		바닥재	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
		단열재	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
		중천정 판넬 및 형광등 압출재 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
8		CAB MASK	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 중량검사
			▪ 인장시험
			▪ 굴곡시험
			▪ 압축시험
			▪ 산소지수 시험
			▪ 화염전파 시험
			▪ 연기밀도 시험
			▪ 독성지수 시험
		내장판	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 중량검사
			▪ 인장시험
			▪ 굴곡시험
			▪ 압축시험
			▪ 산소지수 시험
			▪ 화염전파 시험
			▪ 연기밀도 시험
			▪ 독성지수 시험
			▪ 광택도 시험
			▪ 연필경도 시험
			▪ 색차 시험
			▪ 도막두께 시험
			▪ 내부착성 시험
			▪ 내긁힘성 시험
			▪ 내마모성 시험
9		의자 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 동작검사
10		유리 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 내광성 시험
			▪ 내열성 시험
			▪ 낙구충격 시험
			▪ 쇼트백 시험
11		Door	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항시험
			▪ 내전압시험
			▪ 배선 연속성 시험
			▪ 도어 수동 열기 힘 측정
			▪ 도어 수동 닫기 힘 측정
			▪ 수동 최대 열림폭 측정

No	구분	장치	시험항목
			▪ 내부 비상핸들 작동력 시험
			▪ 외부 비상핸들 작동력 시험
			▪ 열림 시간 측정
			▪ 열림 폭 측정
			▪ 장애물 감지 시험
			▪ 최소전압시험
			▪ 비전력 시험 (열림시/닫힘시)
			▪ 역전압 시험
			▪ 누수시험
			▪ 내구성시험
12		냉방장치 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 코일 기밀/내압시험
			▪ 냉동기 가동시험
			▪ 냉매 압력 시험
			▪ 감속 시험
			▪ 권선온도 상승시험
			▪ 냉방 능력 시험
			▪ 소음시험
			▪ 절연저항 시험
			▪ 절연 내압 시험
			▪ 소비전력 시험
			▪ 고/저압 스위치 작동 시험
			▪ 저전압 기동 시험
			▪ 증발기 응결수 배수 시험
			▪ 냉매 배관 누설 시험
			▪ 컨트롤러(PLC) 기능 시험
13		전기 난방기 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항시험 (상온, 고온)
			▪ 내전압시험
			▪ 소비전력시험
			▪ 온도시험
			▪ 부하시험
			▪ 접착강도시험
			▪ 압축강도시험
			▪ 동작시험
14		운전제어대	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 중량검사
			▪ 인장시험
			▪ 굴곡시험
			▪ 압축시험
			▪ 산소지수 시험
			▪ 화염전파 시험
			▪ 연기밀도 시험
			▪ 독성지수 시험
			▪ 광택도 시험
			▪ 연필경도 시험
			▪ 색차 시험
			▪ 도막두께 시험

No	구분	장치	시험항목
			▪ 내부착성 시험
			▪ 내긁힘성 시험
			▪ 내마모성 시험
11		방송장치	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 전압변동시험
			▪ 기능시험
			▪ AGING 시험
			▪ 절연저항시험
			▪ 절연내압시험
			▪ 음성성능시험
12		실내 스피커 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 기능검사
			▪ Aging 검사
13		화재발신기 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항검사
			▪ 전압변동 시험
			▪ 내전압시험
			▪ 동작시험
14		메인퓨즈박스	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항검사
			▪ 내전압 시험
			▪ 통전시험
			▪ 중량검사
			▪ 방수시험
15		SURGE ARRESTER 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
16		베터리 박스	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 중량검사
			▪ 방수시험
17		베터리 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 중량검사
			▪ 용량시험
			▪ 저온 방전시험
			▪ 정전압 충전특성 시험
			▪ 용량보존특성 시험
			▪ 내구시험
18		배전반 검사	▪ 외관구조검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항시험
			▪ 내전압시험
			▪ 동작시험
			▪ 회로시험
19		제어 증폭기 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항검사

No	구분	장치	시험항목
			▪ 절연 내전압 시험
			▪ 기능검사
			▪ 전압변동 시험
			▪ Aging 시험
20		출력 증폭기 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항검사
			▪ 절연 내전압 시험
			▪ 기능검사
			▪ 전압변동 시험
			▪ 신호대잡음비 측정 시험
			▪ 주파수 응답 시험
			▪ 왜율 측정 시험
			▪ Aging 시험
21		승객 안내 표시기	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항검사
			▪ 절연 내전압 시험
			▪ 기능검사
			▪ 전압변동 시험
			▪ Aging 시험
22		전동 와이퍼	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항 검사
			▪ 내전압 시험
			▪ 입력 전압 시험
23		등구류 검사	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 점등시험
			▪ 절연저항 시험
			▪ 내전압 시험
24		비디오 서버	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항검사
			▪ 절연 내전압 시험
			▪ 기능검사
			▪ 전압변동 시험
			▪ Aging 시험
25		Train computer Display unit	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항시험
			▪ 내전압시험
			▪ 전압변동시험
			▪ 동작시험
26		Train computer TCMS	▪ 외관검사
			▪ 치수검사
			▪ 절연저항시험
			▪ 내전압시험
			▪ 전압변동시험
			▪ 동작시험

위의 표와 같이 구성품 시험은 PBS(제품분할구조)의 장치 및 구성품 수준을 기반으로 정의된다. 이를 반영하여 그림 4와 같이 구성품을 기준으로 해당 구성품 시험 및 제작 도면에 대한 추적표를 구성, PBS의 구성품 수준에 해당하는 단위 품목에 대한 검증 커버리지를 조회한다.



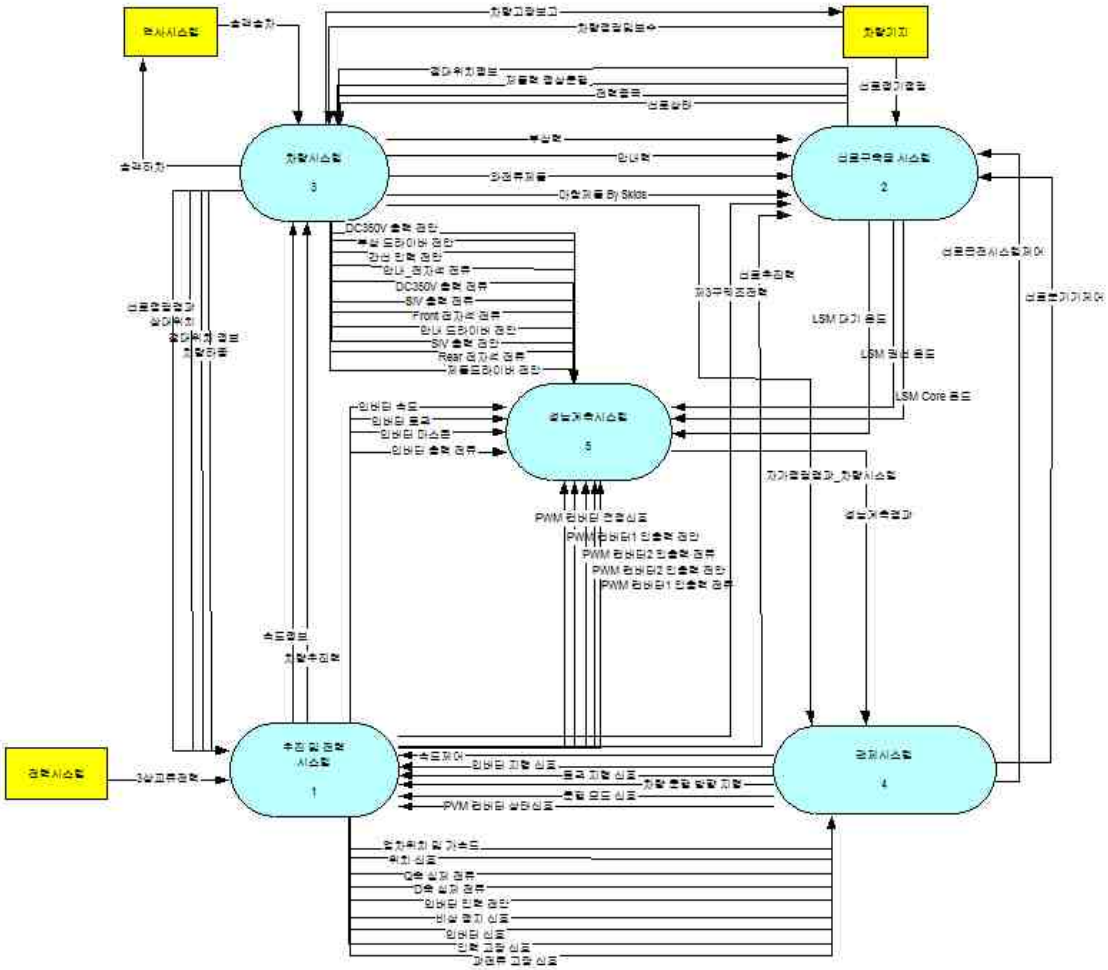
[그림 2.1.31] 구성품 시험 조회 화면

사. 시스템 인터페이스 성능 평가 및 설계 확정

(1) 시험선 시험 운행을 통한 시스템 인터페이스 성능 검증 및 설계안 최종 확정

(가) 시스템 인터페이스 조정

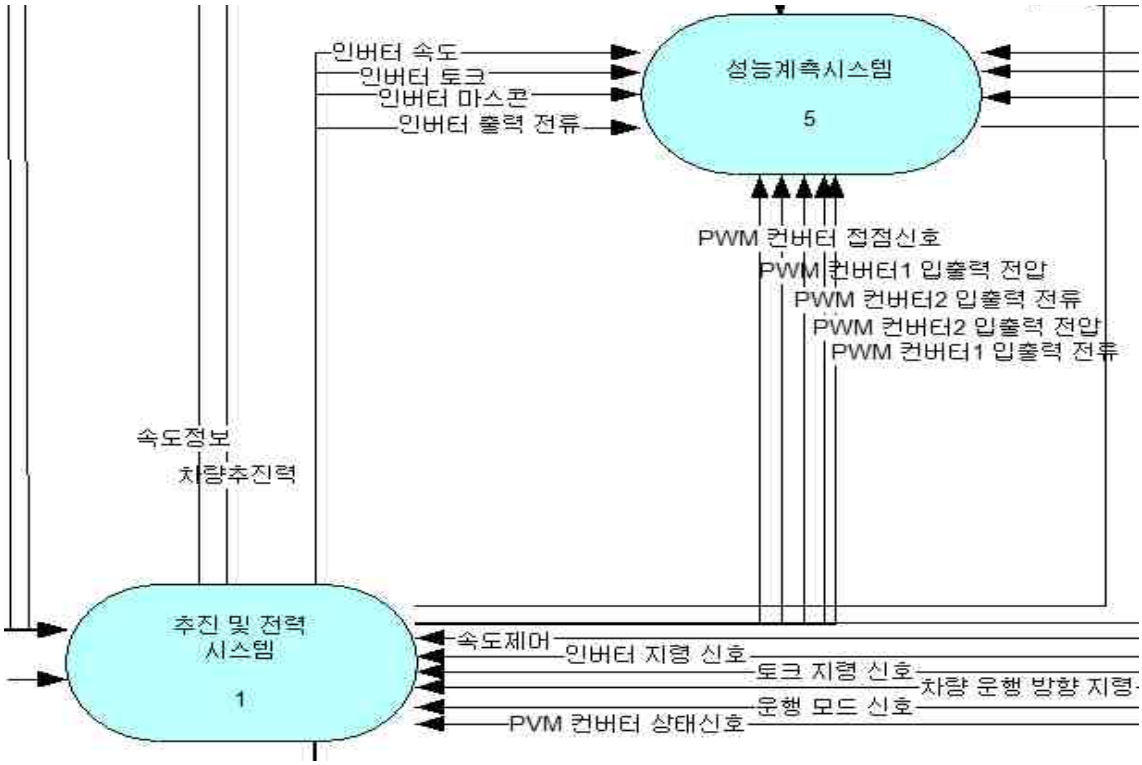
[그림 2.1.32]는 Level 1수준의 물리적 아키텍처(PAD)이며, 초고속 자기부상철도 시스템을 구성하고 있는 서브시스템 요소 및 이들 간의 인터페이스를 표현한 그림이다. 4차년도가 진행(시험선 시험 운행/성능 계측)됨에 따라 구체화된 기술 구현 사항을 식별하여 적용, 인터페이스 조정을 수행하였다. 4차년도의 주요 쟁점사항인 성능 계측 시스템 및 관제 시스템을 기반으로 한 타 서브시스템과의 인터페이스의 구체화된 사항을 반영하였다.



[그림 2.1.32] PAD(4차년도 조정) - Level 1(전체)

위의 그림에서 도식화된 성능계측 시스템 및 관제 시스템을 기반으로 한 타 시스템과의 인터페이스 세부정보(인터페이스 데이터, 송신, 수신)는 다음과 같다.

①추진 및 전력 시스템 → 성능계측 시스템(Level 1 수준)



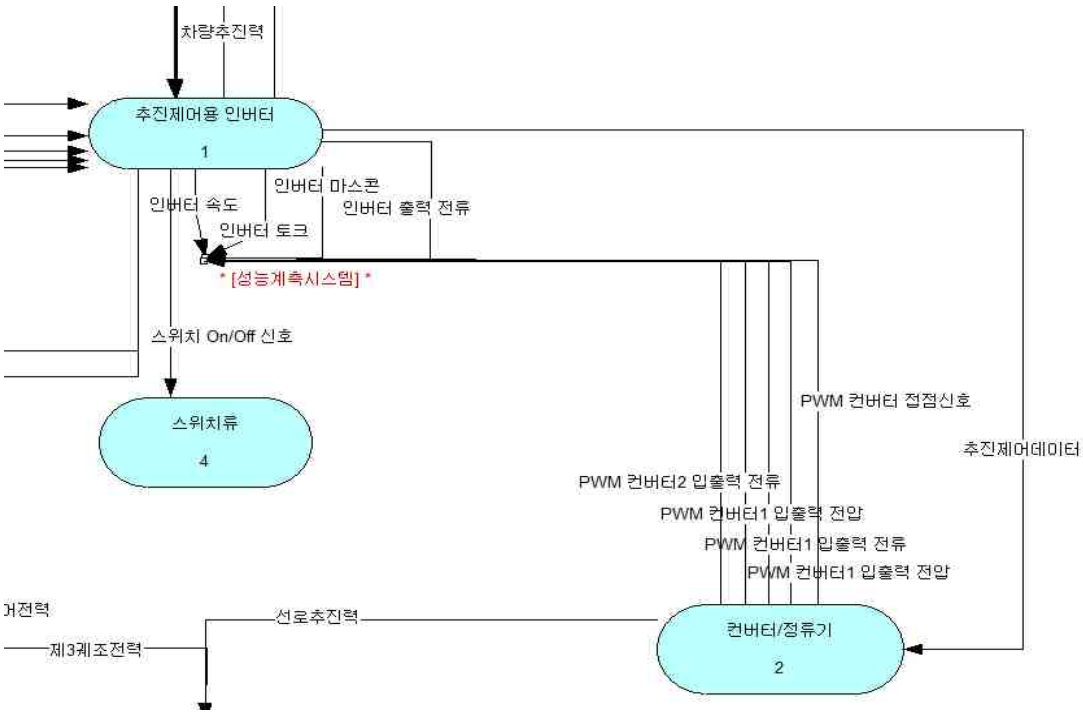
[그림 2.1.33] PAD(4차년도 조정) - Level 1(추진 및 전력→성능계측)

Data - 기본

		인터페이스명	송신		수신	
				명칭		명칭
15		PWM 컨버터 접점신호		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템
				컨버터/정류기		
16		PWM 컨버터1 입출력 전류		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템
				컨버터/정류기		
17		PWM 컨버터1 입출력 전압		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템
				컨버터/정류기		
18		PWM 컨버터2 입출력 전류		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템
				컨버터/정류기		
19		PWM 컨버터2 입출력 전압		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템

[그림 2.1.34] 인터페이스 정보 - Level 1(추진 및 전력→성능계측)

② 추진제어용 인버터/컨버터/정류기 → 성능계측 시스템(Level 2 수준)



[그림 2.1.35] PAD(4차 년도 조정) - Level 2(추진제어용 인버터/컨버터/정류기→성능계측)

Data - 기본

	인터페이스명	송신	수신
		명칭	명칭
125	인버터 마스콘	추진 및 전력 시스템	성능계측시스템
		추진제어용 인버터	
126	인버터 속도	추진 및 전력 시스템	성능계측시스템
		추진제어용 인버터	
127	인버터 출력 전류	추진 및 전력 시스템	성능계측시스템
		추진제어용 인버터	
128	인버터 토크	추진 및 전력 시스템	성능계측시스템
		추진제어용 인버터	

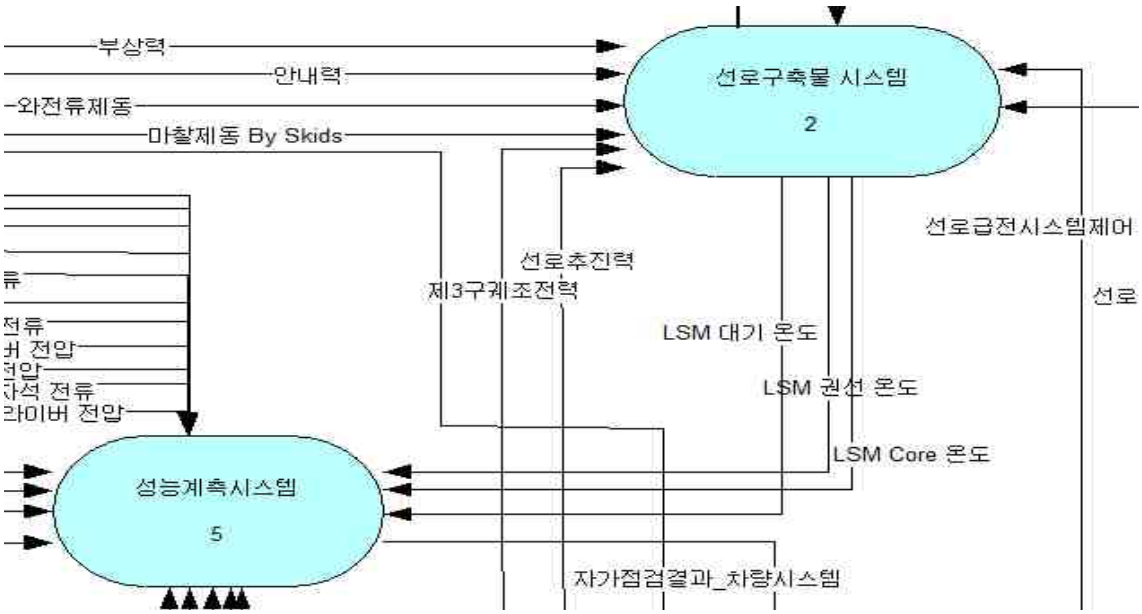
[그림 2.1.36] 인터페이스 정보 - Level 2(추진제어용 인버터→성능계측)

Data - 기본

	인터페이스명	송신		수신	
			명칭		명칭
15	PWM 컨버터 접점신호		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템
			컨버터/정류기		
16	PWM 컨버터1 입출력 전류		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템
			컨버터/정류기		
17	PWM 컨버터1 입출력 전압		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템
			컨버터/정류기		
18	PWM 컨버터2 입출력 전류		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템
			컨버터/정류기		
19	PWM 컨버터2 입출력 전압		추진 및 전력 시스템		성능계측시스템

[그림 2.1.37] 인터페이스 정보 - Level 2(컨버터/정류기→성능계측)

③ 선로구축물 시스템 → 성능계측 시스템(Level 1 수준)



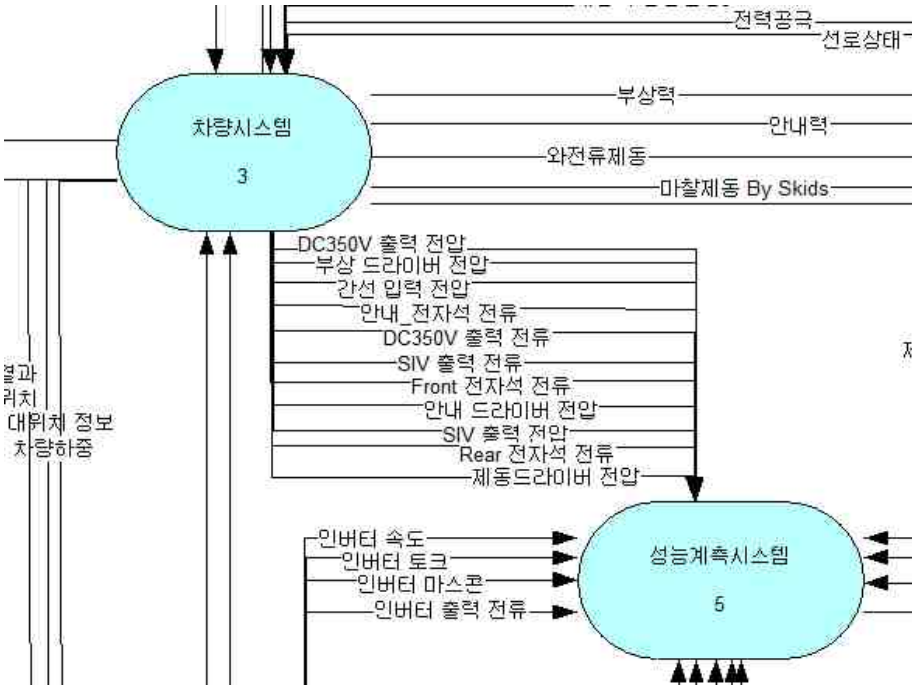
[그림 2.1.38] PAD(4차년도 조정) - Level 1(선로구축물→성능계측)

Data - 기본

	인터페이스명	송신		수신	
			명칭		명칭
10	LSM Core 온도		선로구축물 시스템		성능계측시스템
11	LSM 권선 온도		선로구축물 시스템		성능계측시스템
12	LSM 대기 온도		선로구축물 시스템		성능계측시스템

[그림 2.1.39] 인터페이스 정보 - Level 1(선로구축물→성능계측)

④ 차량 시스템 → 성능계측 시스템(Level.1 수준)



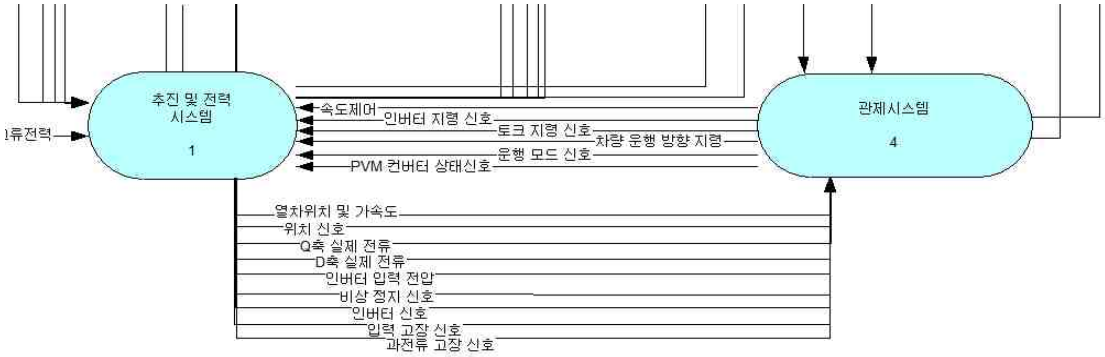
[그림 2.1.40] PAD(4차년도 조정) - Level 1(차량→성능계측)

Data - 기본

	인터페이스명	송신	수신
		명칭	명칭
	이전_		
1	DC350V 출력 전류	차량시스템	성능계측시스템
2	DC350V 출력 전압	차량시스템	성능계측시스템
3	Front 전자석 전류	차량시스템	성능계측시스템
4	Rear 전자석 전류	차량시스템	성능계측시스템
5	SIV 출력 전류	차량시스템	성능계측시스템
6	SIV 출력 전압	차량시스템	성능계측시스템
7	간선 입력 전압	차량시스템	성능계측시스템
8	부상 드라이버 전압	차량시스템	성능계측시스템
9	안내 드라이버 전압	차량시스템	성능계측시스템
10	안내_전자석 전류	차량시스템	성능계측시스템
11	제동드라이버 전압	차량시스템	성능계측시스템

[그림 2.1.41] 인터페이스 정보 - Level 1(차량→성능계측)

⑤ 추진 및 전력 시스템 ↔ 관제 시스템(Level.1 수준)



[그림 2.1.42] PAD(4차년도 조정) - Level 1(추진 및 전력→관제)

Data - 기본

	인터페이스명	송신	수신
		명칭	명칭
	이전_		
1	D축 실제 전류	추진 및 전력 시스템	관제시스템
2	Q축 실제 전류	추진 및 전력 시스템	관제시스템
3	과전류 고장 신호	추진 및 전력 시스템	관제시스템
4	비상 정지 신호	추진 및 전력 시스템	관제시스템
5	열차위치 및 가속도	추진 및 전력 시스템	관제시스템
6	위치 신호	추진 및 전력 시스템	관제시스템
7	인버터 신호	추진 및 전력 시스템	관제시스템
8	인버터 입력 전압	추진 및 전력 시스템	관제시스템
9	입력 고장 신호	추진 및 전력 시스템	관제시스템

[그림 2.1.43] 인터페이스 정보 - Level 1(추진 및 전력→관제)

Data - 기본

	인터페이스명	송신	수신
		명칭	명칭
	이전_		
1	Manual/Auto 운행 모드 신호	관제시스템	추진 및 전력 시스템
2	PWM 컨버터 상태신호	관제시스템	추진 및 전력 시스템
3	속도제어	관제시스템	추진 및 전력 시스템
4	인버터 지령 신호	관제시스템	추진 및 전력 시스템
5	차량 운행 방향 지령	관제시스템	추진 및 전력 시스템
6	토크 지령 신호	관제시스템	추진 및 전력 시스템

[그림 2.1.44] 인터페이스 정보 - Level 1(추진 및 전력→관제)

아. 시스템 성능 시험 및 평가(4차년도)

(1) 시운전 시험 실시 및 성능 평가 환경 구축

종합 시운전 시험은 단거리 시험선 내 운행을 통해 단위 구성품이 조합된 상태에서 시스템 요구사항 및 설계사양에서 제시된 성능을 발휘하는지의 여부를 평가하기 위한 시험이며, 추진제어, 추진전력, 부상제어, 차량/전장품, 신호/통신, 가이드웨이, 종합(차량 및 환경) 분야로 나뉜다.

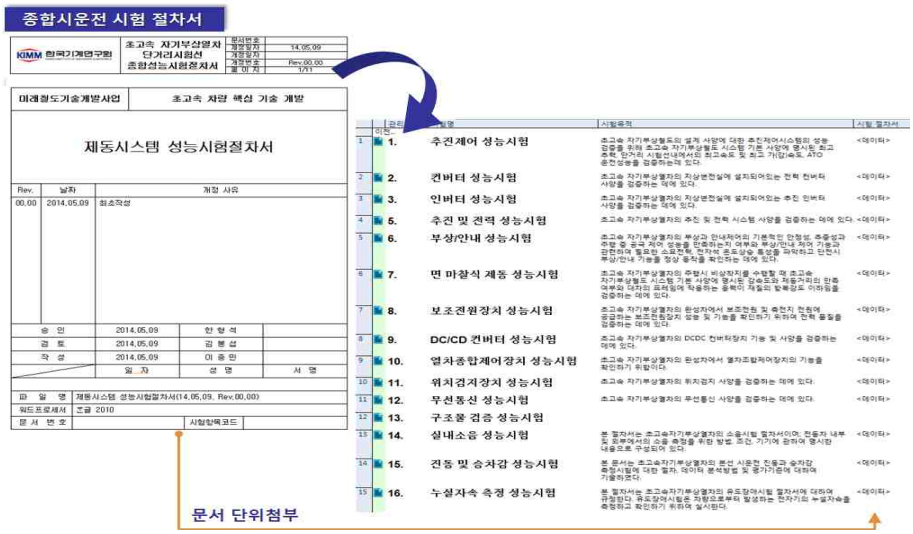
분야별 시험 및 세부과제별 담당기관은 [표 2.1.8]와 같다.

[표 2.1.8] 종합시운전 시험 구분

분야	성능시험절차서	담당기관
추진제어	추진제어	철도연
추진전력	컨버터	우진산전(1세부)
	인버터	우진산전(1세부)
	에너지 세이버	우진산전(1세부)
	추진 및 전력	우진산전(1세부)
부상제어	부상/안내	기계연
차량/전장품	면 마찰식 제동	기계연
	보조전원장치	우진산전(2세부)
	DC/DC 컨버터	우진산전(2세부)
	열차종합제어장치	우진산전(2세부)
신호/통신	위치검지	우진산전(1세부)
	무선통신	우진산전(1세부)
가이드웨이	구조물 검증	철도시설공단
종합(차량 및 환경)	실내소음	기계연
	진동 및 승차감	기계연
	누설자속 측정	기계연

(가) 종합 시운전 시험 DB화

[그림 2.1.58]과 같이 총 16개 분야에 대한 종합 시운전 성능시험 절차서를 데이터베이스화하였다. 분야별 시험에 대한 세부항목은 첨부된 파일을 통해 조회 가능하다.



[그림 2.1.45] 종합시운전 시험별 절차서 첨부 조회 화면

(나) 시험항목 및 결과

[그림 2.1.59]는 성능시험별 세부 시험항목 조회 화면이다. 성능시험과 세부 시험항목 간 추적표를 통해 실제 요구사항 및 설계사양 검증의 기준이 되는 시험항목별 판정기준을 식별 및 관리한다.

분야별 담당기관에 의해 진행되는 시험에 대한 항목별 결과 데이터는 그림 8과 같이 조회한다. 절차서에 제시된 판정기준의 모든 세부 항목을 만족하였을 경우, '적합'으로 체크한다.



[그림 2.1.46] 종합시운전 시험항목별 결과 조회 화면

(다) 요구사항 추적성

[그림 2.1.60]과 같은 요구사항 추적표(Bottom up 방향)를 구성하여 종합 시운전 시험을 통해 검증되는 요구사항 및 설계사양을 종합적으로 검토하여 활용한다.



[그림 2.1.47] 종합시운전 시험과 요구사항/설계사양 간 추적성 조회 화면

5. 기술개발 결과 및 검증

가. 시스템 엔지니어링 데이터베이스 구축 결과 및 검증 개요

초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업의 시스템 엔지니어링 데이터베이스는 영국 3SL사의 시스템 엔지니어링 전산지원도구인 Cradle을 이용하여 구축되었다. 시스템 엔지니어링 데이터베이스가 원활히 활용되기 위해서는 사업 전반에 걸친 업무 분석이 선행되어야 하고, 사업이 진행됨에 따라 지속적으로 보완되어야 한다.

초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업의 시스템 엔지니어링 데이터베이스는 1차 년도에 초기 구축되어 요구사항 정의 - 설계 및 구현 - 검증 단계를 거쳐 오며, 지속적인 보완과 검토를 통해 4차 년도에 확정된 형태의 데이터베이스가 구축 완료되었다.

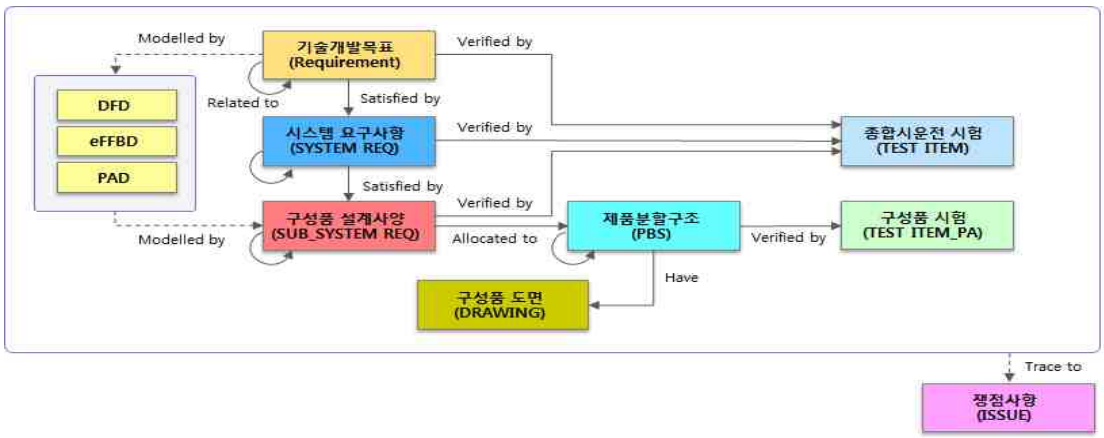
사업 초반에 설계된 데이터베이스 개념을 바탕으로 연구개발 프로세스에 따라 연차별로 진행된 시스템엔지니어링 데이터베이스 구축에 따른 검증 내용은 다음과 같다.

나. 초기 데이터베이스 설계

(1) 데이터베이스 스키마 구성

본 시스템 엔지니어링 데이터베이스의 핵심은 시스템 최상위 요구사항으로부터 최종 시험평가에 이르는 총체적인 추적관리체계의 확립이다. 시스템 엔지니어링 수행환경의 모든 업무는 사용자 요구사항(User Requirements)을 정의하는 것으로부터 시작된다. 사용자 요구사항에 기반 하여 개발자 관점에서 시스템 수준의 요구사항을 정리한 시스템 요구사항을 정의하고, 설계가 진행됨에 따라 하부 수준의 구성품 설계사양으로 전개된다. 최하위 설계사양을 통해 구현된 구성품은 해당 수준의 단위 시험을 통해 검증되고, 상위 수준으로 통합되어 검증을 지속해 나간다. 이와 같은 요구사항 정의, 설계, 검증 프로세스 시 발생되는 쟁점사항들은 해당 데이터와 추적 관리된다.

초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업의 성능 시험 구조 및 산출물에 따라 보완된 시스템 데이터베이스 스키마는 [그림 2.1.61]과 같다.



[그림 2.1.48] 시스템 데이터베이스 스키마

(2) 아이템 타입(Item Type)[1] 정의

정의된 데이터베이스 스키마를 기반으로 아이템 타입을 정의하였으며, 해당 아이템

1) Cradle® 데이터베이스에서 관리될 데이터의 특성을 반영하여 정의된 개체를 말함.

타입을 통해 관리되는 대상은 [표 2.1.9]과 같다.

[표 2.1.9] 아이템 타입(Item Type) 세부내용

명칭	설명
Requirement	기술개발목표를 관리하기 위한 아이템 타입
SYSTEM REQ	시스템 수준의 요구사항을 관리하기 위한 아이템 타입
SUB_SYSTEM REQ	구성품 수준의 설계사양을 관리하기 위한 아이템 타입
PBS	제품분할구조를 관리하기 위한 아이템 타입
TEST ITEM_PA	구성품 시험을 관리하기 위한 아이템 타입
TEST ITEM	종합 시운전 시험을 관리하기 위한 아이템 타입
DRAWING	구성품 도면을 관리하기 위한 아이템 타입
ISSUE	쟁점사항을 관리하기 위한 아이템 타입
REFERENCE	연차별 실적문서를 관리하기 위한 아이템 타입

(3) 연결관계(Cross Reference) 정의

시스템 엔지니어링 데이터베이스 스키마 개념도를 기반으로 아이템 타입 간 연결관계를 정의한 세부내용은 [표 2.1.10]과 같다.

[표 2.1.10] 아이템 타입 간 연결관계 세부내용

출발	관계	도착	의미
Requirement	Related to	Requirement	기술개발목표 문서의 상하위 계층구조를 표현함
Requirement	Satisfied by	SYSTEM REQ	기술개발목표는 시스템 요구사항에 의해 만족됨
Requirement	Verified by	TEST ITEM	기술개발목표는 시운전 시험에 의해 검증됨
SYSTEM REQ	Related to	SYSTEM REQ	시스템 요구사항 문서의 상하위 계층구조를 표현함
SYSTEM REQ	Satisfied by	SUB_SYSTEM REQ	시스템 요구사항은 구성품 설계사양에 의해 만족됨
SYSTEM REQ	Verified by	TEST ITEM	시스템 요구사항은 시운전 시험에 의해 검증됨
SUB_SYSTEM REQ	Allocated to	PBS	구성품 설계사양은 PBS에 할당됨
SUB_SYSTEM REQ	Verified by	TEST ITEM	구성품 설계사양은 시운전 시험에 의해 검증됨
PBS	Related to	PBS	PBS의 구성요소 간 상하위 계층구조를 표현함
PBS	Have	DRAWING	PBS의 구성요소는 해당 설계도면을 가짐
PBS	Verified by	TEST ITEM_PA	PBS의 구성요소는 구성품 시험에 의해 검증됨
All Item Type	Trace to	ISSUE	데이터베이스 내의 모든 아이템 타입은 쟁점사항과 추적관계를 가짐

(4) 아이템 타입별 속성(Attribute) 정의

아이템 타입으로 관리하는 대상의 특성에 따라 아이템 타입별 속성을 정의 및 할당하며, 아이템 타입에 상관없이 동일하게 적용되는 공통 속성(Key, Name, Group 등)과 사용자 정의 속성(Category[2], Frame[3])으로 나뉜다. 세부 내용은 [표 2.1.11]와 같다.

2) 사용자가 미리 값을 지정하여 선택하거나, 날짜 형식의 데이터를 입력하는 용도로 사용하기 위한 사용자 정의 속성
3) 텍스트 형식의 내용 입력 및 다양한 형식(Word, PDF, HWP 등)의 파일을 첨부하는 용도로 사용하기 위한 사용자 정의 속성

[표 2.1.11] 아이템 타입별 속성 세부내용

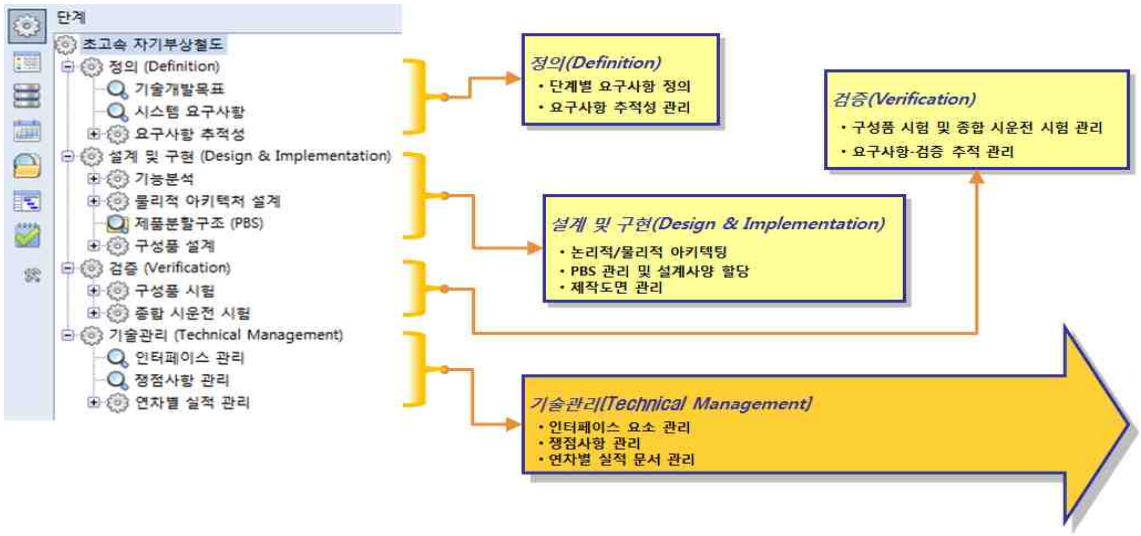
아이템 타입 (Item type)	사용자 정의 속성		설명
	명칭	구분	
Requirement	Key	Pre-defined	기술개발목표 요구사항의 관리번호
	Name	Pre-defined	기술개발목표 요구사항의 명칭
	TEXT	Frame	기술개발목표 요구사항의 내용
	REQ_chk	Category	관리대상이 되는 요구사항만 별도로 식별하기 위한 속성
SYSTEM REQ	Key	Pre-defined	시스템 요구사항의 관리번호
	Name	Pre-defined	시스템 요구사항의 명칭
	TEXT	Frame	시스템 요구사항의 내용
	REQ_chk	Category	관리대상이 되는 요구사항만 별도로 식별하기 위한 속성
SUB_SYSTEM REQ	Key	Pre-defined	구성품 설계사양의 관리번호
	Name	Pre-defined	구성품 설계사양의 명칭
	TEXT	Frame	구성품 설계사양의 내용
	REQ_chk	Category	관리대상이 되는 요구사항만 별도로 식별하기 위한 속성
PBS	Key	Pre-defined	PBS의 관리번호
	Name	Pre-defined	PBS의 명칭
	TEXT	Frame	PBS별 세부내용
	PBS Level	Category	PBS 구성 레벨(Systme, Subsystem, Component)
	PDF	Frame	구성품 도면을 첨부하기 위한 속성(PDF)
	HWP	Frame	관련 매뉴얼을 첨부하기 위한 속성(HWP)
TEST ITEM_PA	Key	Pre-defined	구성품 시험의 관리번호
	Name	Pre-defined	구성품 시험의 명칭
	TEST START DATE	Category	구성품 시험의 시험 시작일
	TEST END DATE	Category	구성품 시험의 시험 종료일
	PDF	Frame	구성품 시험 성적서를 첨부하기 위한 속성(PDF)
	HWP	Frame	구성품 시험의 시험기록서를 첨부하기 위한 속성(HWP)

TEST ITEM	Key	Pre-defined	종합 시운전 시험/시험항목의 관리번호
	Name	Pre-defined	종합 시운전 시험/시험항목의 명칭
	TEXT	Frame	종합 시운전 시험항목별 판정기준
	시험목적	Frame	종합 시운전 시험별 시험목적
	시험절차서	Frame	종합 시운전 시험의 절차서를 첨부하기 위한 속성(HWP)
	시험결과서	Frame	종합 시운전 시험의 결과서를 첨부하기 위한 속성(HWP)
DRAWING	Key	Pre-defined	구성품 도면의 도면번호
	Name	Pre-defined	구성품 명칭
	PDF	Frame	구성품 도면을 첨부하기 위한 속성(PDF)
ISSUE	Key	Pre-defined	쟁점사항의 관리번호
	Name	Pre-defined	쟁점사항의 명칭
	TEXT	Frame	쟁점사항의 세부내용
	OUTPUT	Frame	쟁점사항과 관련된 산출물
	관련기관	Frame	쟁점사항과 관련된 기관
	담당자	Frame	쟁점사항의 담당자
	분류	Category	쟁점사항의 분류(요청/제공)
	FORMAT	Category	쟁점사항 요청/제공 형식(3D 파일,한글문서/한글문서/한글문서,CAD)
	END DATE	Category	쟁점사항의 처리 완료일
REFERENCE	Name	Pre-defined	연차별 실적 문서의 명칭
	PDF	Frame	연차별 실적 문서를 첨부하기 위한 속성(PDF)
	연차구분	Category	연차 구분을 위한 속성(1차년도, 2차년도, 3차년도, 4차년도)

(5) 마스터 트리(Master Tree)[4] 구성

시스템 엔지니어링 데이터베이스의 마스터 트리(Master Tree)는 초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업의 업무 진척에 따라 단계적으로 수행하는 업무의 흐름을 반영하여 구성되며, 그림 [그림 2.1.62]와 같다.

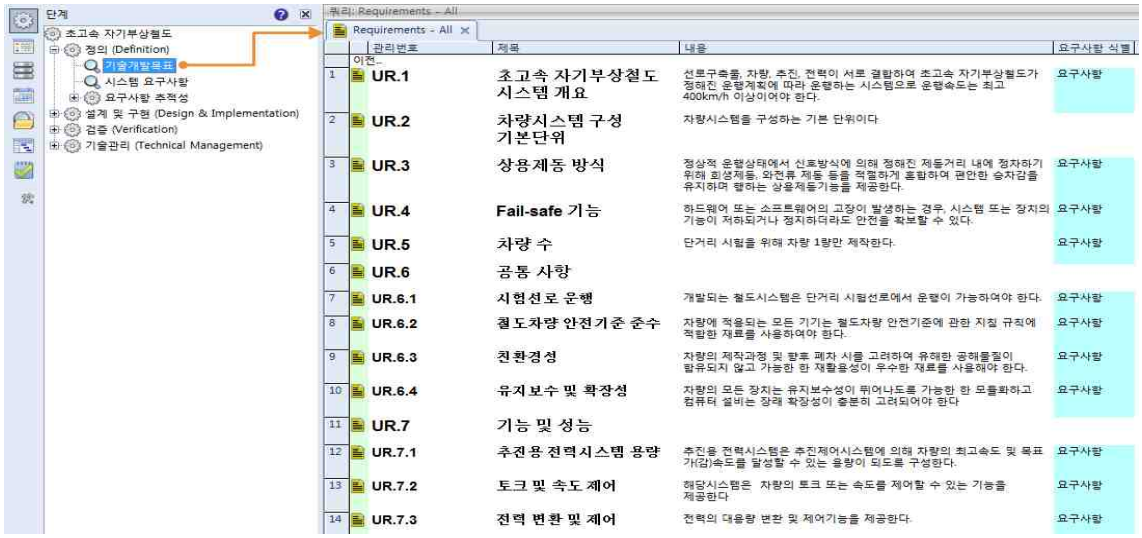
4) Cradle®을 통해 최상위 프로세스 및 하위 업무를 구성하기 위한 계층구조 형태의 업무 트리를 말함.



[그림 2.1.49] 시스템 데이터베이스 마스터 트리 구성 및 설명

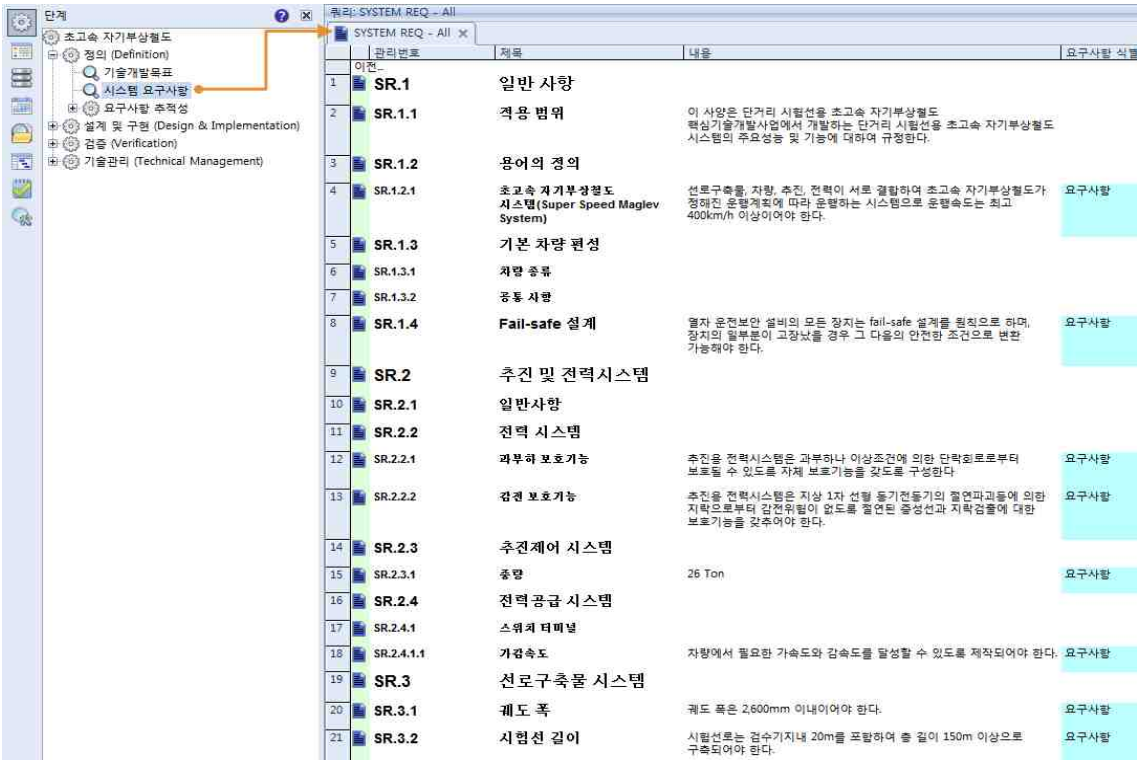
다. 요구사항 관리 환경 구축 결과 검증(1차년도)

(1) 최상위 기술개발목표 입력 결과



[그림 2.1.50] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 기술개발목표

(2) 시스템 요구사항 입력 결과



단계
- 초고속 자기부상철도
  - 정의 (Definition)
    - 기술개발목표
    - 시스템 요구사항
    - 요구사항 추적성
  - 설계 및 구현 (Design & Implementation)
  - 검증 (Verification)
  - 기술관리 (Technical Management)

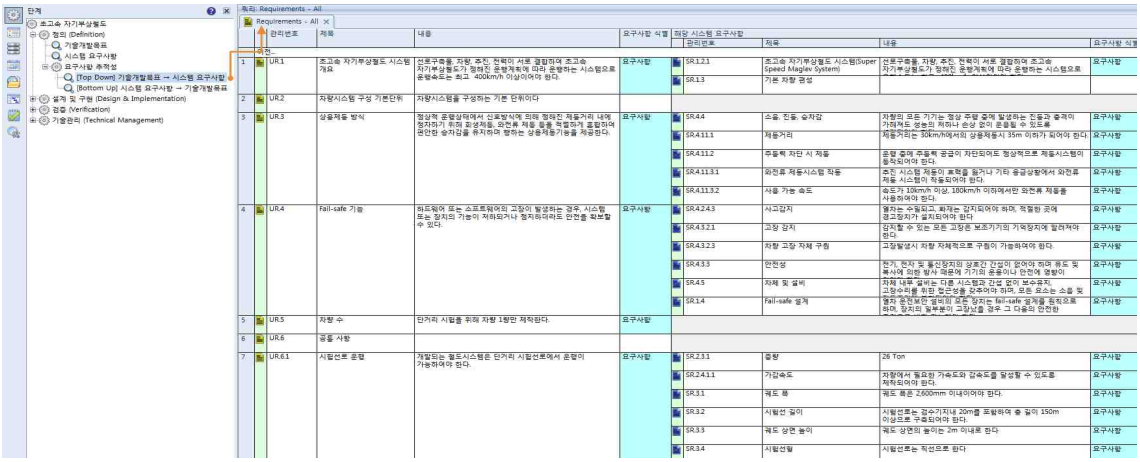
쿼리: SYSTEM REQ - All

SYSTEM REQ - All

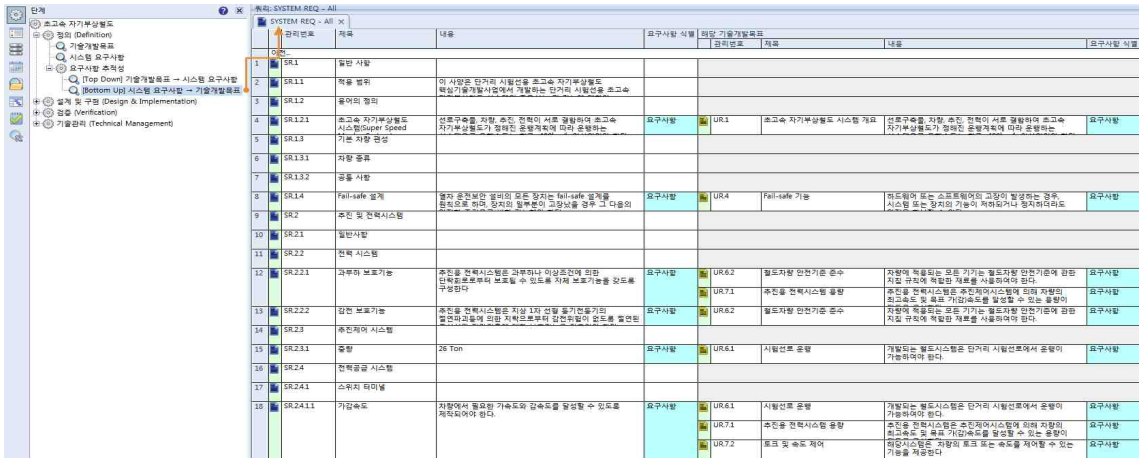
	관리번호	제목	내용	요구사항 식별
	이전...			
1	SR.1	일반 사항		
2	SR.1.1	적용 범위	이 사양은 단거리 시험선을 초고속 자기부상철도 핵심기술개발사업에서 개발하는 단거리 시험선용 초고속 자기부상철도 시스템의 주요성능 및 기능에 대하여 규정한다.	
3	SR.1.2	용어의 정의		
4	SR.1.2.1	초고속 자기부상철도 시스템(Super Speed Maglev System)	선로구축물, 차량, 추진, 전력이 서로 결합하여 초고속 자기부상철도가 정해진 운행계획에 따라 운행하는 시스템으로 운행속도는 최고 400km/h 이상이어야 한다.	요구사항
5	SR.1.3	기본 차량 편성		
6	SR.1.3.1	차량 종류		
7	SR.1.3.2	공통 사항		
8	SR.1.4	Fail-safe 설계	열차 운전보안 설비의 모든 장치는 fail-safe 설계를 원칙으로 하며, 장치의 일부분이 고장났을 경우 그 다음의 안전한 조건으로 변환 가능해야 한다.	요구사항
9	SR.2	추진 및 전력시스템		
10	SR.2.1	일반사항		
11	SR.2.2	전력 시스템		
12	SR.2.2.1	과부하 보호기능	추진용 전력시스템은 과부하나 이상조건에 의한 단락회로로부터 보호될 수 있도록 자체 보호기능을 갖도록 구성한다.	요구사항
13	SR.2.2.2	감전 보호기능	추진용 전력시스템은 지상 1차 선형 동기전동기의 절연파괴등에 의한 지락으로부터 감전위험이 없도록 절연된 중성선과 지락검출에 대한 보호기능을 갖추어야 한다.	요구사항
14	SR.2.3	추진제어 시스템		
15	SR.2.3.1	중량	26 Ton	요구사항
16	SR.2.4	전력공급 시스템		
17	SR.2.4.1	스위치 터미널		
18	SR.2.4.1.1	가감속도	차량에서 필요한 가속도와 감속도를 달성할 수 있도록 제작되어야 한다.	요구사항
19	SR.3	선로구축물 시스템		
20	SR.3.1	궤도 폭	궤도 폭은 2,600mm 이내이어야 한다.	요구사항
21	SR.3.2	시험선 길이	시험선로는 검수기지내 20m를 포함하여 총 길이 150m 이상으로 구축되어야 한다.	요구사항

[그림 2.1.51] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 시스템 요구사항

(3) 요구사항 추적(기술개발목표 - 시스템 요구사항) 결과



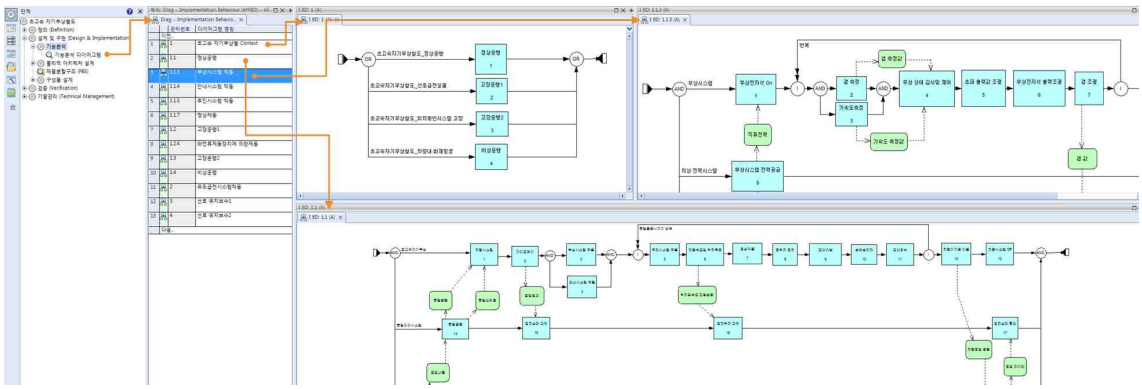
[그림 2.1.52] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Top Down)



[그림 2.1.53] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Bottom Up)

라. 물리/기능 아키텍처 정의 결과 및 검증

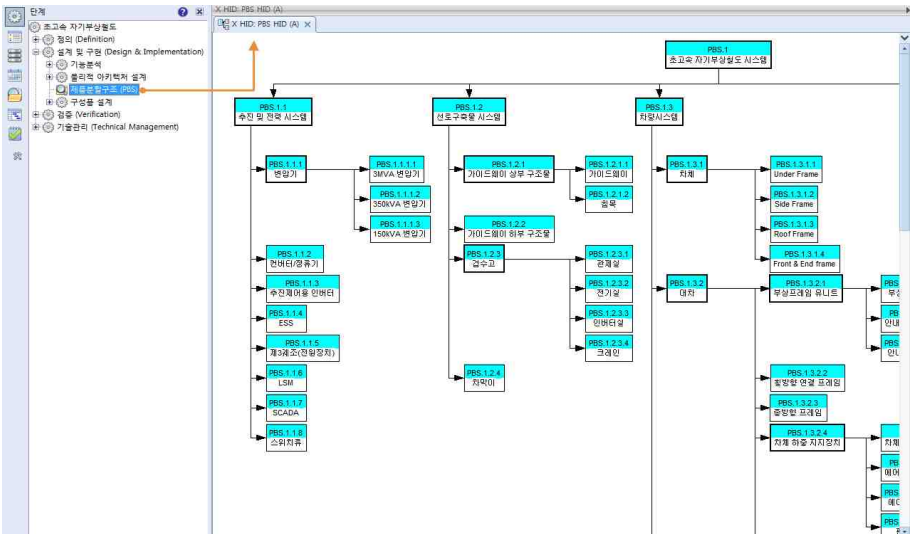
(1) 기능분석 수행 결과



[그림 2.1.54] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 기능분석

마. 구성품 요구사항 추적관리 환경 구축

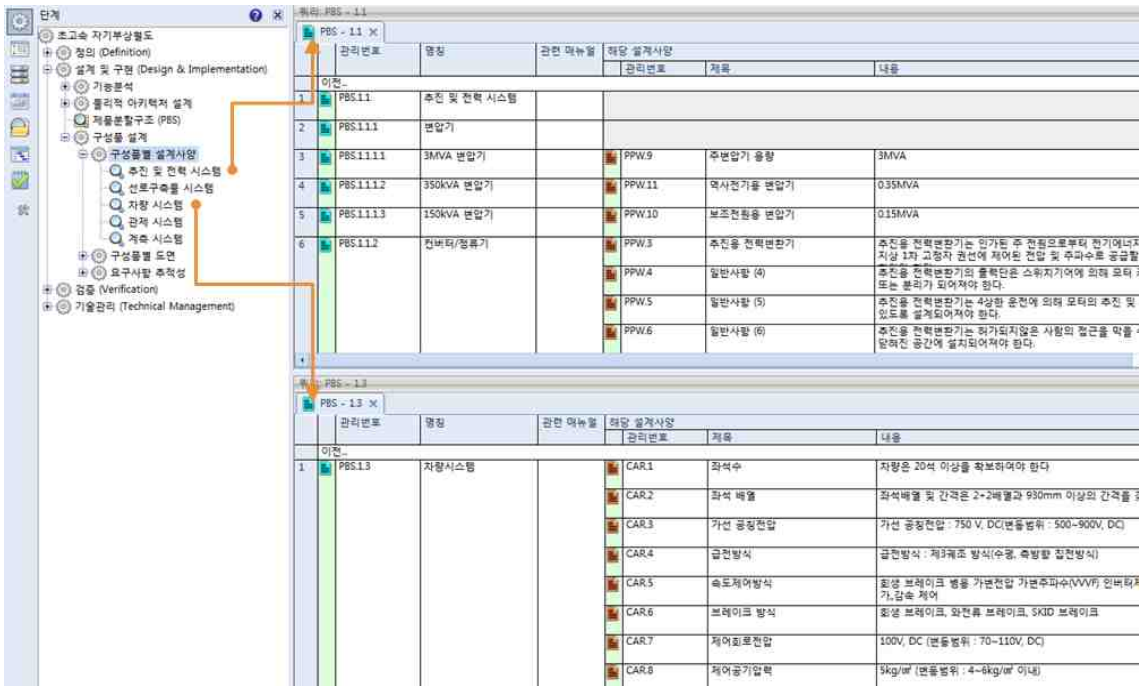
(1) 제품분할구조(PBS) 반영 결과



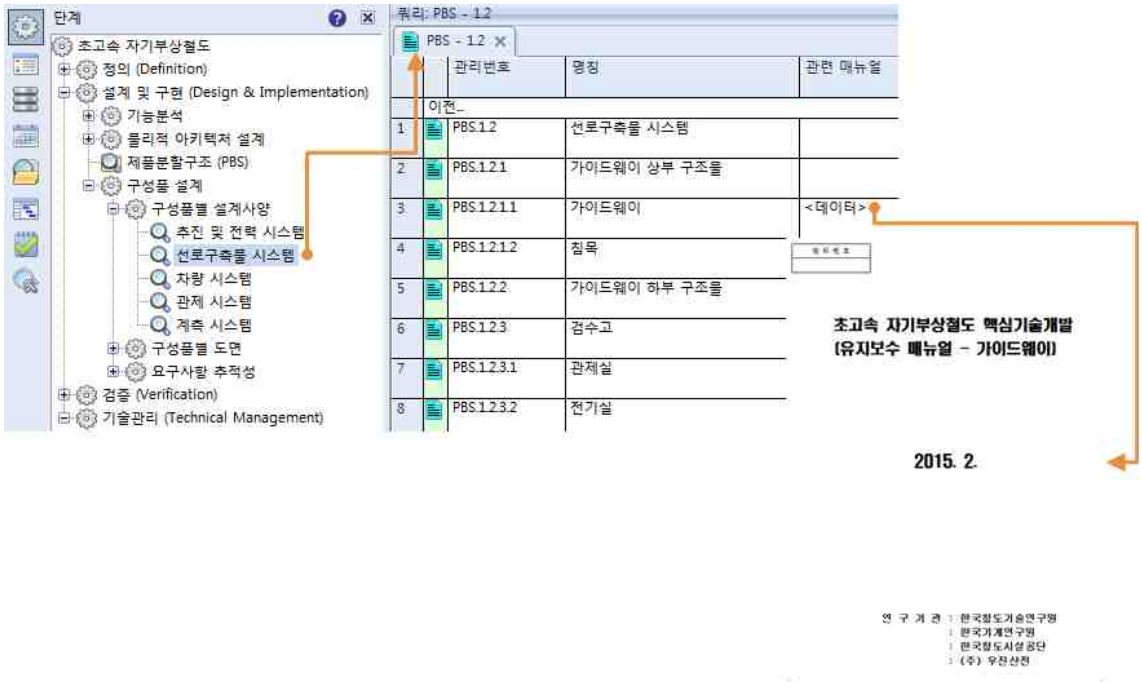
[그림 2.1.55] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 제품분할구조(PBS)

(2) 구성품 설계사양

(가) 구성품 설계사양 반영 결과

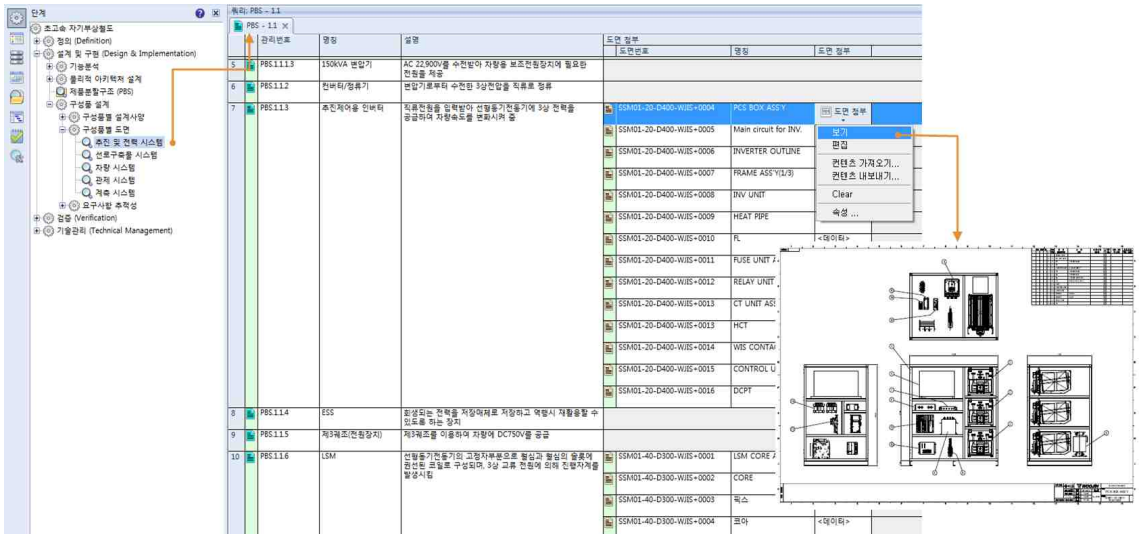


[그림 2.1.56] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 구성품 설계사양
(추진 및 전력/차량 시스템)



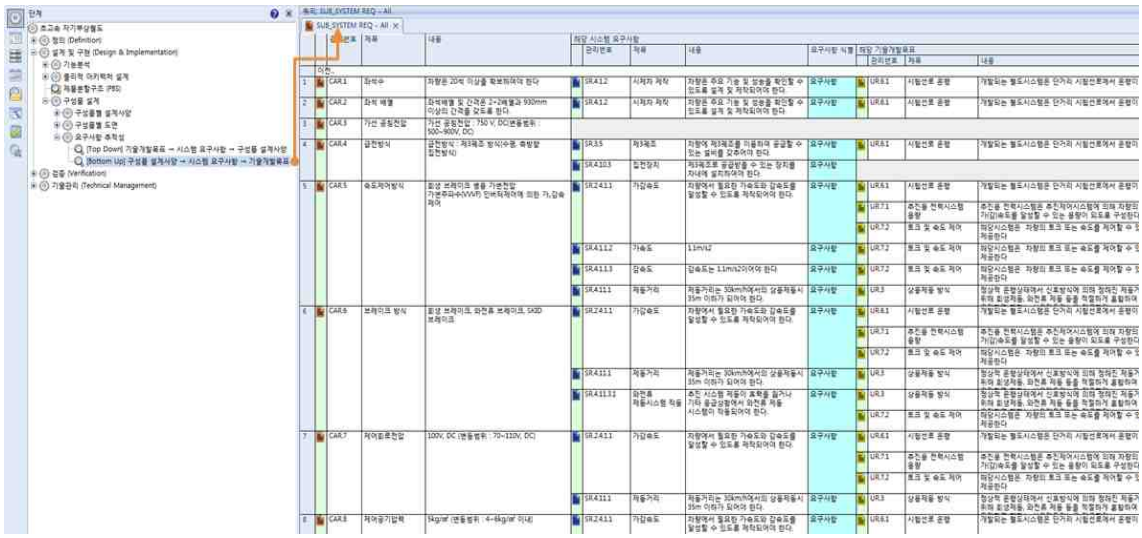
[그림 2.1.57] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 구성품 설계사양(선로구축물 시스템)

(나) 구성품별 도면 반영 결과

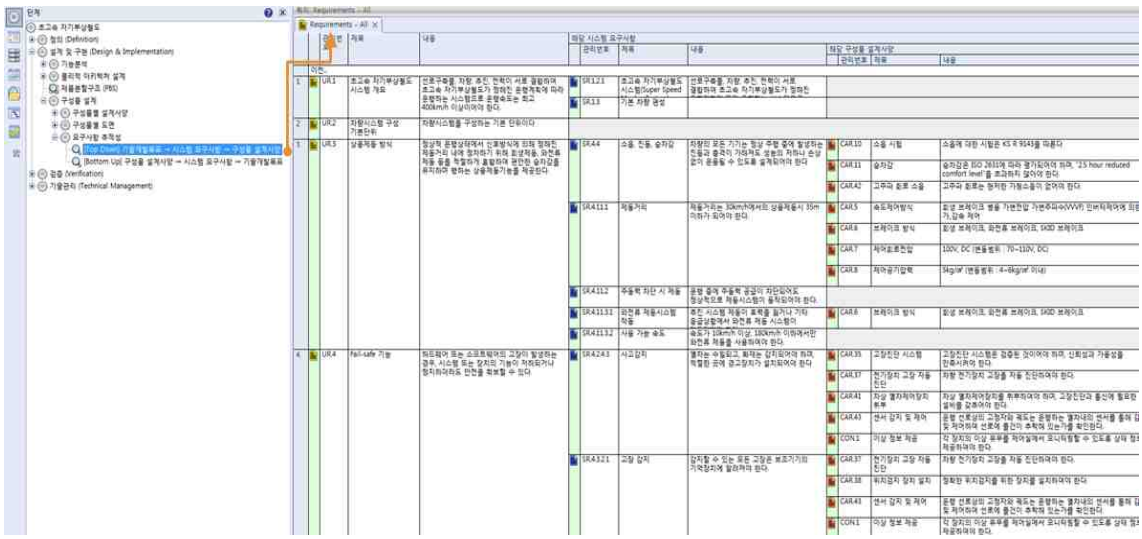


[그림 2.1.58] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 구성품별 도면(추진 및 전력 시스템)

(다) 요구사항 추적(요구사항 - 구성품 설계사양) 결과



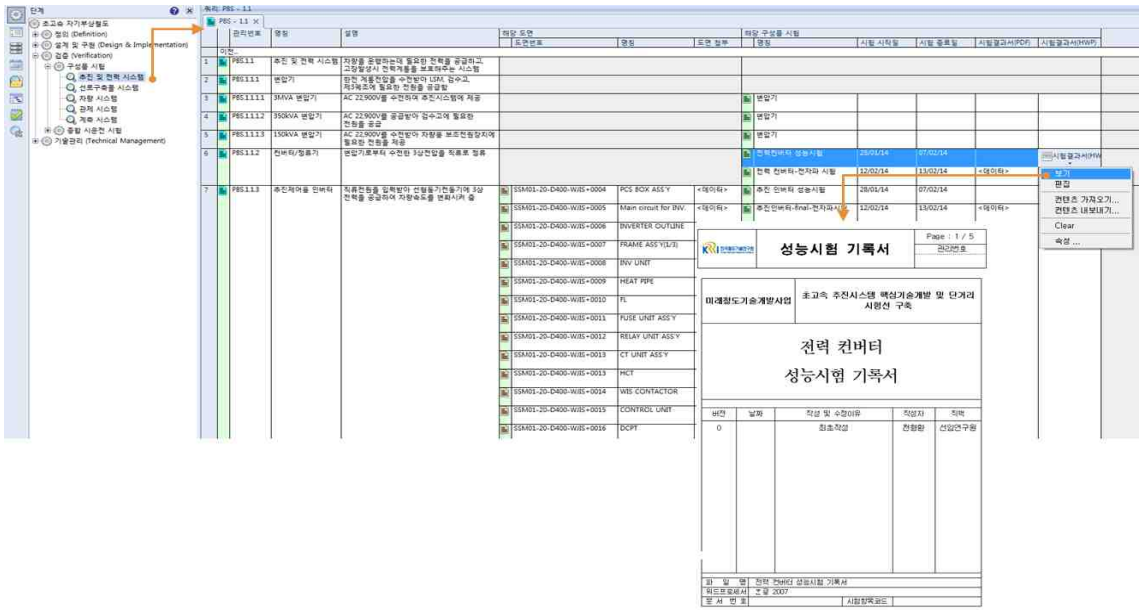
[그림 2.1.59] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Bottom Up)



[그림 2.1.60] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Top Down)

바. 시험평가 추적 관리 환경 구축(3차 년도)

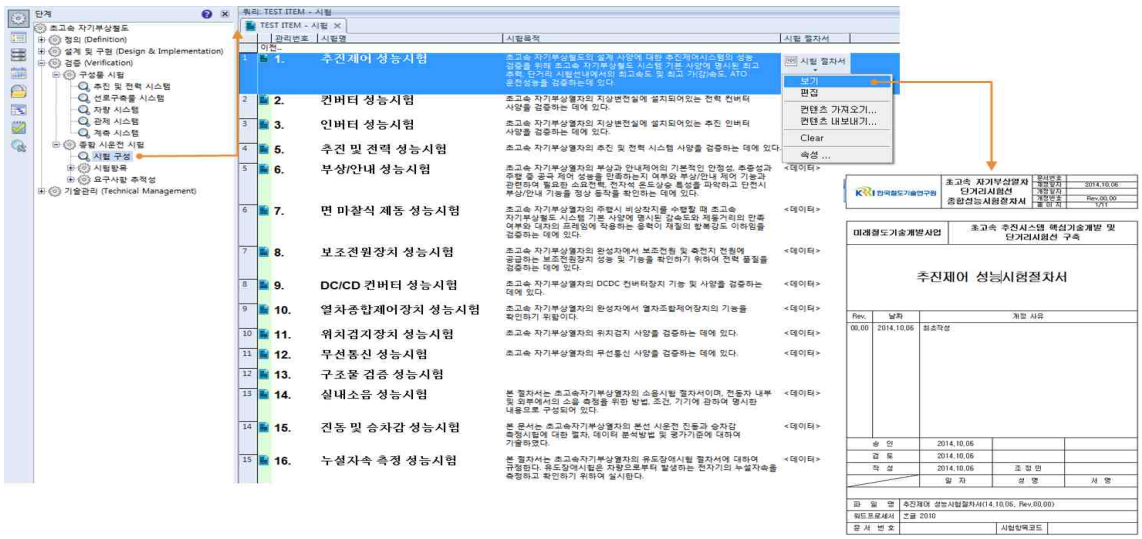
(1) 구성품 시험 반영 결과



[그림 2.1.61] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 구성품 시험(추진 및 전력 시스템)

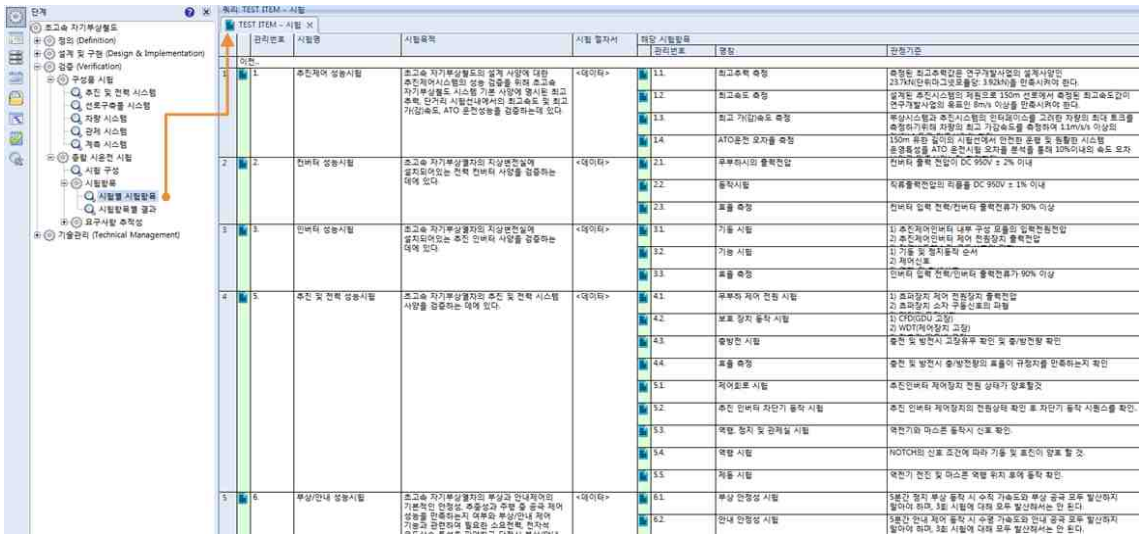
사. 시스템 성능 시험 및 평가(4차 년도)

(1) 시험 구성



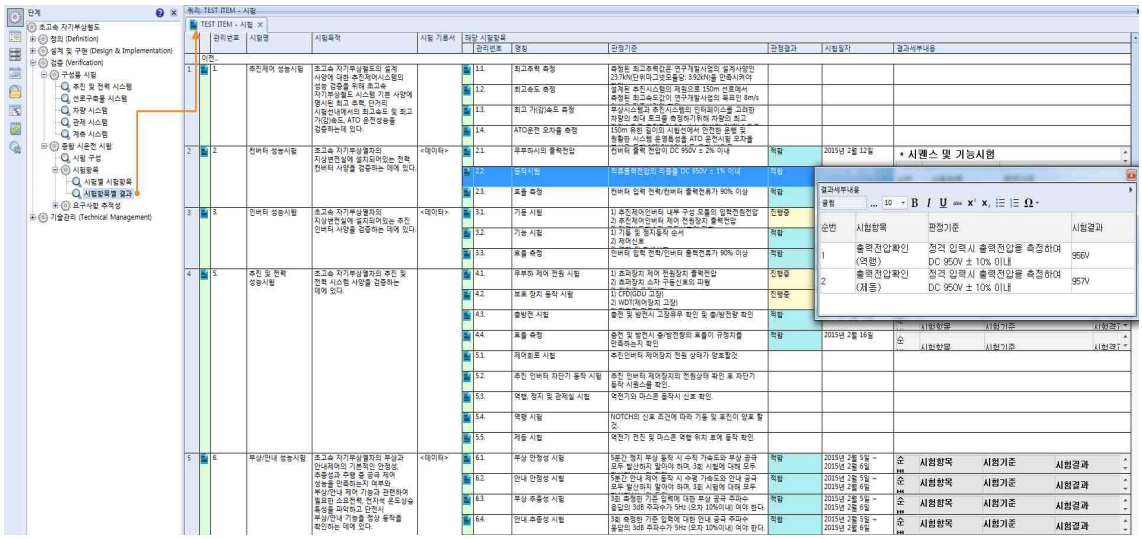
[그림 2.1.62] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 종합 시운전 시험 구성

(2) 시험별 시험항목



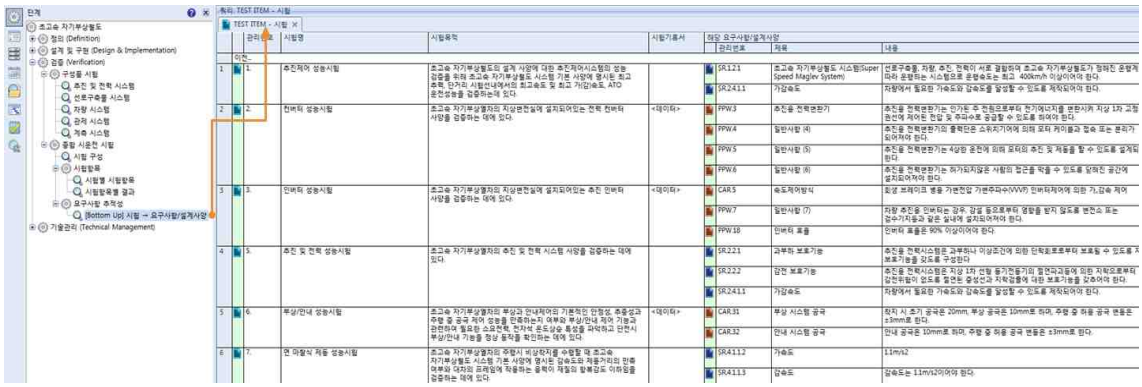
[그림 2.1.63] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 종합 시운전 시험별 시험항목

(3) 시험항목별 결과



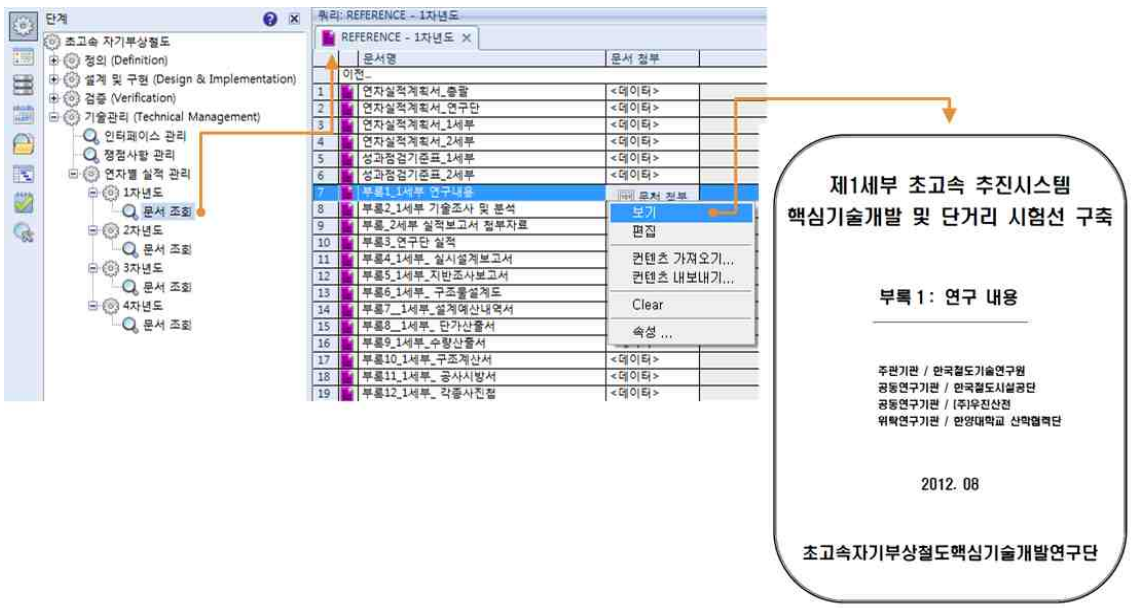
[그림 2.1.64] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 종합 시운전 시험항목별 결과

(4) 요구사항 추적 관리 결과



[그림 2.1.65] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Bottom Up)

아. 연차별 실적 관리



[그림 2.1.66] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 연차별 실적 문서

제2절 종합계측시스템 기술개발

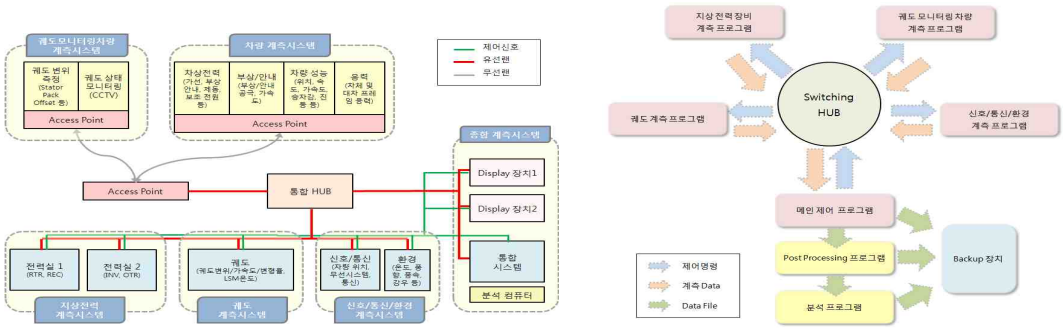
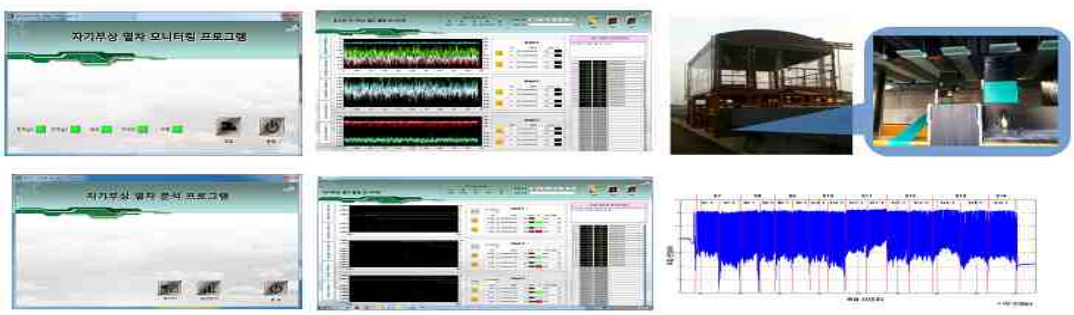
1. 개요

본 과제를 통해 개발된 초고속 자기부상철도 시스템의 주요 성능을 실시간으로 모니터링하고 분석하기 위하여 종합계측시스템의 구축이 필요하다. 초고속 자기부상철도의 주요 시스템은 크게 차량, 궤도 및 지상전력 공급장치로 나눌 수 있으며, 종합계측시스템을 통해 운행 중 각 시스템이 정상적으로 동작하는지, 그리고 운행 중 오류가 발생하였을 때 어떤 부분에서 발생하여 어떠한 영향을 미쳤는지 등의 분석을 할 수 있게 된다. 특히 초고속 자기부상열차의 경우 지상전력장치로부터 추진전력을 공급 받은 궤도 LSM을 통해 차량이 운행하기 때문에 차량, 궤도 및 지상전력장치간의 종합적인 성능 분석이 중요하다.

2. 목표

앞 절에서 설명한 초고속 자기부상철도 종합계측시스템을 구축하기 위해서는 다음과 같은 일련의 작업이 수행되어야 하며 이는 연차별 기술개발의 목표가 된다. 먼저, 초고속 자기부상철도를 기능별로 주요시스템으로 나누고 시스템의 주요 성능을 나타내는 항목을 선별하여 계측하고자 하는 항목을 정해야 한다. 그리고 각 계측항목 별로 어떻게 측정하여야 하는지, 센서가 필요하다면 어떤 센서를 사용해야 하는지, 측정값의 범위는 어떻게 되고, 신호를 어떻게 받아서 처리해야 하는지 등의 세부적인 계획이 필요하다. 이러한 계획이 수립되면 계측시스템 하드웨어 및 소프트웨어를 제작하여야 하고, 이렇게 제작된 계측시스템은 성능을 우선적으로 확인하기 위하여 Lab Test를 수행해야 한다. Lab Test를 통해 기본적인 성능이 확인되면 현장에 적용하여 구축을 하고 운영을 통해 그 성능을 최종적으로 확인하여야 한다. 이와 같은 일련의 과정 및 단계별 목표를 다음 그림에 나타내었다.

3. 개발 내용 요약

연구목표	초고속 자기부상철도의 종합 계측 시스템 구축을 위하여 관련 하드웨어 및 소프트웨어를 개발하고 단거리 시험선에 적용하여 운영하는 것을 목표로 함
연구내용	▪ 종합 계측시스템 상세 구축 계획 수립 ▪ 계측시스템 하드웨어 및 운영 소프트웨어 개발 ▪ Lab test를 통한 계측시스템 성능 확인 ▪ 종합 계측시스템 현장 구축 및 운영
수행과정	▪ 종합계측시스템 요구사항 분석 및 상세 구축 계획 수립 ▪ 계측시스템 하드웨어 및 운영 소프트웨어 구축 ▪ Lab test 및 조합시험을 통한 기본 성능 확인 ▪ 종합 계측시스템 현장 구축, 운영 및 유지보수 계획 수립
연구결과	▪ 초고속 자기부상철도 계측시스템 구축 계획 수립  ▪ 계측시스템 하드웨어 구축 및 적용  ▪ 계측시스템 운영 소프트웨어 구축 및 운영 

4. 국내외 개발 동향

가. 국내 개발 동향

국내에는 아직 초고속 자기부상 열차에 대한 성능시험 항목 및 시운전 기준서는 없는 실정이지만 한국철도기술연구원에서 수행한 “열차 성능시험 및 평가기술 개발(2001년도 1차년도 연구 수행)”을 통해 다음과 같은 연구결과를 얻었다. 첫째로 기존철도 시운전시험 사례, 기존선 고속화 시험사례, 고속철도 시운전 시험사례 및 표준규격(JIS, IEC 및 UIC)에 제시된 시험항목에 대한 조사 및 분석을 통하여 8개의 성능에 대하여 27종류의 시험항목으로 분류됨을 확인하였고, 국내 전동차의 경우는 34종, 일본381전차는 11종, 재래열차 시험매뉴얼에는 7종, TGV-K는 21종, 일본500계 고속열차는 12종, 미국 AMTRAK사의 틸팅차량인 X2000적용의 경우는 14종, IEC 1133은 19종, JIS E6004는 13종, UIC 610은 15종의 시험을 실시하도록 되어 있었다. 둘째로 여러 종류의 철도시스템(기존철도, 기존선 고속화, 고속철도)에 대한 시운전 시험항목과 표준규격에 제시된 시험항목을 비교분석 하여 기동/가속시험, 집전성능시험, 제동성능시험, 주행성능시험, 안전운행시험 등 5개종류의 시험이 9개의 시험사례 중 7개 이상의 시험사례에서 실시된 것으로 확인되어 본 항목이 가장 중요한 시험항목임을 알 수 있었다.

2차년도 과제수행 결과로는 이들 시험 항목에 대한 시험 방법 및 평가기준(안)을 도출하였으며, 3차년도 과제수행 결과 각 성능별로 계측 항목에 대한 상세 검토를 수행하여 계측 항목을 결정하였으며, 계측 항목별 측정 위치 및 센서 설치를 위한 필요사항을 검토하였고, 이와 아울러 각 성능시험별로 시험준비 조건, 시험방법, 시험절차 및 평가방법과 기준에 대한 시운전 시험절차서를 작성하였다. 또한, 시제열차의 시운전시험 수행을 위한 시험계측시스템의 구축방안에 대한 검토를 수행하여 시험계측시스템 구축 기본계획을 결정하였는데, 시운전시험계측시스템은 각 차량별로 데이터 수집 모듈을 설치하고 중앙 시험차량에서 네트워크를 통하여 전체시스템의 제어 및 계측 신호의 모니터링을 수행할 수 있도록 구성한 것이 특징이었다. 이와 아울러 시험계측시스템의 일부를 시험실수준으로 구축하여 계측시스템의 사전 점검 및 발생가능 문제점에 대한 검토를 사전에 수행할 수 있도록 하였다.

철도분야 종합계측시스템 기술에 대한 국내 개발 현황은 다음과 같이 경량전철, 차세대 전동차 및 한국형 틸팅열차에 대해서 살펴보았다. 경량전철 계측시스템의 경우, 새롭게 개발된 경량전철 system의 시험평가를 위한 각 기능 및 성능을 확인하기 위한 목표로 구축되었으며, 차량, 전력, 신호, 선로 등 각 시스템 기능에 따른 운행 data 및 각종 자료를 수집하고 분석하는 목적으로 진행이 되었다. 계측시스템 구축을 위한 구체적인 방법으로는 첫째, 계측 장치의 추가 및 제거가 용이하도록 Network를 이용한 분산계측 시스템으로 구축하였고, 둘째, 차상/지상 신호의 시간동기를 맞추어 통합계측이 가능하도록 시스템을 구축하였으며, 마지막으로 상시 계측항목 및 향후 추가가 예상되는 계측항목뿐만 아니라, 필요시 별도로 계측항목을 추가할 수 있도록 시스템을 구성하여 구축하였다. 다음 그림은 경량전철 계측시스템 구축과 관련된 상세 내용을 보여주고 있다.

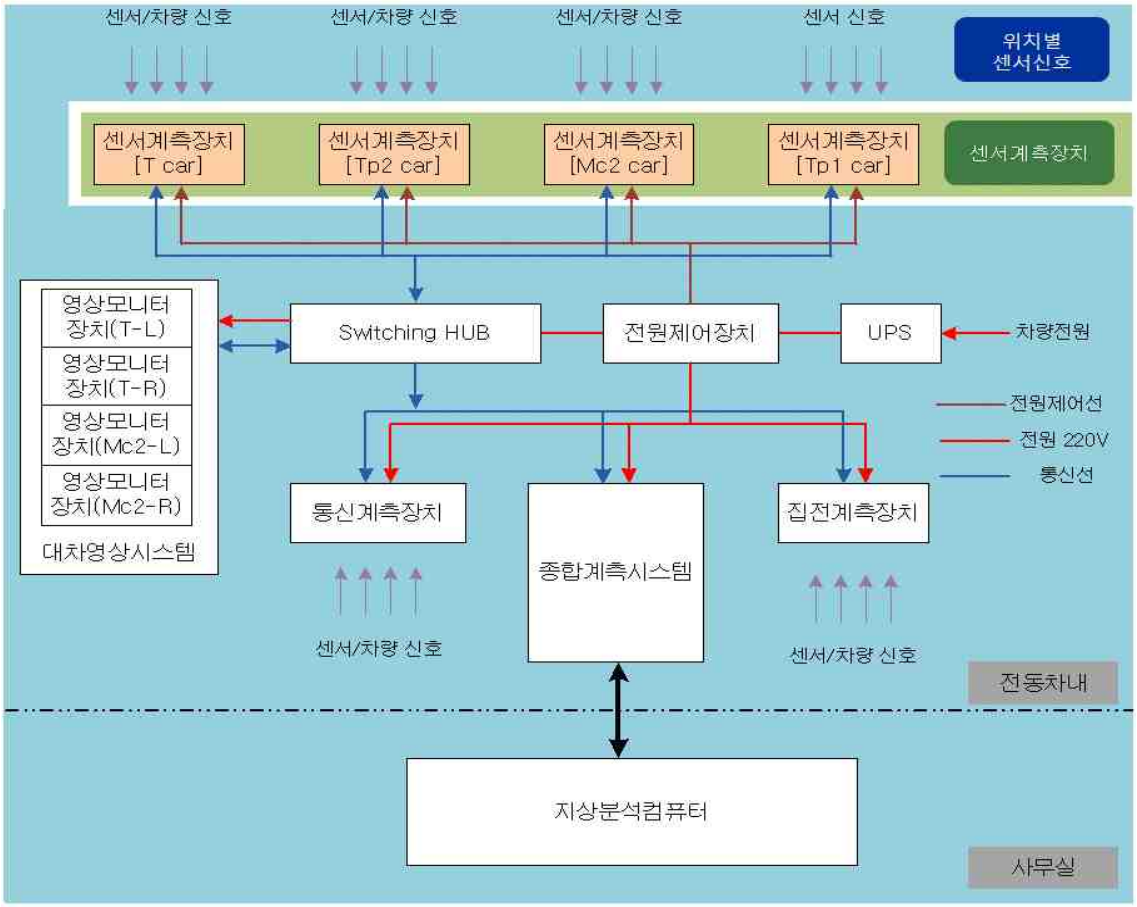


[그림 2.2.1] 경량전철 계측시스템 주요 내용

경량전철 계측시스템의 주요 특징을 구체적으로 살펴보면, 먼저 무선랜을 이용한 Network 구축하였고, 각종 신호를 검출하는 Sensor 사양을 검토하였으며, 검토된 사양을 바탕으로 시제차량 차체 및 대차에 Strain Gauge를 설치/교정하고, 전력, 선로, 차량, 신호분야별 계측장비를 구축하였다. 또한 계측 전용 프로그램 및 분석용 프로그램 제작하였고, 계측시스템 통합 시운전 및 장비 운영 지원하였으며, Data 통합 관리 및 보안 사항에 대해서 연구를 수행하였다. 다음 그림은 신호별 계측시스템 구성도를 나타낸다.

경량전철 계측시스템의 경우 특히 다음과 같은 사항에 있어서 기존의 계측시스템과는 차별화 되는 내용이 존재한다. 첫째, 계측 장치의 추가 및 제거가 용이하도록 Network 기반 분산계측 시스템을 적용하였고, 둘째로 무선랜 Network를 통한 차상 및 지상신호의 시간동기화 시스템을 구축하였다. 셋째로 차량, 전력, 신호, 선로 등의 Interface를 단계별로 수행하여 기능별 데이터를 통합하여 관리할 수 있도록 구성하였으며, 마지막으로 계측시스템 통합 시운전 및 장비 운영지원이 가능하도록 각종 관리 시트 작성을 통하여 추후 활용이 가능하도록 개발하였다. 아래 그림은 경량전철 계측시스템의 통합계측 시스템 layout과 무선 network 구성 및 관련 사진을 보여준다.

차세대 전동차 계측시스템은 크게 종합계측장치, 센서계측시스템, 집전계측장치, 통신계측장치 및 대차영상시스템으로 구성되어 있으며, 경량전철 계측시스템과 마찬가지로 각 계측시스템은 Network로 연결되는 분산계측시스템으로 이루어져 있다. 또한 차량분리시 용이하게 계측시스템이 분리/접속되도록 설계하였으며 주행시험시 고속으로 Backup장비 및 분석컴퓨터에 저장되도록 개발하였다. 다음 그림은 차세대 전동차 계측시스템의 전체적인 layout을 보여주고 있다.



[그림 2.2.2] 차세대 전동차 계측시스템 Layout

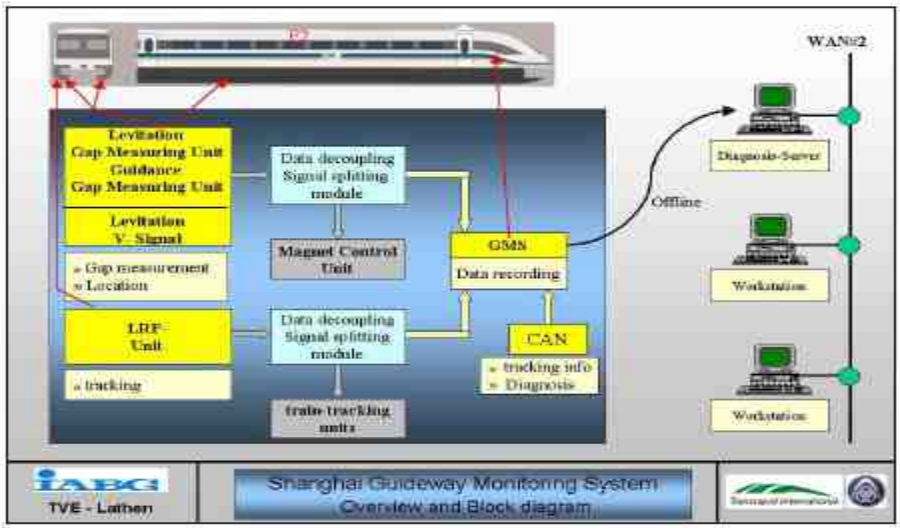
나. 국외 개발 동향

현재 중국 상하이에서 운행중인 초고속 자기부상열차의 경우 가이드웨이에 대한 상시계측시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다. 아래 그림과 같은 가이드웨이 측정 전용 차량을 이용하여 stator pack 및 cable winding 상태를 수시로 측정하여 그 값을 관리하고 있으며, 특히 선로 표면의 상태를 영상으로 주기적으로 점검하여 유지, 보수에 반영하고 있다.

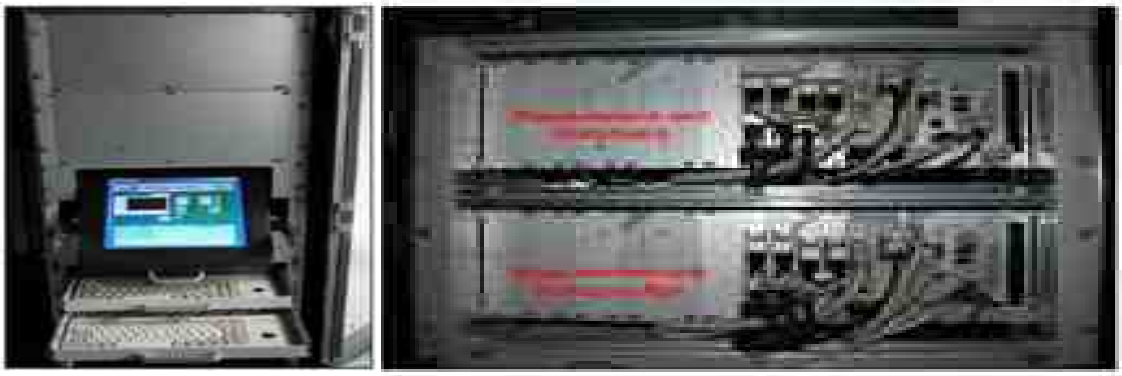


[그림 2.2.3] 가이드웨이 상태 측정 차량

중국 초고속 자기부상열차의 경우 유지보수차량에 의한 가이드웨이 상태 점검뿐만 아니라 일일 운행되는 상용열차에서 운행 중인 상태에서 가이드웨이의 상태를 실시간으로 측정하도록 하는 시스템을 개발하여 현재 사용 중에 있다. 본 시스템에서는 초고속 자기부상열차 성능 및 안전과 직결되는 stator pack과 안내레일의 위치변화량 및 모듈체결상태를 측정하는데 차량에 기 설치된 기존의 gap 센서 및 절대위치 센서를 활용하는 특징으로 위치에 따른 데이터가 주기적으로 저장되며 추후 운행 종료 후 offline으로 데이터를 분석하게 된다. 가이드웨이 모니터링 시스템의 개념과 차량 내에 설치된 측정 장비에 대한 그림이 아래에 나타나 있다.

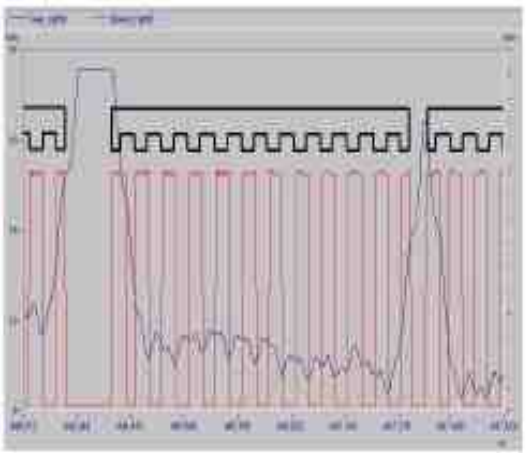


[그림 2.2.4] 가이드웨이 모니터링 시스템 개념

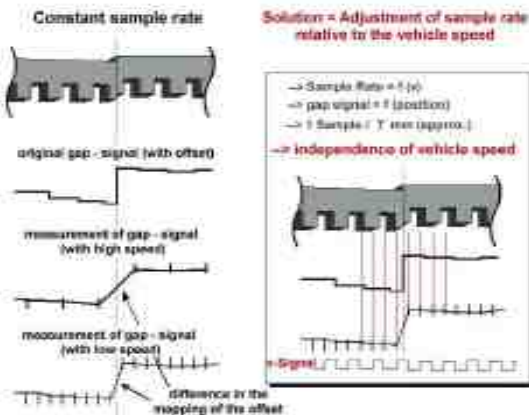


[그림 2.2.5] Measurement units in the vehicle

측정 방법은 아래 그림과 같이 간격 센서 데이터를 이용하여 인접한 stator pack과 guidance rail의 offset값을 계산하게 되는데, 운행속도 변화에 상관없이 동일한 sampling rate로 측정 가능하도록 소프트웨어적으로 구현을 하였으며, Offset 값이 특정값 초과시 alarm 발생하여 유지 보수에 반영할 수 있도록 하였다.



[그림 2.2.6] Rail offset 측정 및 계산



[그림 2.2.7] 차량 속도와 연동된
sampling rate 구현

운행 후 취득 data를 diagnosis server로 전송하여 offline으로 분석 및 평가를 수행하게 되며, stator pack의 연결부위와 같은 특정 위치에 대한 이력관리를 통한 장기적인 동향 분석을 수행하고 있다.



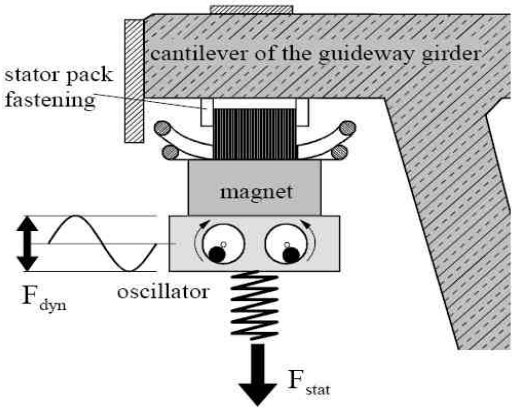
[그림 2.2.8] 분석 및 평가 프로그램



[그림 2.2.9] 이력관리 시스템

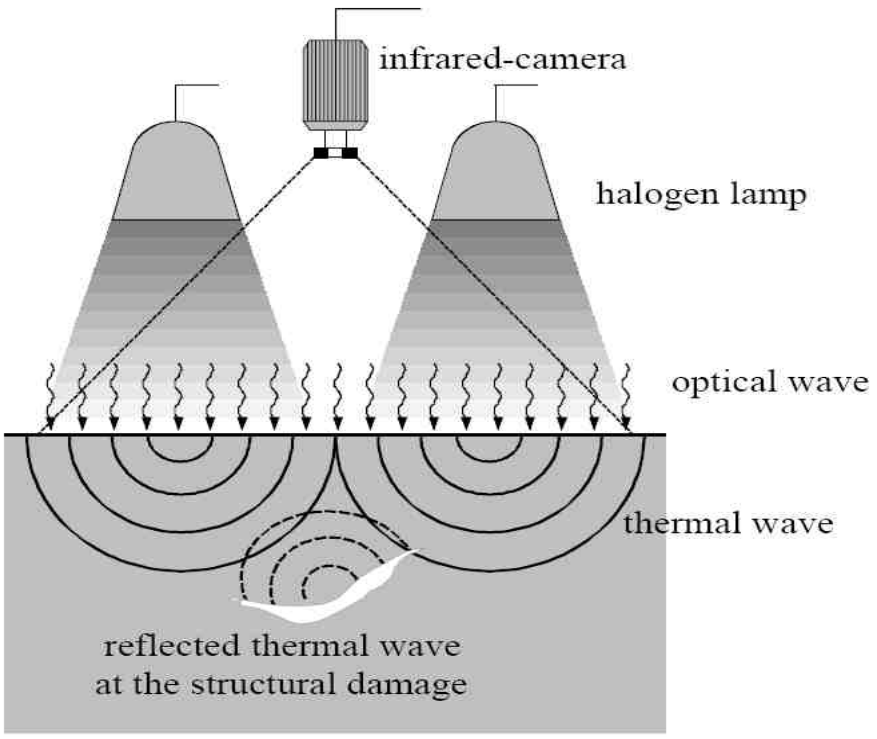
또한 독일에서는 Transrapid 개발 당시 가이드웨이의 검사 및 계측을 보다 효율적으로 하기 위한 연구차원의 노력이 다음과 같이 다수 진행되었다.

- Sliding 표면과 스키드 사이의 마찰 계수 측정
- 가이드웨이의 수직 fixings을 측정하기 위한 고유주파수 측정
- 스테이터 팩의 결합정도를 측정하기 위한 동적 부하장치(아래 그림 참조)
- 가이드웨이에 부착되는 장치의 조립정도 측정



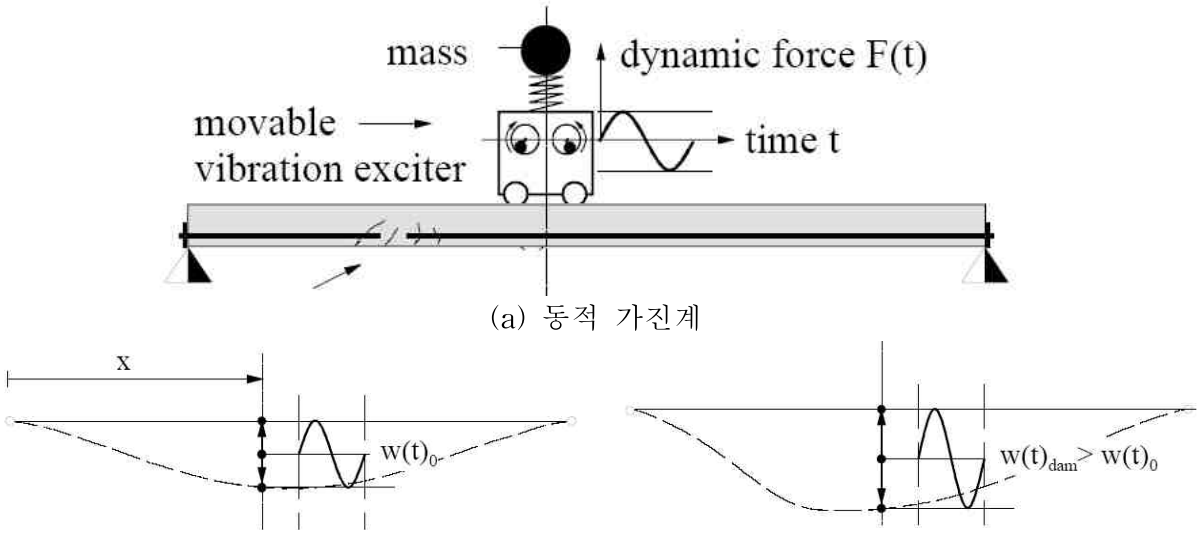
[그림 2.2.10] Stator Pack 체결정도 측정 장치

그러나 상기와 같은 측정 방법은 오랜 시간이 필요하고 이는 실제 운영 중인 노선에 적용하기 힘들기 때문에, 실제 운행 중인 노선에서 손쉽고 단시간에 측정이 가능하도록 하는 연구가 진행되었다. 즉, 아래 그림과 같이 적외선 카메라와 할로겐 램프를 이용하여 optical wave를 궤도에 조사하여 열적 파동을 발생시킴으로써 궤도 내부에 있는 damage나 crack을 검측하는 것이다.



[그림 2.2.11] Lock-in-thermography를 이용한 궤도내 결함 측정 방법

또한 아래 그림과 같이 이동 가진계를 이용하여 이동하면서 동적인 힘을 궤도 상면에 가하면서 그 응답을 분석함으로써 가이드웨이의 손상 여부를 측정하는 방법도 개발되었다.

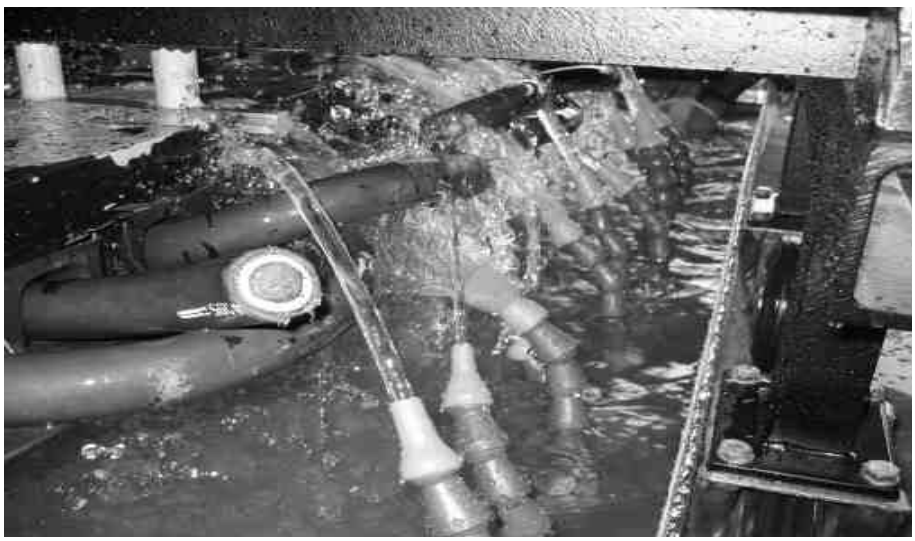


(a) 동적 가진계

(b) 정상적인 궤도의 경우 응답 (c) Damage가 존재하는 궤도의 경우 응답

[그림 2.2.12] 궤도의 동적 강성 측정 방법

Transrapid 개발 및 성능 개량시 수행하였던 주요 성능평가 항목은 구동 및 에너지 공급시스템, 자기부상 차량 및 가이드웨이 부분으로 각 항목에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 먼저 구동 및 에너지 공급 시스템의 경우 가장 중요한 성능 평가항목은 긴 설치 거리에 따른 권선의 성능저하에 대한 대처방안이었다. 이 항목은 육안으로 확인하기 어려운 부분이고 20년 동안 운영이 되어왔던 점을 감안할 때, 더욱 중요시 되는 항목으로 주된 기술은 외부 환경에 강인 절연 피복의 성능이다. 따라서 장시간에 따른 성능 저하에 대한 평가나 아래 그림과 같이 수분에 노출되었을 때의 성능을 평가하는 연구가 주로 진행되었다.



[그림 2.2.13] Qualification test for flushing process

또한 아래 그림과 같은 Inductive Poser Supply(IPS)의 경우, 안정적으로 전원 공급

이 가능한지에 대한 평가가 주되게 이루어졌다.



[그림 2.2.14] 가이드웨이 하단에 설치된 IPS-Test module

자기부상 차량 및 궤도 부분의 성능평가를 위하여 아래 그림처럼 이동 가능하고 여러 시험이 가능한 이동식 가이드웨이 모듈을 개발하여 관련된 각종 성능평가를 수행하였다.



[그림 2.2.15] 하부에서 검사가 가능하도록 설계된 LSM 가이드웨이 모듈

5. 상세 개발 내용

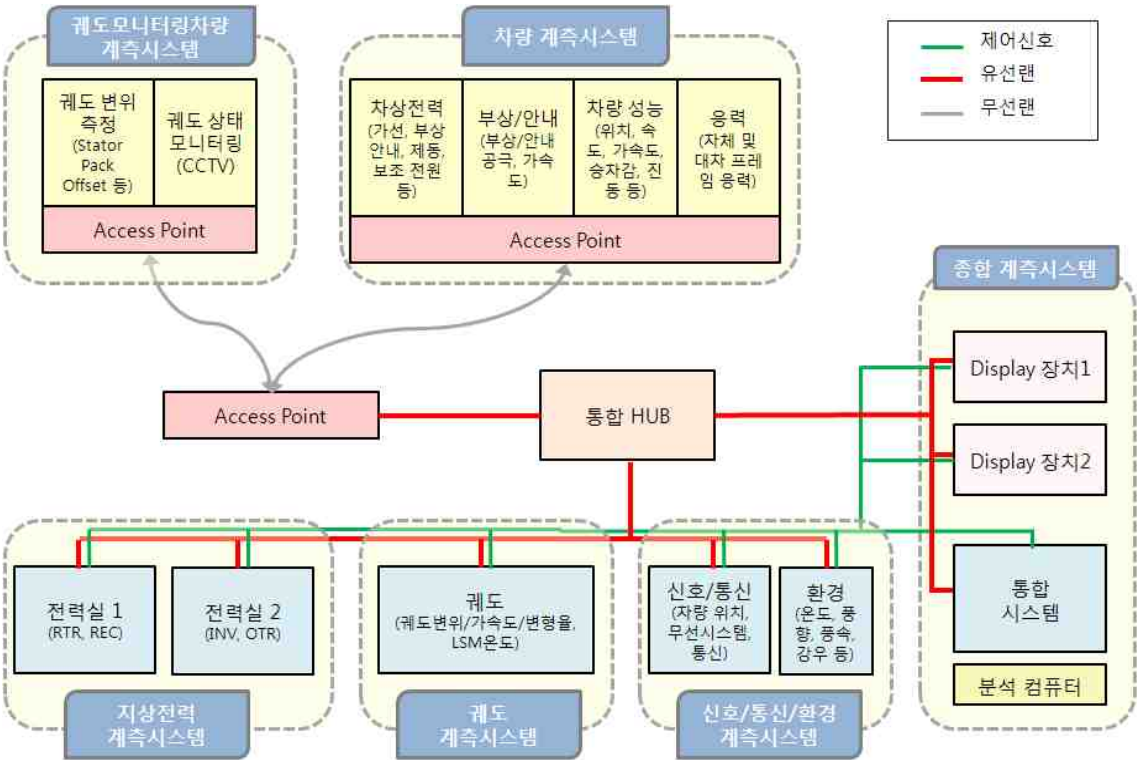
가. 성능계측시스템 구축 계획 수립

(1) 종합계측시스템 개요

초고속 자기부상철도의 종합계측시스템은 그림과 같이 지상전력, 궤도, 궤도모니터링차량, 차량, 신호/통신/환경 및 종합계측시스템 등 총 6개로 이루어져 있다. 지상전력 계측시스템은 지상에 위치한 변압기, 정류기, 인버터 등의 추진장치의 입출력값을 모니터링하여 추진성능 평가 및 운영 중 고장진단을 가능하게 한다. 궤도 계측시스템을 통해서는 처짐 및 변형에 대해서 엄격한 규격이 요구되는 자기부상철도 궤도의 상태를 수시로 모니터링 및 보완함으로써 차량의 부상 및 추진성능을 최적화할 수 있다. 궤도 상태를 보다 정밀하고 효율적으로 모니터링하기 위하여 궤도를 수시로 운행하면서 궤도에 부착된 권선의 불량정도 및 궤도의 변형정도를 모니터링하기 위해서 궤도모니터링차량 계측시스템이 활용된다.

차량 계측시스템은 차량에 공급되는 전원, 부상/안내 공극 및 차량의 속도/가속도 등을 모니터링하여 제어실로 송신함으로써 차량의 상태를 원격에서 알 수 있도록 한

다. 신호/통신/환경 계측시스템은 차량의 위치, 무선데이터 통신 상태 및 온도, 풍향, 풍속과 같은 환경을 계측하며, 종합 계측시스템은 상기에 서술한 각 시스템에 대해서 제어 명령을 내리며 계측된 데이터를 통합하여 모니터링하고 분석, 저장하는 역할을 수행한다.



[그림 2.2.16] 초고속 자기부상철도 계측시스템 구성도

상기에 서술한 각 계측시스템별로 관련이 있는 성능평가 항목 및 상시모니터링 항목은 다음 표와 같다.

[표 2.2.1] 세부 계측시스템 별 시험평가 항목 및 상시모니터링 항목

분야	시험평가 항목	상시모니터링 항목
지상전력 계측시스템	▪ 추진 성능 ▪ 전류 제어 성능 ▪ 전력 품질 ▪ 회생전력 흡수량 ▪ 고조파 ▪ 단락회로 감지 성능	▪ 각종 전력 장비 입출력 ▪ 에너지 저장장치 입출력 ▪ 접점 정상 작동 유무 ▪ 정류기 지락전류 ▪ 인버터 토크/전류 지령치/달성치
궤도 계측시스템	▪ 처짐 변위 ▪ 고유진동수 ▪ 궤도 설치 공차	▪ 궤도 변위 ▪ 궤도 가속도 ▪ 궤도 응력 ▪ LSM 권선/코어 온도
궤도모니터링차량 계측시스템	▪ Stator pack 설치 공차	▪ Stator pack offset ▪ 궤도 상태(상면/측면/하면)
차량 계측시스템	▪ 부상/안내/제동 성능 ▪ DC컨버터 및 보조전원장치 성능 ▪ 승차감 및 실내 소음	▪ 부상/안내 공극 및 공극가속도 ▪ 부상/안내/제동 전류/전압 ▪ 가선 및 보조전원 전류/전압 ▪ 차량 속도/가속도 및 롤링/피칭/요잉 ▪ 의자 승차감 및 등받이 가속도 ▪ 차체 진동
신호/통신/환경 계측시스템	▪ 차량 위치 검지 성능 ▪ 무선시스템 성능 ▪ 데이터 통신 성능	▪ 차량 상대/절대 위치 ▪ 무선시스템 상태 ▪ 데이터 통신 상태 ▪ 온도/강우/풍향/풍속 등
종합 계측시스템	▪ 각 계측시스템 제어 및 취득데이터 현시/분석/저장	

(2) 종합계측시스템 구성 계획

초고속 자기부상철도 종합계측시스템은 다음과 같이 6개의 주요 계측시스템으로 구성되어 있고, 각 계측시스템별 상세 설명은 다음과 같다.

(가) 지상전력 계측시스템

초고속 자기부상철도는 기존열차와는 틀린 지상추진방식으로 지상의 전력실에 주전력이 입력되고 변압기, 정류기 및 인버터 등을 거쳐 최종 추진전류가 궤도의 권선으로 공급된다. 이러한 각종 지상전력장비의 입출력값 모니터링을 통하여 초고속 자기부상철도의 추진성능 평가 및 운영 중 고장진단이 가능하다. 또한 에너지 효율을 높이기 위하여 초고속 자기부상철도에 적용되는 회생에너지 저장장치의 효율을 평가하는 역할을 수행한다.

(나) 궤도 계측시스템

초고속 자기부상철도 궤도의 경우 작은 부상공극을 정밀하게 유지해야 되기 때문에, 궤도의 처짐 및 변형에 대해서 엄격한 규격이 요구된다. 따라서 궤도의 처짐량과

변형량을 항시 모니터링하고 궤도에 부가되는 가속도값을 계측하여 향후 궤도 변형에 영향을 주는 인자를 수시로 분석해야 한다. 또한 초고속 자기부상철도의 효율적이고도 안정적인 추진성능 유지를 위해서는 궤도에 설치된 권선의 온도를 일정 수치 이하로 항시 유지시키는 것이 중요하기 때문에 권선의 온도를 상시 모니터링 하는 계측 시스템이 필요하다.

(다) 차량 계측시스템

초고속 자기부상철도 차량에 공급되는 가선전력과 보조전원장치의 상태를 우선적으로 모니터링하며, 차량의 부상/안내 공극 및 공극 제어에 필요한 전류/전압을 모니터링한다. 또한 주요 성능인 차량의 속도/가속도와 승차감 및 차체 진동 등을 모니터링 하게 된다.

(라) 신호/통신/환경 계측시스템

차량의 상대/절대 위치, 무선시스템과 데이터 통신 상태 및 온도, 풍향, 풍속, 강우 등의 외기 환경에 대한 계측을 담당한다.

(마) 종합 계측시스템

각 시스템의 제어 및 계측된 데이타를 통합하여 모니터링하고 분석, 저장하는 역할을 수행한다.

(3) 세부 계측시스템별 상세 구축 내용

(가) 지상전력 계측시스템

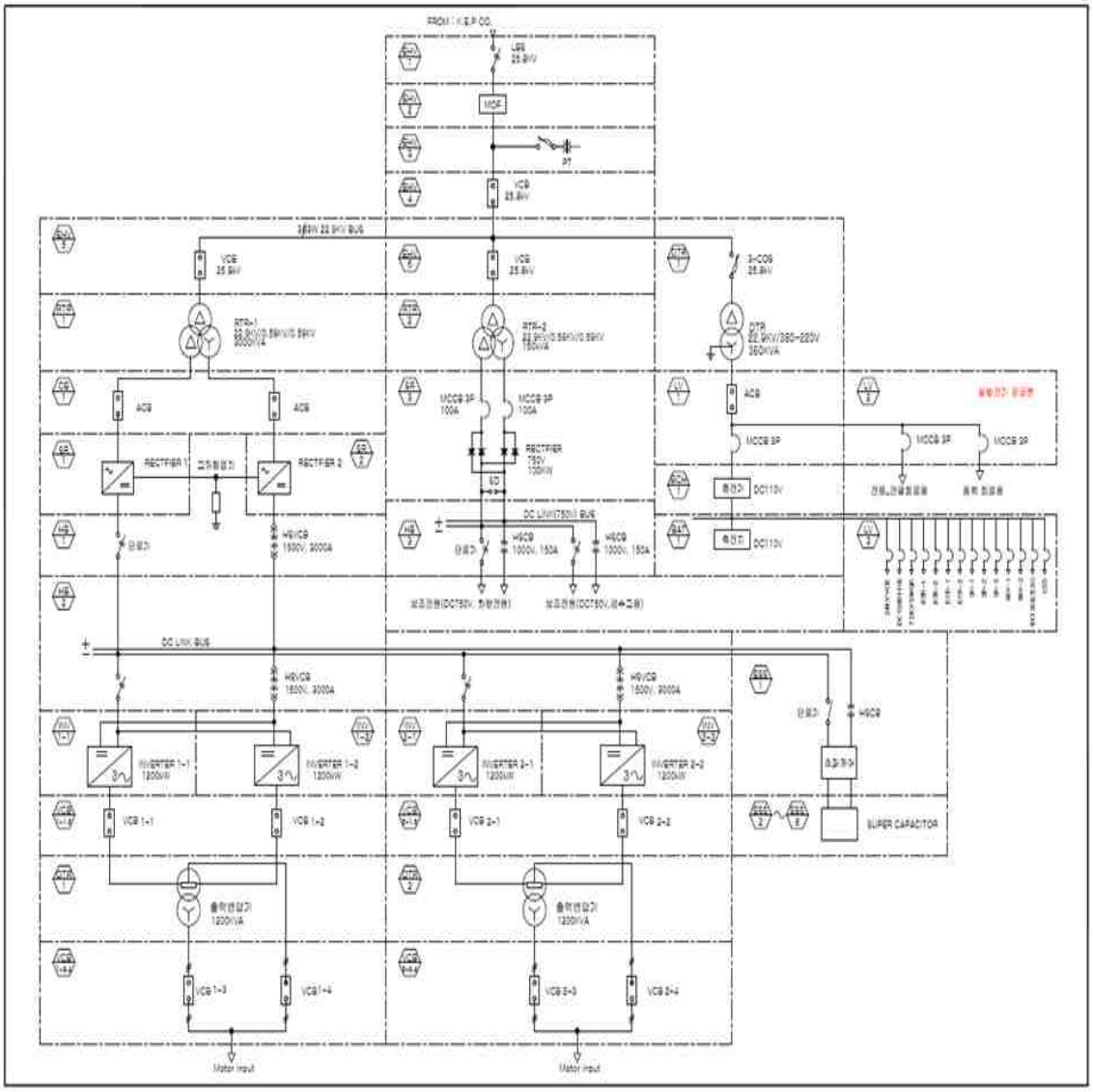
초고속 자기부상철도의 지상전력계통 배선도는 [그림 2.2.16]과 같으며 각각의 지상전력장비는 [그림 2.2.17]과 같이 건설예정인 차고지 내의 전력실 1과 전력실 2에 배치가 된다. [표 2.2.2]는 세부 측정항목 및 측정범위, 신호종류 및 위치 등 측정항목에 대한 상세 사항을 보여준다. 측정을 위한 센서(CT 및 PT)는 측정항목의 상세사항을 고려하여 구입하여 설치하도록 하며, 각 측정항목에 대한 신호인출은 장비별로 계측을 위해 별도로 제작한 커넥터 또는 신호 인출 단자를 통해서 이루어지기 때문에, 이를 고려하여 신호인출 관련 장비를 구성하여야 한다.

각각의 전력실에는 전압강하 방지와 노이즈 최소화를 위하여 분산계측시스템을 구축하도록 한다. 각 전력실에 필요한 계측항목 및 신호종류를 고려하여 [표 2.2.3]과 같이 각 전력실에 필요한 계측장비를 구성하여야 한다.

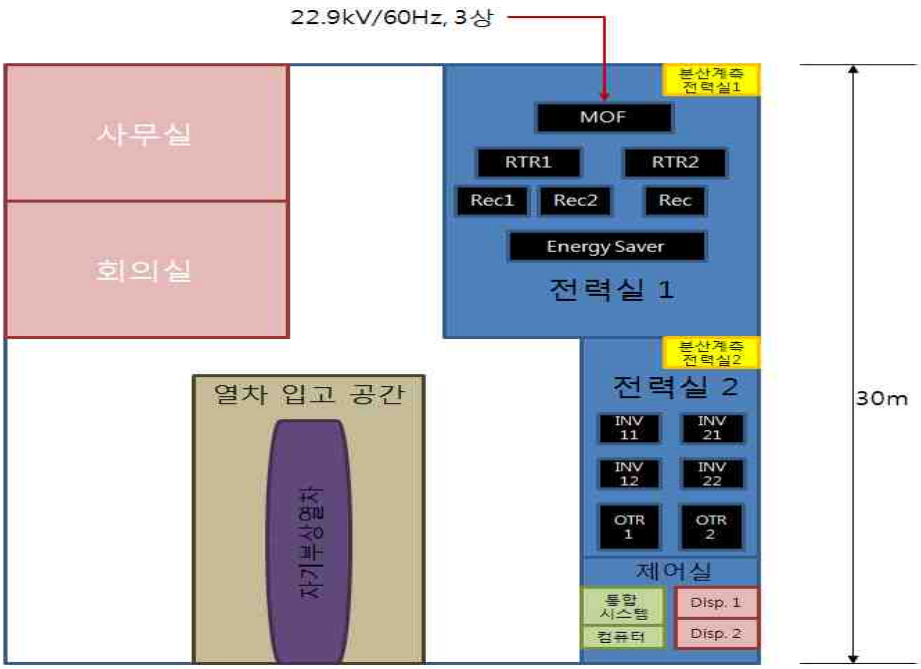
본 계측장비를 탑재하는 Rack은 19“Rack을 기본으로 하되 필요시 크기를 조절하여 제작하도록 하고, Rack의 위치는 사전에 협의하여 정하도록 하며, Rack과 지상전력장비 사이의 테이터 통신은 바닥하부의 Pit를 이용하도록 한다. Rack과 종합계측시스템과의 통신은 유선랜을 사용하도록 한다.

전원공급을 위한 UPS는 다음을 만족하도록 제작, 설치하여 Rack내부에 내장하도록 한다.

- 정전시에도 15~20분 정도의 전원 공급 가능
- 전환시간이 0인 on-line type
- 원격 조정 가능



[그림 2.2.17] 지상전력계통 배선도



[그림 2.2.18] 차고지 Layout

[표 2.2.2] 지상전력 계측시스템 측정항목 상세 사항

대분류	측정항목	측정범위	단위	채널수	신호종류			상세위치
					종류	Type	출력값	
전력실 1	MOF 입력전압	25,000 ~35,000	V	1	지상 전력설비	전압	0~10	MOF
	MOF 입력전류	50 ~100	A	1	지상 전력설비	전압	-10~10	MOF
	가선전력	~3M	W	1	지상 전력설비	전압	0~10	MOF
	RTR1/2 입력전압	25,000 ~35000	V	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier Transformer
	RTR1/2 입력전류	50 ~100	A	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier Transformer
	RTR1/2 출력전압	22.9kv/ 0.59kv	V	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier Transformer
	RTR1/2 출력전류		A	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier Transformer
	RECTIFIER1/2 입력전압		V	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier
	RECTIFIER1/2 입력전류		A	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier
	RECTIFIER1/2	1,500	V	2	지상	전압	-10~10	Rectifier

대분류	측정항목	측정범위	단위	채널수	신호종류			상세위치
					종류	Type	출력값	
	출력전압				전력설비			
	RECTIFIER1/2 출력전류	3,000	A	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier
	RECTIFIER (보조전원)입력전압		V	1	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier
	RECTIFIER (보조전원)입력전류		A	1	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier
	RECTIFIER (보조전원)출력전압		V	1	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier
	RECTIFIER (보조전원)출력전류		A	1	지상 전력설비	전압	-10~10	Rectifier
	정류기 지락전류	±2,000	A	1	지상 전력설비	전압	-10~10	REC EARTH
	SUPER CAP. 입력전류	±3000	A	1	지상 전력설비	전압	-10~10	Energy Saver
	SUPER CAP. 입력전압	75 ~1,500	V	1	지상 전력설비	전압	-10~10	Energy Saver
전력실2	INV11/12/21/22/ 입력전압	0 ~3,000	V	3	지상 전력설비	전압	-10~10	Inverter
	INV11/12/21/22/ 입력전류	±2,000	A	3	지상 전력설비	전압	-10~10	Inverter
	INV11/12/21/22/ 출력전류(R,S,T)	±2,000	A	3	지상 전력설비	전압	-10~10	Inverter
	OTR1/2 입력전압		V	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Output Tr
	OTR1/2 입력전류		A	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Output Tr
	OTR1/2 출력전압		V	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Output Tr
	OTR1/2 출력전류		A	2	지상 전력설비	전압	-10~10	Output Tr
	속도	-100 ~100	km/h	1	지상 전력설비	전압	-10~10	INV CONTROLLER
	INV11/12/21/22 토크지령치	±30,000	Nm	4	지상 전력설비	전압	-10~10	INV CONTROLLER
	INV11/12/21/22 토크달성치	±30,000	Nm	4	지상 전력설비	전압	-10~10	INV CONTROLLER
	INV11/12/21/22 토크전류지령치	±500	A	4	지상 전력설비	전압	-10~10	INV CONTROLLER
	INV11/12/21/22	±500	A	4	지상	전압	-10~10	INV

대분류	측정항목	측정범위	단위	채널수	신호종류			상세위치
					종류	Type	출력값	
	토크전류달성치				전력설비			CONTROLLER
	접점 신호		-	9	지상 전력설비	전압	0~10	각 접점장비

[표 2.2.3] 지상전력 계측시스템에 필요한 계측장비 구성

구분	계측위치	계측장비	수량
지상전력 계측시스템	전력실 1	AD Board	1
		Main Chassis	1
		Controller (PXI용)	1
		Controller upgrade kit	1
		Rack mount monitor	1
		전압 및 온도 Module	4
	전력실 2	AD Board	2
		Main Chassis	1
		Controller (PXI 용)	1
		Controller upgrade kit	1
		Rack mount monitor	1
		전압 및 온도 Module	8
		Sub chassis	1
		SCXI Adapter, Cable	1

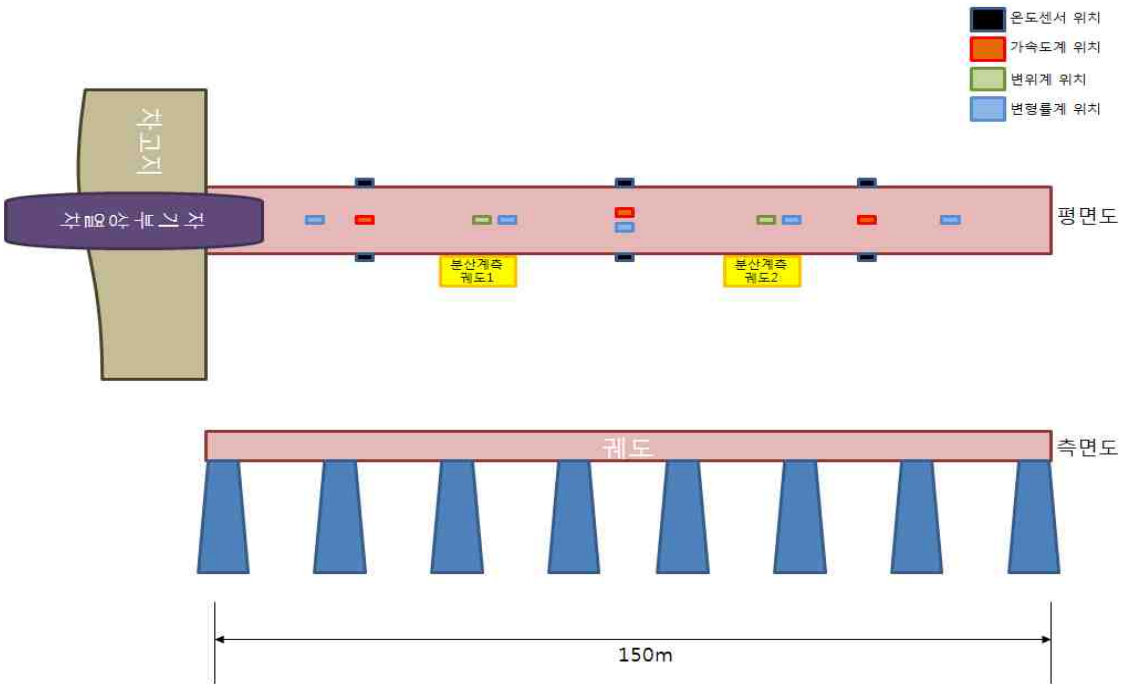
(나) 궤도 계측시스템

[그림 2.2.18]은 초고속 자기부상철도의 단거리 시험선의 궤도의 Layout 및 궤도에 부착되는 센서의 위치 및 종류를 보여주고, [표 2.2.4]는 측정항목 별로 측정범위, 신호 종류 등의 상세사항을 보여준다.

온도센서는 일반적인 thermocouple을 구입해서 좌/우측 궤도하부에 취부된 LSM의 권선(U,V,W) 및 코어표면에 부착하여 온도를 측정하도록 한다. 온도 측정 위치는 궤도 앞부분, 중간부분, 뒷부분으로 3군데로 나누어 측정하도록 한다. 가속도계, 변위계 및 변형률계는 최고속도로 인해 변형이 심할 것으로 예상된 부분에 설치하도록 한다.

궤도의 길이가 100m로 길기 때문에 전압강하 방지와 노이즈 최소화를 위하여 두 곳으로 나누어 분산계측시스템을 구축하도록 하되, 외부환경임을 감안하여 [표 2.2.5]와 같이 임베디드용 계측장비를 이용하여 구성하도록 한다. 종합계측시스템과의 통신은 유선랜을 사용한다. 또한 전원공급을 위한 UPS는 다음을 만족하도록 제작, 설치하도록 한다.

- 정전시에도 15~20분 정도의 전원 공급 가능
- 전환시간이 0인 on-line type
- 원격 조정 가능
- 거친 외부환경에서의 정상적인 동작 가능



[그림 2.2.19] 궤도 Layout

[표 2.2.4] 궤도 계측시스템 측정항목 상세 사항

대분류	측정항목	측정 범위	단위	채널 수	신호종류			상세위치
					종류	Type	출력값	
궤도 LSM 온도	LSM 권선온도 (11/12/13/21/22/23/-u/v/w)	-20~200	℃	18	센서	TC	-	LSM COIL
	LSM CORE 온도 (11/12/13/21/22/23)	-20~200	℃	6	센서	TC	-	LSM CORE
궤도 구조	거더 침하 변위	0.3~30	㎜	2	센서	전압	-10~10	거더중앙
	거더 가속도	-1~+1	g	3	센서	전압	-10~10	거더중앙
	구조물 Strain	±5,000	με	5	센서	브리지	-10~10	거더중앙

[표 2.2.5] 궤도 계측시스템에 필요한 계측장비 구성

구분	계측 위치	계측장비	수량
궤도 계측시스템	궤도	Chassis (임베디드 용)	2
		Case	2
		Controller (임베디드 용)	2
		Strain Module (임베디드 용)	2
		전압 Module (임베디드 용)	2
		온도 Module (임베디드 용)	2
		전원장치	2

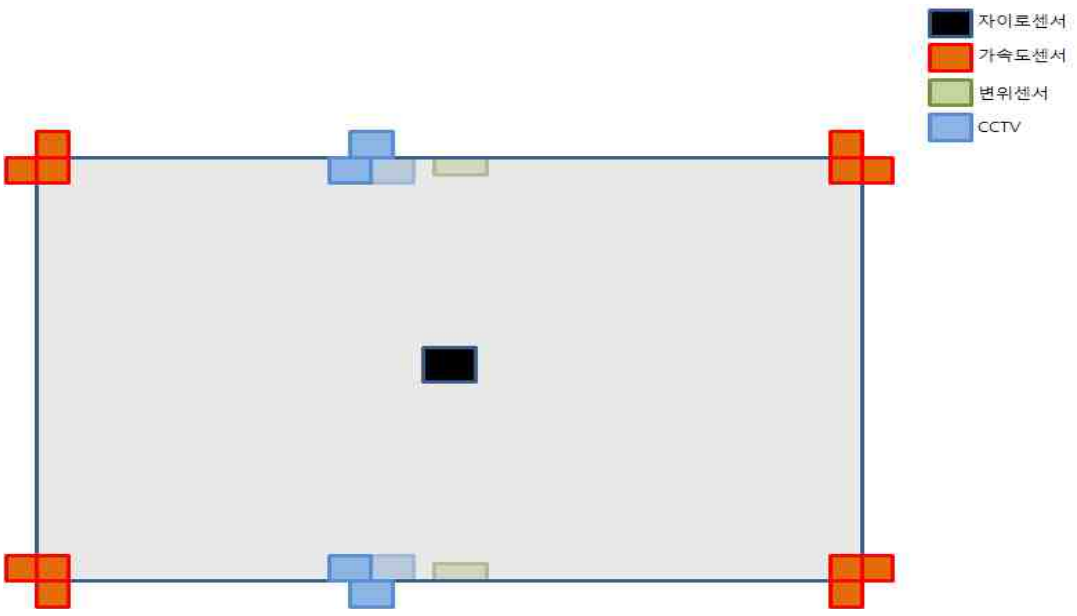
(다) 궤도모니터링차량 계측시스템

궤도모니터링차량에는 [그림 2.2.19]와 같이 Stator pack offset을 측정하는 변위 센서가 2군데 취부되며, 차량의 가속도(4 코너당 x, y, z 방향) 및 자이로 성분을 측정하는 센서가 각각 12개 및 1개씩 취부가 된다. 또한 좌우 궤도의 측면, 하면, 상면 등을 영상으로 촬영하기 위한 CCTV가 총 4대 설치된다. 센서 및 CCTV의 설치 위치 및 방법은 궤도모니터링차량이 제작된 이후에 관련 담당자와 서로 협의하여 결정하도록 한다.

가속도 센서, 자이로 센서, 변위 센서 및 CCTV는 [표 2.2.6]에 표시된 측정항목의 상세 사항을 고려하여 구입하도록 한다. 특히 CCTV의 경우 720×480 해상도, 초당 30 프레임 이상 실시간 저장하며, 저장 파일은 압축코덱(MPEC-4 등)을 사용하여 저장이 가능해야 한다.

종합계측시스템과 무선통신으로 데이터를 주고받아야 함으로 [표 2.2.7]과 같이 무선통신프로그램 구동을 위한 임베디드용 컴퓨터 및 USB용 샤시, 그리고 임베디드용 모듈을 이용하여 계측시스템을 구성하도록 한다.(본 장비들은 이미 구입이 되어있는 상태임) 종합계측시스템과의 무선데이터 통신 방법, 통신 데이터의 양 등에 대한 구체적인 사항은 향후 관련 담당자와 협의하여 진행하도록 한다.

전원공급은 약 4시간정도 궤도모니터링차량 계측시스템 운영이 가능한 용량의 배터리를 사용하도록 하며, 충전을 고려하여 2세트의 배터리를 운영하도록 한다.



[그림 2.2.20] 궤도모니터링차량 Layout(평면도)

[표 2.2.6] 궤도모니터링차량 측정항목 상세 사항

대분류	측정항목	측정 범위	단위	채널 수	신호종류			상세위치	비고
					종류	Type	출력값		
궤도 모니터 링차량	Stator pack offset(1/2)	-20~20	mm	2	센서	전압	-10~10	궤도모니터링 차량	
	궤도 표면 상태 (1/2-상/측/하면)	-	-	4	-	-	-	궤도모니터링 차량	CCTV
	차량 가속도	-	-	12	센서	전압	-10~10	궤도모니터링 차량	
	차량 자이로 센싱항목	-	-	1	센서	통신	-	궤도모니터링 차량	

[표 2.2.7] 궤도모니터링차량에 필요한 계측장비 구성

구분	계측위치	계측장비	수량
궤도모니터링 차량 계측시스템	궤도모니터링 차량	임베디드용 컴퓨터	1
		Chassis (USB 용)	1
		가속도 Module (임베디드 용)	3
		전압 Module (임베디드 용)	1

(라) 차량 계측시스템

차량 계측항목 및 계측에 사용되는 센서 종류가 [표 2.2.8]에 나타나 있다. 계측된 데이터는 무선통신을 이용하여 종합계측시스템으로 보내지게 되며, 다른 측정데이터와 시간동기를 맞추어 최종 디스플레이 되게 된다. 차량 계측시스템은 지상 및 궤도 계측시스템과 인터페이스에 문제가 발생하지 않도록 동기화 등의 문제 등에 유념하여 설계 및 제작이 되어야 한다.

[표 2.2.8] 차량 계측시스템 계측항목 및 센서종류

구분	계측항목	센서종류	비고
차량성능 계측	위치표시기	레이저센서	-
	차량속도	-	점점신호 사용
	차량가속도	가속도센서	-
	의자승차감(X)	-	승차감 측정기 사용
	의자승차감(Y)		
	의자승차감(Z)		
	등받이 가속도		
	차량 승차감(차체진동)	가속도센서	-
	외기온도	Thermo Couple	-
부상성능 계측	가선전압	전압 센서	-
	가선전류	전압 센서	-
	부상 공극	전압 센서	-
	부상 수직 가속도	전압 센서	-
	안내 공극	전압 센서	-
	안내 횡 가속도	전압 센서	-
	부상 전류	전류 센서	쵸퍼(부상계)
	안내 전류	전류 센서	쵸퍼(안내계)
	부상,안내 전압	전압 센서	
	제동 전압	전압 센서	제동 쵸퍼
	제동 전류	전류 센서	제동 쵸퍼
	보조 전원	전압 센서	Input/Output
	보조 전류	전류 센서	Input/Output
	제어전원	전압 센서	-
응력성능 계측	차체 응력	스트레인 게이지	-
	대차 프레임	스트레인 게이지	-

(마) 신호/통신/환경 계측시스템

온도, 풍향, 풍속, 강우 등의 외부 환경 데이터는 외부에 설치된 센서로부터 신호를 공급 받으며, 차량의 상대/절대 위치 및 통신에 관련된 항목은 관련 기기로부터 신호를 공급받아서 종합계측시스템으로 전송된다. 측정항목, 범위, 신호종류는 [표 2.2.9]와 같다. 온도, 풍향, 풍속, 강우를 측정하기 위한 센서는 표 9에 명시된 측정항목의

상세 사항을 고려하여 구입하도록 한다. 신호처리를 위한 계측장비는 제어실에 위치하는 Rack안에 설치하도록 한다.

[표 2.2.9] 신호/통신/환경 계측시스템 측정항목 상세 사항

대분류	측정항목	측정범위	단위	채널수	신호종류			상세위치	비고
					종류	Type	출력값		
제어 계측실	온도	-	-	2	센서	전압	-10~10	-	
	풍향, 풍속	-	-	1	센서	전압	-10~10	-	
	강우	-	-	1	센서	전압	-10~10	-	
	상대위치신호	-	-	-	-	-	-	-	인버터 신호이용
	절대위치신호	-	-	-	-	-	-	-	인버터 신호이용
	통신 NMS	-	-	-	-	-	-	-	
	신호제어 응답속도		ms		제어	ms	-		

(바) 종합 계측시스템

종합 계측시스템은 신호/통신/환경 신호 처리용 계측장비, 산업용컴퓨터, 모니터, 장비제어장치 및 Backup장치로 구성되며, 전체 계측시스템의 구성요소를 제어하고 다른 계측시스템에서 전송한 Data를 저장하고 실시간 모니터링을 수행하며, 측정 Data를 분석하여 현시한다. 또한 전체 계측시스템의 제어 및 점검 역할을 수행하며 Data 실시간 모니터링, 연산, 저장, 시간 동기, 백업, onboard 분석/저장 기능을 가진다.

종합 계측시스템을 위한 19″ Rack에는 신호/통신/환경 계측시스템에서 공급받은 계측신호의 처리를 위한 계측장비[표 2.2.10]가 포함되며, Rack의 위치는 사전에 협의하여 정하도록 한다. 또한 전체 데이터의 측정속도는 측정하고자 하는 신호 종류에 따라 사용자가 변경하여 선택할 수 있어야 한다. 전원공급을 위한 UPS는 다음을 만족하도록 제작, 설치하여 Rack내부에 내장하도록 한다.

▪ 정전시에도 15~20분 정도의 전원 공급 가능
▪ 전환시간이 0인 on-line type
▪ 원격 조정 가능

[표 2.2.10] 종합 계측시스템에 필요한 계측장비 구성

구분	계측위치	계측장비	수량
종합 계측시스템	제어실	산업용 컴퓨터	2
		모니터	2
		Sub chassis	1
		AD Board	1
		SCXI Adapter, Cable	1

(4) 운영 프로그램 구축 계획

(가) 계측 프로그램

지상전력 계측시스템, 궤도 계측시스템, 궤도모니터링차량 계측시스템, 신호/통신/환경 계측시스템 및 차량 계측시스템을 통합하는 종합계측시스템이 모두 제어, 계측, 저장 및 분석 가능하도록 구성한다. 계측을 위한 운영 프로그램은 지상전력장비 계측 프로그램, 궤도계측 프로그램, 궤도모니터링차량계측 프로그램, 신호/통신/환경 계측 프로그램, 차량 계측 프로그램 및 메인제어시스템 프로그램으로 구성된다. 각 프로그램은 전원 인가에 따라 시스템 자체점검을 수행하고 메인제어시스템의 제어 신호의 명령에 따라 시스템 간의 시간 동기를 맞추고, Data를 계측하며, 통신을 이용한 Data를 제어 및 모니터링 프로그램으로 전송한다.

제어 및 모니터링 프로그램은 전체 계측 시스템을 제어하며, 각 센서계측 프로그램에서 전송한 Data를 모니터링하고, 필요시 종합계측시스템에 Data를 저장한다. 각 계측 프로그램은 측정 채널을 Calibration하며, 그 결과를 File로 저장하여 보관하며, 필요한 채널을 선택적으로 모니터링 및 저장한다. 운영 프로그램은 Hardware의 성능을 최대한 사용하며 GUI(Graphical User Interface) 프로그램의 언어로 사용이 쉬우며 일반적으로 사용되는 언어로 작성한다.

(나) 분석 및 저장 프로그램

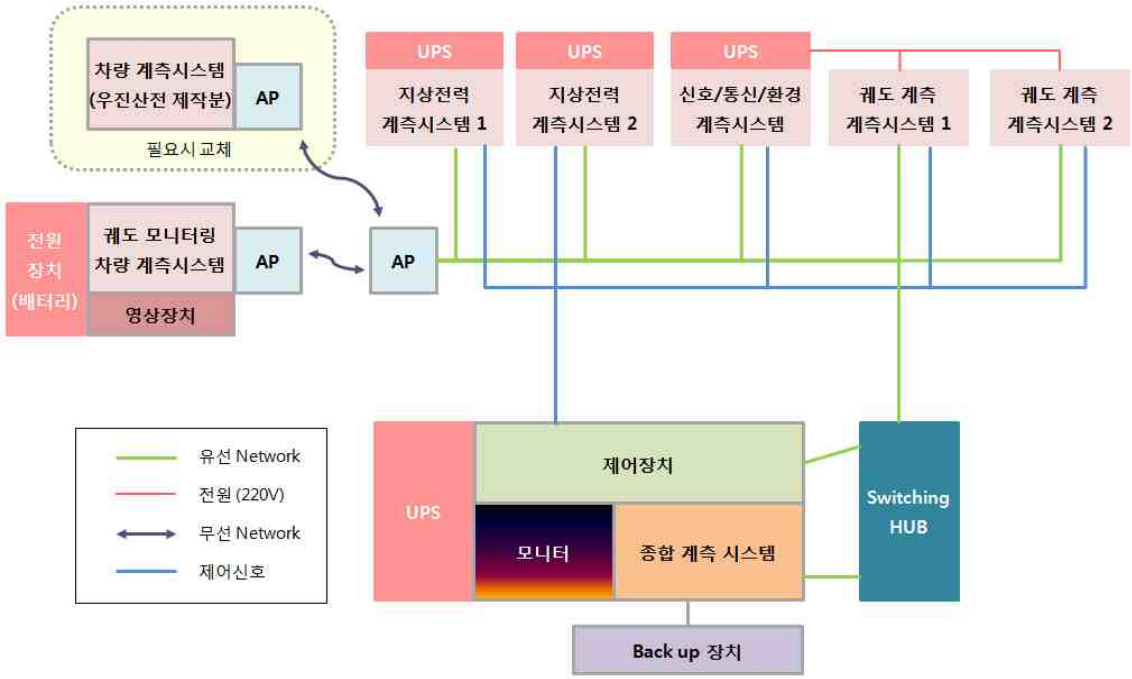
분석프로그램은 측정한 Data를 가공하고 가공된 Data를 읽어 분석하는 기능을 지니며 메인제어시스템 뿐만 아니라 각 계측시스템별로도 분석이 가능하도록 한다. 분석프로그램은 측정된 Data를 이용하여 통계 Data 분석, FFT분석, Filter 처리 등을 수행하고 Reporting을 하도록 한다. 또한 채널 간 연산 및 저장이 가능하도록 하고 시간동기 보정이 가능하도록 해야 하며, 채널별 Data를 User가 선택하여 Load 및 저장이 가능하도록 한다.

나. 계측시스템 하드웨어 및 소프트웨어 개발

(1) 계측시스템 하드웨어 개발

(가) 전체 시스템 Layout

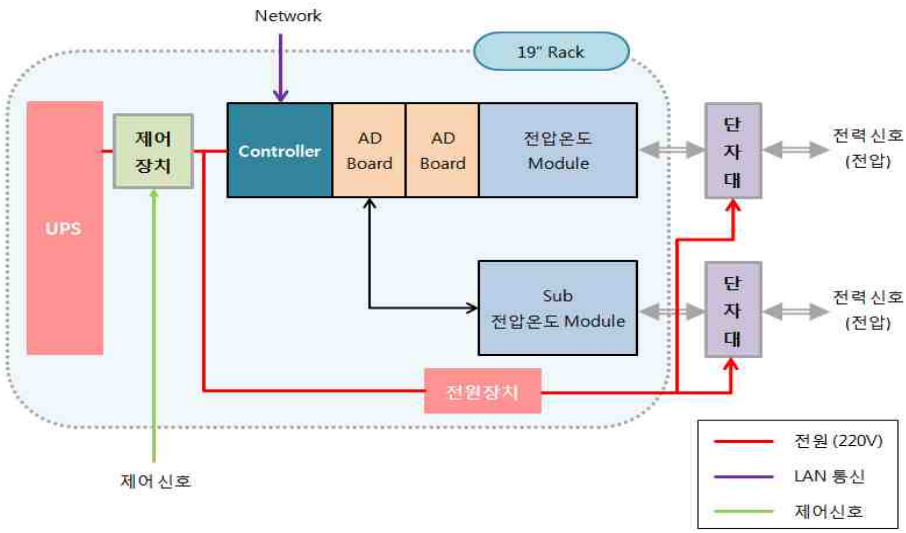
종합계측시스템 하드웨어의 전체 Layout은 다음 그림과 같다. 그림에서 보듯이 각각의 계측 시스템은 Switching HUB를 이용하여 Network로 연결되며 계측 및 제어가 이루어지는 분산 계측 시스템으로 구성한다.



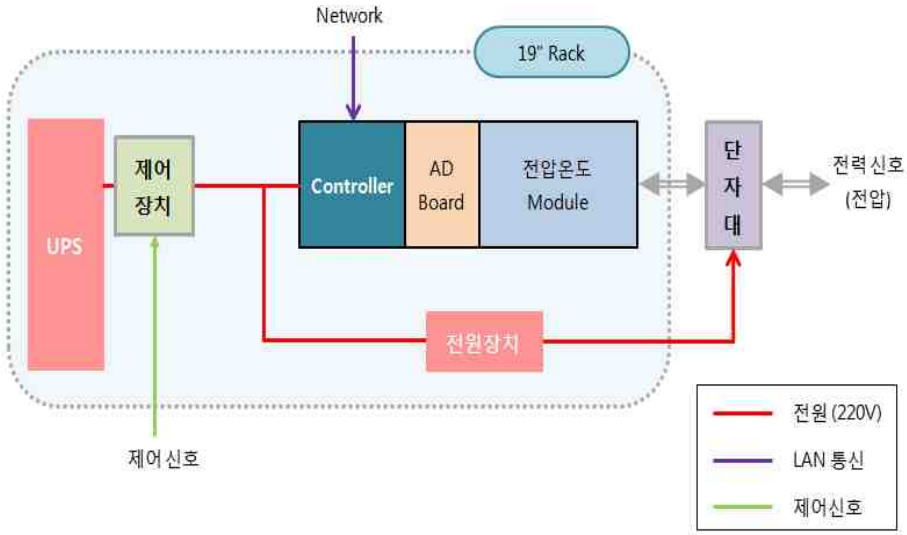
[그림 2.2.21] 지상계측 관련 하드웨어 및 운영 소프트웨어 구성도

(나) 지상 전력 계측시스템

지상 전력 계측시스템은 다음 그림과 같이 전력실 1과 전력실 2에 배치되어 종합 계측 시스템의 제어를 받아 주요 Data의 계측 및 저장, 모니터링을 담당한다. 지상 전력 계측시스템은 UPS를 내장하고, 원격으로 전원의 ON/OFF가 이루어진다.



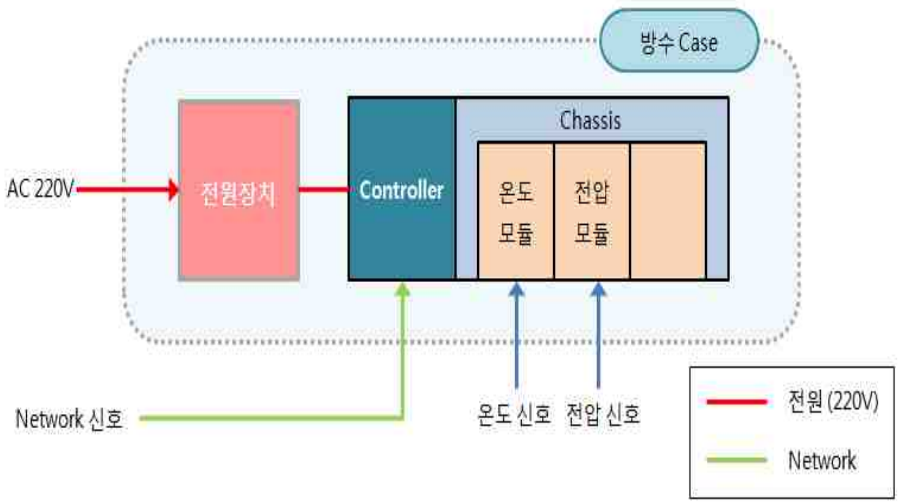
[그림 2.2.22] 전력실 1



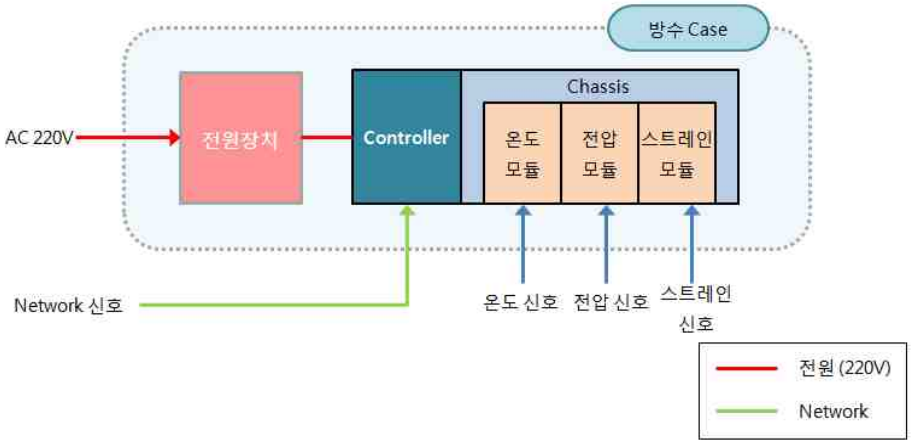
[그림 2.2.23] 전력실 2

(다) 궤도 계측시스템

궤도 계측시스템은 다음 그림과 같이 궤도에 설치되어 궤도와 차량의 상태를 계측하고 저장을 담당하며, 설치 위치를 고려하여 2개의 계측시스템으로 구성한다. 궤도 계측 시스템은 종합 계측시스템의 제어를 받아 Data의 계측, 저장 및 모니터링을 수행한다. 궤도 계측 시스템은 UPS 전원을 공급받아 원격으로 전원의 ON/OFF가 이루어진다.



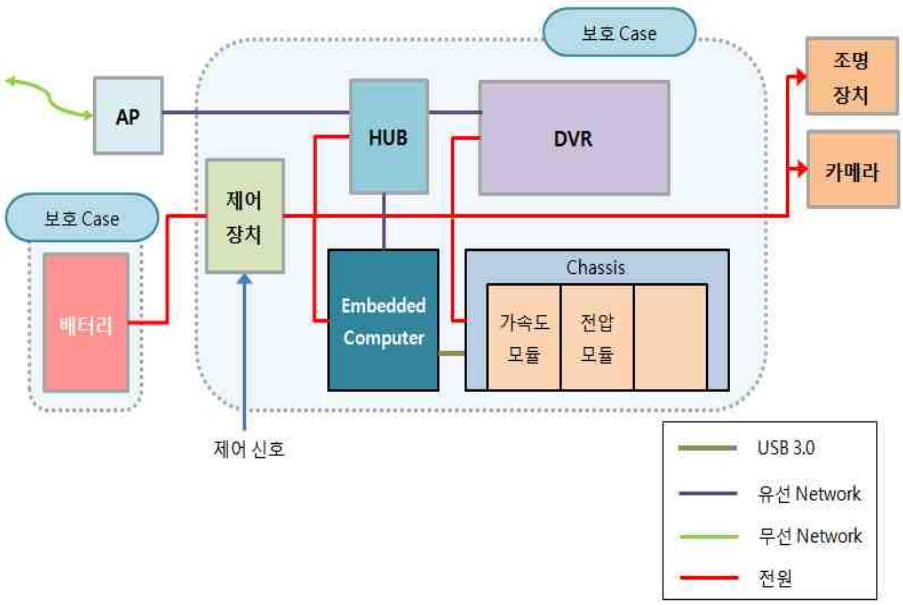
[그림 2.2.24] 궤도 계측 시스템 1



[그림 2.2.25] 궤도 계측 시스템 2

(라) 궤도 모니터링 차량 계측시스템

궤도 모니터링 차량 계측시스템은 다음 그림과 같이 차량의 상태 Data와 궤도의 영상 Data를 계측, 저장하는 시스템으로 종합 계측시스템의 제어를 받는다. 궤도 모니터링 차량 계측시스템은 무선 Network를 이용하여 측정한 Data를 지상으로 전송한다.

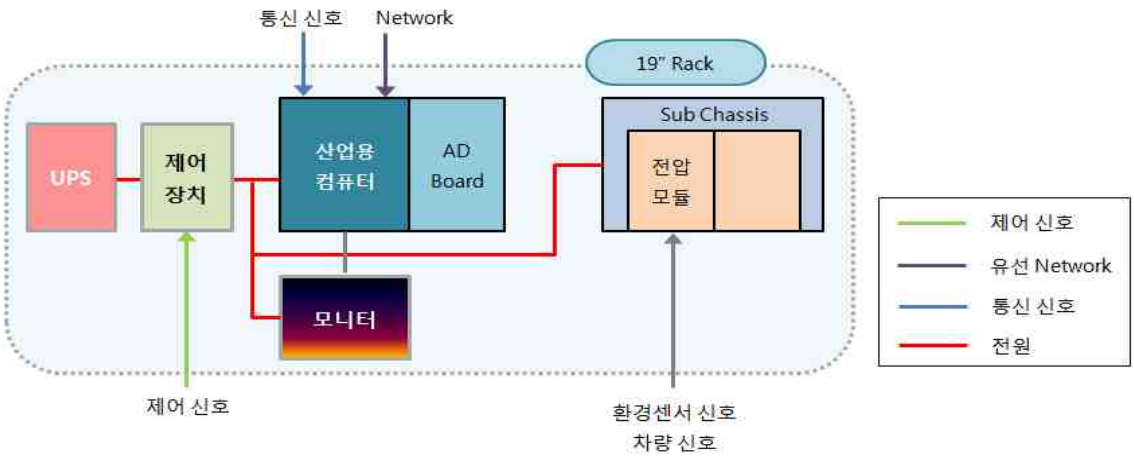


[그림 2.2.26] 궤도 모니터링 차량 계측 시스템 구성도

(마) 신호/통신/환경 계측시스템

신호/통신/환경 계측시스템은 다음 그림과 같이 차량의 위치와 통신 상태, 그리고

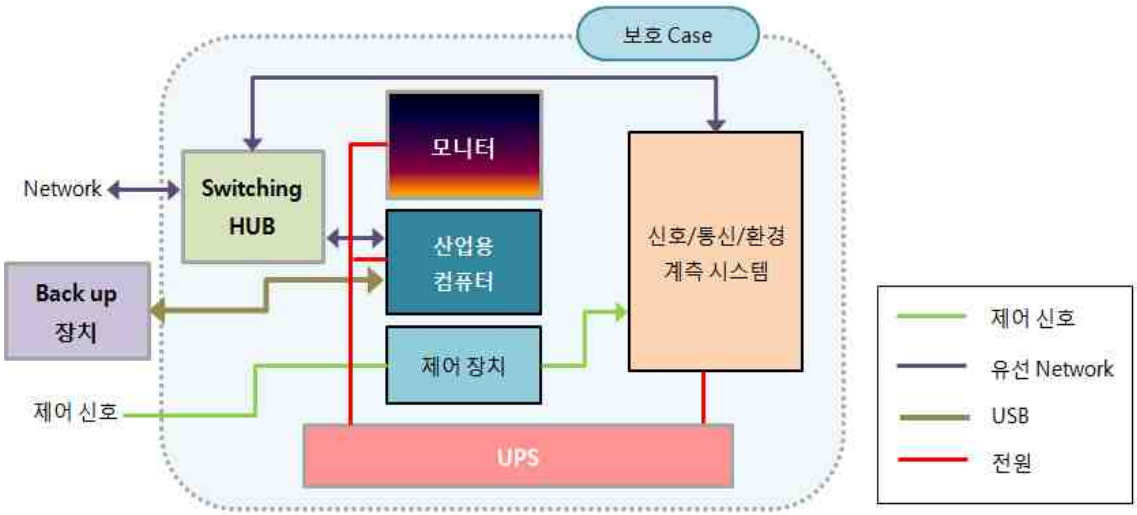
환경 Data의 계측 및 저장을 담당하는 계측시스템이다. 신호/통신/환경 계측시스템은 HUB에 연결되어 있으며, 종합 계측시스템의 제어를 받아 계측, 저장 및 모니터링을 수행한다. 신호/통신/환경 계측시스템은 UPS를 내장하고 있으며, 원격으로 전원의 ON/OFF가 이루어진다.



[그림 2.2.27] 신호/통신/환경 계측 시스템 구성도

(바) 종합 계측시스템

종합 계측시스템은 다음 그림과 같이 전체 계측시스템의 통신 및 작동 상태를 점검하고 현시한다. 종합 계측시스템은 전체 계측시스템에서 계측된 Data를 통합하여 모니터링하고 분석, 저장하는 기능을 수행하여, 원격으로 시스템 전체의 제어(계측, 저장, 종료, 시작)를 수행한다.

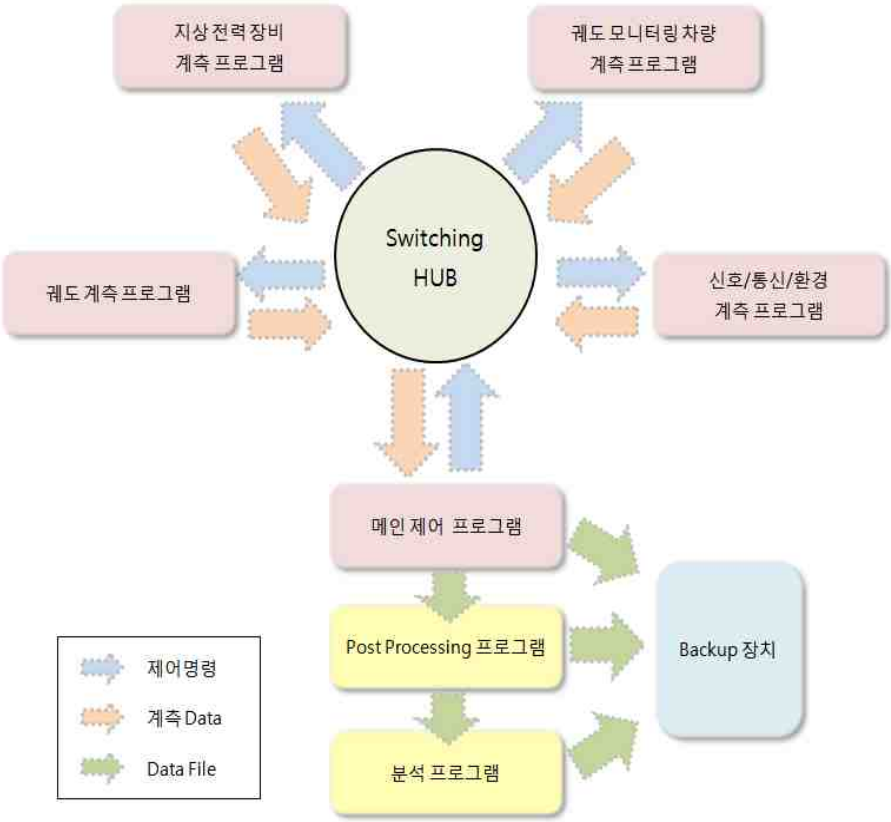


[그림 2.2.28] 종합 계측 시스템 구성도

(2) 계측시스템 소프트웨어 개발

(가) 소프트웨어 구성

종합 계측시스템 소프트웨어의 운영 프로그램 구성도는 다음 그림과 같다.



[그림 2.2.29] 운영 프로그램 구성도

① 계측 프로그램

계측 프로그램의 종류는 지상 전력 장비 계측 프로그램, 궤도 모니터링 차량 계측 프로그램, 궤도 계측 프로그램 및 신호/통신/환경 계측 프로그램으로 구성되어 있으며 다음과 같은 기능을 가지고 있다.

- 실시간 Data 계측
- 실시간 계측 Data 네트워크 전송
- 측정 Data 채널간 동기화
- 계측 시스템 점검
- 실시간 Data 모니터링
- 채널 설정
- 채널 Calibration 및 Calibration 파일 저장
- 실시간 User Limit Check

▪ 실시간 Data 저장
▪ 사용자에 의하여 사용 및 저장 채널 설정 가능

② 메인 제어 프로그램

메인 제어 프로그램은 전체 계측 시스템을 제어하기 위해 채널 간 동기를 위한 제어 신호를 전송하여 각 계측 프로그램에서 전송한 Data를 실시간 모니터에 현시한다. 또한 사용자 필요시 전송받은 Data를 실시간 저장한다. 주요 기능은 다음과 같다.

▪ 실시간 Data 모니터링
▪ 실시간 Data 저장
▪ 사용자에 의하여 사용 및 저장 채널 설정 가능
▪ 연결된 계측 시스템 원격 제어
▪ 계측 시스템 네트워크 접속 상태 점검 및 표시
▪ 제어 신호 출력
▪ 실시간 KP 연산

③ Post Processing 프로그램

각 계측 프로그램에서 저장한 파일을 가공하여 채널 간 시간 동기를 맞추고, 분석 프로그램에서 사용 가능한 파일로 변환시키며, 전체 채널의 계측 정보를 저장한다. 도한 계측 Data 파일을 채널별로 분리하고 채널간의 연산 및 계산을 수행하며 별도의 채널로 저장하며, 계산 채널을 가상의 채널로 추가한다. (Jerk, 주행거리, 전력량 등) 주요 기능은 다음과 같다.

▪ 채널 별 Data 저장
▪ 채널 간 연산 및 가상 채널 추가 저장
▪ 이동거리 및 위치 계산
▪ 채널 간 시간동기 보정
▪ 시험 조건 기록 및 계측정보 파일 저장

④ 분석 프로그램

Post Processing 프로그램에 의해 처리된 파일을 읽어 Data를 분석하는 프로그램으로 다음과 같은 주요 기능을 지닌다.

▪ 전체 측정 Data Load 및 분석
▪ User 선택 일부구간 분석 및 측정시간 일치 후 채널 별 분석
▪ 디지털 필터 처리 및 분석
▪ FFT 분석
▪ 사용자 선택 구간 텍스트 파일(Text file) 저장
▪ X-Y Graph 분석
▪ Time-Y Graph 분석
▪ Report 출력 (Printer, JPG file)
▪ 선택 채널 텍스트 파일(Text file) 변환 및 Data 통계 처리

(나) 소프트웨어 운영

운영 프로그램은 한국내쇼날인스트루먼트 사(社)의 랩뷰(LabVIEW)를 사용하여 개발하였다. 운영 프로그램은 하드웨어를 구동하고 Data를 계측하는 (지상 전력 장비, 궤도 모니터링 차량, 궤도, 신호/통신/환경) 계측 프로그램과 전체 계측 시스템을 총괄·제어하는 메인 제어 프로그램, 측정한 Data를 가공하는 Post Processing 프로그램, 측정한 Data를 분석하는 분석 프로그램으로 구성한다. Switching HUB에 의해 Network로 연결된 전체 프로그램은 메인 제어 프로그램에 의해 원격으로 통제되며 계측 프로그램은 제어 명령에 따라 장치 간 시간 동기를 맞추고, 동기화된 Data를 실시간으로 메인 제어 프로그램에 전송하여 실시간으로 현시한다. 계측 Data의 저장은 Network Error에 따른 Data 손실을 막기 위해 각 계측 프로그램에 저장하고, 시험 완료 후 저장한 Data를 메인 제어 프로그램으로 전송한다. Post Processing 프로그램은 메인 제어 프로그램이 저장한 Data를 분석 프로그램에서 빠르고 정확히 사용할 수 있도록 Data를 가공하고 채널 간 동기를 보정하여 필요한 채널 간의 연산을 수행한다. 분석 프로그램은 처리된 Data file을 읽어 통합 분석 및 계측 시스템 별로 분석이 가능하며 필요시 선택 구간 및 채널의 저장이 가능하다.

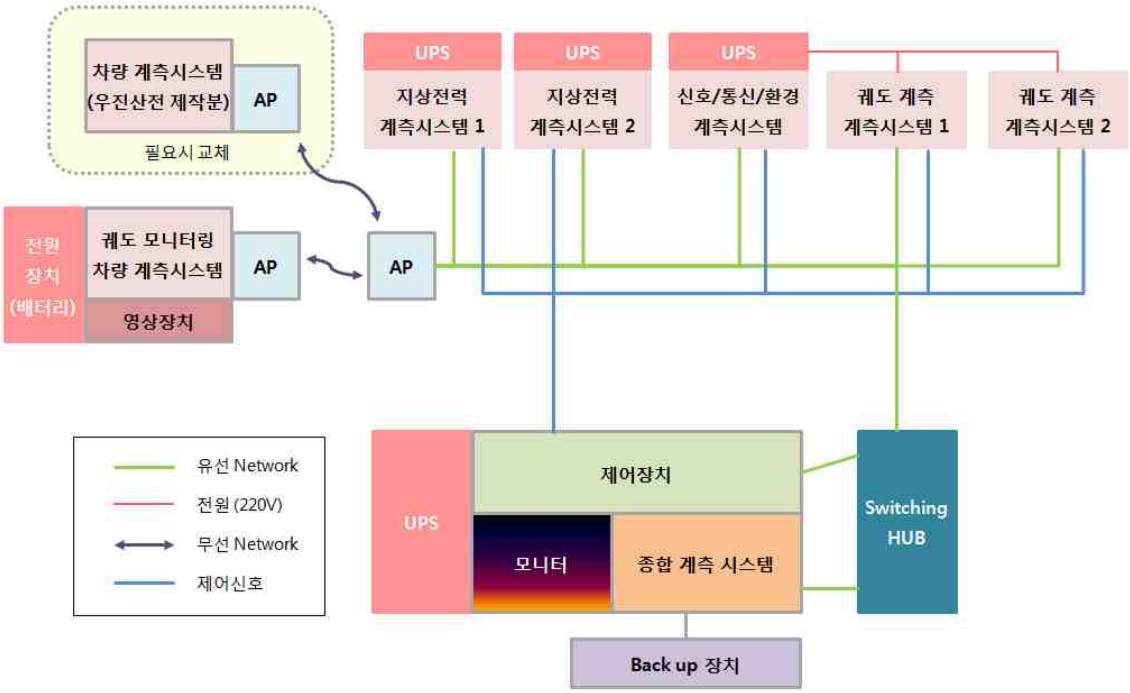
다. Lab Test를 통한 계측시스템 성능 확인

(1) Lab Test 수행 계획

계측시스템의 구성(지상전력 계측 시스템 1, 지상전력 계측 시스템2, 신호/통신/환경 계측 시스템, 궤도 계측 시스템1, 궤도 계측 시스템2, 궤도 모니터링 차량 계측 시스템, 종합 계측 모니터링 시스템), 장비들의 사양 및 통신 방법을 구분하여 동일한 구성을 가진 장비들을 각각 하나의 시스템으로 구성한 후 구성한 시스템들의 Data를 모아 종합계측시스템으로 모니터링한다.

(가) 전체 계측 시스템 구성

전체 계측 시스템 구성도는 다음 그림과 같다.



[그림 2.2.30] 전체 계측 시스템 구성도

(나) 전체 계측 시스템 구분

Lab Test를 위한 전체 계측 시스템 구분은 다음 표와 같다.

[표 2.2.11] 전체 계측 시스템 구분

계측 시스템 이름	시스템 구성 장비	시스템 구분	통신 연결
종합계측 시스템	통신전용 산업용 PC	계측모니터링전용	유선
지상 전력 계측 시스템	전력실 1 : PXI 시스템	윈도우 기반의 PC 계측	유선
	전력실 2 : PXI 시스템 SCXI 시스템	윈도우 기반의 PC 계측	유선
궤도 계측 시스템	궤도 1 : cRIO시스템	RIO 장비	유선
	궤도 2 : cRIO 시스템	RIO 장비	유선
신호/통신/환경 계측 시스템	산업용 PC, SCXI 시스템	윈도우 기반의 PC 계측	유선
궤도 모니터링 차량 계측 시스템	임베디드 PC cDAQ 시스템	윈도우 기반의 PC 계측	무선
차량 계측 시스템	장비 미정	미정	미정

위 표의 시스템 구분과 통신 연결을 기준으로 시스템 구성을 단순화한다. 단순화한 Test 구성도는 다음 그림과 같고 기능 설명은 다음과 같다.



[그림 2.2.31] 단순화한 Test 구성도

종합 계측(계측 모니터링)에서는 구성에 따라 분리한 각각의 계측시스템에서 계측

된 모든 데이터를 네트워크통신을 통해 전송받아 모니터링한다. 계측 시스템(윈도우 기반의 장비)은 윈도우를 기반으로 동작되는 계측시스템이고, 계측 시스템(cRIO 기반의 장비)은 cRIO의 컨트롤러에서 동작하는 계측시스템이다. 마지막으로 임베디드 계측(무선)은 윈도우 기반에서 동작하는 계측시스템이지만, 네트워크 연결 방법이 무선으로 연결된 시스템이다. 위 4가지의 시스템을 구성하고 Data의 전송 유무와 Data의 계측 유무의 테스트를 진행한다.

(다) 테스트 환경 구축

상기에 설명한 테스트 환경의 구축 모습은 다음과 같다.







[그림 2.2.32] PXI 시스템과 SCXI 장비



[그림 2.2.33] 임베디드 PC와 cDAQ 시스템



[그림 2.2.34] cRIO 시스템



[그림 2.2.35] 네트워크 허브

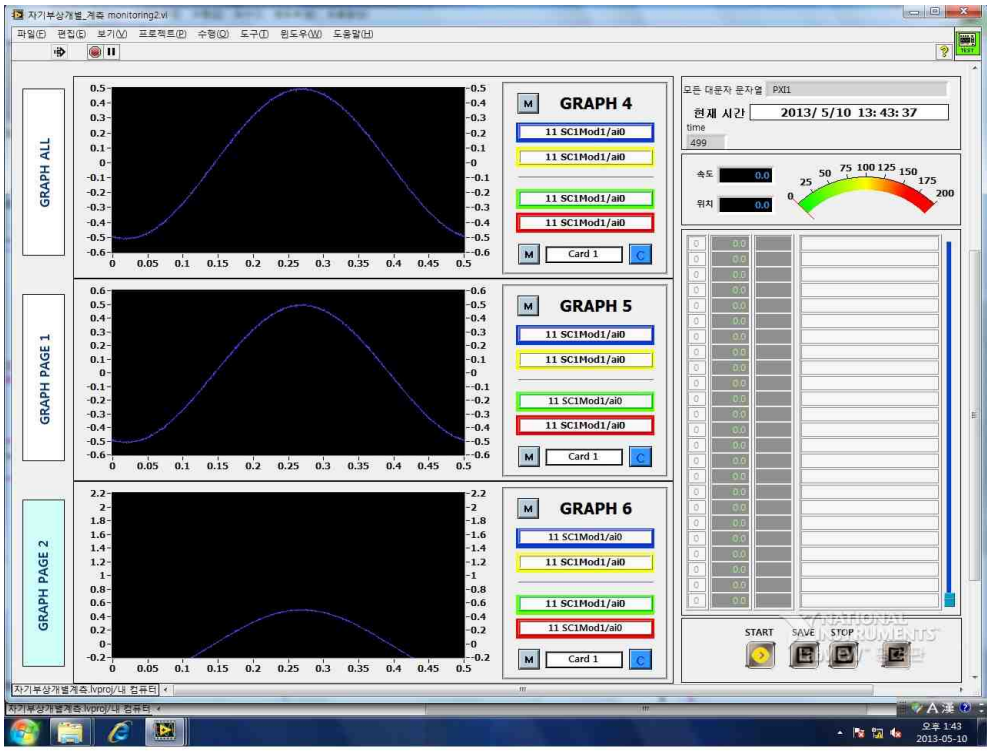
(2) Lab Test 상세 내용

(가) Lab Test 수행 내용 상세

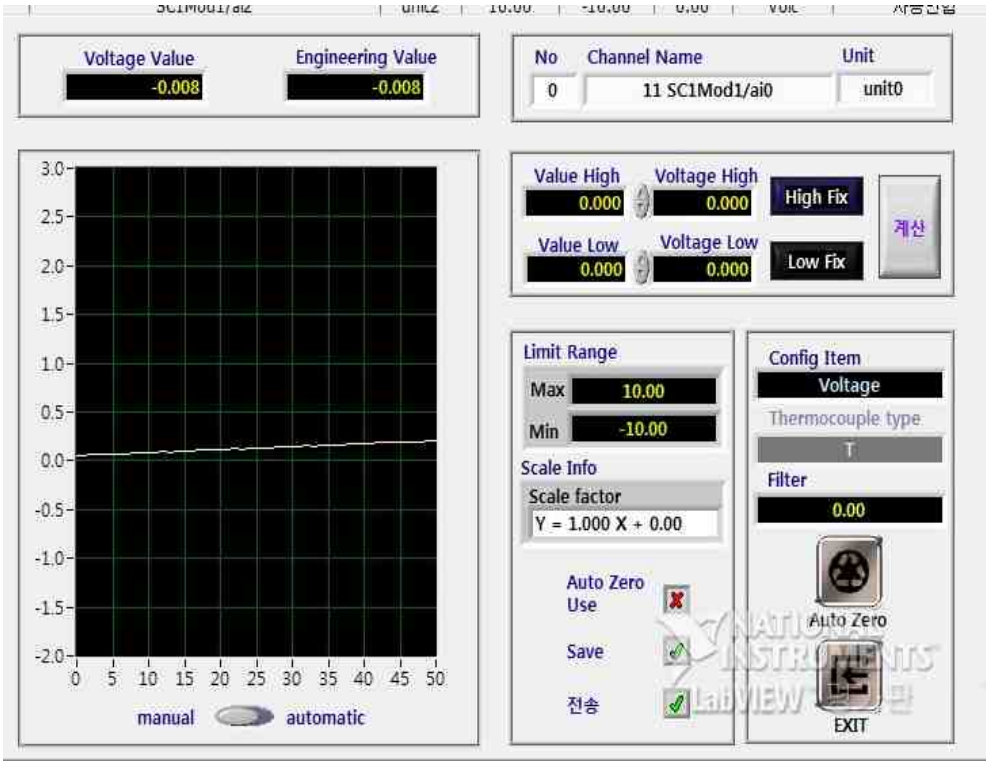
Lab test를 통해 전체적으로 종합계측(계측 모니터링) 장비에서 각 계측 장비에 계측 시작, 정지, 저장 명령을 네트워크를 통해 전달하고 전달된 신호에 맞게 계측의 시작, 정지, 저장이 이루어지는지 테스트한다. 세부적으로는 종합계측(계측 모니터링) 장비에서 계측 시작 버튼을 클릭하면 계측 시스템들이 대기 상태에서 계측 상태로 변경되고, 계측 상태로 변경되면 계측을 시작되며, 계측된 Data를 종합 계측(계측 모니터링) 장비로의 전송이 순조롭게 이루어지는지 확인하고 계측채널의 설정과 계측 속도에 변경이 가능한지 테스트한다. 종합계측(계측 모니터링) 장비에서 계측 정지 버튼을 클릭했을 때, 계측을 하고 있던 계측 시스템 장비들이 계측을 정지하고 대기 상태로 변경되고 계측 시스템 장비들이 대기 상태로 돌아가 종합계측 (계측 모니터링) 장비로의 Data 전송이 정지되는지 확인한다. Data 저장과 관련해서는 종합계측(계측 모니터링)장비에서 계측 저장 버튼을 클릭하면 저장 버튼이 ON 되어 있는 동안 계측 시스템의 Data를 저장하고 저장 버튼이 ON 되는 순간의 동기화된 시간을 기준으로 계측 시스템 장비들이 저장하고 동기화된 시간의 저장 파일이 생성되고 생성된 파일에 저장이 순조롭게 되는지 확인을 한다. 종합계측에서 계측 시작 이후 네트워크 통신으로 실시간 계측데이터를 수신 받아 모니터링 가능하도록 화면에 순조롭게 표현이 되는지, 그리고 각 계측 시스템에서 보내오는 데이터의 동기화가 잘 되는지를 확인한다. 확인방법은 각 계측시스템에 일부채널에 동일한 파형을 입력하고 계측시작 후 종합계측 모니터링에 출력되는 데이터들이 동일한 파형이 출력되는지를 확인하면 된다.

(나) Lab Test 진행

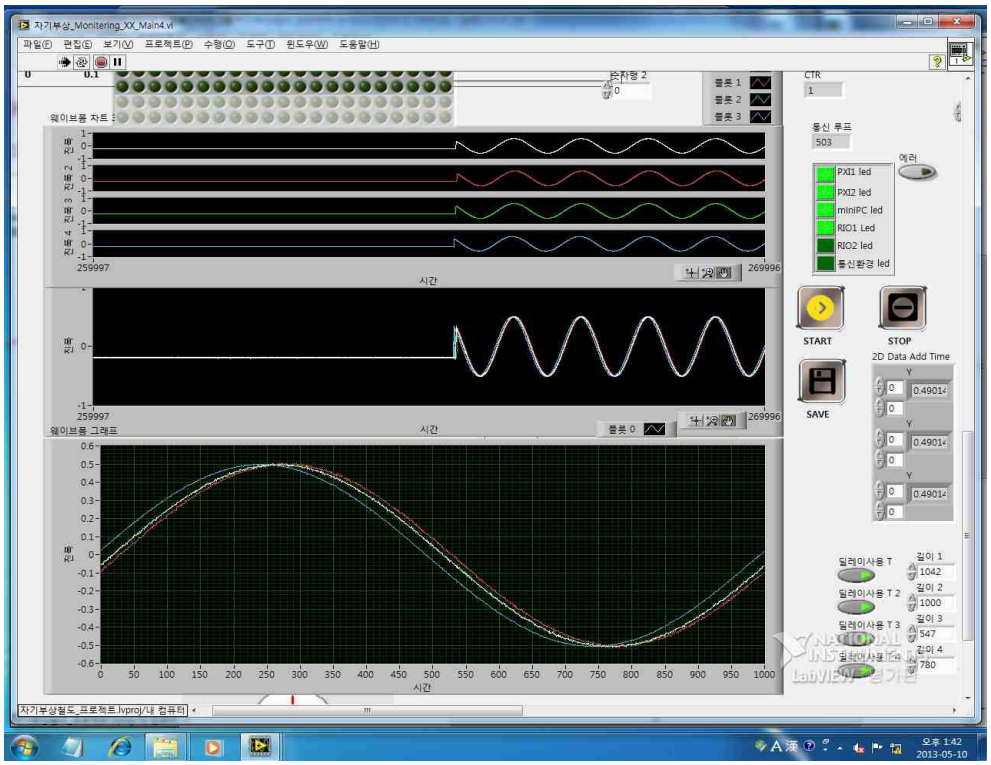
Lab Test 진행을 계측프로그램 화면을 이용하여 다음 그림과 같이 나타내었다.



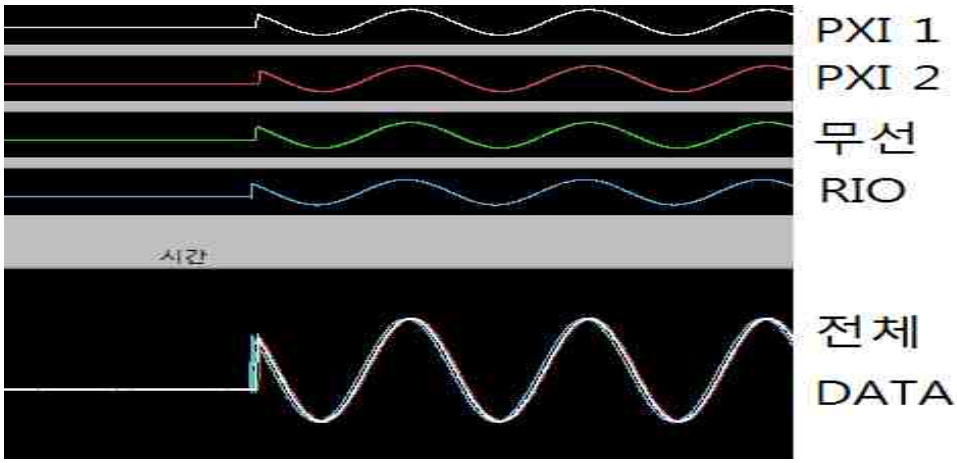
[그림 2.2.36] 계측시스템 테스트 프로그램 화면



[그림 2.2.37] 계측시스템 채널 설정 테스트 프로그램 화면



[그림 2.2.38] 종합 계측 동기화 테스트 프로그램 화면



[그림 2.2.39] 종합 계측, 파형에 동기화 테스트 화면

(라) Lab Test 수행 결과

상기에 설명한 Lab Test 수행 결과는 6. 기술개발 결과 및 검증 부분에 자세히 첨부하였다.

라. 성능계측시스템 구축

(1) 지상전력 계측시스템 하드웨어 구축

지상전력장비 계측시스템에 필요한 계측 Rack을 제작하였다. 계측 Rack은 계측선을 연결하는 단자대, 신호를 받는 계측 모듈과 이를 구성하기 위한 chassis, 수신된 신호의 변환을 위한 AD converter, 종합 제어를 controller 및 모니터로 이루어져 있다. 이와 같은 장비의 상세 사양은 다음 표와 같다.

[표 2.2.12] 지상전력 계측장비 상세 사양

Controller	Main Chassis
	
• CPU : 2.26 GHz Intel Core 2 Quad • RAM : 2 GB DDR2 RAM std, 4 GB max • HDD : 120GB • OS : Windows 7 • 10/100/1000BASE-TX (gigabit) Ethernet • ExpressCard/34 slot & 4 Hi-Speed USB ports • Integrated hard drive, GPIB, serial, and other peripheral I/O	• 4Slot for PXI/Compact PCI Modules and 8 SCXI Slot • AC 전압 : 90 ~ 264VAC (47 ~ 63Hz) • 최대전력 : 300W • Cooling Fans : 2 with filters • Cooling 용량 : 300W • 사용온도 : 0 ~ 50℃

보조 Chassis



- 4Slot 또는 12 Slot
- AC 공급전압 : 90 ~ 264VAC (47 ~ 63Hz)
- 최대전력 : 60W
- Cooling Fans : 2 with filters
- Cooling 용량 : 300W
- 사용온도 : 0 ~ 50℃

Isolation 전압, 온도 입력 Module



- 적용 Sensor 및 신호 : 전압, 온도
- 8 Isolated channels
- 333KS/s Sampling rate / any gain
- 300 Vrms Isolation
- 입력범위 : ±2.5mV ~±300V
- Non Linearity : ±0.02% FS

AD Board



- 정밀도 : 16 bit

임베디드 컨트롤러



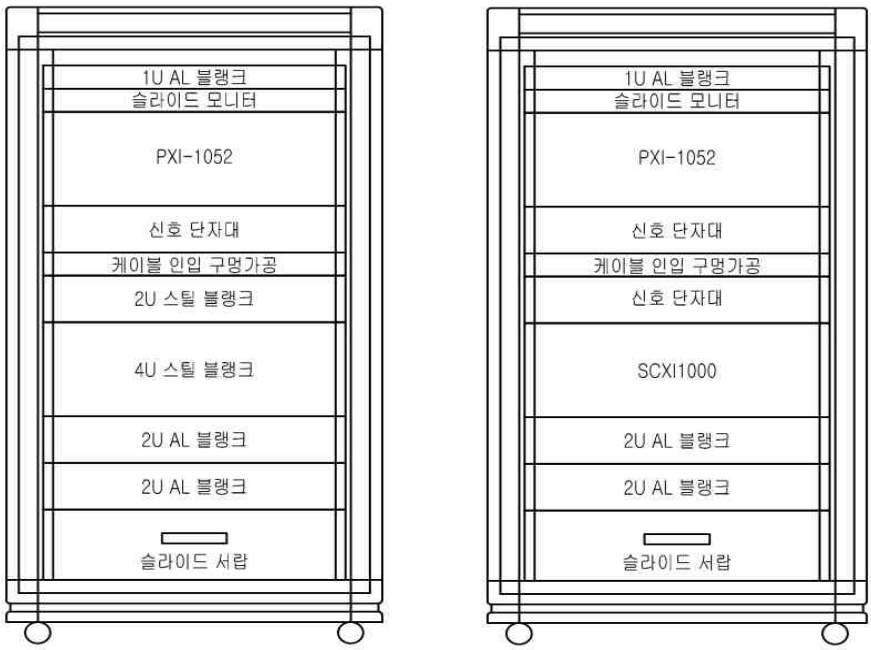
- 랙마운드형 모니터

• Sample rate : 1.25 MS/s • Analog and digital triggering • 4 analog outputs at 16 bits, 2.8 MS/s (2 µs full-scale settling) • 7 programmable input ranges (±100 mV to ±10 V) per channel • Up to 48 TTL/CMOS digital I/O lines (up to 32 hardware-timed at 10 MHz) • Two 32-bit, 80 MHz counter/timers • X1, X2, or X4 quadrature encoder inputs	• 17“ LCD Monitor • Full size keyboard • 터치패드 포함 • 해상도 : 1280*1024 • 키보드/마우스 PS/2 에뮬레이션 • Size : 534*480*44 mm (19인치/10) • 소비전력 : 220V 25W

다음과 같은 사양과 도면을 바탕으로 지상전력장비 계측시스템에 필요한 계측 Rack을 제작하였다. 각각의 rack에는 rack에서 계측상황을 바로 체크할 수 있도록 하는 슬라이드 모니터, controller인 PXI, 케이블 인입 구멍 및 신호 단자대가 있다. 전력실 2에는 추가로 필요한 계측항목을 위한 SCXI가 별도로 설치되어 있다. 제작 완료된 rack의 모습은 다음 그림과 같다.

[표 2.2.13] 지상전력 계측 Rack 제작 사양

메이커	큐빅
모델	CN 70
높이 (H)	1200 (22U)
넓이 (W)	600 / 내부 19″
깊이 (D)	750
앞문	유리도어
뒷문	스틸도어
사이드	스틸 / 래치타입
탑	스틸 / 팬
마운틴프레임	AL / 라인너트
전원	220V10WAY15A 1EA
색상	아이보리



전력실 1 전력실 2

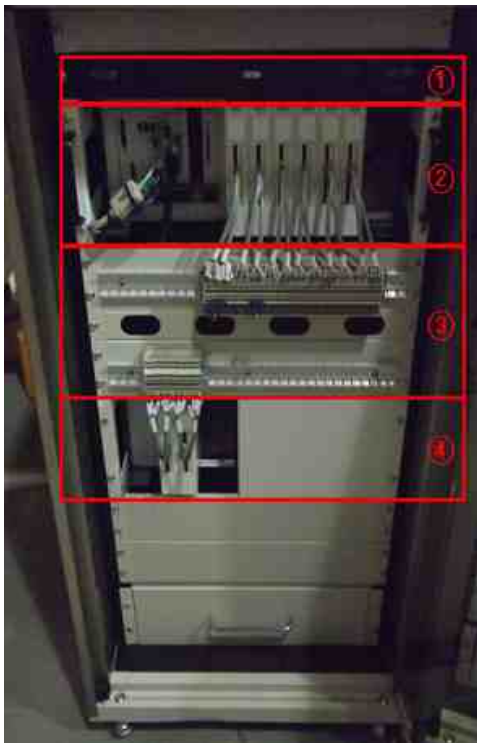
[그림 2.2.40] 지상전력 계측시스템 Rack 제작 구성도

전력실 1



① Rack mount monitor
② PXI 계측 장비
③ 단자대

전력실 2



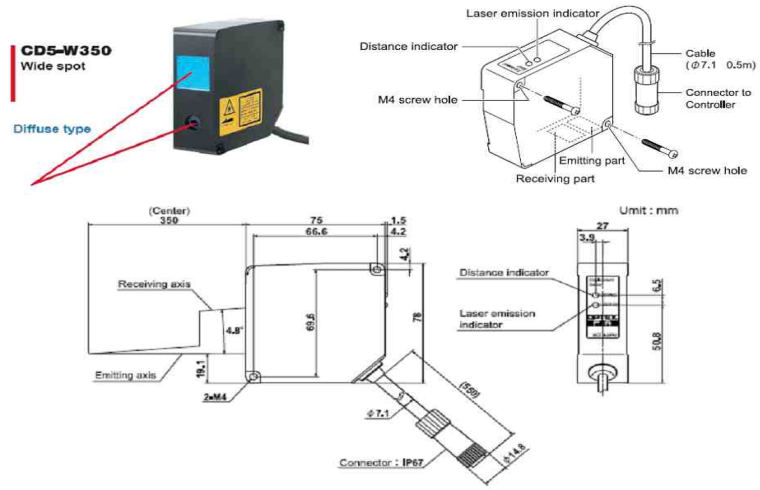
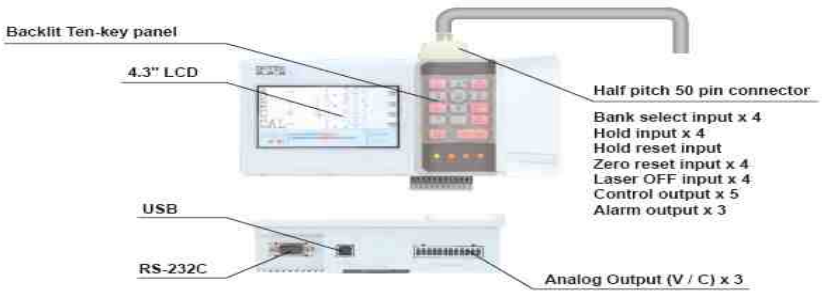
① Rack mount monitor
② PXI 계측 장비
③ 단자대
④ SCXI 계측 장비

[그림 2.2.41] 지상전력 계측시스템 Rack 제작 모습

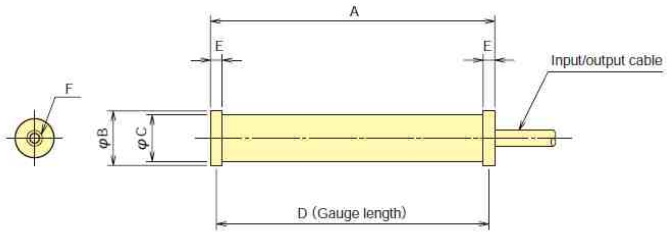
(2) 궤도 계측시스템 하드웨어 구축

궤도의 온도 측정은 thermocouple을 이용하여 LSM 권선의 u,v,w상의 표면과 코어 표면의 온도를 측정하고, 가속도계, 변위계 및 변형률계를 이용하여 차량 이동에 따른 궤도의 특성을 파악하도록 하였다. 각 센서에 대한 세부 사양은 다음 표와 같다.

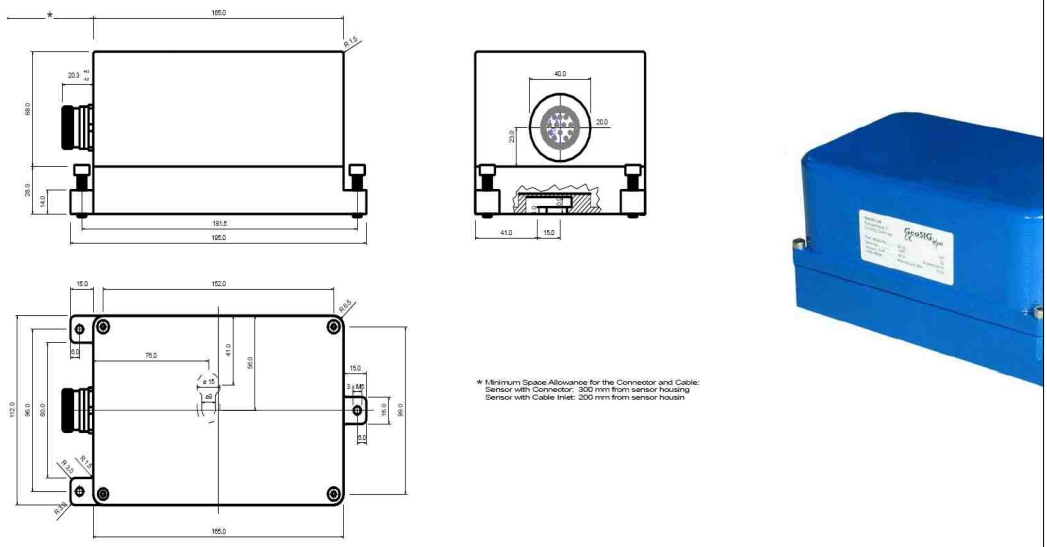
[표 2.2.14] 레이저 변위계 사양

목적	현재 설계가 완료된 초고속 자기부상 단거리 시험선의 가이드웨이에 설치하여 가이드웨이 Beam의 연직 및 수평 변위를 계측하여 거동을 분석함
품명	레이저 변위계(CD5-W350)
제조회사	일본 OPTEX
작동이론	레이저 Head의 송신기에서 발사된 레이저는 타겟에 다다른후 반사되어 수신기로 입사된다. 발사된 레이저와 입사된 레이저의 위상차 등을 이용하여 타겟의 위치 변화량을 계산하여 그 값을 측정한다.
사양 (센서)	광학형식(Optic Type) : 발산형 (Diffuse) 측정거리 : 350 ㎜ ± 100 ㎜ Resolution : 5 μm (0.005㎜) Sampling rate : 800 μs (1,250Hz)
사양 (컨트롤러)	레이저 변위 센서 연결용(3개 채널) Analog output : Voltage ±10V/F.S., Current 4 to 20mAF.S.
장비의 상세도 (센서)	
장비의 상세도 (컨트롤러)	

[표 2.2.15] 변형률계 사양

목적	현재 설계가 완료된 초고속 자기부상 단거리 시험선의 가이드웨이에 설치하여 가이드웨이 Beam의 응력을 측정함
품명	변형률계 (KM-100B)
제조회사	일본 Tokyo Sokki
작동이론	전기 저항이 전기저항식 스트레인 게이지의 길이변화에 비례하여 변하며 저항 변화에 따라 길이 변화를 측정하여 변형률값으로 변환하여 준다.
사양	측정범위: ±5,000 με 측정방식: 전기저항식 비선형성: ±1.0% RO 사용온도범위: -20~+80℃
장비의 상세도	 
설치방법	설치위치를 선정한 후 설치할 곳을 정확히 표시한다. 설치위치에 센서 설치용 지그를 단단하게 고정한다. 고정이 완료된 지그에 변형률계를 단단하게 고정한다. 변형률계는 케이블과 연결시키고 연결된 케이블은 계측기에 연결한다. 설치가 완료되면 초기치를 설정한 후 주변을 마무리 정리한다. 케이블은 측정위치의 길이만큼 설정한 후 주변을 마무리 정리한다.

[표 2.2.16] 가속도계 사양

목적	현재 설계가 완료된 초고속 자기부상 단거리 시험선의 가이드웨이에 설치하여 가이드웨이 Beam에 미치는 진동의 영향을 계측하여 거동을 분석함
품명	지진 가속도계(AC-73)
제조회사	스위스 GEOSIG
작동이론	mass-spring 시스템을 기반으로 한 서보 가속도계로 평형력 가속도계(force balanced accelerometer)의 원리는 검전기(position detector)의 자기장에 한 질점(mass)이 놓여 있는데, 감지장치가 위치변동을 일으키면 질점 위치가 변화하여 중력의 작용 방향으로 기울어지게 되며 이로 인하여 검전기에 전류의 변화가 일어나게 되고 이것은 서보진폭기(servo amplifier)를 통해 복원 코일(restoring coil)로 feedback된다.
사양	측정범위: ±0.5~±4g 사용온도: -20~70℃ Bandwidth from DC to 200Hz
장비의 상세도	
설치방법	지진계를 설치할 장소 및 방향을 정확하게 확인한다. 센서를 설치할 장소(표면)에 이물질이 있으면 깨끗하게 제거한 후 센서 위치를 표시한다. 전동공구(Drill)를 이용하여 천공한 후 특수 제작된 앵커 및 볼트를 고정한다. 센서 하부에 볼트를 끼우고 센서 측면의 볼트를 들어 올려 센서를 고정한다. 센서 고정이 완료되면 센서의 3방향이 정확한지를 확인한다. 센서의 측정 Cable을 자동계측기 위치까지 배선한 후 자동계측기와 연결하기 이전에 센서의 정상작동 여부를 재확인한다. 설치에 이상 없음이 확인되면 센서 보호용 Cover를 씌워준 후 배선 및 결선을 마무리한다.

궤도의 길이가 150m로 길기 때문에 전압강하 방지와 노이즈 최소화를 위하여 두

곳으로 나누어 분산계측시스템을 구축하도록 하였고, 외부환경임을 감안하여 외부에서 동작이 가능한 임베디드용 계측장비를 이용하여 구성하였다. 이와 같은 계측장비에 대한 상세 사양을 다음표에 나타내었다.

[표 2.2.17] 궤도 계측장비 상세 사양

<table>
<tr>
<td>임베디드 컨트롤러
 
• Model : cRIO - 9024
• Memory : 512 MB
• 저장용량 : 4 GB
• 10/100Base TX Ethernet Port 포함
• RS 232 Serial Port 포함
• Input Power : 9~35V DC
• 사용온도 : -40~70℃</td>
<td>임베디드용 전압 모듈
 
• Model : cRIO - 9239
• Input Range : ± 10V DC
• Channel 수 : 4 ch
• Resolution : 24 Bit
• Sample Rate : 50 KHz / Ch
• 사용온도 : -40~70℃</td>
</tr>
<tr>
<td>임베디드용 온도 모듈
 
• 250 Vrms channel-to-channel isolation
• 최고 1,200 S/s를 위한 고속 모드 (집적)
• 내장된 CJC (냉접점 보상)</td>
<td>임베디드용 스트레인 모듈
 
• 최대 10 V의 내부 여기
• 4개의 동시 샘플된 아날로그 입력, 50 kS/s
• 1,000 Vrms 변이 절연</td>
</tr>
</table>

<table>
<tr>
<td>• 오프셋 에러 보상용 자동 영점 조절 채널
• 최고 0.02 ℃ 측정 민감도를 위한 24 비트 ADC
• J, K, T, E, N, B, R, S 유형 지원</td>
<td>• 프로그램 가능한 하프 및 풀 브리지
• 120 Ω 및 350 Ω 쿼터 브리지 측정용 액세사리 사용 가능
• 24비트, RJ-50 커넥터 지원 ±25 mV/V 아날로그 입력
• 40 to 70 ℃ operating range
• Terminal adapter, cable 포함</td>
</tr>
<tr>
<td>임베디드용 Chassis
 
• 슬롯 개수 : 8 slot
• 운영시스템/타겟 : FPGA
• 소비전력 : 5.9W
• 사용온도 : -40~70℃</td>
<td>전원장치
 
• Input Voltage : AC 90~132V/180~264V
• Output Voltage : 24V DC
• Output Current : 6.2A
• Ripple : 150mv Max
• Efficiency : 80%
• Over current Protection : 110%
• Operation Temp. & HUMID : -10~50℃, 20~90% RH</td>
</tr>
</table>

이와 같은 장치를 이용하여 다음 그림과 같이 궤도 계측시스템을 제작하였다. 궤도 계측시스템은 외부환경에 노출되기 내환경성을 지니도록 설계, 제작하였으며, 별도의 전원장치를 이용하여 장비에 전원을 공급하도록 하였다. 또한 아래 표와 같은 사양의 UPS를 전력실 및 궤도의 계측시스템에 별도로 추가 설치하여 비상사태에 대비할 수 있도록 하였다.



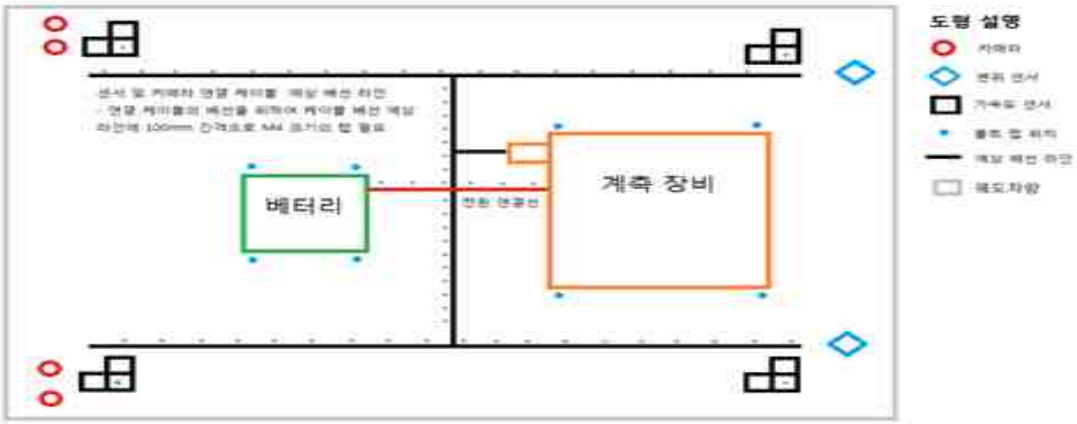
[그림 2.2.42] 궤도 계측시스템 제작 모습

[표 2.2.18] UPS 사양

제조사	APC	
모델명	SUA1000RMI2U	
출력	출력용량	650 Watts / 1000 VA
	공칭 출력 전압	230 V
	파형	정현파
입력	공칭 입력 전압	230 V
	입력 주파수	50/60 Hz
	입력배선 연결	IEC-320 C14
	허용 입력 전압 범위	160~280 V
배터리 & 정전보상시간	배터리 유형	무보수 무누액 연축전지
	일반적인 충전시간	3시간
외형	최대 높이	89.00 mm
	최대 폭	432.00 mm
	최대 깊이	457.00 mm
	랙 높이	2U
	중량	28.18 kg
		

(3) 궤도모니터링 차량용 계측시스템 하드웨어 구축

초고속 자기부상철도의 경우 차량이 궤도에 부상한 상태로 운행하기 때문에, 궤도의 상태는 승차감을 좌우하는 중요한 요소가 된다. 따라서, 이러한 궤도의 상태를 수시로 점검하여 수정할 필요가 있으며, 이를 위하여 본 과제에서는 궤도모니터링 차량을 구축하였다. 궤도모니터링 차량에는 다음 그림과 같이 stator pack offset을 측정하는 변위센서, 차량의 가속도 및 자이로 성분을 측정하는 센서와 궤도의 상면을 영상으로 촬영하기 위한 CCTV가 설치가 된다. 측정된 데이터는 무선통신을 통해 제어실로 송신이 되도록 무선 통신 시스템을 구축하였다.



[그림 2.2.43] 궤도 모니터링 차량용 계측시스템 구성도

궤도모니터링 차량에서 사용되는 센서 및 계측장비에 대한 설명이 각각 다음 표에 나타나 있다.

[표 2.2.19] 궤도모니터링차량용 가속도 센서 사양

목적	초고속 자기부상철도 모니터링 차량에 부착하여 궤도의 상태를 계측하기 위한 목적임
품명	가속도계 : 3711 Series, PCB
사양	Sensitivity(± 5 %) 66.7 mV/g Measurement Range ± 30 g pk Frequency Range(± 5 %) 0 to 1.0 kHz / Frequency Range(± 10 %) 0 to 1.5 kHz Resonant Frequency ≥ 4 kHz Phase Response(100 Hz) <5 ° Broadband Resolution(0.5 to 100 Hz) 034 m/s² rms Non-Linearity ≤ 1 % ≤ 1 % [6] Transverse Sensitivity ≤ 3 % Overload Limit(Shock) ± 3000 g pk Temperature Range(Operating) -54 ~ +121 °C Temperature Coefficient of Sensitivity ± 3 % Zero g Offset Temperature Coefficient ± 2 %FSO ± Excitation Voltage 6 to 30 VDC Current Consumption ≤ 10 mA ≤ 10 mA / Output Impedance ≤ 100 ohm ≤ 100 ohm Size (Height x Length × Width) 0.45 in × 0.85 in × 0.85 in 11.4 mm × 21.6 mm × 21.6 mm Weight : 16.3 gm / Electrical Connector 4-Pin 4-Pin
장비의 상세도	

[표 2.2.20] 궤도모니터링차량용 자이로 센서 사양

목적	초고속 자기부상철도 모니터링 차량에 부착하여 궤도의 상태를 계측하기 위한 목적임
품명	자이로센서 : mySen-B, HYFUN
사양	Input Range : Rate of Turn : ±300 deg/s(Standard), Acceleration : ± 4G (Standard) Static Accuracy : Roll, Pitch : <0.5 deg, Heading : <1 deg Dynamic Accuracy : 2 deg RMS / Angular Resolution : 0.05 deg Update Rate : 100Hz Digital interface : RS-232 and USB Operating Voltage : 5V DC Power Consumption : 2.2W(nominal) Dimensions (W*L*H) : 50*50*29mm / Weight : 50g
장비의 상세도	

[표 2.2.21] 레이저 변위 센서 사양

Model	DT50-n1114
사양	Analog output : 1 x 0 V ~ 10 V (≥ 5 kΩ) Resolution analog output : 16 bit Output type : 1xNPN(100mA) Hysteresis : 10 mm ~ 1,000 mm Supply voltage Vs : DC 15 V ~ 30 V Power consumption : ≤ 2.1 W Initialization time : ≤ 250 ms Warm-up time : ≤ 15 min Connection type : Male connector, M12, 5-pin Weight : 200 g Enclosure rating : IP 65 Ambient temperature : Operation: -30 ~ 65 °C, Storage: -40 ~ 75 °C Max. rel. humidity : ≤ 95 %
장비의 상세도	

[표 2.2.22] 카메라 사양

Model	VN37CSHR-W4IR
사양	촬상소자 : 1/3″ Sony Super HAD 수평해상도 : 500 TV Lines 동기방식 :Internal Visible Distance at ″0″ lux dark (IR on) : 12M LED Spectrum & IR No. : 850nm(20°) x 7 IR 사용전원 : 12VDC / 210mA or less IP 등급 : IP68 영상출력 : 1.0Vp-p Composite. 75 Ohms S/N 비 : More than 50dB (AGC Off) 감마보정 : r=0.45 화이트밸런스 : 2100°K ~ 9100°K Auto 이득조정 : 4dB ~ 30dB Auto 스미어현상 : 0.01% MTBF : 20,000 hours 사용렌즈 : 기본 f=4.3mm (78°), 옵션 3.6 / 4.3 / 6.0 / 8.0 / 12 / 16mm 동작온도 : 14°F ~ 122°F (-10°C ~ +50°C) 동작습도 : Within 90% RH 출력단자 : 1foot(30cm) waterproof 4 Pin DIN-male + 1foot 4 Pin DIN-female Short cable (Total 2ft long cable set) 크기(mm) : 37ϕ × 89(L) 중량(g) : 650
장비의 상세도	

[표 2.2.23] DVR 사양

Model	HVR-960H04S
사양	압축방식 : H.264 High Profile 성능 : Pentaplex (라이브. 녹화, 재생, 백업, 네트워크접속) 비디오 입력 (아날로그) : 4 채널입력 (960H/D1/CIF) 비디오 출력 : 1VGA, 1HDMI, 1메인 BNC 녹화해상도 : 960H/D1/CIF, 960x480, 720x480, 320x240 녹화방법 : 매뉴얼녹화, 움직임감지녹화, 연속녹화 사전녹화 : 30초 디지털 줌 : 마우스 드레그를 통한 디지털 줌 지원 저장 방식 : SATA(1HDD) 최대 하드 용량 : 2TB (2TB x 1ea) 제어장치 : 프론트 키버튼, 마우스, 컨트롤러(옵션) NTP Sever : Yes GMT Time Zone : Yes Auto DST : Yes 파워 아답터 : Free Voltage DC12V / 3A 사이즈(W x H x D) : 260(W) X 200(D) x 43(H)mm
장비의 상세도	

[표 2.2.24] 궤도 모니터링 차량용 계측장비 상세 사양

<table>
<tr>
<td>

USB용 Chassis



• 임베디드 머신 컨트롤 및 모니터링 시스템
• 컨트롤, 데이터 로깅 및 분석을 위한 400MHz 산업용 리얼타임 프로세서
• 맞춤형 I/O 타이밍, 컨트롤 및 프로세싱을 위한 2M 게이트, 8-slot FPGA Chassis
• 2개 10/100BASE-T 이더넷 포트, 주변 기기로의 연결을 위한 RS232 시리얼 포트
• 작동 온도 : -20 ~ 55℃

</td>
<td>

임베디드용 가속도 모듈



• Model : NI 9234
• 운영시스템/타겟 : 리얼타임, Windows
• Channel 수 : 4 ch
• Resolution : 24 Bit
• Sample Rate : 23.04 KHz
• 동시 샘플링 가능
• 사용온도 : -40 ~ 70℃

</td>
</tr>
<tr>
<td>

임베디드용 컴퓨터



• Intel® AtomTM D510 1.66 GHz processor + Intel® ICH8-M chipset
• Rugged, -20℃ ~ 70℃ fanless operation (w/industrial SSD)
• Built-in 9 VDC ~ 32 VDC wide-range DC power input
• 1GB DDR2 RAM
• 120GB 2.5″ SATA HDD
• Up to three 1000/100/10 Mbps Ethernet ports
• Windows XP
• Size : 210×170×53 mm

</td>
<td>

베터리



• 최대 2시간 이상 지속
• 여분 배터리1개 이상 추가 운영

</td>
</tr>
</table>

상기와 같은 장비 및 센서를 이용하여 궤도모니터링 차량용 계측시스템을 다음 그림과 같이 구축하였다. 임베디드컴퓨터와 계측용 장비 및 무선통신 장치로 구성되어 있으며, 별도 전원 공급용 배터리가 부착되어 있다.



전체 구성도



속판 기구 배치 모습

[그림 2.2.44] 궤도모니터링 차량용 계측시스템 제작 모습

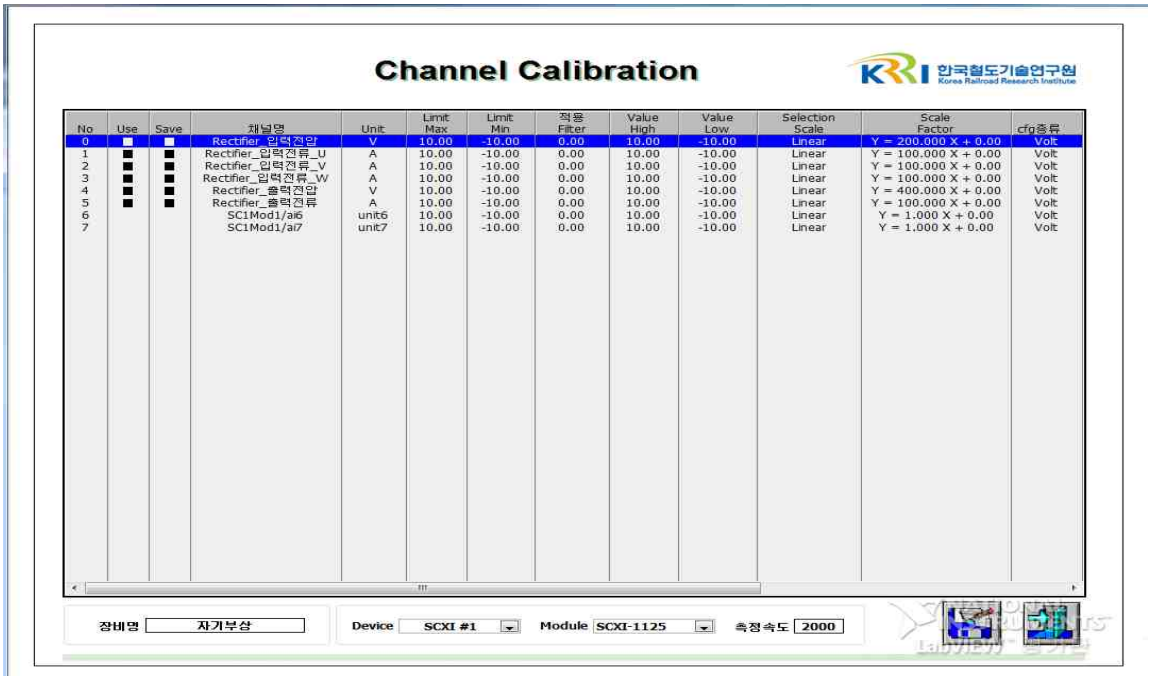
(4) 계측시스템 소프트웨어 구축

초고속 자기부상철도 계측시스템을 운영하기 위한 소프트웨어를 구축하였다. 초고속 자기부상철도의 계측시스템 프로그램은 채널 설정, 계측, 분석으로 구성되어 있어 각종 시험에 따른 데이터를 저장, 모니터링 및 분석할 수 있도록 구성되어 있다. 다음은 초고속 자기부상철도 계측시스템의 메인 화면을 나타낸다.



[그림 2.2.45] 초고속 자기부상철도 종합계측시스템 프로그램 메인화면

채널 설정은 다음 그림과 같이 계측을 위해 필요한 채널정보와 센서 Calibration 값을 설정하고 저장하는 부분이다. 여기서 각 항목 및 각종 버튼에 대한 상세 설명이 다음 표에 각각 나타나 있다.



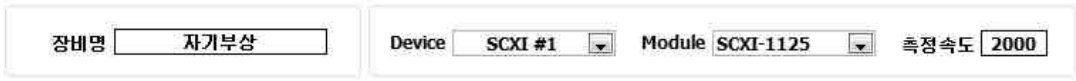
[그림 2.2.46] 채널설정 전체 화면

[표 2.2.25] Title item 상세 설명

No	Use	Save	채널명	Unit	Limit Max	Limit Min	적용 Filter	Value High	Value Low	Selection Scale	Scale Factor	cfg종류

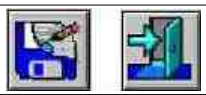
① No. : 선택한 모듈에 대한 채널 번호 (해당 모듈의 가능채널 수)
② Use : 해당 채널을 계측할 것인지 사용여부 확인 (계측 시 ■)
③ Save : 해당 채널을 저장할 것인지 저장여부 확인 (저장 시 ■)
④ 채널명 : 사용할 채널의 이름
⑤ Unit : 사용할 채널의 단위
⑥ Limit Max : 채널의 Limit Check를 위한 Limit 최대 값 설정치
⑦ Limit Min : 채널의 Limit Check를 위한 Limit 최소 값 설정치
⑧ 적용 Filter : 적용할 Lowpass Filter 값 (0일시 필터적용 안함)
⑨ Value High : 채널의 사용 물리량 최대 값
⑩ Value Low : 채널의 사용 물리량 최소 값
⑪ Selection Scale : 채널계산(환산) Scale 정보
⑫ Scale Factor : 채널계산 계산식 정보 (ex. Y = aX + b)
⑬ cfg종류 : 채널 Config 종류 정보 (전압, 온도, 주파수, 가속도.. 등)

[표 2.2.26] Device 와 Module 정보 및 측정속도 상세 설명



① 장비명 : 현재 사용 중인 컴퓨터의 이름
② Device : 계측시스템에 사용 중인 계측장비 리스트
③ Module : 현재 계측장비(PXI,SCXI,DAQcard 등)에 연결된 모듈리스트
④ 측정 속도 : Device별 측정 속도 설정 (같은device의 모듈은 모두 같다)

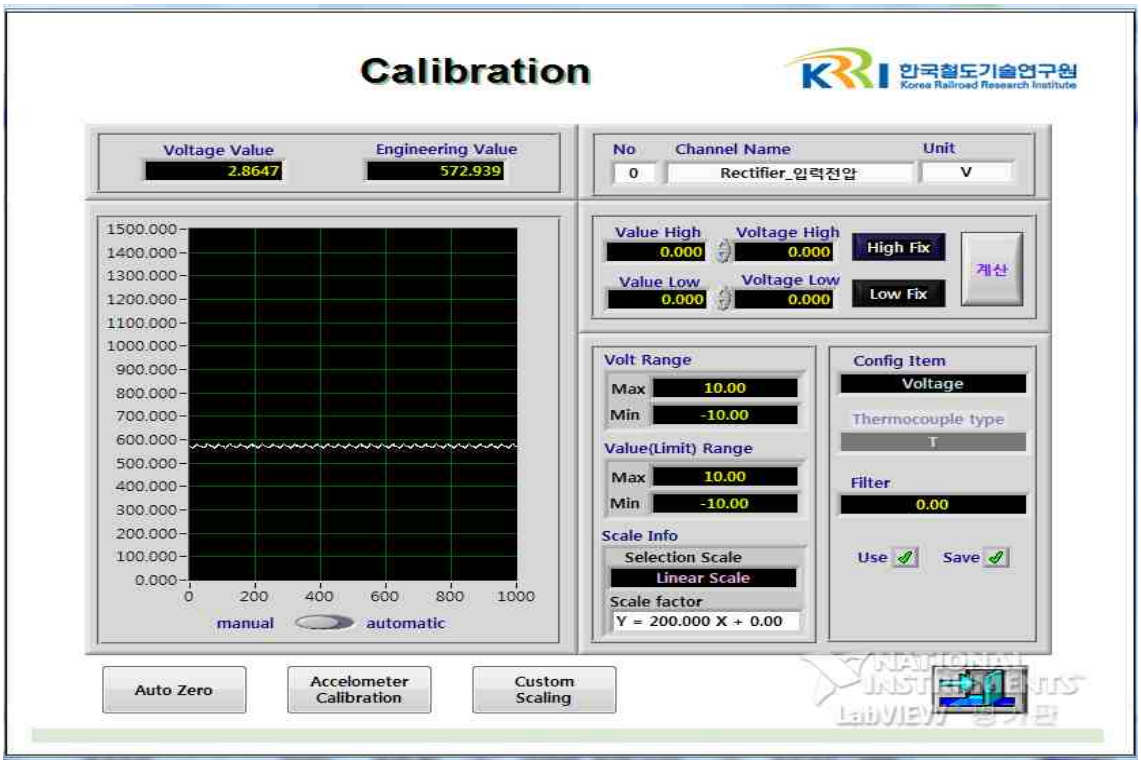
[표 2.2.27] Command button 상세 설명



①  저장 : SAVE 버튼으로 설정한 채널의 값을 장비명_config.cfg파일로 프로그램 폴더에 저장되며 다시 실행 시 저장된 File 값들을 읽어 설정화면에 Data를 표시한다.

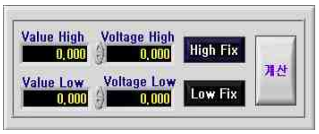
②  종료 : 채널설정을 종료한다.

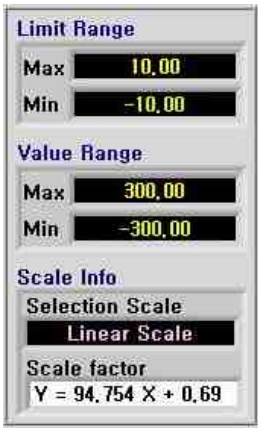
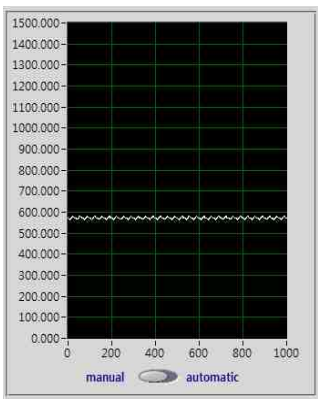
채널 calibration은 다음 그림과 같이 각 계측 항목에 대해서 측정값과 실제값을 보정 및 매칭시키기 위한 부분이다. 여기서 각 항목 및 각종 버튼에 대한 상세 설명이 다음 표에 각각 나타나 있다.

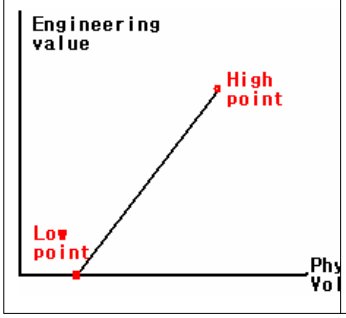


[그림 2.2.47] 채널 calibration 전체 화면

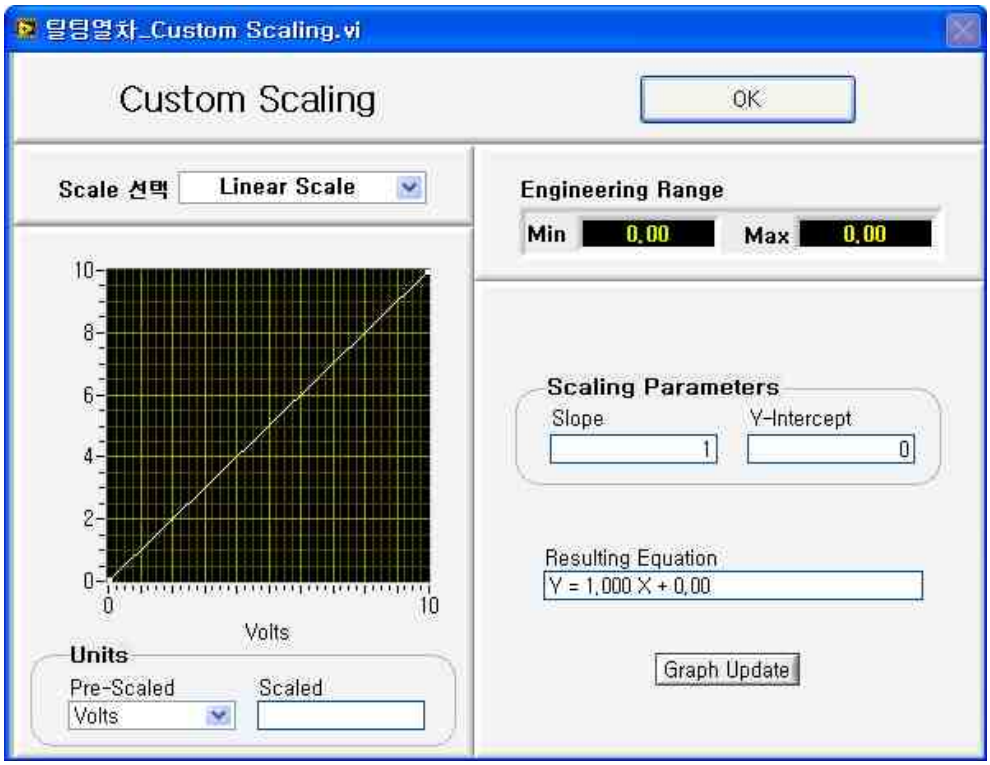
[표 2.2.28] 채널 calibration 관련 항목 상세 설명

	- 선택 채널의 채널번호, 채널이름, 채널단위를 입력한다. - No : 채널번호 (순서에 맞추어 자동으로 기록됨) - Channel Name : 채널의 이름으로 저장File의 채널이름으로 사용된다. - Unit : 채널의 단위
	- Value High : 인가한 전압 대비 환산 물리량 High값을 입력한다. - Value Low : 인가한 전압 대비 환산 물리량 Low값을 입력한다. - Voltage High : High Fix 시 현재 인가 전압을 Voltage High값으로 적용하기 위해 보여준다. - Voltage Low : Low Fix 시 현재 인가 전압을 Voltage Low값으로 적용하기 위해 보여준다. - High Fix : 현재 인가 전압을 Voltage High 값으로 적용한다. - Low Fix : 현재 인가 전압을 Voltage Low값으로 적용한다. - 계산 : 입력한Value High/Low값과 적용된 Voltage High/Low 값을 이용하여 보정 계산한다.

	- 수동 입력 계산 : 별도의 Calibrater를 사용하지 않을 때는 사용 전압대비 환산 물리량을 직접 입력한 후 계산만 클릭하여 계산 한다.
	- Physical Range : Channel Configuration 채널 정보 리스트에 입력될 Device DC Voltage 범위를 Max / Min 각각 입력한다. - Engineering Range : Channel Configuration 채널 정보 리스트에 입력될 Physical Range 대비 환산 값 범위를 Max / Min 각각 입력한다. - Scale Info : 기본 Linear Scale 및 사용자 스케일 중 선택한 스케일 방법과 방법에 따른 스케일 적용 식을 보여준다.
	- Config Item : 선택한 채널의 Config 종류를 설정한다.(센서별) - Filter : 계측 시 적용할 필터 값을 입력한다.(Lowpass Filter적용) - Use : 선택 채널의 계측 여부를 체크한다.(계측함  ,계측안함 ) - Save : 선택 채널을 저장 여부를 체크한다.(저장함  , 저장안함 )
	- Voltage Value : 채널 보정 확인용 인가전압 값 - Engineering Value : 채널 보정 후 인가전압 대비 환산 값
	- 그래프 : 현재 채널에 인가한 물리량을 그래프로 보여준다. - Manual & Auto : 그래프 Y축 Range를 사용자가 입력할 때 Manual로 두고 Auto로 두면 자동으로 인가 전압에 따라 Range가 수정된다.
	- Calibration 값이 적용된 후 Zero 값 보정 시 현재 값의 위치를 Zero로 보정한다.

	ICP타입의 가속도용 Calibration - 기준가속도: 가속도 Calibrator의 기준가속도 값을 입력한다. - Amplitude : 계산 적용 시 현재 인가된 Sine 파형의 Amplitude다. - Peak Frequency : 계산 적용 시 현재 인가된 Sine 파형의 Peak frequency 가 입력된다. - 계산 : 인가된 파형의 Amplitude와 Peak Frequency를 계산하여 나타낸다. - 완료 : 계산된 Calibration 값을 적용하고 마친다.
	- 기본 1차방정식의 스케일링 외의 사용자 스케일 적용 시 사용한다.
	- 채널보정 곡선 (기본 1차 방정식)

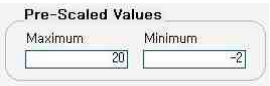
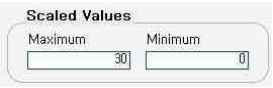
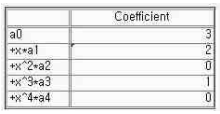
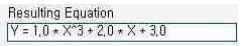
Custom scale에 대한 입력은 다음 그림과 같은 화면에서 이루어지며, 입력방법은 다음 표와 같다.



[그림 2.2.48] Custom scale 입력 화면

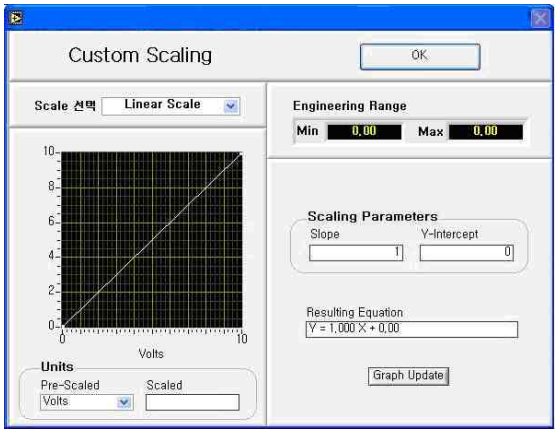
[표 2.2.29] Custom scale 입력 방법

Scale 선택 Linear Scale	- 선택할 스케일
Units Pre-Scaled Volts Scaled	- 적용할 단위
Engineering Range Min 0,00 Max 0,00	- Calibration에서 입력한 Engineering Range
Scale 선택 Linear Scale	- Scaling Parameter의 Slope 와 Y-intercept를 입력하여 Graph Update 를 클릭한다. - 입력한 Slope 와 Y-intercept를 적용한 결과식이 아래 Resulting Equation에 표시되며 입력되어 왼쪽 그래프에 결과식에 따른 그래프를 보여준다. - Unit 에 적용할 단위를 입력한다. - OK 클릭하여 완료한다.
Scale 선택 Map Range Scale	- 측정신호의 전압 Range를 Pre-Scale Values에 입력하고 Pre-Scale Values 대비 물리적인 값의 Range를 Scale Value에 입력한다. 그리고 Graph Update를 클릭하면 Scale을 적용한 결과가 왼쪽 그래프에 표시된다.

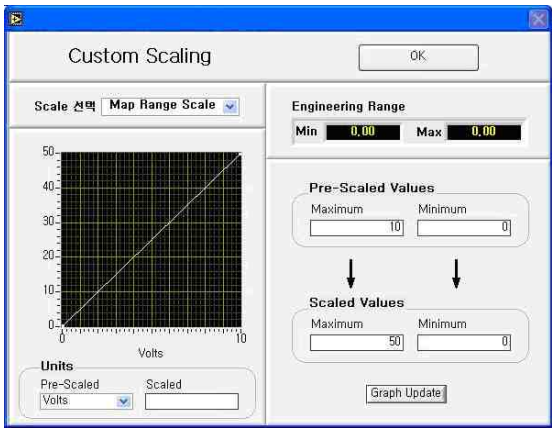
<table>
<tr><td></td><td>- 먼저 입력 데이터의 전압 Range를 Pre-Scale Values에 입력한다.
- Pre-Scale Values대비 물리적인 값의 Range를 Scale Value에 입력한다.
- Graph Update를 클릭한다.
- Range를 적용한 결과가 왼쪽 그래프에 표시된다.
-  : Calibration에서 입력한 Engineering Range
-  : 측정신호 전압 Range
-  : 물리적인 값의 Range</td></tr>
<tr><td>  </td><td>- 오른쪽 테이블에 다항식(최대 4차 다항식)의 항의 상수 값을 입력하여 식을 완성하면 입력한 계수와 상수를 적용한 결과식이 Re sulting Equation에 표시되며 Graph Update를 클릭하면 다항식을 적용한 결과가 왼쪽 그래프에 나타난다.
- 다항식 입력 Scale를 설정 시 사용한다.
- 오른쪽 테이블에 다항식의 항의 계수와 상수항 상수 값을 입력하여 식을 완성한다.
- 입력한 계수와 상수를 적용한 결과식이 아래 입력되어 표시된다.
- Graph Update를 클릭한다.
- 다항식을 적용한 결과가 왼쪽 그래프에 표시된다.
-  : Calibration에서 입력한 Engineering Range
-  : 다항식 입력 Table
-  : 물리량으로 적용할 방정식</td></tr>
<tr><td>  </td><td>- 오른쪽 테이블에 Pre-Scale(전압) 대비 적용할 데이터 값을 입력하여 테이블을 완성하고 Graph Update를 클릭하면 Table을 적용한 결과가 왼쪽 그래프에 표시된다.
- Table로 값을 정의하여 Scale을 설정 시 사용한다.
- 오른쪽 테이블에 Pre-Scale (전압) 대비 적용할 데이터 값을 입력하여 테이블을 완성한다.</td></tr>
</table>

	- Graph Update 를 클릭한다. - Table를 적용한 결과가 왼쪽 그래프에 표시된다. - Engineering Range Min 0,00 Max 0,00 : Calibration에서 입력한 Engineering Range - Pre-Scaled / Scaled 1 / 10 : 전압과 물리량을 입력하는 Table

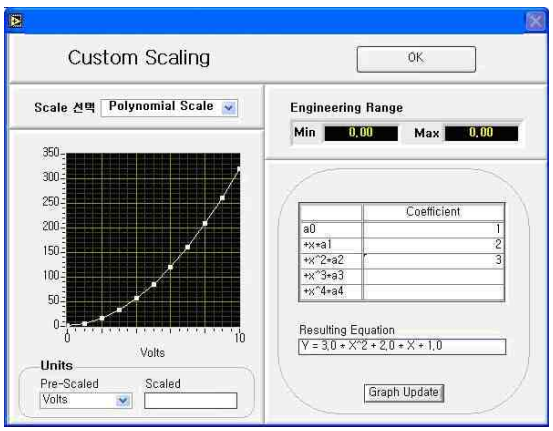
상기와 같은 방법으로 custom scale을 입력한 결과의 예가 다음 그림에 나타나 있다.



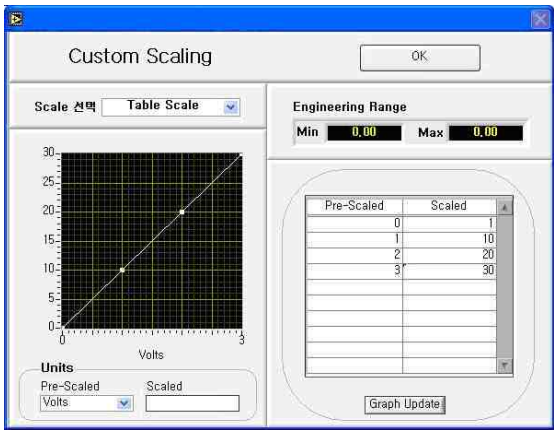
< Linear Scale 설정완료 화면 >



< Map Range Scale 설정완료 화면 >



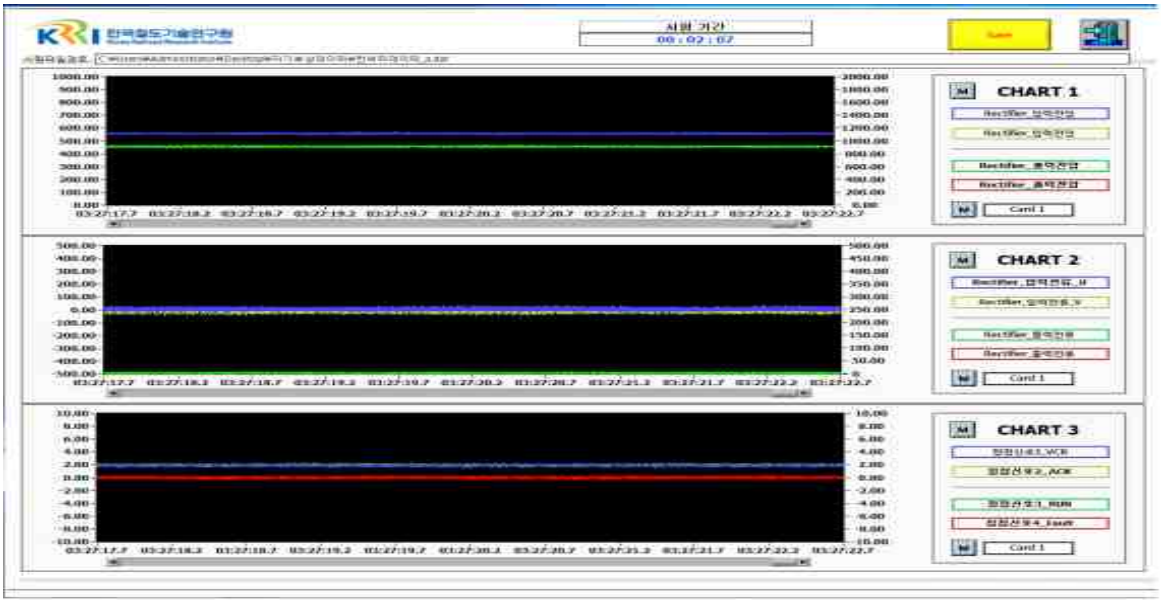
< Polynomial Scale 설정완료 화면 >



< Table Scale 설정완료 화면 >

[그림 2.2.49] Custom scale 입력 결과

채널설정에서 저장한 File 의 채널정보를 적용하여 다음 그림과 같이 Data를 계측하여 확인할 수 있고, 계측 Data를 저장할 수 있으며, 원하는 계측 Data를 선택하여 Chart로 볼 수 있다. 데이터 측정화면에 대한 자세한 설명은 다음 표와 같다.



[그림 2.2.50] 데이터 측정 화면

[표 2.2.30] 데이터 측정 화면 설명

M	그래프 화면 위/아래에 하나씩 있는 그래프 스케일 버튼이다. 위쪽버튼은 그래프 왼쪽 Y축 스케일을, 아래쪽 버튼은 오른쪽 Y축 스케일을 Auto/Manual로 설정하는 기능을 한다.
대차가속도(상하)ICP_BM3 대차가속도(상하)ICP_BM3 대차가속도(상하)ICP_BM3 대차가속도(상하)ICP_BM3	그래프에 모니터링 할 채널을 선택한다. 각 리스트의 색상이 그래프 데이터 색상이다.
Card 1	Device 선택 : 장비에 있는 디바이스를 선택하여 해당 디바이스의 전체 채널을 불러온다.
C	그래프 커서를 찾아주는 버튼이다. 그래프 위의 커서를 움직여 값을 확인한다.
시험 기간 00 : 02 : 07	시험 기간 : 시험 경과 시간을 보여준다.
Save	저장 : SAVE 버튼으로 측정한 계측 Data를 저장한다. 채널설정에서 Save 하기로 설정한 채널을 저장한다.
	종료 : 측정을 종료한다.

(5) 지상전력 계측시스템 시험가동

구축한 계측시스템을 이용하여 지상전력장비의 조합시험시 계측시스템 시험가동을 수행하였다. 다음 그림과 같은 컨버터와 인버터에 대해서 전압변동시험 및 정전시험을 수행할 때 각각의 입출력 전류/전압에 대해서 측정을 수행하였다. 데이터 출력은 그림과 같이 인버터 및 컨버터의 데이터 출력단자를 이용하여 계측시스템과 연결을 하였다.



< 컨버터 >



< 인버터 >

[그림 2.2.51] 컨버터 및 인버터 조합시험



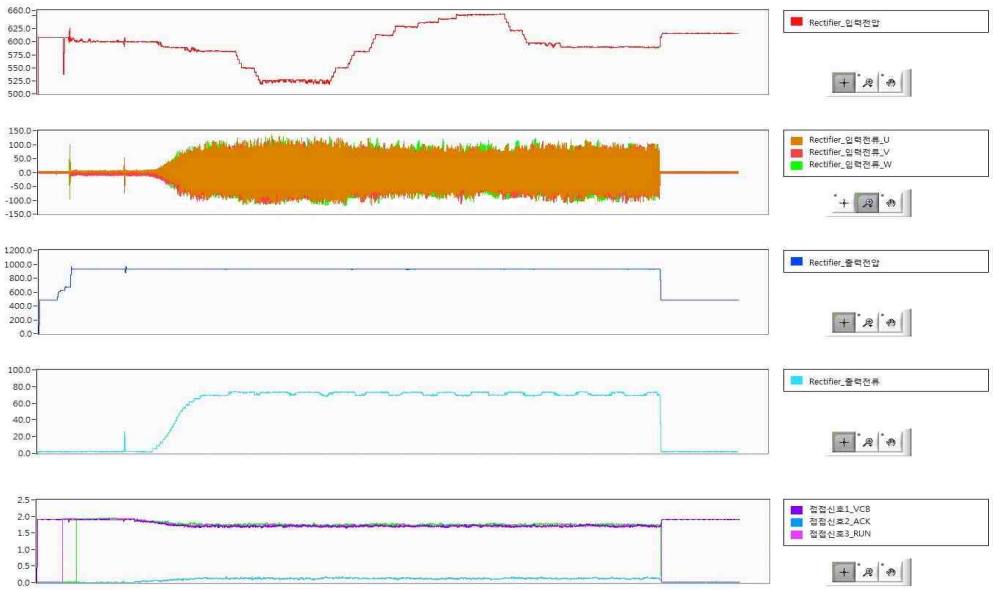
< 계측출력단자 >



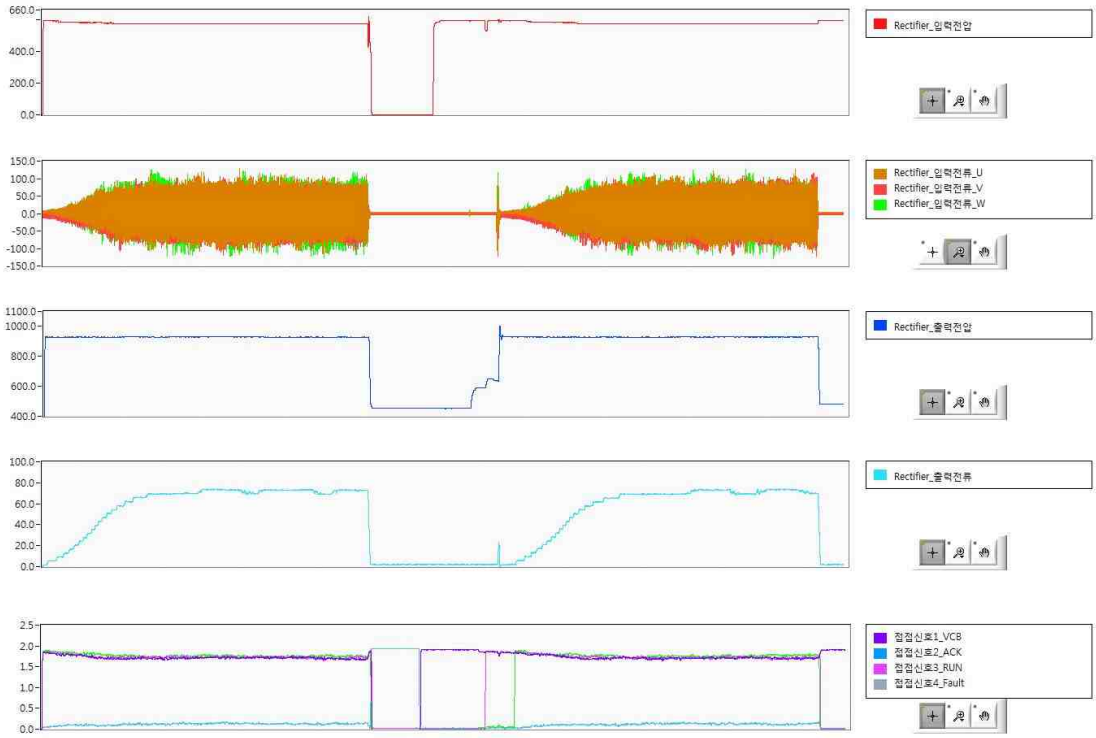
< 단자연결 및 모니터링 >

[그림 2.2.52] 계측시스템 연결 및 모니터링

전압변동시험 및 정전시험시 측정한 데이터의 그림이 다음에 나타나 있다. 전압변동에 따라 계측치가 일정하게 변화하고 있음을 확인할 수 있고 이에 따른 출력 전류의 모습도 변동하고 있음을 알 수 있다. 또한 정전시험에 따른 각 장비의 입출력 현황도 올바르게 모니터링 되고 있음을 확인할 수 있다.



[그림 2.2.53] 전압변동시험 계측 결과



[그림 2.2.54] 정전시험 계측 결과

마. 성능계측시스템 현장 구축 및 운영

(1) 지상전력 계측시스템 하드웨어 현장 구축

지상전력 계측시스템을 전력실 1과 전력실 2에 [그림 2.2.55]과 같이 설치하였다. 각각의 계측시스템에는 [그림 2.2.56]과 같이 모니터가 부착되어 있어 계측항목의 수정 및 캘리브레이션이 가능하도록 하였다. [그림 2.2.55]은 전력실 1과 전력실 2에 설치된 계측시스템 내부의 계측장치 및 배선 등을 보여주고 있다.



< 전력실 1 > < 전력실 2 >

[그림 2.2.55] 지상전력 계측시스템 현장 설치



< 전력실 1 > < 전력실 2 >

[그림 2.2.56] 지상전력 계측시스템 모니터



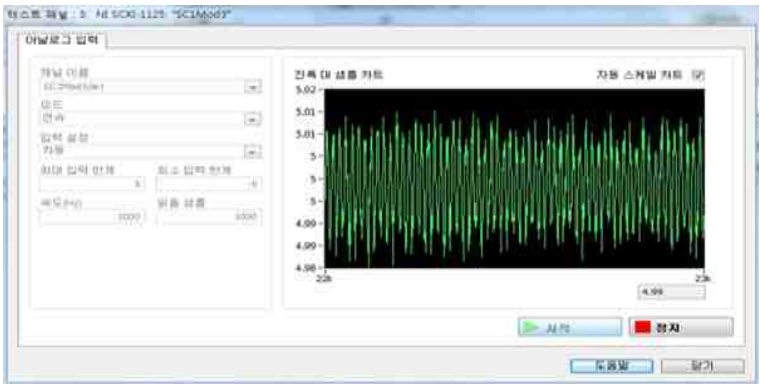
< 전력실 1 > < 전력실 2 >

[그림 2.2.57] 지상전력 계측시스템 내부장치 및 배선

이와 같이 각 전력실에 설치된 계측시스템은 유선랜을 통해 바닥을 거쳐 제어실의 종합계측시스템에 연결을 하였다. 배선을 한 뒤에는 [그림 2.2.58]와 같이 켈리브레이터를 이용하여 전원을 인가하고 화면에서 전압을 확인함으로써 배선이 양호하게 되었음을 확인하였다.



< 전원인가 1 >



< 인가 전압 확인 화면 >

[그림 2.2.58] 배선 양호 점검

(2) 궤도 계측시스템 하드웨어 현장 구축

궤도의 길이가 150m로 길어 계측신호선을 직접 종합모니터링시스템으로 연결하면 전압강하 문제가 발생할 수 있다. 따라서 약 50m와 100m 부근에 [그림 2.2.59]과 같이 두 개의 계측 단자함을 설치하였다. 단자함 내부에는 [그림 2.2.60]과 같이 전원공급장치와 계측장치로 구성이 되어 있다.



[그림 2.2.59] 궤도 계측 단자함



[그림 2.2.60] 궤도 계측 단자함 내부

초고속 자기부상철도는 궤도하부에에 설치된 LSM의 코어 및 코일에 [그림 2.2.61]와 [그림 2.2.62]과 같이 온도센서를 설치하였다. 설치된 온도센서에서 나온 선은 [그림 2.2.63]와 같이 배선을 하여 계측단자함으로 인입시켰으며 계측단자함에 인입된 선은 [그림 2.2.64]와 같이 측정장치에 연결하였다.



[그림 2.2.61] 궤도 LSM 코일 온도센서 부착



[그림 2.2.62] 궤도 LSM 코어 온도센서 부착



[그림 2.2.63] 궤도 온도센서 배선



[그림 2.2.64] 궤도 온도 측정 장치

궤도 계측단자함에서 종합계측시스템이 있는 제어실까지의 배선을 위해 [그림 2.2.65]과 같이 궤도 중앙에 설치된 파이프를 본선측 궤도 끝단에서 지상으로 내려 최종적으로는 건물 측벽을 통해 연결하였다. 제어실 내부에서는 [그림 2.2.66]과 같이 바닥을 통해 최종적으로 종합계측시스템에 연결되도록 하였다.



[그림 2.2.65] 궤도-제어실간 배선 처리(제어실 외부)



[그림 2.2.66] 궤도-제어실간 배선 처리(제어실 내부)

궤도의 처짐, 변형률 및 가속도의 측정은 가장 값이 크게 나오는 부분에 대해서 이동형 측정장비를 사용하여 측정하였다. 이에 대한 보다 자세한 내용은 보고서 내용 중 가이드웨이 구축 부분을 참고하기 바란다.

(3) 차량 계측시스템 하드웨어 현장 구축

[그림 2.2.67]과 같이 차량 계측시스템을 차량 내부에 구축하였다. 차량 계측시스템 구축에 대한 보다 자세한 내용은 2세부 과제 보고서 내용을 참조하기 바란다.



[그림 2.2.67] 차량 계측 시스템 설치

(4) 궤도모니터링차량 계측시스템 하드웨어 현장 구축

[그림 2.2.68]와 같이 궤도 상태를 모니터링 하기 위한 차량을 제작하고, 그 안에 계측시스템을 구축하였다. [그림 2.2.69]는 차량 위에 올려진 계측함과 배터리를 나타내며, [그림 2.2.72]은 차량에 설치된 가속도 센서, 카메라, LSM stator 변위 센서 등을 나타낸다.



[그림 2.2.68] 궤도모니터링차량



[그림 2.2.69] 궤도모니터링차량 내 계측시스템



[그림 2.2.70] 궤도모니터링차량 내 계측시스템

(5) 종합 계측시스템 하드웨어 현장 구축

종합계측시스템의 모니터링 랙을 제어실 내에 [그림 2.2.81]와 같이 설치하였다. 종합계측시스템에는 전력실1, 전력실2, 궤도 등의 전원을 ON/OFF 할 수 있는 스위치를 부착하여 제어를 할 수 있도록 하였다. 그리고 제어실 내에는 [그림 2.2.82]과 같이 궤도모니터링용 모니터와 종합계측시스템용 모니터를 설치하였다.



[그림 2.2.71] 종합 계측시스템 랙 및 스위치



[그림 2.2.72] 궤도 모니터링용 및 종합 계측시스템용 모니터

(6) 계측용 무선통신 시스템 현장 구축

차상 계측 데이터의 송수신을 위한 무선통신 시스템을 구축하였다. 먼저 검수고에

[그림 2.2.73]와 같은 안테나와 모듈을 설치하였고, 여기서 나온 선을 제어실까지 배선하였다. 또한 차량이 본선 끝으로 갔을 경우 계측 데이터가 유실될 위험이 있어 궤도 중간 지점에 [그림 2.2.74]와 같이 보조 안테나를 추가로 설치하였다. [그림 2.2.75]은 차량 상부에 설치된 안테나를 보여주는데 각각 차량 위치데이터 수신용, 계측 데이터 수신용 및 관제 데이터 수신용이다.



[그림 2.2.73] 검수고 안테나 및 모듈



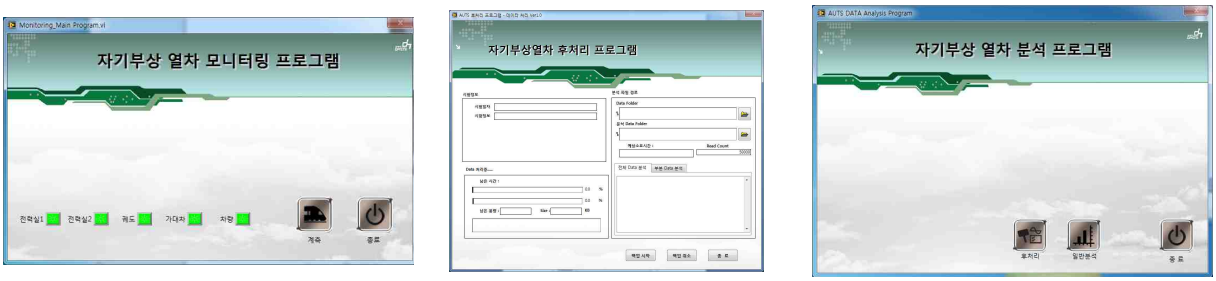
[그림 2.2.74] 본선 안테나 및 모듈



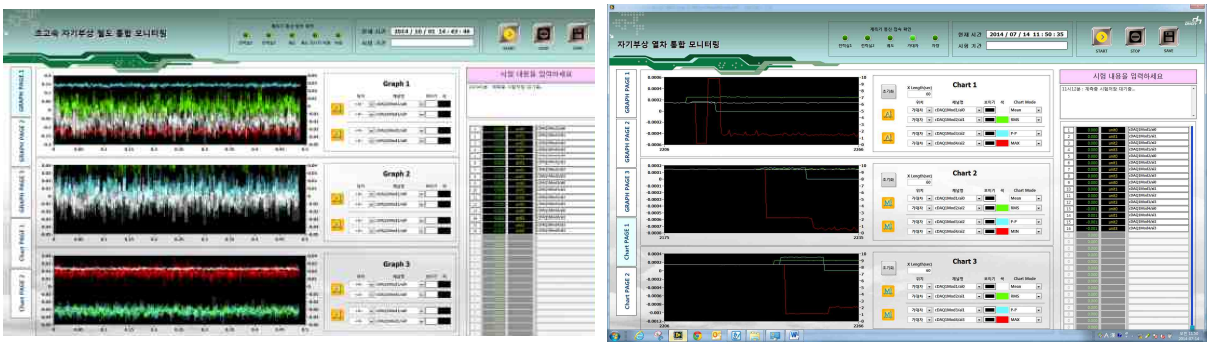
[그림 2.2.75] 차량 안테나 및 내부 배선

(7) 계측시스템 운영 소프트웨어 구축

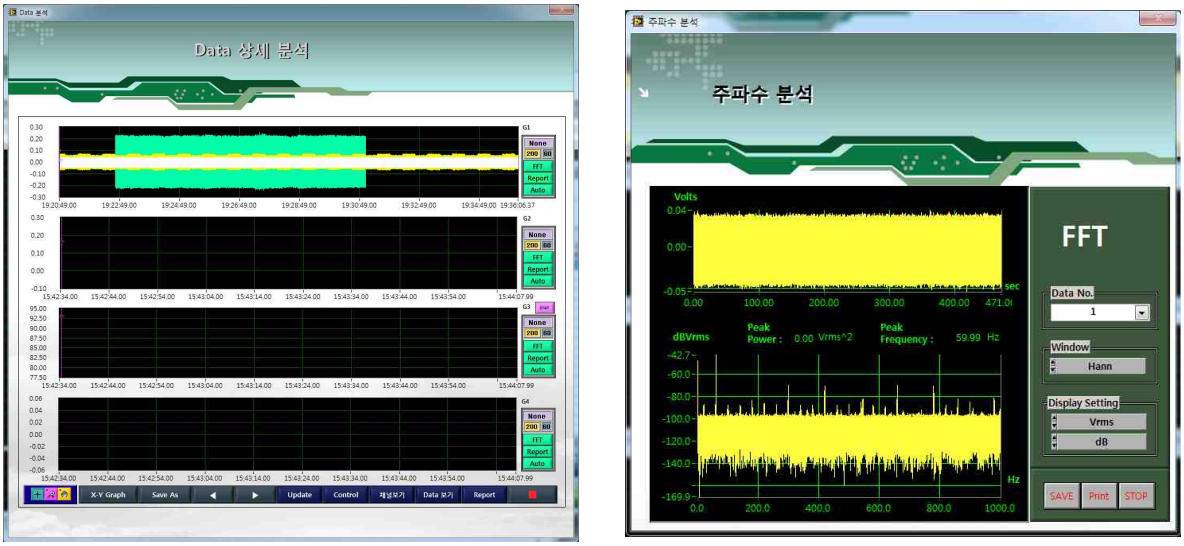
계측시스템 운영 소프트웨어는 [그림 2.2.76]과 같이 크게 모니터링 프로그램, 후처리 프로그램, 분석 프로그램으로 구성되어 있다. 세부적으로 모니터링 프로그램은 [그림 2.2.89]과 같이 각 계측항목별로 실시간 데이터를 모니터링 할 수 있게 되어있다. 후처리 프로그램은 데이터를 압축하고 해제하는 역할을 수행하고, 분석 프로그램은 [그림 2.2.90]와 같이 추출된 데이터를 이용하여 FFT분석과 같은 상세분석을 수행할 수 있도록 해준다.



[그림 2.2.76] 계측시스템 운영 소프트웨어



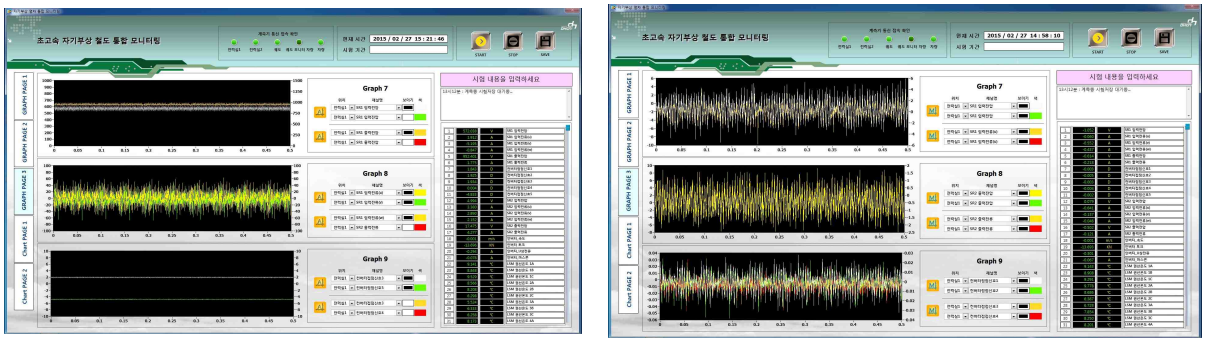
[그림 2.2.77] 모니터링 프로그램



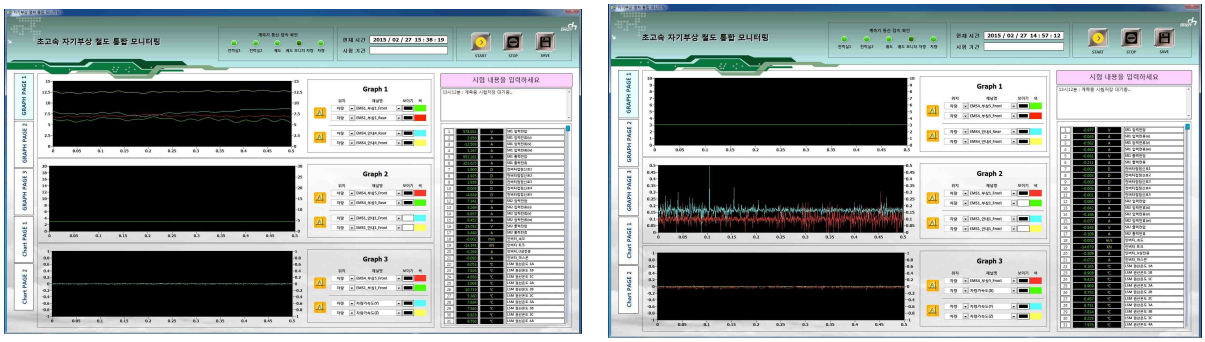
[그림 2.2.78] 분석 프로그램

(8) 계측시스템 운영

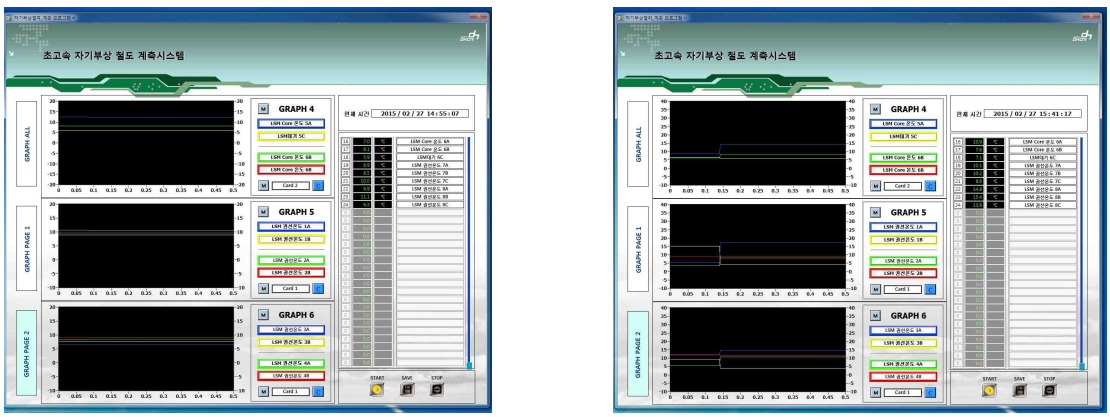
구축된 계측시스템을 실제로 운영한 결과를 [그림 2.2.79], [그림 2.2.80], [그림 2.2.81]에 나타내었다. 계측시스템을 통한 실시간 모니터링을 통해 문제점이 있는지, 이상 징후는 없는지를 판단하였으며, 상세 분석이 필요한 경우 데이터를 저장하여 추가 분석을 수행하였다.



[그림 2.2.79] 추진전력 성능 계측



[그림 2.2.80] 차량 부상성능 계측

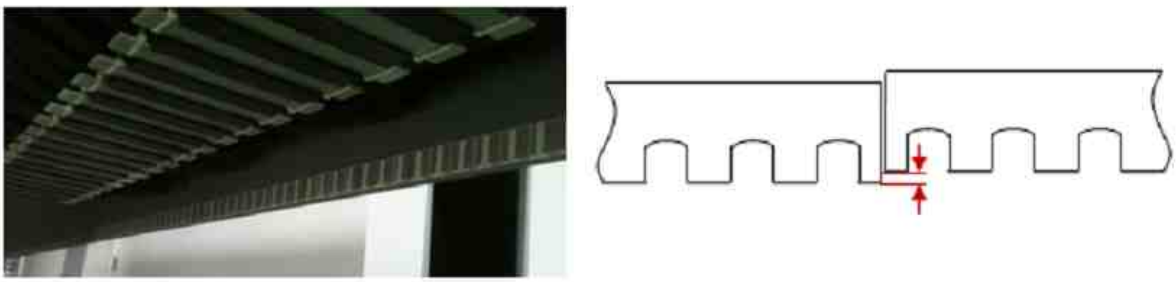


[그림 2.2.81] 궤도 성능 계측

궤도모니터링 차량을 이용하여 [그림 2.2.82]과 같이 궤도 LSM stator pack의 단차를 측정하였다. LSM stator pack은 [그림 2.2.83]와 같이 추진 및 부상을 위한 핵심 부품으로 적층된 철심 코어 및 코어로 이루어져 있는데 단차가 존재할 경우 부상 특성 및 승차감에 안 좋은 영향을 미치기 때문에 Transrapid의 경우 +-5mm 이내로 관리하고 있다.

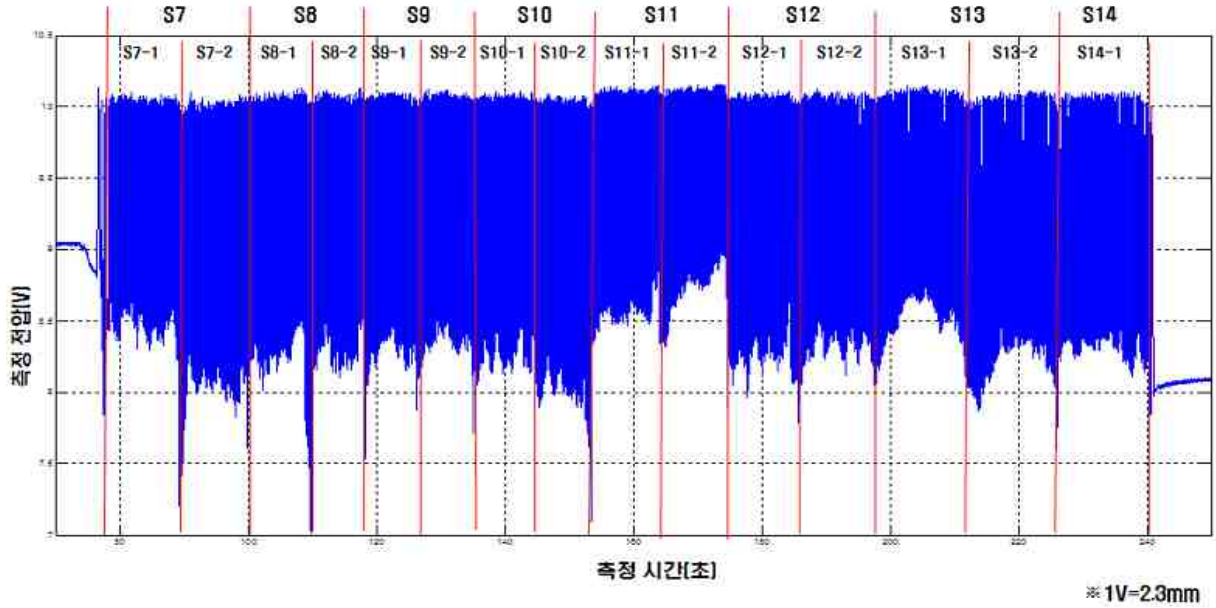


[그림 2.2.82] 궤도 LSM Stator pack 단차 측정



[그림 2.2.83] 궤도 LSM stator pack 및 단차

측정된 그래프 결과가 [그림 2.2.84]에 나타나 있고 이를 [그림 2.2.85]에 수치적으로 정리하였다. 결과에서 알 수 있듯이, 각각의 가이드웨이 섹션 내에서 변위 폭은 1~3.5mm 이내로 나타났고, 최대 변위 폭은 4.7mm로 기준치를 만족하는 것을 알 수 있었다.



[그림 2.2.84] 궤도 LSM stator pack 단차 측정 결과 그래프

구분		최고값(V)	최저값(V)	차이(V)	환산값(mm)
S7	S7-1	8.649	7.845	0.804	**1.8**
	S7-2	8.313	7.197	1.116	**2.6**
S8	S8-1	8.526	**7.007**	1.519	**3.5**
	S8-2	8.615	8.098	0.517	**1.2**
S9	S9-1	8.554	7.517	1.037	**2.4**
	S9-2	8.521	7.883	0.638	**1.5**
S10	S10-1	8.509	7.715	0.794	**1.8**
	S10-2	8.582	7.095	1.487	**3.4**
S11	S11-1	8.866	8.348	0.518	**1.2**
	S11-2	**9.032**	8.315	0.717	**1.6**
S12	S12-1	8.637	7.89	0.747	**1.7**
	S12-2	8.511	7.386	1.125	**2.6**
S13	S13-1	8.777	7.449	1.328	**3.1**
	S13-2	8.421	7.597	0.824	**1.9**
S14	S14-1	8.458	7.766	0.692	**1.6**

[그림 2.2.85] 궤도 LSM stator pack 단차 측정 결과 정리

6. 기술개발 결과 및 검증

가. 계측시스템 설계사양서

계측시스템 구축을 위한 상세 설계사양서는 다음과 같다.

나. Lab 환경에서의 HW 및 SW 인터페이스 조합시험

“5. 다. Lab Test를 통한 계측시스템 성능 확인“에서 설명한 La 환경에서의 HW 및 SW 인터페이스 조합시험에 관한 성적서 결과는 다음과 같다.

초고속 자기부상철도 계측시스템 인터페이스 조합시험 승인서

구 분	일 자	기관/소속	성 명	서 명
작 성	2013.05.03	철도연/초고속자기부상철도연구단	이진호	
검 토	2012.05.10	철도연/초고속자기부상철도연구단	조정민	
승 인	2012.05.16	철도연/초고속자기부상철도연구단	한영재	

개정내역

개정번호	개정일자	내 역	
		~을	~(으)로
0	2013.05.03	최초제정	

1. 개 요

본 문서는 초고속 자기부상철도 계측시스템의 기본 성능을 테스트하기 위하여 Lab 환경에서 실시하는 계측시스템 하드웨어 및 소프트웨어 인터페이스 조합시험에 대한 승인서이다.

2. 구성품 시험계획 및 절차

2.1 개요

초고속 자기부상철도 계측시스템의 각 부분 계측시스템별로 하드웨어와 소프트웨어의 인터페이스 조합시험을 실시한다. 조합시험에서는 각 계측장비에 실제와 유사한 범위의 입력 신호를 주었을 때, 계측 프로그램을 통하여 채널설정, 데이터 계측 및 저장, 그리고 결과 모니터링 등의 주요 기능이 정상적으로 동작하는지 여부를 확인한다.

2.2 시험 대상 장비

다음 표와 같이 각 계측시스템별로 구성되어 있는 계측장비(회색표시 장비는 제외)에 대해서 테스트를 실시하도록 한다.

2.3 시험 항목

시험 항목은 다음과 같은 항목을 통하여 계측장비와 계측을 위한 기본 프로그램의 정상적인 동작 유무를 확인하도록 한다.

- 채널 별 정보 입력
- 채널 Calibration
- 측정 속도 입력
- 제어 신호 명령에 따른 계측 시작 및 종료
- 데이터 실시간 모니터링(그래프)
- 신호인가 전압 및 파형 확인
- 데이터 저장 기능(저장 시작기능 및 저장 파일 확인)
- 각 신호의 시간 동기화(인가 파형 위상차 확인)

대분류	측정위치	계측장비	개수
지상전력 계측시스템	전력실 1	AD Board	1
		Main Chassis	1
		Controller (PXI용)	1
		Controller upgrade kit	1
		Rack mount monitor	1
		전압 및 온도 Module	4
	전력실 2	AD Board	2
		Main Chassis	1
		Controller (PXI 용)	1
		Controller upgrade kit	1
		Rack mount monitor	1
		전압 및 온도 Module	8
		Sub chassis	1
		SCXI Adapter, Cable	1
궤도 계측시스템	궤도 1	Chassis (임베디드 용)	1
		Case	1
		Controller (임베디드 용)	1
		Strain Module (임베디드 용)	1
		전압 Module (임베디드 용)	1
		온도 Module (임베디드 용)	1
		전원장치	1
	궤도 2	Chassis (임베디드 용)	1
		Case	1
		Controller (임베디드 용)	1
		Strain Module (임베디드 용)	1
		전압 Module (임베디드 용)	1
		온도 Module (임베디드 용)	1
		전원장치	1
궤도모니터링 차량 계측시스템	궤도모니터링 차량	임베디드용 컴퓨터	1
		Chassis (USB 용)	1
		가속도 Module (임베디드 용)	3
		전압 Module (임베디드 용)	1
신호/통신/환경 및 종합 계측시스템	제어실	산업용 컴퓨터	2
		모니터	2
		Sub chassis	1
		AD Board	1
		SCXI Adapter, Cable	1

2.4 시험 절차

○ S/W 시험 절차

- **채널설정 & Calibration** : 측정할 채널의 기본 정보 (사용전압, 스케일, 저장여부 등)를 설정하고 채널별로 데이터 상태를 확인한다.
  1) 채널설정 버튼을 클릭한다.
  2) 확인 하고자 하는 장치(모듈)를 선택한다.
  3) 설정 및 Calibration 하고자 하는 채널을 더블클릭 한다.
  4) Calibration 창이 팝업하면 채널의 이름, 단위 등 정보를 입력하고 측정 전압을 스케일링 한다. (전압에 해당하는 물리량 값 입력 및 계산)
  5) 해당 채널의 특정 전압을 인가하여 인가한 전압과 스케일 된 값을 함께 확인하여 스케일이 정상적으로 적용되었는지 확인한다.
  6) 설정과 함께 계측 및 저장 옵션을 함께 체크한 후 종료한다.

- **데이터 계측** : 채널 설정에 설정한 Option에 따라 전체 선택 채널 연동 계측과 모니터링, 저장상태를 확인한다.
  1) 데이터 계측 버튼을 클릭한다.
  2) 시험정보 입력 창이 팝업하면 필요한 시험정보를 입력하고 저장할 데이터의 파일 경로 및 파일 이름을 입력한다.
  3) 시험정도 입력이 완료되면 시험계측 버튼을 클릭한다.
  4) 시험 모니터링 화면이 팝업하면 측정 채널의 List를 확인하고 각 채널별 데이터가 측정되는지 확인한다.
  5) 확인하고자 하는 채널에 Calibrator 등의 신호 장치로 신호를 인가하여 측정이 잘 되는지 확인하여 완료한다.

- **데이터 저장** : 측정 모니터링하는 전체 채널의 데이터를 실시간 저장한다.
  1) 데이터 계측화면의 [시험시작] 또는 [시험저장] 버튼을 클릭한다.
  2) 시험시작(시험저장)이 시작되면 인버터에 해당 신호를 보내며 실시작 측정 데이터 저장을 시작한다.
  3) 윈도우 탐색기에서 저장 경로를 열어 해당 파일이 생성되었는지 확인한다.
  4) 일정시간 이후 새로고침을 하면 파일 사이즈가 변화하는지 확인한다.
  5) 파일 사이즈가 증가하면 정상 저장중임이 확인된다.

- **데이터 동기화** : 무선통신을 사용하는 궤도모니터링차량 계측시스템의 경우, 무선계측 cDAQ-9191과 유선 SCXI를 통해 계측되는 데이터의 동기화 상태를 확인한다. 유무선 공유기와 장비간의 무선 신호상태를 함께 확인한다. 장비의 무선 신호는 신호 LED 기준 3개 이상의 LED 신호를 안정상태로 본다.
  1) 무선 계측채널과 유선 계측채널을 각 1개씩 선정한다.
  2) 선정한 채널에 병렬로 Calibrator를 통해 신호를 인가한다. (사인파, 또는 구형파, 삼각파)
  3) 인가한 파형이 각 두 채널에 나오는지 확인하고 같은 신호의 계측상에서 파형의 오차(위상차)가 얼마나 되는지 확인한다. (동기화 전 파형과 동기화 후 파형을 비교하려면 동기화 전과 후를 각각 확인한다.)
  4) 시스템 상태에 따라 위상차 범위가 다르다. 현재 시스템 기준 동기화 이후 위상차를 (1~4ms)로 맞춘다.

  ※ 유선통신을 사용하는 계측시스템의 경우, 임의의 2개의 파형을 이용하여 데이터를 비교하여 동기화 하도록 한다.

3. 시험 결과

시 험 품	초고속 자기부상철도 계측시스템 인터페이스 조합시험 승인서			소속	성 명
제품(차량)번호			확인자	KRRI	
시험일시	2013 년 월 일 ~ 2013 년 월 일			다현CNI	
시험 환경	온도 (℃)	습도 (% R.H)	시험자	KRRI	기 건 호
	날씨			다현CNI	이 동 은

3.1 지상전력 계측시스템 (전력실 1)

구분	시험항목	시험기준	시험결과	비고
1	채널 설정		정 상	
	채널 별 정보 입력	채널 별 정보 입력	정 상	
	채널별 Calibration	채널별 보정(스케일) 기능	정 상	
	측정속도	측정 Sample 정보확인	정 상	
2	데이터 계측		정 상	
	계측시작/종료	시험시작/종료기능	정 상	
	데이터 실시간 모니터링	실시간 모니터링 및 그래프	정 상	
	신호인가	인가전압 및 파형 확인	정 상	
	데이터 저장	측정데이터 저장 기능	정 상	
3	데이터 저장		정 상	
	시험시작(저장시작)	사용자 시험시작 저장기능	정 상	
	저장파일	저장파일 생성 및 용량확인	정 상	
	시험종료	저장중지 및 시험 종료	정 상	
4	데이터 동기화			
	채널 별 신호 동기화	인가 파형 위상차 확인	정 상	

3.2 지상전력 계측시스템 (전력실 2)

구분	시험항목	시험기준	시험결과	비고
1	채널 설정		정 상	
	채널 별 정보 입력	채널 별 정보 입력	정 상	
	채널별 Calibration	채널별 보정(스케일) 기능	정 상	
	측정속도	측정 Sample 정보확인	정 상	
2	데이터 계측		정 상	
	계측시작/종료	시험시작/종료기능	정 상	
	데이터 실시간 모니터링	실시간 모니터링 및 그래프	정 상	
	신호인가	인가전압 및 파형 확인	정 상	
	데이터 저장	측정데이터 저장 기능	정 상	
3	데이터 저장		정 상	
	시험시작(저장시작)	사용자 시험시작 저장기능	정 상	
	저장파일	저장파일 생성 및 용량확인	정 상	
	시험종료	저장중지 및 시험 종료	정 상	
4	데이터 동기화		정 상	
	채널 별 신호 동기화	인가 파형 위상차 확인	정 상	

3.3 궤도 계측시스템 (궤도 1,2)

구분	시험항목	시험기준	시험결과	비고
1	채널 설정		정 상	
	채널 별 정보 입력	채널 별 정보 입력	정 상	
	채널별 Calibration	채널별 보정(스케일) 기능	정 상	
	측정속도	측정 Sample 정보확인	정 상	
2	데이터 계측		정 상	
	계측시작/종료	시험시작/종료기능	정 상	
	데이터 실시간 모니터링	실시간 모니터링 및 그래프	정 상	
	신호인가	인가전압 및 파형 확인	정 상	
	데이터 저장	측정데이터 저장 기능	정 상	
3	데이터 저장		정 상	
	시험시작(저장시작)	사용자 시험시작 저장기능	정 상	
	저장파일	저장파일 생성 및 용량확인	정 상	
	시험종료	저장중지 및 시험 종료	정 상	
4	데이터 동기화		정 상	
	채널 별 신호 동기화	인가 파형 위상차 확인	정 상	

3.4 궤도모니터링차량 계측시스템

구분	시험항목	시험기준	시험결과	비고
1	채널 설정		정 상	
	채널 별 정보 입력	채널 별 정보 입력	정 상	
	채널별 Calibration	채널별 보정(스케일) 기능	정 상	
	측정속도	측정 Sample 정보확인	정 상	
2	데이터 계측		정 상	
	계측시작/종료	시험시작/종료기능	정 상	
	데이터 실시간 모니터링	실시간 모니터링 및 그래프	정 상	
	신호인가	인가전압 및 파형 확인	정 상	
	데이터 저장	측정데이터 저장 기능	정 상	
3	데이터 저장		정 상	
	시험시작(저장시작)	사용자 시험시작 저장기능	정 상	
	저장파일	저장파일 생성 및 용량확인	정 상	
	시험종료	저장중지 및 시험 종료	정 상	
4	데이터 동기화		정 상	
	채널 별 신호 동기화	인가 파형 위상차 확인	정 상	

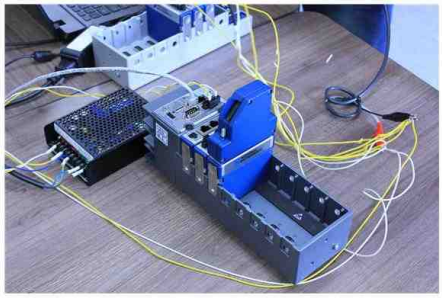
나) 계측시스템 인터페이스 조합시험 관련 사진



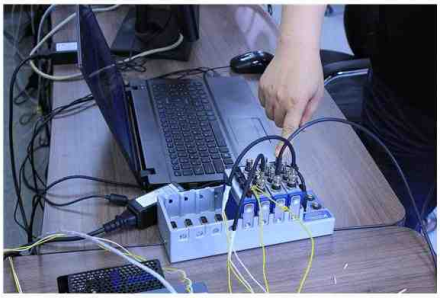
전체 테스트 기기 구성



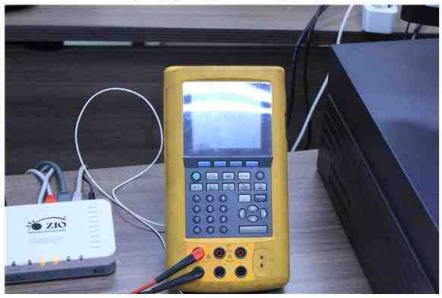
계측 장비(제어실 1, 2)



계측장비(궤도 1, 2)



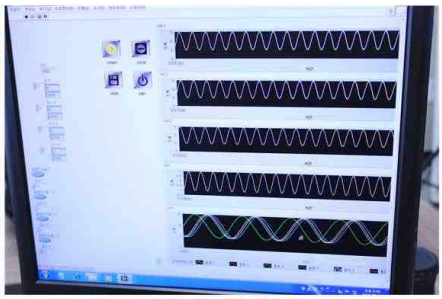
계측장비(궤도 모니터링 차량)



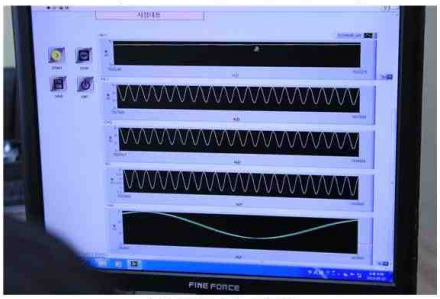
소스 파일 생성기



각종 기능(채널 설정/시작/종료 등) 버튼



동기화 전 파형



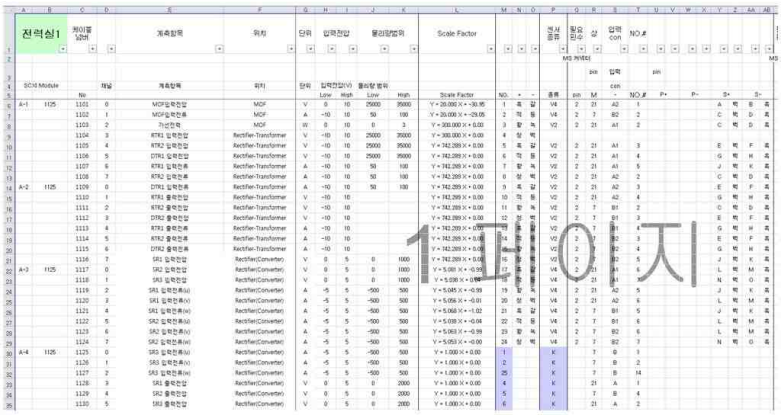
동기화 후 파형

다. 현장 구축 및 운영 결과

(1) 계측시스템 운영 유지보수 매뉴얼

2. 구축된 계측 시스템의 정밀도(신뢰도) 검증자료

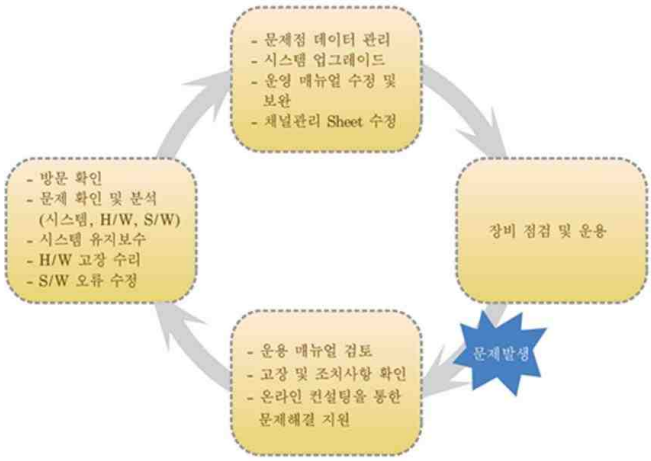
- 구축된 계측 시스템의 정밀도(신뢰도)를 확인하기 위하여 각 계측 채널의 스케일에 맞추어 Calibration을 한 뒤 Calibrator를 이용하여 각 계측 채널의 신호를 확인한다.



<그림 3.3.1 Scale Factor 계산 자료>

- Rack 이름 : 왼쪽 상단의 [MC2]는 계측 시스템 이름이다.
- SCXI Module : Conditioner Module의 이름
- 채널 : 해당 Module내의 채널번호
- 계측항목 : 시스템에서 사용하는 채널의 이름
- 위치 : 센서의 부착 위치를 말한다.
- 단위 : 센서의 단위
- 입력전압 - Low : 채널의 측정값의 최소값
- 입력전압 - High : 채널의 측정값의 최대값
- 물리량 - Low : 채널의 Limit 설정의 최소값
- 물리량 - High : 채널의 Limit 설정의 최대값
- 센서의 Type : 측정 채널의 신호종류 또는 센서 종류
- 계측시스템 Sensor 계측용 Rack 앞의 단자대 번호.
- Core : 케이블의 전선 가닥수. (core)
- No. : 케이블 끝단의 넘버링 번호
- Pin No. : 배전반의 D-sub Connector의 핀 번호
- Scale Factor : Calibration 한 Scale 값

3. 유지보수 계획



<그림 3.4.1 유지보수 계획>

- 초고속 자기부상열차 계측시스템 구축 완료 후 2년간 고장 수리 등의 유지보수를 수행한다.

- 초고속 자기부상열차 계측시스템 구축 완료 후 시스템 운용방법, 관리 방법, 오류에 대한 조치 방안, 시스템 점검 방안 등의 내용을 담은 매뉴얼을 작성한다.

- 작성된 매뉴얼에 따라 시스템을 검증하고, 내용을 갱신하며 수정, 관리한다.

- 고장의 유형을 사전에 파악하여 정리하고 그 내용에 맞는 조치 사항을 작성하여 제출한다.

- 장비의 원활한 유지보수를 위하여 채널의 연결 정보가 수록된 채널 관리 Sheet를 작성하여 관리한다.

- 장비 설계 시 모든 계측 채널 및 전원에 관련한 케이블 배선도를 사전에 작성하고, 설치시 모든 케이블에 케이블 번호 체계에 따른 넘버링을 부착한다.

제3절 단거리 시험선 구축

1. 개요

자기부상철도는 차량을 전자기력으로 부상시켜 레일과 바퀴가 접촉하지 않는 상태에서 주행하는 운송시스템으로써, 추진/점착력이 크므로 기존 바퀴식 고속 철도의 속도한계를 극복할 수 있고, 진동소음 저감, 고효율의 에너지, 유지보수 비용절감 등 많은 장점이 있으며, 궤도 구조상 탈선의 위험이 없기 때문에, 차세대 초고속 육상교통수단 으로 주목받고 있다.

본 과업을 통해서 550km/h급 초고속 자기부상 철도시스템 설계 기술 확보 및 조합성능평가를 위한 길이 150m 내외 실 규모 단거리 시험선을 구축하고자 한다.

과업의 범위는 궤도 양 끝단에 Stopper가 설치된 150m내외의 초고속 자기부상 시스템 단거리 시험선 가이드웨이 건설, 15ton 이상의 천장형 크레인 2대 등을 구비한 차량 유지보수 설비 (검수고)구축, 3 MVA이상의 전력용 변전시스템을 갖춘 전기실 등을 건설하고자 한다.

2. 목표

본 과업의 최종목표는 초고속 단거리 시험선을 구축하는 것으로 한다. 1차년도에는 초고속 자기부상 단거리 시험선 설계 및 공사 발주하여 부지선정, 실시설계 (감리) 발주/계약하고 2차년도에는 단거리 시험선 공사를 착공하여 시험선 노반, 궤도 공사 검수고(유지보수설비/제어실)공사 등을 실시한다. 품질관리를 통하여 시험선 공사를 완료하고 시험선 및 각 설비 품질검사 및 시험 운영을 통해 3차년도에 시험선 공사를 완료하고 마지막 년도인 4차년도에는 시험선 운영을 통해 발생된 하자를 보수하고 유지보수를 시행하는 것을 목표로 한다.

3. 개발 내용 요약

<table>
<tr><td>연구목표</td><td>550km/h급 초고속 자기부상 철도시스템 설계 기술 확보 및 조합성능평가를 위한 길이 150m 내외 실 규모 단거리 시험선을 구축</td></tr>
<tr><td>연구내용</td><td>▪ 부지선정, 실시설계 (감리) 발주/계약
▪ 설계시행 및 공정/계약 관리
▪ 단거리 시험선 노반, 궤도, 전력, 유지보수설비/제어실 공사발주/계약
▪ 검수고(유지보수설비/제어실)공사
▪ 시험선 공사 및 품질관리
▪ 시험선 공사 완료
▪ 시험선 및 각 설비 품질검사 시험운영/ 유지보수</td></tr>
<tr><td>수행과정</td><td>▪ 초고속철도시스템 단거리 시험선의 가이드웨이 구축
◆ 150m내외의 초고속철도 시스템용 단거리 시험선의 가이드웨이 건설
◆ 검수고 건설
- 차량 유지보수 설비 구축
- 15ton 이상의 천장형 크레인 2대, 궤도 양 끝단 Stopper 설치
◆ 전기실 건설
- 전력용 변전시스템 구축 : 3 MVA이상</td></tr>
<tr><td>연구결과</td><td>▪ 부지선정 (검수고 및 본선구조물, 상수도 및 전기 노서)
 



▪ 시험선 기초 PHC 파일공사 및 본선하부구조물 철근조립작업
 


▪ 본선 및 검수고 완공 사진
 
 </td></tr>
</table>

4. 상세 개발 내용

가. 국내외 기술개발 현황

국내의 초고속 자기부상철도 관련 주요 연구 추진 이력

년도	사 업 명	수행 기관
1998	철도청 주관 자기부상철도 개발을 위한 연구기획	철도연 수탁사업
1999	철도청 주관 동기형 자기부상철도 개발을 위한 기초연구(I)	철도연 수탁사업
2005	과기부 주관 초고속 자기부상철도 부상/추진 기술연구 착수	기계연 전문연구시범사업

(1) 국내 기술 및 산업 동향

(가) 국내 시장 현황 및 예측

① 국내에서는 현재 영업최고속도 300km/h의 고속열차가 운행된 지 7년이 경과되었으며, 전국을 일일 생활권으로 묶는 생활 패턴이 정착되고 있음

② 400km/h 이상의 초고속 수송 서비스가 요구되기까지는 많은 시간이 소요될 것으로 예상되나 이미 시작된 초고속 수송서비스의 효과로 인해 국내 철도시장은 초고속화에 대한 요구가 더욱 커질 것으로 예상됨

③ 특히 거대 경제권역간의 교류 및 전국 반일생활권의 요구 증대에 따라 국내 초고속 철도 시장이 더욱 확대될 것으로 예상됨

④ 또한 남북 통일시 중국·러시아를 거쳐 유럽대륙으로 연결되는 대륙간 초고속 철도 교통 수요도 예측할 수 있음

(나) 국내 기술개발 수준

세부기술 내용			현재 기술수준		
			기술수준(%)	기술격차(년)	비고
궤도 및 기반 시설 · 건설 기술	토목	설계기준	75	3년	성숙단계
		터널	100	-	경쟁단계
		기초/교각	90	2년	성숙단계
		거더	85	2년	성숙단계
		교좌장치 등 부대시설	100	-	경쟁관계
	궤도	설계기준	75	3년	도입단계
		추진/부상레일	85	2년	성숙단계
		분기기	60	3년	도입단계

(다) 국내 주요연구기관 및 관련업체

기관 및 업체명	업체 능력 또는 주요 보유 기술	비 고
㈜삼안건설 기술공사	▪ 자기부상열차 궤도 및 구축물 설계 및 시공, 도시형자기부상철도 실용화사업 궤도, 기반시설분야 타당성 조사 참여 ▪ 교량 상부구조(PSC거더,ST거더), 하부구조 (교각, 기초), 터널(NATM터널,TBM터널 ,쉴드터널등), 궤도(GUIDE RAIL , AL REACTION PLATE, CROSS ARM등), 2WAY, 3WAY 분기기 및 역사구조물 건설 기술 보유	관련업체
(주)대우엔지니어링	▪ 경전철 및 일반철도 설계 및 엔지니어링, 도시형 자기부상철도 실용화사업 기술분야 타당성 조사 참여 ▪ 신호, 제어 및 전력분야 기술보유	관련업체
한터기술	▪ 무인/자동 자기부상열차 신호시스템개발 참여, 산업자원부 중기거점기술개발사업 참여	관련업체
(주)현대건설	▪ 자기부상철도 노선건설, 엑스포 과학공원 내 노선 건설사업 참여	관련업체
(주)두산중공업	▪ 자기부상철도 노선건설, 기계연구원 내 시험선로 노선 건설사업 참여	관련업체
도화엔지니어링	▪ 자기부상철도 노선 설계/감리, 기계연구원 내 시험선로 노선 건설사업 참여	관련업체
(주)신성건설	▪ 자기부상철도 노선건설, 기계연구원 내 시험선로 노선 연장사업 참여	관련업체
신화엔지니어링	▪ 자기부상철도 노선 설계/감리, 기계연구원 내 시험선로 노선 연장사업 참여	관련업체
(주)동방건설	▪ 자기부상철도 노선건설, 기계연구원 내 시험선로 노선 연장사업 참여	관련업체

(라) 국내 연구인프라 및 기술 개발 수준

기술분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소 부족	동등	우월	보다 우월
궤도 건설기술	▪ 시험선에 평행이동식 분기기 적용 실적 보유 ▪ 관절식 고속분기기 개발 ▪ 고속 및 일반철도 건설실적 보유 ▪ 자기부상철도 노선설치 사업 실적 보유		○			
철도건설 사업/품질 /안전관리	▪ 전문인력(PMP) 보유 : 900명 ▪ KR-EPMS등 철도건설 사업관리 시스템 확보 ▪ 품질·안전·환경분야 통합 인증등 품질관리역량 기반 확보			○		

나. 국외 기술 및 산업 동향

(1) 초고속 자기부상철도 국외기술 동향

중저속을 포함하여 자기부상철도를 연구하고 있거나 건설을 검토하고 있는 국가를 종합하면 아래 표와 같으며, 특히 세계적으로 초고속 자기부상철도를 개발하고 있거나 실용화 노선을 건설한 국가로는 독일, 중국, 그리고 일본이 있다.

(2) 자기부상철도 연구 및 건설 계획

국 가	연구개발 프로그램		시험 또는 실용화 노선 계획	
	중저속	초고속	중저속	초고속
독 일	-	Transrapid(09)	-	-
일 본	HSST	MLX	나고야 (운행중)	도쿄~오사카(500km) (1단계:나고야구간)
미 국	· MB Maglev System · Inductrack (GA) · Magplane · CALU sky shuttle	Maglev-2000	· Old Dominion Univ. · CALU 교내	· LA-Anaheim 외 6개 노선(Transrapid) · 플로리다 (Maglev-2000)
중 국	CMS03A	Transrapid 기술 이전에 따른 독자개발 추진	-	상하이(푸둥공항-시내) 운행중 항조우 연장 검토
스위스	-	스위스 메트로	-	Zurich-Berne (114km) * Transrapid
영 국	-	-	-	London-North England * 바퀴식/Transrapid
카타르 - 바레인	-	-	-	NDIA-Doha-Ar Rifa - BIA(182km) * 바퀴식/Transrapid

(가) 독일

① 1970년 초부터 연구개발을 시작해 온 독일은 초고속 자기부상철도인 Transrapid를 개발하였으며, 중국 상하이에 세계 최초로 영업노선을 구축하여 운영 중에 있다. 후속 차량 모델 개발 뿐 아니라 궤도 건설비를 줄이기 위한 다양한 궤도 기술에 대한 연구가 진행되고 있다.



[그림 2.3.1] 독일의 초고속 자기부상철도 (Transrapid09)

② 기술개발 이력

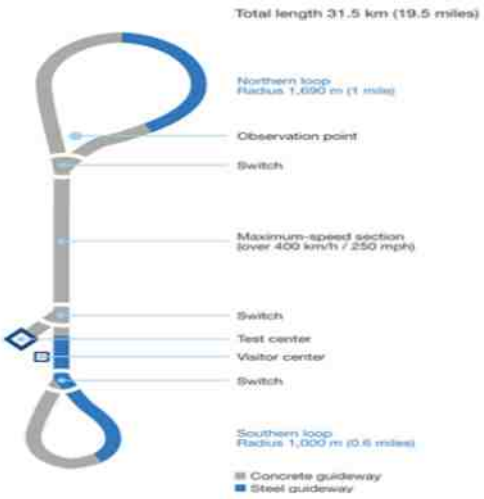
- 1922 : Hermann Kemper가 전자기적으로 부상하는 철도의 개념발명
- 1971 : Ottobrunn에 있는 MBB(MesserschmittBölkow-Blohm) 회사에서 원리적인 유인용 차량 제시. 흡인제어식 부상과 안내 시스템 사용
- 1972 : Transrapid 03. 초전도를 이용한 반발부상방식 사용
- 1977 : 흡인제어식 방식 채택, 반발부상식 연구 중단
- 1979 : Hamburg 세계 교통 박람회에서 세계 최초의 승객탑승용 자기부상 철도 전시 (Transrapid 05)
- 1983: Transrapid 06 작동. 총길이 54m, 102t, 192좌석. LSM(Linear Synchronous Motor) 방식, 차량탑재용 리니어 발전기사용
- 1988 : 세계신기록 412.6km/h 달성
- 2000 : 독일과 미국 간 Transrapid 자기부상 기술 협력각서 체결 (두 나라 사이의 기술교류 및 관련 안전, 환경적인 기준마련 등)
- 2001 : 세계 최초의 상업용 자기부상 철도인, 중국 상하이시와 푸동공항을 연결하는 Transrapid 계약 체결
- 2003 : 중국 상하이시와 푸둥공항을 연결하는 Transrapid 개통
- 2005 : 2월, 총 250만명의 승객수송 총 운행거리 128만7천 km
- 2009 : 도시형 초고속 자기부상열차 Transrapid 09 모델 개발완료

③ TVE 시험선 개요

㉮ 독일의 자기부상철도 시험소인 TVE(Transrapid Versuchsanlage Emsland) 는 자기부상열차에 있어서 세계에서 규모가 가장 큰 시험 시설이다

㉯ 연장 31.5km의 TVE 시험선은 남북으로 길게 건설되어 있으며, 선로의 남북쪽 양 끝에 루프가 있고, 두 루프가 12km의 직선 선로로 연결되어 있는 형태로 선로전환기는 2개의 루프에 1개씩, 시험소로 연결되는 유치선과 직선 선로와의 교차점에 1개, 모두 3개가 설치되어 있다.

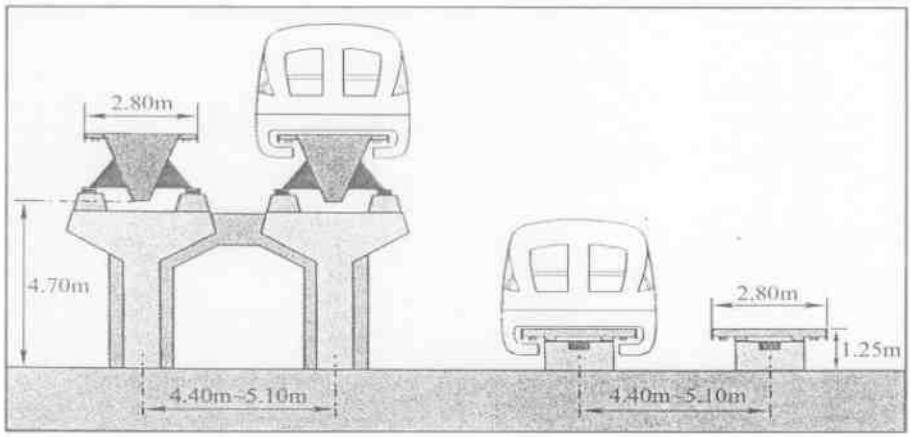
㉰ 선로는 시험을 위하여 18가지 방식으로 구분 시공되었으며, 선로마다 승차감, 진동, 소음 내역이 다르다.



총길이	31.5 km (19.5 mile)
직선 구간	12 km
북쪽루프의 곡선반경	1,690 m
남쪽루프의 곡선반경	1,000 m
캔트	9 ~ 12 도

[그림 2.3.2] TUV 시험선

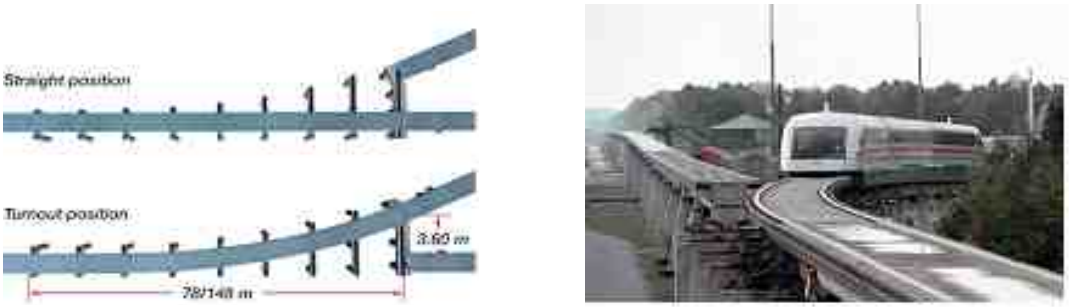
㉮ Transrapid의 선로는 지면 위나 고가형으로 설치할 수 있으며, 2.8m 게이지의 강철 또는 콘크리트 빔을 사용한다.
㉯ 특히 선로전환기는 구부릴 수 있는 강철 재질로서, 78m~148m 길이의 강철 박스 빔으로 구성되어 있다.
㉰ 선로전환기 빔은 진로방향으로 휘어지며, 전환된 후 쇄정됨. 직선구간에서는 속도제한 없이 분기기를 통과할 수 있고, 선로 변경구간에서는 200km/h(고속용), 또는 100km/h(저속용)로 제한됨. Transrapid의 구배 등판능력은 10%(기존 철도차량 4%), 곡선한계는 시속 300km/h에서 1,950m(기존 철도차량 3,200m) 이다.
㉱ 선로는 차량을 정해진 길로 유도하는 역할뿐만 아니라, 열차의 하중을 감당하여 목표지점까지 운송하게 하는 기초 역할을 수행하며 선로상부의 구조는 긴 고정자를 정밀하게 용접시킨 강철 구조나 철근 콘크리트 구조의 지지 거더를 연결하여 구성하며, 하부구조는 철근 콘크리트를 이용, 버팀과 기초의 역할을 한다.
㉲ 지지거더 자체는 기계적 하중을 담당하며 전통적인 토목공사의 간단한 구조의 버팀 형교(桁橋, girder bridge)나 연속 형교의 거더부분과 똑같으며 그 상부에는 필요한 자기부상 시스템의 고정자 코일과 철심을 설치해야 하기 때문에 제조와 시공에 있어서 높은 정밀도를 요구한다.
㉳ 자기부상차량과 선로간의 인터페이스 때문에 자기부상 철도의 선로는 반드시 일정한 높이로, 거더식 구조를 채택해야 하며 선로는 고가(高架)나 지형에 따라 직접 거더를 지상 (저치(low implantation)선로라고 함)에 고정시킬 수 있고, 교량이나 터널 구역에서는 교량과 터널의 기초구조가 기본적으로 완성된 상태에서 저치선로의 방식을 이용해 지지거더를 상부에 설치한다.



[그림 2.3.3] Transrapid 선로 구조

[표 2.3.1] 속도에 따른 곡선 반경

속도	최소 곡선반경	선로간 간격	비고
	350 m		캔트 12°~16°
200km/h	750m	4.4m	
300km/h	1,950m	4.4m	
400km/h	2,825m	4.8m	
500km/h	4,415m	5.1m	



[그림 2.3.4] Transrapid의 선로 전환기

(나) 중국(상하이 자기부상철도 프로젝트)

① 개 요

㉮ 중국은 영토가 넓고 인구가 많기 때문에 800~1,500km 거리의 여객운송시장의 잠재력은 거대하며, 경제력의 지속적 급속 발전과 생활수준의 향상에 따라 대량의 고속수송 수단에 대한 요구가 증가하고 있다.

㉯ 중국은 독일의 초고속 자기부상철도 기술개발이 육상교통수단으로서 세계 최고라고 판단하고 자국의 육상 고속교통시스템에 대한 정책범위에 추가하였으며, 독일

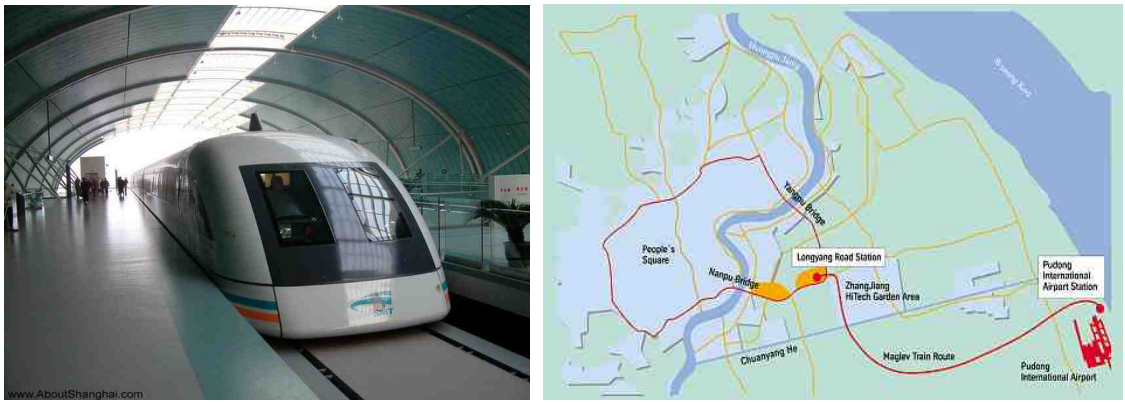
로 부터 기술 도입을 결정하고 상하이에 세계 최초의 초고속 자기부상철도 영업노선을 건설하였다.

㉰ 중국은 상하이프로젝트 수행을 위하여 SMTDC(Shanghai Maglev Transportation Development Co., SMT)를 설립하여 독일로부터 기술을 전수받는 것과 동시에 자체적으로도 기술 개발을 추진하였다.

㉱ 이에 따라 중국은 상하이 프로젝트를 통해 자기부상 선로 기술을 완전 이전 받았고, 22개월에 걸친 극히 단기간에 세계 최초의 초고속 자기부상철도 시스템을 건설하였다.

[표 2.3.2] 중국 Shanghai 프로젝트

총 구간	30 ㎞ 복선 및 3.5 ㎞ 보조 선로
총 여행 시간	8 분
운행 속도	430 ㎞/h
배차 시간	10 분
정차역	2 개
차량	3 편성 (5량 1편성)
연간 예상 승차 인원	3,350만 명
예상 투자 비용	35억 달러
공급자	Siemens, TyssenKrupp



[그림 2.3.5] 중국 상하이 초고속 자기부상철도 및 노선

② 상하이 자기부상철도 프로젝트 추진일정

- 2000. 6 중·독 정부는 상하이 자기부상철도 프로젝트 타당성연구에 대해 정식으로 합작 체결
- 2000. 8 상하이 선통(申通)그룹 유한공사 등 6개 회사가 연합해 출자등록하여 상하이 자기부상교통발전 유한회사(SMTDC) 설립. 국가계획위원회는 국무원 동의

로 프로젝트 건의서 비준

- 2000.10 상하이시 위원회·시청은 상하이시 자기부상철도 공사지휘부 설립을 비준
- 2000.11 중·독 쌍방 합작 편제 완성 및 타당성연구 보고 상하이시 계획위원회는 국가계획위원회에 보고, 심사비준 중국은 독일 컨소시엄과 설비공급 및 서비스 계약 협상
- 2001. 1 중·독 상하이 자기부상철도 프로젝트 계약 조인
- 2001. 2 상하이 자기부상철도 프로젝트 타당성연구 보고를 기초로 확충공사의 초안설계를 완성
- 국무원은 타당성연구 보고와 착공 보고에 대해 상하이시 계획위원회와 건설위원회에 확충공사 초안설계 비준을 회답
- 2001. 3 상하이시 위원회, 시청에서 상하이 자기부상철도 공사 착공식을 주관, 거더제작 기지 구축, 공사의 정식 착공을 선포
- 2001. 3 푸동 신해방구·남후이(南匯)현청의 협조로 토지징수, 이주 작업의 기초완성, 공사의 전면적인 착공 조건을 구성함
- 2001. 5 상하이 자기부상교통발전 유한공사에 운영 사전기획준비부 설립, 각 항목별 준비작업에 착수, 운영기술·관리인원을 독일에 파견해 훈련·양성시켜 시스템의 학습·훈련에 적극 돌입
- 2001. 6 본선공사 시공 시작, 시공 준비의 정식 착수단계 진입
- 2001. 7 첫 번째 궤도거더 주조완성
- 2001.11 공사 첫 조립으로 고정자 철심의 완제품인 궤도거더를 운송,도리스 슈뢰더(Doris Schroder) 독일 총리부인은 주룽지 총리와 부인의 동행 하에 현장 운송식 참석
- 2002. 2 시스템 설비의 장착 시작
- 2002. 5 롱양루 변전소에서 110kV 전기 수전
- 2002. 7 전체노선에 전기 공급, 롱양루 변전소에서 전체노선에 고압전원을 투입, 시스템 조정 테스트 단계 진입
- 2002. 9 첫 열차의 설치 완성, 종합 조정시험 실시
- 2002. 12 중국 주룽지 총리와 독일 슈뢰더 총리 등 현장 시험운행 커트식 및 자기부상열차 시승, 최고속도 430km/h 도달



[그림 2.3.6] 중·독 상하이 자기부상철도 착공식 및 궤도 운송



[그림 2.3.7] 롱양루역 외부 모습

③ 상하이 자기부상철도의 선로

㉮ 고가형 선로로, TVE의 합성 빔을 개량하여 설치하였으며, 경제성 등을 위해 선로와 차량, 운행, 환경 등과의 상호작용을 고려하였음

㉯ 2개 역간에 175ton에 달하는 24m 길이의 거더를 2,551개 사용하였음

㉰ 또한 중국은 이를 바탕으로 독일로 자기부상철도 선로 제품의 수출을 고려하고 있음



[그림 2.3.8] 상하이 자기부상철도 선로

④ 선로 인프라 유지관리 현황

㉮ 선로 유지보수 주기는 매일 첫 운행 전과 마지막 운행 후에 검측차량을 통과시켜 선로 상태 검측하고 있으며 운행 열차에도 선로상태 검측을 위한 센서 내장함

㉯ 유지보수를 위해 자체동력을 갖춘 모노레일 형태의 검측 및 유지보수 차량 운영함




[그림 2.3.9] 선로 검측 및 유지보수를 위한 차량

㉰ 운용 중 선로 침하 현황과 대책과 관련해서는 선로하부 지반이 연약하여 침하가 발생하고 있기 때문에 교량 교좌장치에 자체 개발한 3방향 무단계 조절 베어링(3 directional stepless adjustable bearing)가 설치되어 있으며, 스팬당 네 개의 베어링을 설치하여 상하좌우로 가이드웨이의 위치 조절함으로써 연약지반 상의 교량 부등침하에 대처함




[그림 2.3.10] 선로 부등침하 방지를 위한 3방향 조절 베어링

㉱ 정밀도와 신뢰성이 우수한 전동식 분기기 적용하며, 자기부상 분기기는 모든 궤도 거더를 함께 이동시키므로 전동 분기를 위한 별도의 변전소를 분기 구간에 건설



[그림 2.3.11] 전동 분기기 및 변전시설

㉮ 거더 사이의 신축이음부에서는 선로 한편에만 코일을 연결하고 있으며, 교량 자체의 거더 간에 5cm 이상의 큰 갭이 있음에도 불구하고 부상제어를 위한 자기력 손실에는 큰 문제가 없음. 따라서 일반적인 휠-레일 접촉식 교량에 비해 교량 신축이음부에서 차량충격, 승차감 저하 등의 문제 소지가 적음



[그림 2.3.12] 교량 신축이음부 형태

(다) 일 본

① 개 요

㉮ 일본은 토카이도 신칸센 노선(도쿄~오사카)의 포화로 대체선로의 필요성이 증가하면서 추오 신칸센 계획을 수립(신칸센 철도정비법 제4조)하고, 1970년도부터 500km/h 이상의 초고속 자기부상철도에 대한 연구개발을 진행함

㉯ 일본이 개발한 MLX는 초전도 전자석을 사용한 반발부상식으로서 별도의 부상제어시스템 없이도 120mm의 부상 공극을 유지하고 581km/h의 최고속도를 기록한 바가 있으며, 2005년에는 시스템 성능 향상과 궤도 건설 비용을 줄이기 위하여 일체형 지상코일(PLG코일)의 개발을 완료하고 현재 2세대 고온초전도체(YBCO)에 의한 초전도 전자석 개발을 추진 중에 있음



[그림 2.3.13] 일본 MLX 시제 차량

㉰ 1996년에는 야마나시 시험선을 건설하고 실제 주행 환경에서의 시제차량에 대한 신뢰성 및 내구성 평가, 공력특성 개선, 비용저감 등 초전도 자기부상철도의 실용화를 위한 기술개발을 진행함

㉱ 야마나시 시험선은 당초 42.8km 규모의 시험 구간을 계획하였으나 용지매수지연, 주행시험의 조속시행의 필요성 등으로 인해 18.4km구간을 우선 건설 하였으며, 시험차량(MLX)은 전두부 형상을 달리한 3종의 선두차량과 표준 및 장대 중간 객차를 3량 또는 5량 편성하여 1997년부터 주행시험을 개시하여 현재에 이르고 있음

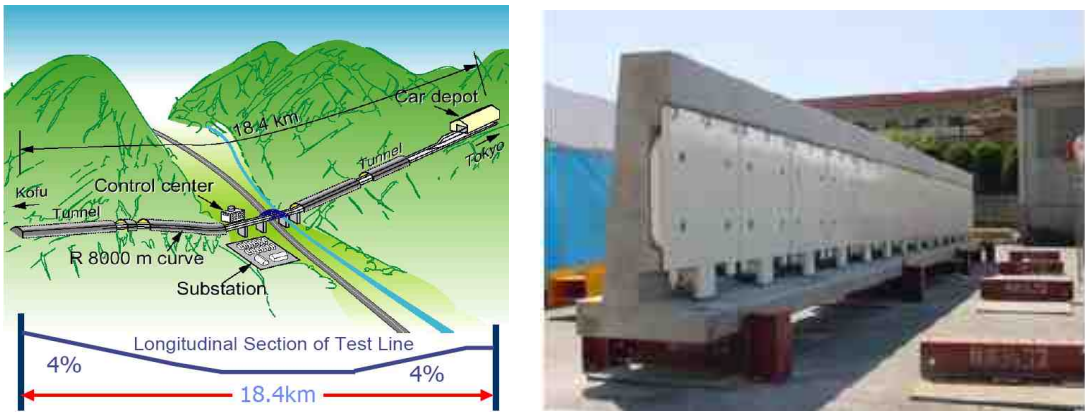
① 기술개발 이력

- 1962 선형전동기 추진 및 비접속 주행 연구 착수
- 1970 초전도체를 사용 역학부상시스템 연구 공식적 착수
- 1972 초전도체 자기부상열차 LSM200/ML100 부상주행 성공
- 1977 Miyazaki 자기부상철도 시험소 건설
- 1979 ML-500R 517km/h 달성
- 1987 405.3km/h(무인2량), 400.8km/h(유인 2량) 성공, RTRI 재단 법인으로 재편 및 JNR R&D 업무 인수
- 1989 공기역학 제동시스템 시험, 394 km/h 달성 (MLU002)
- 1990 전환형 분기기(Traverser) 시험 착수
- 1991 측벽 부상시스템을 이용한 주행시험 착수, MLU002 화재로 전소
- 1994 MLU002N 431km/h 달성
- 1996 Yamanashi 시험선 개통(선행구간 18.4km), MLX01 견인시험
- 1997 MLX01 531 km/h (유인), MLX 01 550 km/h (무인) 기록
- 1999 2개 열차 교행 주행시험 실시 (상대속도 1,003 km/h)
- 2000 일본 교통위원회 “초고속 자기부상 대량수송시스템 실현성 확보” 결론, 시험운행 누적거리 100,000km
- 2002 시험운행 누적거리 200,000km, 시승인원 30,000명
- 2003 누적거리 300,000 km, 3량 MLX 01 581 km/h (유인) 세계최고기록
- 2004 열차 교행 상대속도 1,026 km/h로 교차운행, 누적거리 400,000km

- 2006 고온초전도 마그넷 적용 주행시험 성공
- 2007 시험선 연장 42.8km 건설계획 발표 (실용노선준비단계:2014완료)
- 2008 동경-오사카간 건설 계획 발표 (2025년 완료)

② 야마나시 시험선 개요

㉮ 건설년도 : 1996년
㉯ 위치 : Sakaigawa ~ Akiyama
㉰ 노선길이 : 18.4km(12.8km 이중 트랙)
㉱ 터널 구간 길이 : 16.0 km
㉲ 교각 구간 길이 : 2.4 km
㉳ 최대 구배 : 4 ‰
㉴ 관제소 및 급전소 각 1개소



[그림 2.3.14] 일본 야마나시 시험선 노선 및 측벽 Guideway 구조물

㉵ 야마나시 시험선에서는 시속 500km/h 이상의 운행 속도를 가지는 초전도 자석을 사용하는 초고속 자기부상열차의 시험을 수행하고 실제 주행 환경에서의 시제차량에 대한 신뢰성 및 내구성 평가, 공력특성 개선, 비용 저감 등 실용화를 위한 기술개발을 진행함

㉶ 시험은 크게 제1기 시험기간(1997~1999)과 제2기 시험기간(2000~2004)으로 나누어지며 시제편성차량에 대한 장기신뢰성의 평가를 비롯하여 실용화에 요구되는 다양한 기술 및 구성품의 개발을 중심으로 진행됨

㉷ 2003년에는 3량 편성 MLX로서 유인 세계최고기록인 581km/h의 주행속도를 달성

㉸ 2004년도 말에는 8년에 걸친 야마나시 시험선에서의 기술개발성과에 대해서 일본 국토교통성 산하 '초전도 자기부상식 철도 실용 기술 평가위원회'에서 『초전도 자기부상식철도에 대해서 실용화의 기반기술이 확립되었다』는 최종 평가를 내림

㉹ 2005년도부터 2009년도까지 5년 더 연장하여 실용노선에 투입될 차량의 장기내

구성에 대한 검증과 영업선에 적용할 설비사양의 검토 실시예정

㉮ 2006년에는 현 야마나시 시험선을 당초 계획구간인 42.8km로 연장 건설하기로 발표함

(3) 실시설계 시행 및 공정관리

(가) 공정관리

① 실시설계 용역 착수계 제출('12.5.16)

㉮ "초고속 자기부상철도 단거리 시험선구축 실시설계 용역"에 대한 사업책임자 및 기술자 배치계획, 보안각서 등 용역 착수계 제출

② 시험선 예정부지 현장조사 시행('12.5.18)

㉮ 시험선 예정부지 현장, 진입로, 현장주변 여건 등 파악을 위한 현장조사 시행



③ 실시설계 과업수행계획서 제출('12.5.21)

㉮ 설계에 대한 각분야별 추진계획, 방법, 인터페이스 등 설계 과업수행계획서 제출

④ 단거리 시험선 부지 선정

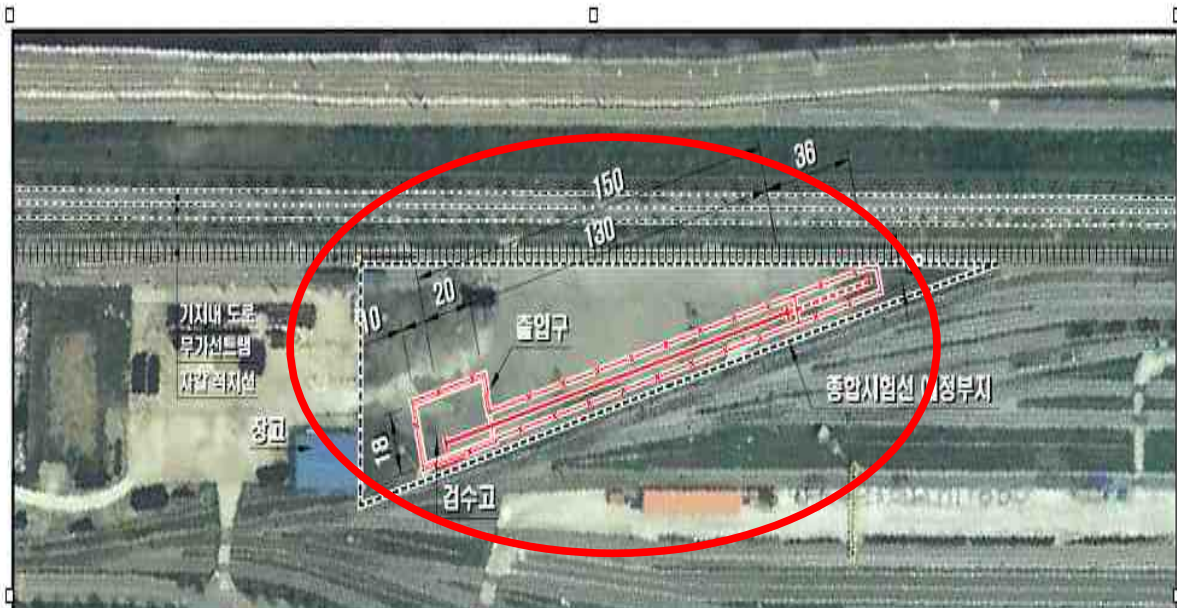
㉮ 위치 : 충북 청원군 강외면 정중 384(공단 시설장비사무소내)

㉯ 선정 : 단거리 시험선 부지는 향후 건설예정인 종합시험선 계획과 저촉 최소화 및 맹용지 발생 최소화를 고려하여 대안 2로 결정

시험선 부지선정

구분	대 안 1	대 안 2	대 안 3
위성도			
특징	• 종합시험선 계획과의 저촉 최소화 • 검수고 후면 맹용지 발생 • 장래 2단계 부지확장 곤란	• 종합시험선 계획과의 저촉 최소화 • 맹용지 발생 최소화 • 장래 2단계 부지확장 곤란	• 종합시험선 계획과 미저촉 • 무가선트램과 시험선이 인접하여 공간 협소 및 시공성 불량 • 장래 2단계 부지확장 가능
적용		○	

○ 초고속자기부상철도 시험선 구축 예정지



⑤시험선 예정부지 지반조사 및 측량 시행('12.5.21~5.25)

㉮ 일 시 : '12.5.21~5.23

㉯ 장　소 : 공단 시설장비사무소내
㉰ 참석자 : 공단, 지케이엔지니어링, 벽산엔지니어링 등 7명
㉱ 내　용 : 시험선 예정부지내 지장물여부, 우수, 배수관 루트 확인 및 지반/측량 시행



⑥ 초고속자기부상철도 단거리 시험선구축 실시설계 계약변경 시행('12.8.2)
㉮ 당초 : 67,052,000원, 변경 : 72,372,000원, 증액 : 5,320,000원
㉯ 사유 : 검수고 면적 증(당초 : 380제곱미터, 변경 : 950제곱미터

(나) 관련기관 밴치마킹
① 경산 경량전철 시험선 밴치마킹 시행('12.5.24)
㉮ 일시/장소 : '12.5.24./ 경산 경량전철 시험선
㉯ 참석자 : 공단 박기주부장, 이정호차장
㉰ 내　용
1) 경산 경량전철 시험선 검수고 현황 및 운용현황
2) 변전실 현황 및 운용현황
3) 구조물 형태 및 전원공급 방안 등 견학



시험선　전경



검수고



본선1



본선2



변전실



전원공급방법

② 영종도 자기부상철도 벤치마킹 시행(‘12.6.18)

㉮ 일 시 : ‘12.6.18

㉯ 장 소 : 영종도 자기부상철도

㉰ 참석자 : 이정호차장

㉱ 내 용

1) 영종도 자기부상철도 검수고내 가이드웨이 구조, 면적(회의실, 제어실 등), 용도 등 견학

2) 검수고내 크레인, 대차 및 객차 유지보수공간, 검수방법 등 견학

3) 변전실 현장 견학

	
검수고 1	검수고 2

	
크레인 1	크레인2

	
변전실	본선

(다) 성과품질 향상을 위한 보고회 및 설계심사 시행

① 실시설계 용역 착수보고회 시행(‘12.5.23)

㉮ 일시/장소 : ‘12.5.23 14:00, 공단 201회의실

㉯ 참석자 : 공단, 철도연, 기계연, 우진산전, 설계사 등 10명

㉰ 회의내용 : 실시설계 조직도, 추진방향, 일정 등 설명

② 실시설계 용역 중간보고회 시행(‘12.6.28)

㉮ 일 시 : ‘12.6.28 14:00

㉯ 장 소 : 철도연 5동 3층 중회의실

㉰ 참석자 : 공단, 철도연, 기계연, 우진산전, 설계사 등 15명

㉱ 회의내용 :

1) 구조물 형태(강제, 콘크리트 구조), LSM 체결 방법, 전원공급 방법

2) 검수고내 면적(회의실, 사무실, 창고, 화장실, 인버터실, 유지보수공간 등) 검토

3) 전기실 면적 검토 및 공단과 우진산전간 인터페이스 사항 검토

4) 대차와 구조물간 인터페이스 사항 검토

5) 크레인, CCTV등 설치 여부 검토

③ 최종보고회 개최

㉮ 일 시 : ‘12.7.27

㉯ 장 소 : 한국철도시설공단 7층 회의실

㉰ 참석자 : 공단, 철도연, 기계연, (주)우진산전 책임 및 참여연구원

④ 설계 심사요청(‘12.7.18)

㉮ 설계 심사를 통해 예산절감, 기능향상, 설계 오류방지 및 설계품질향상을 위해 설계 심사요청(기술연구소⇒기준심사처)

㉯ 지적사항 조치완료 보고(’12.8.2)

1) 분야별(토목, 건축, 전기, 통신) 설계심사 지적사항에 대한 조치완료 보고(50건)

(3) 설계준공

① 초고속자기부상철도 단거리 시험선 구축 실시설계 준공검사 시행

② 일 시 : ’12.8.8~8.9(2일)

③ 검사자 : 황인환과장(노반, 건축분야), 심수섭대리(전기, 통신분야) 초고속자기부상철도 단거리 시험선 구축 실시설계 준공검사 결과 및 준공금 지급 결의(’12.8.20)

(4) 공사발주 서류작성 및 계약체결

(가) 발주서류 작성

① “초고속 자기부상철도 단거리 시험선 구축공사” 발주 시행(안)방침 수립(’12.9.4)

㉮ 초고속 자기부상철도 단거리 시험선 구축공사에 대한 발주 방안, 발주시기 등 내부방침 수립

② “초고속 자기부상철도 단거리 시험선 구축공사” 발주 시행 내부방침수립(’12.9.5)

③ “초고속 자기부상철도 단거리 시험선 구축공사” 계약요청 공문 발송(계약처) 및 KR전자조달시스템에 계약요청 자료입력(‘12.9.05)

④ “초고속 자기부상철도 단거리 시험선 구축공사” 입찰공고(‘12.9.07)

⑤ “초고속 자기부상철도 단거리 시험선 구축공사” 개찰(‘12.9.13)

⑥ 계약요청 및 계약체결

㉮ PHC파일 구매 계약요청 및 KR 전자조달 자료입력(‘12.10.29)

1) “초고속 자기부상철도 단거리시험선 구축 공사 PHC파일 구매” 계약요청 공문 발송 (계약처) 및 KR전자조달시스템에 계약요청 자료입력(조달청 위탁계약)

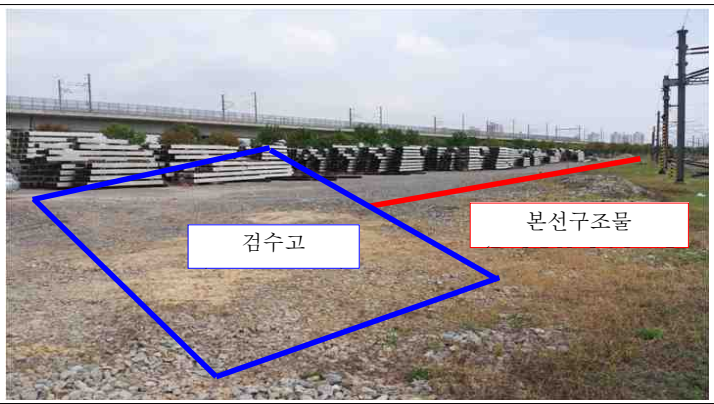
(3) 건설공사 추진 및 공정관리

(가) 건설공사 착수계 제출(‘12.10.08)

① “초고속 자기부상철도 단거리 시험선구축 공사”에 대한 사업책임자 및 기술자 배치계획, 보안각서 등 공사 착수계 제출

(나) 시험선 부지 현장조사 시행(‘12.10.15~)

① 가설사무실 부지 및 진입로, 현장주변여건 등 파악을 위한 현장조사 시행



검수고 및 본선구조물 위치 현장확인





상수도 및 전력케이블 현장확인

② 가설사무실 공사



현장사무실 2동, 창고 1동

(다) 지장물 이설공사 시행('12.11.03~)

① 시험선부지내 침목 및 자갈 이설



지장물(침목) 이설



지장물(자갈) 이설

(라)시험선 공사 시행

① 시험선 기초공사 PHC파일 공사



② 부대공사(상수도,배수로 공사)시행



(나) 초고속 자기부상철도 단거리 시험선 구축 공사 PHC파일 준공

① 초고속 자기부상철도 단거리 시험선 구축 공사 PHC파일 준공검사 시행

㉮ 일 시 : '12.12.26

㉯ 검사자 : 황인환과장, 윤성순과장

라. 2차 시험선 공사

(1) 시험선 공사 계약체결

(가) 시험선 건설공사 3차 계약체결

- 계 약 자 : 무영종합건설(주), 다우건설(주)

(2) 구매설치 계약체결

(가) 천장크레인 구매설치 1차 계약체결

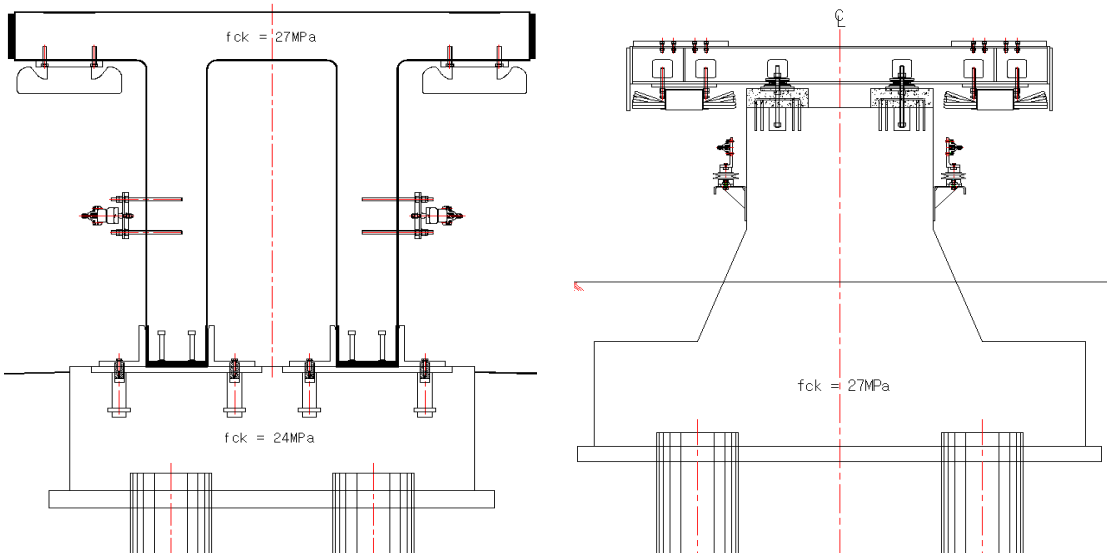
- 계 약 자 : 동양산업기계(주)

(3) 시험선 가이드웨이 건설공사 추진현황

(가)가이드웨이 구조변경 시행

- 당초 Ⅱ형 구조의 가이드웨이로 설계하였으나, 운영 중 유지보수 및 LSM취부 용이성 등을 고려하여 상,하 분리형 구조로 변경
- 하부구조(콘크리트)와 상부구조물(강재) 사이에 체결구를 이용하여 수직, 수평 단차조정 가능으로 유지보수성 향상
- LSM취부는 현장설치가 불가능하여 상부구조물 제작시 LSM취부까지 완료하여 현장반입으로 LSM취부 용이성 향상

(나) 가이드웨이 변경 전,후 단면도



당초:Ⅱ형 구조 가이드웨이　　변경:상하분리형 구조 가이드웨이

[그림 2.3.15] 가이드웨이 구조

(다) 가이드웨이 하부구조 공사

① 시공과정

- 구조물 중심선 측량
- PHC파일 공사 (암반층까지 기초파일 안착)
- 철근조립 작업 및 거푸집설치 (철근간격 등 치수 확인)
- 콘크리트 타설, 양생 및 거푸집 철거 (레미콘 슬럼프 시험)
- 외관 규격 검사

② 시공 사진(철근조립 작업)



[그림 2.3.16] 하부구조물 철근조립 작업

③ 시공 사진(거푸집 설치 작업)



[그림 2.3.17] 하부구조물 거푸집 설치 작업

④ 시공 사진(콘크리트 타설 및 양생 작업)



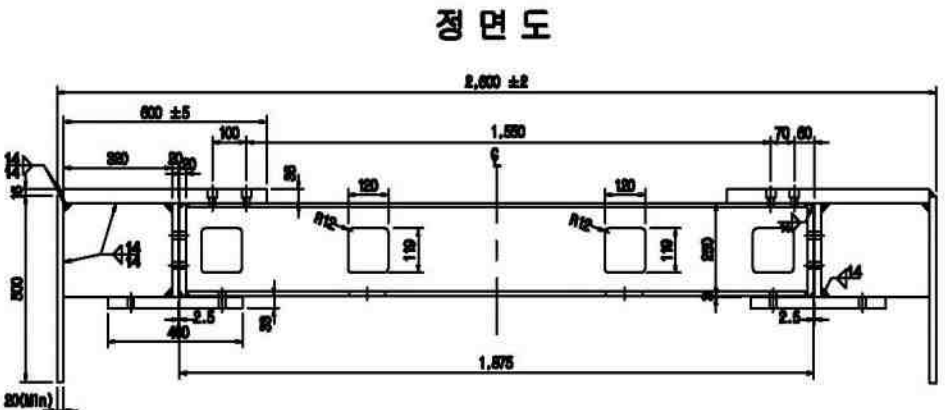




[그림 2.3.18] 하부구조물 콘크리트타설 및 제작완료

(라) 가이드웨이 상부구조 제작

① 상부구조 단면도



[그림 2.2.19] 상부구조물 단면도

② 상부구조물 제작사진



[그림 2.3.20] 상부구조물 제작

(4)시험선 검수고 건설공사 추진현황

(가) 검수고 건설공사

① 시공 사진(검수고 철골공사)



[그림 2.3.21] 검수고 철골공사

② 시공 사진(검수고 외장판넬 공사)







[그림 2.3.22] 검수고 외장판넬 공사

③ 시공 사진(검수고 조적공사 및 미장공사)







[그림 2.3.23] 검수고 조적공사 및 미장공사

④ 시공 사진(검수고 내장판넬공사 및 창호공사)







[그림 2.3.24] 검수고 내장판넬공사 및 창호공사

⑤ 시공 사진(검수고 내장재 마감공사)



[그림 2.3.25] 천장 텍스마감공사



[그림 2.3.26] 수장공사 페인트 마감



[그림 2.3.27] 관제실 악세스플로워 마감

(나) 검수고 천장크레인 설치공사

① 천장크레인 사양 및 규격

TYPE (형식)		10 TON x SPAN 11.490M x T/L 24.3M HOIST식 천정 CRANE	
QUANTITY (수 량)		2 대 (1LINE)	
HOISTING LOAD (정격하중)		10 TON	
TESTING LOAD (시험하중)		11 TON	
SPAN (주행 RAIL 중심거리)		11.49 M	
LIFT (양정)		6.572 M	
GIRDER TYPE (형식)		DOUBLE	
SPEED	HOISTING (권상)	4.5/0.45 M/MIN	9/1.1 KW x 8 P
	TRAVERSING(횡행)	16 M/MIN	0.75 KW x 4 P
	TRAVELLING(주행)	21 M/MIN	1.5 KW x 4 P x 2SETS
BRAKE	HOISTING (권상)	D.C MAGNET DISC BRAKE	
	TRAVERSING(횡행)	D.C MAGNET DISC BRAKE	
	TRAVELLING(주행)	D.C MAGNET DISC BRAKE	
주위온도 (MAX.)		40℃	
POWER SOURCE (전 원)	POWER (동력)	AC. 3Ø 380V 60Hz	
	CONTROL (조작)	AC. 1Ø 110V 60Hz	
CONTROL TYPE (운전방식)		BY PENDANT SWITCH & REMOCON	
BUFFER TYPE		RUBBER	
WIRE ROPE 종류		6xFi(25) IWRC Ø 14 x 4 FALLS	
RAIL	TRAVERSING(횡행)	15 KG/M	
	TRAVELLING(주행)	30 KG/M	
POWER SYSTEM	TRAVERSING(횡행)	FESTOON TYPE	
	TRAVELLING(주행)	TROLLEY BAR	
RATING (정격)		30 MIN	
LOCATION (설치장소)		IN-DOOR	

[그림 2.3.28] 천장크레인 제작사양

② 천장크레인 서면심사 결과 통지서

심 사 결 과 통 지 서

신청인	사 업 장 명	동양산업기계㈜	산재보험관리번호 (사업자등록번호)	- (139-81-16513)
	소 재 지	인천광역시 남동구 고잔동 735-9 남동공단 166B-10L (전화 : 032-812-6096 FAX : 032-813-6096)		
	대 표 자 명	김 상 원		
안전인증대상 기계 · 기구명		천장주행 크레인	인 증 번 호	14-BA1AC-0062
형 식 (규 격)		DHI14-1578	용 량(등 급)	정격하중 10 ton / 양 정 10.355 m
인 증 심 사 원		최 진 영		백 남 일

「산업안전보건법」 제34조 및 같은 법 시행규칙 제58조의4에 따라 실시한

□ 예비심사
■ 서면심사
□ 기술능력 및 생산체계심사
□ 개별 제품심사
□ 형식별 제품심사

결과가 ■ 적 합 / □ 부적합 함을 통지합니다.

2014 년 1 월 10 일

대 한 산 업 안 전 협 회 장

[그림 2.3.29] 천장크레인 서면심사 결과

③ 천장크레인 설치 및 시운전



[그림 2.3.30] 천장크레인 시운전(산업안전공단 입회시험)

(5) 시험선 건설공사 2차 준공

(가) 시험선 건설공사 2차 준공검사 시행

▪ 준공검사 : ‘13.12.30(월) 1일간

(6) 시험선 레미콘구매 준공

(가) 시험선 레미콘구매 현장납품완료 검사 시행

▪ 준공검사 : ‘13.12.31(월) 1일간

(7) 시험선 천장크레인 1차 준공

(가) 시험선 천장크레인 1차 준공검사 시행

▪ 준공검사 : ‘13.12.30(월) 1일간

5. 가이드웨이 성능시험 절차서 및 성적서

미래철도기술개발사업	초고속 추진 및 시스템 엔지니어링 기술개발

가이드웨이 성능시험절차서

Rev.	날짜	개정 사유
00.00	2014.7.1	최초작성

승 인	2014.7.1	정 남 훈	
검 토	2014.7.1	김 훈	
작 성	2014.7.1	김 훈	
	일 자	성 명	서 명

파 일 명	가이드웨이 성능시험 절차서		
워드프로세서	한글 2010		
문 서 번 호		시험항목코드	

- 개정 이력

Rev.	페이지	변경사유	변경내용		개정일자
			~를	~(으)로	
00.00		최초 작성	최초 작성		'14.7.1

목 차

1. 적용범위 ····· 4

2. 적용규격 ····· 4
   2.1. 적용 문서 ····· 4
   2.2. 용어 정의 ····· 4

3. 시험의 목적 및 방법 ····· 4
   3.1. 시험 목적 ····· 4
   3.2. 시험장소 ····· 4
   3.3. 시험 항목 ····· 5
   3.4. 시험 방법 ····· 5
   3.5. 시험방법 및 판정기준 ····· 6

4. 판정기준 ····· 11

별첨 1. 가이드웨이 시험 기록지 ····· 12

1. 적용범위

본 절차서는 초고속 자기부상열차 단거리시험선에서 초고속 자기부상철도 핵심기술개발 연구단과제를 통하여 개발되는 "초고속 자기부상열차에 사용되는 가이드웨이의 성능시험"을 위한 시험 절차 및 기준에 대하여 규정한다.

2. 적용규격

2.1. 적용 문서

1) 도시형자기부상열차 시범노선 종합시험 기준 및 시험방안 개발 연구 용역 시험절차서
2) High-speed Maglev System Design Principles

2.2. 용어 정의

1) 궤간틀림 : 좌우 양 레일간의 간격틀림이다.
2) 수평·수직틀림 : 레일 기준선(궤간선)에서 임의의 5m현 (이상) 에 대한 종거를 측정한 수치로서 레일의 수평, 수직 방향에 대한 상대적인 직진성 틀림을 의미
3) 이음매 단차 : 레일간 이음매에서 레일의 수직 및 횡방향 단차
4) 레일상하 단차 : 좌우 레일간 연직방향 높이의 차
5) 횡방향 틀림 : 편측레일에서 형성되는 평면에 대하여 상대측 레일의 회전에 대한 틀림

3. 시험의 목적 및 방법

3.1. 시험 목적

초고속 자기부상 열차의 주행안전성을 확보하기 위하여 궤도의 상태를 점검하고 가이드웨이 요구성능(기준) 충족여부를 검토한다.

3.2. 시험장소

시험은 주행이 이루어진 본선 구간에서 실시하고 최고속도 운행구간, 취약구간을 우선적으로 선정하는 것을 원칙으로 한다.

3.3. 시험 항목

구분	시 험 항 목		판정기준	비 고
1	궤간틀림		± 3mm	2,600mm
2	수평틀림		± 3mm	임의의 5m 레일
3	수직틀림		± 3mm	임의의 5m 레일
4	이음매 단차	수직방향	± 1mm	
5		횡방향	± 2mm	
6	레일상하 단차		± 3mm	좌/우 레일
7	횡방향 틀림		± 1mm	2,600mm 궤간

3.4. 시험 방법

3.4.1. 시험 조건

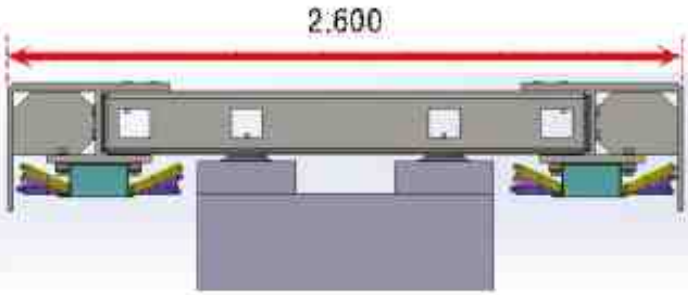
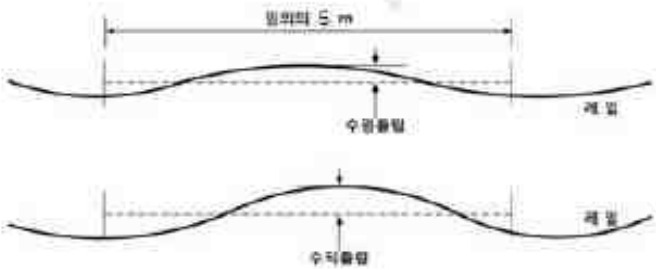
1) 선로에 검측인원을 투입하기 전에 투입인원 및 투입시간에 대해 단거리 시험선 유지관리 담당자의 사전 승인을 받아야 한다.
2) 선로검측 시간에는 차량운행을 통제하여야 하며 1명 이상의 안전요원을 반드시 배치해야 한다.

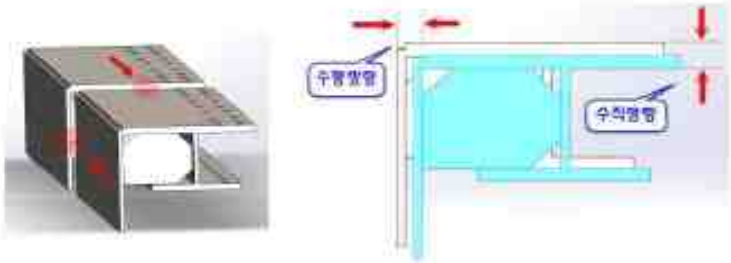
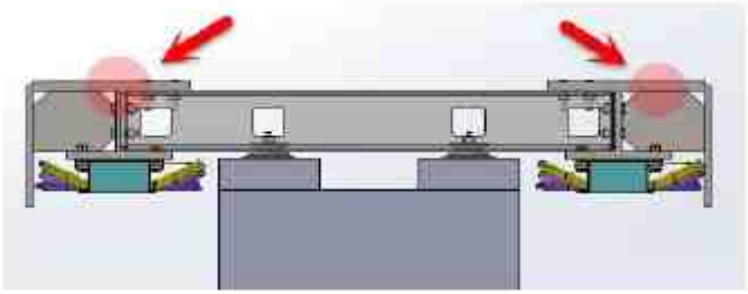
3.4.2. 측정 장비

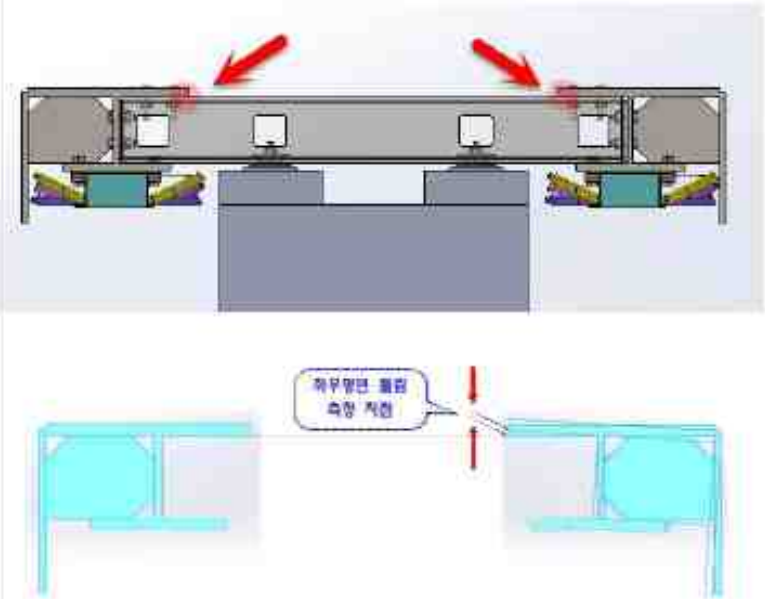
No.	시험장비 및 자재	수량	비 고
1	광파기	1	
2	레벨	1	
3	검측용 실	1	
4	클리노미터	1	
5	직선자	1	

3.5. 시험방법 및 판정기준

3.5.1. 시험방법

항 목	검사(검측) 방법	비고
궤간틀림	양 레일 단부 기본간격 2,600mm에 대한 틀림량을 말하며 기본간격 보다 큰 경우를 (+), 축소되어 있는 것을 (-) 로 정의한다.  Rail 당 3개소 이상 검측	
수평 수직 틀림	레일의 기준선 (단부 또는 중심선) 에서 임의의 5m (이상의) 현 에 대한 종거를 측정한 수치로써 레일의 수평, 수직 방향에 대한 상대적인 직진성 틀림을 의미한다.  2.5 m당 1개소 검측	

항 목	검사(검측) 방법	비고
이음매 단차	레일간 이음매에서 레일의 수직 및 횡방향 단차로서 레일 설치기준에 대하여 그 증감량을 의미하고, 검측방법은 수직, 횡방향의 직각방향으로 직선자와 틈새게이지를 이용하여 검측한다.  이음매 전개소 검측	
레일 상하단차	직선부에서 레일의 설치기준에 대한 좌우 레일간 연직 방향 높이의 차를 의미하고, 레일상하 단차의 검측방법은 레벨기를 이용한다.   	

항 목	검사(검측) 방법	비고
횡방향 틀림	틀림의 측정은 편측레일의 레일기준면과 일치하는 직선과 상대측 레일과의 높이를 레일기준면에서 측정한 값을 의미하고, 검측방법은 횡방향 틀림 검측방법은 롤세게이지를 이용하여 항목과 레일사이의 틀림량을 이용한다.  	

3.5.2. 검측구간 선정

본선의 전구간을 선정한다. 본선은 준공도면의 표기법에 의하면 검수고의 S7에서부터 본선 종단부근의 단부 차막이 부근 S16까지 10개 구간으로 구분되어 있으며 각 구간의 연장은 아래와 같다.

표 1. 검측 구간 연장

구 분	연장(m)	구 분	연장(m)	비 고
S7	13,430 m	S12	13,430 m	
S8	13,430 m	S13	13,430 m	
S9	13,430 m	S14	13,430 m	
S10	13,430 m	S15	13,430 m	
S11	13,430 m	S16	10,195 m	

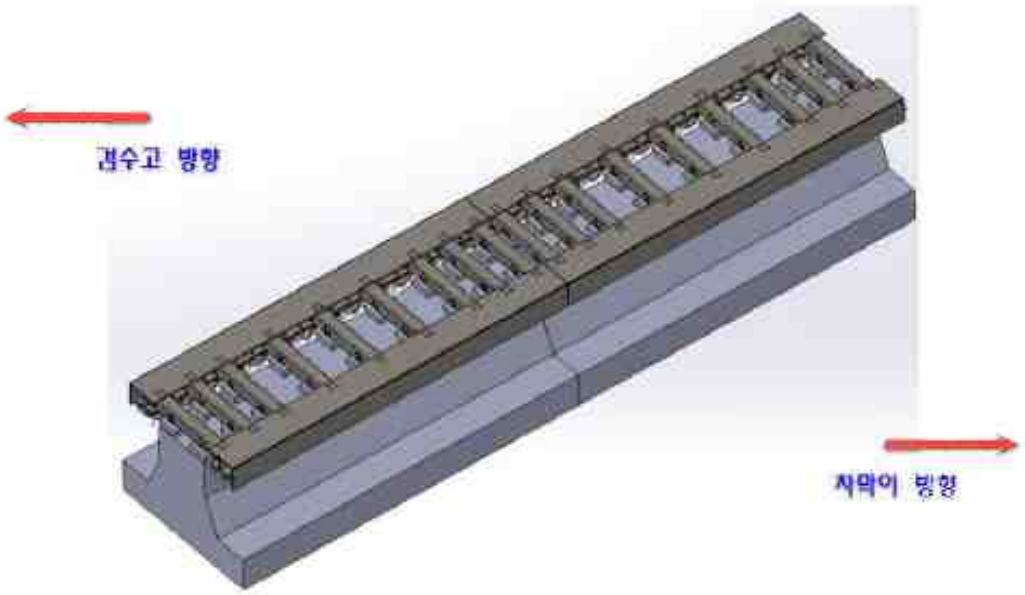


그림 1. 궤과 위치 번호

3.5.3. 위치 부호

각 구간은 2개의 궤광으로 구성되어 있다. 2개의 궤광 중에서 검수고 방향의 궤광을 1 번으로 표기하고 종단부 차막이 방향의 궤광을 2로 표기하였다.

각 궤광은 9개의 침목이 부착되어 있으며 측정은 단부 2개와 중앙 침목 중심부를 측정 지점으로 하였다. 위치 표시는 '구간번호 – 궤광번호 – 침목번호' 로 표기하였다. 즉, 'S9 – 1 – 5' 은 'S9 구간 – 검수고 방향 궤광 – 5번 침목' 의 중앙부를 의미한다.

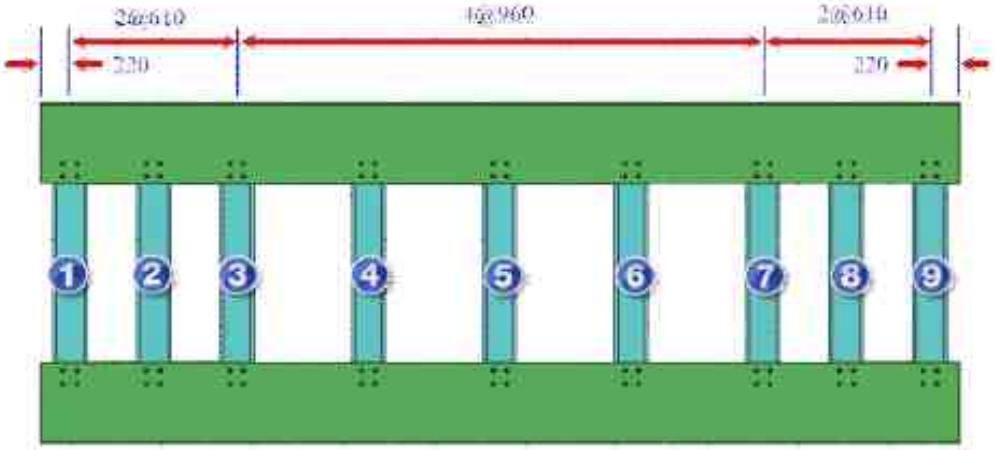


그림 2. 침목 위치 (번호)

4. 판정기준

순번	시험항목		판정기준	판 정	비 고
1	궤간틀림		± 3mm	합 / 불	2,600mm 궤간
2	수평틀림		± 3mm	합 / 불	임의의 10m 레일기준
3	수직틀림		± 3mm	합 / 불	임의의 10m 레일기준
4	이음매 단차	수직방향	± 1mm	합 / 불	
5		횡방향	± 2mm	합 / 불	
6	레일상하 단차		± 3mm	합 / 불	좌/우 레일
7	횡방향 틀림		± 1mm	합 / 불	2,600mm 궤간

별첨 1. 가이드웨이 시험 기록지

검 측 기 록 부

(시공완료시)

사 업 명: 초고속자기부상철도 단거리 시험선구축 공사 확 인 자: 정 남 철 (인)

측 정 구 간: 본선구간 S7 ~ S16 측 정 자: 김 훈 (인)

측 정 일 시: 2015. 3. 23.

항목	위치	궤간 틀림	수평 틀림	수직 틀림	레일 상·하 단차	횡방향 틀림	위치	이음매 단차			
								수직방향 ±1mm		횡방향 ±2mm	
판정기준		±3mm	±3mm	±3mm	±3mm	±2mm		좌측	우측	좌측	우측
S7	S7-1-1										
	S7-1-5					합격					
	S7-1-9	1	-1	0	0	합격	S7_1 /S7_2	1	0.5	0	1
	S7-2-1	0	0	0	-0.5	합격					
	S7-2-5	-1	1	0	-0.5	합격					
	S7-2-9	0	0	0	0.5	합격	S7_2 /S8_1	0.5	0	0	0.5
S8	S8-1-1	0.5	0	0	-1	합격					
	S8-1-5	0	1	0	-1	합격					
	S8-1-9	2	0	0	-1	합격	S8_1 /S8_2	1.5	2	1	1
	S8-2-1	1	0	0	-1	합격					
	S8-2-5	1	-0.5	-0.5	-0.5	합격					
	S8-2-9	0	0	0	0.5	합격	S8_2 /S9_1	1	1.5	0	0
S9	S9-1-1	1	0	0	-0.5	합격					
	S9-1-5	-1	1	-0.5	-0.5	합격					
	S9-1-9	0	0	0	0	합격	S9_1 /S9_2	0.5	1	2.5	1
	S9-2-1	0	0	0	0	합격					
	S9-2-5	-1	1	0.5	1	합격					
	S9-2-9	0	0	0	0	합격	S9_2 /S10_1	0	0	1.5	2

항목	위치	궤간 틀림	수평 틀림	수직 틀림	레일 상·하 단차	횡방향 틀림	위치	이음매 단차			
								수직방향		횡방향	
								±1mm		±2mm	
판정 기준		±3mm	±3mm	±3mm	±3mm	±2mm		좌측	우측	좌측	우측
S10	S10-1-1	2	0	0	0	합격					
	S10-1-5	1	0.5	-0.5	-0.5	합격					
	S10-1-9	1	0	0	0	합격	S10_1 /S10_2	3	1	2.5	1
	S10-2-1	-1	0	0	0.5	합격					
	S10-2-5	0	1	0.5	1	합격					
	S10-2-9	-1	0	0	0	합격	S10_2 /S11_1	0	1	1	1
S11	S11-1-1	-2	0	0	-0.5	합격					
	S11-1-5	-2	0.5	-1	-0.5	합격					
	S11-1-9	-1	0	0	0	합격	S11_1 /S11_2	1	0	0.5	0.5
	S11-2-1	-1	0	0	0.5	합격					
	S11-2-5	-1	0.5	0.5	1	합격					
	S11-2-9	0	0	0	0	합격	S11_2 /S12_1	0	1	2.5	0.5
S12	S12-1-1	0	0	0	-0.5	합격					
	S12-1-5	0	0	-1.5	0.5	합격					
	S12-1-9	0	0	0	-0.5	합격	S12_1 /S12_2	2	2.5	2	0
	S12-2-1	0	0	0	-1	합격					
	S12-2-5	1	-1	-1	-0.5	합격					
	S12-2-9	0	0	0	0	합격	S12_2 /S13_1	1	0	3	0
S13	S13-1-1	-1	0	0	0.5	합격					
	S13-1-5	-1	0	-0.5	0.5	합격					
	S13-1-9	-1	0	0	-0.5	합격	S13_1 /S13_2	2	0	2	0
	S13-2-1	-1	0	0	0.5	합격					
	S13-2-5	-1	0.5	-0.5	-1	합격					
	S13-2-9	0	0	0	-0.5	합격	S13_2 /S14_1	3	2	3	1

항목	위치	궤간 틀림	수평 틀림	수직 틀림	레일 상·하 단차	횡방향 틀림	위치	이음매 단차			
								수직방향		횡방향	
								±1mm		±2mm	
관정 기준		±3mm	±3mm	±3mm	±3mm	±2mm		좌측	우측	좌측	우측
S14	S14-1-1	-1	0	0	-0.5	합격					
	S14-1-5	-1	0	-1.5	0	합격					
	S14-1-9	-1	0	0	0.5	합격	S14_1 /S14_2	2	0	3	0.5
	S14-2-1	-1	0	0	0.5	합격					
	S14-2-5	0	-0.5	-1.5	0	합격					
	S14-2-9	0	0	0	0.5	합격	S14_2 /S15_1	1	0	1.2	1
S15	S15-1-1	0	0	0	0.5	합격					
	S15-1-5	0	0.5	-1.5	0.5	합격					
	S15-1-9	1	0	0	0	합격	S15_1 /S15_2	1	1	0	2.5
	S15-2-1	1	0	0	0.5	합격					
	S15-2-5	-0.5	1	-1	1	합격					
	S15-2-9	0	0	0	0.5	합격	S15_2 /S16_1	2	2	2	1.5
S16	S16-1-1	0.5	0	0	-1.5	합격					
	S16-1-5	0	0.5	-1.5	-1	합격					
	S16-1-9	0	0	0	0	합격	S16_1 /S16_2	1	1	2	1
	S16-2-1	0.5	0	0	0	합격					
	S16-2-5	0	0	0	0	합격					

제4절 초고속 자기부상열차 가이드웨이 해석기술 개발

1. 개요

가이드웨이는 초고속 자기부상 차량의 하중을 지지하여 지반까지 안전하게 전달할 수 있는 조건을 충분히 만족할 수 있는 강도를 가지도록 설계되어야 하며 차량의 원활한 주행을 위해서는 강도뿐만이 아니라 주행을 위한 기타 제반조건 즉, 처짐, 승차감을 위한 가속도, 그 밖에 자기부상 고유한 요구성능을 만족하여야 한다.

국내에서는 도시형 자기부상 구조물에 대해서는 최근 연구가 진행되고 있으나, 초고속 자기부상 가이드웨이에 대한 설계/제작은 국내에서 최초로 수행하는 것이어서 기존에 국내외에서 수행되었던 자기부상 구조물에 대한 개발사례를 조사하고 가이드웨이의 요구성능, 설계하중, 설계기준에 대한 연구가 우선적으로 필요하다. 이를 바탕으로 초고속 자기부상 구조물의 동적인 해석기법을 개발하여 보다 안전하고 경제적인 가이드웨이 해석기술 개발을 위한 이론적인 해석기법의 접근이 필요하다

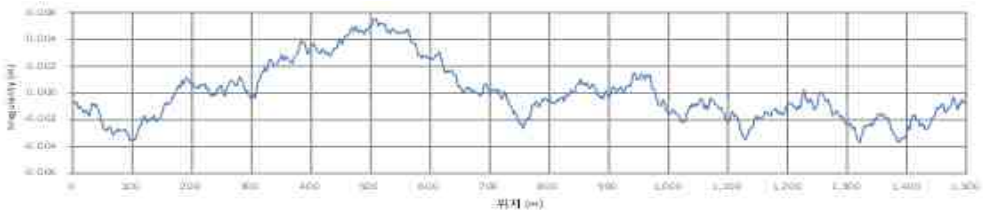
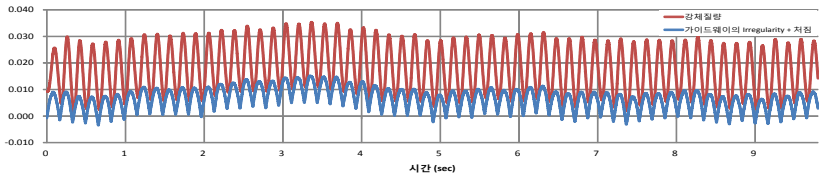
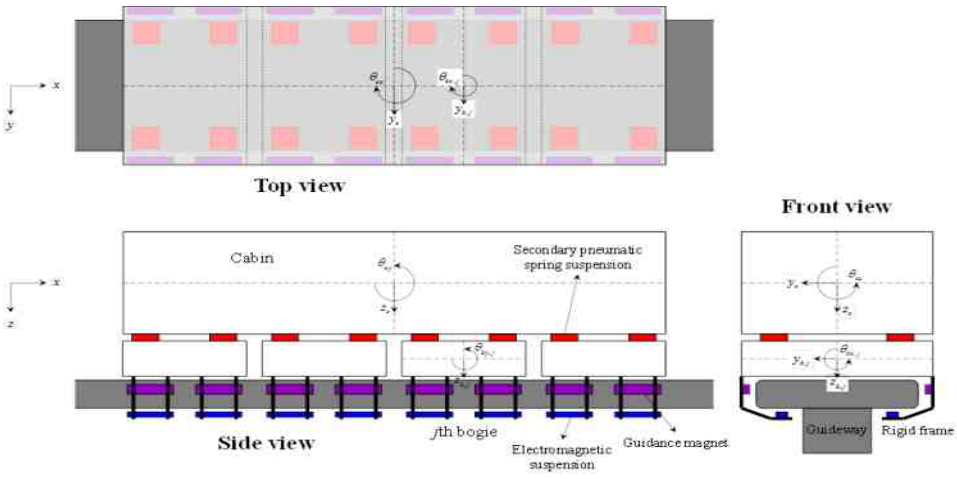
2. 목표

해석기술을 개발하기 위해서 앞에서 언급한 바와 같이 초고속 자기부상 가이드웨이 설계·제작과 적용경험이 있는 해외 선진국(독일 Transrapid)의 요구성능 및 사례조사가 필요하다. 이를 위해 초고속 자기부상 선진국인 독일 Transrapid 가이드웨에 대한 문헌조사를 수행하여 가이드웨이 개발과정을 조사하고 초고속 자기부상 가이드웨이를 설계 및 시공 시 고려해야할 인터페이스 항목을 조사하였다.

본 연구에서 건설하고자 하는 초고속 자기부상 단거리 시험선에 적용할 설계기준에 대해서 해외 초고속 자기부상 선진국의 설계기준과 국내 도시형 자기부상의 경우를 조사하여 설계 시 고려할 고정하중, 활하중, 기타하중 그리고 차량이상 시 발생하는 하중 등을 파악하여 안전한 주행로 설계 및 제작에 이용하여야 한다.

최종적으로 강체 가이드웨이 시스템의 안정성, 다양한 운행속도와 조건 하에서 초고속 자기부상철도 시스템의 동적거동 분석이 가능하며, 초고속 자기부상열차-가이드웨이의 상호작용을 고려한 3차원 동해석 기법을 개발하였다.

3. 개발 내용 요약

<table>
<tr><td>연구목표</td><td>초고속 자기부상열차-가이드웨이의 상호작용을 고려한 3차원 동해석 기법을 개발하고, 다양한 운행속도와 조건 하에서 초고속 자기부상철도 시스템의 동적거동 분석</td></tr>
<tr><td>연구내용</td><td>▪ 가이드웨이 궤도틀림 모델
▪ 강체 가이드웨이를 운행하는 강체질량 시스템의 안정성 분석
▪ 유연한 가이드웨이를 운행하는 강체질량 시스템의 동적거동 분석
▪ 초고속 자기부상열차-가이드웨이 상호작용 3차원 정밀해석 기법 개발</td></tr>
<tr><td>수행과정</td><td>▪ 국내외 초고속자기부상열차-가이드웨이 상호작용해석 관련 논문 및 연구보고서 분석을 통한 기술 동향 분석
▪ 국내외 관련 전문가 자문을 통한 기술개발방향 설정
▪ 유연한 가이드웨이를 이동하는 강체질량의 동적 거동 특성 분석 후 이를 일반적인 자기부상철도 시스템으로 확장
▪ 운행 속도, 가이드웨이 강성 등을 변화시켜가며 parametric study 수행</td></tr>
<tr><td rowspan="3">연구결과</td><td>▪ 가이드웨이 궤도틀림 모델
  </td></tr>
<tr><td>▪ 유연한 가이드웨이를 운행하는 강체질량 시스템의 동적거동 분석
운행속도 시속 550 km, 처짐비 2500:
  </td></tr>
<tr><td>▪ 초고속 자기부상열차-가이드웨이 상호작용 3차원 정밀해석 기법 개발
  </td></tr>
</table>

4. 상세 개발 내용

가. 국내외 개발 동향

(1) 국내 개발동향

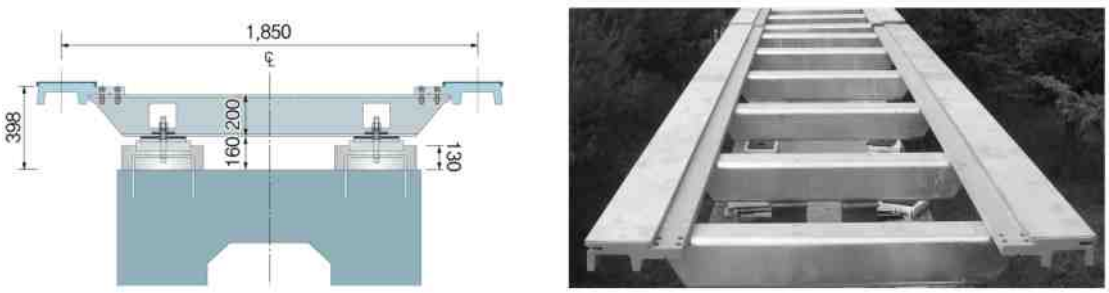
인천국제공항에 건설되는 도시형 자기부상열차는 국내 최초의 자기부상 실용화 노선이다. 선형전동기(Linear Motor)로 추진력을 발생시켜 레일과 접촉하지 않고 주행하는 특성은 저소음, 저공해성을 지닌 우수한 첨단 교통수단으로 각광받을 것으로 기대되고 있다.

자기부상 열차의 선로구조물은 고가궤도의 형태로 건설되어져 있으며 궤도와 비접촉방식으로 대차가 궤도를 감싸고 주행하는 구조적 특성상 일반 철차륜 방식의 궤도와는 다른 특수한 형태 (가이드웨이, 침목, 분기기 등)로 구성되어 있다.

선로구조물은 시공성과 경제성, 주변환경과 미관을 고려한 슬림한 형태로 설계되어 있으며 자기부상 열차의 안전한 열차운영을 위해 기존 방식과 다른 성능(설계기준)을 충족시켜야 한다. 도시형 자기부상에사용된 주요 설계기준은 아래와 같다.

(가) 궤도 주요 설계기준

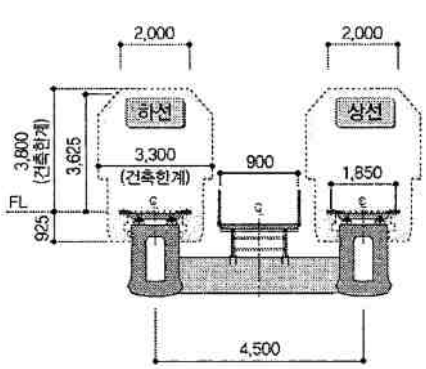
구 분		설 계 기 준	비 고
궤 간		• 1,850mm	레일 기준면
최소 곡선 반경	본선구간	• R=100mm 이상 부득이한 경우 60mm까지 축소	
	정거장구내 (승강장구간)	• R=600mm 이상	
궤도 중심 간격	직선구간	• 일반구간 : 4,050mm 이상 • 건넘선 구간 : 6,000mm 이상	
	곡선구간	• 직선구간 + W_c(내측확폭량) + W_e(외측확폭량)	



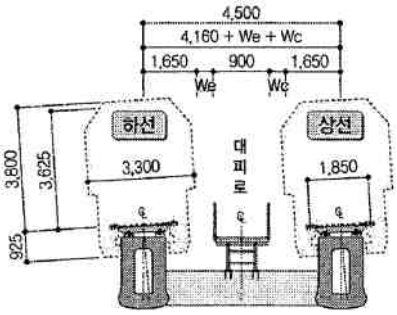
[그림 2.4.1] 궤도 및 Mono Block 침목

(나) 건축한계 설계기준

구 분			설 계 기 준	비 고
건축 한계	직 선 구 간		• 3,300mm × 3,800mm	높이기준 : 레일기준면
	곡 선 구 간		• Wc(내측확폭량) : 15,600/R • We(외측확폭량) : 15,600/R (캔트에 의하여 경사)	
	승강장 연단	직선 구간	• 차량한계로부터 60mm 이하 • (레일기준면 상단 1,000mm 상면에서 측정)	
		곡선 구간	• 건축한계 확대량에 따라 확대	

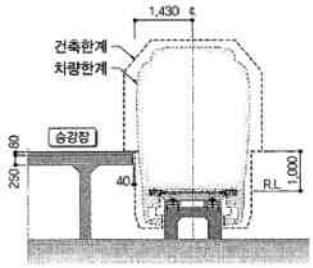


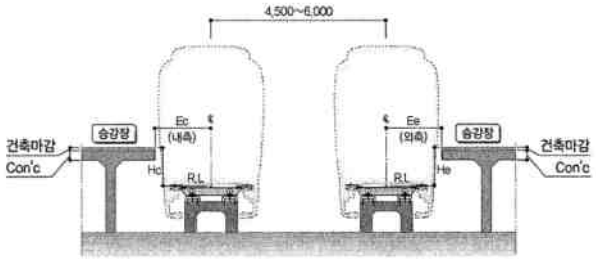
(a) 복선부



내측 : W_c=15,600/R, 외측 : W_e=15,600/R

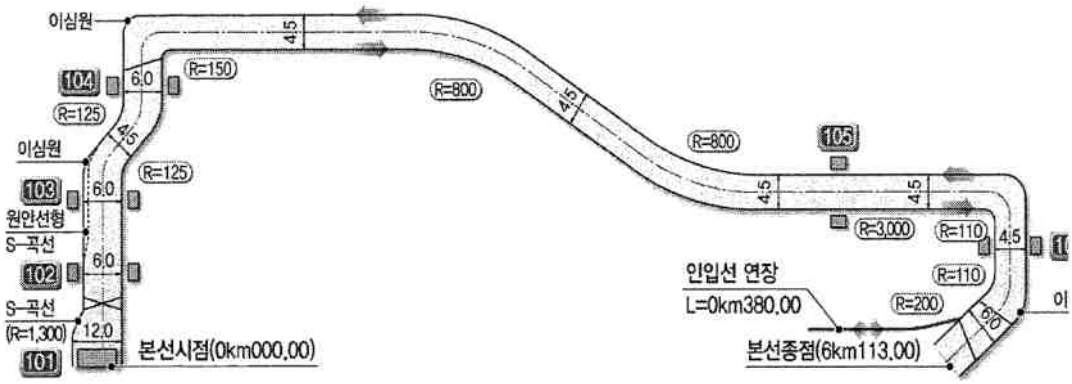
(b) 곡선부





(c) 곡선부

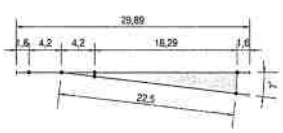
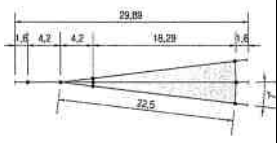
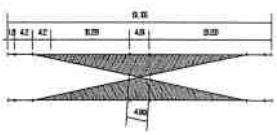
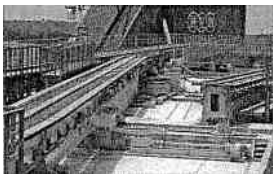
[그림2.4.2] 건축한계



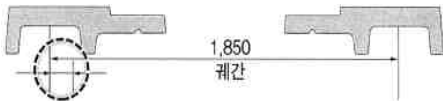
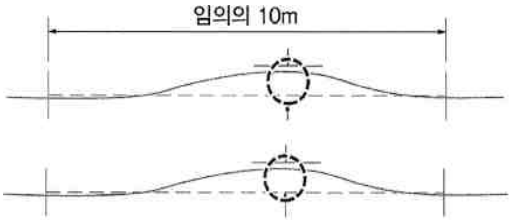
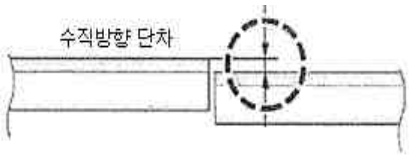
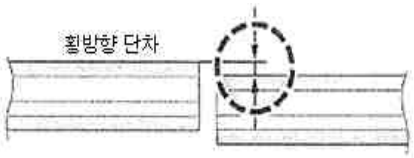
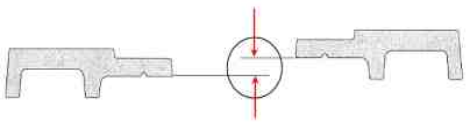
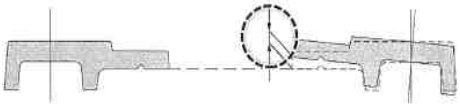
[그림 2.4.3] 궤도 중심간격

(다) 관절형 분기기

중저속 도시형 자기부상열차가 운행되는 시범노선에는 2way와 3way, Scissors 형태의 분기기가 설치되어 있으며, 각각의 특성은 아래 표와 같다.

구분	2방향	3방향	SCO
스켈톤			
현황사진			
특성	• 2방향으로 분기기 사용 • 일반적인 분기시 사용 • 건넘선의 경우 사용	• 3방향으로 분기시 사용 • 차량기지에 주로 사용 • 2방향에서 1방향 추가시 사용 • 종점부 회차 건넘선에서 차량기지로 인입시 사용	• 시종점역의 전후방에 회차 및 반복을 위하여 사용 • 2방향 분기 2개소와 단경간 이동거더로 구성

(라) 자기부상열차의 궤도틀림 관리

구 분	정 의	개 념 도	허용공차 (단위 : ㎜)	
			설치시	운영시
궤 간	좌우 양 레일간의 간격 틀림		±3	±4
수평·수직 (방향,고저)	레일 기준선(궤간선)에서 임의의 10m 현에 대한 종거 측정 레일의 수평, 수직 방향에 대한 상대적인 직진성 틀림		±3	±5
이음매 단차	레일간 이음매에서 수직 및 횡방향 단차		±1	±1
			±0.5	±1
레일상하 단차	직선부에서 레일의 설치기준에 대한 좌우 레일간 연직방향 높이의 차		±3	±4
좌우 평면성	편측레일의 레일 기준면과 일치하는 직선과 상대측 레일과의 높이를 레일기준면에서 측정한 값		±3	±5

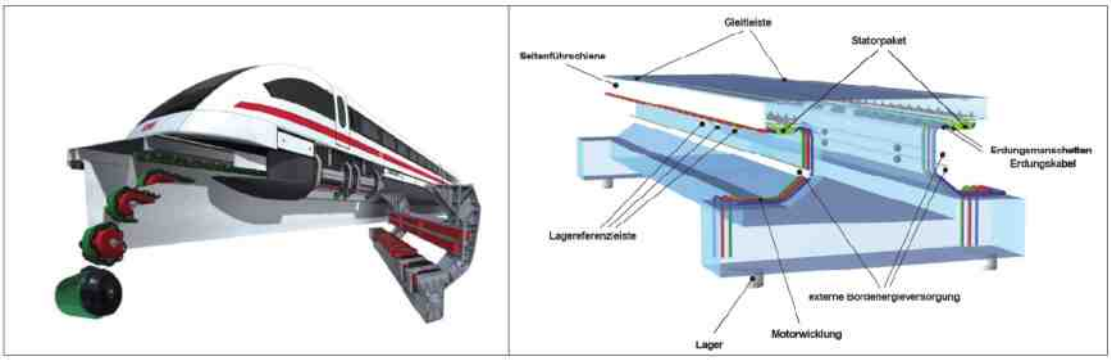
(2) 국외 개발 동향

(가) Transrapid 개념

Transrapid 시스템은 철심 마그넷 (iron-core magnets)을 이용하여 자석의 견인력에 의한 차량의 부상 및 안내를 하는 전자기 서스펜션 시스템을 갖추고 있다. 부상과 안내 시스템에는 마그넷과 가이드웨이 레일 사이의 간극(air gap)을 유지할 수 있는 제어장치(control system)가 있다.

제어장치는 가이드웨이(guideway)에서 약10mm의 간극을 유지하도로 조절한다. 가이드웨이 하단의 stator packs에 장착 추진권선(propulsion widnding)과 부상자석을 사용하는 선형동기모터(synchronous long-stator linear motor)에 의해 추진되며 자기장의 방향을 바꿔줌으로써 자기부상열차를 접촉 없이 가속 및 제동할 수 있다.

[그림 2.4.4]와 같이 차량은 T-자형 가이드웨이 주위를 감싸고 주행한다. 안내레일(guidance rail)은 바깥쪽 가장자리에 설치되며, 부상 및 추진 stator packs은 가이드웨이 밑에 설치되어 있다.



[그림 2.4.4] 일반 Transrapid 차량 및 가이드웨이, MSB-AG-Fahrweg Teil I, 2007

(나) Transrapid 차량

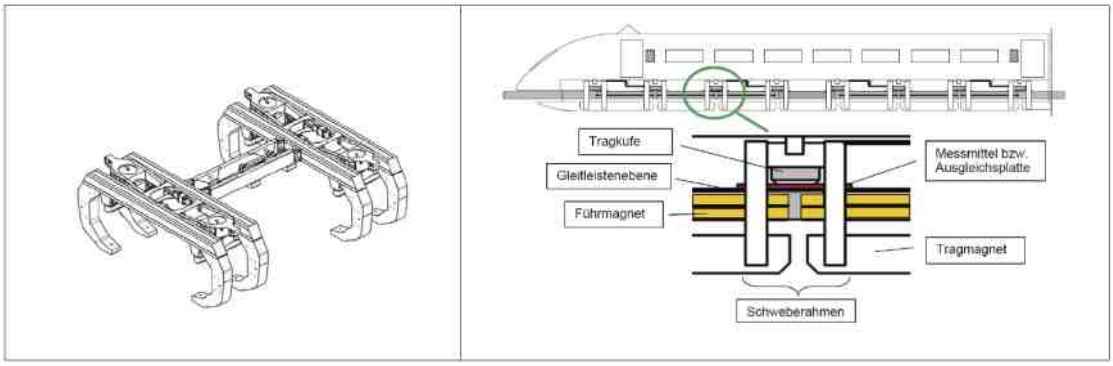
TR09는 2007년 4월 이후 Emsland의 시험시설(TVE)에서 주행하고 있는 최신 자기부상 차량으로 [표 2.4.1]과 같은 부품으로 구성되어 있다.

[표 2.4.1] TR 09의 구성품

TR09	
Magnets	Cable systems
Sensors	Levitation frames
Magnet control units	Secondary suspension
On-board power supply	Carriage body
On-board control/diagnosis system	

차체는 강화 유리섬유 플라스틱 판넬의 샌드위치 쉘구조와 알루미늄 프레임으로 구성되어 있다. 각 단일 차량은 독립적인 운행이 가능하며 32개의 부상자석과 30개의

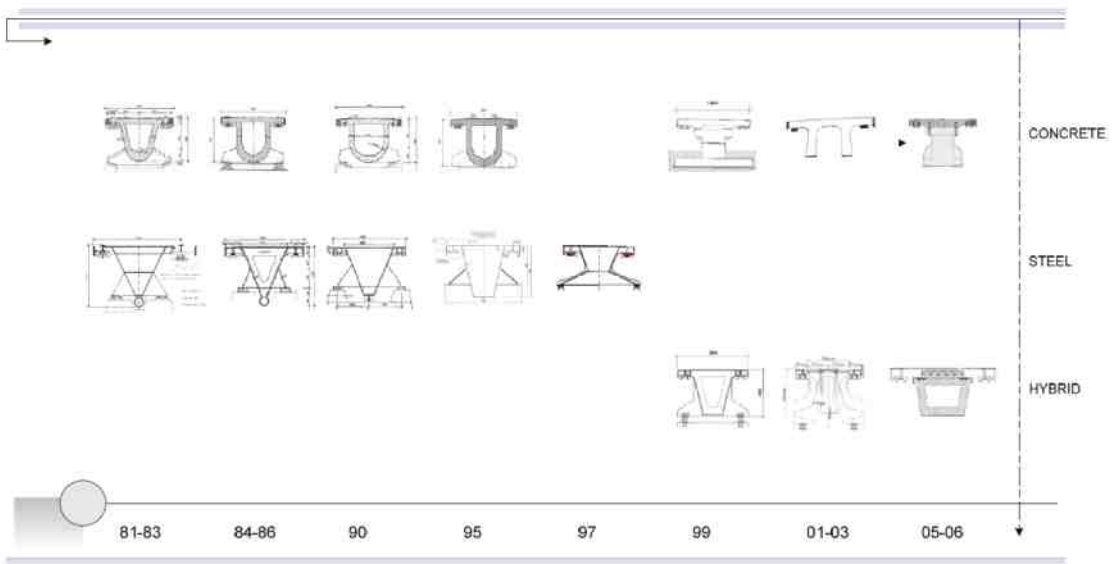
안내자석이 있다. 추진력은 차량 마그넷 exciter 권선 (vehicle magnet exciter windings)과 가이드웨이 stator 권선(guideway stator windig)의 상호작용에 의해 발생된다. 주제동은 위상각 변조에 따른 응답으로 선형전동기 전류의 역전을 통해 재생성된다. (Michael Tum 2007)



[그림 2.4.5] Transrapid 차량 및 subassemblies, MSB-AG-Fahrzeug Teil I, 2007

(다) 가이드웨이 개발

Transrapid 자기부상에 대한 가이드웨이는 Emsland(TVE)의 시험시설에서 25년 이상 개발되었다. 1981년부터 가이드웨이의 약 20종류가 설계, 건설 및 테스트되었다. [그림 2.4.6]은 문헌에서 찾을 수 있는 가이드웨이를 나타내고 있다.



[그림 2.4.6] 자기부상 가이드웨이 개발

나. 구축물 설계하중 정의

가이드웨이를 설계할 때 고려하여야 할 하중에서 자기부상과 관련된 하중에 대해서

조사하였다. 차량이상시 하중은 자기부상식 차량 특유의 하중으로 차량에 갑작스러운 정전이나 차량고장 또는 부상제어상 이상이 발생한 경우에 작용하는 낙하하중 및 활주하중을 말한다.

(1) 활하중(L)

활하중은 열차하중 및 군집하중으로이 있으며 열차하중은 아래와 같다.

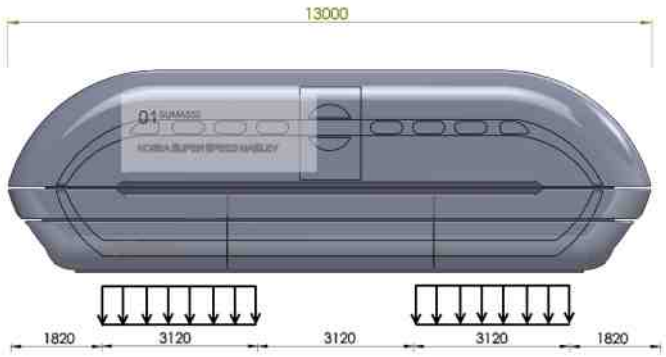
(가) 열차하중

① 열차하중은 해당 노선에서 정한 1편성의 운행하중으로 하고 부재에 최대응력이 발생하도록 재하하여야 한다.

② 열차하중 1편성의 차량수는 1량을 기본으로 한다.

③ 열차하중은 [그림 2.4.7]과 같이 1궤도당 등분포하중(W)으로 한다. 이때, 열차하중은 공차하중(W1)과 만차하중(W2)으로 나누며 그 값은 [표 2.4.2]과 같으며 평면상의 하중작용 위치는 [그림 2.4.8]과 같다.

(단위 : ㎜)

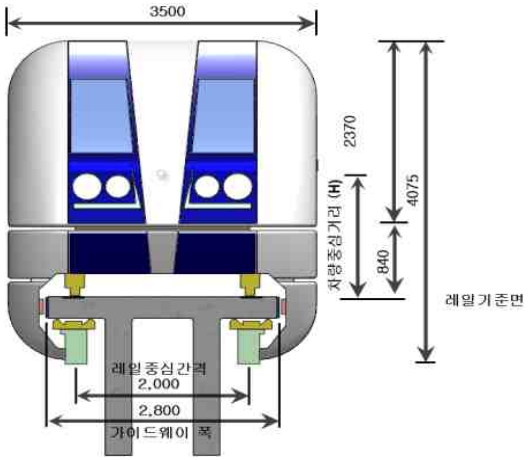


[그림 2.4.7] 자기부상열차의 하중분포

[표 2.4.2] 열차하중의 종류 및 등분포하중

하중종류	기호	등분포하중(1궤도당)
공차하중	W_1	20 kN/m
만차하중	W_2	21.546 kN/m

④ 공차시와 만차시 차량중심 위치는 각각 [그림 2.4.8]과 같이 궤도중심의 레일기준면으로 부터 수직 높이(H)로서 1,300 mm 및 1,500 mm를 기본으로 하며, 차량제원 등이 변경되는 경우 이를 고려하여야 한다. 여기서 궤도중심은 레일중심 간격(2,000mm)의 중심으로 한다. 다만, 차량중심위치 등 차량제원이 변경될 경우에는 적절한 보정이 필요하다.



[그림 2.4.8] 궤도중심과 차량중심 위치

⑤ 차량고장시 견인하중을 고려하여야 하며 고장차량은 만차하중을 적용하고 견인차량은 공차하중을 적용한다.

(2) 충격하중(I)

(가) 충격은 열차하중에 의하여 일어나는 것으로서 충격에 따른 영향은 열차하중에 다음의 [표 2.4.3]에 주어진 충격계수(i)를 곱한 값으로 한다.

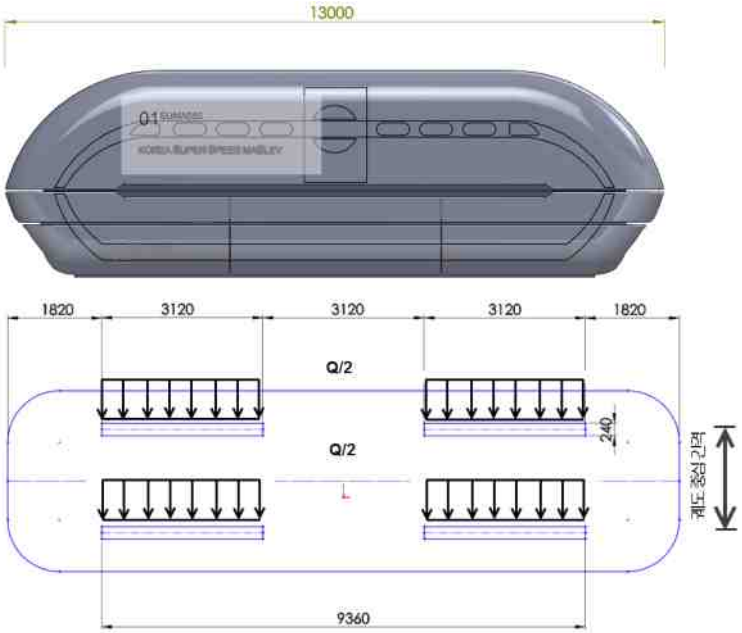
[표 2.4.3] 충격계수

종 별	충격계수(i)
강 거더	0.15
콘크리트 거더	0.10

(나) 하부구조의 설계에 사용하는 상부구조 반력에는 열차하중에 의한 충격을 고려하지 않아도 된다. 그러나 받침부나 콘크리트 및 강재로 된 기둥형의 교각 또는 이와 유사한 경량의 구체로 된 하부구조의 구체부분에는 충격을 고려하여야 한다.

(3) 차량 횡하중(LF)

(가) 차량 횡하중은 대차위치의 안내레일에 작용하는 것으로 하고 다음 [그림 2.4.9]와 같이 교축에 직각이고 수평으로 작용하는 등분포하중으로 한다.



[그림 2.4.9] 차량 횡하중

(나) 1궤도당 차량 횡하중의 크기(Q)는 열차하중의 20%가 작용하는 것으로 한다.

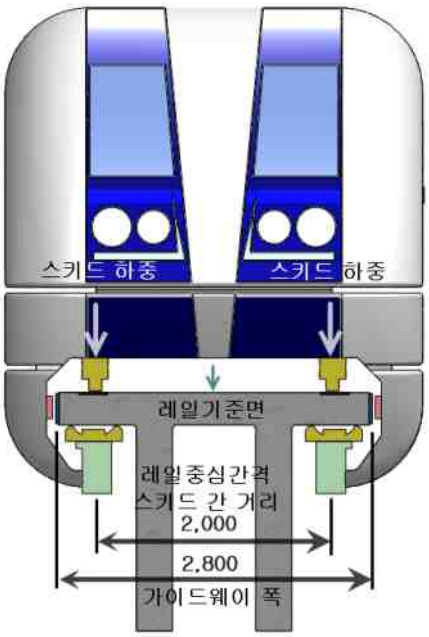
(4) 시동하중 및 제동하중(SB)

(가) 시동하중은 차량중심 위치에서 열차하중의 10%가 교축방향으로 작용하는 것으로 한다.

(나) 제동하중은 차량중심 위치에서 열차하중의 15%가 교축방향으로 작용하는 것으로 한다.

(5) 차량이상시 하중(EL)

차량이상시 하중은 주행 중인 차량에 갑작스러운 정전이나 차량고장 또는 부상제어상 이상이 발생한 경우에 차량 대차가 레일상에 낙하 또는 흡착낙하하거나 전체 스키드로 활주하게 된다. 이 때 스키드가 각각의 레일에 작용하는 하중으로서 스키드 낙하하중 및 스키드 활주하중으로 구분되며, 스키드 하중의 횡방향 작용위치는 [그림 2.4.10]과 같다. 다만, 스키드의 지지형식 및 스키드간 거리 등이 변경될 경우에는 이를 고려하여야 한다.



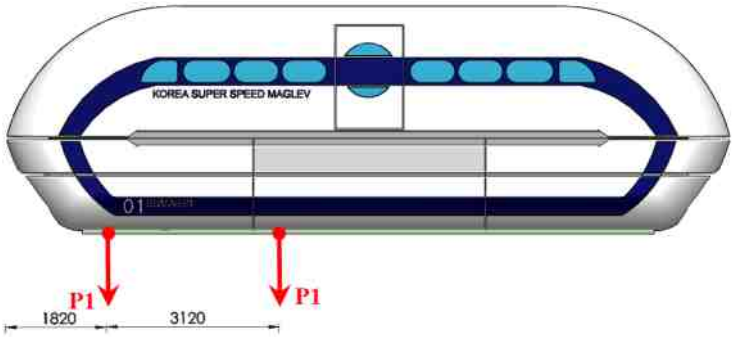
[그림 2.4.10] 스키드 하중의
작용위치

(6) 스키드 낙하하중

차량 주행시 차량의 1대차에 부상 제어상 이상이 발생했을 때, 스키드가 레일기준면에 작용하는 하중으로서 다음과 같이 정한다.

(가) 스키드 정상낙하하중

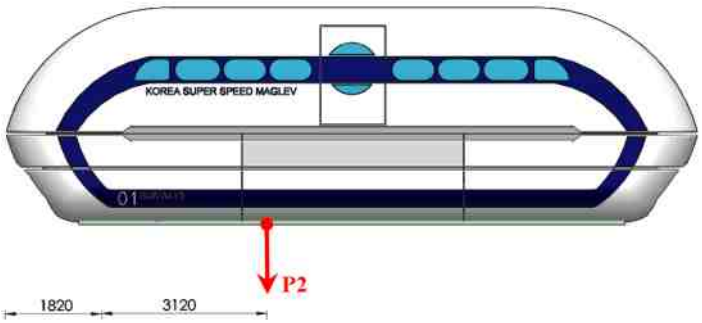
차량의 1대차가 부상력을 상실하여 레일상에 낙하할 때 레일 한쪽에 대해 2개의 스키드가 작용하는 하중의 크기(P1)는 46 kN으로 한다. ([그림 2.4.11]참조)



[그림 2.4.11] 스키드 정상낙하하중(단위 : ㎜)

(나) 스키드 최대낙하하중

차량의 1대차가 한쪽 전자석이 부상력을 상실하여 레일상에 낙하할 때 레일 한쪽에 대해 1개의 스키드가 작용하는 하중의 크기(P2)는 51 kN으로 한다. ([그림 2.4.12] 참조).



[그림 2.4.12] 스키드 최대낙하하중(단위 : ㎜)

(7) 스키드 활주하중

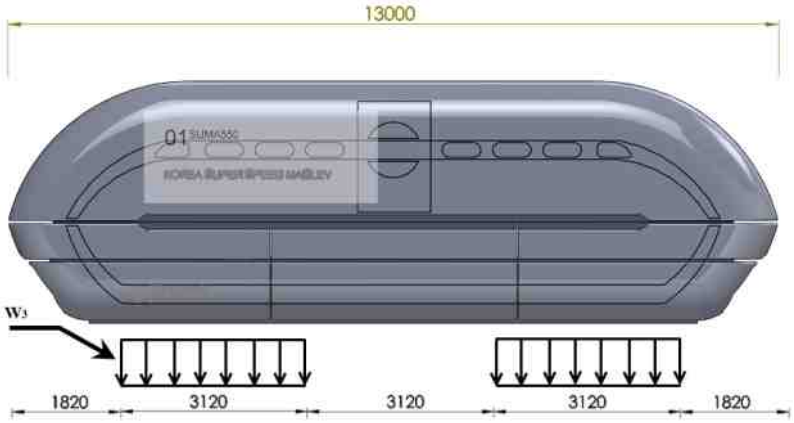
차량 주행시 전체 대차에서 부상 제어 상 이상이 발생하여 차량이 전체 스키드에 의해 활주하는 경우에 레일기준면에 작용하는 하중으로서 다음과 같이 정한다.

(가) 스키드 활주하중(연직방향)

스키드 활주시 레일기준면에서 연직방향으로 작용하는 1궤도당 스키드 활주하중의 크기(W3)는 다음과 같이 정한다.([그림 2.4.13] 참조)

① 콘크리트거더 및 PSC거더 : 열차하중(W2)×0.10

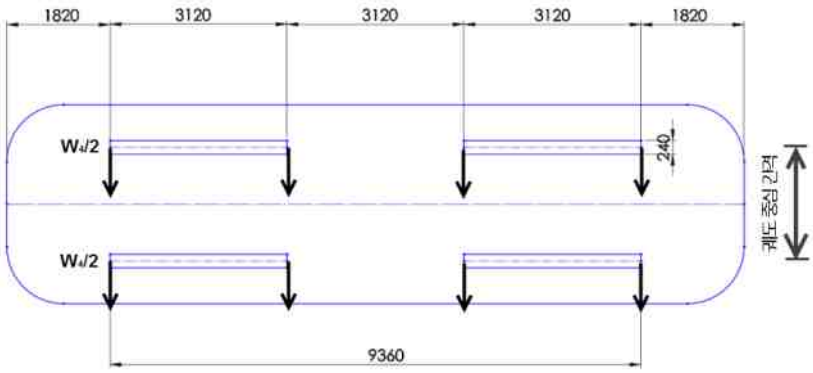
② 강거더 : 열차하중(W2)×0.15



[그림 2.4.13] 연직방향 스키드 활주하중(단위 : ㎜)

(나) 스키드 활주하중(교축직각방향)

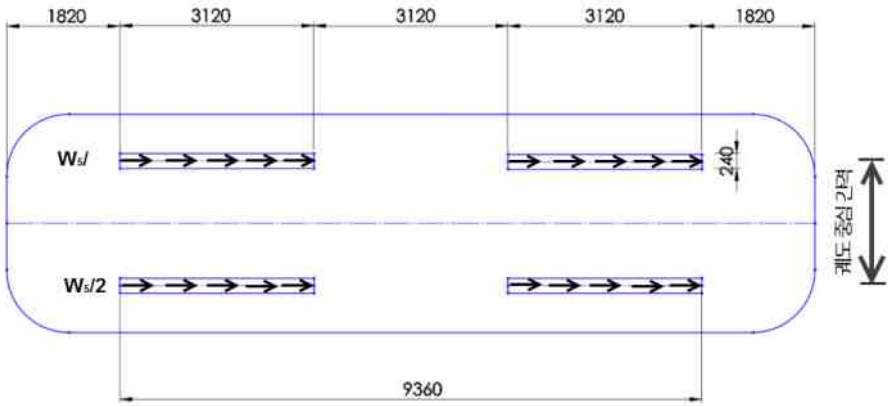
스키드 활주시 레일기준면에서 직각·수평방향으로 작용하는 1궤도당 스키드 활주하중의 크기(W4)는 열차하중(W2)에 0.2를 곱한 값으로 한다. ([그림 2.4.14] 참조)



[그림 2.4.14] 교축직각방향 스키드 활주하중(단위 : ㎜)

(다) 스키드 활주하중(교축방향)

스키드 활주시 레일기준면에서 교축방향으로 작용하는 1궤도당 스키드 활주하중의 크기(W5)는 열차하중에 0.2를 곱한 값으로 한다. ([그림 2.4.15] 참조)



[그림 2.4.15] 교축방향 스키드 활주하중(단위 : ㎜)

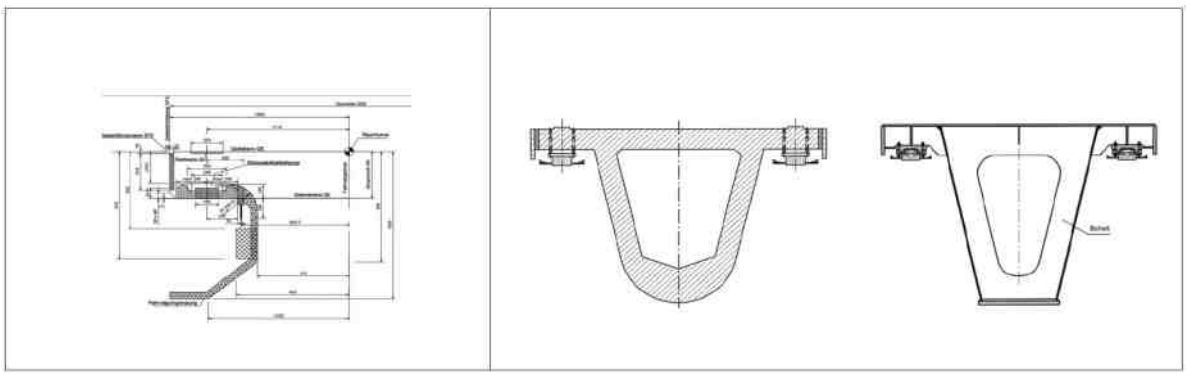
스키드 낙하하중은 차량설계시 차량을 견인하기 위한 Landig Roller로 변경할 경우 향후 다른 하중을 고려해야 한다.

다. 가이드웨이 요구성능 정의

(1) 자기부상 가이드웨이

자기부상 가이드웨이의 기능은 운행으로 유발되는 작용력, 환경의 영향, 그리고 자중을 지반으로 전달하는 것이다. 비접촉으로 가이드웨이를 주행하는 차량을 지지하고 자력으로 추진, 부상, 그리고 안내와 관련된 구성품 등이 설치되어 있다.

전자적으로 제어되고, 차량의 진행방향 양쪽 전체에 설치되는 부상 마그넷은 자석의 견인력에 의해 의도된 만큼 수직 거리에 차량을 유지한다. 안내 마그넷은 안내레일과 접촉되지 않게 차량을 수평으로 유지한다. 추진구성품(Driving component)은 stator packs의 형태로 가이드웨이에 설치되어 있다. 이러한 요소들은 자기부상 가이드웨이가 다른 교통 시스템과 구별되는 독특한 특성이다.



[그림 2.4.16] 콘크리트 및 강재 가이드웨이 횡단면도, MSB-AG-Fahrweg Teil II, 2007

부상/안내 마그넷과 가이드웨이 사이의 간극은 매우 작다. 그렇기 때문에 모든 외력

이 작용하는 상태에서 구조물 (또는 부재, 부품)의 허용편차는 매우 작기 때문에 정밀한 시공이 요구된다. 형상의 정밀 시공에 대한 기준은 기계산업분야에 일반적으로 적용되는 ㎜이내의 기준이 적용되며 이러한 기준은 건설분야에서 거의 불가능한 기준이다. (G. Schwindt 2006)
가이드웨이 구조의 일반적인 요구 사항 이외에 Transrapid 가이드웨이의 설계는 [표 2.4.4]와 같이 자기부상 시스템의 특정 요구 조건 등이 필요하다.

[표 2.4.4] 자기 부상 가이드웨이의 특별 요구성능 (조건)

• 가이드웨이 표면하부에 차량이 가이드웨이 캔틸레버 부분을 감쌀 수 있는 여유공간이 필요하다.
• 차량은 가이드웨이와 안내 레일에서 약 10mm 가량 부상한다.
• 차량 및 가이드웨이는 연계된 시스템으로 가이드웨이에 정밀한 강성 요구조건을 필요로 한다
• 제작과 조립에 대한 최소한의 오차만 허용되는 stator packs과 안내레일의 정확한 위치가 필요하다.
• 차량이 고속으로 주행할 때 가이드웨이 변형 및 진동

Gert Schwindt는 자기부상에 대한 특별한 요구사항을 두 가지 측면으로 요약했다. 즉, 가이드웨이 및 차량/추진 시스템 간의 인터페이스, 그리고 환경에 대한 인터페이스로 분류하였다. 전자는 기하적구조(geometry), 내구성(tolerances), 강성(stiffness), 댐핑(damping), long stator의 부착 및 유지보수에서 발생하고, 후자는 소음규제 조건 등 환경 기준을 만족시켜야 하고 모든 기상 조건에 적합해야 한다.

(2) 초고속 자기부상열차 시험선 완충차막이 성능요구조건 도출

초고속 자기부상열차의 시험선 운행에 있어 차량 및 궤도의 안전은 필수적인 사항이다. 초고속 자기부상열차가 적용되어 운행중인 중국의 완충차막이 설치 현황은 아래 [그림 2.4.17]과 같다. 기존 철로에 설치되는 완충차막이는 마찰식 에너지흡수요소를 주로 사용하였으나, 자기부상열차의 특성상 마찰식 에너지흡수요소보다는 고정식으로 유압식 완충차막이를 설치하는 것이 바람직하다. 중국의 완충차막이를 살펴보면 크게 세 부분으로 구성된다. 첫 번째는 완충차막이가 선로에 고정되는 본체이다.

이 본체는 완충차막이의 하중용량에 따라 그 구조가 결정되며 취부방식 역시 하중용량에 따라 결정되어야 한다. 가능한 한 중량이 큰 것이 유리하며 콘크리트를 채운

철강구조물로 판단된다. 소형 완충차막이의 경우는 철강구조물을 기초로 하여 보강하는 형태일 것으로 예상된다. 두 번째는 유압버퍼이다. 유압버퍼는 대형의 경우 양쪽에 대칭으로 두 개가 위치하며 소형의 경우 한 개의 유압버퍼로 지지된다.

이는 완충 용량에 따라 결정된다. 세 번째는 충돌부이다. 충돌부는 초고속자기부상열차의 차체와 직접적으로 접촉하는 부위로 차체에 손상을 주지 않아야 한다. [그림 2.4.18]의 중국 자기부상열차용 완충차막이의 예를 보면 충돌부에 붉은색 원형기둥이 무수히 박혀있음을 확인할 수 있다. 이는 열차 차체에 손상을 최소화하기 위함으로 재질은 플라스틱류일 것으로 예상된다. 또한 차체의 형태에 따라 완충을 위한 플라스틱면의 형태를 달리함을 확인할 수 있다.

완충차막이의 성능요구조건 도출을 위하여 가장 중요한 부분은 선로 이탈로부터 보호하고자 하는 차량의 속도 범위다. 이는 해당 차량의 운행조건 및 사고유형, 심각성 등을 고려하여 결정한다. 또한 차체에 수많은 전기장치를 보호하기 위하여 충돌에 의한 과도한 감가속도 발생을 억제할 필요가 있다. 이를 위하여 차체에 장착되는 전기장치의 최대 감가속도 내구성을 확인하고 이보다 낮은 감가속도 범위 내에서 차체를 안전하게 정지시켜야 한다.



a) 상하이 고속자기부상 철도



b) 일반철도 선로

[그림 2.4.17] 완충차막이

본 연구에서는 초고속자기부상열차 시험선의 완충차막이 성능요구조건 도출을 목표로 한다. 이를 위하여 먼저 최대 충돌속도를 설정한다. 최대 충돌속도가 정해지면 차량의 공차중량을 환산하여 최대충돌에너지를 구하고 이는 최대 완충용량이 된다. 이 최대충돌에너지는 결국 유압식 완충장치에 흡수되며, 전기장치의 감가속도 제한요건에 따라 유압식 완충장치의 최대 반발력을 결정한다. 최대 충돌에너지와 힘이 결정되면 완충장치의 스트로크를 결정할 수 있다. 이를 통해 완충차막이의 성능요구조건을 도출한다.



(Library test line outside) (Library inside)
Installation in Shanghai "15" 863 plans maglev transportation technology major projects DDCQY series of test facilities engineering hydraulic buffer buffer stops for a long trip



Installation in Shanghai in low speed (city rail) maglev transportation engineering DDCQY550718 type of test facilities long trip buffer stops for hydraulic buffer



Installed in tangshan low-speed (city rail) maglev transportation test facilities project GY500/53 type stationary hydraulic buffer stops for buffer

[그림 2.4.18] 중국의 MAGLEV관련 완충차막이 설치 현황

(3) 완충차막이 성능요구조건

앞선 연구개요에서 설명한 바와 같이 초고속 자기부상열차용 완충차막이의 성능요구조건을 결정하기 위해서는 돌파사고 방지를 위한 최대 돌파속도를 정해야 한다. 금

번 초고속 자기부상열차 시험노선에서 최대 운행속도는 약 30 km/h이므로 최대 돌파속도는 30 km/h로 결정하였다. 이는 시험노선 최대 운행속도 이내의 운행속도에서는 돌파사고에 의한 물적 피해를 최소화할 수 있음을 의미한다.

초고속 자기부상열차 1편성의 공차중량은 약 26톤으로 발생가능한 최대 충돌에너지는 약 0.9 MJ이다. 또한 초고속 자기부상열차의 전기장치의 감가속도 제한조건은 최대 3g로 설정하였다. 이는 초고속자기부상열차에 취부된 전기장치에 최대 3g의 감가속도가 순간적으로 가해졌을 때 구조 및 기능상 이상이 없이 정상 작동해야 함을 의미한다.

최대 에너지흡수량과 최대하중을 고려하여 최대 스트로크는 약 1.5 m로 설정하였다. 최대하중은 약 800 kN으로 단축형태의 유압실린더를 사용하게 되면 직경이 커져 가공비용이 크게 증가할 것으로 예상되어 2축 실린더에 하중을 분할하여 에너지를 흡수하도록 설정하였다.

[표 2.4.5] 초고속 자기부상열차 완충차막이 성능요구조건

항목	스펙	비고
최대 에너지흡수량	0.9 MJ	시험선 최대속도 및 공차중량 고려
최대 스트로크	1.5 m	최대하중에 따른 에너지흡수량 고려
최대 하중	800 kN	감가속도 한계 및 공차중량 고려
감가속도 한계	3 g (축방향)	.
구조물 내하중 한계	1,600 kN	최대하중의 2배
유압실린더 형태	2 cylinder type	유압실린더 가공성 고려

라. 선로구축물 설계기준

(1) 초고속 자기부상철도 시험선로 사양

(가) 차량분야

① 차량제원

- 차량의 길이 : 13.0m
- 대차 수량 : 2대/량
- 설계 최고속도 : 550km/h
- 시험선 운영속도 : 26 ~ 30km/h(최고 : 100km/h)

(나) 구조분야

① 활하중

- 공차하중 : 2ton/m × 13m = 26ton
- 만차하중 : 26seat × 75kg/seat

② 차량중량

- 공차 : 26.0 톤/량, 만차 : 28.0 톤/량

③ 충격하중

- 강 거더 : 0.15, 콘크리트 거더 : 0.10

④ 차량의 횡하중

- 1궤도당 차량 횡하중의 크기는 열차 만차하중의 20% 작용

⑤ 시동 및 제동하중

- 시동하중 : 차량중심 위치에서 열차하중의 10%가 교축방향으로 작용
- 제동하중 : 차량중심 위치에서 열차하중의 15%가 교축방향으로 작용

⑥ 차량 이상시 하중

- 착지륜 정상낙하하중 : 차량의 1 대차가 부상력을 상실하여 레일상에 낙하할 때 레일 한쪽에 대해 2개의 착지륜이 작용하는 하중의 크기로 4.6 ton 적용
- 착지륜 최대낙하하중 : 차량의 1 대차의 한쪽 전자석이 부상력을 상실하여 레일상에 낙하할 때 레일 한쪽에 대해 1개의 착지륜이 작용하는 하중의 크기로 5.1 ton 적용
- 연직방향 착지륜 활주하중 : 콘크리트 가이드웨이의 경우 차량 만차하중의 10%, 강재 가이드웨이의 경우는 차량 만차하중의 15%
- 교축방향과 교축직각방향 착지륜 활주하중 : 차량만차 하중의 20%

(다) 전기분야

① 전기방식

- 부하계통 : 정격 및 용량
- 개통정격 : 3상 4선식, 22.9kV, 60Hz
- 전원설비용량 : 3.5MVA

② Motor 입력

- 전압 → 0 ~ 4KV
- 용량 → 3MVA
- 주파수 → 가변(0~320 Hz)

③ 차량용 직류 보조전원

- 전압 : DC750V
- 용량 : 0.15MVA

④ 관리동 일반전기

- 전압 : AC380V, 220V, 3상 4선식
- 용량 : 0.35MVA

(라) 설계적용 차량제원

① 차량제원(안)

- 설계 최고속도 : 100km/h(시험선구간 운행속도 : 26~30km/h)

- 차량편성 : 1량 1편성
- 차체길이 : 13.0m (1량 기준)
- 대차수량 : 2대/량
- 대차 중심간 거리:2.0m
- 차체폭 : 3.5m
- 차량높이 : 4.5m (차체 : 3.0, 대차 : 1.5m)

(2) 설계 방법 및 적용 시방서

① 콘크리트 구조물의 설계는 강도 설계법으로 하는 것을 원칙으로 하되 본선구조물, 하부구조의 안정성 검토, 기초구조 검토, 프리스트레스의 도입으로 선형 탄성설계가 가능한 부재 등에 대하여 허용응력 설계법을 적용할 수 있다.

② 강도 설계법에 의해 콘크리트 구조물을 설계할 경우 콘크리트 부재의 모든 부재는 구조물설계기준(안)에서 규정하는 하중계수와 강도감소계수를 사용하여 기준의 규정에 따른 충분한 강도를 가져야 한다.

③ 강구조물의 설계는 허용응력 설계법으로 하는 것을 원칙으로 하되 강합성교의 콘크리트 상판구조 등의 설계에는 강도 설계법을 적용하는 것을 원칙으로 하여야 한다.

④ 구조물의 안정계산에서는 일반적으로 받침면, 기초저면 등에서의 전도, 그리고 지반 및 말뚝 등의 수평 및 연직지지 등에 대한 안전도가 소정의 값 이상으로 확보되도록 한다.

⑤ 구조물의 변형은 일반적으로 열차의 주행안정성을 고려한 허용 변위량 이내라야 한다.

⑥ 구조물의 안전성을 고려할 경우 설계 내용기간(耐用期間)을 설정할 필요가 있으며 구조물의 내용기간과 내구성능을 고려하여 설계 내용기간을 정하는 것이 원칙이다.

⑦ 적용 시방서

- 철도설계기준(노반편), 대한토목학회, 2011년판
- 고속철도설계기준(노반편), 한국철도시설공단, 2005년판
- 도로교설계기준, 한국도로교통협회, 2005년판
- 콘크리트구조설계기준해설, 한국콘크리트학회, 2003년판
- 구조물기초설계기준해설, 한국지반공학회, 2003년판
- 도시형 자기부상철도 건설규칙 법안 및 해설, 한국산업기술시험원, 2008년 판
- 도시형 자기부상열차 안전기준에 관한 규칙 법안 및 해설, 한국산업기술시험원, 2008년 판
- High-Speed Maglev system design principles, Guideway, Maglev Technical Com mittee, 2007
- Manual for Railway Engineering, 미국철도기술협회 (AREA : American

Railway En gineering Association), 1994년판

⑧ 사용 단위계

- 설계 시 적용된 주요 시방서는 토목구조물 설계기준(안)으로서 시방서 기준적용 위해 사용 단위계는 시방서 사용 단위계인 SI 단위계를 사용하였다.

(3) 설계하중

(가) 하중의 종류

설계에 있어서는 다음 하중을 고려한다.

① 주하중(P)

- 고정하중(D)
- 활하중(L)
- 충격(I)
- 원심하중(CF)
- 프리스트레스힘(PS)
- 콘크리트 크리프의 영향(CR)
- 콘크리트 건조수축의 영향(SH)
- 토압(H)
- 수압(F)
- 부력 또는 양압력(B)

② 부하중(S)

- 차량 횡하중(LF)
- 시동하중 또는 제동하중(SB)
- 풍하중(W)

③ 주하중에 상당하는 특수하중(PP)

- 설하중(SW)
- 지반변동의 영향(GD)
- 지점이동의 영향(SD)
- 파압(WP)

④ 부하중에 상당하는 특수하중(PA)

- 온도변화의 영향(T)
- 지진의 영향(E)
- 가설시 하중(ER)
- 충돌하중(CO)
- 차량이상시 하중(EL)
- 기타하중

가이드웨이를 설계할 때 고려하여야 할 하중의 종류를 모두 열거한 것으로 가교지점의 여러 조건과 구조에 따라 적절한 하중 및 하중의 조합을 선정하여야 하며

모든 하중을 모두 고려할 필요는 없다.

차량이상시 하중은 자기부상식 차량 특유의 하중으로 차량에 갑작스러운 정전이나 차량고장 또는 부상제어상 이상이 발생한 경우에 작용하는 낙하하중 및 활주하중을 말한다.

마. 3차원 동해석기법 개발

(1) 자기부상 열차 시스템의 안정성

자기부상 열차 시스템의 안정성 특성을 조사하기 위하여 속도 V로 강체 가이드웨이를 이동하는 강체 질량 M의 동적 특성을 조사한다 [그림 2.4.19]. 정지 부상상태에서의 평형방정식은 다음과 같다.

$$Mg - F_0 = Mg - \frac{\mu_0 N^2 A}{4}\left(\frac{i_0}{u_0}\right)^2 = 0 \tag{2.4.1}$$

여기서 F_0는 정지 부상상태에서의 전자석의 전자기력, g는 중력가속도, μ_0는 진공의 투과계수(magnetic permeability), N과 A는 전자석의 코일수와 면적, i_0와 $u_0 = z(t=0) - r[x(t=0)] = z_0 - r_0$는 정지 부상상태에서의 전자석 전류와 부상공극이다. 운행상태에서의 동적 평형방정식은 다음과 같다.

$$M\Delta\ddot{z} + \Delta F = \tag{2.4.2}$$

여기서 $\Delta z = z(t) - z_0$는 강체 질량 변위의 변동량, $\Delta F = F(t) - F_0$는 전자석 전자기력의 변동량이다. 전자석 전류와 부상공극의 변동량 $\Delta i = i(t) - i_0$와 $\Delta u = u(t) - u_0$을 미소하다고 가정하여 $\Delta F = k_i \Delta i - k_u \Delta u$로 선형화할 수 있다. 여기서, $k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2u_0^2}$이고 $k_u = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2u_0^3}$이다. 부상공극의 변동량 Δu는 강체 질량 변위의 변동량 Δz와 가이드웨이의 irregularity의 변동량 $\Delta r = r[x(t)] - r[x(t=0)]$에 의해 $\Delta u = \Delta z - \Delta r$로 주어진다. 여기서, $x(t)$는 시간 t에서 강체질량의 위치이다. 그러므로, 강체질량의 동적 평형방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$M\Delta\ddot{z} - k_u\Delta z + k_i\Delta i = -k_u\Delta r \tag{2.4.3}$$

전자석 전류 Δi에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

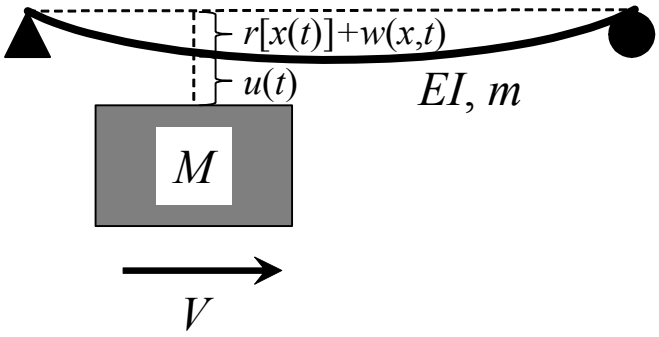
$$\Delta\dot{i} + \frac{R}{L}\Delta i - \frac{k_u}{k_i}\Delta\dot{z} = -\frac{1}{L}\Delta v - \frac{k_u}{k_i}\Delta\dot{r} \tag{2.4.4}$$

여기서 R은 전자석의 reluctance, $L = \dfrac{\mu_0 N^2 A}{2u_0}$, $\Delta v = v(t) - v_0$는 전자석 인가전압의 변동량이다. 식 (2.4.3)과 (2.4.4)로부터 강체질량의 최종 운동방정식은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M & \\ & \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\ddot{z} \\ \Delta\ddot{i} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \\ -\dfrac{k_u}{k_i} & \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\dot{z} \\ \Delta\dot{i} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_u & k_i \\ & \dfrac{R}{L} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta z \\ \Delta i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -k_u\Delta r \\ -\dfrac{1}{L}\Delta v - \dfrac{k_u}{k_i}\Delta\dot{r} \end{Bmatrix} \tag{2.4.5}$$

이 시스템의 안정성을 조사하기 위해서는 식 (2.4.5)를 상태변수를 사용하여 식 (2.4.6)과 같이 나타낸 후 complex eigenvalue를 계산하면 된다.

$$\begin{bmatrix} & & & \\ & M & & \\ & & & \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\dot{z} \\ \Delta\dot{i} \\ \Delta\ddot{z} \\ \Delta\ddot{i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & -k_i & & \\ & -\dfrac{R}{L} & \dfrac{k_u}{k_i} & - \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta z \\ \Delta i \\ \Delta\dot{z} \\ \Delta\dot{i} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -k_u\Delta r \\ -\dfrac{1}{L}\Delta v - \dfrac{k_u}{k_i}\Delta\dot{r} \end{Bmatrix} \tag{2.4.6}$$



[그림 2.4.19] 강체질량 시스템

다음의 예제 시스템에 대해 안정성을 조사해보자. 강체질량 $M = 28000\,kg$, 이동속도 $V = 550\,km/h$, 목표 부상공극 $u_0 = 0.01\,m$, $\frac{\mu_0 N^2 A}{4} = 2.006\times10^{-2}$, $R = 1.1\Omega$인 예제 시스템에 대해, 식 (2.4.6)의 complex eigenvalue 중 0이 아닌 것은 $-3.3679\times10^{-5} + 319.61i$, $-3.3679\times10^{-5} - 319.61i$, 6.7358×10^{-5}이다. 처음 두 개의 eigenvalue는 음의 실수부를 가지지만, 마지막 eigenvalue 6.7358×10^{-5}는 양수이므로 이 시스템은 불안정한 시스템이다. 즉, 시스템이 초기 평형상태에서 벗어나게 되면 처음 상태로 복구할 수 없는 것이다.

이 시스템의 안정성을 확보하기 위해서 되먹임을 이용한 부상 제어를 활용한다. 식 (2.4.7)과 같이 부상공극의 변동량을 되먹임하여 전자석 인가전압을 조정하는 것이다.

$$\begin{aligned}\Delta v &= K_p\Delta u + K_v\Delta\dot{u} + K_a\Delta\ddot{u} \\ &= K_p\Delta z + K_v\Delta\dot{z} + K_a\Delta\ddot{z} - K_p\Delta r - K_v\Delta\dot{r} - K_a\Delta\ddot{r}\end{aligned} \tag{2.4.7}$$

이 경우 최종 운동방정식은 식 (2.4.8)과 같이 주어지고, 상태변수 방정식은 식 (2.4.9)와 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ -\frac{K_a}{L} & 0 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\ddot{z} \\ \Delta\ddot{i} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\left(\frac{k_u}{k_i}+\frac{K_v}{L}\right) & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\dot{z} \\ \Delta\dot{i} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_u & k_i \\ -\frac{K_p}{L} & \frac{R}{L} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta z \\ \Delta i \end{Bmatrix}$$
$$= \begin{Bmatrix} -k_u\Delta r \\ -\frac{K_p}{L}\Delta r - \left(\frac{k_u}{k_i}+\frac{K_v}{L}\right)\Delta\dot{r} - \frac{K_a}{L}\Delta\ddot{r} \end{Bmatrix}$$

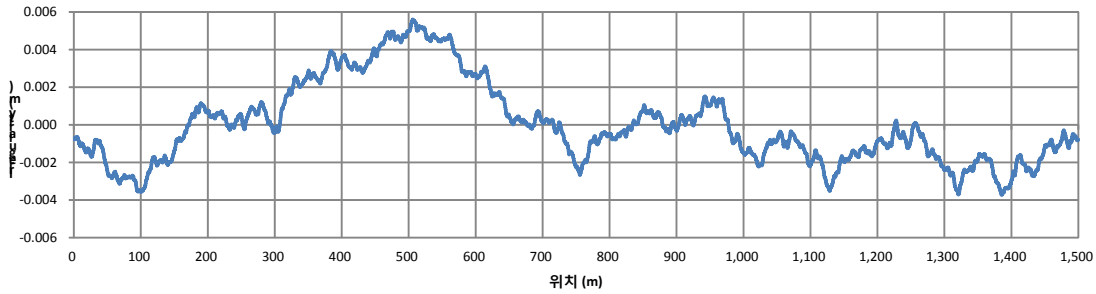
(2.4.8)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_a}{L} & 0 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\dot{z} \\ \Delta\dot{i} \\ \Delta\ddot{z} \\ \Delta\ddot{i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_u & -k_i & 0 & 0 \\ \frac{K_p}{L} & -\frac{R}{L} & \frac{k_u}{k_i}+\frac{K_v}{L} & -1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta z \\ \Delta i \\ \Delta\dot{z} \\ \Delta\dot{i} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -k_u\Delta r \\ -\frac{K_p}{L}\Delta r - \left(\frac{k_u}{k_i}+\frac{K_v}{L}\right)\Delta\dot{r} - \frac{K_a}{L}\Delta\ddot{r} \end{Bmatrix}$$

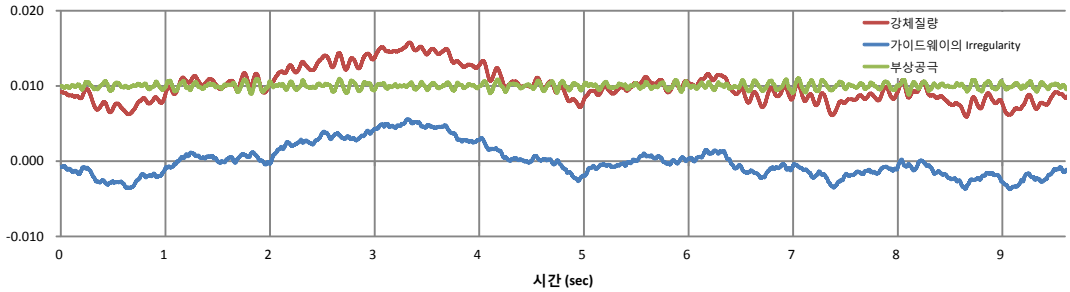
(2.4.9)

앞의 예제 시스템에서 되먹임을 위한 상수 $K_p = 500000,\ K_v = 20000,\ K_a = 300$으로 설정한다. 식 (2.4.9)의 complex eigenvalue 중 0이 아닌 것은 $-2.5068\times10^{-3}+2.0634\times10^{-2}i,\ -2.5068\times10^{-3}-2.0634\times10^{-2}i,\ -3.5315\times10^{-2}$이다. 처음 두 개의 eigenvalue는 음의 실수부를 가지고, 마지막 eigenvalue는 음수이므로 이 시스템은 안정한 시스템이다. 즉, 시스템이 초기 평형상태에서 벗어나게 되더라도 처음 상태로 복귀하게 되는 것이다. 되먹임 상수의 값은 다양한 값을 가질 수 있으므로 최적화를 통해 그 값을 결정하여야 할 것이다.

강체 가이드웨이를 운행하는 강체질량의 동적 응답을 조사하였다. 강체 가이드웨이의 irregularity는 식 (2.4.34)의 irregularity 밀도 스펙트럼에 의해 생성되었고 [그림 2.4.20]와 같이 주어진다. 시간에 따른 강체질량의 변위와 부상공극은 [그림 2.4.21]과 같이 얻어진다. 비교를 위해 가이드웨이의 irregularity도 같이 포함시켰다. [그림 2.4.21]에서 확인할 수 있듯이 강체질량 시스템은 안정한 거동을 보인다. 가이드웨이의 irregularity가 변화함에 따라 강체질량의 변위도 변화하고, 결국 일정한 부상공극을 유지하고자 하는 경향을 보임을 확인할 수 있다.



[그림 2.4.20] 가이드웨이의 irregularity



[그림 2.4.21] 강체 가이드웨이를 운행하는 강체질량의 부상공극과 변위

가이드웨이의 변형을 고려하게 되면 강체질량과 가이드웨이의 상호작용을 포함하여야 한다. 강체질량-가이드웨이 상호작용계에서 강체질량에 대한 정지 부상상태에서의 평형방정식은 식 (2.4.1)과 같이 주어진다. 단, 정지 부상상태에서의 부상공극 u_0는 다음과 같이 주어진다.

$$u_0 = z_0 - w_0 - r_0 = z_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{n0} q_{n0}^{(k_0)} - r_0 \tag{2.4.10}$$

여기서 w_0는 정지 부상상태에서 가이드웨이의 처짐, $\phi_{n0} = \phi_n[x_0 - (k_0 - 1)L]$, $q_{n0}^{(k_0)}$는 k_0번째 경간의 모드 좌표(modal coordinate)이다. 단, ϕ_n은 가이드웨이의 n번째 고유모드, L은 가이드웨이의 경간장, k_0는 $t = 0$에서 강체질량이 위치한 경간을 의미한다. 정지 부상상태에서 j번째 경간의 평형방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$K_n q_{n0}^{(j)} = \delta_{jk_0} \phi_{n0} F_0 + F_{n,mg} \tag{2.4.11}$$

여기서, K_n은 n번째 고유모드의 generalized stiffness, δ_{ij}는 Dirac delta function,

$F_{n,mg} = \int_0^L \phi_n(x) mg dx$, $\boldsymbol{m}$은 가이드웨이의 단위길이당 질량이다.

운행상태에서 강체질량의 동적 평형방정식과 전자석 전류의 지배방정식은 각각 식 (2.4.2)와 식 (2.4.4)로 주어진다. 단, 부상공극의 변동량 $\boldsymbol{\Delta u}$는 다음과 같이 가이드웨이의 변형을 고려하여 표현된다.

$$\Delta u = \Delta z - \Delta w - \Delta r = \Delta z - \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \Delta q_n^{(k)} - \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n q_{n0}^{(k)} + \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{n0} q_{n0}^{(k0)} - \Delta r \tag{2.4.12}$$

여기서 Δw는 가이드웨이 처짐의 변동량, $\phi_n = \phi_n[x-(k-1)L]$, $\boldsymbol{k}$는 강체질량이 위치한 경간을 의미한다. 운행상태에서 $\boldsymbol{j}$번째 경간의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$M_n \Delta \ddot{q}_n^{(j)} + C_n \Delta \dot{q}_n^{(j)} + K_n \Delta q_n^{(j)} = \delta_{jk} \phi_n F - \delta_{jk_0} \phi_{n0} F_0 \tag{2.4.13}$$

여기서, M_n과 C_n은 각각 $\boldsymbol{n}$번째 고유모드의 generalized mass와 damping이다.

이상으로부터 강체질량과 가이드웨이의 최종 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

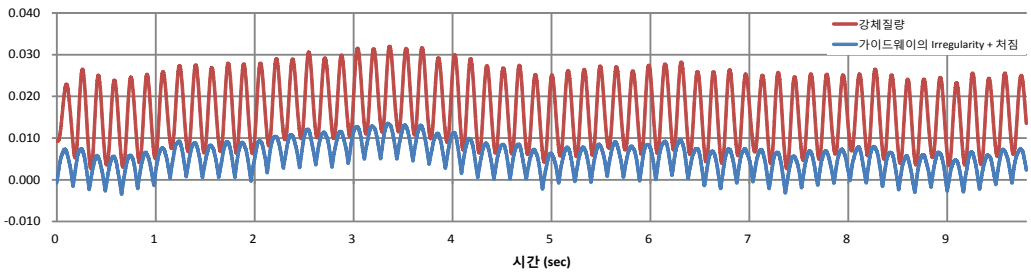
$$M\Delta \ddot{z} - k_u \Delta z + k_i \Delta i = -k_u \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \Delta q_n^{(k)} - k_u \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n q_{n0}^{(k)} + k_u \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{n0} q_{n0}^{(k0)} - k_u \Delta r \tag{2.4.14a}$$

$$\begin{aligned}
&\Delta \dot{i} + \frac{R}{L} \Delta i - \frac{K_a}{L} \Delta \ddot{z} - \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{K_v}{L} \right) \Delta \dot{z} - \frac{K_p}{L} \Delta z \\
&= -\frac{K_a}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \Delta \ddot{q}_n^{(k)} - \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{K_v}{L} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \Delta \dot{q}_n^{(k)} - \frac{2K_a}{L} \sum_{n=1}^{\infty} V \frac{d\phi_n}{dx} \Delta \dot{q}_n^{(k)} \\
&\quad - \frac{K_p}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \Delta q_n^{(k)} - \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{K_v}{L} \right) \sum_{n=1}^{\infty} V \frac{d\phi_n}{dx} \Delta q_n^{(k)} - \frac{K_a}{L} \sum_{n=1}^{\infty} V^2 \frac{d^2\phi_n}{dx^2} \Delta q_n^{(k)} \\
&\quad - \frac{K_p}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n q_{n0}^{(k)} - \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{K_v}{L} \right) \sum_{n=1}^{\infty} V \frac{d\phi_n}{dx} q_{n0}^{(k)} - \frac{K_a}{L} \sum_{n=1}^{\infty} V^2 \frac{d^2\phi_n}{dx^2} q_{n0}^{(k)} + \frac{K_p}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{n0} q_{n0}^{(k0)} \\
&\quad - \frac{K_p}{L} \Delta r - \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{K_v}{L} \right) \Delta \dot{r} - \frac{K_a}{L} \Delta \ddot{r}
\end{aligned} \tag{2.4.14b}$$

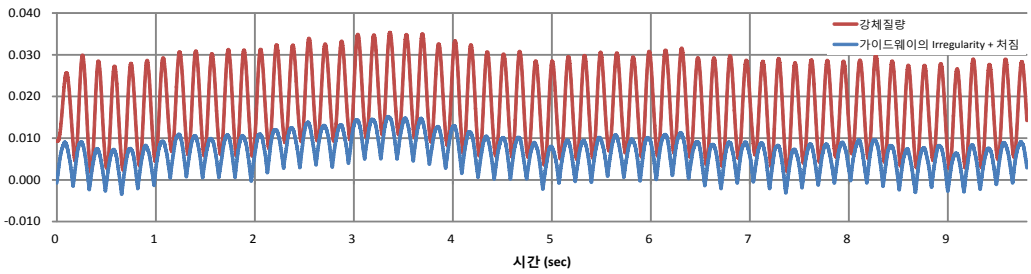
$$M_n\Delta\ddot{q}_n^{(j)} + C_n\Delta\dot{q}_n^{(j)} + K_n\Delta q_n^{(j)} = \delta_{jk}\phi_n F - \delta_{jk_0}\phi_{n0}F_0$$

(2.4.14c)

강체질량과 가이드웨이의 상호작용을 고려한 강체질량의 동적 응답을 조사하였다. 강체 가이드웨이의 irregularity는 [그림 2.4.20]와 같이 주어진다. 가이드웨이의 각 경간은 단순보로 구성되어 있고, $L = 25\,m$, $m = 3760\,kg/m$이다. 강체질량의 운행속도 $V = 550\,km/h$ (초고속 자기부상열차), $V = 200\,km/h$ (중고속 도시형 자기부상열차), $V = 100\,km/h$ (중저속 도시형 자기부상열차)일 때, 가이드웨이의 처짐비에 따른 동적 응답의 변화를 조사하여, 부상실패가 발생하지 않을 때 시간에 따른 강체질량의 변위와 가이드웨이의 처짐(irregularity 포함)을 [그림 2.4.22] ~ [그림 2.4.24]에 도시하였다. 강체 가이드웨이를 운행하는 경우인 [그림 2.4.21]과 비교하였을 때, 가이드웨이의 변형에 의해 강체질량의 응답이 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한, 강체질량의 운행속도와 구조물의 강성은 전체 시스템의 거동에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 그러므로, 자기부상철도 시스템을 설계하기 위해서는 자기부상열차-가이드웨이 상호작용을 정밀히 고려한 동해석을 반드시 수행하여 시스템의 거동 특성을 파악하여야 한다. 현재, 이 연구에서는 부상제어의 최적화가 포함되지 않았는데, 운행속도와 전체 시스템의 동적 특성을 고려하여 부상제어를 최적화하는 과정이 필요하다.

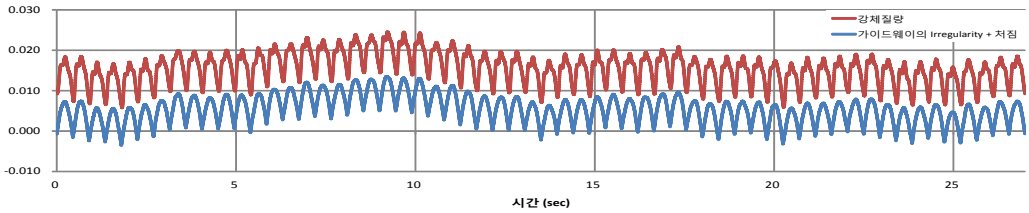


(a) 가이드웨이 처짐비 3000

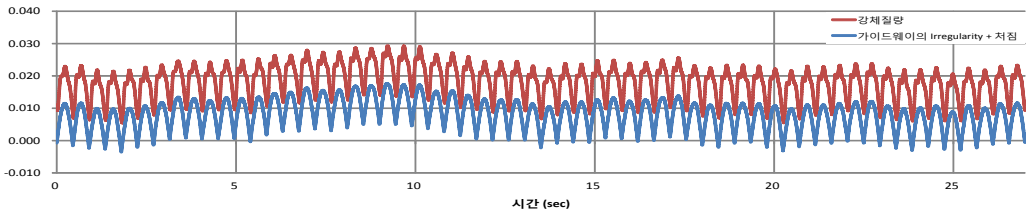


(b) 가이드웨이 처짐비 2500

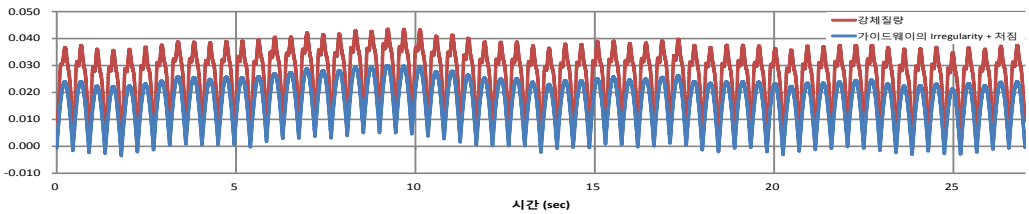
[그림 2.4.22] 유연한 가이드웨이를 운행하는 강체질량의 부상공극과 변위 (운행속도 $V = 550\,km/h$)



(a) 가이드웨이 처짐비 3000

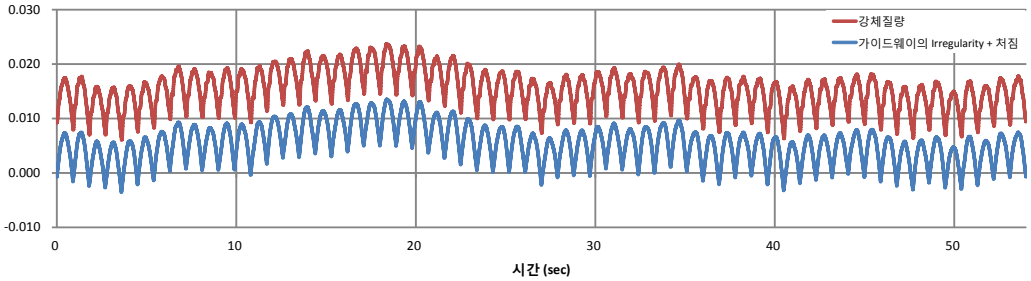


(b) 가이드웨이 처짐비 2000

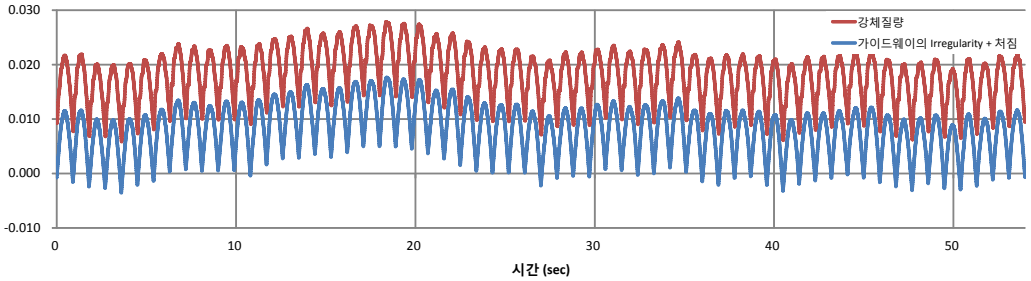


(c) 가이드웨이 처짐비 1000

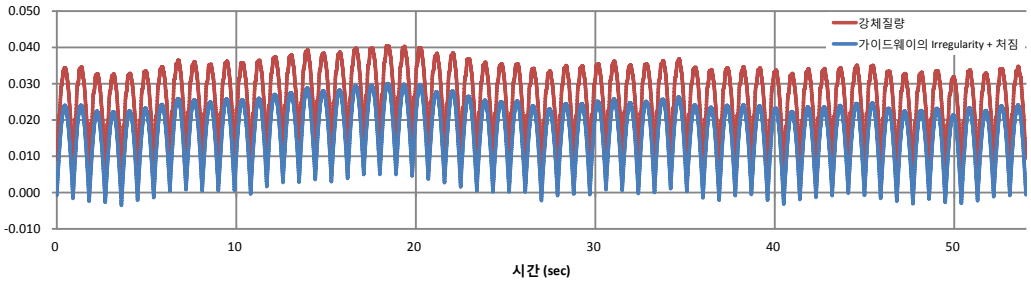
[그림 2.4.23] 유연한 가이드웨이를 운행하는 강체질량의 부상공극과 변위 (운행속도 $V = 200\,km/h$)



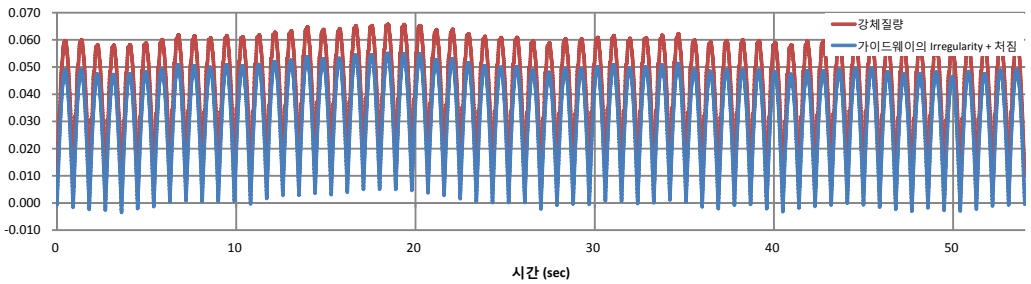
(a) 가이드웨이 처짐비 3000



(b) 가이드웨이 처짐비 2000



(c) 가이드웨이 처짐비 1000



(d) 가이드웨이 처짐비 500

[그림 2.4.24] 유연한 가이드웨이를 운행하는 강체질량의 부상공극과 변위 (운행속도 $V = 100\,km/h$)

(2) 초고속 자기부상철도 시스템의 3차원 동해석 기법 개발

객차(cabin)와 각 대차(bogie)의 병진 자유도(sway, heave) 및 회전 자유도(rolling, pit ching, yawing)를 포함한 초고속 자기부상 차량의 3차원 모델을 구성하였다. 각 대

차에는 전자석(EMS)과 부상공극 측정을 위한 센서(sensor)가 부착되어 있고, 현가장치(suspension)로 객차와 연결되어 있다. 각 대차에는 부상 전자석과 안내 전자석이 설치되는 강체 프레임이 연결되어 있고, 부상력과 안내력은 능동 제어되는 제어시스템에 이하여 제어된다.

이 연구에서 사용할 변수의 의미는 다음과 같다.

M_c, I_{cx}, I_{cy}, I_{cz}: 객차의 질량과 회전관성

M_b, I_{bx}, I_{by}, I_{bz}: 대차의 질량과 회전관성

$2H_c$, $2H_b$: 객차와 대차의 높이

N_b: 대차의 수

V: 차량의 이동 속도

$x_c(t)$, $y_c(t)$, $z_c(t)$: 객차의 변위

$\theta_{cx}(t)$, $\theta_{cy}(t)$, $\theta_{cz}(t)$: 객차의 회전각

$x_{b,j}(t)$, $y_{b,j}(t)$, $z_{b,j}(t)$: j번째 대차의 변위

$\theta_{bx,j}(t)$, $\theta_{by,j}(t)$, $\theta_{bz,j}(t)$: j번째 대차의 회전각

N_s: 현가장치의 수

k_x, k_y, k_z, c_x, c_y, c_z: 현가장치의 강성과 감쇠

$a_{x,j}$: 객차 중심과 j번째 대차 중심 간의 거리

$b_{x,k}$, $b_{y,k}$: 대차 중심과 k번째 현가장치 간의 거리

$F_{x,jk}^{sus}(t)$, $F_{y,jk}^{sus}(t)$, $F_{z,jk}^{sus}(t)$: 현가장치의 탄성력과 감쇠력

N_{ems}, N_{gm}: 부상 전자석과 안내 전자석의 수

W_g: 좌우측 안내 전자석 간의 거리

$e_{x,l}$, $e_{y,l}$: 대차 중심과 l번째 부상 전자석 간의 거리

$g_{x,m}$, $g_{z,m}$: 대차 중심과 m번째 안내 전자석 간의 거리

$s_{z,m}$: 가이드웨이의 전단 중심과 m번째 안내 전자석 간의 거리

δ_m: 1 (우측 안내 전자석) 또는 -1 (좌측 안내 전자석)

μ_0: 진공의 투과계수(magnetic permeability)

n_{ems}, A_{ems}, R_{ems}: 부상 전자석의 코일수, 면적, reluctance

n_{gm}, A_{gm}, R_{gm}: 안내 전자석의 코일수, 면적, reluctance

$i_{jl}^{ems}(t)$, $i_{jm}^{gm}(t)$: 부상 전자석과 안내 전자석의 전류

$v_{jl}^{ems}(t)$, $v_{jm}^{gm}(t)$: 운행 상태에서의 부상 전자석과 안내 전자석 전압 변동량

$u_{jl}^{ems}(t)$, $u_{jm}^{gm}(t)$: 부상 전자석과 안내 전자석의 공극

$\overline{u}_{ems}$, $\overline{u}_{gm}$: 목표 부상공극과 안내공극

$F_{z,jl}^{ems}(t)$, $F_{y,jm}^{gm}(t)$: 부상 전자석과 안내 전자석의 전자기력

EI, GJ: 가이드웨이의 휨 강성과 비틀림 강성

m: 가이드웨이의 단위 길이당 질량

L: 가이드웨이 경간장

W: 가이드웨이 너비

N_{gw}^{w}, N_{gw}^{α}: 해석에 고려한 가이드웨이 휨 변형과 비틀림 변형의 모드 수

$\phi_n^w(x)$, $\phi_n^\alpha(x)$: 가이드웨이 휨 변형과 비틀림 변형의 고유모드

$q_n^w(t)$, $q_n^\alpha(t)$: 가이드웨이의 modal coordinate

M_n^w, M_n^α: 가이드웨이의 modal mass

C_n^w, C_n^α: 가이드웨이의 modal damping

K_n^w, K_n^α: 가이드웨이의 modal stiffness

$w(x,t)$, $\alpha(x,t)$: 가이드웨이의 휨 변형과 비틀림

$z_g(x,y,z,t)$, $y_g(x,y,z,t)$: 가이드웨이의 변위

$r(x)$: 가이드웨이의 irregularity

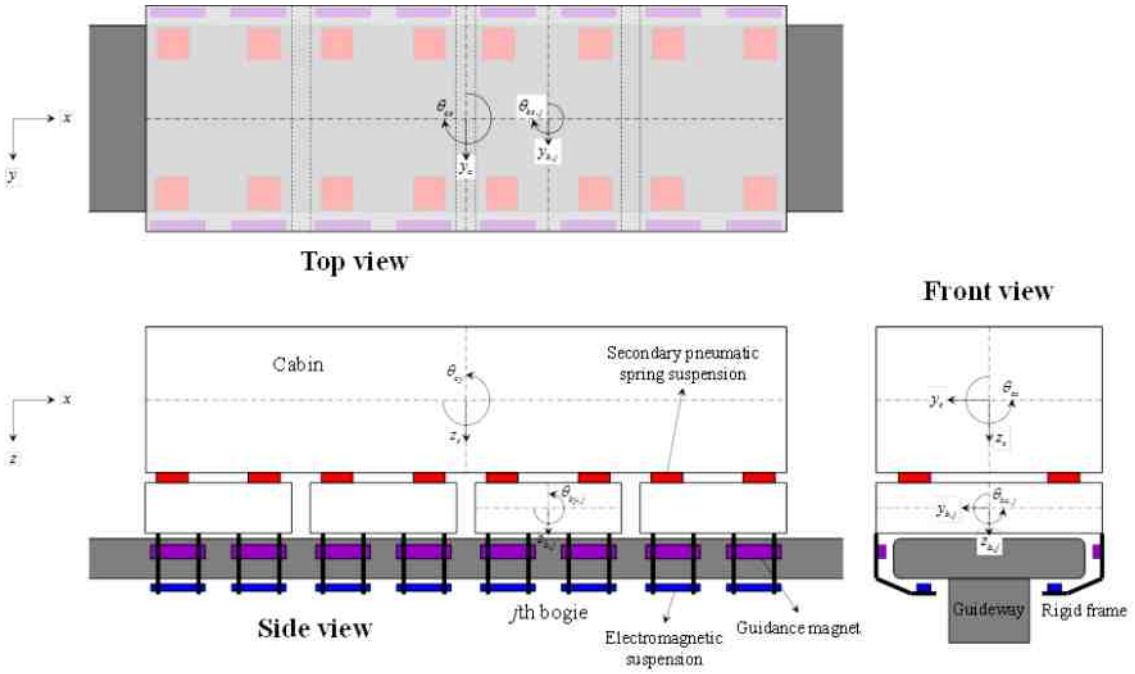
k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, V_1, V_2, V_3: 제어기 변수

$\hat{x}_{1,jl}^{ems}(t)$, $\hat{x}_{2,jl}^{ems}(t)$, $\hat{x}_{3,jl}^{ems}(t)$, $\hat{x}_{4,jl}^{ems}(t)$, $\hat{x}_{5,jl}^{ems}(t)$: 제어기 상태 변수

$\delta(x)$: Dirac delta function

g: 중력가속도

이상의 물리량에 대하여 정지 부상상태에서의 물리량은 위첨자 **O**를 붙이고, 정지 부상상태에 대한 변동량은 물리량 앞에 **Δ**를 붙인다.



[그림 2.4.25] 자기부상열차-가이드웨이 시스템 개념도

(가) 객차의 운동방정식

객차의 운동방정식을 다음과 같이 도출하였다 [그림 2.4.26].

Heave에 대한 운동방정식:

$$M_c \Delta \ddot{z}_c + \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{k=1}^{N_s} \Delta F_{z,jk}^{sus} = 0 \tag{2.4.15a}$$

Sway에 대한 운동방정식:

$$M_c \Delta \ddot{y}_c + \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{k=1}^{N_s} \Delta F_{y,jk}^{sus} = 0 \tag{2.4.15b}$$

Rolling에 대한 운동방정식:

$$I_{cx} \Delta \ddot{\theta}_{cx} - \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{k=1}^{N_s} \left(H_c \Delta F_{y,jk}^{sus} - b_{y,k} \Delta F_{z,jk}^{sus} \right) = 0 \tag{2.4.15c}$$

Pitching에 대한 운동방정식:

$$I_{cy}\Delta\ddot{\theta}_{cy} - \sum_{j=}^{N_b}\sum_{k=}^{N_s}\left[\left(a_{x\,j} + b_{x\,k}\right)\Delta F_{z\,jk}^{sus} - H_c\Delta F_{x\,jk}^{sus}\right] = \tag{2.4.15d}$$

Yawing에 대한 운동방정식:

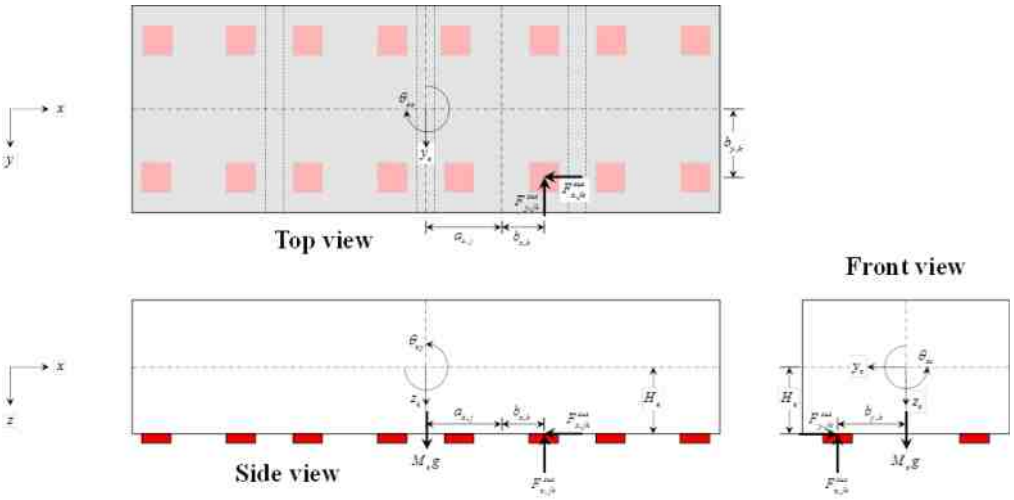
$$I_{cz}\Delta\ddot{\theta}_{cz} - \sum_{j=}^{N_b}\sum_{k=}^{N_s}\left[b_{y\,k}\Delta F_{x\,jk}^{sus} - \left(a_{x\,j} + b_{x\,k}\right)\Delta F_{y\,jk}^{sus}\right] = \tag{2.4.15e}$$

현가장치에서 발생하는 힘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{x\,jk}^{sus} &= k_x\left[\left(H_c\theta_{cy} - b_{y\,k}\theta_{cz}\right) - \left(-H_b\theta_{by\,j} - b_{y\,k}\theta_{bz\,j}\right)\right] \\ &\quad + c_x\left[\left(H_c\dot{\theta}_{cy} - b_{y\,k}\dot{\theta}_{cz}\right) - \left(-H_b\dot{\theta}_{by\,j} - b_{y\,k}\dot{\theta}_{bz\,j}\right)\right] \end{aligned} \tag{2.4.16a}$$

$$\begin{aligned} F_{y\,jk}^{sus} &= k_y\left[\left(y_c + \left(a_{x\,j} + b_{x\,k}\right)\theta_{cz} - H_c\theta_{cx}\right) - \left(y_{b\,j} + b_{x\,k}\theta_{bz\,j} + H_b\theta_{bx\,j}\right)\right] \\ &\quad + c_y\left[\left(\dot{y}_c + \left(a_{x\,j} + b_{x\,k}\right)\dot{\theta}_{cz} - H_c\dot{\theta}_{cx}\right) - \left(\dot{y}_{b\,j} + b_{x\,k}\dot{\theta}_{bz\,j} + H_b\dot{\theta}_{bx\,j}\right)\right] \end{aligned} \tag{2.4.16b}$$

$$\begin{aligned} F_{z\,jk}^{sus} &= k_z\left[\left(z_c + b_{y\,k}\theta_{cx} - \left(a_{x\,j} + b_{x\,k}\right)\theta_{cy}\right) - \left(z_{b\,j} + b_{y\,k}\theta_{bx\,j} - b_{x\,k}\theta_{by\,j}\right)\right] \\ &\quad + c_z\left[\left(\dot{z}_c + b_{y\,k}\dot{\theta}_{cx} - \left(a_{x\,j} + b_{x\,k}\right)\dot{\theta}_{cy}\right) - \left(\dot{z}_{b\,j} + b_{y\,k}\dot{\theta}_{bx\,j} - b_{x\,k}\dot{\theta}_{by\,j}\right)\right] \end{aligned} \tag{2.4.16c}$$



[그림 2.4.26] 객차의 자유물체도

(나) 대차의 운동방정식

대차의 운동방정식을 다음과 같이 도출하였다. [그림 2.4.27]

Heave에 대한 운동방정식:

$$M_b \Delta \ddot{z}_{bj} - \sum_{k=}^{N_s} \Delta F_{z\,jk}^{sus} + \sum_{l=}^{N_{ems}} \Delta F_{z\,jl}^{ems} = \tag{2.4.17a}$$

Sway에 대한 운동방정식:

$$M_b \Delta \ddot{y}_{bj} - \sum_{k=}^{N_s} \Delta F_{y\,jk}^{sus} + \sum_{m=}^{N_{gm}} \delta_m \Delta F_{y\,jm}^{gm} = \tag{2.4.17b}$$

Rolling에 대한 운동방정식:

$$I_{bx} \Delta \ddot{\theta}_{bx\,j} - \sum_{k=}^{N_s} \left(H_b \Delta F_{y\,jk}^{sus} + b_{y\,k} \Delta F_{z\,jk}^{sus} \right) + \sum_{l=}^{N_{ems}} e_{y\,l} \Delta F_{z\,jl}^{ems} - \sum_{m=}^{N_{gm}} g_{z\,m} \delta_m \Delta F_{y\,jm}^{gm} = \tag{2.4.17c}$$

Pitching에 대한 운동방정식:

$$I_{by} \Delta \ddot{\theta}_{by\,j} - \sum_{k=}^{N_s} \left(- b_{x\,k} \Delta F_{z\,jk}^{sus} - H_b \Delta F_{x\,jk}^{sus} \right) - \sum_{l=}^{N_{ems}} e_{x\,l} \Delta F_{z\,jl}^{ems} = \tag{2.4.17d}$$

Yawing에 대한 운동방정식:

$$I_{bz}\Delta\ddot{\theta}_{bz,j} - \sum_{k=}^{N_s}\left(-b_{y,k}\Delta F_{x,jk}^{sus} + b_{x,k}\Delta F_{y,jk}^{sus}\right) + \sum_{m=}^{N_{gm}} g_{x,m}\delta_m \Delta F_{y,jm}^{gm} = \tag{2.4.17e}$$

여기서, 부상 전자석과 안내 전자석에서 발생하는 전자기력은 다음과 같다.

부상 전자석의 전자기력:

$$\Delta F_{z,jl}^{ems} = k_{i,jl}^{ems}\Delta i_{jl}^{ems} - k_{u,jl}^{ems}\Delta u_{jl}^{ems} \tag{2.4.18a}$$

$$k_{i,jl}^{ems} = \frac{\mu_0 n_{ems}^2 A_{ems} i_{jl}^{ems0}}{2\left(u_{jl}^{ems0}\right)^2}, \quad k_{u,jl}^{ems} = \frac{\mu_0 n_{ems}^2 A_{ems}\left(i_{jl}^{ems0}\right)^2}{2\left(u_{jl}^{ems0}\right)^3} \tag{2.4.18b}$$

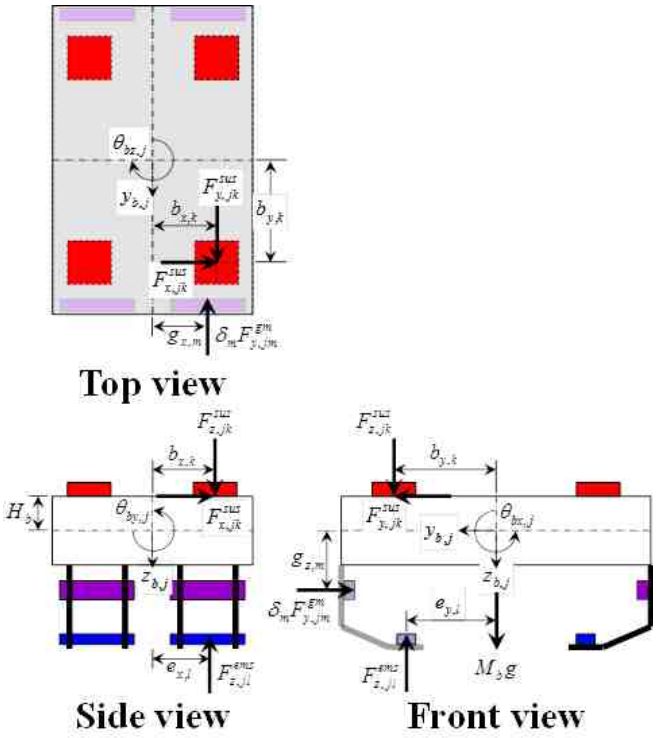
$$\Delta u_{jl}^{ems} = \Delta z_{b,j} + e_{y,l}\Delta\theta_{bx,j} - e_{x,l}\Delta\theta_{by,j} - \Delta z_{g,jl} - \Delta r_{jl} \tag{2.4.18c}$$

안내 전자석의 전자기력:

$$\Delta F_{y,jm}^{gm} = k_{i,jm}^{gm}\Delta i_{jm}^{gm} - k_{u,jm}^{gm}\Delta u_{jm}^{gm} \tag{2.4.19a}$$

$$k_{i,jm}^{gm} = \frac{\mu_0 n_{gm}^2 A_{gm} i_{jm}^{gm0}}{2\left(u_{jm}^{gm0}\right)^2}, \quad k_{u,jm}^{gm} = \frac{\mu_0 n_{ems}^2 A_{ems}\left(i_{jm}^{gm0}\right)^2}{2\left(u_{jm}^{gm0}\right)^3} \tag{2.4.19b}$$

$$\Delta u_{jm}^{gm} = \delta_m\left(\Delta y_{b,j} + g_{x,m}\Delta\theta_{bz,j} - g_{z,m}\Delta\theta_{bx,j} - \Delta y_{g,jm}\right) \tag{2.4.19c}$$



[그림 2.4.27] 대차의 자유물체도

(다) 가이드웨이의 운동방정식

가이드웨이의 운동방정식을 다음과 같이 도출하였다. [그림 2.4.28]

휨 변형:

$$m\frac{\partial^2(\Delta w)}{\partial t^2}+a_0 m\frac{\partial(\Delta w)}{\partial t}+EI\left[\frac{\partial^4(\Delta w)}{\partial x^4}+a_1\frac{\partial^5(\Delta w)}{\partial x^4\partial t}\right]$$
$$=\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}}F_{z,jl}^{ems}\delta(x-x_c-a_{x,j}-\widetilde{e}_{x,jl})-\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}}F_{z,jl}^{ems0}\delta(x-x_c^0-a_{x,j}-\widetilde{e}_{x,jl}^0) \quad (2.4.20a)$$

비틀림:

$$\frac{mJ}{A}\frac{\partial^2(\Delta\alpha)}{\partial t^2}+a_2\frac{mJ}{A}\frac{\partial(\Delta\alpha)}{\partial t}-GJ\left[\frac{\partial^2(\Delta\alpha)}{\partial x^2}+a_3\frac{\partial^3(\Delta\alpha)}{\partial x^2\partial t}\right]$$
$$=\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}}\widetilde{e}_{y,jl}F_{z,jl}^{ems}\delta(x-x_c-a_{x,j}-\widetilde{e}_{x,jl})-\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}}\widetilde{e}_{y,jl}^{0}F_{z,jl}^{ems0}\delta(x-x_c^0-a_{x,j}-\widetilde{e}_{x,jl}^{0})$$
$$-\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{m=1}^{N_{gm}}\widetilde{s}_{z,jm}\delta_m F_{y,jm}^{gm}\delta(x-x_c-a_{x,j}-\widetilde{g}_{x,jm})+\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{m=1}^{N_{gm}}\widetilde{s}_{z,jm}^{0}\delta_m F_{y,jm}^{gm0}\delta(x-x_c^0-a_{x,j}-\widetilde{g}_{x,jm}^{0}) \quad (2.4.20b)$$

여기서 a_0, a_1, a_2, a_3는 감쇠 상수

$\widetilde{e}_{x,jl}(t)=e_{x,l}+e_{z,l}\theta_{by,j}(t)-e_{y,l}\theta_{bz,j}(t)$

$\widetilde{e}_{y,jl}(t)=e_{y,l}+y_{b,j}(t)-e_{z,l}\theta_{bx,j}(t)+e_{x,l}\theta_{bz,j}(t)$

$\widetilde{g}_{x,jm}(t)=g_{x,m}+g_{z,m}\theta_{by,j}(t)-g_{y,m}\theta_{bz,j}(t)$

$\widetilde{s}_{z,jm}(t)=s_{z,m}+z_{b,j}(t)+g_{y,m}\theta_{bx,j}(t)-g_{x,m}\theta_{by,j}(t)-w_{jm}(t)$,

$w_{jm}(t)=w(x_c+a_{x,j}+\widetilde{g}_{x,jm},t)$이다.

Modal decomposition을 사용하여 가이드웨이의 운동을 표현한다.

$$w(x,t)=\sum_{n=1}^{N_{gw}^{w}}\phi_n^w(x)q_n^w(t) \quad (2.4.21a)$$

$$\alpha(x,t)=\sum_{n=1}^{N_{gw}^{\alpha}}\phi_n^\alpha(x)q_n^\alpha(t) \quad (2.4.21b)$$

Modal coordinate system에서 이산화 된 운동방정식을 얻는다.

$$M_n^w\Delta\ddot{q}_n^w+C_n^w\Delta\dot{q}_n^w+K_n^w\Delta q_n^w=\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}}\phi_{n,jl}^w\Delta F_{z,jl}^{ems}+\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}}\left(\phi_{n,jl}^w-\phi_{n,jl}^{w0}\right)F_{z,jl}^{ems0} \quad (2.4.22a)$$

$$
\begin{aligned}
&M_n^{\alpha}\Delta\ddot{q}_n^{\alpha} + C_n^{\alpha}\Delta\dot{q}_n^{\alpha} + K_n^{\alpha}\Delta q_n^{\alpha} \\
&\quad = \sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}} \phi_{n,jl}^{\alpha}\,\widetilde{e}_{y,jl}\Delta F_{z,jl}^{ems} + \sum_{j=1}^{N_b}\sum_{l=1}^{N_{ems}} \left(\phi_{n,jl}^{\alpha}\,\widetilde{e}_{y,jl} - \phi_{n,jl}^{\alpha 0}\,\widetilde{e}_{y,jl}^{0}\right) F_{z,jl}^{ems0} \\
&\quad - \sum_{j=1}^{N_b}\sum_{m=1}^{N_{gm}} \phi_{n,jm}^{\alpha}\,\widetilde{s}_{z,jm}\delta_m\Delta F_{y,jm}^{gm} - \sum_{j=1}^{N_b}\sum_{m=1}^{N_{gm}} \left(\phi_{n,jm}^{\alpha}\,\widetilde{s}_{z,jm} - \phi_{n,jm}^{\alpha 0}\,\widetilde{s}_{z,jm}^{0}\right)\delta_m F_{y,jm}^{gm0}
\end{aligned}
\qquad \text{(2.4.22b)}
$$

여기서 $\phi_{n,jl}^{w} = \phi_n^{w}(x_c + a_{x,j} + \widetilde{e}_{x,jl})$, $\phi_{n,jl}^{\alpha} = \phi_n^{\alpha}(x_c + a_{x,j} + \widetilde{e}_{x,jl})$, $\phi_{n,jm}^{\alpha} = \phi_n^{\alpha}(x_c + a_{x,j} + \widetilde{g}_{x,jm})$ 이다.

가이드웨이 변형을 고려하여 가이드웨이의 변위 $z_{g,jl} = w_{jl} + \tilde{e}_{y,jl}\alpha_{jl}$, $z_{g,jm} = \tilde{s}_{z,jm}\alpha_{jm}$ 와 같이 표현된다.

여기서,

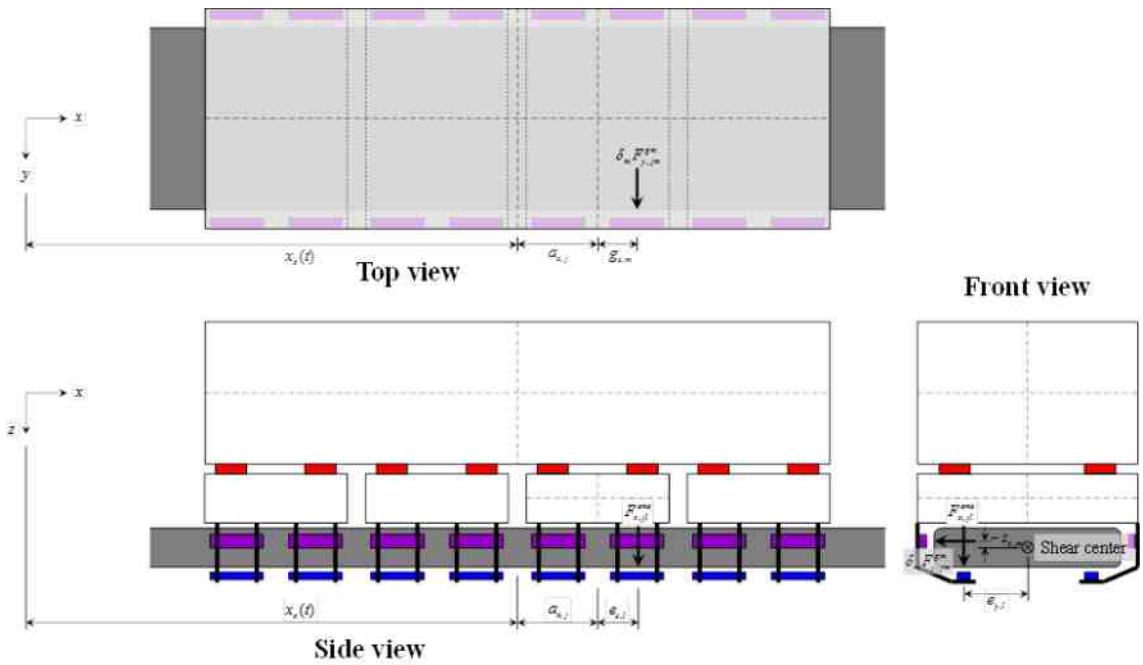
$$w_{jl}(t) = w(x_c + a_{x,j} + \tilde{e}_{x,jl}, t) = \sum_{n=1}^{N_{gw}^{w}} \phi_{n,jl}^{w} q_n^{w}(t), \qquad \alpha_{jl}(t) = \alpha(x_c + a_{x,j} + \tilde{e}_{x,jl}, t) = \sum_{n=1}^{N_{gw}^{\alpha}} \phi_{n,jl}^{\alpha} q_n^{\alpha}(t),$$

$$\alpha_{jm}(t) = \alpha(x_c + a_{x,j} + \tilde{g}_{x,jm}, t) = \sum_{n=1}^{N_{gw}^{\alpha}} \phi_{n,jm}^{\alpha} q_n^{\alpha}(t)$$ 이다. 변위에 대한 표현을 사용하여 부상 전자석과 안내 전자석의 공극을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_{jl}^{ems} = z_{b,j} + e_{y,l}\theta_{bx,j} - e_{x,l}\theta_{by,j} - w_{jl} - \tilde{e}_{y,jl}\alpha_{jl} - r_{jl} \tag{2.4.23a}$$

$$u_{jm}^{gm} = \delta_m \left(y_{b,j} + g_{x,m}\theta_{bz,j} - g_{z,m}\theta_{bx,j} + \tilde{s}_{z,jm}\alpha_{jm} \right) \tag{2.4.23b}$$

여기서 $r_{jl} = r(x_c + a_{x,j} + \tilde{e}_{x,jl}, \tilde{e}_{y,jl})$이다.



[그림 2.4.28] 가이드웨이의 자유물체도

(라) 공극 제어

전체 자기부상 열차 시스템의 안정성을 확보하기 위하여 부상 공극과 안내 공극을

제어하여야 한다. 이 연구에서는 전상태 되먹임 제어기법을 활용하고자 한다. 부상 전자석과 안내 전자석의 전류, 전압, 부상공극 간에는 다음의 관계가 성립한다.

부상 전자석:

$$\Delta \dot{i}_{jl}^{ems} = \frac{k_{u,jl}^{ems}}{k_{i,jl}^{ems}} \Delta \dot{u}_{jl}^{ems} - \frac{R_{ems}}{L_{jl}^{ems0}} \Delta i_{jl}^{ems} + \frac{1}{L_{jl}^{ems0}} \Delta v_{jl}^{ems} \tag{2.4.24a}$$

$$L_{jl}^{ems} = \frac{\mu n_{ems} A_{ems}}{u_{jl}^{ems}} \tag{2.4.24b}$$

안내 전자석:

$$\Delta \dot{i}_{jm}^{gm} = \frac{\delta_m k_{u,jm}^{gm}}{k_{i,jm}^{gm}} \Delta \dot{u}_{jm}^{gm} - \frac{R_{gm}}{L_{jm}^{gm0}} \Delta i_{jm}^{gm} + \frac{1}{L_{jm}^{gm0}} \Delta v_{jm}^{gm} \tag{2.4.25a}$$

$$L_{jm}^{gm} = \frac{\mu n_{gm} A_{gm}}{u_{jm}^{gm}} \tag{2.4.25b}$$

부상 전자석의 전압은 센서에서 계측된 가속도, 부상공극과 제어 알고리즘의 상태변수의 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta v_{jl}^{ems} &= k_1 \left(\Delta \ddot{z}_{b,j} + e_{y,l} \Delta \ddot{\theta}_{bx,j} - e_{x,l} \Delta \ddot{\theta}_{by,j} \right) \\ &\quad - k_1 \hat{x}_{1,jl}^{ems} + \left(-k_1 V_1 + k_2 \right) \hat{x}_{2,jl}^{ems} + k_3 \hat{x}_{3,jl}^{ems} + \left(k_1 V_1 + k_4 \right) \hat{x}_{4,jl}^{ems} + k_5 \hat{x}_{5,jl}^{ems} \end{aligned} \tag{2.4.26a}$$

$$\begin{Bmatrix} \dot{\hat{x}}_{1,jl}^{ems} \\ \dot{\hat{x}}_{2,jl}^{ems} \\ \dot{\hat{x}}_{3,jl}^{ems} \\ \dot{\hat{x}}_{4,jl}^{ems} \\ \dot{\hat{x}}_{5,jl}^{ems} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_3} & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ -\frac{1}{T_1} & -\frac{V_1}{T_1} & 0 & \frac{V_1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & -\frac{V_2}{T_2} & 0 & \frac{V_2}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{V_3}{T_4} & -\frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_5} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{x}_{1,jl}^{ems} \\ \hat{x}_{2,jl}^{ems} \\ \hat{x}_{3,jl}^{ems} \\ \hat{x}_{4,jl}^{ems} \\ \hat{x}_{5,jl}^{ems} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \ddot{z}_{b,j} + e_{y,l} \Delta \ddot{\theta}_{bx,j} - e_{x,l} \Delta \ddot{\theta}_{by,j} \\ \Delta u_{jl}^{ems} \end{Bmatrix} \tag{2.4.26b}$$

안내 전자석에 대해서도 동일한 제어기법을 사용할 수 있다. 이상의 운동방정식을

연계하여 풀면 초고속 자기부상 열차와 가이드웨이 상호작용계의 3차원 동적해석을 수행할 수 있다. 이때 $\widetilde{e}_{x,jl}$, $\widetilde{e}_{y,jl}$, $\widetilde{g}_{x,jm}$, $\widetilde{s}_{z,jm}$은 자기부상열차-가이드웨이 시스템의 현재 변위에 좌우되므로, 전체 방정식은 비선형이다. 그러므로, 이 시스템의 해를 구하기 위해서는 반복 계산을 수행하여야 한다. 이 연구에서는 자기부상 열차 시스템과 가이드웨이의 운동방정식을 교대로 만족시키도록 하여, 최종적으로는 전체 시스템의 지배방정식을 만족시키도록 한다. 즉, 우선 가이드웨이의 변위를 가정한 후, 자기부상 열차의 지배방정식의 해를 구한다. 이 해를 자기부상 열차의 변위로 고정한 후, 가이드웨이의 운동방정식을 푼다. 이후에는 이 과정을 전체 시스템의 지배방정식을 만족시킬 때까지 반복한다.

(마) 정지 부상상태 해석

앞에서 상술한 지배방정식들은 정지 부상상태를 기준으로 한 변동량에 대하여 서술되었다. 그러므로, 운행상태에서의 해를 구하기 위해서는 정지 부상상태에 대한 해석을 먼저 수행하여야 한다.

정지 부상상태에서 객차의 평형방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{k=1}^{N_s} F_{z,jk}^{sus0} = M_c g \tag{2.4.27a}$$

$$\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{k=1}^{N_s} F_{y,jk}^{sus0} = 0 \tag{2.4.27b}$$

$$\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{k=1}^{N_s} \left(H_c F_{y,jk}^{sus0} - b_{y,k} F_{z,jk}^{sus0}\right) = 0 \tag{2.4.27c}$$

$$\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{k=1}^{N_s} \left[\left(a_{x,j} + b_{x,k}\right) F_{z,jk}^{sus0} - H_c F_{x,jk}^{sus0}\right] = 0 \tag{2.4.27d}$$

$$\sum_{j=1}^{N_b}\sum_{k=1}^{N_s} \left[b_{y,k} F_{x,jk}^{sus0} - \left(a_{x,j} + b_{x,k}\right) F_{y,jk}^{sus0}\right] = 0 \tag{2.4.27e}$$

여기서

$$F_{x,jk}^{sus0} = k_x\left[\left(H_c\theta_{cy}^0 - b_{y,k}\theta_{cz}^0\right) - \left(-H_b\theta_{by,j}^0 - b_{y,k}\theta_{bz,j}^0\right)\right] \tag{2.4.28a}$$

$$F_{y,jk}^{sus0} = k_y\left[\left(y_c^0 + \left(a_{x,j} + b_{x,k}\right)\theta_{cz}^0 - H_c\theta_{cx}^0\right) - \left(y_{b,j}^0 + b_{x,k}\theta_{bz,j}^0 + H_b\theta_{bx,j}^0\right)\right] \tag{2.4.28b}$$

$$F_{z,jk}^{sus0} = k_z\left[\left(z_c^0 + b_{y,k}\theta_{cx}^0 - \left(a_{x,j} + b_{x,k}\right)\theta_{cy}^0\right) - \left(z_{b,j}^0 + b_{y,k}\theta_{bx,j}^0 - b_{x,k}\theta_{by,j}^0\right)\right] \tag{2.4.28c}$$

정지 부상상태에서 대차의 평형방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^{N_s} F_{z,jk}^{sus0} - \sum_{l=1}^{N_{ems}} F_{z,jl}^{ems0} + M_b g = 0 \tag{2.4.29a}$$

$$\sum_{k=1}^{N_s} F_{y,jk}^{sus0} - \sum_{m=1}^{N_{gm}} \delta_m F_{y,jm}^{gm0} = 0 \tag{2.4.29b}$$

$$-\sum_{k=1}^{N_s} \left(H_b F_{y,jk}^{sus0} + b_{y,k} F_{z,jk}^{sus0} \right) + \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{y,l} F_{z,jl}^{ems0} - \sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{z,m} \delta_m F_{y,jm}^{gm0} = 0 \tag{2.4.29c}$$

$$-\sum_{k=1}^{N_s} \left(-b_{x,k} F_{z,jk}^{sus0} - H_b F_{x,jk}^{sus0} \right) - \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{x,l} F_{z,jl}^{ems0} = 0 \tag{2.4.29d}$$

$$-\sum_{k=1}^{N_s} \left(-b_{y,k} F_{x,jk}^{sus0} + b_{x,k} F_{y,jk}^{sus0} \right) + \sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{x,m} \delta_m F_{y,jm}^{gm0} = 0 \tag{2.4.29e}$$

정지 부상상태에서 가이드웨이의 평형방정식은 다음과 같다.

$$K_n^w q_n^{w0} = \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{l=1}^{N_{ems}} \phi_{n,jl}^{w0} F_{z,jl}^{ems0} \tag{2.4.30a}$$

$$K_n^\alpha q_n^{\alpha 0} = \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{l=1}^{N_{ems}} \phi_{n,jl}^{\alpha 0} \tilde{e}_{y,jl}^0 F_{z,jl}^{ems0} - \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{m=1}^{N_{gm}} \phi_{n,jm}^{\alpha 0} \tilde{s}_{z,jm}^0 \delta_m F_{y,jm}^{gm0} \tag{2.4.30b}$$

자기부상 열차가 정지 상태에서 부상이 이루어졌을 때, 부상 전자석과 안내 전자석에서 목표 부상공극과 안내공극을 만족시켜야 한다. 그러므로, 정지 부상상태에서 다음의 식을 만족시켜야 한다.

$$\bar{u}_{ems} = z_{b,j}^0 + e_{y,l} \theta_{bx,j}^0 - e_{x,l} \theta_{by,j}^0 - w_{jl}^0 - \tilde{e}_{y,jl}^0 \alpha_{jl}^0 - r_{jl}^0 \tag{2.4.31a}$$

$$\bar{u}_{gm} = 0.5\left(W - W_g\right) + \delta_m \left(y_{b,j}^0 + g_{x,m} \theta_{bz,j}^0 - g_{z,m} \theta_{bx,j}^0 + \tilde{s}_{z,jm}^0 \alpha_{jm}^0 \right) \tag{2.4.31b}$$

이상의 방정식들은 운행상태의 방정식과 마찬가지로 비선형이므로 반복계산을 수행하여 그 해를 구하여야 한다. 우선 $\tilde{e}_{y,jl}^0 = e_{y,l}$, $\tilde{s}_{z,jm}^0 = s_{z,m}$, $q_n^{w0} = 0$, $q_n^{\alpha 0} = 0$으로 가정한다. 식 (2.4.31a)와 (2.4.31b)로부터 대차의 변위를 결정한다. $\left(N_{ems} + N_{gm}\right)$개의 방정식에서 미지수의 수는 5개이므로, 다음과 같이 최적화된 해를 구한다.

$$\begin{Bmatrix} z_{b,j}^0 \\ y_{b,j}^0 \\ \theta_{bx,j}^0 \\ \theta_{by,j}^0 \\ \theta_{bz,j}^0 \end{Bmatrix} = \mathsf{A}^{-1} \begin{Bmatrix} \sum_{l=1}^{N_{ems}} \left(\overline{u}_{ems} + w_{jl}^0 + \widetilde{e}_{y,jl}^0 \alpha_{jl}^0 + r_{jl}^0 \right) \\ \sum_{m=1}^{N_{gm}} \delta_m \left[\overline{u}_{gm} - 0.5(W - W_g) - \delta_m \widetilde{s}_{z,jm}^0 \alpha_{jm}^0 \right] \\ \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{y,l} \left(\overline{u}_{ems} + w_{jl}^0 + \widetilde{e}_{y,jl}^0 \alpha_{jl}^0 + r_{jl}^0 \right) - \sum_{m=1}^{N_{gm}} \delta_m g_{z,m} \left[\overline{u}_{gm} - 0.5(W - W_g) - \delta_m \widetilde{s}_{z,jm}^0 \alpha_{jm}^0 \right] \\ - \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{x,l} \left(\overline{u}_{ems} + w_{jl}^0 + \widetilde{e}_{y,jl}^0 \alpha_{jl}^0 + r_{jl}^0 \right) \\ \sum_{m=1}^{N_{gm}} \delta_m g_{x,m} \left[\overline{u}_{gm} - 0.5(W - W_g) - \delta_m \widetilde{s}_{z,jm}^0 \alpha_{jm}^0 \right] \end{Bmatrix}$$

(2.4.32a)

$$\mathsf{A} = \mathsf{B}^T \mathsf{B} = \begin{bmatrix} N_{ems} & 0 & \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{y,l} & -\sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{x,l} & 0 \\ 0 & N_{gm} & -\sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{z,m} & 0 & \sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{x,m} \\ \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{y,l} & -\sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{z,m} & \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{y,l}^2 + \sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{z,m}^2 & -\sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{y,l} e_{x,l} & -\sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{x,m} g_{z,m} \\ -\sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{x,l} & 0 & -\sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{y,l} e_{x,l} & \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{x,l}^2 & 0 \\ 0 & \sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{x,m} & -\sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{x,m} g_{z,m} & 0 & \sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{x,m}^2 \end{bmatrix}$$

(2.4.32b)

$$\mathsf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & e_{y,1} & -e_{x,1} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & e_{y,N_{ems}} & -e_{x,N_{ems}} & 0 \\ 0 & \delta_1 & -\delta_1 g_{z,1} & 0 & \delta_1 g_{x,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \delta_{N_{gm}} & -\delta_{N_{gm}} g_{z,N_{gm}} & 0 & \delta_{N_{gm}} g_{x,N_{gm}} \end{bmatrix} \qquad (2.4.32c)$$

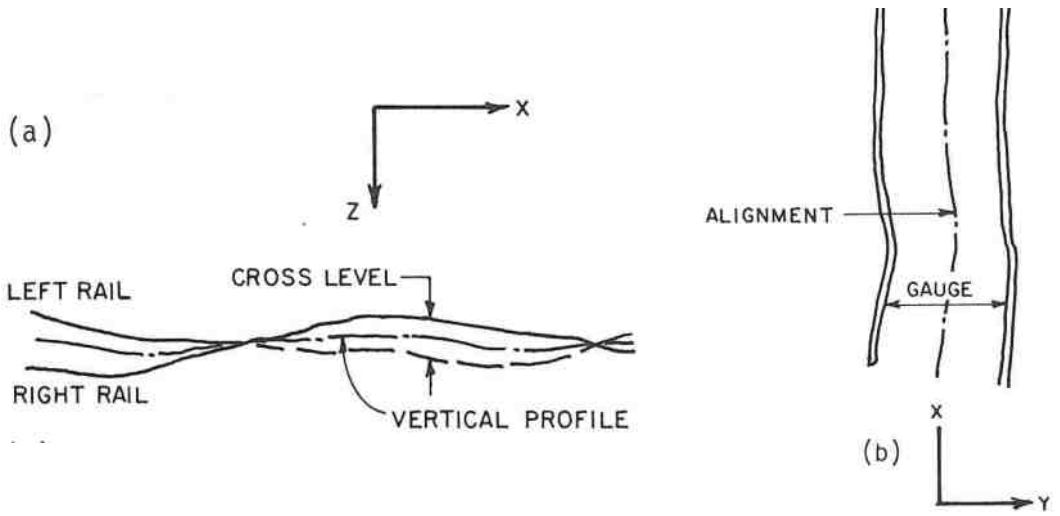
식 (2.4.27a-e)로부터 객차의 변위를 반복계산을 수행하여 구한다. 식 (2.4.29a-e)로부터 부상 전자석과 안내 전자석의 전자기력 $F_{z,jl}^{ems0}$과 $F_{y,jm}^{gm0}$을 구한다. 이때, 5개의 방정식에 대하 $(N_{ems} + N_{gm})$개의 미지수가 존재하므로, 다음과 같이 minimum norm solution을 구한다.

$$\begin{Bmatrix} F_{z,j1}^{ems0} \\ \vdots \\ F_{z,jN_{ems}}^{ems0} \\ F_{y,j1}^{gm0} \\ \vdots \\ F_{y,jN_{gm}}^{gm0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overline{F}_{z,j1}^{ems0} \\ \vdots \\ \overline{F}_{z,jN_{ems}}^{ems0} \\ \overline{F}_{y,j1}^{gm0} \\ \vdots \\ \overline{F}_{y,jN_{gm}}^{gm0} \end{Bmatrix} + \mathbf{BA}^{-1} \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^{N_s} F_{z,jk}^{sus0} - \sum_{l=1}^{N_{ems}} \overline{F}_{z,jl}^{ems0} + M_b g \\ \sum_{k=1}^{N_s} F_{y,jk}^{sus0} - \sum_{m=1}^{N_{gm}} \delta_m \overline{F}_{y,jm}^{gm0} \\ \sum_{k=1}^{N_s} \left(H_b F_{y,jk}^{sus0} + b_{y,k} F_{z,jk}^{sus0} \right) - \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{y,l} \overline{F}_{z,jl}^{ems0} + \sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{z,m} \delta_m \overline{F}_{y,jm}^{gm0} \\ \sum_{k=1}^{N_s} \left(- b_{x,k} F_{z,jk}^{sus0} - H_b F_{x,jk}^{sus0} \right) + \sum_{l=1}^{N_{ems}} e_{x,l} \overline{F}_{z,jl}^{ems0} \\ \sum_{k=1}^{N_s} \left(- b_{y,k} F_{x,jk}^{sus0} + b_{x,k} F_{y,jk}^{sus0} \right) - \sum_{m=1}^{N_{gm}} g_{x,m} \delta_m \overline{F}_{y,jm}^{gm0} \end{Bmatrix} \quad (2.4.33)$$

여기서 $\overline{F}_{z,jl}^{ems0} = \dfrac{(M_c + N_b M_b)g}{N_b N_{ems}}$ 이다. 식 (2.4.30a)와 식 (2.4.30b)로부터 q_n^{w0}와 $q_n^{\alpha 0}$을 갱신한다. 갱신된 q_n^{w0}와 $q_n^{\alpha 0}$를 사용하여 이상의 계산을 반복하여 수행하여, 전체 평형방정식의 해를 만족하도록 한다.

(3) 가이드웨이의 irregularity 모델

가이드웨이의 irregularity[그림 2.4.29]는 자기부상열차의 주행성에 큰 영향을 미칠 수 있다. Irregularity의 영향을 정확히 분석하고 이론적인 관점에서 파악하기 위하여, 다양한 irregularity의 밀도 스펙트럼 함수가 제안되어 사용되고 있다.



[그림 2.4.29] 가이드웨이 irregularity의 정의

(가) Anis and Hedrick 모델 (Anis Z. and Hedrick J.K., Characterization of Rail Track Irregularities, U.S. Dept. of Transportation, Final Report on Contract DOT-TSC-1206, Washington, D.C., 1977)

Vertical profile:

$$S_v(\omega) = \frac{A_v \omega_c^2}{\omega^2\left(\omega^2 + \omega_c^2\right)} \tag{2.4.34a}$$

Alignment:

$$S_a(\omega) = \frac{A_a \omega_c^2}{\omega^2\left(\omega^2 + \omega_c^2\right)} \tag{2.4.34b}$$

Cross-level & guage:

$$S_g(\omega) = S_c(\omega) = \frac{4 A_v \omega_c^2}{\left(\omega^2 + \omega_c^2\right)\left(\omega^2 + \omega_s^2\right)} \tag{2.4.34c}$$

[표 2.4.6] Anis and Hedrick 모델 parameter

Parameter	Track Class					
	1	2	3	4	5	6
$A_v\,(cm^2\,rad/m)$	1.2107	1.0181	0.6816	0.5376	0.2095	0.0339
$A_a\,(cm^2\,rad/m)$	3.3634	1.2107	0.4128	0.3027	0.0762	0.0339
$\omega_s\,(rad/m)$	0.6046	0.9308	0.8520	1.1312	0.8209	0.4380
$\omega_c\,(rad/m)$	0.8245	0.8245	0.8245	0.8245	0.8245	0.8245

(나) USA FRA 모델

Vertical profile & alignment:

$$S(\omega) = \frac{A \omega_2^2\left(\omega^2 + \omega_1^2\right)}{\omega^4\left(\omega^2 + \omega_2^2\right)} \tag{2.4.35a}$$

Cross-level & guage:

$$S(\omega) = \frac{A \omega_2^2}{\left(\omega^2 + \omega_1^2\right)\left(\omega^2 + \omega_2^2\right)} \tag{2.4.35b}$$

[표 2.4.7] USA FRA 모델 parameter

Irregularity	Parameter		Class					
	Notation	Unit	1	2	3	4	5	6
Vertical profile	A	$10^8 m^3$	15.53	8.85	4.92	2.75	1.57	0.98
	ω_1	$10^3 m^{-1}$	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3
	ω_2	$10^2 m^{-1}$	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
Alignment	A	$10^8 m^3$	9.83	5.51	3.15	1.77	0.98	0.59
	ω_1	$10^3 m^{-1}$	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8
	ω_2	$10^2 m^{-1}$	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4
Cross-level	A	$10^8 m^3$	4.52	3.15	2.16	1.38	0.98	0.59
	ω_1	$10^3 m^{-1}$	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3
	ω_2	$10^2 m^{-1}$	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
gauge	A	$10^8 m^3$	9.83	5.51	3.15	1.77	0.98	0.59
	ω_1	$10^3 m^{-1}$	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2
	ω_2	$10^2 m^{-1}$	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3

(다) Žilina, Technical University of Transport and Telecommunications 모델

$$S(\omega) = \frac{2.72 \times 10^{-4}}{\left(1+1.185\omega^2\right)\left(1+14.388\omega^2\right)} \tag{2.4.36}$$

(라) Railway Research Institute, Czech Republic 모델

$$S(\omega) = \frac{0.135}{\left(1+22\omega^2\right)\left(1+44000\omega^2\right)} \tag{2.4.37}$$

(마) French National Railways 모델

$$S(\omega) = \frac{10^{-6} A}{\left(1+3.257\omega\right)^3} \tag{2.4.38}$$

여기서 $A = 160$ (양호한 궤도) 또는 $A = 550$ (불량한 궤도).

제5절 LSM 설계 및 해석기술 개발

1. 개요

최근 세계화가 가속화되면서 이에 따른 고속 교통수단에 대한 요구도 증가하고 있다. 교통 측면에서의 속도는 경쟁력을 갖추기 위한 중요한 요소 중 하나이며, 가까운 미래에 세계 경제의 중심이 될 동북아시아 지역에서는 더욱 중요하다.

지금까지 개발된 가장 빠른 열차는 일본의 자기부상열차(581km/h)이다. 자기부상열차는 1960년대부터 연구개발이 이루어진 이래, 독일과 일본의 경우는 실용화 수준에 도달하였으며, 시험선로에서의 대부분의 시험이 이루어졌다.

그러나 막대한 건설비용 문제를 해결하지 못하고, 기술적, 경제적 문제를 포함한 다양한 이유로 인하여 실용화가 늦어지고 있다. 그에 대한 대안으로 기존의 휠-레일 방식과 자기부상 추진방식의 장점만을 혼합한 하이브리드 철도시스템에 대한 관심이 커지고 있다.

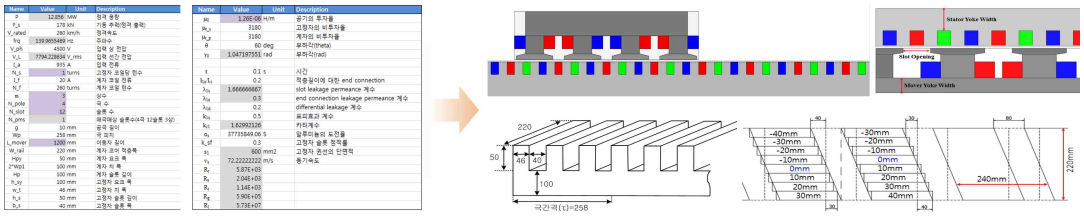
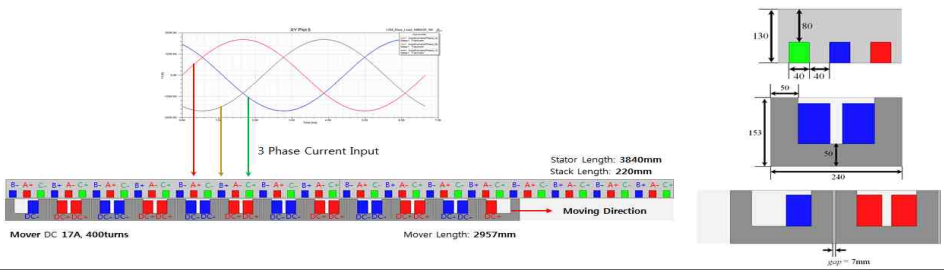
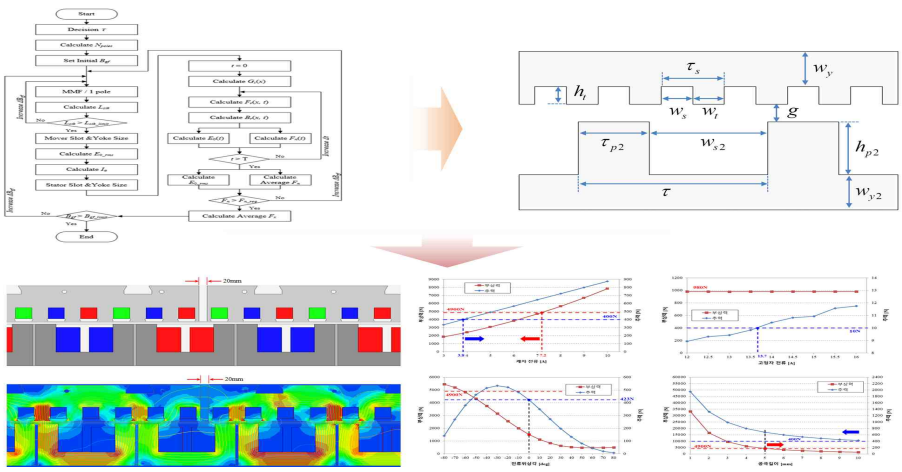
자기부상 추진방식의 전동기 중 LSM은 고정밀성, 비접촉성, 직접구동, 정숙성, 구조의 단순성, 유지보수의 간편성 등을 들 수 있다. 특히 구동 대상에 비접촉으로 추력을 부여하기 때문에, 모터와 구동 대상 간에 힘의 전달기구를 필요하지 않아 기구 구성이 간단해지고, 또한 수송 및 반송 시스템에서는 접착이나 전달의 성능에 의존하지 않는 높은 가감속력이 가능하므로 급한 경사도 오르내릴 수 있다. 유지보수 및 신뢰성에도 우수한 특성을 가지며, 고정자축과 가동자축이 직선적으로 전개되어 있기 때문에 형상이나 배치가 자유롭다는 장점을 가지고 있다.

이러한 장점으로 하이브리드 철도시스템의 추진시스템으로 LSM이 대표적으로 사용되고 있다. 하이브리드 철도시스템은 휠-레일 방식에 기초하지만, 추진시스템으로 기존의 회전형 전동기가 아닌 선형전동기를 이용하기 때문에, 비점착구동이 가능하여 기존의 휠-레일 추진방식에 의한 속도한계를 극복할 수 있다.

2. 목표

기존 휠 온 레일방식의 철도가 갖는 문제점 및 고속의 교통수단 수요 증가로 초고속 자기부상열차의 필요성이 대두되었다. 초고속 자기부상열차는 선로 건설 및 차량 제작에 천문학적인 비용이 들어가므로 정확한 특성해석을 통한 설계 오류를 최소화해야만 한다. 따라서, 본 과제에서는 지상 1차 LSM(Linear Synchronous Motor)형태의 추진시스템을 개발하고자 하며, LSM의 해석 및 설계 기법을 연구하고자 한다.

3. 개발 내용 요약(1장)

연구목표	초고속 자기부상열차의 부상과 추진을 담당하는 Long Stator형 LSM(Linear Synchronous Motor)을 개발하고자 하며, LSM의 해석 및 설계 기법을 연구하고자 한다.
연구내용	▪ 유한요소법을 통한 해석기법 정립 ▪ Long Stator형 LSM의 설계 파라미터 분석 ▪ LSM 시험대차 설계 및 해석 ▪ LSM 설계기술 정립
수행과정	▪ 선형 동기전동기 기초 설계 및 최적화 설계 ▪ 유한요소법을 통한 주요 설계 파라미터 선정 및 민감도 해석 ▪ LSM 시험대차 설계 및 특성해석 ▪ LSM 성능 측정 시험
연구결과	▪ 선형 동기전동기 기초 설계 및 최적화 설계  ▪ LSM 유한해석 모델 구축  ▪ LSM 설계 플로우 정립 

4. 상세 개발 내용

가. 선형 동기전동기 기초 설계 및 최적화 설계(1차년도)

(1) 선형 동기전동기 기초 설계

선형 동기전동기(이하 LSM; Linear Synchronous Motor)는 구조적으로 회전형 동기전동기와는 다르므로, LSM의 설계를 위해서는 LSM만이 갖는 특성에 대하여 알아야 할 필요성이 있다.

(가) 선형 동기전동기의 특성

LSM은 대표적으로 3가지의 특성을 가진다.

① LSM의 구동원리는 회전형 동기전동기와 동일하다.

② 기존의 회전형 영구자석 동기전동기와는 달리, 상대적으로 큰 공극을 갖게 되며 선형의 특성상 원의 무한궤도와는 다르게 유한한 길이를 갖게 되므로 단부에 의한 특성이 존재한다.

③ 회전형 기기에서는 수직력이 서로 상쇄되는 구조를 가질 수 있지만, 선형기에서는 이와 같은 상쇄를 고려하기가 힘들며, 단부효과 및 일정 공극을 유지할 수 있도록 하는 지지구조 등을 고려하여야 한다.

이와 같은 특징을 바탕으로 LSM의 설계 시 고려하여야 할 사항으로는 기존의 회전형 동기 전동기의 설계 시 고려해야할 사항들뿐만 아니라 선형으로 변환되면서 발생하는 비대칭적인 수직력, 입구단과 출구단에서의 단부효과, 그리고 공극의 지지구조 등을 고려하여야 한다.

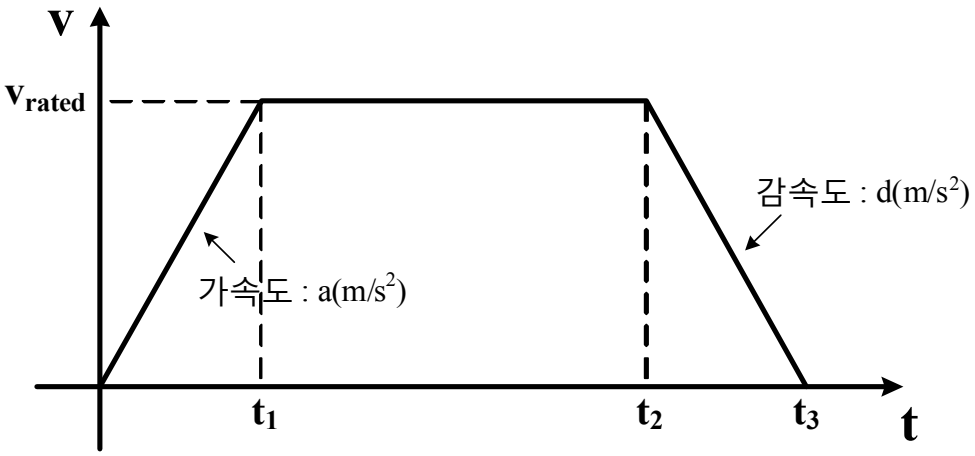
일반적으로 공극의 지지는 기계적인 방법, 공기 부상, 그리고 자기 부상 등의 방법을 통하여 지지할 수가 있다. 이 중 자기 부상의 경우 추진을 위한 자계와 부상을 위한 자계가 서로 간섭이 발생할 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하게 된다. 그 외의 방식에서도 기계적인 조인트 부분 등에 대한 고려가 요구되지만, 설계 디자인에서는 이와 같은 부분들에 대한 고려는 생략하도록 한다.

(나) LSM 부하 산정

LSM을 설계하기 위해서는 우선 LSM이 받게 될 최대 부하를 산정해야하고 그 부하를 이겨낼 수 있는 LSM의 용량을 결정해야 한다.

① 주행 시간 및 거리 산정

[그림 2.5.1]과 같이 속도-시간 프로파일이 정해져 있다고 가정하면, 각각의 구간에서의 주행속도 및 이동거리를 계산할 수 있다.



[그림 2.5.1] 속도 시간 곡선

② 기동인장력 산정

③ 주행저항 산정

자기부상 LSM의 경우 마찰력이 없으나, 그 외에 공기역학 저항, 자기적 저항, 선형발전에 의한 저항이 추가로 고려되어야 한다.

▶ Aerodynamic drag force (F_A)

▶ Magnetic drag force (F_M)

▶ Linear generating drag force (F_B)

④ 구배저항의 고려

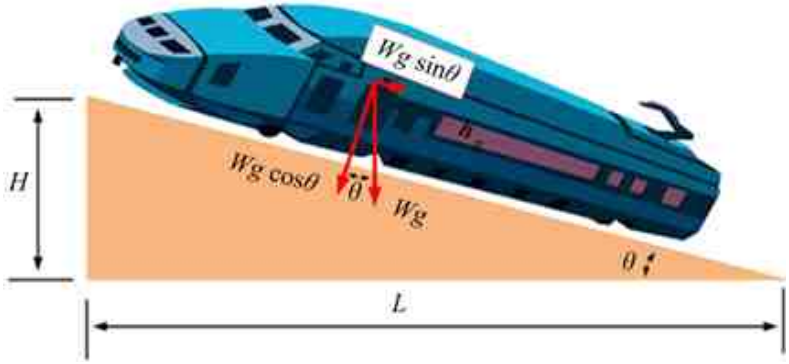
자기부상열차의 등판능력은 일반적인 바퀴식(Wheel-On-Rail) 철도차량에 비해 월등히 뛰어난 특성을 갖는다. 그러나 열차의 등판 각도가 커질수록 더 많은 출력을 필요로 하게 되며 이에 대한 고려가 필수적이다.

열차가 구배구간을 올라갈 때의 중력에 의한 저항을 구배저항이라 한다. 구배저항은 열 차 중량과 구배의 경사에 비례하여 증감하고 그 값은 다음과 같다.

$$R_g = 1{,}000 \times W \cdot g \cdot \sin\theta\,[N]$$

$$\theta = \arctan(\text{구배}[\%] \times 0.01)$$

[그림 2.5.2]는 철도차량의 구배저항을 그림으로 나타낸 것이다.



[그림 2.5.2] 철도차량의 구배저항

(다) LSM의 출력 도출

① 정격속도에서의 출력

② 최대속도에서의 견인력 및 가속도

③ 입력 전력의 계산

(라) LSM 기초 설계

① 고정자 설계

차량이 요구하는 속도에 대하여 주파수와 극 피치의 비를 적절히 산정하여야 한다. 이는 입력단의 스위칭 주파수 및 차량의 크기를 결정하는 단계이므로 이를 고려한 선택이 중요하다.

② 계자 설계

계자의 설계에는 많은 가정이 들어가게 되며 이러한 가정에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이라 사료된다.

③ 기초설계 결과

(2) LSM의 특성 해석

직선형 기기를 올바로 설계하고 개발하기 위해서는 적절한 해석기법을 통하여 그 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 전기기기를 해석하는 방법은 크게 이론해석법과 수치해석법으로 나누어진다. 이론해석법에서는 여러 가정들을 통하여 해석 대상을 단순화하게 되는데, 이 과정에서 해의 정밀성이 떨어지게 되며, 해석 대상의 국부적인 형상 변화에 따른 세부적인 특성 변화를 파악하기가 어렵게 된다. 그러나 이론해석식을 구한 후에는 해석 시간이 매우 빠르고 해석모델의 제반 설계변수 변화에 따른 특성 변화를 손쉽게 파악할 수 있기 때문에 초기 설계 시에는 매우 유용한 방법이라고 할 수 있다.

수치해석법은 해석모델의 복잡한 형상 및 재질의 비선형성에 대한 고려가 가능하여 정밀한 해를 구할 수 있기 때문에, 근래의 전자계산기의 발달과 함께 기기의 설계 및 정밀해석방법으로 그 이용이 점차 확대되고 있다. 그러나 수치해석법은 해석모델에 대한 모델링 및 요소분할 등의 선처리 작업이 번거로워 해석 대상의 기하학적인 설계변

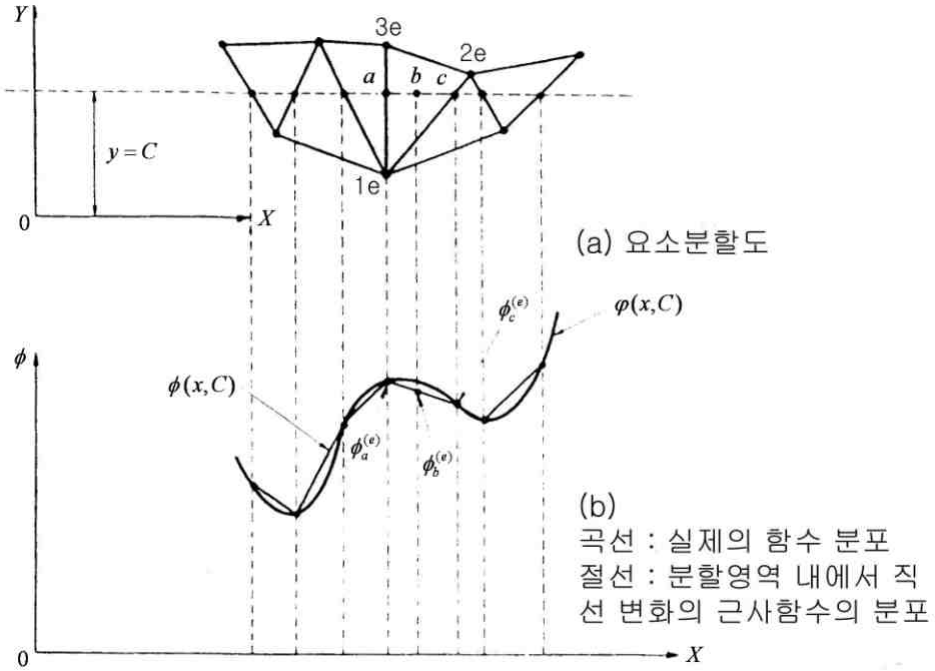
수 변화에 따른 특성 변화를 해석하기가 용이하지 않다.

일반적으로 공학 분야에서 제기되는 물리적인 제반현상들은 복잡한 분포 특성을 갖는 연속적인 현상이라고 할 수 있는데, 이러한 현상들은 그 물리 장을 지배하는 지배방정식에 의해 표현되는 것이 보통이다. 또한 이와 같은 지배방정식을 만족하는 함수분포는 그 함수에 의해서 성립되는 지배방정식인 미분방정식의 해를 구함으로써 알 수 있다. 따라서 LSM의 이론해석법은 우리가 알고자하는 전자계를 지배하고 있는 맥스웰 방정식을 기초로 하여 해를 구하는 과정이라고 할 수 있다.

그러나 최근에는 이와 같은 미분방정식에 기초한 지배방정식의 해를 구하기 위해서 해석적인 방법을 사용하는 것 뿐 아니라, 컴퓨터에 의한 수치 계산에 의해 해를 구하는 방법이 많이 사용되고 있으며, 이러한 수치 계산에 의한 방법에서는 주어진 미분방정식을 시간이나 혹은 변역(變域)에 대해서 이산화(discretization)해야 하는 것이 보통이다. 여기에서 현상을 기술하는 미분방정식을 이산화하는 방식과 현상 그 자체를 이산화하는 방식을 생각 할 수 있다.

어떤 물리적 현상을 나타내는 함수의 분포영역을 특별한 기하학적 형태로 세분하고, 세분된 미소영역을 독립적으로 보아 각각의 미소영역에서의 함수분포가 서로 연속되고, 또한 이들이 종합적으로 결합되어 전영역에서의 연속현상을 나타내는 함수분포를 구성한다고 보면, 고찰대상의 해석영역을 세분된 미소영역으로 이산화하고 이산된 각 미소영역에 대해 함수특성을 나타내는 관계방정식을 적용시켜 이 방정식들의 전해석영역에 대한 집합이 종합적으로 구성된 방정식이라고 보아 수치해석을 하는 이산적인 방법을 생각할 수 있다.

지금 해석대상영역을 미소영역으로 세분하고 세분된 각 미소영역에 대한 함수분포를 미시적인 관점에서 분석해 보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 즉 전영역에 대해서는 비록 복잡하게 분포하는 함수라 할지라도 세분된 미소영역에서는 단순한 변화를 한다고 볼 수 있다. 따라서 이렇게 복잡하게 변화하는 함수를 미소영역에 대해서 단순변화를 하는 함수 형으로 근사시켜도 큰 오차는 발생하지 않는다.



[그림 2.5.3] 영역분할과 함수분포

[그림 2.5.3]과 같이 해석영역을 삼각형상의 미소영역으로 세분한 경우에 x-y 평면에서 y=C인 직선상에서의 함수분포 $\phi(x,C)$를 생각할 때, 그림 (b)에서의 곡선이 실제의 함수분포 특성이라 하면, 절선은 세분된 삼각형상의 미소영역 내에서는 함수 $\phi(x,C)$가 직선적으로 변화한다고 가정하여 단순화시킨 $\phi(x,C)$의 분포를 나타낸 것이다. 따라서 아래의 그림에서와 같이 분할구간 내에서는 원함수 $\phi(x,C)$를 직선적으로 변화하는 단순함수 $\phi(x,C)$로 근사시켜도 큰 무리가 없음을 알 수 있다. 유한요소법은 이와 같은 사실에 관점을 두어 해석 대상영역을 유한개의 미소영역으로 세분하고 분할된 각 영역 내에서의 함수를 단순 함수로 근사시키며 이 근사함수가 주어진 방정식과 경계조건을 만족하도록 하는 관계 조건을 찾아 분할된 각 미소영역에 적용하여 관계방정식을 유도하고, 전해석영역을 이 관계 방정식군의 집합에 의해서 성립되는 이산결합된 해석장으로 취급하여 관계방정식의 해를 구하는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 유한요소법을 이용하여 수치해석적인 해를 구하여 앞서의 이론해석법과의 비교 연구를 수행한다.

(가) 자기등가회로법을 이용한 특성 해석

자기등가회로법은 전기회로와 쌍대성을 갖는 자기회로를 구성하여 해를 구하는 것으로 간략하게 특성을 파악할 수 있는 방법이다. 그러나 자기회로 해석은 전기회로와 달리 자성체와 비자성체의 투자율의 비가 1:10,000 이하에 불과하기 때문에 누설을 비롯한 프린징 효과(Fringing Effect) 등을 고려하여야 하며 정확한 해석 결과를 얻기 힘들

다. 하지만 치수를 이용한 간단한 근사 해석법이므로 설계의 보조수단으로 충분히 활용가능하다. 본 연구에서는 계산상의 난해함을 줄이고자 고정자 슬롯을 고려하지 않은 평판으로 가정하여 해석을 수행하였다.

(나) 유한요소법을 이용한 특성 해석

LSM의 설계과정에서 설계된 모델이 요구 사양을 만족하는지 정확한 특성 해석을 통한 검증과정은 필수 사항이다. LSM의 전자기적 특성 해석 방법은 자기등가회로를 이용하는 방법과 유한요소법을 이용하는 방법이 있다. 자기등가회로를 이용한 특성 해석은 계산이 간단하고 해석 시간이 매우 짧은 장점이 있지만, 복잡한 형상이나 비선형 특성을 고려하지 못하기 때문에 해석의 정확성이 떨어진다는 단점이 있다. 반면, 유한요소법은 해석 시간은 오래 걸리지만, 비선형 특성을 고려할 수 있고, 복잡한 형상도 정확하게 해석할 수 있는 장점이 있다.

유한요소법을 이용하여 LSM의 특성 해석을 하기 위해서는 LSM의 모델링 작업이 필요하다. LSM의 형상에 각 부분별 재질 조건, 권선의 배치 및 감긴 방향, 전기적 입력 조건, 계자의 운동 조건 등을 설정해줘야 한다. 이러한 작업은 직접 프로그래밍을 통해 할 수 있으나 시간이 오래 소요되므로, 상용 프로그램을 이용하는 것이 유리하다. 본 과제에서는 대부분 Ansys사의 Maxwell을 이용하여 LSM의 특성 해석을 실시하였으며, 일부는 JRI사의 JMAG Studio를 이용하였다.

(3) LSM 최적화 설계

추력 및 부상력의 리플이 과도하게 발생하여 부상력 제어 및 승차감에 악영향을 주게 되므로 대책이 필요하다. 또한 LSM의 성능저감 없이 재료비를 줄이는 설계가 이루어져야 한다. 따라서 추력 및 부상력 리플의 저감과 LSM의 재료비 저감을 위한 LSM 최적화 설계를 실시하였다.

나. 자기부상열차용 LSM 설계 및 해석 시험

첫 번째로 단거리 시험선 운행용 자기부상열차 추진용 LSM을 설계하였다. 두 번째로 유한요소법을 이용하여 설계된 LSM의 특성 해석을 실시하였다. LSM 부상전자석의 특성 해석을 우선 수행한 후 LSM 1 Module에 대한 특성 해석을 실시하였다. 또한, 자기부상열차의 특성상 LSM의 부상력은 항상 일정하게 유지되어야하기 때문에 부상력 일정 제어를 고려한 해석을 수행하였다. 세 번째로 LSM의 요구 부상력 및 요구 추력을 산정하였으며, 요구 부상력을 유지하면서 요구 추력을 만족시키기 위한 LSM의 운전 조건 및 제어 방법을 제시하였다. 네 번째로 LSM의 설계 파라미터를 분석하였다. 고정자 치폭과 고정자 슬롯 개구폭, 공극 길이를 설계 파라미터로 선정하여, 설계 파라미터의 변화가 추력 및 부상력 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 LSM 단품의 추력측정을 실시하였다. LSM 단품의 추력측정을 위해서 측정 방법을 제안하였고, 제안한 방법으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 실제 측정결과와 비교하였다.

(1) 자기부상열차용 LSM 설계

본 연구의 최종 목표는 최대 속도 550km/h의 초고속 자기부상열차용 LSM을 개발하는 것이다. 자기부상열차가 550km/h의 속도로 달리기 위해서는 수 km 이상의 충분한 주행거리가 확보되어야 하는데, 이렇게 수 km에 달하는 노선을 건설하기에는 천문학적인 비용이 소모된다. 따라서 150m의 노선을 최대 속도 28.8km/h까지만 달리는 단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 LSM으로 설계하였다.

(가) 단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 LSM 설계

단거리 시험선 운행을 위한 자기부상열차(12m)는 실용화 노선용 차량(79.7m)에 비해 차량 길이가 짧고, 만차 중량도 각각 28ton과 188.5ton으로 시험선 차량이 훨씬 가볍다. 따라서 시험선 차량은 실용화 차량에 비해 더 적은 부상력과 추력을 요구한다. 본 절에서는 앞 절의 실용화 노선 운행용 차량과 같은 방식으로 시험선 차량에 대한 요구 부상력과 추력을 계산하였다.

단거리 시험선 운행용 LSM은 부상전자석과 고정자 철심의 형상을 실용화 모델과 동일하게 유지하면서 고정자 권선과 입력 전류의 크기를 변경하는 방식으로 설계하였다. 시험선 차량은 최대 속도가 28.8km/h에 불과하기 때문에 아주 작은 크기의 역기전력이 발생하고, 고정자 권선(1턴)의 길이도 짧기 때문에 권선 저항도 작다. 자기부상열차의 요구 추력을 만족시키기 위해서는 수 천A의 전류를 인가해야 하지만, 제어해야 하는 전압의 크기는 수 십V 이내이기 때문에 전류 제어가 쉽지 않고 인버터의 용량이 커지는 문제점이 있다. 그래서 LSM의 고정자 권선을 1턴에서 4턴으로 변경하여 역기전력 및 권선 저항을 높여 충분한 전압을 확보하였다.

① 자기부상열차의 주행 저항 계산
② 자기부상열차의 기동 추력 계산
③ 자기부상열차의 요구 부상력 계산
④ LSM 설계 모델

(2) LSM 부상전자석

자기부상열차의 차상에 장착되는 LSM 부상전자석은 기본적으로 차량을 부상시키는 역할을 담당하며 LSM 고정자에서 발생하는 이동자계에 의한 추진 기능도 갖는다. 차량의 중량이 곧 부상력이기 때문에 부상전자석 설계는 차량의 만차 중량으로부터 시작된다. 본 연구에서 제작하고자하는 시험선 차량은 1차 설계 시 22톤이었으나 2차 설계에서 28톤으로 증가하였다. 따라서 중량 증가에 따른 부상전자석의 설계 변경이 있었으며 중량증가에 따른 부상전자석의 특성 변화를 확인할 수 있었다.

일반적으로 초고속 자기부상열차 추진용 LSM은 용량이 크고 높은 추력 리플과 부상력 리플 성분을 갖는다. 이러한 리플 성분은 승차감과 부상력 제어에 악영향을 주기 때문에 리플 저감을 위해 많은 연구가 이루어졌다. 본 연구에서는 추력 및 부

상력 리플 저감을 위해 세그먼트 구조의 부상전자석이 적용되었다.

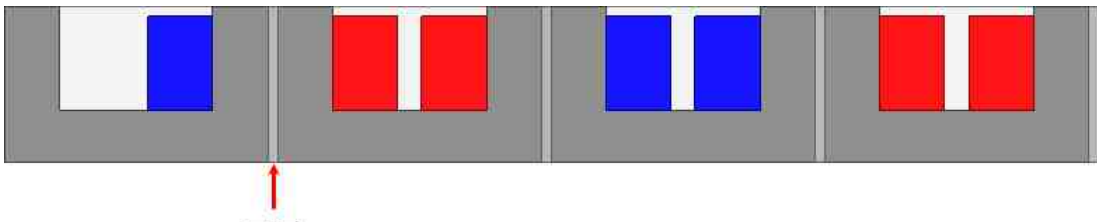
① 부상전자석 1차 모델

② 부상전자석 2차 모델

③ 부상전자석 세그먼트 간격 특성 해석

LSM은 제작의 편의상 오픈 슬롯 구조를 갖는다. 따라서 구조가 간단하며 높은 리플 성분을 갖는다. 이러한 리플 성분을 줄이기 위해 많은 연구가 이루어졌으며, 본 연구에서는 Phase Set Shift 기법을 적용하여 리플을 저감하였다.

부상전자석은 [그림 2.5.4]와 같이 "ㄷ" 형태의 세그먼트로 이루어져 있다.



[그림 2.5.4] LSM 부상전자석에서 세그먼트 사이의 공간

(3) LSM 부상력 제어를 고려한 해석

일반적으로 초고속 자기부상열차에 적용되는 선형동기전동기(LSM)는 추진과 부상을 모두 담당하는 일체형 타입이다. 이 때문에 LSM의 추력을 높이기 위해 고정자 전류를 높일 경우, 부상력도 함께 증가하게 된다. 상전도 흡인식의 LSM에서 부상력이 요구량을 넘어서면 일정한 공극을 유지하지 못하고 고정자와 부상전자석이 달라붙게 된다. 따라서 부상전자석은 계자전류의 크기를 조정하여 일정한 공극을 유지해야 한다. 즉, 고정자 전류의 증가로 부상력이 증가되면 계자전류를 줄여 증가된 부상력을 다시 낮춘다. 그러나 계자전류가 줄어들었기 때문에 LSM의 추력은 원하는 만큼 쉽게 증가하지 못하고 더 많은 고정자 전류를 필요로 하게 된다. 따라서 LSM의 요구 추력을 만족시키는 설계를 위해서는 부상력 제어를 고려한 해석이 반드시 수반되어야 한다.

① LSM의 요구 부상력 및 요구 추력 산정

③ 계자 전류 크기에 따른 LSM 특성

④ 부상력 제어를 고려한 LSM 특성 해석

⑤ 실용화 모델의 운전 조건

⑥ LSM 설계 파라미터 분석

⑦ LSM의 상전압 계산

⑧ 단거리 시험선에서의 추진체 주행 특성 분석

(4) LSM 단품 시험

단거리 시험선 운행용 자기부상열차는 총 6개의 LSM Module이 장착된다. 6개의 LSM Module을 모두 제작하여 성능 시험을 진행하기 전에 우선 1개의 Module만

제작하여 성능 시험을 통해 설계의 타당성을 검증하는 것이 보다 합리적이다. LSM의 성능을 측정하기 위해서는 고정자와 부상전자석에 전류를 인가해야 한다. 특히 고정자에는 3상 교류 전류를 인가해야 하므로 대용량의 전력변환기가 필요하며, 부상 제어를 할 경우에는 별도의 제어기가 필요하다. 본 연구에서는 전력변환기와 제어기 없이 DC Power Supply 2개로만 LSM 단품 시험을 진행하였다.

① LSM 단품의 추력 측정 방법

③ LSM 단품의 추력측정 시뮬레이션

④ LSM 단품의 추력측정 시험

⑤ LSM 단품의 추력측정 결과와 시뮬레이션 결과 비교

다. 성능 계측시스템 구축(3차년도)

(1) LSM 제어 성능시험을 위한 시험대차 설계 및 해석

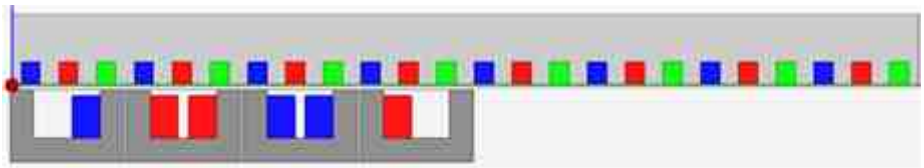
(가) 중량 200kg급 시험대차 설계

① 시험대차 요구 추력 산정

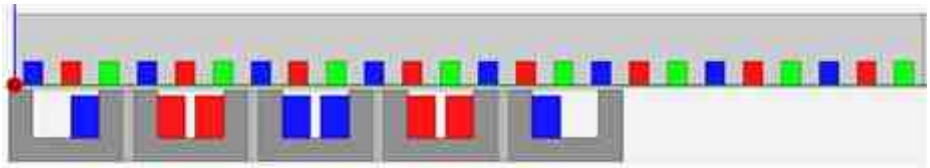
시험대차 중량을 200kg으로 가정할 경우, 전체 요구 부상력은 1.96kN이며, 시험대차의 LSM은 좌우측 2대가 필요하므로 LSM 1대당 요구 부상력은 980N이다. 시험대차의 최대속도를 2.4m/s로 가정하고, 최대 가속도를 0.1m/s^{2}으로 가정하면, 시험대차의 요구 추력은 20N이고 LSM 1대당 부담해야 하는 추력은 10N이다. 여기서, 시험대차의 최대속도가 저속이므로 공기저항은 무시하였다.

② 부상전자석 극수 선정 및 권선 설계

시험대차의 중량을 200kg으로 가정하고 부상전자석을 설계 진행하였다. 기존 부상전자석에서 극수를 줄여 3극 모델과 4극 모델로 변경하여 특성을 해석하였다.



[그림 2.5.5] LSM 부상전자석 3극 모델



[그림 2.5.6] LSM 부상전자석 4극 모델

정지 상태에서 3극 모델과 4극 모델에 대하여 NI(암페어 턴)에 대한 부상력 특성을 비교하였다. 다음 그림과 같이 3극 모델은 NI 1900AT에서 요구부상력 980N을

만족하였으며, 4극 모델은 NI 1700AT에서 요구부상력을 만족하였다. 역기서 NI 1900AT는 부상전자석의 권선이 190턴일 때 계자 전류 10A가 인가됨을 의미한다.

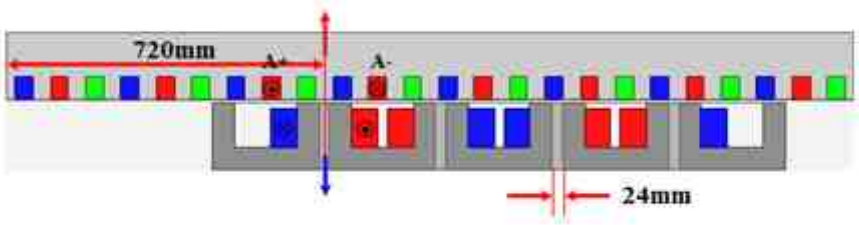
③ LSM 부상전자석 4극 모델의 세그먼트 간격 특성 해석

LSM은 추력 및 부상력 리플이 많이 발생하는 특성이 있다. 따라서 리플 성분을 줄이기 위해 많은 연구가 진행되었으며, 대표적인 방법 중에 하나가 고정자 극 피치와 계자 극 피치를 다르게 설계하는 것이다. LSM 부상전자석 4극 모델의 추력 및 부상력 리플을 줄이기 위해서 부상전자석의 극 피치를 고정자의 극 피치와 다르게 설계하였다. 고정자 극 피치는 240mm이므로 시험대차의 부상전자석의 극 피치를 결정하기 위한 특성 해석이 필요하다.

④ LSM 시험대차의 요구 추력 만족을 위한 입력전류 계산

LSM 시험용 대차의 요구 추력을 내기하기 위해 필요한 고정자 및 부상전자석의 입력전류를 구할 필요가 있다. 따라서, 다음 그림과 같이 시험용 대차의 부상전자석을 모델링하여 유한요소해석을 수행하였다.

해석모델의 초기위치는 1번째 극을 고정자 A상 권선의 기자력 축에 정렬시켰다. 이것을 D축 정렬이라고 정의한다. 또한, 부상전자석의 세그먼트 사이는 추력 리플과 부상력 리플 저감을 위해 24mm씩 간격을 두었다.



[그림 2.5.7] LSM 부상전자석 4극 모델

⑤ LSM 시험용 대차의 운전조건 설정

LSM 시험대차가 요구 부상력을 유지하면서 최대속도 및 가속도를 만족시키기 위한 운전조건을 설정해야 한다.

(나) 중량 1,000kg급 시험대차 설계

① 시험대차 운전 특성 및 요구 추력 산정

LSM 시험대차의 중량 변경으로 요구 부상력 및 요구 추력 재산정이 필요하다. LSM 시험대차의 총 중량을 1000kg으로 가정하면, 전체 요구 부상력은 9,800N이다. LSM 2대가 시험대차 1대를 구성하므로 LSM 1대의 요구 부상력은 4,900N이 된다. 그러나 LSM 시험대차는 부상을 하지 않고 바퀴를 통해 일정 공극을 유지하기 때

문에 LSM의 부상력은 요구 부상력 4,900N을 넘어서는 안 되며, 최대한 부상력이 작게 설계해야 한다.

② 150m 선로에서 LSM 시험대차 주행 특성 분석

일반적으로 철도차량은 다음의 주행 저항식을 이용하여 주행저항을 계산한다.

$$F_A = 2.8 \times v^2 \times (0.265 \times N + 0.3) \text{ [N]}$$

$$F_M = N \times (0.1 \times v^{0.5} + 0.02 \times v^{0.7}) \times 10^{-3} \text{ [N]}$$

$$F_B = 0 \quad \text{[N] (for } 0 \leq v \leq 20\text{km/h)}$$

$$= N \times 7.3 \times 10^3 \quad \text{[N] (for } 20 \leq v \leq 70\text{km/h)}$$

$$= N(146/v - 0.2) \times 10^3 \text{ [N] (for } 70 \leq v \leq 500\text{km/h)}$$

여기서, N은 차량 수를 의미한다.

③ 계자 권선 설계

LSM 시험대차 설계를 위해 4극 LSM을 모델링하였다.

④ 계자 전류 크기에 따른 LSM 특성

전류위상각을 0deg로 고정하고, 고정자 전류 520A(실효치)인가한 상태에서 계자 전류를 3A부터 10A까지 변경시켰다.

⑤ 공극길이에 따른 LSM 특성

4극 LSM 해석모델에서 전류위상각 0deg인 상태로 고정자전류 520A(실효치), 부상전자석의 계자 전류 4A를 인가하였다.

⑥ LSM 시험대차의 계자 권선 저항 계산

LSM 시험대차의 전자석 계자 전류를 제어하기 위해서 계자 권선의 저항값이 필요하다. 계자 권선의 저항은 시험대차 제작 후 측정을 통해서 쉽게 구할 수 있으나, 시험대차를 제작하기 전에 특성 해석이 필요하다.

(2) LSM 제어 정수 추출 해석

(가) LSM D축 정렬 기준 변경

기존의 D축 정렬 기준의 경우 무부하 역기전력의 위상이 약 26.2deg 앞서게 된다. 따라서 위상이 0deg가 되도록 d축 정렬 기준을 변경하였다. 고정자 권선의 극피치는 240 mm인 반면, 부상전자석의 극피치는 247mm로 모든 극에 대하여 기자력 축 정렬이 불가능하다. 따라서 부상전자석 1극에 대하여 정렬하면 나머지 극은 기자력 축이 어긋나게 된다. 이에 따라 다음과 같이 D축 정렬 기준을 정하였다.

(나) D축 Q축 인덕턴스 산정

시제차량용 LSM의 벡터 제어를 위한 제어 정수로서 D축과 Q축 인덕턴스를 필요로 하며, 다음과 같은 방법으로 계산할 수 있다.

(다) LSM 시험대차의 D축 정렬 기준 변경에 따른 운전조건 재계산

LSM 시험대차의 무부하 역기전력의 위상도 0deg가 되도록 D축 정렬 기준을 변경하였다. 앞서 시제차량용 LSM의 D축 정렬 기준 변경으로 인해 LSM의 운전 조건이 바뀌는 것을 확인하였기 때문에 시험대차용 LSM 또한, D축 정렬 기준 변경으로 인해 운전조건이 바뀔 것이므로 시험대차용 LSM의 운전조건을 다시 찾아야 한다.

(라) LSM 시험대차의 D축 Q축 인덕턴스 산정

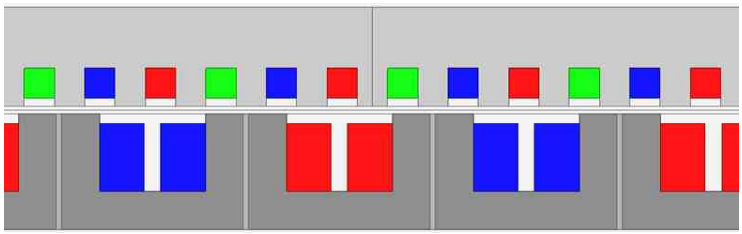
LSM 시험대차의 벡터 제어를 위한 제어정수로서 D축과 Q축 인덕턴스를 필요로 하며, 시제차량용 LSM과 동일한 방법으로 계산한다.

(3) LSM 제작모델 특성 해석 및 고정자 권선 배치 검토

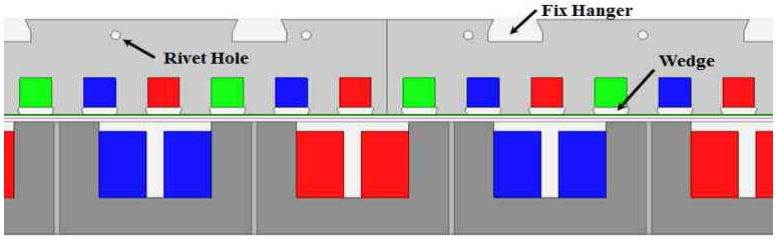
(가) LSM 전자계 설계 모델과 제작 모델의 출력 특성 비교

LSM 고정자는 적층 고정 및 가이드웨이 취부 등을 위해 자로 축소가 불가피하다. 이러한 자로 축소로 인한 LSM의 성능 저하가 예상되므로, LSM 전자계 설계 모델과 제작 모델의 특성 해석 결과 비교를 통하여 어느 정도의 성능 저하가 발생할 것인지 예측해 볼 필요가 있다.

LSM 전자계 설계 모델은 [그림 2.5.8]와 같이 고정자가 단순한 형태로 설계되어 있는 반면, LSM 제작 모델의 경우, [그림 2.5.9]와 같이 전기강판 적층 고정을 위한 12mm 직경의 Rivet Hole, LSM 고정자의 가이드 웨이 취부를 위한 Fix Hanger, 고정자 권선의 고정을 위한 Wedge가 존재하여 전자계 설계 모델보다 복잡한 형태를 갖는다. 따라서 LSM 제작 모델은 자기통로(자로)가 LSM 전자계 설계 모델에 비해 줄어들게 되어 출력 특성이 저하될 것으로 예상된다.



[그림 2.5.8] LSM 전자계 설계 모델



[그림 2.5.9] LSM 제작 모델(A-Type)

(나) LSM 제작 모델 C-Type 특성 해석

LSM 고정자는 열팽창 및 시공 특성상 각 모듈 사이를 일정 간격으로 띄워야 한다. 따라서 LSM 고정자의 불연속에 의한 출력 특성 저하가 예상되므로 특성 해석이 필요하다.

(다) LSM 고정자 권선 배치 검토

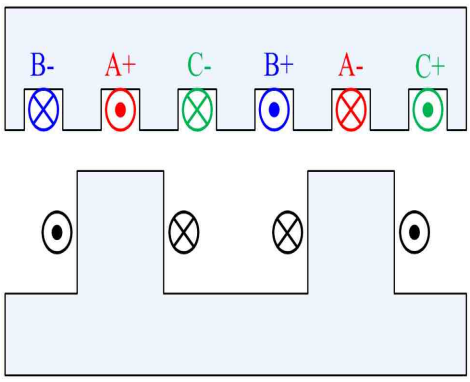
LSM 고정자 권선을 시공할 때, 권선의 터미널은 부상전자석의 간섭을 피하기 위해 가이드웨이 안쪽에 위치해야 하며, 각 상의 권선 방향을 주의하면서 시공해야 한다. 따라서 고정자 권선의 배치가 전자계 해석 모델과 동일한지 검토할 필요가 있다.

라. LSM 설계기술 정립(4차년도)

(1) LSM 설계 프로세스

그림 2.5.10은 설계하고자하는 EMS 방식의 자기부상열차용 LSM의 기본 형상을 나타낸다. 그림의 위쪽이 고정자, 아래쪽이 부상전자석(이동자)이다. 고정자는 자기부상열차의 선로가 되므로 제작성과 건설비를 고려하여 그림과 같이 단순한 형태로 설계한다. 반면, 부상전자석은 차량에 장착되므로 중량을 최대한 줄이기 위해 다양한 형태로 설계하지만, 기초 설계 단계에서는 그림과 같이 아주 단순한 형태로 부상전자석을 설계한다. 부상전자석은 자기부상열차가 정지 상태에 있을 경우 차량의 부상 역할만 담당하고, 운행 상태에 있을 경우 부상 역할과 함께 LSM의 이동자 역할도 한다. 따라서 본 보고서에서는 부상전자석과 이동자를 혼용하여 사용한다.

[그림 2.5.10]은 LSM 2개의 극만 나타내고 있는데, 차량의 중량 및 길이가 증가하게 되면 이러한 2극 형상이 반복되면서 극수가 증가한다. 한편, 자기부상열차용 LSM의 고정자 권선은 제작성 및 비용을 고려하여 극당 상당 슬롯수를 1로 설계한다. 따라서 3상 고정자 권선 레이아웃은 [그림 2.5.10]과 같다.

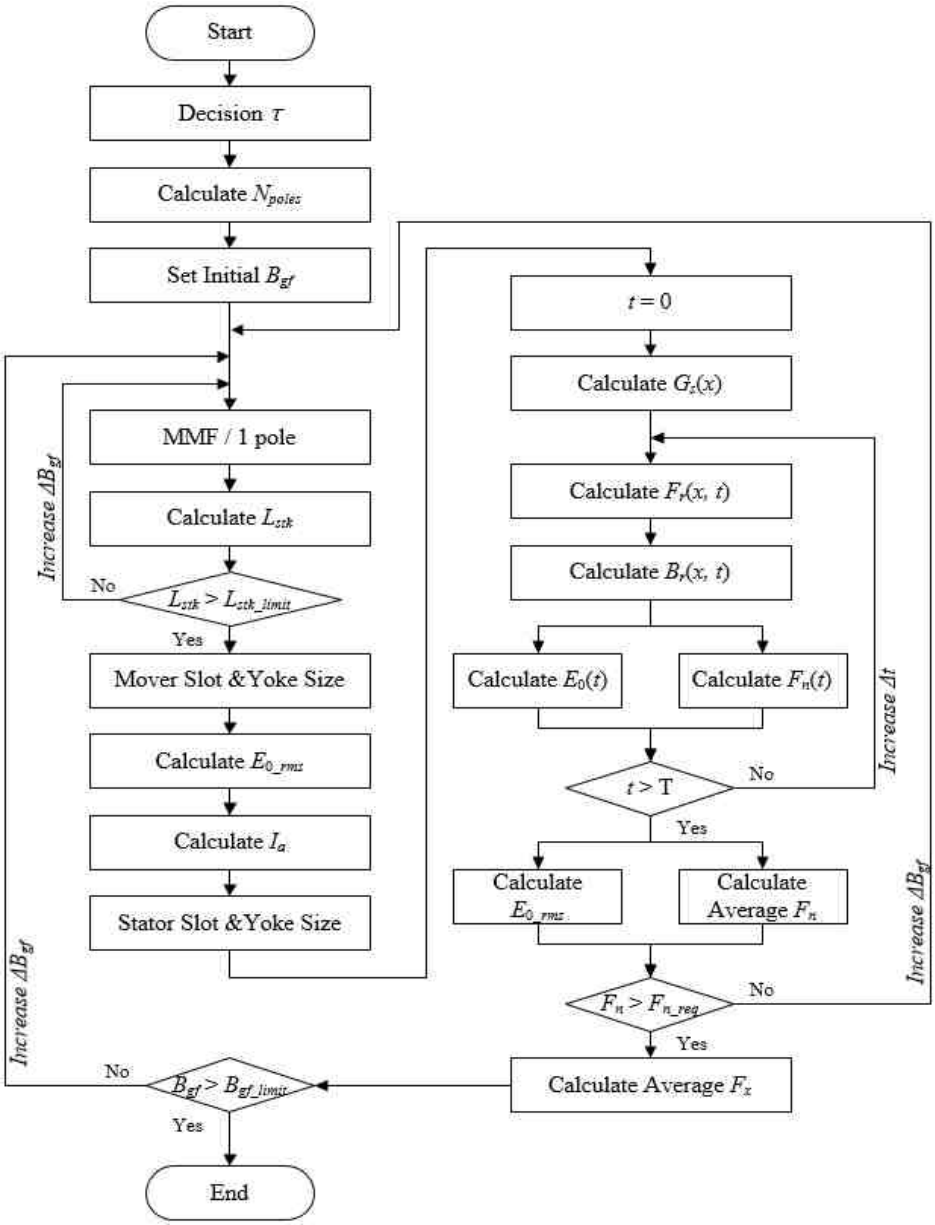


[그림 2.5.10] 자기부상열차용 LSM 기본 형상

[그림 2.5.11]은 자기부상열차용 LSM의 설계 플로우를 나타낸다. 일반적으로 회전형 전동기를 설계할 때는 동일한 용량에 대하여 전기장하와 자기장하를 어떻게 분배

하느냐에 따라 전동기의 사이즈가 결정되며, 대부분 사이즈가 최소가 되도록 설계한다. 반면에 EMS형 자기부상열차용 LSM은 전기장하가 없는 상태에서 오직 자기장하로만 차량을 부상시켜야 하므로 자기장하가 결정된 상태에서 설계를 해야 한다. 따라서 설계 과정이 회전형 전동기 설계에 비해 간단한 편이지만, 상대적으로 큰 공극과 큰 폭의 개방 슬롯을 갖기 때문에 기존 설계 방식으로는 설계 오차가 크게 발생한다. 이러한 설계 오차는 기초 설계 단계에서 많은 시행 착오를 발생시키며, 설계 기간을 증가시킨다. 이러한 설계 오차를 줄이기 위해 LSM의 슬롯 고조파를 고려하여 한 주기의 역기전력 파형과 부상력 파형을 해석적으로 계산하는 루틴을 설계 플로우 상에 포함시켰다.

한편, 자기부상열차용 LSM의 고정자는 선로가 되므로 건설비 저감을 위해, 이동자는 차량에 장착되므로 경량화를 위해 사이즈 저감이 필요하다. 자기부상열차의 선로 길이와 차량 길이는 주어지므로 LSM의 사이즈 저감을 위해서는 적층길이를 줄이는 설계가 필요하다. 그러나 일방적인 적층길이의 감소는 LSM의 부상력 감소로 이어지며, 이를 보상하기 위해 이동자의 계자 기자력을 높여 공극 자속밀도를 증가시킨다. 공극 자속밀도의 증가는 철심의 자속 포화를 발생시켜 LSM의 성능 저하를 야기한다. 따라서 자속 포화를 고려하여 LSM의 최소 적층길이를 구하도록 설계 플로우를 구성하였다.



[그림 2.5.11] LSM 설계 플로우

(가) 극 피치 결정

LSM 설계에 있어서의 극 피치의 결정은 회전형 전동기 설계에서의 극 수 선택에 해당한다. 회전형 전동기에서 극 수는 전동기의 회전속도와 전력변환기의 스위칭 주파수를 고려하여 선택한다. 마찬가지로 LSM에서는 극 피치를 열차의 주행속도와 전력변환기의 스위칭 주파수를 고려하여 선택해야 한다. 즉, 자기부상열차의 최대 속도가 $v_{\max}$,전력변환기의 최대 출력 주파수가 $f_{\max}$라면, LSM의 극 피치는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau \geq \frac{v_{\max}}{2f_{\max}}$$

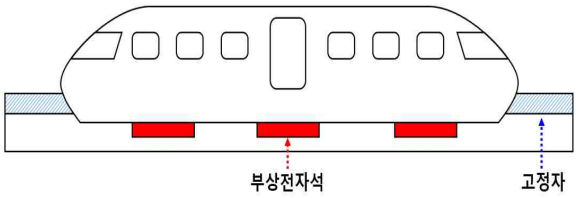
이렇게 극 피치를 결정하는 것으로부터 자기부상열차용 LSM의 설계가 시작된다.

(나) 극 수 산정

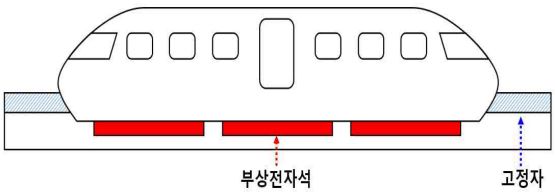
자기부상열차용 LSM의 이동자는 차량의 추진뿐만 아니라 차량을 들어 올리는 부상전자석 역할도 함께 한다. 이러한 부상전자석은 차량의 중량을 분산시키기 위해 [그림 2.5.12]의 (b)와 같이 최대한 길게 설계하는 것이 유리하다. 따라서 극 피치 τ가 결정되었다면 최대한 많은 극을 사용하여 부상전자석의 길이를 길게 설계한다. 주어진 차량의 길이 내에서 부상전자석 전체 길이의 제한 L_{mover}가 결정되면, LSM 이동자의 극 수 N_{poles}를 아래 식를 통해 계산할 수 있다.

$$N_{poles} \leq N_{poles\_\max} = \frac{2}{N_{md}}\left(\frac{2}{3}+\frac{N_{mover}}{\tau}\right)-2$$

여기서 N_{md}는 부상전자석 모듈 수를 의미하며, 그림 2.5.12의 경우, 한 사이드에 3개의 부상전자석을 가지므로 양 사이드에는 총 6개의 부상전자석을 갖게 되어 N_{md}는 6이 된다.



(a)



(b)

[그림 2.5.12] 자기부상열차의 부상전자석

(다) 극당 기자력 계산

LSM 부상전자석 1 모듈의 부상력 F_n은 아래 식으로 구할 수 있다.

$$F_n = \frac{B_{gf}^2 \alpha_p \tau L_{stk}}{2\mu_0} N_{poles}$$

여기서 α_p는 극 피치 τ 에 대한 극 폭 τ_{p2}의 비율로 아래 식으로 나타낼 수 있으며, 이동자의 극 형상은 슈(shoe)가 없는 돌극 구조인 경우 0.4 ~ 0.7 범위에서 결정한다.

$$\alpha_p = \frac{\tau_{p2}}{\tau}$$

한편, 부상력 F_n을 표현한 윗 식에서 L_{stk}은 LSM 고정자와 부상전자석의 적층길이를 의미한다.

앞서 LSM 부상전자석의 극 피치 τ와 극 수 N_{poles}를 결정하였기 때문에 계자에 의한 공극자속밀도 B_{gf}의 크기를 얼마로 결정하느냐에 따라 부상전자석과 고정자의 적층길이 L_{stk}이 계산된다. 계자에 의한 공극자속밀도 B_{gf}는 다음 아래 식과 같이 공극 비퍼미언스와 이동자 기자력의 곱으로 계산할 수 있다.

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

여기서, μ_0는 진공의 투자율, g'는 유효공극길이, k_{sat}는 포화 계수, N_f는 계자 한 극당 턴 수, I_f는 계자 전류를 의미한다. 또한, 유효공극길이 g'은 카터 계수 k_{cart}를 도입하여 다음과 같이 쓸 수 있으며,

$$g' = k_{cart} g$$

카터 계수 k_{cart}는 다음 식으로 구할 수 있다.

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

B_{gf}를 결정하면 계자의 기자력 $N_f I_f$를 식 공극자속밀도 B_{gf}를 변형하여 다음과 같이 구할 수 있다.

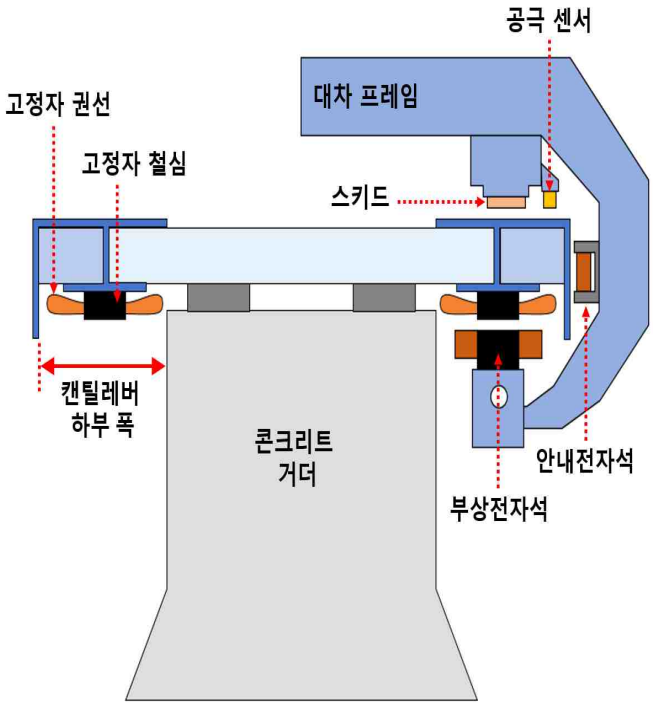
$$N_f I_f = \frac{g'(1+k_{sat}) B_{gf}}{\mu_0}$$

이렇게 계산된 기자력에서 N_f와 I_f를 권선의 제작성을 고려하여 적당히 분배한다. 계자의 기자력 $N_f I_f$가 정해지면 적층길이 L_{stk}은 다음 식으로 구할 수 있다.

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

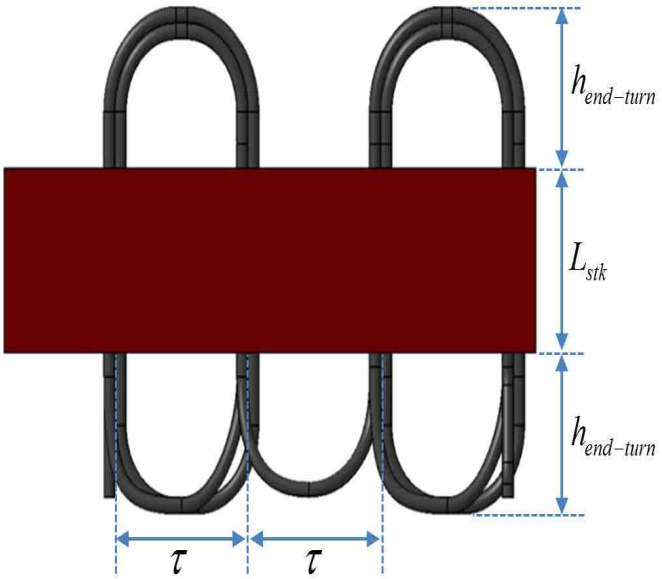
자기부상열차용 LSM에서 고정자가 곧 선로가 되기 때문에 수 십 km 이상의 노선 건설이 필요한 초고속 자기부상열차의 경우 적층길이 L_{stk}을 작게 할수록 많은 건설 비용을 저감할 수 있다. 부상력 F_n식을 통해 알 수 있듯이 L_{stk}은 B_{gf}^2에 반비례하므로 L_{stk}을 줄이려면 B_{gf}를 높이면 된다. 그러나 LSM의 고정자와 이동자의 철심은 포화 특성을 가지므로 B_{gf}가 너무 높으면 시스템의 효율이 감소하므로 적당한 수준에서 결정을 해야한다. 이러한 B_{gf}의 결정은 많은 설계 경험을 필요로 하므로 그림 2.5.11의 설계 플로우 상에서 피드백을 통해 자동으로 결정되도록 하였다. 또한, B_{gf}와 $N_f I_f$는 비례 관계에 있으므로, [그림 2.5.11]의 설계 플로우 상의 $\triangle B_{gf}$ 대신 $\triangle N_f$이나 $\triangle I_f$로 변경해도 설계 결과는 동일하다.

[그림 2.5.11]의 설계 플로우 상에서 L_{stk}는 적층길이 제한치를 의미하며 그림 2.5.13의 캔틸레버 하부 폭과 고정자 권선의 엔드턴 높이를 고려하여 결정한다. 그림 2.5.14은 슬롯당 4턴의 고정자 권선을 갖는 LSM의 고정자 치수를 나타낸다. 적층길이가 L_{stk} , 엔드턴 높이가 $h_{end-turn}$ 일 때, 권선을 포함한 고정자의 전체 폭은 $L_{stk} + 2h_{end-turn}$가 되며, 이것은 [그림 2.5.13]의 캔틸레버 하부 폭보다 작아야 한다. 따라서 캔틸레버 하부 폭이 W_{cant}라면, $L_{stk_\lim}$의 결정 조건은 [그림 2.5.13] 아래의 수식과 같다.



[그림 2.5.13] 가이드웨이 단면

$$L_{stk\_\lim} \leq W_{cant} - 2h_{end-turn}$$

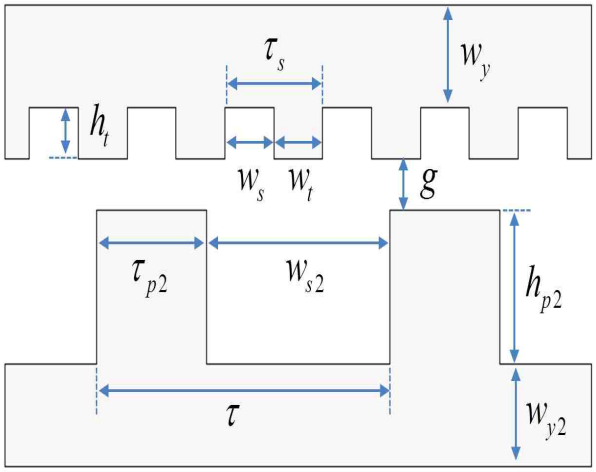


[그림 2.5.14] LSM 고정자 권선의 치수

(라) 부상전자석 형상 설계

자기부상열차용 LSM의 기본 형상과 치수 기호를 [그림 2.5.15]에 나타내었다. 그

림의 상단이 고정자, 하단이 2극의 부상전자석에 해당한다. LSM의 극수가 늘어나면 그림과 같은 형상이 극쌍수만큼 반복된다.



[그림 2.5.15] LSM 기본 형상 및 치수

공극길이 g가 작을수록 더 적은 전력으로 차량을 부상시킬 수 있으나, 정밀한 부상제어가 요구되며 시스템의 신뢰성이 저하되는 문제가 있다. 자기부상열차는 일반적으로 10mm 내외의 공극 길이를 갖는다.

앞 항에서 이동자의 계자 기자력 $N_f I_f$가 계산되었으므로 부상전자석의 슬롯 면적 A_{s2}를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$A_{s2} = \frac{2N_f I_f}{k_{sf2} J_2}$$

여기서 k_{sf2}는 부상전자석의 슬롯 점적률을, J_2는 계자 권선의 전류밀도를 각각 의미한다.

부상전자석의 슬롯 폭은 다음 식으로 구한다.

$$W_{s2} = \tau - \tau_{p2}$$

여기서 τ_{p2}는 극 폭을 나타내며, 식은 다음과 같이 쓸 수도 있다.

$$W_{s2} = \tau(1 - \alpha_p)$$

부상전자석의 슬롯 높이는 슬롯 면적을 슬롯 폭으로 나눠서 구한다.

$$h_{p2} = \frac{A_{s2}}{w_{s2}}$$

요크 두께 w_{y2}는 극 폭 τ_{p2}의 절반 정도를 취해주면 적당하다.

$$w_{y2} = \frac{1}{2}\tau_{p2}$$

(마) 고정자 형상 설계

자기부상열차용 LSM의 고정자 형상 설계는 정격속도 v_b에서 LSM의 무부하 역기전력 E_0를 구하면서 시작된다. [그림 2.5.11]의 설계플로우 상에서 E_0는 한 주기 동안의 공극 자속밀도 파형을 모두 계산하여 구하지만, 초기값은 아래 식을 통해 근사적으로 계산한다.

$$E_0 = \pi\sqrt{2}\, N_c k_w \Phi_p f_b$$

여기서, $N_c = Z_c p$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_p는 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.

$$f_b = \frac{v_b}{2\tau}$$

정격 속도 v_b에서의 무부하 역기전력 E_0를 구했으면, 요구 추력 F_x를 내기위해 필요한 상전류 I_a를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$I_a = \frac{F_x v_b}{3E_0}$$

한편, 고정자의 슬롯 면적은 다음 식으로 구한다.

$$A_{s1} = \frac{Z_c I_a}{k_{sf} J_1}$$

여기서 k_{sf}는 고정자 슬롯의 점적률을, J_1은 고정자 권선의 전류밀도를 각각 의미한다.

고정자 슬롯에는 권선이 1턴 또는 4턴이 들어가며, 슬롯 형상은 [그림 2.5.15]와 같이 슬롯 쐐기를 제외한 슬롯 높이와 슬롯 폭이 거의 동일한 정사각형이 된다. 따라서 슬롯 폭 w_s는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$w_s \geq \sqrt{A_{s1}}$$

슬롯 높이는 슬롯 폭에 슬롯 쐐기를 설치할 공간을 고려하여 결정하면 된다. 대략 슬롯 높이의 25% 정도로 결정하면 적당하다. 따라서 슬롯 높이 h_s는

$$h_s = 1.25 w_s$$

극당 슬롯 수가 3이므로 슬롯 피치 τ_s는

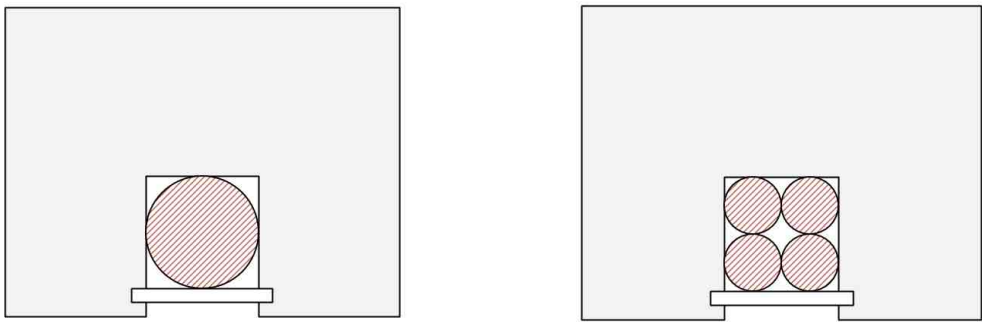
$$\tau_s = \frac{\tau}{3}$$

따라서 치 폭 w_t는

$$w_t = \tau_s - w_s$$

마지막으로 고정자 요크 폭 w_y는 다음 식으로 구한다.

$$w_y = \frac{3}{2} w_s$$



(a) 1턴 (b) 4턴

[그림 2.5.16] 고정자 슬롯 형상

(바) 단거리 시험선 LSM 설계

본 연구의 단거리 시험선은 본래 550km/h급의 초고속 자기부상열차의 연구 개발을 위해 기획되었다. 따라서 LSM의 극 피치 τ를 차량의 최대 속도가 550km/h라고 가정하고 240mm로 결정하였다. LSM의 공극길이 g는 10mm로 결정하였다. 차량 길이와 설치 여유 공간을 고려하여 이동자 총 길이 제한 L_{mover}는 9.5m로 설정하였다. 극 피치가 240mm이고, 부상전자석 모듈이 총 6개이므로 부상전자석 1모듈당 허용 가능한 최대 극 수는 최대 극수 식 에 의해 11개가 된다. 회전형 전동기의 경우 11극과 같은 홀수 극은 설계가 불가능하지만, 선형 전동기는 구조적으로 가능하므로 극 수를 11극 그대로 설계하였다.

단거리 시험선은 선로가 짧기 때문에, 자기부상열차의 최대속도는 28.8km/h로 매우 저속이다. 따라서 고정자 권선을 슬롯당 1턴으로 설계할 경우, LSM의 속도 기전력이 매우 작아 저전압 대전류의 전력을 필요로 할 것이다. 반면 4턴으로 설계할 경우에는 속도 기전력이 4배가 증가하여 1턴 설계 모델에 비해 4배의 전압과 1/4배의 전류를 필요로 할 것이다. 따라서 단거리 시험선에서는 전력변환장치의 효율적 사용을 위해 고정자 권선을 슬롯당 4턴으로 결정하였다. 따라서 슬롯당 도체수 Z_c는 4가 된다.

LSM 이동자의 극당 턴수는 편의상 400턴으로 고정하고 설계를 진행하였다. 차량의 정격속도를 운행 최대속도인 28.8km/h로 설정하였으며, 이동자의 슬롯 점적률 k_{sf2}는 0.5, 계자 권선의 전류밀도 J_2는 $2A/mm^2$를 적용하였다. 또한, 고정자의 슬롯 점적률 k_{sf1}은 0.3, 고정자 권선의 전류밀도 J_1는 $4A/mm^2$을 적용하였다.

이동자의 극호율 α_p는 0.42로 설정하였으며, 극 피치가 240mm이므로 극호율 0.42를 적용하면 극 폭 τ_{p2}는 100mm가 된다.

설계 플로우 상에서 $\triangle t$는 0.5ms로, $\triangle B_{gf}$는 0.01T로 각각 설정하였다. 이렇게 초기 설정 값을 지정한 상태에서 계자에 의한 공극 자속밀도 B_{gf}에 따른 설계 결과를

[표 2.5.1]에 나타내었다. [표 2.5.1]을 통해 알 수 있듯이 공극자속밀도가 증가함에 따라 적층길이가 감소하였으며, 이에 따라 부상전자석의 중량도 함께 감소하였다. 그러나 적층길이가 감소함에 따라 요구 부상력을 만족시키기 위해 더 많은 계자 전류를 필요로 하며, 무부하 역기전력도 감소하여 요구 추력을 만족시키기 위해 더 많은 상전류를 필요로 한다. 그리고 공극 자속밀도의 증가로 계자 및 고정자 치의 포화가 예상된다. 따라서 공극 자속밀도 최대값의 제한치를 0.86T로 결정하여 적층길이 220mm로 설계하였다. 이렇게 설계된 단거리 시험선 LSM 기본 모델의 최종 설계 치수를 [표 2.5.2]에 나타냈으며, [그림 2.5.17]에 부상전자석 1모듈에 대한 기본 모델 형상을 나타내었다.

[표 2.5.1] 단거리 시험선 LSM 설계 결과

Bgf [T]	적층 길이 [mm]	계자 전류 [A]	부상 력 [kN]	Bg max [T]	상전 류 [A]	역기 전력 [V]	상저 항 [Ω]	전자 석 중 량 [kg]	역률	효율	계자 슬롯 높이 [mm]
0.5	340	12.9	44.48	0.67	328	125	0.41	847	0.748	0.473	84
0.51	329	13.2	45.07	0.68	331	124	0.40	825	0.754	0.473	85
0.52	318	13.4	44.89	0.70	338	122	0.39	803	0.752	0.473	86
0.53	308	13.7	44.62	0.70	345	119	0.38	776	0.759	0.472	88
0.54	299	14	45.23	0.71	348	118	0.37	759	0.757	0.472	89
0.55	290	14.2	45.13	0.73	353	116	0.37	741	0.762	0.472	90
0.56	281	14.5	45.60	0.74	357	115	0.35	726	0.760	0.471	92
0.57	273	14.7	45.53	0.75	363	113	0.35	710	0.765	0.471	93
0.58	266	15	45.21	0.78	369	111	0.34	688	0.764	0.471	94
0.59	258	15.3	45.63	0.80	373	110	0.34	672	0.769	0.470	95
0.6	251	15.5	45.56	0.81	378	109	0.33	661	0.767	0.470	97
0.61	244	15.8	46.02	0.82	382	108	0.32	647	0.772	0.469	98
0.62	238	16	46.03	0.83	386	106	0.31	636	0.769	0.469	99
0.63	232	16.3	45.68	0.83	394	104	0.31	616	0.775	0.468	100
0.64	226	16.6	46.15	0.85	397	103	0.31	607	0.779	0.468	102
0.65	220	16.8	46.02	0.86	403	102	0.30	595	0.777	0.467	103
0.66	215	17.1	46.59	0.87	405	101	0.30	586	0.781	0.467	104
0.67	210	17.3	46.58	0.88	410	100	0.29	576	0.779	0.466	105
0.68	205	17.6	46.01	0.92	418	98	0.29	561	0.784	0.465	107
0.69	200	17.8	45.91	0.93	423	97	0.28	552	0.782	0.465	108
0.7	195	18.1	46.28	0.94	427	96	0.28	542	0.786	0.464	109
0.71	191	18.4	46.85	0.96	429	96	0.27	535	0.784	0.463	110
0.72	187	18.6	46.87	0.97	433	95	0.27	527	0.788	0.463	111
0.73	183	18.9	47.36	0.98	436	94	0.27	520	0.791	0.462	112
0.74	179	19.1	46.37	0.98	446	92	0.26	508	0.790	0.462	114
0.75	175	19.4	46.77	0.99	449	91	0.26	500	0.794	0.461	115
0.76	171	19.7	47.13	1.01	453	91	0.25	492	0.792	0.460	116
0.77	168	19.9	47.24	1.02	456	90	0.25	487	0.795	0.460	117
0.78	165	20.2	47.81	1.03	458	90	0.25	482	0.798	0.459	118
0.79	161	20.4	47.58	1.04	465	88	0.25	475	0.796	0.458	120
0.8	158	20.7	46.95	1.08	472	87	0.24	464	0.800	0.457	121

[표 2.5.2] 단거리 시험선 LSM 기본 모델의 설계 치수

항목	기호	사양	항목	기호	사양
공극길이	g	10mm	적층길이	L_{stk}	220mm
고정자 슬롯 피치	τ_s	80mm	극 피치	τ	240mm
고정자 치 폭	w_t	40mm	이동자 극 폭	τ_{p2}	100mm
고정자 슬롯 폭	w_s	40mm	이동자 슬롯 폭	w_{s2}	140mm
고정자 슬롯 높이	h_s	50mm	이동자 슬롯 높이	h_{p2}	103mm
고정자 요크 폭	w_y	80mm	이동자 요크 폭	w_{y2}	50mm



[그림 2.5.17] 단거리 시험선 LSM 기본 설계 모델

5. 기술개발 결과 및 검증

가. 선형 동기전동기 기초 설계 및 최적화 설계(1차년도)

(1) 선형 동기전동기 기초 설계

(가) LSM 부하 산정

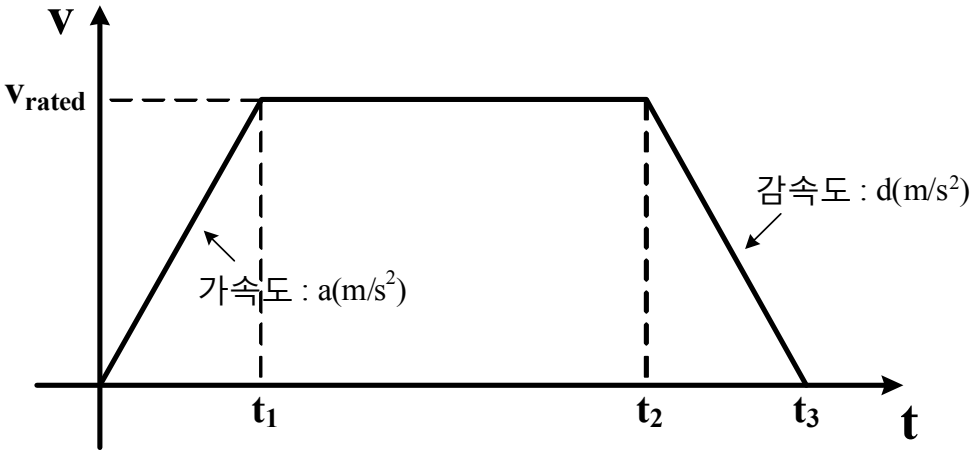
LSM이 받게 될 부하를 산정하기 전 주요 설계사양은 다음 [표 2.5.3]과 같다.

[표 2.5.3] LSM 주요 설계사양

주행로 길이	150 [m]
가속도	1.1 [m/s^2]
감속도	-1.1 [m/s^2]
주행체 길이	12 [m]
차량중량 (주행체 Load)	1량 22 [ton]
주행속도	28.8 [km/h]

① 주행 시간 및 거리 산정

[그림 2.5.18]과 같이 속도-시간 프로파일이 정해져 있다고 가정하면,



[그림 2.5.18] 속도 시간 곡선

주어진 가속도 a와 최고속도에 의하여 가속 시간 t_1은

$$a = \frac{v - v_o}{t_1} = \frac{28.8}{t_1 \times 3.6} = 1.1\,[m/s^2]$$

$$t_1 = \frac{28.8}{1.1 \times 3.6} \fallingdotseq 7.3 \ [\text{sec}]$$

따라서 가속거리는

$$S_1 = \frac{1}{2}at_1^2 + v_o t_1 = \frac{1}{2}at_1^2 = \frac{1}{2} \times 1.1 \times 7.3^2 = 29.3 \ [\text{m}]$$

주어진 감속도 d와 최고속도에 의하여 감속 시간 t_3는

$$d = \frac{v - v_o}{t_3} = \frac{-28.8/3.6}{t_3} = -1.1\,[m/s^2]$$

$$t_3 = \frac{28.8}{1.1 \times 3.6} = 7.3 \ [\text{sec}]$$

따라서 감속거리는

$$S_3 = \frac{1}{2} \times 1.1 \times 7.3^2 = 29.3 \ [\text{m}]$$

총 주행거리는 150[m]이므로 정속거리는

$$S_2 = 150 - 2 \times 29.3 = 91.4 \ [\text{m}]$$

따라서 정속거리 주행시간 t_2는

$$t_2 = \frac{S_2 \times 3.6}{v} = \frac{91.4 \times 3.6}{28.8} = 11.4 \ [\text{sec}]$$

따라서 총 주행시간은

$$t = t_1 + t_2 + t_3 = 7.3 + 11.4 + 7.3 = 26 \ [\text{sec}]$$

② 기동인장력 산정

자기부상열차 1량 1편성의 시험 모델의 경우 차량 총 중량은 22[ton]으로 주어졌으나, 시속 550km로 달리기 위한 실제 모델의 경우 차량 총 중량은 W=188.5[ton]이 될 것으로 추정된다. 따라서 차량 기동 가속도 a와 차량 총 중량 W=188.5[ton]을 적용하면 다음과 같다.

$$T_E = 28.35 \times W \times 1.05 \times a$$

여기서, 기동 가속도 $a \fallingdotseq 0.9[\mathrm{m/s^2}] \fallingdotseq 3.25[\mathrm{km/h/sec}]$ 이므로

$$\therefore T_E = 28.35 \times 188.5 \times 1.05 \times 3.24$$
$$= 18{,}180[\mathrm{kgf}]$$
$$= 18{,}180[\mathrm{kgf}] \times 9.8[\mathrm{N}]$$
$$= 178.16[\mathrm{kN}] \fallingdotseq 178[\mathrm{kN}]$$

따라서 178[kN] 이상의 견인력이 확보되면 차량을 기동할 수 있게 된다.

③ 주행저항 산정

자기부상 LSM의 경우 공기역학 저항, 자기적 저항, 선형발전에 의한 저항이 추가로 고려되어야 한다.

▶ Aerodynamic drag force (F_A)

▶ Magnetic drag force (F_M)

▶ Linear generating drag force (F_B)

$$F_A = 2.8 \times v^2 \times (0.265 \times N + 0.3) \times 10^{-3} \ [\mathrm{kN}]$$

$$F_M = N \times (0.1 \times \sqrt{v} + 0.02 \times v^{0.7}) \ [\mathrm{kN}]$$

$$F_B = 0 \ [\mathrm{kN}] \qquad (0 \sim 20\mathrm{km/h})$$
$$= N \times 7.3 \ [\mathrm{kN}] \qquad (20 \sim 70\mathrm{km/h})$$
$$= N \times \left(\frac{146}{v} - 0.2\right) \ [\mathrm{kN}] \qquad (70 \sim 550\mathrm{km/h})$$

여기서, v: 열차 속도 [m/s]

N: 열차 1편성당 차량의 수

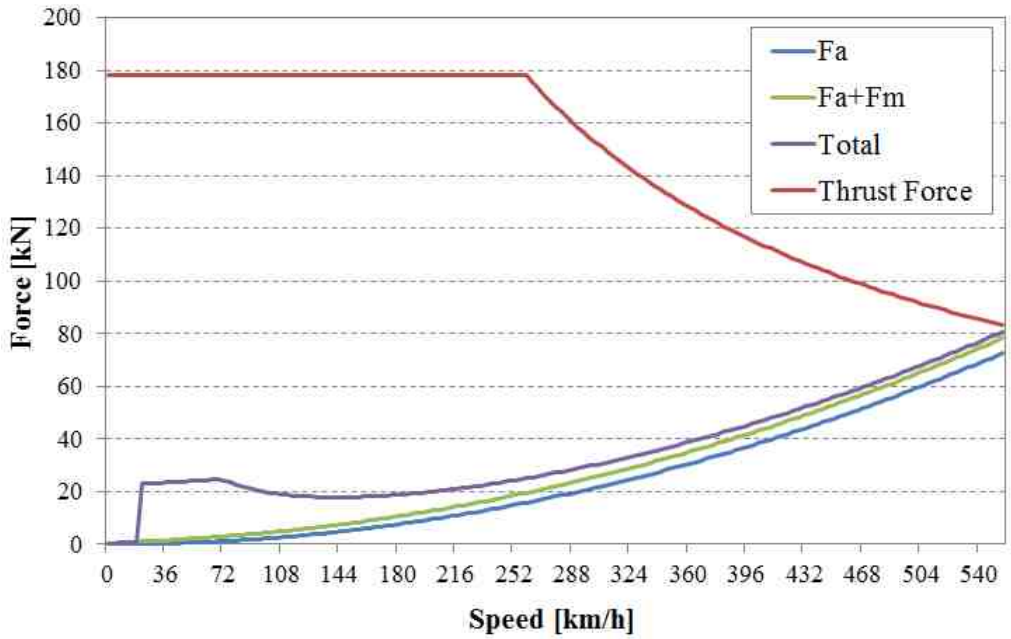
$$F_A[kN] = 2.8 \times (550/3.6)^2 \times (0.265 \times 3 + 0.3) \times 10^{-3}$$
$$= 71.56[kN]$$

$$F_M[kN] = 3 \times (0.1 \times \sqrt{(550/3.6)} + 0.02 \times (550/3.6)^{0.7})$$
$$= 5.74[kN]$$

$$F_B[kN] = 3 \times (\frac{3.6 \times 146}{550} - 0.2) \qquad (70\sim550 \text{ km/h})$$
$$= 2.27[kN]$$

$$\therefore F_{Drag-total} = F_A + F_M + F_B = 79.6 \text{ [kN]} \quad (\text{최대 속도 } 550 \text{ km/h에서})$$

차량의 550[km/h] 주행 시 79.6[kN]의 주행저항이 발생되므로, 79.6[kN] 이상의 견인력이 확보되어야 한다. 실제 차량이 550[km/h]로 주행할 때, 79.6[kN]의 주행저항이 발생되므로, 5[%]의 설계 마진을 고려하여 83.6[kN]의 견인력이 확보되어야 한다. 또한 550[km/h] 주행 시 83.6[kN]의 견인력 확보를 위하여 그 이상의 기동견인력이 확보되어야 한다.



[그림 2.5.19] 550km/h급 초고속 자기부상열차의 견인력 산정

여기서, 기동견인력은 T_E=178[kN]이고, 550[km/h]로 주행할 때 요구되는 견인력이 83.6[kN] 이므로

$$P_{const} = T_E \times \omega_r = 83.6[kN] \times 550[km/h]$$
$$= 178 \times \omega_r = 83.6 \times 550$$

$$\therefore \omega_r \fallingdotseq 258[km/h]$$

따라서 정격속도를 260[km/h]로 정하면 적당하다.
$\omega_r = 260[km/h]$이므로 최종 기동견인력은

$$\therefore T_E = \frac{83.6 \times 550}{260} \fallingdotseq 177[kN]$$

또한 이때의 기동가속도 a는

$$T_E = 28.35 \times 188.5 \times 1.05 \times 9.8 \times a[km/h/s] = 177 \times 1{,}000[N]$$

$$\therefore a = 3.22[km/h/s] = 0.894[m/s^2]$$

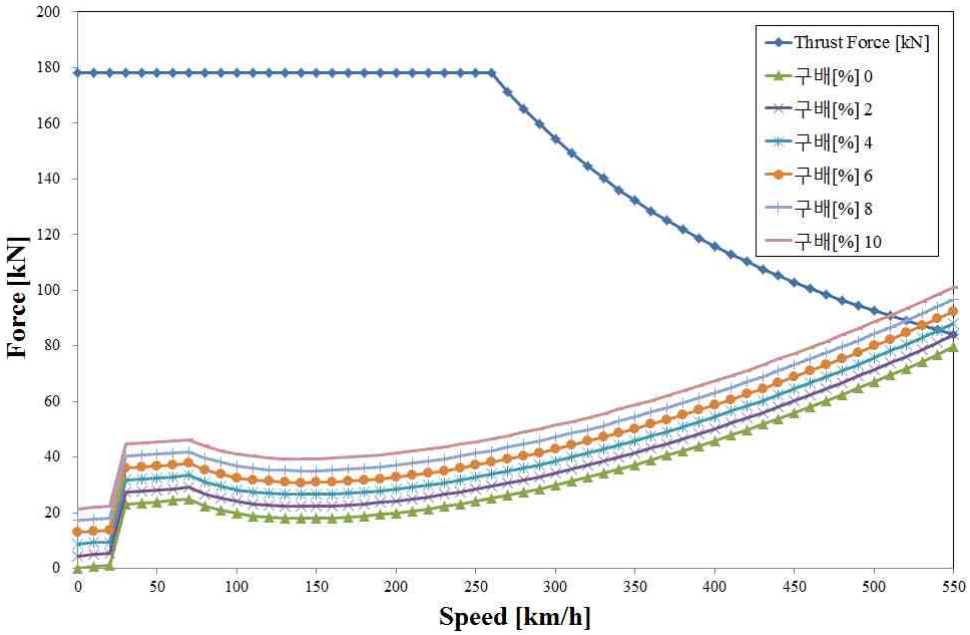
④ 구배저항의 고려

열차가 구배구간을 올라갈 때의 중력에 의한 저항을 구배저항이라 한다. 구배저항은 열차 중량과 구배의 경사에 비례하여 증감하고 그 값은 다음과 같다.

$$R_g = 1{,}000 \times W \cdot g \cdot \sin\theta[N]$$

$$\theta = \arctan(\text{구배}[\%] \times 0.01)$$

[그림 2.5.20]은 배의 경사에 따른 주행저항 곡선을 나타낸 그래프이다.



[그림 2.5.20] 자기부상열차의 구배 경사에 따른 주행저항 곡선

(다) LSM의 출력 도출

① 정격속도에서의 출력

T_{const}구간의 종단속도(rated speed: 260km/h)에서의 출력은 다음과 같다.

$$P_M[kW] = \frac{T_E[kgf] \times V[km/h]}{367.3} = \frac{177 \times \frac{1000}{9.8} \times 260}{367.3} \fallingdotseq 12.79[MW]$$

② 최대속도에서의 견인력 및 가속도

특성 구간의 종단속도(Max speed: 550km/h)에서의 견인력은 다음과 같다.

$$T_{\max,\, speed}[kgf] = \frac{P_M[kW] \times 367.3}{V[km/h]}$$

$$= \frac{12785 \times 367.3}{550} = 8535[kgf]$$

$$\therefore T_{\max,\, speed}[kgf] = 8537 \times 9.8 \fallingdotseq 83.67[kN]$$

이때의 가속도 $a_{\max,\, speed}$는

$$a_{\max,\ speed}[km/h/s] = \frac{\frac{83.67\times 1{,}000}{9.8} - \frac{79.6\times 1{,}000}{9.8}}{28.35\times 188.5}$$

$$= 0.0777[km/h/s] \fallingdotseq 0.0216[m/s^2]$$

③ 입력 전력의 계산

정격출력이 $P_{rated} = 12.79$[MW] 이므로

- LSM 1열의 경우 정격출력 : 6.4[MW]
- LSM의 효율을 85[%]라고 가정하면

입력 전력은

$$P_{input} = \frac{12.79}{0.85} \fallingdotseq 15.05[\text{MVA}]$$

(라) LSM 기초 설계

① 고정자 설계

극 피치와 공극 길이에 의해 누설 성분이 결정되므로 적절하게 선정하는 것이 중요하다.

$$f = \frac{1}{t} = \frac{1}{S/v} = \frac{1}{2\tau/v} = \frac{v}{2\tau}$$

$$2\tau f = v$$

일반적으로 3상의 전원(V_{L-Lrms})이 인가된다고 가정하면,

$$V_{DC} = \frac{3}{\pi}\sqrt{2}\ V_{L-Lrms}$$

인버터에서의 최대 출력 전압은 다음과 같다.

$$V_{inverter-\max} = V_{DC}\times\frac{\sqrt{6}}{\pi} \qquad \text{(구형파일 경우 최대)}$$

이에 따른 상전압의 크기는 다음과 같이 정해질 수 있다.

$$V_{ph} = V_t = \frac{1}{\sqrt{3}}\ V_{L-L}$$

LSM의 용량 산정은 전기장하와 자기장하를 결정하는 것으로 시작한다. LSM 용

량을 전기장하와 자기장하와 관련된 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S = \frac{kVA}{P} = K_0 A\phi f \times 10^{-3}$$

$$\frac{S}{f \times 10^{-2}} = K_0 (A \times 10^{-3})(\phi \times 10^{2})$$

$$\frac{S}{f} = K_0 \boldsymbol{A}\boldsymbol{\phi}$$

여기서,P : 극수

S : 극당 용량

A : Ampere-turns

$\boldsymbol{A}$: 전기장하

$\boldsymbol{\phi}$: 자기장하

본 연구에서는 전기 설계학에서의 경험적인 수치를 바탕으로 장하 분배 정수 및 자기 장하 값을 선정하도록 하겠다. 이에 대한 기준의 예를 [표 2.5.4]에 나타냈다. 향후 연구를 추가적으로 진행하면서 기준 자기장하 및 장하 분배 정수에 대한 고찰이 필요할 것이다.

[표 2.5.4] 기기별 장하분배정수 및 기준자기장하의 예

	장하분배정수 g	기준자기장하 j_0
동기기	1.5	(0.25~0.35)×10-2
유도기	1.3	
직류기	1.5	
변압기	1	

기준 자기장하와 자기장하의 비는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\chi = \frac{\boldsymbol{\phi}}{\boldsymbol{\phi_0}} = \left(\frac{S}{f \times 10^{-2}}\right)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}}$$

여기서, χ : 기준 자기장하와 자기장하의 비

γ : 장하분배정수

장하비를 선정하였으면, 이제 고정자의 상당 권선수를 선정할 것이다. 이 결과를 바탕으로 다시 기준 자기장하와 전기장하를 비교하여 반복하는 순으로 설계를 진행한다.

$$E = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{k_d k_p}{k_\phi} P N_{ph} \phi \frac{n}{60}$$

$$E \approx 2.1 N_{ph} \phi f$$

$$N_{ph} = \frac{V_{LL}/\sqrt{3}\,(\text{or}\;\; V_{ph})}{2.1 \times \phi \times f}$$

여기서, N_{ph} : 1상의 직렬턴수

k_d : 권선의 분포계수

k_p : 권선의 단절계수

k_ϕ : 권선의 자속분포계수

ϕ : 매극의 자속수

$n = \frac{120f}{P}$: 분당 회전수

[표 2.5.5]와 표 [2.5.6]에서 권선의 극당 상당 슬롯수에 따른 분포계수, 코일 피치에 따른 단절계수를 나타내고 있다.

[표 2.5.5] 분포계수

극당 상당 슬롯수 q	2	3	4	5	6	7	∞
분포계수 k_d	0.966	0.960	0.958	0.957	0.956	0.956	0.955

[표 2.5.6] 단절계수

코일 피치	17/18	14/15	11/12	8/9	13/15	5/6	12/15
단절계수 k_p	0.996	0.995	0.991	0.985	0.978	0.966	0.951

앞서 가정한 고정자의 전기장하와 자기장하를 다시 계산하여 비교를 통하여 재선정한다. 우선 단층권에 극당 상당 슬롯수 q를 가정하면 슬롯당 권선수를 계산할 수 있다. 슬롯당 권선수를 계산한 후 이를 다시 가까운 정수 값으로 산정한다. (여기에서 2층권으로 가정할 경우 슬롯당 권선수는 짝수로 선정한다.)

$$\frac{N_{ph}}{P \cdot q}$$

이와 같은 슬롯당 권선수를 토대로 다시 상당 권선수를 계산한 후 이를 토대로 하여 새로운 자기장하를 계산한다. 그리고 상당 권선수를 이용하여 극당 전기장하(암페어 도체수 AC)를 계산한다.

$$AC = \frac{3N_{ph}I}{P}$$

고정자 슬롯은 아래와 같은 방법을 통하여 계산을 수행한다.

$$\frac{b_s}{\tau_s} = \frac{slot\ width}{slot\ pitch} \approx 0.35 \sim 0.55$$

$$\tau_s = \frac{\tau \times P}{P \times m \times q}$$

$$\frac{h_s}{b_s} = \frac{slot\ height}{slot\ width} = 4 \sim 10$$

$$B_g = \frac{\phi}{b_s l_{pri}} = \frac{\phi}{\tau \alpha_s l_{pri}} \Rightarrow l_{pri} = \frac{\phi}{\tau \alpha_s B_g}$$

$$A_{slot} = \frac{6 \times N_{ph} \times I_n}{N_s \times K_{fill\_arm} \times j_{\cos\_arm}}$$

여기서, B_g : 자기비장하

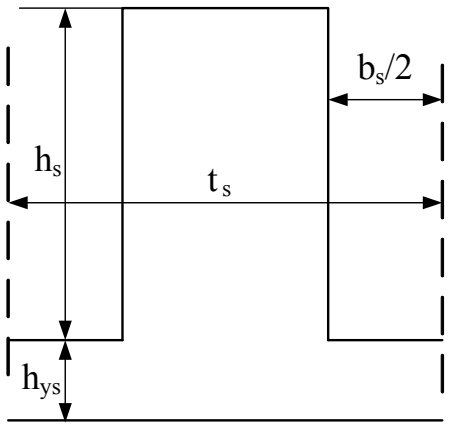
A_{slot} : 슬롯 넓이

K_{fill_arm} : 전기자 권선의 점적률

$j_{\cos\_arm}$: 전기자 권선의 전류 밀도

[표 2.5.7] 용량 및 전압에 따른 전기비장하와 자기비장하

	소형	중형		대형
	저압	저압	고압	고압
전기비장하 ac(AC/m)	15,000 ~ 30,000	30,000 ~ 55,000	25,000 ~ 55,000	45,000 ~ 80,000
자기비장하 B_g(T)	0.6 ~ 0.8	0.7 ~ 0.9	0.7 ~ 0.9	0.7 ~ 0.9



[그림 2.5.21] 고정자 치의 각 부분별 치수

위에서 고정자 슬롯의 폭과 높이를 정할 수 있고, 아래에서 요크의 높이를 계산할 수 있다.

$$h \approx \frac{B_g}{B_{y1}} \bullet \frac{\tau}{\pi} \quad (B_{y1} = 1.3 \sim 1.7)$$

여기서 고정자 코일은 일반적으로 open slot의 형태를 사용하므로 고정자 코일이

탈출하지 않도록 고정하기 위한 쐐기의 높이를 가정한다.

$$h_{s\_wed} = 0.005 \ [\mathrm{m}]$$

따라서 고정자의 높이는 아래와 같이 설계할 수 있다.

$$h_{s\_total} = h_s + h_{ys} + h_{s\_wed}$$

② 계자 설계

계자의 설계는 다음과 같은 절차로 진행된다. 우선 극 피치당 극 슈(pole shoe)를 가정한다.

$$\alpha_i = \frac{b_p}{\tau} \approx \ 0.66 \ \sim \ 0.75$$

즉, 한 극에 대하여 공극에 맞닿는 계자극의 면적이 극 피치에 대하여 2/3~3/4 정도 되도록 선정한다는 것이다. 또한 고정자의 슬롯 피치와 극 슈의 비는 고정자 슬롯에 의해 발생하는 역기전력의 맥동을 줄이기 위하여 5.5 이상으로 설계하는 것이 일반적이다.

$$\frac{b_p}{\tau_s} > 5.5$$

이를 계산하기 위해서는 고정자 슬롯 피치와 극 슈의 비 또는 극 피치당 극 슈의 비 중 하나의 값을 가정하여야 한다. 또한 계자의 슈의 높이를 설정함에 있어서 극피치에 비례하여 증가하도록 선정한다.

$$\frac{h_{pri\_shoe}}{\tau} \approx 0.1 \ \text{ for } \tau = 0.3m$$
$$0.2 \ \text{ for } \tau = 0.1m$$

위의 값을 토대로 하여 적정한 값을 선정하여 슈의 높이를 선정한다.
또한 계자 치의 높이는 극 피치와의 비를 통해 설계한다.

$$K_h = \frac{h_p}{\tau}$$

위의 값은 τ가 0.4m일 때 약 0.3의 값을 갖고, τ가 1m일 때 0.1의 값을 갖도록 설계한다. 적절한 값의 선정이 요구되는 항목이다. 그리고 K_h의 값은 극 피치가 감소할 때 증가하고, 평균 공극 자속이 증가할 때 감소한다.

계자의 치 폭은 치의 포화를 고려하여 극 피치에 대하여 일정 비율로 선정한다.

$$W_p \approx (0.45-0.55) \bullet \tau$$

계자의 코일을 감기 위한 폭은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$W_c = \frac{b_p - W_p}{2}$$

극당 계자 코일의 암페어 턴은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$W_F I_{Fn} = j_{\cos\_field} \times W_c \times h_p \times K_{fill\_field}$$

여기서, W_F : 계자 권선수

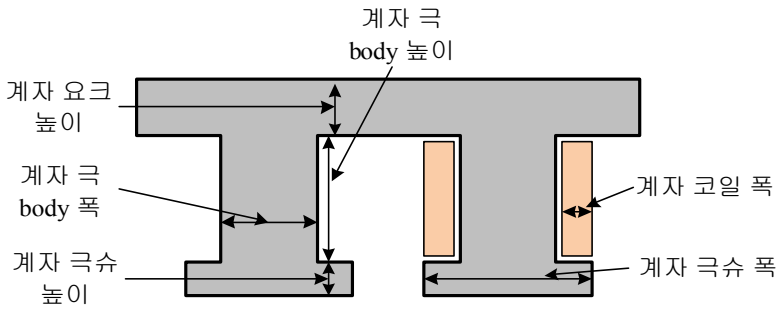
I_{Fn} : 정격 계자전류

$j_{\cos\_field}$: 계자권선의 정격 전류 밀도

K_{fill_field} : 계자권선의 점적률

그리고 계자 요크의 길이는 누설자속을 고려하여 치에 흐르는 자속보다 10~15% 증가된 자속이 흐를 수 있도록 설계한다.

$$h_{yr} \approx \frac{B_g}{B_{yr}} \bullet \frac{\tau}{\pi}(1+K_{peak})$$

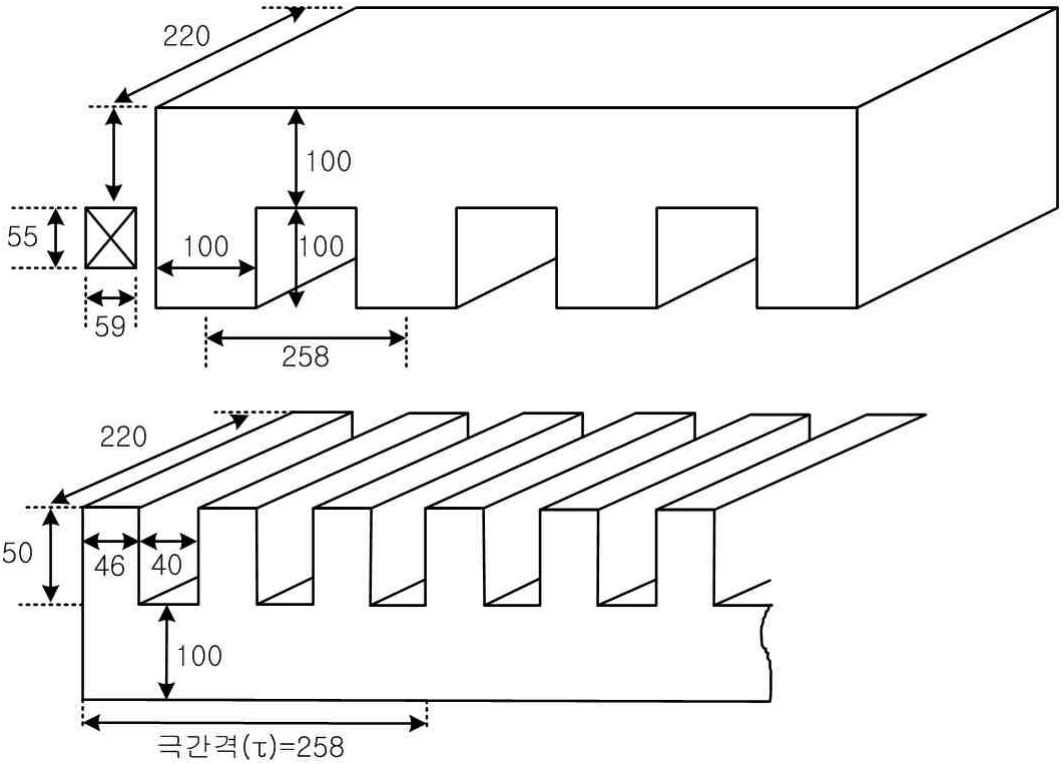


[그림 2.5.22] 계자 설계 파라미터

③ 기초설계 결과

최대속도 550km/h의 자기부상열차용 LSM을 설계한 결과, [그림 2.5.23]과 같은 사이즈의 기초설계 모델을 얻을 수 있었다. 이 모델의 경우 극 피치가 258mm로 주어졌으며, 계자를 4극으로 설계하였다. 계자의 극 수는 필요에 따라 늘릴 수 있다. 또한, 계자 권선은 치당 260턴이며, 계자 코일 전류는 직류 20A이다.

기초설계 모델의 정격 용량은 12.86MW이며, 총 46개의 LSM 모듈이 장착된다. LSM 모듈은 10극을 갖는 LSM 계자를 의미하며 1 모듈당 280kW의 용량을 갖는다. 모듈 1개당 3.863kN 이상의 추력을 내야하며, 정격 속도 260km/h에서 주파수는 극 피치가 258mm이므로 140Hz이며, 입력 상전압 실효치는 4,089V이고, 입력 전류 실효치는 1486A이다. 최대속도 550km/h에서의 주파수는 296.1Hz이며, 입력 상전압 실효치는 5,385V이고, 입력 전류 실효치는 823A이다.



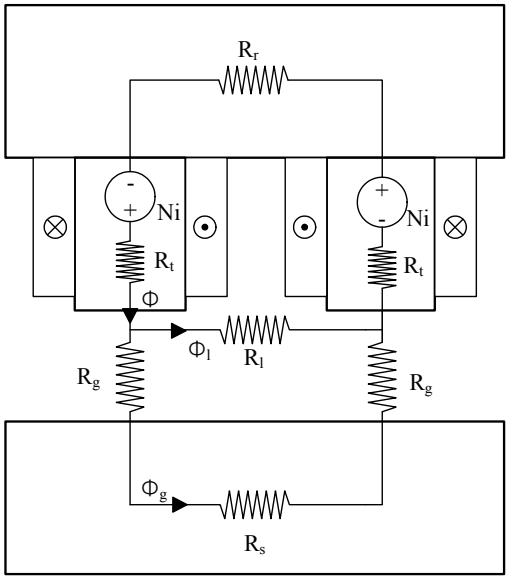
[그림 2.5.23] LSM 기초설계 모델

(2) LSM의 특성 해석

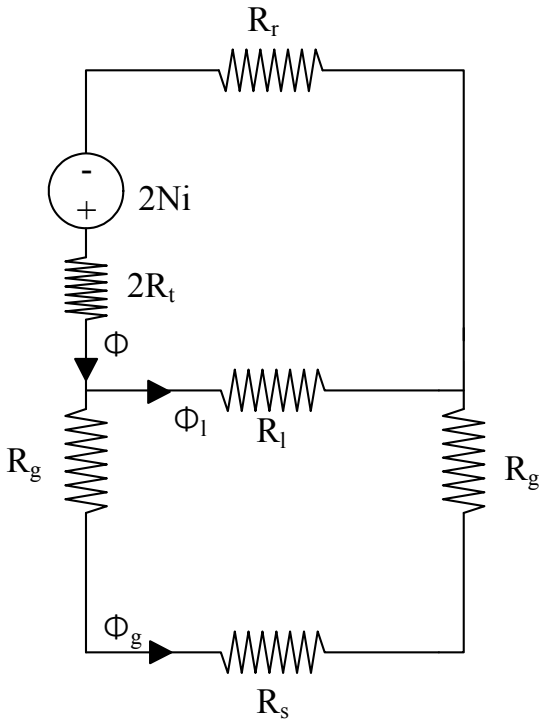
(가) 자기등가회로법을 이용한 특성 해석

① 특성 해석을 위한 주요 수식

[그림 2.5.24]와 [그림 2.5.25]에 나타낸 것처럼 LSM의 등가회로를 가정하게 되면, 각각의 자기저항 성분과 기자력 성분을 통하여 특성을 예측할 수 있다.



[그림 2.5.24] LSM의 자기등가회로 모델



[그림 2.5.25] 간략화된 자기등가회로

[그림 2.5.25]에서 각각의 자기저항 성분은 다음과 같은 식을 통해 구할 수 있다.

$$R_r = \frac{\tau}{\mu_0 \mu_r (h_{yp} \times l_{pri})}$$

$$R_s = \frac{\tau}{\mu_0 \mu_r (h_{ys} + h_{ts}) \times l_{stator}}$$

$$R_g = \frac{K_c \bullet g_0}{\mu_0 (w_{s\_t} \times l_{pri})}$$

$$R_t = \frac{h_{t\_p}}{\mu_0 \mu_r (w_{t\_p} \times l_{pri})}$$

$$R_l = \frac{\tau}{\mu_0 (K_c g_0 \times l_{pri})}$$

여기에서 R_r, R_s, R_g, R_t 및 R_l은 각각 계자 요크에서의 자기저항, 고정자에서의 자기저항, 공극에서의 자기저항, 계자 치에서의 자기저항, 그리고 공극의 누설자속에 의한 자기저항을 의미한다. 또한, 식의 K_c는 카터계수(Cater's coefficient)를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$K_c = \left[1 - \frac{1}{\frac{\tau_s}{w_s}\left(5\frac{g}{w_s} + 1\right)} \right]^{-1}$$

기자력 성분은 다음 식으로 나타낼 수 있으며,

$$F = 2Ni = \Phi R_{eq}$$

전체 자기저항의 합은 전기회로에서 합성 저항을 구하는 방식으로 계산하면 되며, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R_{eq} = \{(2R_g + R_s) // R_l\} + R_r + 2R_t$$

따라서 총 자속은 다음과 같이 구할 수 있고,

$$\Phi = \frac{F}{R_{eq}}$$

공극자속은 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$\Phi_g = \Phi \times \frac{R_l}{(2R_g + R_s) + R_l}$$

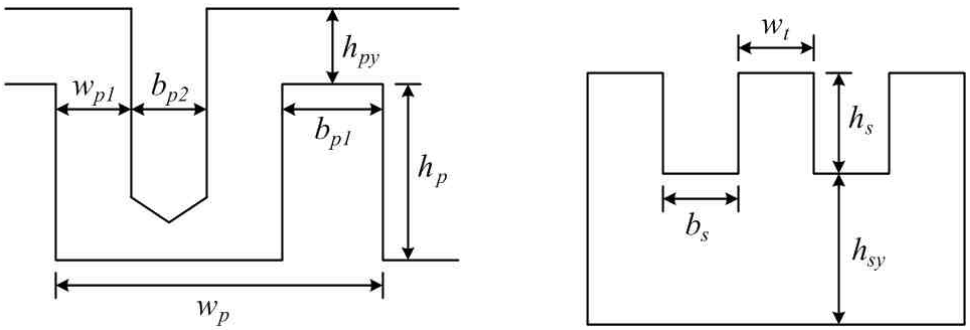
② 특성 해석 프로그램

본 연구에서는 Microsoft社의 스프레드시트 프로그램인 Excel을 기반으로 특성 해석 프로그램을 작성하였다. [그림 2.5.26]은 특성 해석 프로그램의 설계 값 입력 부분을 나타낸다. Value 열에서 흰색 셀에 설계 값을 입력하면 자동으로 특성 해석 식이 계산되도록 작성하였다. [그림 2.5.27]은 LSM의 설계 파라미터를 나타내며 각 설계 파라미터를 참조하여 LSM의 주요 사이즈를 해당하는 셀에 입력하면 된다.

[그림 2.5.28]은 특성 해석을 위한 가정치와 계산 값을 나타내는 부분이다. 공극과 철심의 투자율 및 부하각, 누설 퍼미언스 계수 등의 계산을 수행하고 자속의 누설을 고려하여 공극 길이를 보정하는 카터 계수의 계산을 수행한다. 또한 LSM의 고정자 권선은 1턴을 가지며 알루미늄 권선을 사용하므로 알루미늄의 도전율을 입력하였다. 만약 구리 권선을 사용하게 된다면, 도전율 값을 구리에 해당하는 값으로 입력하면 된다.

Name	Value	Unit	Description
P	12.856	MW	정격 용량
F_s	178	kN	기동 추력(정격 출력)
V_rated	260	km/h	정격속도
frq	139.9655469	Hz	주파수
V_ph	4500	V	입력 상 전압
V_L	7794.228634	V_rms	입력 선간 전압
I_a	935	A	입력 전류
N_s	1	turns	고정자 코일당 턴수
I_f	20	A	계자 코일 전류
N_f	260	turns	계자 코일 턴수
m	3		상수
N_pole	4		극 수
N_slot	12		슬롯 수
N_pms	1		매극매상 슬롯수(4극 12슬롯 3상)
g	10	mm	공극 길이
Wp	258	mm	극 피치
L_mover	1200	mm	이동자 길이
W_rail	220	mm	계자 코어 적층폭
Hpy	50	mm	계자 요크 폭
2*Wp1	100	mm	계자 치 폭
Hp	100	mm	계자 슬롯 깊이
h_sy	100	mm	고정자 요크 폭
w_t	46	mm	고정자 치 폭
h_s	50	mm	고정자 슬롯 깊이
b_s	40	mm	고정자 슬롯 폭

[그림 2.5.26] 특성 해석 프로그램의 설계 값 입력 부분



(a) 계자 (b) 고정자

[그림 2.5.27] LSM 특성 해석을 위한 설계 파라미터

Name	Value	Unit	Description
μ_0	1.26E-06	H/m	공기의 투자율
μ_{r_s}	3180		고정자의 비투자율
μ_{r_p}	3180		계자의 비투자율
θ	60	deg	부하각(theta)
γ_0	1.047197551	rad	부하각(rad)
t	0.1	s	시간
l_{le}/L_i	0.2		적층길이에 대한 end connection
λ_{ls}	1.666666667		slot leakage permeance 계수
λ_{le}	0.3		end connection leakage permeance 계수
λ_{ld}	0.2		differential leakage 계수
k_{lx}	0.5		표피효과 계수
k_{cl}	1.62992126		카터계수
σ_s	37735849.06	S	알루미늄의 도전율
k_sf	0.3		고정자 슬롯 점적률
s_1	600	mm2	고정자 권선의 단면적
v_s	72.22222222	m/s	동기속도
R_f	5.87E+03		
R_s	2.04E+03		
R_t	1.14E+03		
R_g	5.90E+05		
R_l	5.73E+07		

[그림 2.5.28] 특성 해석을 위한 가정치 및 계산 값

[그림 2.5.29]는 특성 해석 결과 값을 나타내는 부분이다. 각각의 계수를 살펴보면, 다음과 같다. 계자의 form factor는 공극 자속 밀도의 최대치에 대한 1차 고조파의 크기의 비로 정해지며, d축과 q축의 전기자 반작용 form factor는 전기자 반작용 자속 밀도의 법선 성분의 최대값에 대한 1차 고조파의 크기의 비로 정해진다.

- Form factor of the excitation field

$$k_f = \frac{B_{mg1}}{B_{mg}} = \frac{4}{\pi} sin \frac{\alpha_i \pi}{2}$$

- Pole-shoe b_p - to - pole pitch τ ratio

$$\alpha_i = \frac{b_p}{\tau}$$

Name	Value	Unit	Description
α_i	0.67		계자의 극간격과 슈의 비
k_f	1.105975994		계자극의 form factor
k_{fd}	0.943982697		전기자의 d축 form factor
k_{fq}	0.396017303		전기자의 q축 form factor
k_{ad}	0.853529102		d축 reaction factor
k_{aq}	0.358070433		q축 reaction factor
F_{excd}	466.6776046		공극이 0일때의 등가 d축 기자력
F_{excq}	195.779443		공극이 0일때의 등가 q축 기자력
RND	2		ROUND(L_mover/(2*Wp*10^-3),0)
R_1	0.000232684	Ohm	고정자 권선의 저항
X_l	9.82E-04		전기자 누설 리액턴스
X_{dm}	0.004417049		d축 전기자 리액턴스
X_{qm}	0.001853029		q축 전기자 리액턴스
X_a	0		
XD	5.40E-03		Xl+Xdm+Xa
XQ	2.83E-03		Xl+Xqm+Xa
Φ_f	8.92E-03	Wb	계자 자속
Φ_g	8.74E-03	Wb	공극 자속
B_g	0.397419798	T	
F_n	7.82E+03	N	
E_f	5.55E+00	V	전기자 권선에 쇄교되는 무부하 역기전력
E_i	5.44E+00	V	전기자 반작용을 고려한 기전력
I_{ad}	-1.02E+03	A	d축 전기자 전류
I_{aq}	1.40E+06	A	q축 전기자전류
I_a	1403885.374	A	전기자 전류
beta	-89.95842266	deg	
P_{in}	1.39E+09	W	입력전력
P_{elm}	1.24E+07	W	동손을 고려한 출력전력
F_{dx_syn}	1.66E+05	N	동기 추력
F_{dx_rel}	61019716.22	N	릴럭턴스 추력
F_{dx}	6.12E+07	N	합성 추력
P	4.42E+09	W	출력
cosφ	0.50062831		역률
η	8.91E-01	%	효율

[그림 2.5.29] 특성 해석 결과 값

돌극 형태의 전동기에서는 d, q축의 form factor는 다음과 같이 계산할 수 있다.

• D-axis Form factors of the armature reaction

$$k_{fd} = \frac{\alpha_i \pi + \sin \alpha_i \pi}{\pi}$$

• Q-axis Form factors of the armature reaction

$$k_{fq} = \frac{\alpha_i \pi - \sin \alpha_i \pi}{\pi}$$

• Reaction factors in the d- and q- axis

$$k_{ad} = \frac{k_{fd}}{k_f}, \quad k_{aq} = \frac{k_{fq}}{k_f}$$

돌극형 동기 전동기에서의 d축과 q축의 동기 리액턴스를 구하기 위하여 아래에서와 같이 전기자 누설 리액턴스, 공극 리액턴스와 d, q축의 자화 리액턴스를 계산하여 전체 동기 리액턴스를 계산할 수 있다.

• Total armature leakage reactance

$$X_1 = \mu_0 w_1 \left[\left(\lambda_s + \frac{p}{p'} \lambda_d \right) l + \lambda_e (\tau + 0.02) \right] 2 p'$$

• Airgap leakage reactance

$$X_a = \frac{6 \mu_0 w_1 \tau l}{\pi^2 (\frac{\tau}{\pi})} (p' - p)$$

• Magnetizing reactance of d-axis

$$X_{dm} = \frac{6 \mu_0 w_1 \tau l}{\pi^2 k_c g_o} p \, k_{fd}$$

• Magnetizing reactance of q-axis

$$X_{qm} = \frac{k_{fq}}{k_{fd}} X_{dm}$$

• d-axis and q-axis synchronous reactance

$$X_d = X_{dm} + X_1 + X_a, \quad X_q = X_{qm} + X_1 + X_a$$

본 특성 해석 프로그램에서는 자기등가회로를 이용하여 계자에 의한 공극 자속밀도 B_g 및 공극 자속 Φ_g를 계산하였다. 또한 계자 자속 Φ_f에 의해 유도되는 무부하 유도기전력은 다음과 같다.

$$E_f = \pi\sqrt{2} f N_1 k_{w1} \Phi_f$$

그리고 부하각에 따른 단자전압 V_1 그리고 q축의 유도기전력 E_f에 의하여, 전기자의 d, q 축 전류를 구하면, 다음과 같다.

$$I_{ad} = \frac{V_1(X_{sq}\cos\delta - R_1\sin\delta) - E_f X_{sq}}{X_{sd}X_{sq} + R_1^2}$$

$$I_{aq} = \frac{V_1(R_1\cos\delta + X_{sd}\sin\delta) - E_f R_1}{X_{sd}X_{sq} + R_1^2}$$

이 값들을 통하여 전기자 전류의 rms 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_a = \sqrt{I_{ad}^2 + I_{aq}^2} = \frac{V_1}{X_{sd}X_{sq} + R_1^2} \times \sqrt{[(X_{sq}\cos\delta - R_1\sin\delta) - E_f X_{sq}]^2 + [(R_1\cos\delta + X_{sd}\sin\delta) - E_f R_1]^2}$$

따라서 입력 전력은 다음과 같다.

$$P_{in} = m_1 V_1 I_a \cos\phi = m_1 V_1 (I_{aq}\cos\delta - I_{ad}\sin\delta)$$

전동기의 입력 전력에서 전기자 동손을 빼게 되면 기계적인 출력을 구할 수 있다.

$$P_{elm} = P_{in} - \triangle P_{1w} = m_1[I_{aq}E_f + I_{ad}I_{aq}(X_{sd} - X_{sq})]$$

전기자 권선 저항을 무시하면($R_1 = 0$), 추력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{dz} = \frac{m_1}{v_s}\left[\frac{V_1 E_f}{X_{sd}} sin\delta + \frac{V_1^2}{2}\left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}}\right)\sin 2\delta\right]$$

돌극형 동기 전동기의 추력은 동기 추력과 릴럭턴스 추력으로 나뉘며 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$F_{dx} = F_{dxsyn} + F_{dxrel}$$

여기서 첫 번째 인자가 동기 추력 F_{dxsyn}을 나타내고 두 번째가 릴럭턴스 추력 F_{dxrel}을 나타낸다.

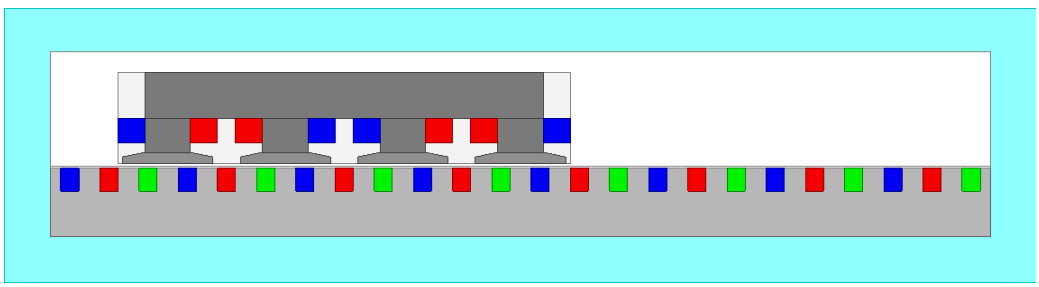
$$F_{dxsyn} = \frac{m_1}{v_s}\frac{V_1 E_f}{X_{sd}} sin\delta$$

$$F_{dxrel} = \frac{m_1 V_1^2}{2v_s}\left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}}\right)\sin 2\delta$$

(나) 유한요소법을 이용한 특성 해석

① LSM 기초설계 모델의 특성 해석

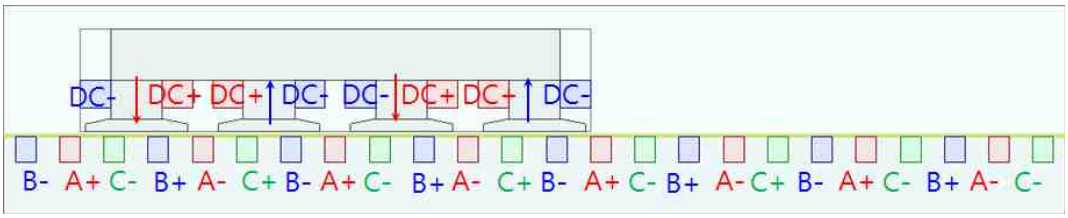
LSM의 기초설계 과정을 통하여 LSM 기초설계 모델을 얻었다. 이 기초설계 모델이 요구 사양을 만족하는지 검증하기 위해 유한요소 해석을 실시하였다. LSM의 유한요소 해석을 위한 해석 모델을 [그림 2.5.30]에 나타냈다.



[그림 2.5.30] LSM 유한요소 해석 모델

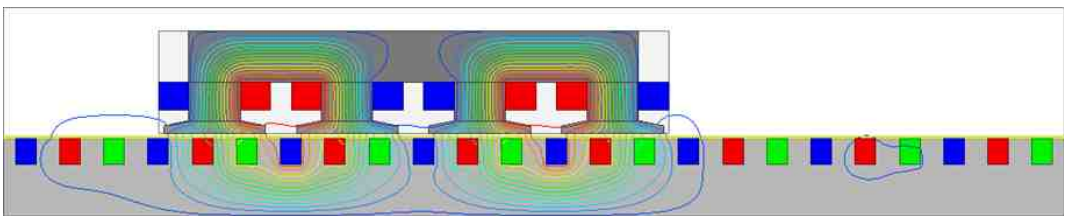
유한요소 해석을 위해서는 [그림 2.5.30]과 같은 LSM의 형상 이외에 철심 재실, 권선 방향 및 코일 전류의 크기, 계자의 이동 속도 등의 조건이 주어져야 한다. 우

선 LSM의 권선 조건은 [그림 2.5.31]과 같다. 상단의 계자 권선은 20A의 직류 전류가 흐르며, 치당 알루미늄 권선 260턴이 감긴다. 권선의 방향은 +는 나오는 방향, -는 들어가는 방향을 나타낸다. 하단의 고정자 권선도 계자 권선과 같이 +는 나오는 방향, -는 들어가는 방향을 나타내며, A, B, C 3상이 그림과 같이 배열되고, 치당 알루미늄 권선 1턴이 감기고, 실효치 1486A의 3상 교류 전류가 인가된다.



[그림 2.5.31] LSM 기초설계 모델의 권선 조건

[그림 2.5.32]는 LSM 기초설계 모델의 계자를 LSM의 정격속도인 260km/h로 이동 시켰을 때의 자속선도를 나타낸다. 이때 고정자 권선에는 전류를 인가하지 않고, 오직 계자 권선에만 20A의 직류 전류를 인가하였다. 20A의 계자 전류에 의해 발생한 계자 자속이 고정자 권선에 쇄교되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 고정자 권선에 쇄교되는 자속은 고정자 권선에 유도기전력을 형성하며, 이를 무부하 역기전력이라고 한다.

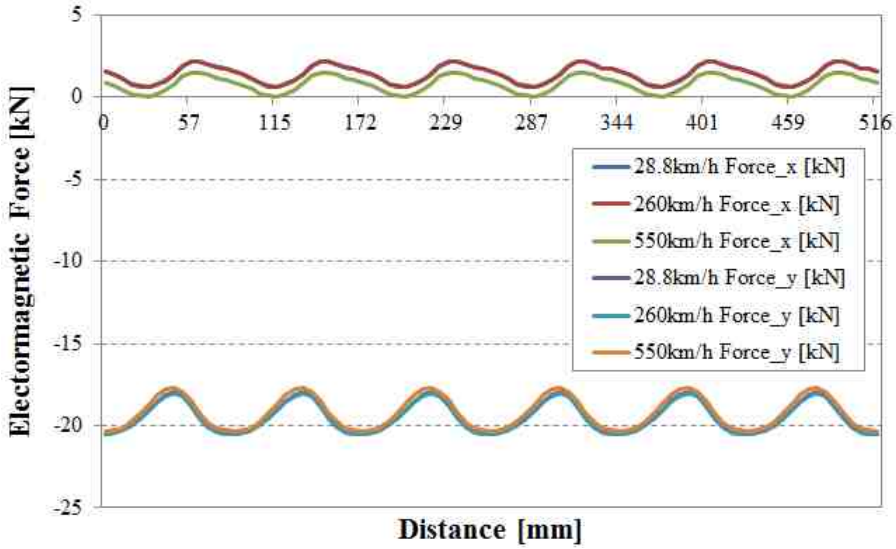


[그림 2.5.32] LSM 기초설계 모델의 자속선도

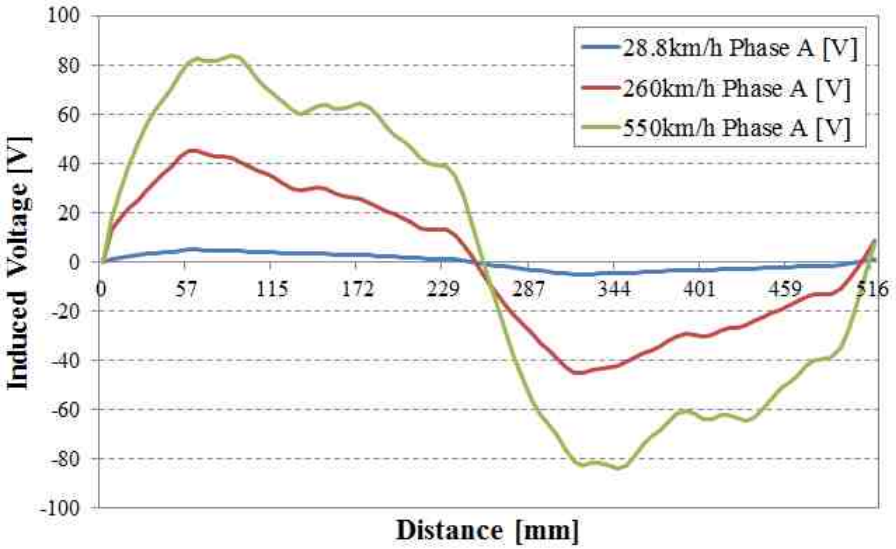
한편, 이 유한요소 해석에서 고정자와 계자 철심은 S08(35PN230)의 전기 강판으로 설정하였다. 전기 강판을 적층하여 제작한다고 가정하였기 때문에, 철심에서 발생하는 와전류손은 무시하였다.

[그림 2.5.32]에서 계자를 각각 28.8km/h, 260km/h, 550km/h의 속도로 이동시키면서 추력 및 역기전력 특성을 확인하였다. 여기서 28.8km/h는 150m 시험 선로에서의 LSM 최대 속도이고, 260km/h는 LSM의 정격 속도이며, 550km/h는 LSM의 최대 속도이다.

[그림 2.5.33]에 각각의 속도에 대한 추력 및 수직력 특성을 나타냈다. 그림의 범례에서 Force_x가 추력, Force_y가 수직력을 각각 의미한다.



[그림 2.5.33] Maxwell을 이용한 추력 및 수직력 해석 결과

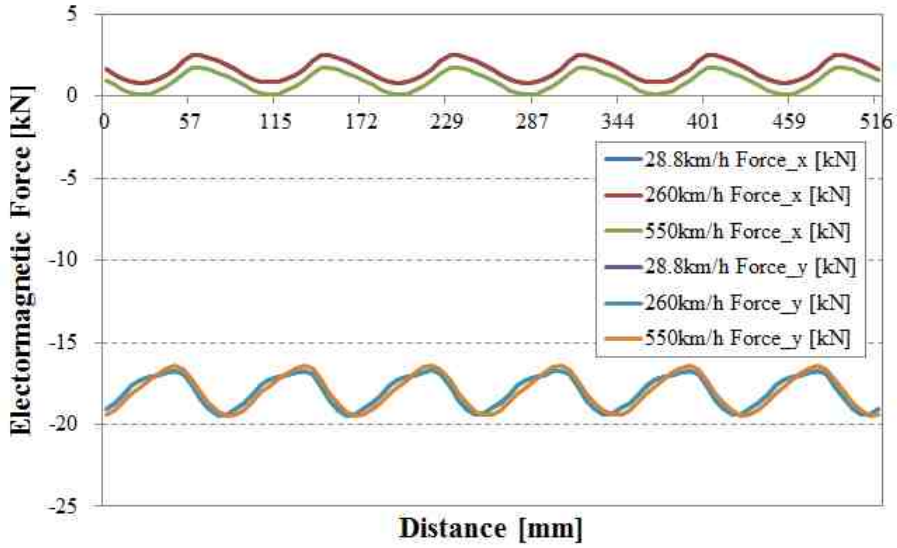


[그림 2.5.34] Maxwell을 이용한 역기전력 해석 결과

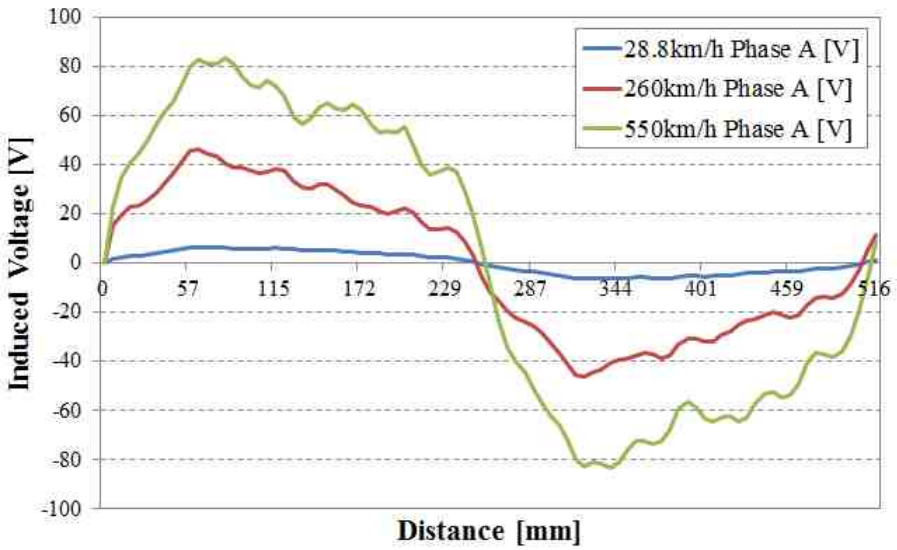
[그림 2.5.34]는 각각의 속도에 대한 역기전력 파형을 나타낸다. 역기전력은 계자의 이동속도에 비례하여 증가하므로 LSM의 최대 속도인 550km/h에서 가장 크게 나타나며, 파형의 형태는 거의 동일하다.

[그림 2.5.33]과 [그림 2.5.34]의 그래프는 Maxwell을 이용하여 해석한 결과이며, 유한요소 해석의 타당성을 검증하기 위해 다른 상용 프로그램인 JMAG Studio를 이용하여 동일한 모델을 동일한 조건으로 해석하였다. [그림 2.5.35]과 [그림 2.5.36]에 JMAG을 이용한 해석 결과를 나타내었다. Maxwell을 이용한 결과와 거의 동일한 파형이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 유한요소 해석의 타당성은 실제 LSM 모델을 제작하여 시험 결과와 비교하여 입증해야 하나, 실제 LSM의 제작비용이 많이

들기 때문에, 일단 서로 다른 해석 프로그램을 사용하여 해석 결과를 비교하는 것으로 타당성 검증을 하였다. 제대로 된 타당성 검증은 LSM 제작 후 성능 시험이 끝난 이후에 완료될 것이다.



[그림 2.5.35] JMAG을 이용한 추력 및 수직력 해석 결과



[그림 2.5.36] JMAG을 이용한 역기전력 해석 결과

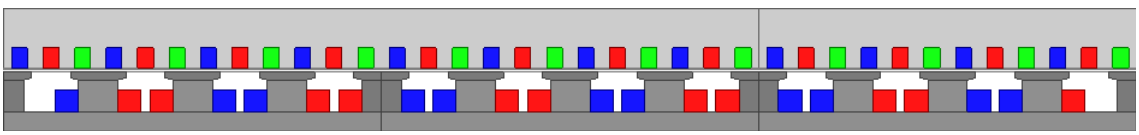
② LSM 기초설계 모델의 특성 해석

앞서 설계된 LSM 기초 모델은 극 피치 258mm에 4극의 계자를 갖는다. 그러나 실제 제작 모델은 극 피치 240mm에 11극의 계자를 갖도록 설계 요구사항이 주어졌다. 따라서 LSM 기초설계 모델을 기반으로 약간의 사이즈 수정을 진행하였다. 우선

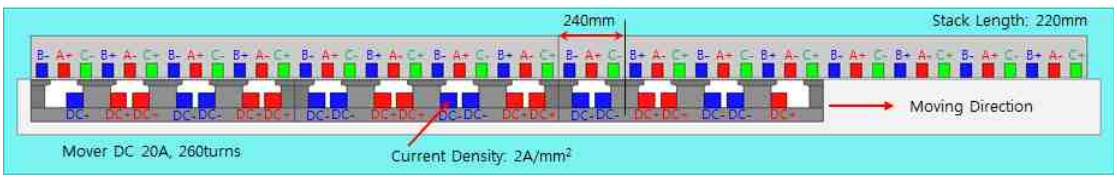
고정자의 경우, 극 피치를 240mm로 맞추기 위해 고정자 슬롯 폭은 40mm 그대로 두고, 치 폭을 46mm에서 40mm로 줄였다. 계자의 경우는 요크 폭과 치 폭은 100mm 그대로 두고, 슬롯 폭을 158mm에서 140mm로 줄여서 극 피치를 240mm로 맞췄다. 또한 계자의 극 수를 4개에서 11개로 늘리고, [그림 2.5.37]과 같이 계자의 양단은 치 폭의 1/2 두께만큼씩 나눠 갖는 형태를 갖도록 설계하였다. 이 양단에는 센서가 장착될 공간이다.

[그림 2.5.37]의 LSM 모델은 LSM 기초설계 모델과 달리 계자와 고정자의 위치가 바뀌었다. 즉, 위쪽이 고정자, 아래쪽이 계자를 나타낸다. 이렇게 계자가 고정자의 아래쪽에 위치하게 되면, 고정자와 계자 사이에 작용하는 흡인력은 고정자 기준으로 봤을 때 위쪽 방향(편의상 +y 방향)으로 작용한다. LSM 기초설계 모델의 경우 계자가 고정자 위쪽에 있어서 흡인력이 아래쪽 방향(편의상 -y 방향)으로 작용한 것과 대조적이다. 수직력(Force_y)이 음(-)의 값이 나왔지만, 그림 2.5.37의 LSM 2차 설계모델의 경우에는 수직력이 양(+)의 값을 갖는다. 즉, +y 방향으로 힘이 작용하며, 중력과 반대 방향이 된다. 따라서 수직력은 LSM의 부상력이 된다.

LSM 2차 설계모델에서 계자의 이동방향은 LSM 기초설계 모델과 동일하게 좌측에서 우측으로 이동한다. LSM 기초설계 모델에서 고정자와 계자의 위치가 바뀐 상태에서 동일한 방향으로 계자가 이동해야 하므로, LSM 2차 설계모델의 권선 방향을 다시 설정해야만 한다. LSM 2차 설계모델의 고정자와 계자의 권선 방향을 그림 2.5.38에 나타냈다. A+는 A상 권선이 밖으로 나오는 방향을, A-는 A상 권선이 안쪽으로 들어가는 방향을 나타낸다. 같은 방식으로 DC+는 직류 전류가 바깥쪽으로 나오는 방향으로 흐른다는 것을, DC-는 안쪽으로 들어가는 방향으로 흐른다는 것을 의미한다.



[그림 2.5.37] LSM 2차 설계 모델



[그림 2.5.38] 유한요소 해석을 위한 해석 모델

계자의 이동속도는 앞서 LSM 기초설계 모델과 동일하게 28.8km/h, 260km/h, 550km/h, 3가지 속도에 대하여 해석을 실시하였으며, 각각의 속도에 대한 입력전류

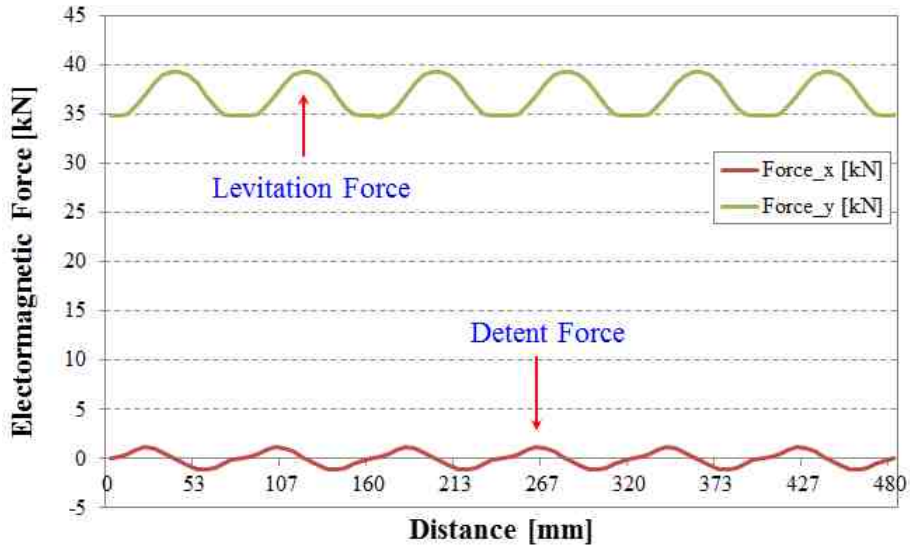
및 주파수를 [표 2.5.8]에 나타냈다.

[표 2.5.8] LSM 속도에 따른 입력 전류와 주파수

Speed	Input Current [A_rms]	Frequency [Hz]
28.8 km/h	1486	15.504
260 km/h	1486	139.966
550 km/h	823	296.081

유한요소해석을 위한 기본 조건을 설정하고, 무부하 해석 및 이동속도별 전류원 해석을 실시하였다. 무부하 해석은 계자 권선에만 20A의 직류 전류만 인가하고, 고정자 권선은 개방한 상태로 계자를 일정한 속도로 이동시키면서 그 특성을 해석하는 것이다. 무부하 해석을 통해 LSM이 타행으로 운전되거나 정지 상태에 있을 때의 부상력을 구할 수 있고, 타행 운전시 고정자 권선에서 발생하는 역기전력을 구할 수 있다.

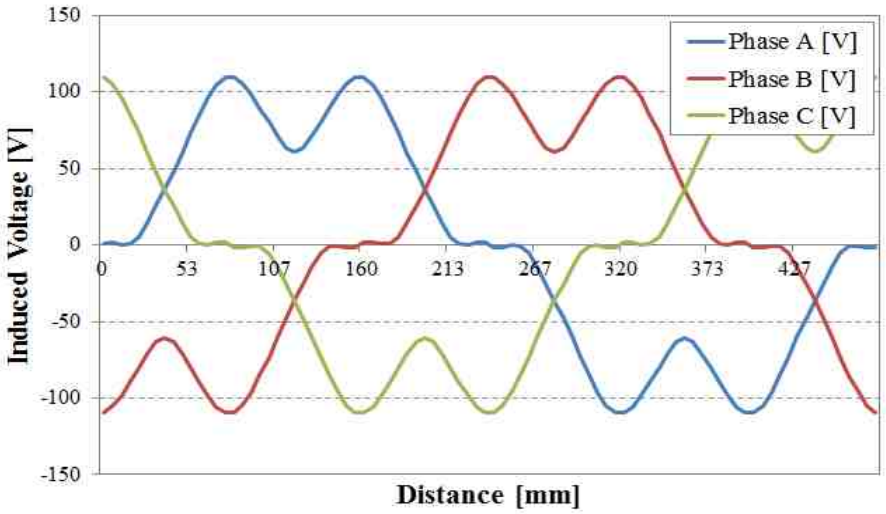
[그림 2.5.39]는 무부하 해석을 통해 얻은 부상력과 디텐트력을 나타낸다. 무부하시 부상력은 약 36.8kN이며, 부상력 리플은 약 4.6kN, 디텐트력은 약 2.3kN이다.



[그림 2.5.39] LSM의 부상력과 디텐트력 (무부하 해석)

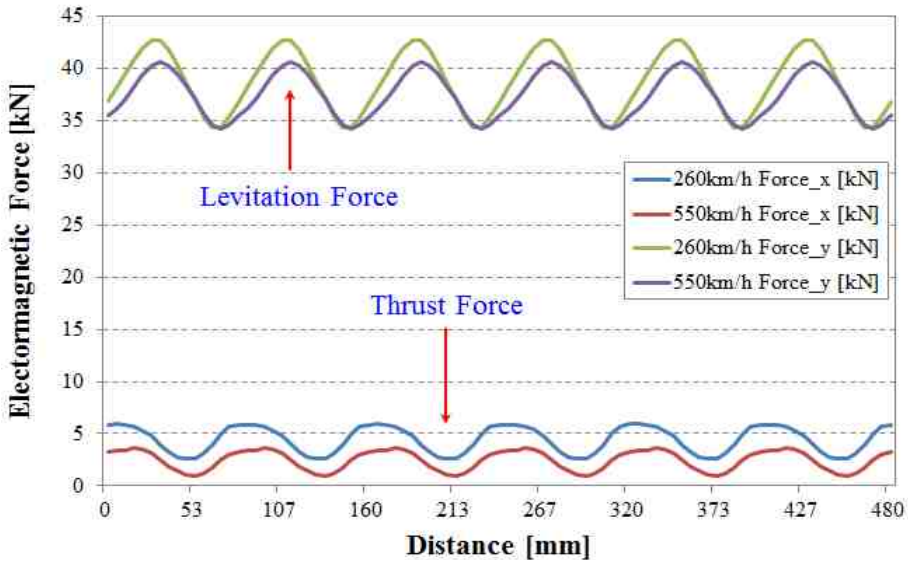
[그림 2.5.40]은 LSM의 무부하 역기전력 파형을 나타낸다. 일반적으로 역기전력 파형이 정현파에 가까울수록 추력 리플의 크기가 작고, 제어성이 뛰어난 특성을 갖는다. 그러나 이 LSM의 경우 그림처럼 기본파 성분에 많은 고조파 성분들이 포함

되어 정현파에서 많이 왜곡된 파형으로 나타난다. 그림의 역기전력 파형은 계자가 260km/h의 속도로 이동할 때 고정자 권선에 유기되는 전압을 나타내며, 최대값은 약 109.8V이다.



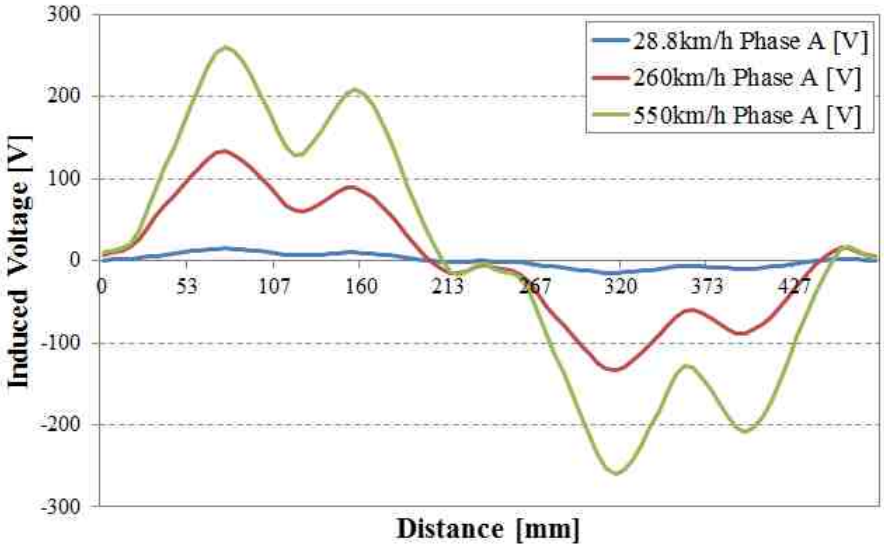
[그림 2.5.40] LSM의 무부하 역기전력 파형

이번에는 고정자 권선에 3상 정현파 전류를 인가하고, 계자의 속도를 바꿔가면서 출력 특성을 해석하였다. [그림 2.5.41]은 계자를 시속 260km와 시속 550km의 속도로 이동시킬 때의 추력과 부상력 특성을 나타낸 그래프이다. 시속 28.8km의 경우는 시속 260km의 경우와 동일한 추력과 부상력 특성을 나타내기 때문에, [그림 2.5.41]에는 시속 28.8km에 대한 그래프는 생략하였다.



[그림 2.5.41] LSM 이동속도별 추력과 부상력

[그림 2.5.42]는 이동속도에 따른 역기전력 파형을 나타낸다. 고정자 권선에 전류를 인가하므로 자속이 발생하게 되어 역기전력 파형과 약간 다르게 변형이 일어난다. 역기전력의 크기는 계자의 이동속도에 비례하기 때문에 그래프 상에서 크기의 차이가 많이 나는 것을 확인할 수 있다.



[그림 2.5.42] LSM 이동속도별 역기전력

이상의 해석 결과는 11극을 가지는 계자 1개의 모듈에 대한 것이다. 초고속 자기부상열차 1편성에 46개의 모듈이 들어가므로, 46 모듈에 대해서 추력과 부상력, 역기전력을 환산하면 [표 2.5.9]과 같은 결과가 나온다.

[표 2.5.9] 이동속도별 추력, 부상력, 역기전력 특성

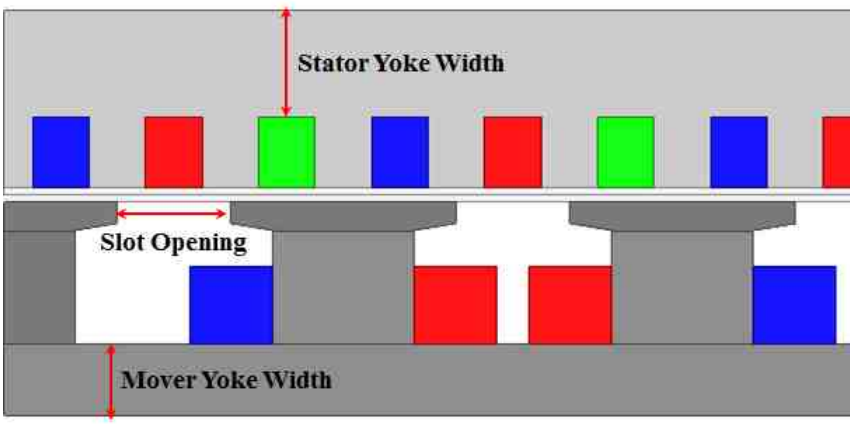
	1 Module			46 Modules		
	28.8km/h	260km/h	550km/h	28.8km/h	260km/h	550km/h
추력 [kN]	4.45	4.44	2.47	204.62	204.32	113.41
추력 리플 [kN]	3.35	3.34	2.62	153.88	153.62	120.66
부상력 [kN]	38.60	38.60	37.36	1775.43	1775.71	1718.64
부상력 리플 [kN]	8.44	8.64	6.43	388.33	397.31	295.63
역기전력 [Vpeak]	14.81	133.41	260.21	340.52	3068.32	5984.83

[표 2.5.9]의 결과에서 46 모듈일 때, 정격 속도 260km/h에서 204.32kN의 추력이 발생하고, 최대 속도 550km/h에서 113.41kN의 추력이 발생하므로, 설계 요구 조건인 260km/h에서 178kN, 550km/h에서 83.6kN의 추력 조건을 만족한다고 볼 수 있다.

(3) LSM 최적화 설계

① LSM 기초설계 모델의 특성 해석

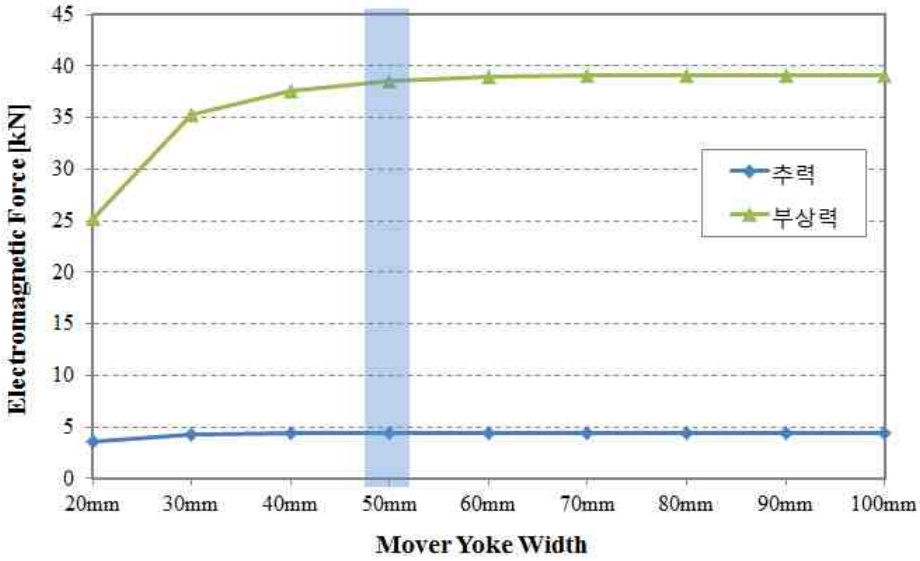
LSM 최적화 설계를 위하여 [그림 2.5.43]과 같이 3개의 설계 변수를 선정하였다. [그림 2.5.43]의 설계변수는 계자 요크 폭(Mover Yoke Width), 고정자 요크 폭(Stator Yoke Width), 슬롯 개구 폭(Slot Opening)을 나타내며, 표 2.5.9와 같이 사이즈를 10mm 단위로 변경하면서 특성 변화를 조사하였다.



[그림 2.5.43] LSM의 설계 변수

[표 2.5.10] LSM 설계 변수의 범위

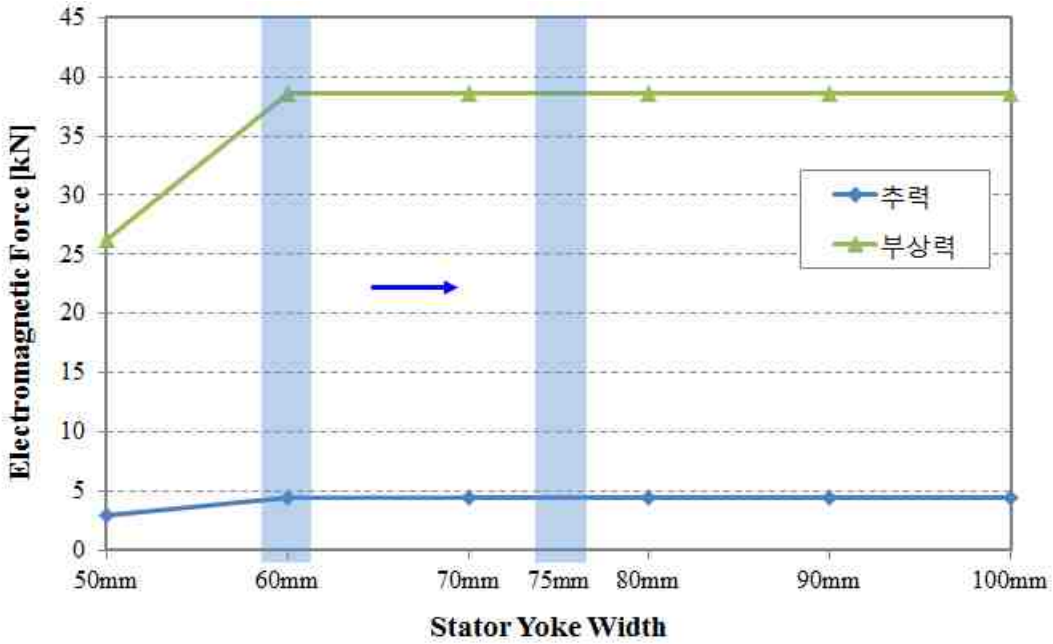
Design Parameter	Range	Step
Mover Yoke Width	20 mm ~ 100 mm	10 mm
Stator Yoke Width	50 mm ~ 100 mm	10 mm
Slot Opening	20 mm ~ 120 mm	10 mm



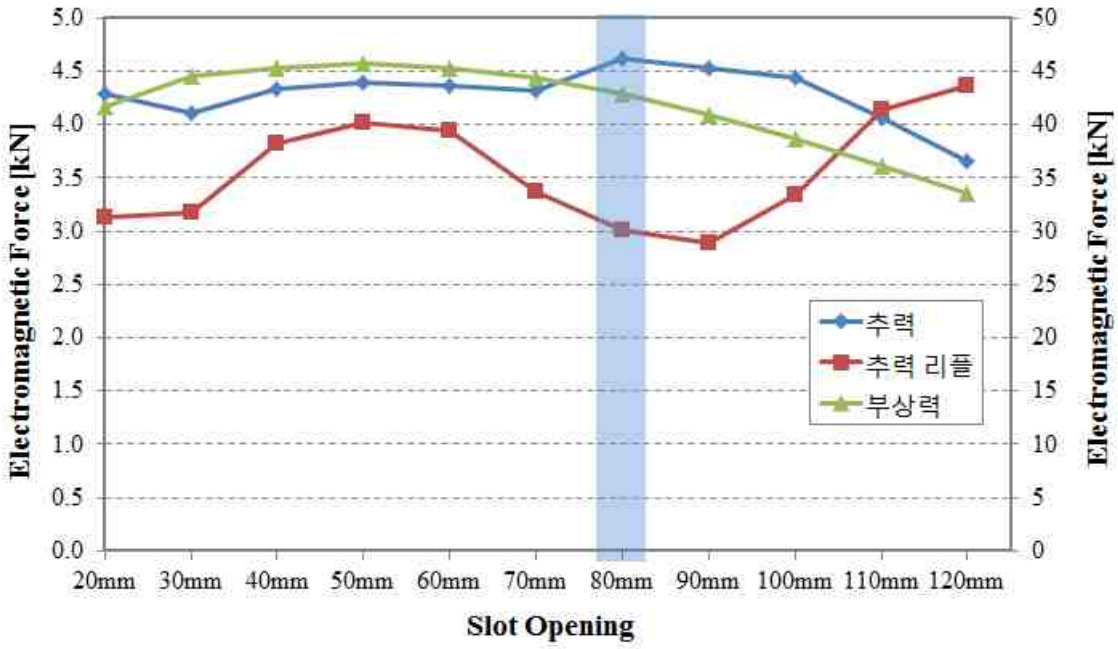
[그림 2.5.44] 계자 요크 폭에 따른 추력 및 부상력의 크기

[그림 2.5.44]는 계자 요크 폭을 100mm부터 20mm까지 10mm씩 줄여가면서 추력과 부상력의 변화를 나타낸 그래프이다. 50mm 보다 얇아지면서 부상력이 상당히 감소하고, 40mm부터는 추력이 감소하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 자속이 흐를 수 있는 통로가 좁아지면서, 자기저항이 증가하게 되어 손실로 나타나게 되는 것이다. 요크 폭을 얇게 만들수록 재료비를 저감할 수 있지만 손실이 증가하므로 적정한 설계 포인트를 잡아야 한다. 여기서는 부상력이 심하게 감소하기 시작하는 50mm를 설계 포인트로 결정하였다.

[그림 2.5.45]는 고정자 요크 폭을 100mm부터 50mm까지 10mm씩 줄여가면서 추력과 부상력의 변화를 나타낸 그래프이다. 100mm부터 60mm까지는 추력과 부상력의 변화가 거의 없으나, 요크 폭이 50mm일 때 추력과 부상력의 급격한 저감 현상이 발생하였다. 따라서 고정자 요크 폭은 최소한 60mm 이상 확보해야 한다. 여기서는 고정자와 선로 구조물과 체결 홈을 파내야 하므로 15mm의 여유를 두어 75mm로 고정자 요크 폭을 결정하였다.



[그림 2.5.45] 고정자 요크 폭에 따른 추력 및 부상력의 크기



[그림 2.5.46] 슬롯 개구 폭에 따른 출력 특성 비교

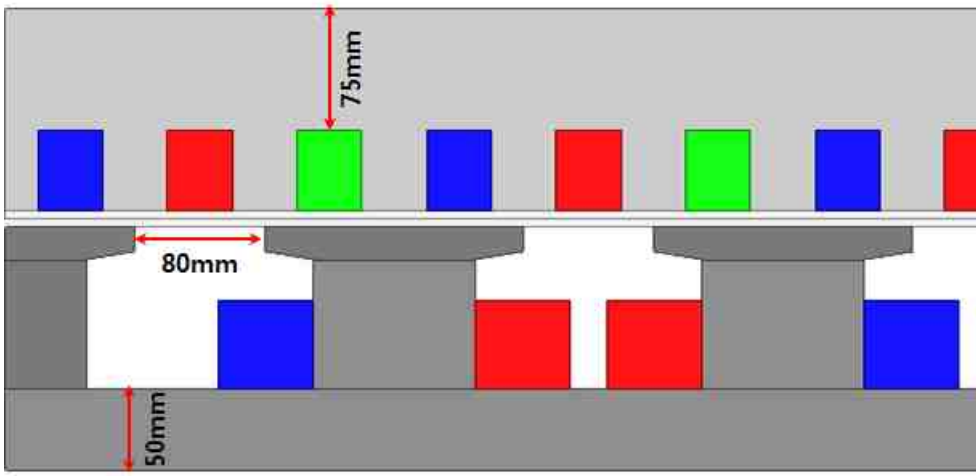
[그림 2.5.46]은 슬롯 개구 폭을 20mm부터 120mm까지 10mm씩 늘려가면서 추력과 추력 리플, 부상력의 변화를 나타낸 그래프이다. 슬롯 개구 폭이 80mm일 때 추력이 가장 크고, 50mm일 때는 부상력이 가장 크며, 90mm일 때는 추력 리플이 가장 작게 나타난다. 추력의 크기에 가중치를 많이 둬서 추력이 최대인 슬롯 개구 폭

80mm를 설계 포인트로 결정하였다.

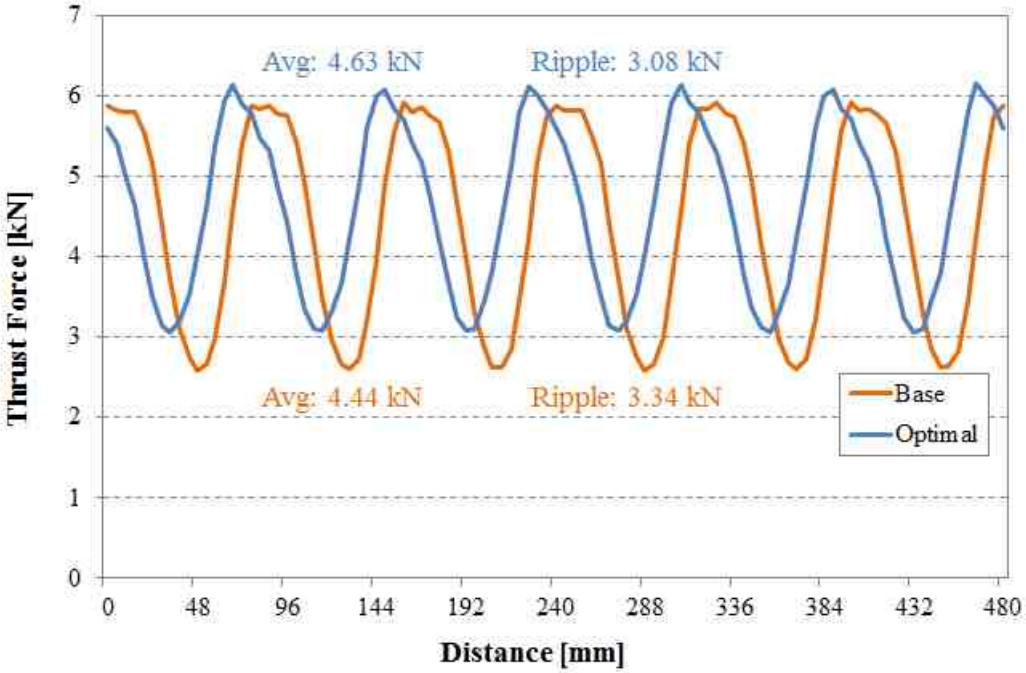
각각의 설계 변수는 교호 작용이 없다고 가정하였으며, 계자 요크 폭은 50mm, 고정자 요크 폭은 75mm, 슬롯 개구 폭은 80mm를 LSM 최적화 모델의 설계 포인트로 결정하였다.

② LSM 기초설계 모델의 특성 해석

설계 변수의 민감도 분석을 통해 결정된 설계 포인트를 가지고 [그림 2.5.47]과 같은 최적화 모델을 설계하였다. 이 최적화 모델이 기본 모델에 비하여 어느 정도의 성능 향상이 되었는지 확인하기 위해서 기본 모델과 동일한 방식으로 유한요소해석을 수행하였다.

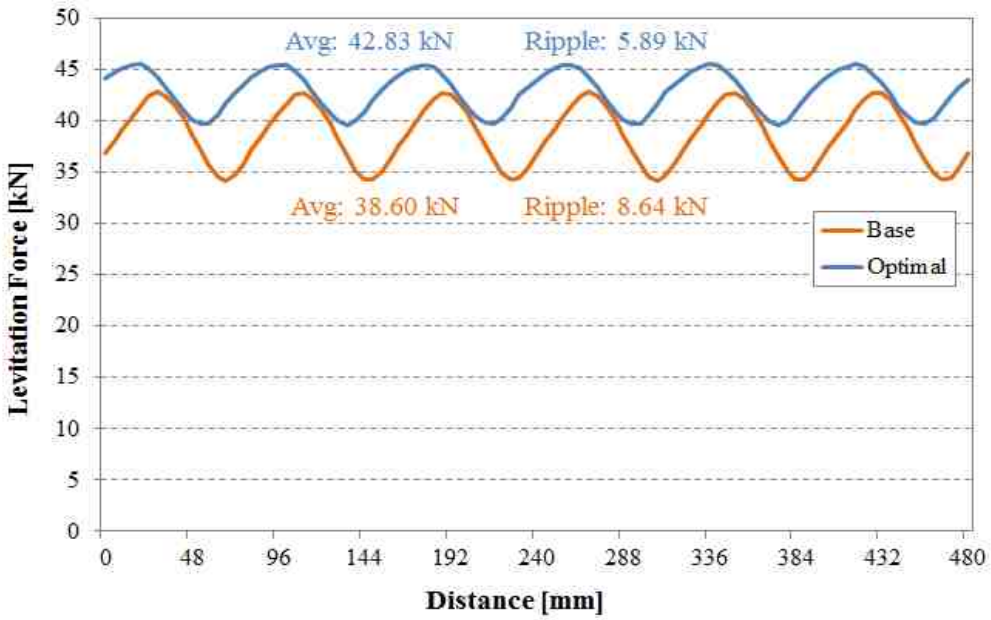


[그림 2.5.47] LSM 최적화 모델



[그림 2.5.48] LSM 기본 모델과 최적화 모델의 추력 파형 비교

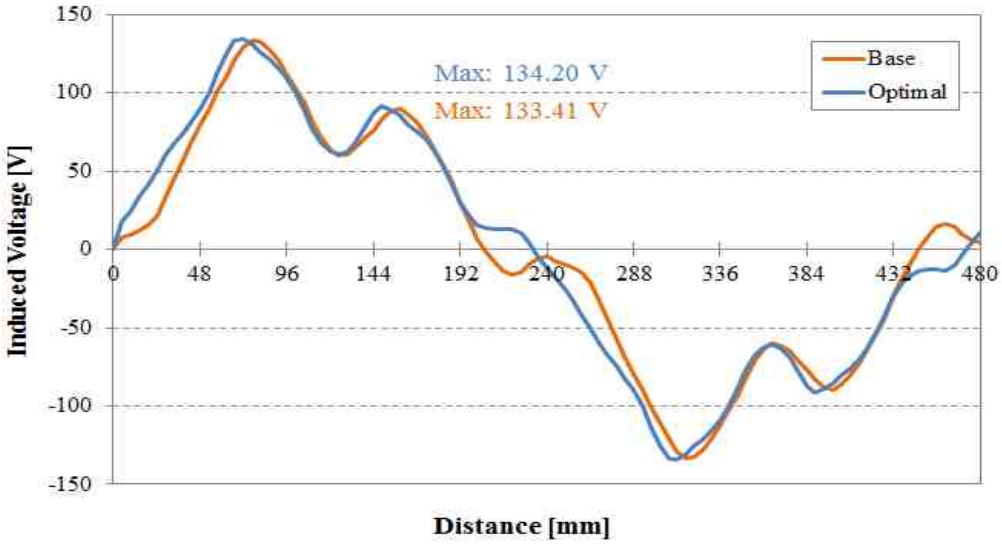
[그림 2.5.48]은 LSM이 정격속도 260km/h로 운전될 때의 추력 파형을 나타낸다. 기본 모델의 평균 추력은 4.44kN이었으나 최적화 모델은 4.63kN으로 약 4.2% 증가하였다. 한편, 추력 리플은 기본 모델이 3.34kN이었으나 최적화 모델은 3.08kN으로 약 7.8% 감소하였다.



[그림 2.5.49] LSM 기본 모델과 최적화 모델의 부상력 파형 비교

[그림 2.5.49]는 LSM이 정격속도 260km/h로 운전될 때의 부상력 파형을 나타낸다. 기본 모델의 평균 부상력은 38.6kN이었으나 최적화 모델은 42.83kN으로 약 11% 증가하였으며, 부상력 리플은 기본 모델이 8.64kN이었으나 최적화 모델은 5.89kN으로 약 31.8% 감소하였다.

[그림 2.5.50]은 LSM이 정격속도 260km/h로 운전될 때의 역기전력 파형을 나타낸다. 기본 모델의 역기전력 최대값은 133.41V, 최적화 모델은 134.2V로 두 모델이 큰 차이를 보이지 않는다.



[그림 2.5.50] LSM 기본 모델과 최적화 모델의 역기전력 파형 비교

LSM 개선 설계를 통하여 추력과 추력 리플, 부상력과 부상력 리플 등의 성능을 향상시킬 수 있었다.

(4) 결론

본 연구의 주된 목적은 시속 550km급 LSM의 최적 모델을 설계하는 것이다. 우선 시속 550km급의 성능을 낼 수 있는 LSM의 기본 설계를 실시하고 이 기본 설계모델의 설계 검증을 위해 유한요소법을 이용하여 특성 해석을 실시하였다. 또한 기본 설계 모델을 바탕으로 최적화 설계를 진행하였고, 최적 설계 모델이 추력과 추력 리플, 부상력과 부상력 리플과 같은 성능이 더 향상되었음을 확인할 수 있었다.

나. 자기부상열차용 LSM 설계 및 해석 시험

(1) 자기부상열차용 LSM 설계

(가) 단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 LSM 설계

본 연구의 최종 목표는 최대 속도 550km/h의 초고속 자기부상열차용 LSM을 개발하는 것이지만, 550km/h의 속도로 달리기 위한 충분한 길이의 노선 확보가 쉽지 않기 때문에 150m의 단거리 시험선 운행으로 대체하였다. 단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 주요 사양은 [표 2.5.11]에 나타내었다.

[표 2.5.11] 단거리 시험선 자기부상열차의 주요 사양

항목	사양
시험선 길이	150 m
차량 구성	1량 1편성
차량 길이	12 m
만차 중량	28 ton
부상전자석 모듈 수	6 개
최대 속도	28.8 km/h
최대 가속도	1.1 m/s^2
LSM 극 피치	240 mm
LSM 공극 길이	10 mm

① 자기부상열차의 주행 저항 계산

단거리 시험선 운행용 자기부상열차는 1량 1편성으로 만차 중량이 28ton에 불과하고, 선형발전기를 사용하지 않는다. 따라서 차량의 속도에 따른 주행저항은 [그림 2.5.51]과 같이 나타난다. [그림 2.5.51]에서 확인할 수 있는 것처럼, 자기부상열차가

최대 속도 28.8km/h로 달릴 때 주행저항이 최대가 되며, 그 크기는 다음과 같이 계산된다.

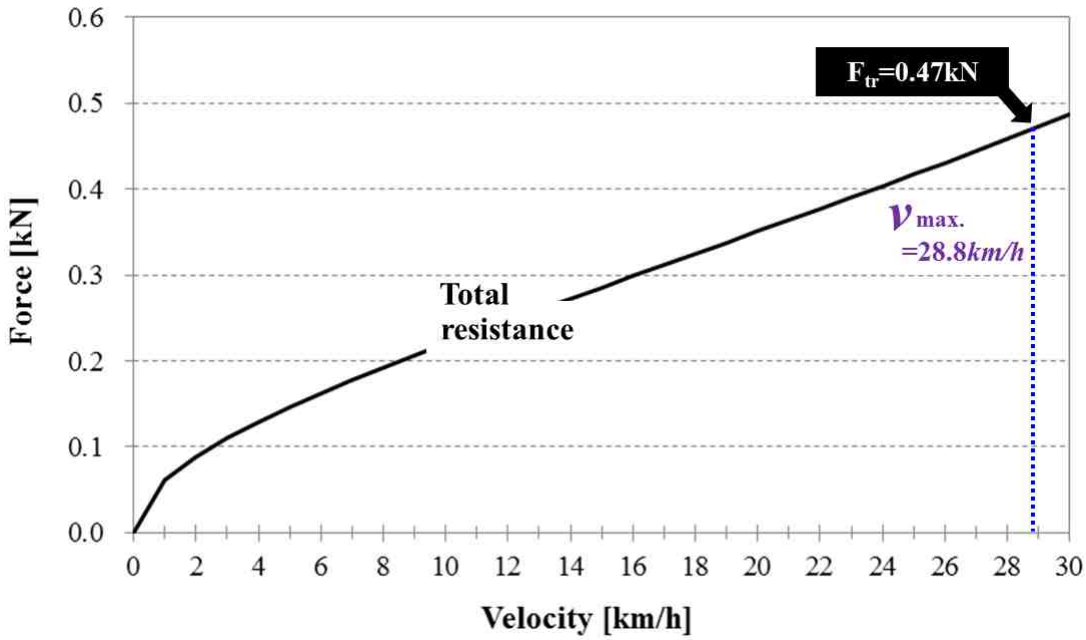
$$F_A[\mathrm{kN}] = 2.8 \times (28.8/3.6)^2 \times (0.265 \times 1 + 0.3) \times 10^{-3}$$
$$= 0.1 \ [\mathrm{kN}]$$

$$F_M[\mathrm{kN}] = 3 \times (0.1 \times \sqrt{(28.8/3.6)} + 0.02 \times (28.8/3.6)^{0.7})$$
$$= 0.37 \ [\mathrm{kN}]$$

$F_{LG}[\mathrm{kN}] = 0 \ [\mathrm{kN}]$ (선형발전기 사용안함)

$F_{Drag} = F_A + F_M + F_{LG} = 0.47 \ [\mathrm{kN}]$ (최대 속도 28.8km/h에서)

단거리 시험선 운행용 자기부상열차도 최대 속도인 28.8km/h에 도달하면 더 이상 속도를 올리지 않으므로 가속도는 0이 된다. 따라서 최대 속도에서 요구되는 추력은 저항력과 동일한 0.47kN이 된다.



[그림 2.5.51] 단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 속도-저항력 그래프

② 자기부상열차의 기동 추력 계산

단거리 시험선 차량도 실용화 노선 차량과 마찬가지로 차량을 공중에 띄운 후 기동하기 때문에 점착력이 불필요하며, 기동 시 속도는 0이므로 저항력은 거의 없다.

따라서 기동 가속도 1.1m/s^{2}을 만족시키기 위해 필요한 추력은 식에 의해서

$$F_{Accel} = ma$$
$$= 28[\text{ton}] \times 1.1[\text{m/s}^2] = 30.8[\text{kN}]$$

기동 가속도 1.1m/s^{2}을 만족시키기 위한 요구 추력은 30.8kN이며, 단거리 시험선 차량은 6개의 LSM Module이 장착되므로 LSM 1 Module당 5.13kN 이상의 추력이 필요하다.

LSM 1 Module당 약 5.22kN의 추력을 낼 수 있다면, 차량이 최대 속도 28.8km/h까지 도달하는 동안 가속도 1.1m/s^2 이상을 계속 유지할 수 있다. 이것은 저속에서 주행저항이 매우 작기 때문에 가능하다.

③ 자기부상열차의 요구 부상력 계산

단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 만차 중량이 28ton이고, 중력가속도 9.8m/s^{2}을 적용하면 LSM의 요구 부상력은 274.4kN이 되며, LSM 1 Module당 45.73kN의 부상력이 필요하다.

④ LSM 설계 모델

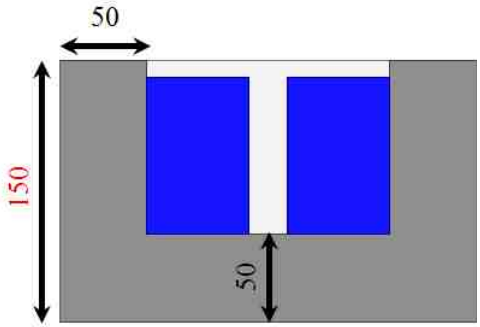
단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 LSM은 부상전자석과 고정자 철심을 실용화 모델과 동일하게 유지하면서 고정자 권선과 입력 전류의 크기만 변경하는 방식으로 설계하였다.

LSM이 저속 구간에서만 운전하기 때문에 고정자 권선을 1턴에서 4턴으로 늘렸다. 이에 따라 고정자 전류는 1턴 모델에 비해 약 1/4 수준으로 줄어들었다.

(2) LSM 부상전자석

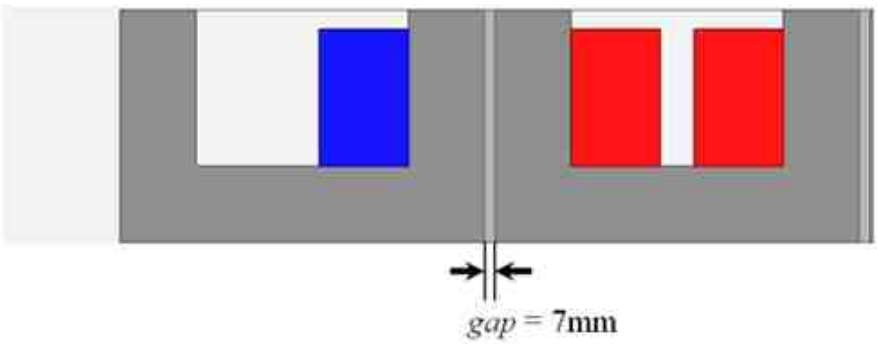
① 부상전자석 1차 모델

부상전자석은 차량의 만차 중량에 기반을 두어 설계가 시작된다. 만차 중량이 22ton일 경우, 정지 상태에서의 요구 부상력은 215.6kN이며, LSM 1 Module당 35.93kN씩 분담하게 된다. LSM 1 Module당 11개의 극을 가지므로 1극당 3.27kN 이상의 흡인력이 발생하도록 부상전자석을 설계하였다. 설계된 부상전자석의 설계 치수를 [그림 2.5.52]에 나타냈으며, 이 부상전자석은 정격전류 DC 20A, 극당 턴수 260턴을 갖는다.



[그림 2.5.52] 부상전자석 설계 치수(만차 중량 22ton 모델)

부상전자석 한 Module은 11개의 극을 가지며, [그림 2.5.52]와 같은 철심 세그먼트 12개로 구성된다. 부상전자석 Module은 [그림 2.5.53]과 같이 철심 세그먼트 사이에 7mm 간격의 공극을 갖는다. 부상전자석 철심 세그먼트의 가로 길이는 고정자 극 피치와 동일한 240mm이다. 이러한 철심 세그먼트 사이에 7mm의 공극이 추가됨으로써 한 극이 고정자 권선의 기자력 축과 정렬하면 나머지 10개의 극은 7mm씩 어긋나게 된다. 이렇게 설계함으로써 LSM의 부상력과 추력의 리플 성분을 상당히 줄일 수 있었다.

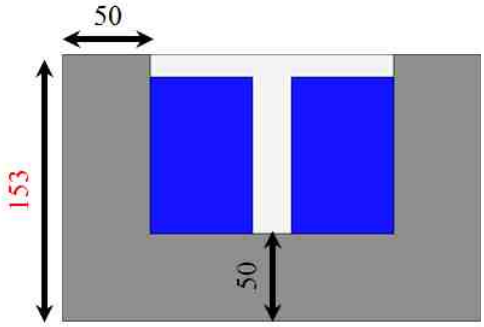


[그림 2.5.53] 부상전자석 세그먼트 사이의 공극

② 부상전자석 2차 모델

단거리 시험선 운행용 자기부상열차에 선형발전기를 설치하지 않는 대신 대용량의 배터리를 비롯하여 다양한 추가 장비가 장착된다. 따라서 차량 중량의 증가가 불가피해졌다. 결국 차량의 만차 중량을 22ton에서 28ton으로 증가하였으며, 중량 증가에 따라 부상전자석의 설계 변경을 진행하였다.

만차 중량이 28ton일 경우, 정지 상태에서의 요구 부상력은 274.4kN이며, LSM 1 Module당 45.73kN씩 분담하게 된다. 설계된 부상전자석의 설계 치수를 [그림 2.5.54]에 나타냈다. 대부분의 치수가 1차 모델과 동일하며, 철심의 높이만 1차 모델에 비해 3mm 늘어났다. 이 부상전자석은 정격전류 DC 17A, 극당 턴수 400턴을 갖는다.



[그림 2.5.54] 부상전자석 설계 치수(만차 중량 28ton 모델)

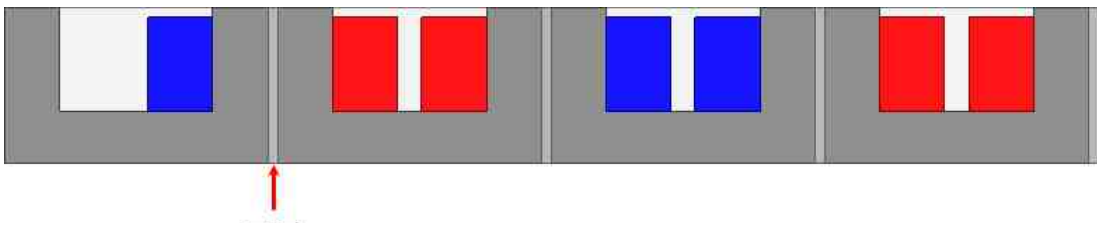
부상전자석이 정격전류 DC 20A, 극당 턴수 260턴에서 DC 17A, 400턴으로 변경되면서, 기자력이 약 30% 증가되었다. 따라서 고정자 전류가 340A(실효치)일 때, 부상전자석 한 Module의 추력이 기존 3.4kN에서 4.3kN으로 약 27% 증가되었다. 또한 정지 상태에서 부상전자석 한 Module의 부상력이 28.2kN에서 48.02kN으로 약 70% 증가되었다.

③ 부상전자석 세그먼트 간격 특성 해석

부상전자석은 [그림 2.5.54]와 같이 “ㄷ” 형태의 세그먼트로 이루어져 있으며 각 세그먼트의 길이는 240mm이고, 각 세그먼트 사이마다 7mm의 공극을 갖는다. 따라서 부상전자석의 첫 번째 극을 고정자 A상의 권선 기자력 축과 정렬시키면 부상전자석의 나머지 극들은 7mm씩 어긋나게 된다. 이것은 회전기에서 토크 리플 저감을 위해 사용하는 스큐와 동일한 효과를 갖는다.

세그먼트 사이 공간의 재질에 따른 출력 특성

부상전자석에서 철심 세그먼트 사이 공간의 재질에 따른 출력 특성을 보기 위해 세그먼트 사이 공간을 비자성체(Air)로 채운 경우와 자성체(S08)로 채운 경우에 대하여 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 비교해 보았다.

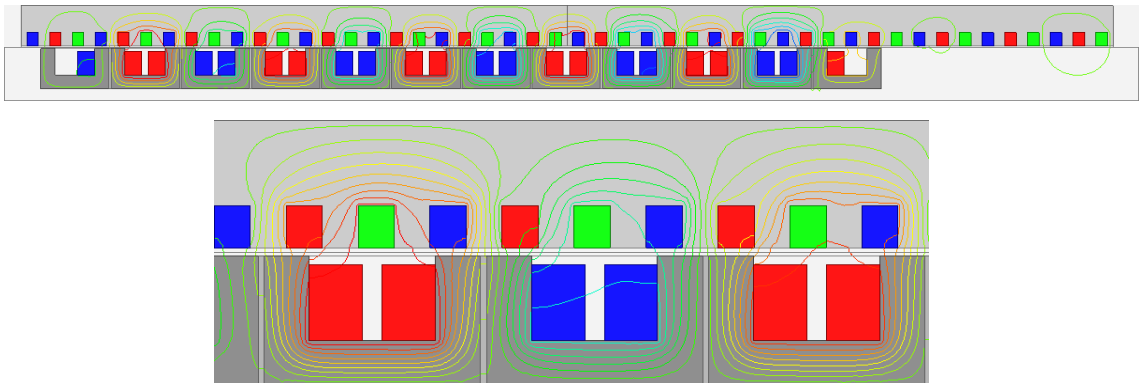


[그림 2.5.55] LSM 부상전자석에서 세그먼트 사이의 공간

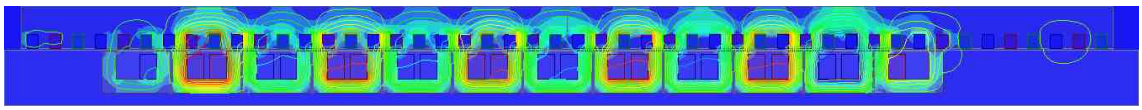
유한요소해석 결과 자속선도와 자속밀도분포를 [그림 2.5.56]부터 [그림 2.5.59]까지 나타냈다. 세그먼트 사이 공간이 비자성체(Air)인 경우, Air가 자속 장벽 역할을 해

서 철심에 자속선이 고르게 분포되어 있는 것을 볼 수 있지만, 자성체(S08)인 경우에는 세그먼트마다 자속선이 다르게 분포되는 것을 확인할 수 있다.

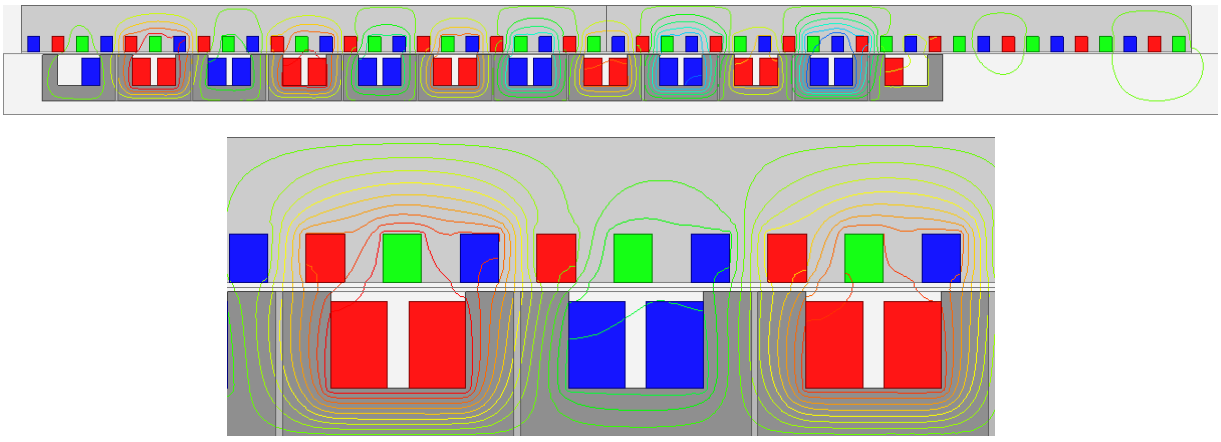
세그먼트 사이의 재질에 따른 추력 특성은 [그림 2.5.60]을 통해 알 수 있듯이 자성체(S08)로 채워진 경우에는 평균 추력이 3.508kN이고, 비자성체(Air)로 채워진 경우에는 3.502kN으로 거의 동일하게 발생하며, 추력 파형도 거의 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.



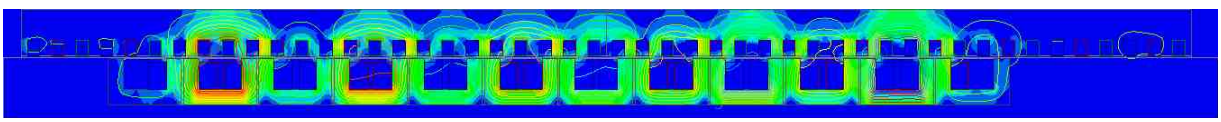
[그림 2.5.56] 세그먼트 사이가 비자성체(Air)인 경우 LSM 자속선도



[그림 2.5.57] 세그먼트 사이가 비자성체(Air)인 경우 LSM 자속밀도분포



[그림 2.5.58] 세그먼트 사이가 자성체(S08)인 경우 LSM 자속선도

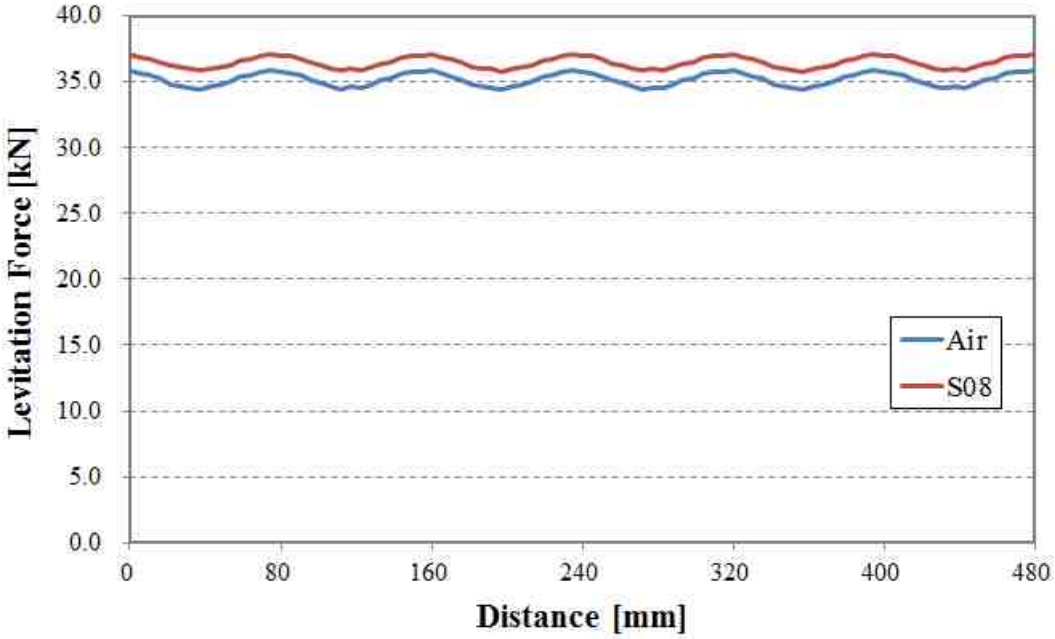


[그림 2.5.59] 세그먼트 사이가 자성체(S08)인 경우 LSM 자속밀도분포



[그림 2.5.60] 세그먼트 사이의 재질에 따른 추력 파형

세그먼트 사이의 재질에 따른 부상력 특성은 [그림 2.5.61]을 통해 알 수 있듯이 자성체(S08)로 채워진 경우, 평균 부상력이 36.48kN으로 비자성체(Air)인 경우의 35.18kN보다 조금 더 높게 나타났다. 이유는 부상저자석의 유효 단면적 증가로 자로가 확장되었기 때문으로 판단된다. 세그먼트 사이의 공간을 부상력이 크게 나오는 자성체(S08)로 채우는 것이 시스템 전체의 효율을 고려했을 때 유리하지만, 제작성이나 재료비를 고려할 경우, 비자성체(Air)로 채우는 경우가 더 합리적이라고 할 수 있다.



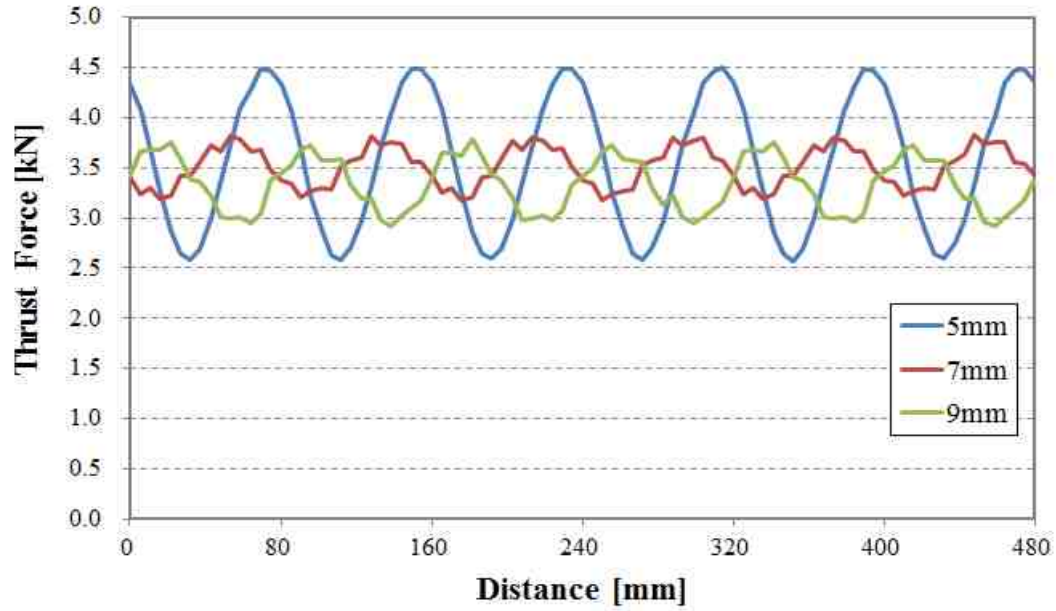
[그림 2.5.61] 세그먼트 사이의 재질에 따른 부상력 파형

세그먼트 사이의 공극 길이에 따른 출력 특성

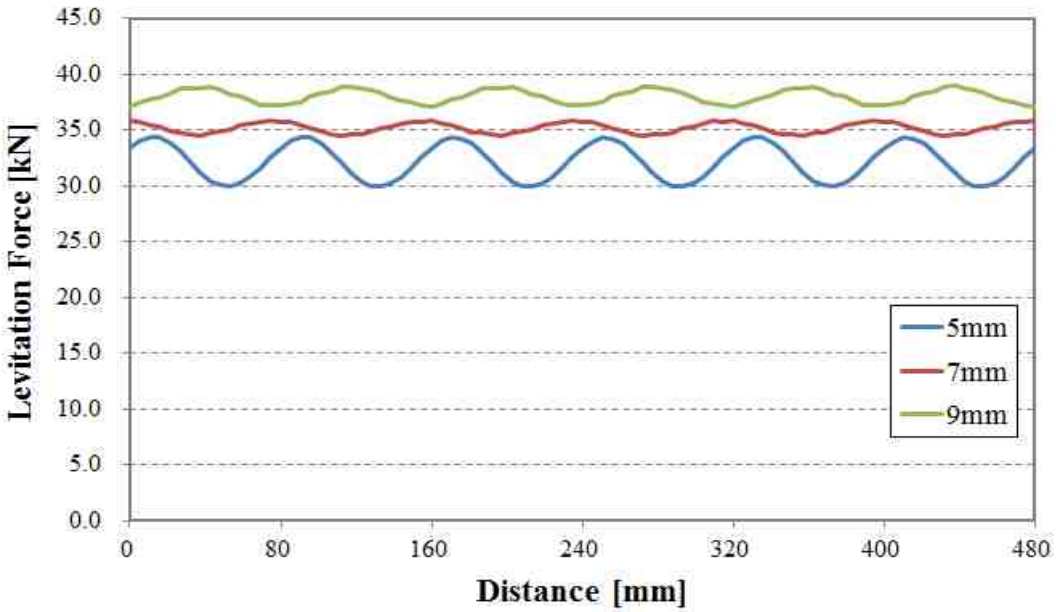
부상저자석에서 철심 세그먼트 사이에 7mm 두께의 비자성체(Air)가 존재하는데, 이 부분의 두께를 다르게 하여 각각의 출력 특성을 비교해 보았다. 철심 세그먼트 사이의 두께를 [표 2.5.12]과 같이 5mm, 7mm, 9mm로 선정한 후 유한요소해석을 수행하였다.

[표 2.5.12] 부상전자석 철심 세그먼트 사이 두께에 따른 추력 및 부상력 해석 결과

구분 / 두께	추력		부상력	
	평균값 [kN]	리플 [kN]	평균값 [kN]	리플 [kN]
5 mm	3.58	1.93	32.12	4.48
7 mm	3.51	0.66	35.18	1.46
9 mm	3.34	0.88	38.02	1.89



[그림 2.5.62] 세그먼트 사이 두께에 따른 추력 파형



[그림 2.5.63] 세그먼트 사이 두께에 따른 부상력 파형

철심 세그먼트 사이의 두께가 5mm일 때, 평균 추력이 가장 높으나 추력 리플도 가장 높게 발생되고 있고, 9mm일 때는 평균 부상력이 최대가 되지만, 평균 추력이 가장 낮았다. 두께가 7mm일 때는 5mm일 때의 평균 추력과 크게 차이가 나지 않았으나, 추력 리플이 5mm일 때에 비해 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 따라서 철심 세그먼트 사이의 두께를 7mm로 하는 것이 적당하다.

(3) LSM 부상력 제어를 고려한 해석

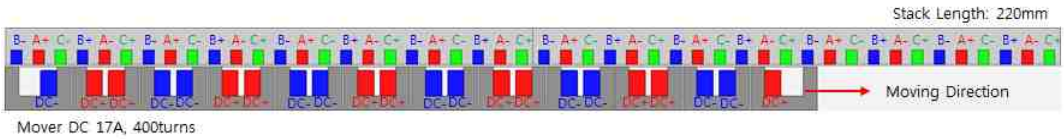
①단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 LSM 설계 모델

단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 설계 사양을 [표 2.5.12]에 나타내었다. 이 자기부상열차는 원래 최대속도 550km/h를 목표로 설계되었으나, 150m의 단거리 시험선 운행을 위해 LSM 부상전자석 모듈을 46개에서 6개로 줄이고, 고정자 권선을 1턴에서 4턴으로 설계변경을 한 모델이다.

[표 2.5.13] 단거리 시험선 자기부상열차의 설계 사양

항목	사양
시험선 길이	150 m
만차 중량	28 ton
부상전자석 모듈 수	6 개
최대 속도	28.8 km/h
최대 가속도	1.1 m/s^2
LSM 극 피치	240 mm
LSM 공극 길이	10 mm
LSM 적층 길이	220 mm

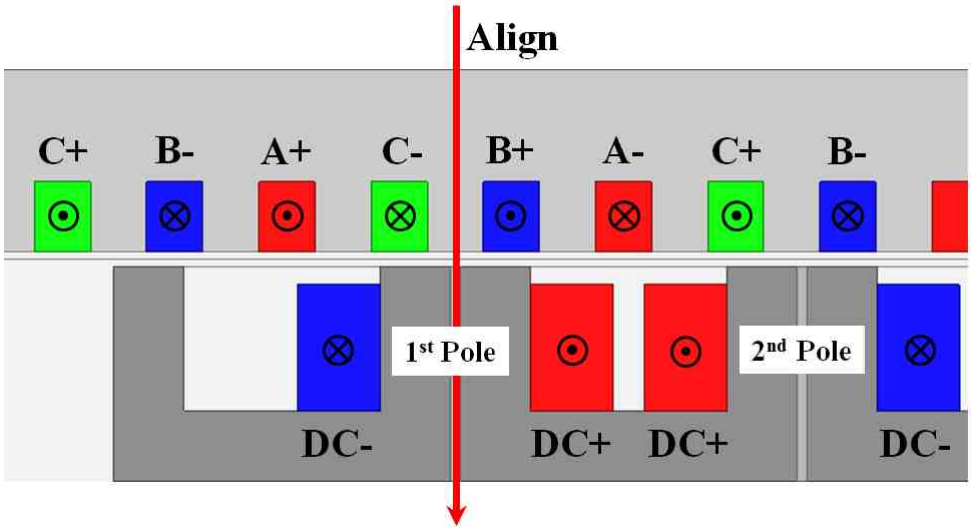
[그림 2.5.64]는 LSM 설계 모델을 나타낸다. 이 모델은 상전도 흡인식의 추진/부상 일체형 LSM이며, 위쪽이 LSM 고정자이고 아래쪽이 부상전자석 1 Module에 해당한다. 고정자는 전체 150m 길이에서 3.84m만 나타냈고 부상전자석 한 모듈은 그림과 같이 11개의 극을 갖는다. 부상전자석의 계자권선은 1극당 400턴이며 정격전류는 DC 17A이다. 고정자 권선의 정격전류는 AC 340A(실효치)이며, 전류밀도는 3.6A/mm^2이다.



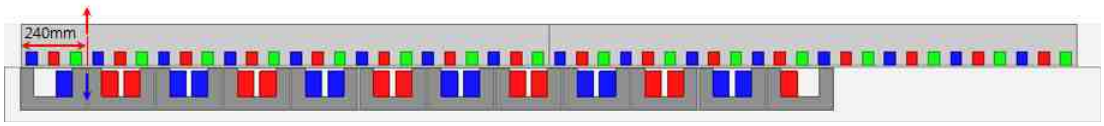
[그림 2.5.64] LSM 설계 모델

[그림 2.5.64]의 LSM 설계 모델의 특성 해석을 위해서는 부상전자석의 초기위치를 설정해야한다. 일반적으로 LSM 해석에 있어서 부상전자석의 초기위치는 [그림 2.5.65]와 같이 고정자 A상 권선의 기자력 축과 부상전자석의 극 중심을 정렬시킨 상태를 잡는다. 그러나 부상전자석의 철심 세그먼트 사이마다 7mm의 공간이 존재하기 때문에 이 부상전자석의 경우 하나의 극을 정렬시키면, 나머지 10개의 극은 정렬이 되지 않는 문제가 있다. 따라서 [그림 2.5.66]과 같이 부상전자석의 첫 번째 극

이 A상 권선축과 정렬되었을 경우를 기준 위치로 선정하였으며, 이 위치를 LSM 특성 해석을 위한 초기위치로 설정하였다.



[그림 2.5.65] LSM 특성해석을 위한 초기위치 설정 상태



[그림 2.5.66] 부상전자석의 첫 번째 극이 A상 권선축과 정렬된 경우

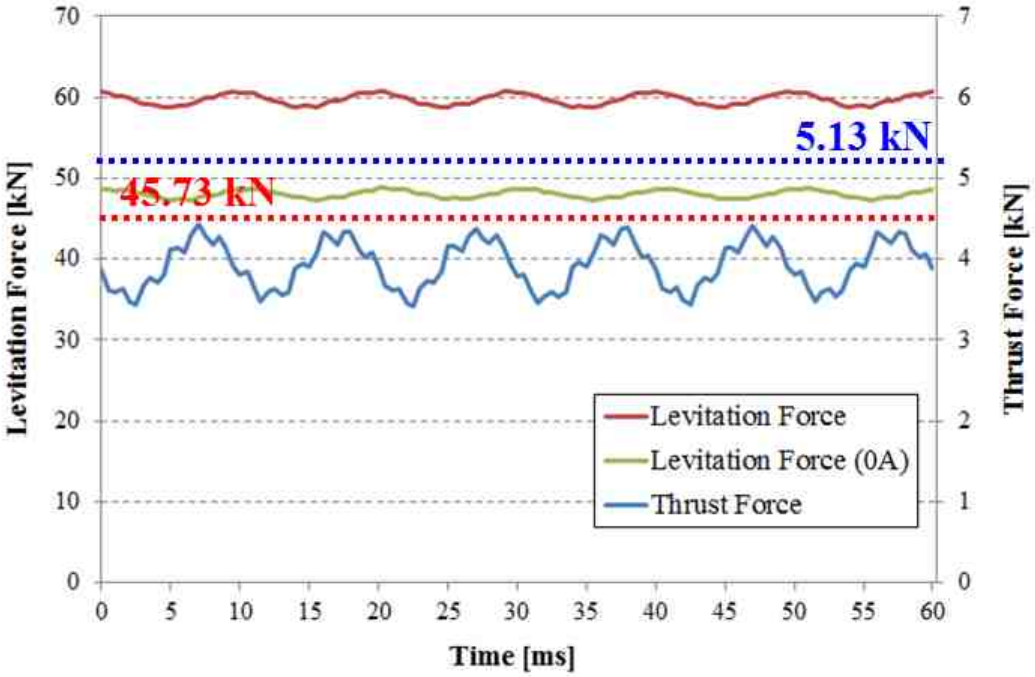
② LSM의 요구 부상력 및 요구 추력 산정

단거리 시험선 자기부상열차의 무게가 28ton이므로 필요한 전체 부상력은 차량 무게에 중력가속도를 곱한 274.4kN이 된다. 따라서 부상전자석 한 모듈당 45.733kN의 부상력이 요구된다. 이 요구 부상력보다 큰 부상력이 발생하면 부상전자석이 LSM 고정자에 달라붙기 때문에 항상 요구량만큼의 부상력을 유지해야 한다.

LSM의 요구 추력을 산정하기 위해서는 자기부상열차의 주행저항을 계산해야 한다. 일반적으로 추진/부상용 LSM의 경우, 마찰력은 없으나 공기역학 저항, 자기적 저항, 선형 발전에 의한 저항을 고려하여 주행저항을 계산해야 한다. 본 연구의 단거리 시험선에서는 선형 발전을 하지 않으므로 선형 발전에 의한 저항은 무시하였다. 단거리 시험선에서의 최대 속도가 28.8km/h밖에 되지 않으므로 최대 주행저항은 약 0.47kN에 불과하다. 28ton의 차량이 최대 속도 28.8km/h에서 최대 가속도 1.1m/s^{2}을 내기 위해서는 식 (2.6)에 의해 가속을 위한 추력 30.8kN에 주행저항이 0.47kN을 더한 31.27kN 이상의 추력이 필요하다. 따라서 부상전자석 한 모듈당 5.212kN 이상의 추력이 필요하다. 그러나 본 연구의 목표 사양은 기동 가속도가 1.1m/s^{2}이기 때문에 부상전자석 한 모듈당 요구 추력은 5.13kN이다.

③ 계자 전류 크기에 따른 LSM 특성

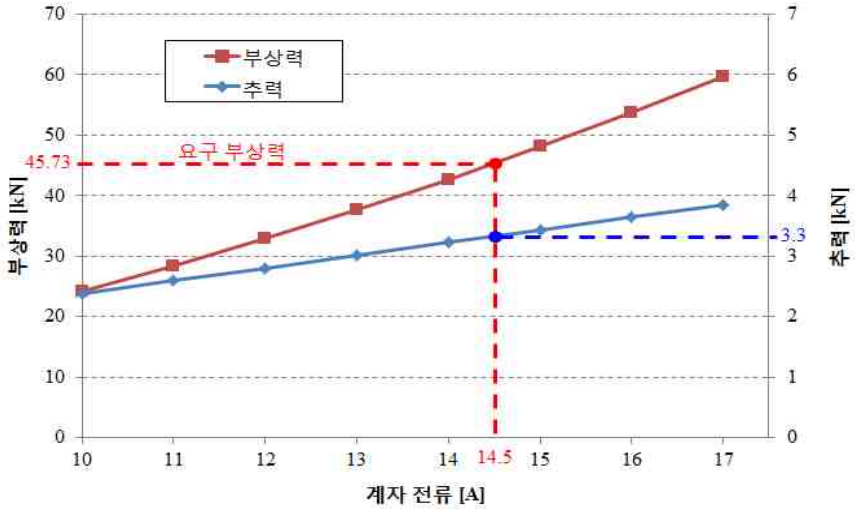
자기부상열차는 차량 중량만큼의 부상력을 항상 일정하게 유지해야 한다. 우선 요구 부상력을 고려하지 않고 고정자 권선과 부상전자석의 계자 권선에 정격전류 340A를 인가하여 특성 해석을 실시하였으며, 그 결과를 [그림 2.5.67]에 나타냈다.



[그림 2.5.67] LSM 설계 모델의 추력 및 부상력 파형

[그림 2.5.67]에서 빨간색 점선은 요구 부상력(45.73kN)을 나타내고, 파란색 점선은 기동 가속도 1.1m/s^{2}을 만족시키기 위해 필요한 요구 추력(5.13kN)을 나타낸다. 정격전류 340A에서 LSM 설계 모델의 평균 추력은 3.93kN으로 요구 추력에 미치지 못하고, 평균 부상력은 59.72kN으로 요구 부상력을 훨씬 상회한다. 따라서 부상력을 낮추고 추력을 높이는 운전 조건을 찾을 필요성이 있다.

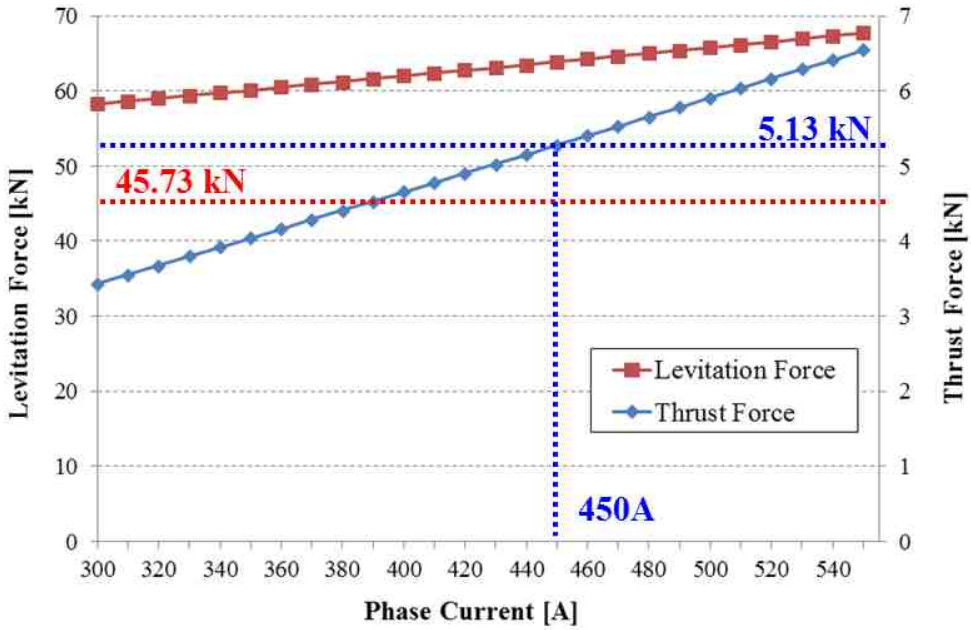
[그림 2.5.68]은 LSM 고정자에 3상 교류전류 340A가 인가될 때, 부상전자석의 계자 전류 크기에 따른 LSM의 부상력 및 추력의 크기 변화를 나타낸다. 부상전자석의 계자 전류가 14.5A일 때 요구 부상력 45.73kN을 만족하며, 이때의 추력은 약 3.3kN으로 요구 추력 5.13kN에는 미치지 못한다.



[그림 2.5.68] 계자 전류 크기에 따른 LSM의 부상력 및 추력 특성(고정자 전류 340A)

④ 부상력 제어를 고려한 LSM 특성 해석

LSM의 추력을 높이기 위해서는 고정자 전류의 크기를 높여야 한다. LSM 고정자 전류를 어느 정도까지 높여야할지 결정하기 위해서 고정자 전류 크기에 따른 부상력과 추력의 양상을 유한요소해석을 통해 확인하였다. 이때 계자 전류는 17A로 일정하게 유지한 상태에서 고정자 전류 크기만 바꿔가면서 해석하였으며, 그 결과를 [그림 2.5.69]에 나타냈다. 여기에서 부상력 제어는 고려하지 않았다.

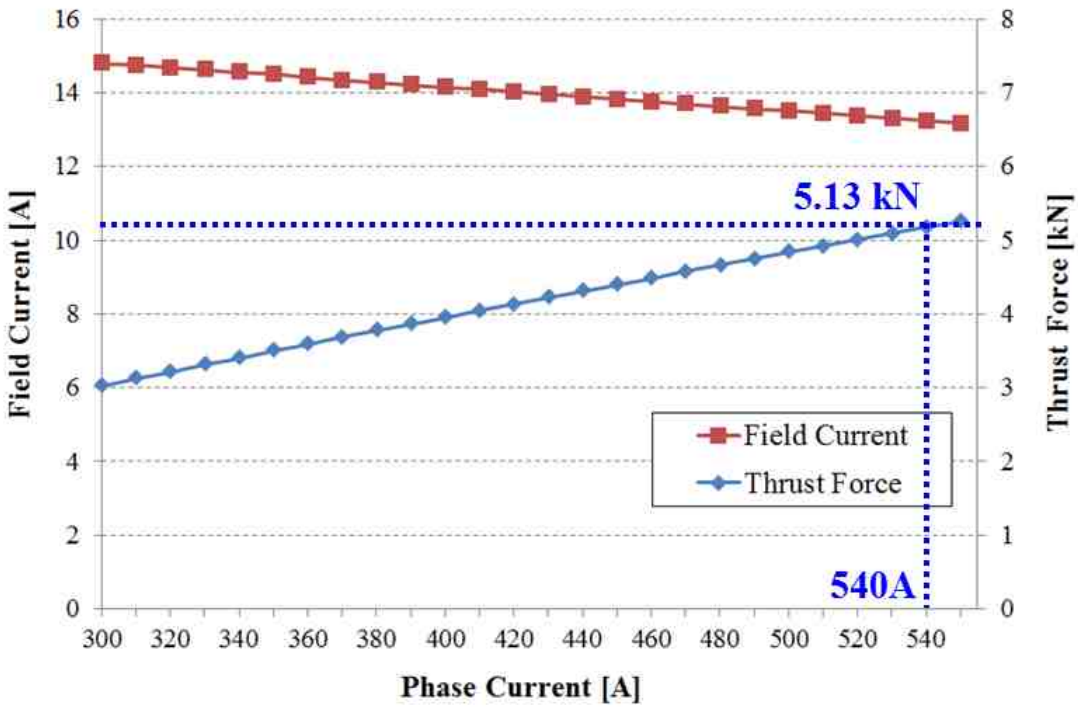


[그림 2.5.69] 고정자 전류 크기에 대한 부상력 및 추력

[그림 2.5.69]에서 고정자 전류가 450A(실효치; 이하 모든 고정자 전류값은 실효치)일 때 추력이 5.277kN으로 요구 추력을 만족하지만, 이때의 부상력은 63.904kN으로 요구 부상력 45.733kN을 크게 웃돈다. 계자전류를 조정하여 부상력 제어를 시행할 경우, 부상력을 45.733kN에 맞추기 위해서 계자전류는 17A에서 13.82A로 떨어지고, 추력 또한 5.277kN에서 4.397kN으로 약 16.7% 감소한다. 따라서 부상력을 일정하게 유지하면서 요구 추력을 만족시키기 위해서는 고정자 전류를 450A보다 더 높여야 한다.

[그림 2.5.70]은 부상력 일정 제어를 실행할 경우, 고정자 전류 크기에 따른 계자전류의 크기 및 추력을 나타낸다. 상전류가 증가할수록 부상력을 일정하게 유지하기 위한 계자전류의 크기는 점점 감소하는 반면, 추력은 점점 증가하는 것을 확인할 수 있다. [그림 2.5.69]에서 고정자 전류가 550A일 때, 부상력 제어에 의한 계자 전류는 13.16A가 되고, 이 때 추력은 5.254kN이 되어 요구 추력을 만족시킨다.

이 해석결과에서 알 수 있듯이 부상력 제어를 고려하지 않을 경우 450A의 고정자 전류로 요구 추력을 달성할 수 있지만, 계자전류 조정을 통한 부상력 제어를 고려할 경우 550A의 고정자 전류를 필요로 한다. 따라서 계자전류 조정을 통한 부상력 제어를 실시할 경우 요구 추력 만족을 위해서 고정자 권선 및 인버터 용량을 더 높여야 하는 문제가 있다.

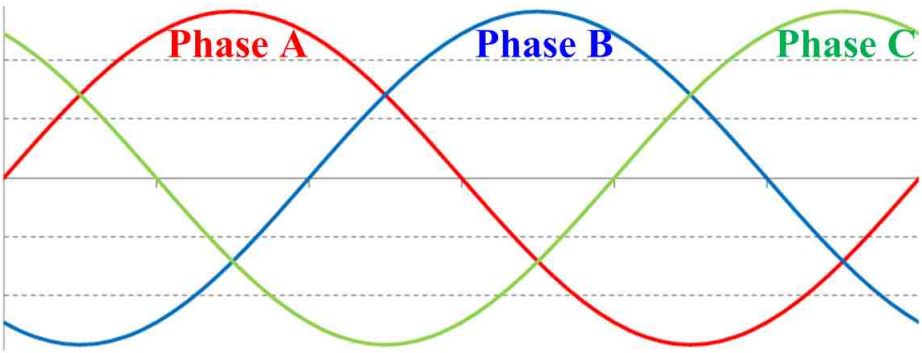


[그림 2.5.70] 부상력 일정 제어 시 고정자 전류에 대한 계자전류 및 추력

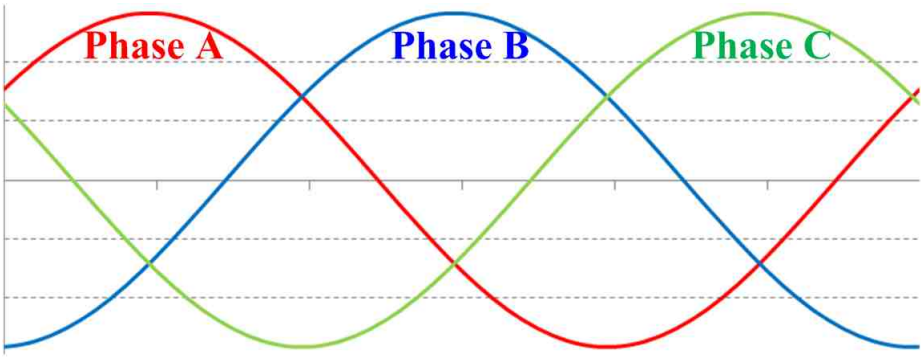
일정한 부상력을 유지하기 위해서는 일정한 공극 자속량을 유지해야 한다. 그러나 추력 향상을 위해 고정자 권선의 전류를 높이게 되면 공극 자속량도 함께 증가하여

부상력이 증가하게 된다. 따라서 계자 권선의 전류를 낮추면 일정한 공극 자속량을 유지하게 되고, 추력은 기대치보다 작게 증가한다. 요구 추력을 만족시키기 위해서는 더 많은 양의 고정자 전류를 인가해야 하므로 시스템의 효율이 저하된다. 본 연구에서는 고정자 전류의 증가로 인한 자속량 증가를 상쇄시키기 위해, 계자 전류 조정이 아닌 영구자석 전동기에서 주로 사용하는 약자속 제어법을 검토하였다.

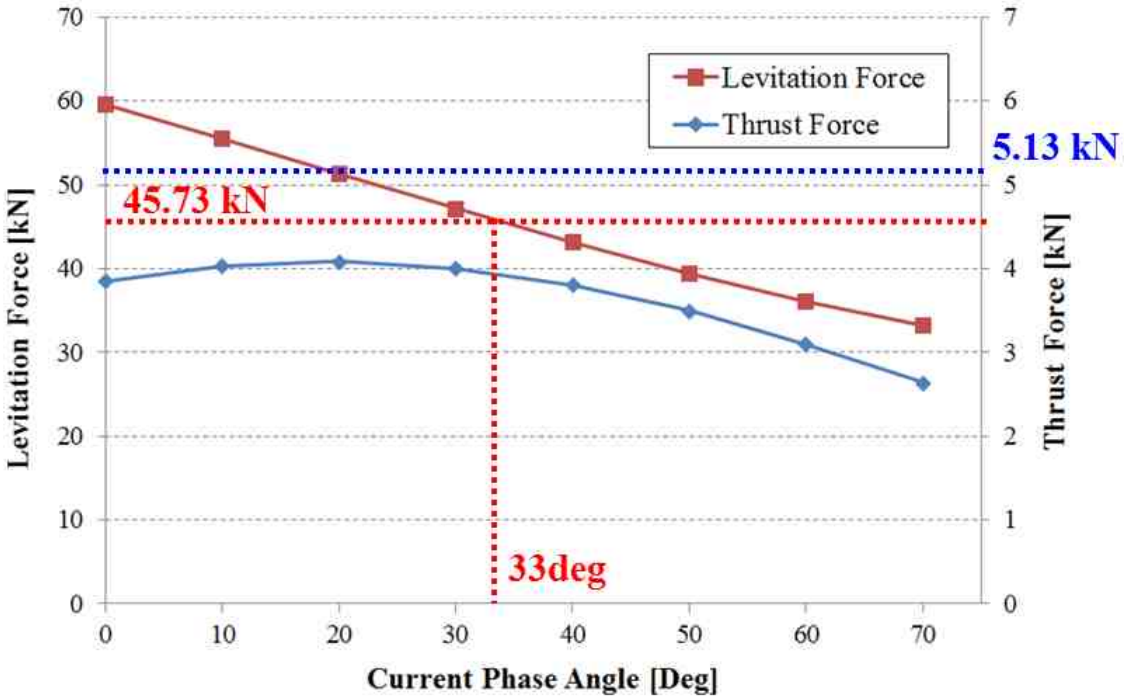
LSM 고정자 A상 권선의 기자력 축과 부상전자석의 첫 번째 극의 중심을 정렬시킨 상태를 D축 정렬 상태라 하겠다. D축 정렬 상태에서 A, B, C상에 [그림 2.5.71]과 같은 3상 평형전류를 인가하면 전류위상각이 0deg가 된다. 전류위상각을 33deg로 설정하면 [그림 2.5.72]와 같이 33deg만큼 위상이 이동된 전류가 인가된다. [그림 2.5.73]과 같이 위상이 이동된 전류가 고정자 권선에 인가되면 계자 권선에 의한 자속을 고정자 권선에 의한 자속이 상쇄시키므로 전체적인 공극 자속량이 감소하게 된다. 이렇게 전류위상각을 조정하여 공극 자속량을 줄이는 방식이 본 연구에서 사용된 약자속 제어법이다.



[그림 2.5.71] 전류위상각 0deg일 때 입력 상전류



[그림 2.5.72] 전류위상각 33deg일 때 입력 상전류

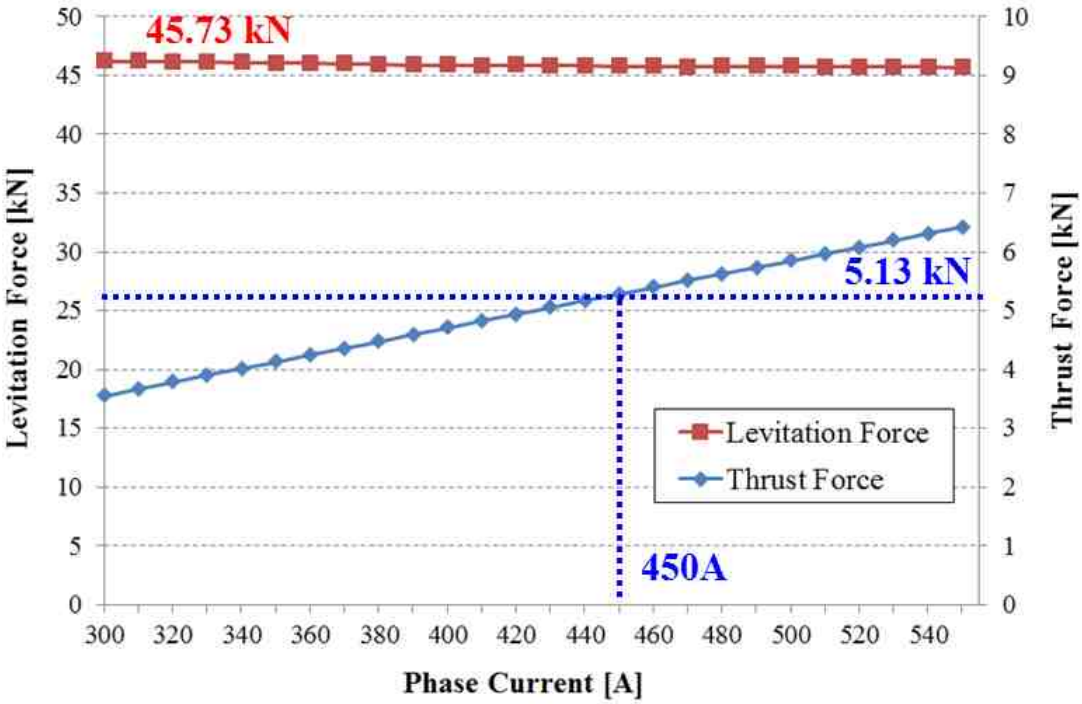


[그림 2.5.73] 전류위상각에 대한 부상력 및 추력

[그림 2.5.73]은 고정자 전류 340A, 계자전류 17A일 때, 전류위상각에 대한 부상력 및 추력 양상을 보여준다. 전류위상각이 증가함에 따라 부상력은 선형적으로 감소하고, 추력은 20deg 근처에서 최대가 된다. 부상전자석은 구조적으로 돌극성을 갖기 때문에 20deg 근처에서 추력이 최대가 되는 것으로 볼 수 있다. 전류위상각이 증가함에 따라 상쇄시키는 자속량이 증가하게 되어 부상력이 거의 선형적으로 감소하게 된다. 전류위상각 0deg에서 요구량을 크게 웃돌았던 부상력은 전류위상각 33deg에서 요구 부상력 45.733kN을 만족한다. 이때의 추력은 3.954kN으로 요구 추력에는 아직 미치지 못한다.

계자전류 17A, 전류위상각 33deg를 그대로 유지한 상태에서, 고정자 전류 크기를 바꿔가면서 부상력과 추력 특성 해석을 실시하여 그 결과를 [그림 2.5.74]에 나타냈다. 고정자 전류가 증가함에 따라 부상력은 아주 미세하게 감소하였다. 이것은 동일한 전류위상각에서 전류 크기가 증가하면, D축 전류의 크기도 함께 증가하게 되는데, 부상전자석에서 발생하는 계자 자속을 증가된 D축 전류가 더 많이 상쇄시키기 때문이다. 그러나 감소되는 부상력은 전체 부상력에 비해 매우 작기 때문에 고정자 전류가 증가하여도 부상력은 거의 변하지 않는다고 볼 수 있다.

한편, LSM의 추력은 고정자 전류 크기에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 요구 추력은 고정자 전류 크기 450A부터 만족하기 시작하는 것도 확인할 수 있다.



[그림 2.5.74] 전류위상각 33deg일 때 상전류에 대한 부상력 및 추력

앞서 계자전류 조정을 통한 부상력 제어 시에는 계자전류 13.16A, 고정자 전류 550A에서 요구 추력을 만족시켰지만, 약자속 제어법을 통한 부상력 제어 시에는 계자전류 17A, 고정자 전류 450A에서 요구 추력을 만족시켰다. 부상전자석 한 모듈의 계자 권선을 모두 직렬로 연결할 경우 권선 저항은 약 9.4Ω이고, 150m 선로에서 고정자 권선 1상의 저항은 약 30mΩ이므로, 효율과 인버터 용량 측면에서 약자속 제어법을 통한 부상력 제어가 더 유리하다. 또한 고정자 권선의 전류밀도를 고려하면, 정격전류 340A가 흐를 때, 전류밀도는 3.6A/mm^{2}이며, 450A가 흐르면 4.7A/mm^2, 550A가 흐르면 5.8A/mm^{2}의 전류밀도를 갖는다. 전류밀도가 낮을수록 열적으로 안정적이므로 동일한 추력을 발생한다면 고정자 전류가 작은 것이 유리하다.

약자속 제어법을 이용하여 LSM의 부상력을 일정하게 유지하기 위해서는 부상전자석의 위치를 정확하게 감지할 수 있어야 한다. 그러나 자기부상열차 추진용 LSM은 정확한 위치 검지가 어렵고, 약간의 오차를 갖는다. 따라서 약자속 제어법만으로는 정밀한 부상력 제어가 불가능하며, 계자 전류 제어법과 함께 사용해야 한다. 즉, 전류위상각을 조정하여 LSM의 부상력을 요구 부상력 근처까지 가져간 후, 계자 전류 제어를 통해 정밀하게 요구 부상력을 맞추는 식으로 운전해야 한다.

정추력 영역에서의 운전 조건

실용화 모델의 만차 중량이 188.5ton이고 46개의 LSM Module을 가지므로 LSM 1 Module당 부상력 40.16kN을 유지하는 조건으로 해석하였다. 자기부상열차는 출발

직후 주행저항이 거의 0이기 때문에 최대 가속도를 낼 수 있다. 최대 가속도 1.1m/s^{2}을 만족시키기 위해서 필요한 LSM 운전 조건은 다음과 같다.

1) 고정자 전류 1700A, 계자전류 17A, 전류위상각 44deg
2) 고정자 전류 2100A, 계자전류 12.25A, 전류위상각 0deg

최대 속도에서의 운전 조건

정추력 영역에서의 운전 조건과 같은 이유로 LSM 1 Module당 부상력 40.16kN을 유지하는 조건으로 해석하였다. 최대 속도 550km/h에서 가속도는 0이기 때문에 요구 추력은 주행저항과 동일한 79.57kN이 되며, LSM 1 Module당 1.73kN 이상의 추력이 발생하는 운전 조건을 찾아야 한다. 그러나 고속 영역에서는 역기전력이 매우 높게 발생하므로 전압 제한치를 고려하여 역기전력 크기에 제한을 두고 운전 조건을 찾아야 한다. 역기전력의 크기를 5,000V로 제한하였을 때, 최대속도 550km/h에서 요구 추력을 만족시키기 위해서 필요한 LSM 운전 조건은 다음과 같다.

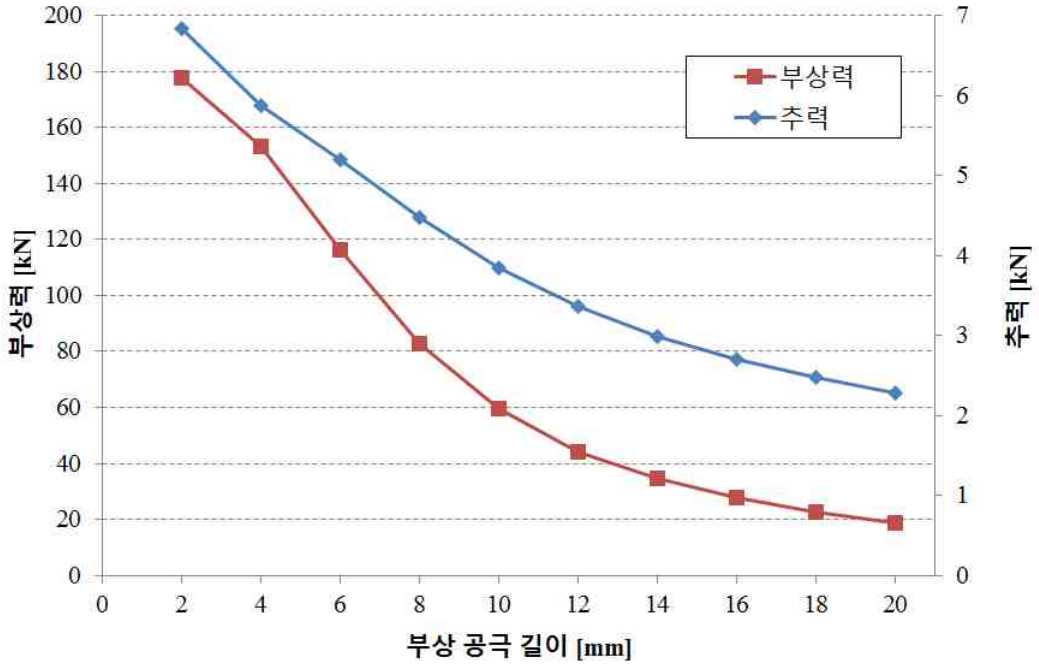
1) 고정자 전류 800A, 계자전류 17A, 전류위상각은 63deg부터 66deg까지

한편, 전류위상각을 0deg로 고정하고 계자전류를 조정하여 550km/h에서 운전할 경우, 운전 조건은 고정자 전류 800A, 계자전류 14.55A, 전류위상각 0deg이다. 그러나 이 경우 역기전력이 약 5,443V로 제한치 5,000V를 넘게 된다.

⑥ LSM 설계 파라미터 분석

부상공극 길이에 따른 LSM 특성 해석

고정자 권선의 상전류를 340A, 전류위상각을 0deg, 부상전자석의 계자 전류를 DC 17A로 인가한 상태에서 부상공극 길이를 변경하면서 평균 추력 및 평균 부상력을 계산하여 [그림 2.5.75]에 나타냈다. [그림 2.5.75]를 통해 알 수 있듯이, 공극 길이가 늘어남에 따라 추력 및 부상력은 급격히 감소한다.



[그림 2.5.75] 부상공극 길이에 따른 LSM 추력 및 부상력 특성

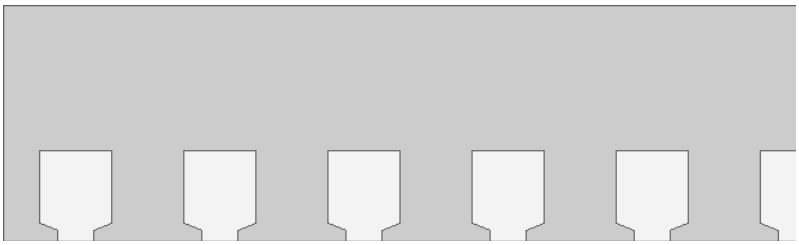
LSM이 정지 상태(고정자 상전류 0A)에 있을 때, 부상공극 길이에 따라 요구되는 부상전자석의 계자 전류 크기를 산정하였다.

1) LSM 고정자와 부상전자석 사이의 공극 길이가 5mm를 유지하고 있는 경우, 계자 전류는 약 7.3A만 필요하다. 이 전류보다 낮은 전류를 인가하면 차량은 가라앉으면서 공극 길이가 늘어나게 될 것이다.
2) 공극 길이가 10mm를 유지하고 있는 경우, 계자 전류는 약 16.6A가 필요하다.
3) 공극 길이가 20mm를 유지하고 있는 경우, 계자 전류는 약 29.7A가 필요하다. 공극 길이 20mm인 상태에서 계자 전류를 29.7A 이상 인가하면, 차량은 부상하여 공극 길이가 감소하게 될 것이다.

고정자 슬롯 개구폭에 따른 LSM 특성 해석

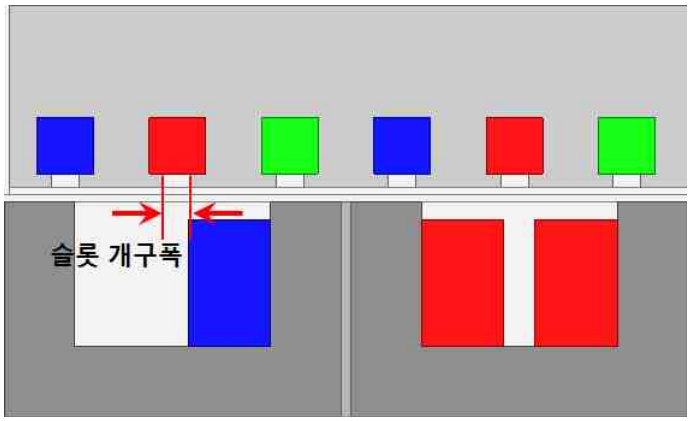
LSM의 부상전자석의 형상은 이미 결정된 상태로 설계 파라미터로 선정할 수 없으며, 고정자의 경우 극 피치(240mm)와 적층길이(220mm)도 이미 결정된 상태로 설계 파라미터로 선정할 수 없다. 따라서 고정자의 슬롯 개구폭과 치폭을 설계 파라미터로 선정하였다.

고정자 권선이 1턴인 실용화 모델에서는 오픈 슬롯 구조를 갖기 때문에 [그림 2.5.76]과 같은 슈(Shloe)를 갖지 못한다. 그러나 단거리 시험선 모델은 고정자 권선이 4턴으로 슈 구조를 가질 수 있다. 고정자 치가 슈 구조를 가지면 슬롯 개구폭을 설계 파라미터로 선정할 수 있다.



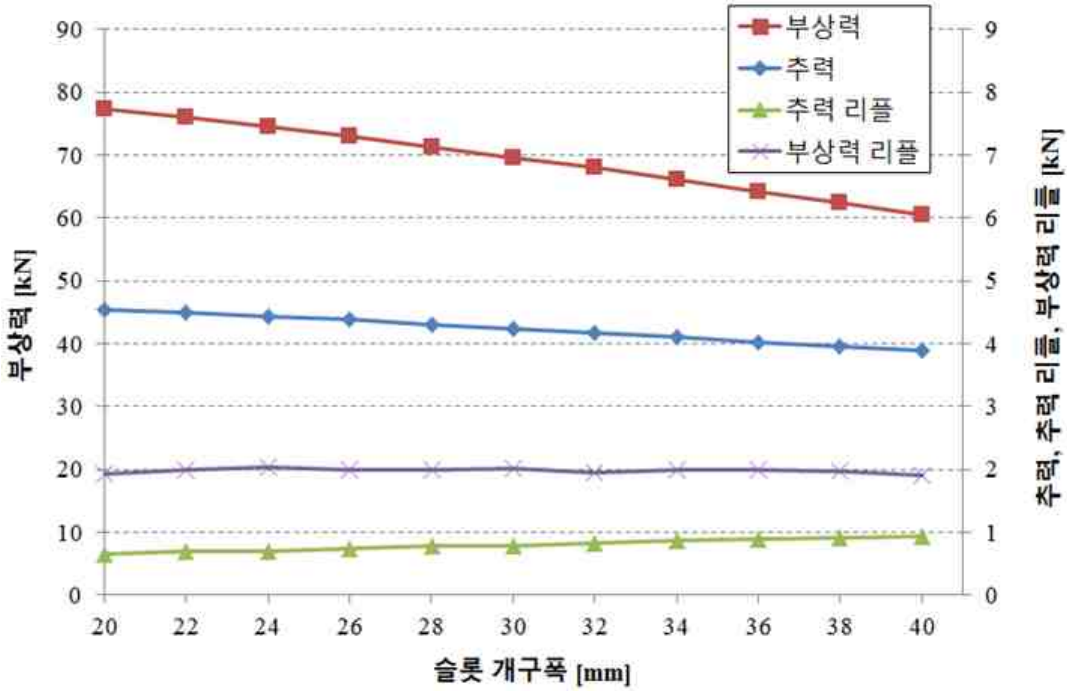
[그림 2.5.76] 고정자 치의 슈(Shoe) 구조

4턴의 고정자 권선은 자기부상열차의 저속구간에서만 적용가능하며, 전체 시스템에는 적용이 불가능하고, 제작이 난해해지는 단점이 있다. 그러나 초고속 자기부상열차 선로에서 저속구간, 고속구간에 따라 고정자 권선 턴 수를 다르게 설치할 경우, 저속구간에서는 반폐 슬롯을 적용하여 저속영역 성능향상을 기대할 수 있다. 기대되는 성능향상을 확인을 위해 [그림 2.5.77]과 같이 슬롯 개구폭을 설계변수로 선정하여 특성 해석을 수행하였다.

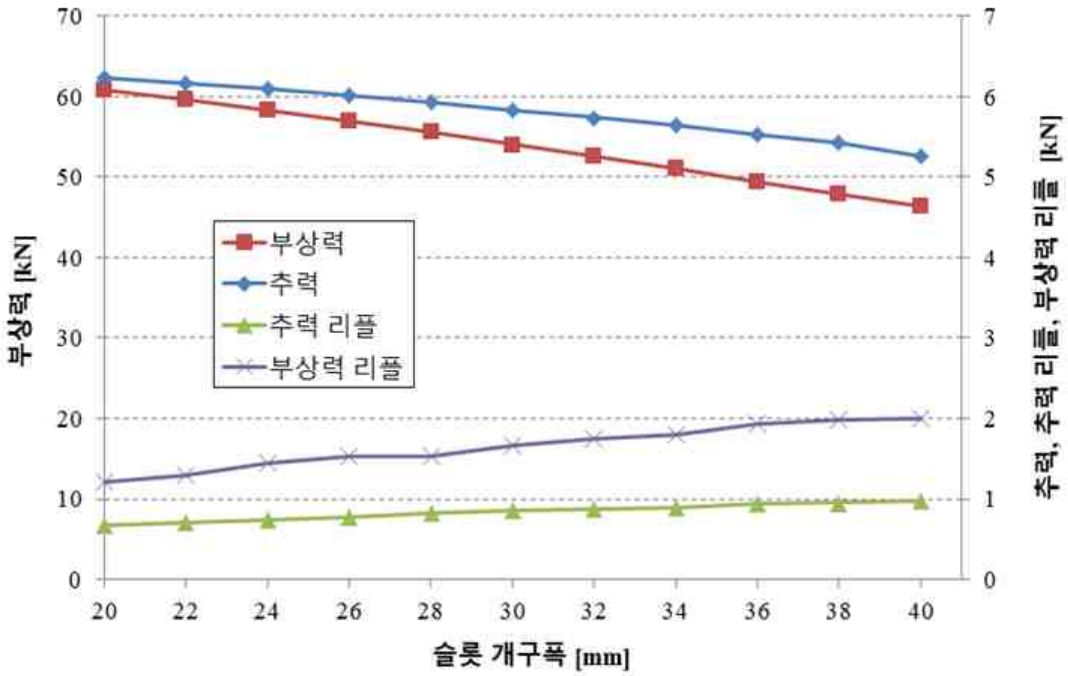


[그림 2.5.77] 반폐 슬롯 고정자의 설계변수(슬롯 개구폭)

LSM의 고정자 전류 340A, 계자 전류 17A, 전류위상각 0deg 상태(부상력 제어 고려안함)로 해석 수행하여 [그림 2.5.78]과 같은 그래프를 얻었다. [그림 2.5.78]에서 슬롯 개구폭 40mm는 개방 슬롯이며, 케이블 두께가 20mm이므로 슬롯 개구폭 20mm부터 2mm씩 높여가며 해석을 수행하였다. [그림 2.5.78]과 같이 슬롯 개구폭이 늘어남에 따라 부상력과 추력이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 한편, 추력 리플은 슬롯 개구폭이 늘어남에 따라 증가하였으며, 부상력 리플은 슬롯 개구폭에 거의 영향을 받지 않았다.



[그림 2.5.78] 슬롯 개구폭에 따른 LSM 출력 특성(부상력 제어 고려안함)



[그림 2.5.79] 슬롯 개구폭에 따른 LSM 출력 특성(부상력 제어 고려)

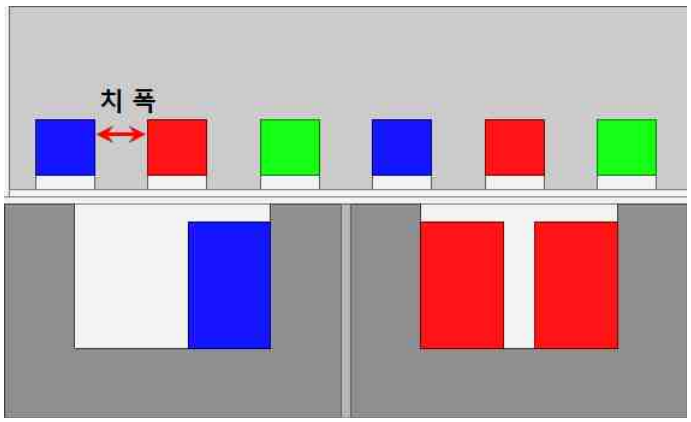
이번에는 부상력 제어를 고려하기 위해 고정자 전류 450A, 계자전류 17A, 전류위상각 33deg 상태(부상력 제어 고려)로 해석을 수행하여 그 결과를 [그림 2.5.79]에 나타냈다. [그림 2.5.79]와 마찬가지로 슬롯 개구폭이 넓어짐에 따라 부상력과 추력

이 저감되었으며, 슬롯 개구폭이 늘어날수록 추력 리플과 부상력 리플도 커지는 것을 확인할 수 있다.

고정자 치 폭 길이에 따른 추력 및 부상력 특성 해석

LSM 고정자 권선의 전압 절연 성능을 높이려면 절연 피복의 두께가 더 두꺼워져야 한다. 한정된 슬롯 영역에서 절연 피복이 두꺼워지면, 도체 면적이 줄어들게 되며, 전류밀도가 증가하게 된다. 따라서 전류밀도를 낮추기 위해서는 슬롯 면적을 확대해야 한다. 슬롯 면적을 확대하기 위해서는 치 폭을 축소해야 하는데, 치 폭을 축소할 경우 LSM 성능 저하가 불가피하다. 그러면 치 폭 축소 시 어느 정도의 LSM 성능 저하가 발생하는 지 검토할 필요가 있다.

[그림 2.5.80]과 같이 개방 슬롯 고정자의 치 폭을 설계변수로 선정하여 특성 해석을 수행하였다. 계자 전류 17A, 고정자 전류 450A, 전류위상각 33deg 상태(부상력 제어 고려)로 설정하고 해석을 수행하였고, 치 폭을 40mm에서 1mm씩 줄여가며 38mm까지 해석하였다.



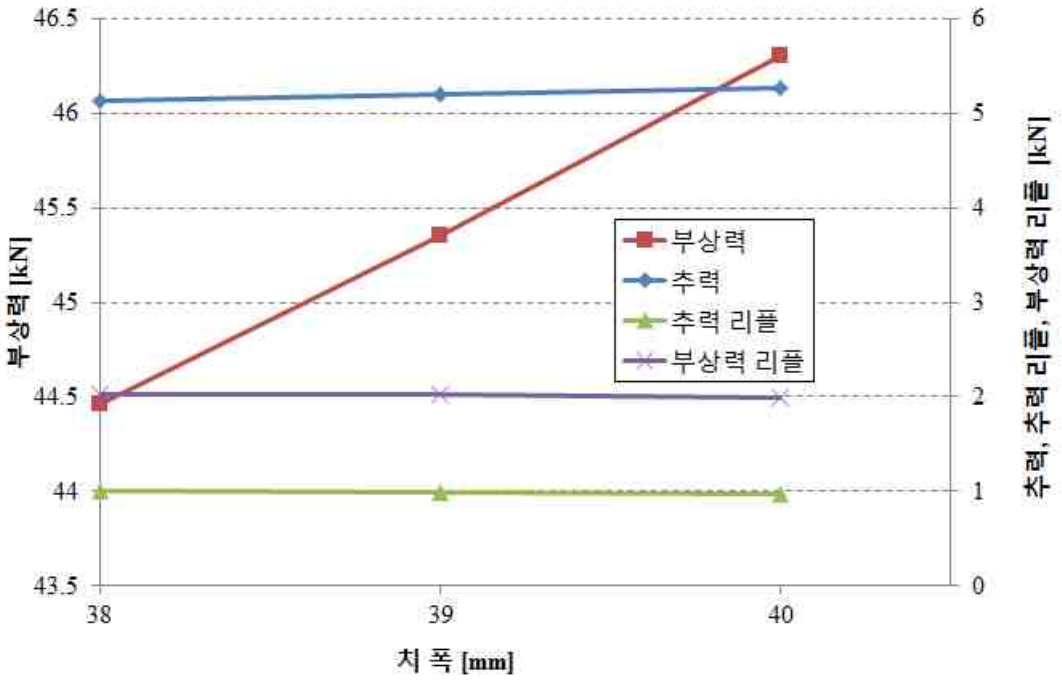
[그림 2.5.80] 개방 슬롯 고정자의 설계변수(고정자 치 폭)

LSM 고정자 치 폭에 대한 특성 해석 결과를 [그림 2.5.81]에 나타냈다. 치 폭 축소에 따라 부상력과 추력 감소하는 것을 확인할 수 있다.

고정자 치 폭이 40mm인 경우 고정자 상전류 450A, 계자 전류 17A, 전류위상각 33deg에서 최대 가속도 1.1m/s^{2}을 만족하였고, 고정자 치 폭이 38mm로 줄어든 경우에는 고정자 상전류 460A, 계자 전류 17A, 전류위상각 30deg에서 최대 가속도 1.1m/s^{2}을 만족하였다. 따라서 고정자 치 폭을 줄일 경우, 최대 가속도 1.1m/s^{2}을 만족시키기 위해 고정자 상전류의 크기와 전류 위상각 조정이 요구된다. 즉, 치 폭 38mm에서 최대 가속도 1.1m/s^{2}을 만족시키기 위해서는 고정자 전류를 450A에서 460A로 증가시키고, 전류위상각을 33deg에서 30deg로 낮춰야 한다.

한편, 선경 19mm, 피복 두께 4mm인 고정자 권선에 흐르는 전류가 450A일 때,

전류밀도는 약 4.74A/mm^{2}이며, 고정자 권선에 460A의 전류가 흐를 때, 전류밀도는 약 4.84A/ mm^{2}가 된다.



[그림 2.5.81] 고정자 치폭에 따른 LSM 출력 특성(부상력 제어 고려)

⑦ LSM의 상전압 계산

LSM의 고정자 권선에 340A의 전류가 인가되고, 부상전자석이 28.8km/h의 속도로 움직일 때, LSM의 고정자 권선에 걸리는 전압을 계산하기 위해서는 고정자 권선의 상저항, 인덕턴스, 역기전력, 주파수 등의 값이 필요하다. 극 피치가 240mm인 LSM이 28.8km/h의 속도로 이동하기 위해서 필요한 주파수는 16.667Hz이다. 본 절에서는 권선 저항과 인덕턴스, 역기전력 계산에 대하여 서술하였다.

고정자 권선 저항 및 인덕턴스 계산

LSM의 상전압뿐만 아니라 효율 및 역률을 계산하기 위해서도 고정자 권선의 상저항 및 인덕턴스 값이 필요하다. 고정자 권선 재질은 알루미늄이고 온도 조건은 상온 20℃, 선로 길이 150m 기준으로 저항을 계산하였다. 150m 선로에서 슬롯당 턴수는 4턴이고 상당 총 턴수는 1250턴이다. 상당 케이블 길이는 약 1,935m이고 케이블 내의 알루미늄 단면적은 94.44mm^2(외경 11mm)로 계산하였다. 이때 알루미늄의 비저항은 2.65e-8[Ωm]이며, 온도계수는 3.8e-3[/℃]이다. 따라서 LSM 1상의 저항은 다음과 같이 계산된다.

$$R = \rho \frac{l}{s} = 2.65 \times 10^{-8} \times \frac{1935}{94.44 \times 10^{-6}} = 0.5429637 \approx 0.543 \ [\Omega]$$

고정자 권선에 전류 340A 인가 시, 동손은 약 187kW이고 A상 권선에 쇄교되는 자속량은 유한요소해석 결과 약 1.676Wb이다. 그러므로 A상 권선의 인덕턴스는 1.676Wb / 340A(rms) = 4.93mH이다.

고정자 권선 상전압 계산

인버터의 용량 및 DC Link 전압을 결정하기 위해서는 LSM 고정자의 상전압을 계산해야 한다. 1상의 저항이 0.543Ω인 LSM 고정자 권선에 16.667Hz의 주파수를 갖는 340A의 전류가 인가될 때, 임피던스 전압강하를 계산하면 약 360V(peak)가 된다.

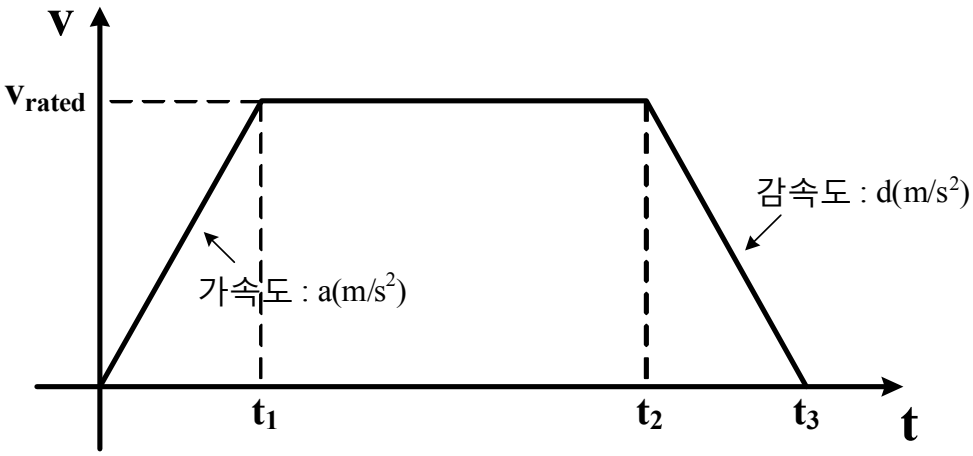
LSM 1 Module이 28.8km/h의 속도로 주행할 때 발생하는 유도기전력을 유한요소해석을 통해 구했으며 약 53V(peak)가 된다. 자기부상열차는 총 6개의 LSM Module을 가지며 2개의 선로에 각각 3개의 LSM Module이 지나가므로, 자기부상열차가 28.8km/h의 속도로 달릴 때, 한쪽 선로에서 발생하는 유도기전력은 159V(peak)이다. 따라서 고정자 권선의 상전압은 360V + 159V = 519V(peak)이다.

⑧ 단거리 시험선에서의 추진체 주행 특성 분석

단거리 시험선은 주행거리가 짧기 때문에 가속거리 및 정속 주행거리, 감속거리를 정확하게 예측해야 추진체의 선로 이탈 등의 사고를 예방할 수 있다. 본 절에서는 150m 단거리 시험선에서의 추진체의 주행시간 및 각 구간별 주행 거리를 예측하였고, 자기부상열차의 주행저항을 고려하여 주행 특성을 분석하였다.

추진체의 주행시간 및 거리 산정

[그림 2.5.82]와 같이 시간-속도 프로파일이 정해져있다고 가정하면, 각각의 구간에서의 주행속도 및 이동거리를 계산할 수 있다.



[그림 2.5.82] 단거리 시험선 차량의 시간에 대한 속도 그래프

주어진 가속도 a와 최대 속도 v에 의하여 가속 시간 t_1은

$$a = \frac{v - v_o}{t_1} = \frac{28.8}{t_1 \times 3.6} = 1.1 \ [\mathrm{m/s^2}]$$

$$t_1 = \frac{28.8}{1.1 \times 3.6} \fallingdotseq 7.3 \ [\mathrm{sec}]$$

따라서 가속거리 S_1은

$$S_1 = \frac{1}{2} a t_1^2 + v_o t_1 = \frac{1}{2} a t_1^2 = \frac{1}{2} \times 1.1 \times 7.3^2 = 29.3 \ [\mathrm{m}]$$

주어진 감속도 d와 최대 속도 v에 의하여 감속 시간 t_3는

$$d = \frac{v - v_o}{t_3} = \frac{-28.8/3.6}{t_3} = -1.1 \ [\mathrm{m/s^2}]$$

$$t_3 = \frac{28.8}{1.1 \times 3.6} = 7.3 \ [\mathrm{sec}]$$

따라서 감속거리 S_3는

$$S_3 = \frac{1}{2} \times 1.1 \times 7.3^2 = 29.3 \ [\mathrm{m}]$$

총 주행거리가 150m이므로 정속거리는

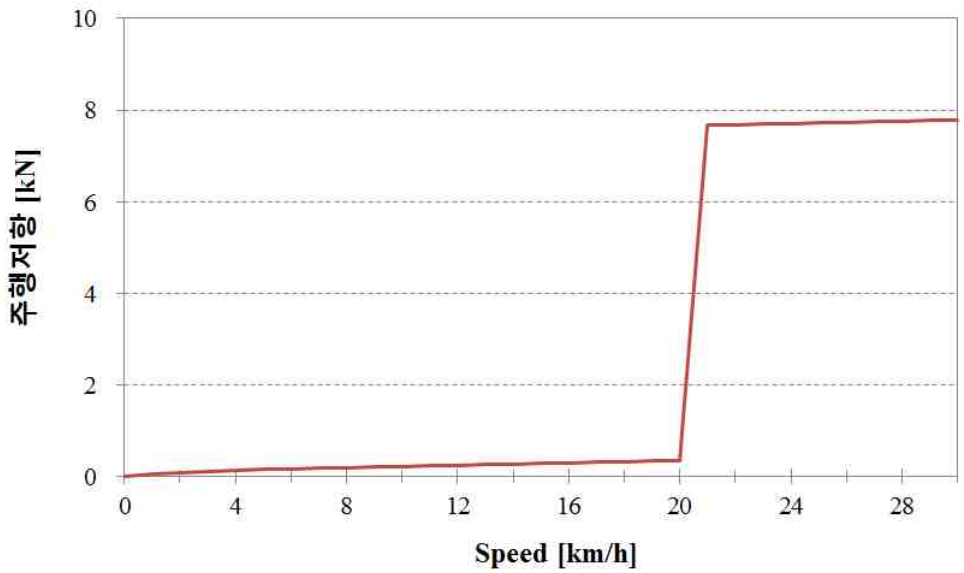
$$S_2 = 150 - 2 \times 29.3 = 91.4 \ [\mathrm{m}]$$

따라서 정속거리 주행시간 t_2는

$$t_2 = \frac{S_2 \times 3.6}{v} = \frac{91.4 \times 3.6}{28.8} = 11.4 \ [\mathrm{sec}]$$

주행저항을 고려한 자기부상열차의 주행 특성 분석

단거리 시험선에서 자기부상열차가 출발해서 최대 속도 28.8km/h에 도달하고 정지할 때까지 각 구간에서 발생하는 주행저항과 LSM의 발생 추력을 구하면 구간별 가속도 및 감속도, 이동 거리, 이동 속도 등을 계산할 수 있다. 여기서는 자기부상열차가 선형발전을 한다고 가정하고 주행저항을 계산하였다. [그림 2.5.83]에 속도에 대한 주행저항 그래프를 나타냈다.



[그림 2.5.83] 자기부상열차의 속도에 대한 주행저항 그래프

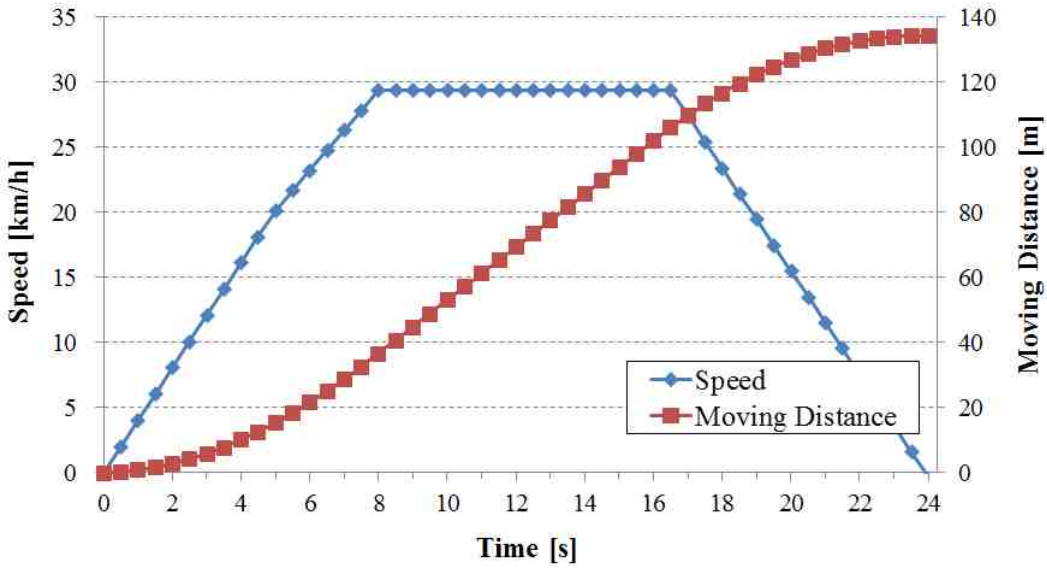
자기부상열차가 정지 상태에서 28.8km/h까지 가속 시 LSM 고정자 전류는 450A, 계자 전류는 DC 17A, 전류위상각은 33deg를 유지한다. 유한요소해석 결과 LSM 1 Module당 추력은 약 5.26kN이고, LSM 6 Module의 추력은 약 31.57kN이다. LSM 추력과 속도별 주행저항을 통해 그림 2.5.84와 같이 시간대별 가속도 그래프를 얻을 수 있다.



[그림 2.5.84] 추진체의 시간에 대한 가속도 그래프

자기부상열차는 정지 상태에서 10km/h의 속도까지 약 1.12m/s^{2}의 가속도를 내며, 출발 후 약 2.5초면 10km/h에 도달한다. 자기부상열차가 20km/h의 속도에 도달한 후(출발 후 약 5초)에는 선형발전에 의한 주행저항의 영향으로 가속도가 0.85m/s^{2}으로 급감하게 되고, 주행 최대 속도 28.8km/h에 도달(출발 후 약 8초)하고 나서는 가속도 0을 유지한다. 출발 후 16.5초 후(선로 106m 지점)부터 감속도 1.1m/s^{2}으로 감속 시작하고, 24초에 차량은 정지한다. 따라서 총 주행 시간은 약 24초이며, 총 주행 거리는 약 135m이다.

[그림 2.5.85]는 자기부상열차의 시간에 대한 속도 및 이동거리를 나타낸 그래프이다. 차량의 길이가 12m이므로 150m 주행선로에서 주행 가능한 거리는 138m 미만이다. 이 그래프에서는 24초 동안 약 135m 주행한 것으로 나타난다. 따라서 약 3m의 여유 거리를 갖는다.



[그림 2.5.85] 자기부상열차의 시간에 대한 속도 및 이동거리 그래프

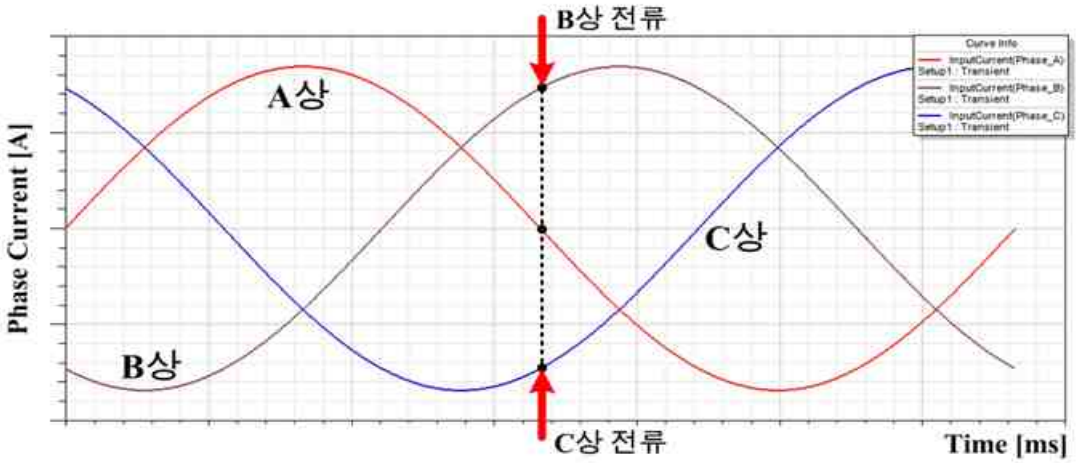
그래프 상에서 0초부터 5초까지 약 1.1m/s^{2}으로 가속하고, 5초부터 8초까지는 약 0.85m/s^{2}으로 가속한다. 0초부터 8초까지 가속거리는 약 37m이다.

그래프 상에서 8초부터 16.5초까지 약 8.5초간 최대 속도 28.8km/h로 정속 주행을 하며, 16.5초부터 24초까지 약 7.5초간 -1.1m/s^{2}의 가속도로 감속하여 정지하며, 총 감속거리는 약 28m이다.

(4) LSM 단품 시험

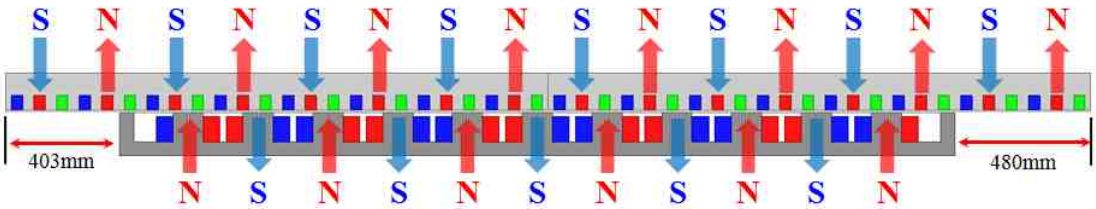
① LSM 단품의 추력 측정 방법

LSM 고정자 권선에는 [그림 2.5.86]과 같은 3상 평형 전류가 인가된다. 이렇게 3상 전류가 인가될 때, A상 전류는 0이 되고, B상과 C상 전류는 크기가 같고 방향이 반대가 되는 한 순간이 [그림 2.5.86]에 표기한 것과 같이 나타난다. 이 순간을 DC Power Supply 1대로 구현 가능하다.



[그림 2.5.86] 3상 평형 전류에서 A상 전류가 0이 되는 순간

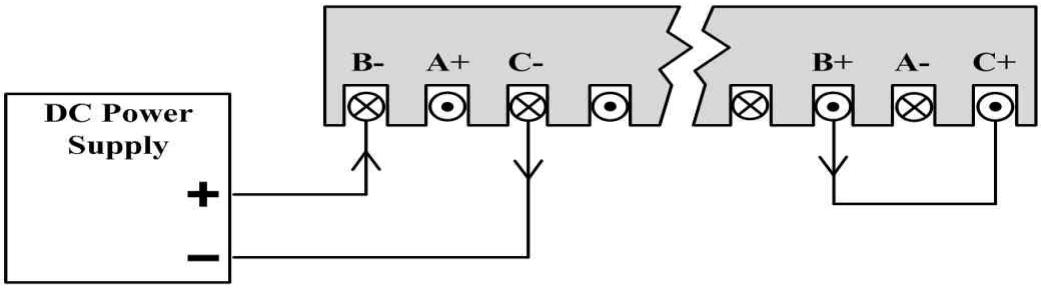
LSM의 고정자 권선에 [그림 2.5.86]에서 A상 전류가 0이 되는 순간에 해당하는 직류 전류를 인가하고, 부상전자석의 계자 권선에는 또 다른 DC Power Supply를 이용하여 DC 17A를 인가한다. 그러면 [그림 2.5.87]과 같이 고정자와 부상전자석은 여러 개의 자석이 되며, 서로 정렬하기 위해서 어느 한 방향으로 움직일 것이다. 이 움직이려는 힘이 곧 LSM의 추력이며, 움직이는 방향에 로드셀을 장착하여 추력을 측정할 수 있다.



[그림 2.5.87] LSM 전류 인가 시 기자력 방향

Power Supply를 이용한 LSM 단품의 추력측정 순서는 다음과 같다.

1) DC Power Supply를 [그림 2.5.88]과 같이 연결한다.



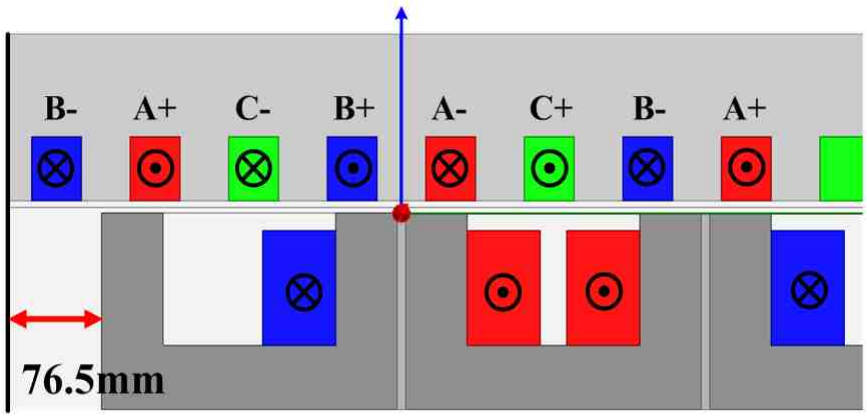
[그림 2.5.88] DC 전원과 LSM 고정자 권선의 결선

- LSM의 A상 단자는 연결하지 않는다.
- LSM의 B상 단자와 DC 전원의 (+)단자, C상 단자와 (-)단자를 연결한다.
- LSM 고정자 끝단의 B상과 C상 단자를 [그림 2.5.89]와 같이 서로 이어준다.



[그림 2.5.89] LSM 고정자 끝단 결선

2) 추진체(부상전자석)의 위치를 [그림 2.5.90]와 같이 76.5mm 위치를 기준으로 잡고 76.5 mm에서 316.5mm까지 20mm 간격으로 총 240mm를 이동하면서 추력을 측정한다.

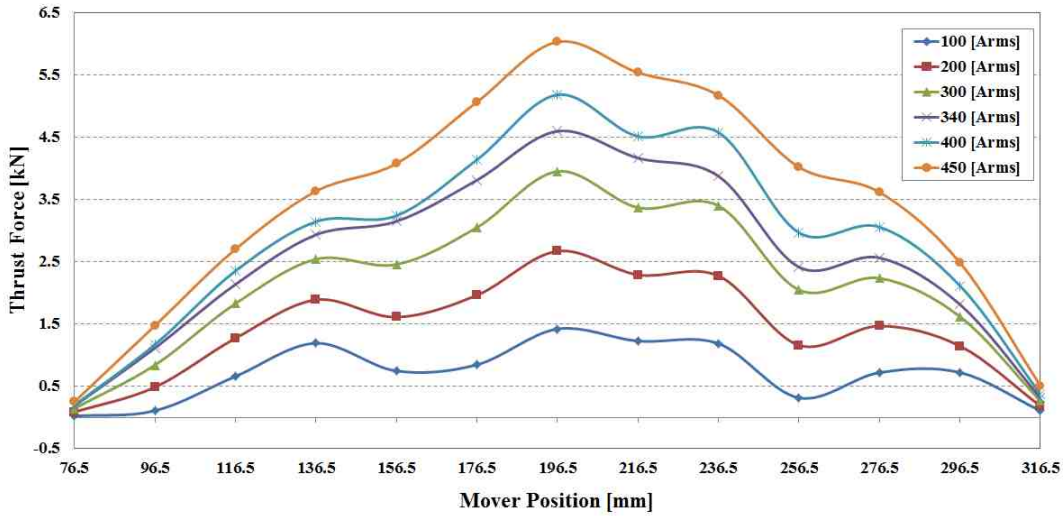


[그림 2.5.90] 부상전자석의 기준위치(76.5mm)

3) 계자 전류를 17A로 유지하고, DC 전원의 전류를 122.5A, 244.9A, 367.4A, 416.4A, 489.9A, 551.1A까지 바꿔가면서 로드셀을 통해 추력을 측정한다. (고정자 전류 크기는 교류 실효치로 환산 시 각각 100A, 200A, 300A, 340A, 400A, 450A에 해당한다.)

③ LSM 단품의 추력측정 시뮬레이션

앞 절에서 서술한 추력측정 방법과 동일하게 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 [그림 2.5.91]에 나타냈다. 부상전자석이 196.5mm에 위치할 때 최대 추력이 발생하였으며, 고정자 전류가 450A일 때, 요구 추력을 만족한다는 것을 확인할 수 있다. 참고로 LSM 1 Module의 요구 추력은 5.13kN이다.



[그림 2.5.91] 입력전류 및 추진체 위치에 따른 LSM 추력 해석결과 그래프

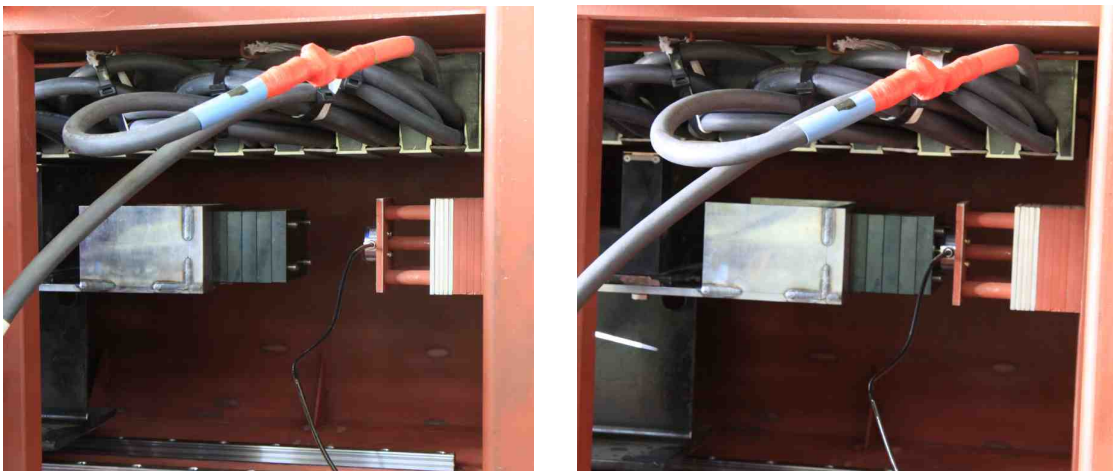
④ LSM 단품의 추력측정 시험

[그림 2.5.92]은 완성된 LSM 단품의 모습을 보여준다. 이 LSM 단품의 부상전자석은 바닥에 고정된 LM 가이드를 통해 이동 가능하며, 별도의 부상 제어를 하지 않아도 항상 공극 10mm를 유지하도록 제작하였다. LSM에 전류 인가시 부상전자석이 고정자에 달라붙지 않도록 LM 가이드가 부상전자석을 잡고 있으며, 바닥과 측면 기둥에 보강대를 용접하였다.

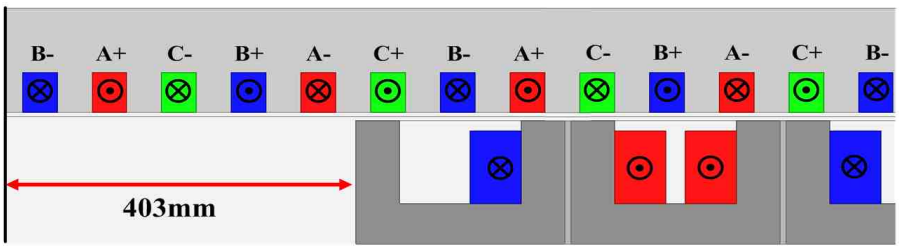


[그림 2.5.92] 완성된 LSM 단품 모델

[그림 2.5.93]은 제작된 LSM의 부상전자석의 구조물과 추력측정을 위한 로드셀을 나타낸다. 부상전자석 앞부분에 달린 구조물과 로드셀이 서로 맞닿아야 추력측정이 가능하다. 그러나 [그림 2.5.90]과 같이 76.5mm의 위치에서는 구조물과 로드셀이 닿지 않아 추력측정이 불가능하다. 따라서 구조물과 로드셀이 서로 맞닿을 수 있도록 부상전자석의 기준 위치를 [그림 2.5.94]와 같이 403mm로 변경하였다.



[그림 2.5.93] LSM의 추력측정을 위한 부상전자석 구조물과 로드셀

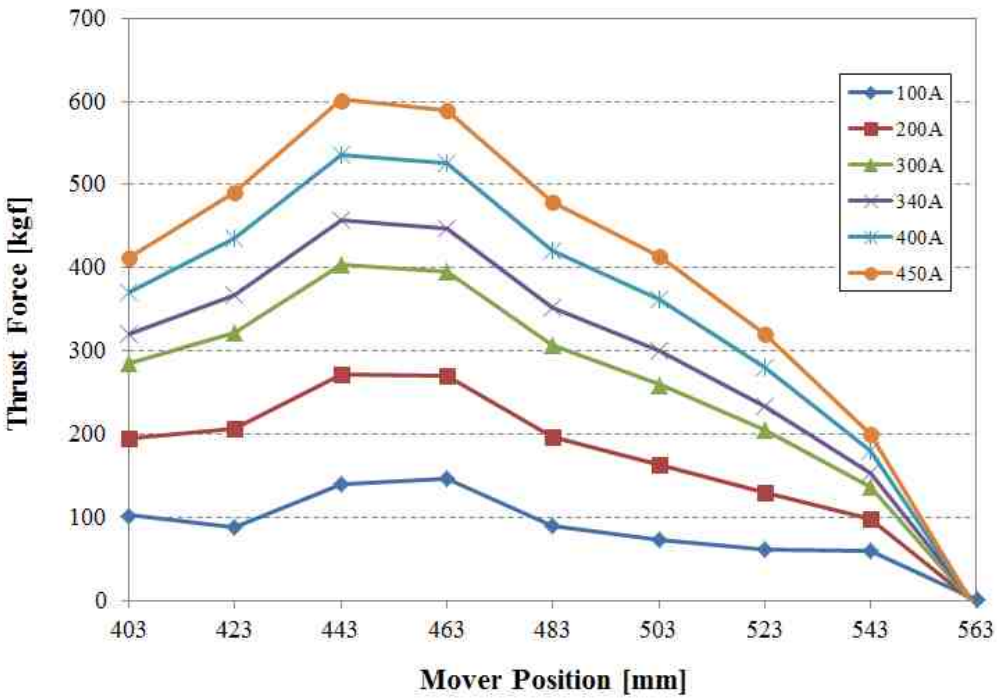


[그림 2.5.94] 부상전자석의 기준위치(403mm)

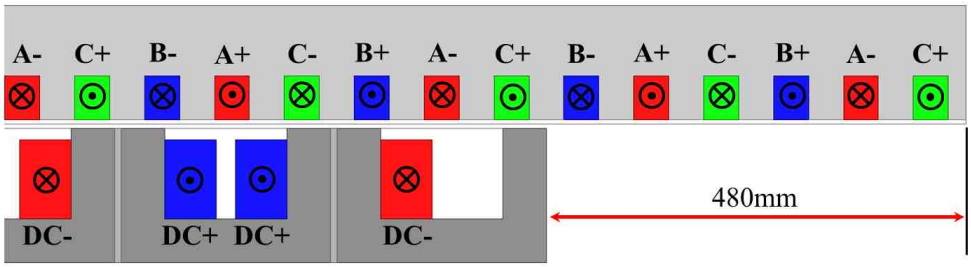
부상전자석의 기준위치가 403mm로 변경되면서 부상전자석의 위치를 기준위치인 403mm부터 563mm까지 20mm 간격에 대하여 시뮬레이션을 다시 수행하였다. 이때 부상전자석의 계자 전류는 DC 17A로 고정하고, 고정자 전류는 122.5A부터 551.1A까지 변경하면서 해석하였으며 그 결과를 [표 2.5.13]과 [그림 2.5.95]에 나타냈다.

[표 2.5.14] 입력전류 및 추진체 위치에 따른 LSM 추력측정 시뮬레이션 결과(단위: kN)

입력전류 / 추진체 위치	122.5A	244.9A	367.4A	416.4A	489.9A	551.1A
403mm	1.00	1.92	2.80	3.14	3.64	4.04
423mm	0.87	2.03	3.16	3.60	4.26	4.81
443mm	1.37	2.67	3.95	4.48	5.25	5.90
463mm	1.44	2.65	3.88	4.38	5.15	5.78
483mm	0.89	1.92	3.01	3.46	4.12	4.70
503mm	0.71	1.60	2.54	2.95	3.54	4.06
523mm	0.60	1.27	2.00	2.29	2.75	3.14
543mm	0.58	0.96	1.33	1.50	1.77	1.97
563mm	0.02	-0.04	-0.06	-0.05	-0.09	-0.11



[그림 2.5.95] 입력전류 및 추진체 위치에 따른 LSM 추력측정 시뮬레이션 결과 그래프



[그림 2.5.96] 부상전자석의 기준위치 반대 방향(403mm)



[그림 2.5.97] 제작된 부상전자석의 기준위치 반대 방향(403mm)

제작된 부상전자석을 403mm 위치에 놓으면 반대쪽은 [그림 2.5.96]과 [그림2.5.97]처럼 480mm만큼의 공간이 생긴다. 이 위치에서부터 부상전자석을 우측으로 20mm씩 이동시키면서 추력을 측정하였다. 추력측정은 로드셀을 이용하였으며, 로드셀에서 측정된 값은 [그림 2.5.98]과 같은 로드셀 디스플레이 장치를 통해 나타난다. 추력측정 결과는 [표 2.5.14]에 나타냈다. [표 2.5.14]에서 "-"로 표기된 부분은 추력 양상 그래프에서 변곡점을 지난 포인트이기 때문에 추력측정을 생략한 부분이다.



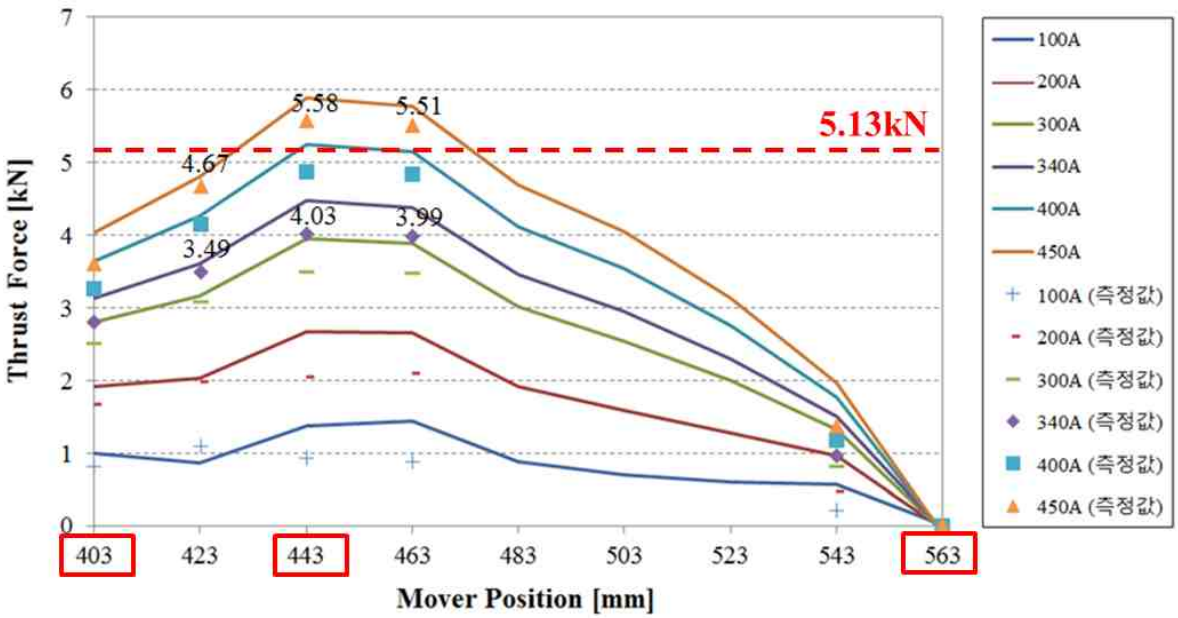
[그림 2.5.98] 로드셀 디스플레이 장치

[표 2.5.15] 입력전류 및 추진체 위치에 따른 LSM 추력측정 시험 결과(단위: kN)

입력전류 / 추진체 위치	122.5A	244.9A	367.4A	416.4A	489.9A	551.1A
403mm	0.81	1.67	2.52	2.80	3.26	3.62
423mm	1.10	1.98	3.09	3.49	4.15	4.67
443mm	0.94	2.06	3.50	4.03	4.88	5.58
463mm	0.89	2.11	3.48	3.99	4.84	5.51
483mm	-	-	-	-	-	-
503mm	-	-	-	-	-	-
523mm	-	-	-	-	-	-
543mm	0.21	0.48	0.82	0.96	1.19	1.37
563mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

⑤ LSM 단품의 추력측정 결과와 시뮬레이션 결과 비교

[그림 2.5.99]은 입력전류 및 부상전자석 위치에 따른 LSM 추력측정 시뮬레이션 결과와 측정값을 함께 나타낸 결과이다. 이 그래프에서 시뮬레이션 결과는 실선으로 나타냈으며, 실측 결과는 점으로 나타내었다.



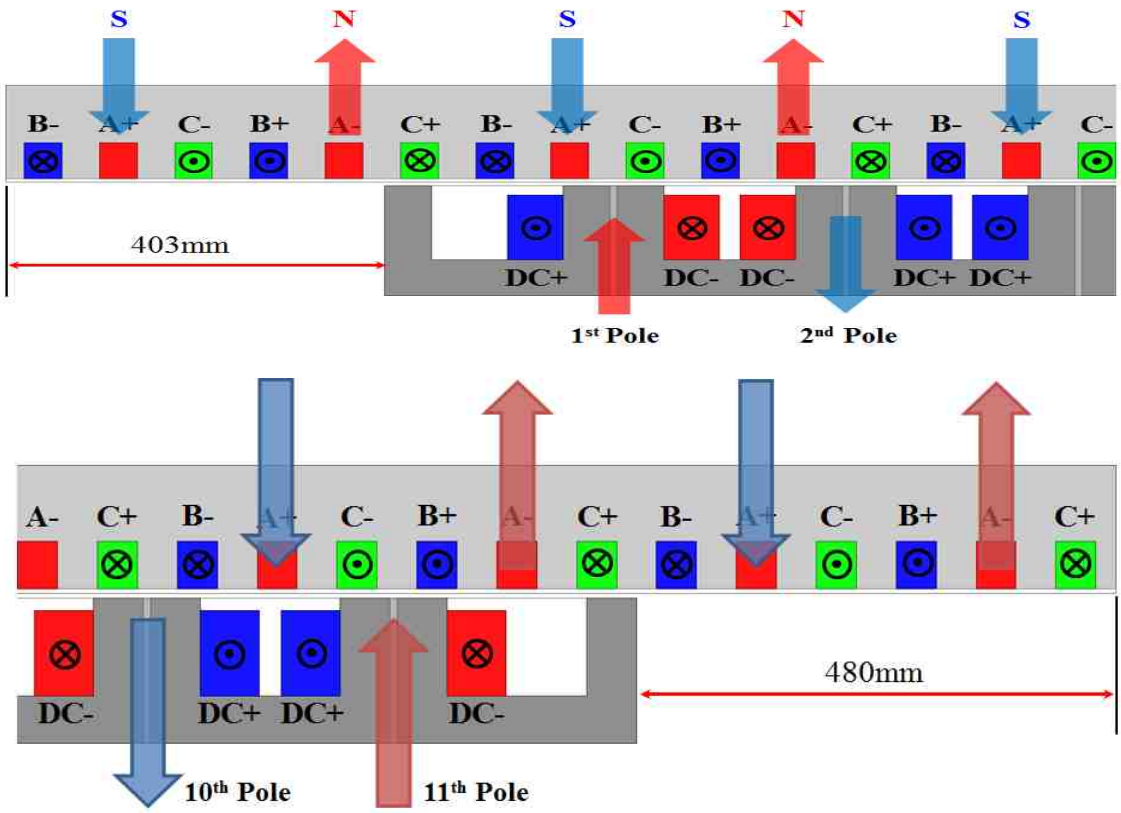
[그림 2.5.99] LSM 추력측정 결과 및 시뮬레이션 결과 그래프

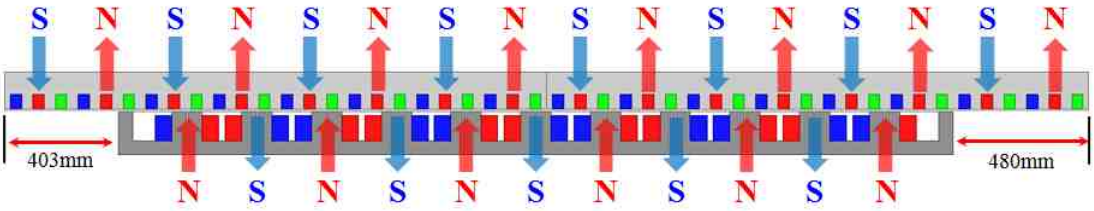
LSM 단품 추력측정 시험 결과 입력전류가 DC 551.1A(교류 전류 기준 450A)이고, 부상전자석이 443mm에 위치하고 있을 때 가장 큰 추력이 발생하였다. 이 경우의 추력은 5.58kN으로 요구 추력 5.13kN을 충분히 만족하는 것을 확인할 수 있다. 이 경우의 시뮬레이션 결과는 5.90kN으로, 실측 결과와 약 5.7%의 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 다음과 같은 원인에 의해 발생했다고 볼 수 있다.

- 부상전자석에 장착된 LM가이드의 마찰에 의한 손실
- 인가된 전류의 측정 오차
- 부상전자석 철심의 재질 차이

이러한 오차를 감안하면 단품 시험으로 얻은 측정치와 유한요소해석으로 얻은 해석치는 비슷한 경향성을 띄고 있으므로 해석 기법의 타당성은 입증했다고 볼 수 있다. 또한 추력측정 결과 최대 추력이 요구 추력을 만족하므로 설계의 타당성도 입증했다고 볼 수 있다.

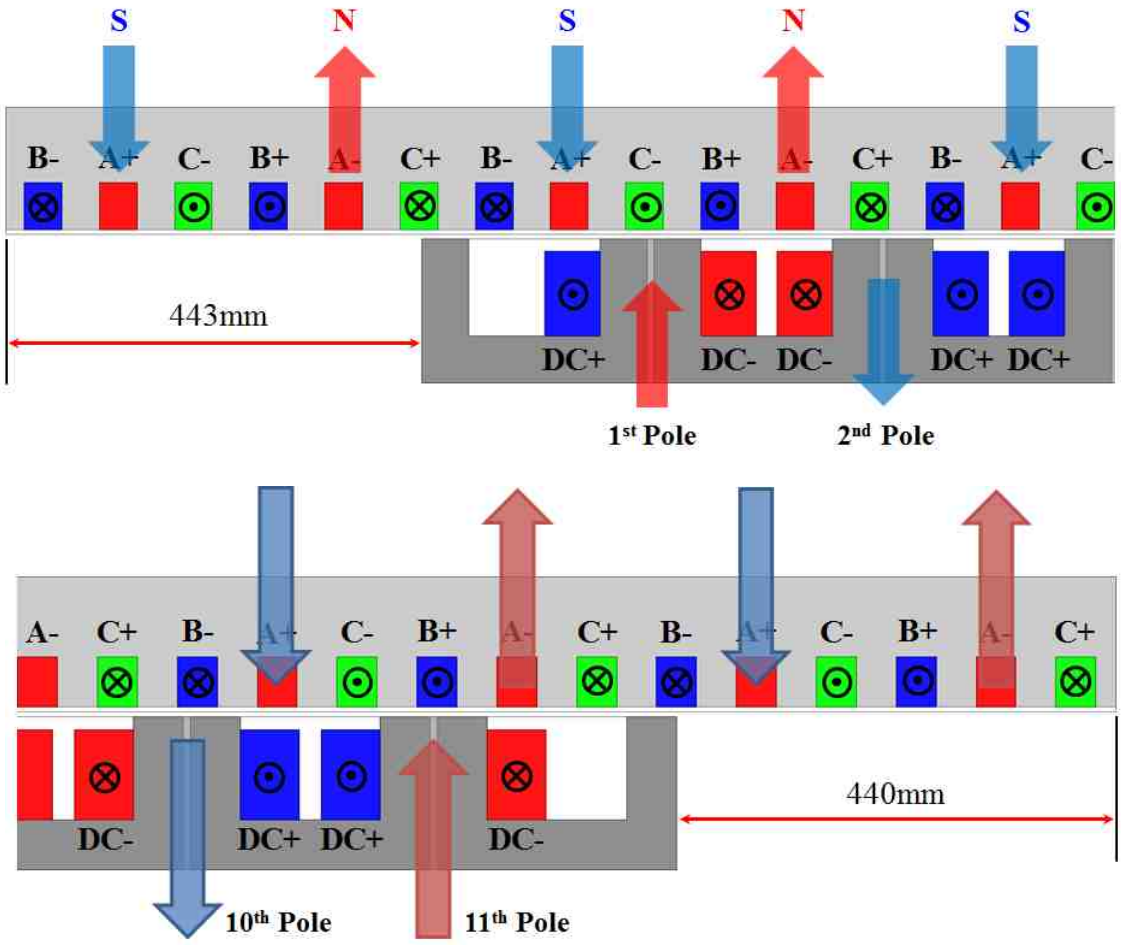
[그림 2.5.99]의 추력측정 결과 그래프에서 부상전자석의 주요 위치에 붉은 색 사각형으로 표시하였다. 주요 위치는 각각 403mm, 443mm, 563mm이다.

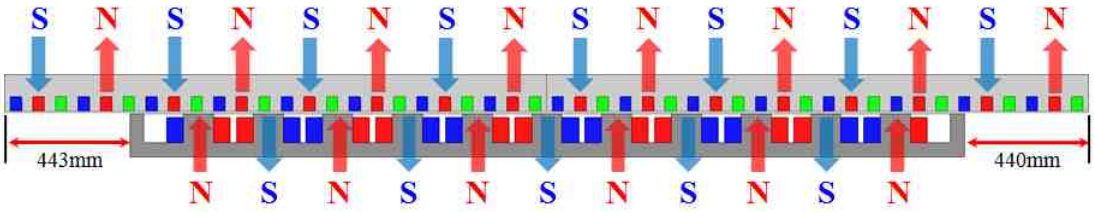




[그림 2.5.100] LSM 고정자와 부상전자석의 기자력 방향(403mm 위치)

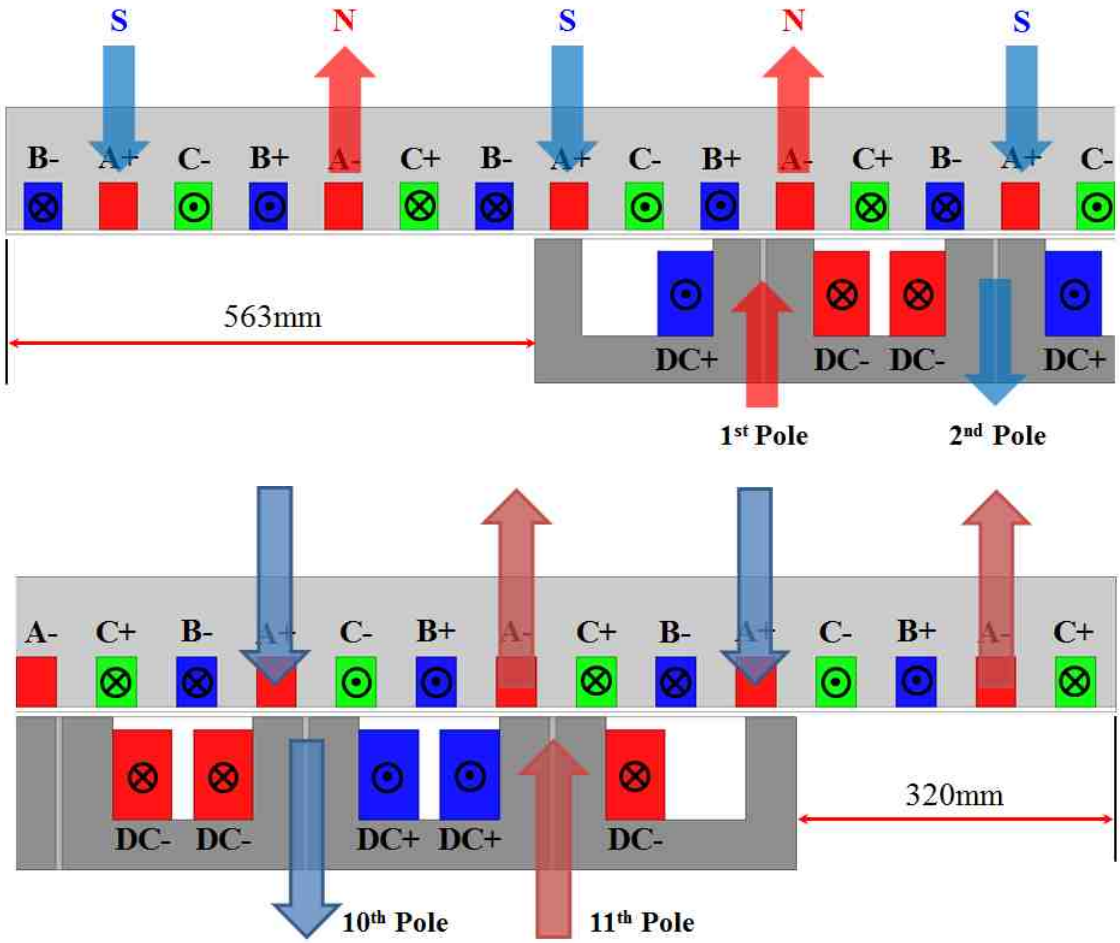
[그림 2.5.100]는 부상전자석이 403mm 위치에 있을 때, LSM 고정자와 부상전자석의 기자력 방향을 나타낸다. A상 권선에는 전류가 흐르지 않으며, B상 권선에는 +방향 전류가 흐르고, C상 권선에는 -방향 전류가 흐른다. 부상전자석의 계자 권선은 항상 동일한 방향의 기자력을 갖는다. 따라서 LSM의 고정자 권선과 부상전자석의 계자 권선에 전류가 인가되면 [그림 2.5.100]과 같이 기자력 축이 형성되며 부상전자석은 고정자의 기자력 축에 맞춰서 정렬하기 위해서 오른쪽으로 움직이려고 할 것이다.

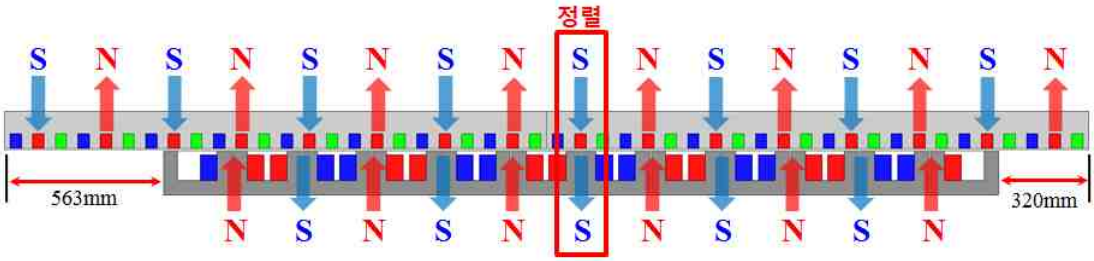




[그림 2.5.101] LSM 고정자와 부상전자석의 기자력 방향(443mm 위치)

[그림 2.5.101]는 부상전자석이 443mm 위치에 있을 때의 기자력 방향을 나타낸다. 이 위치에서 가장 큰 추력이 발생하였다. 이 경우는 부하각 90deg, 전류위상각 0deg에 해당하는 위치이다.





[그림 2.5.102] LSM 고정자와 부상전자석의 기자력 방향(563mm 위치)

[그림 2.5.102]은 부상전자석이 563mm 위치에 있을 때의 기자력 방향을 나타낸다. 이 위치에서 추력이 0가 된다. 그림 상에 표기한 것처럼 이 위치에서 11개의 극을 갖는 부상전자석의 중심부에 해당하는 6번째 극의 기자력 축이 고정자 권선 기자력 축과 정확하게 일치한다. 부상전자석이 Phase set shift가 적용되었기 때문에 나머지 기자력 축은 앞뒤로 어긋나 있으며 서로 반대 방향으로 동일한 힘으로 정렬하려하기 때문에 전체 추력은 0이 된다. 이 경우는 부하각 0deg, 전류위상각 -90deg에 해당한다.

(4) 결론

본 연구의 최종 목표는 최대 속도 550km/h를 달릴 수 있는 초고속 자기부상열차를 개발하는 것이다. 그러나 열차가 550km/h의 속도를 내기 위해서는 수 km 이상의 주행 선로가 확보되어야하는데, 이는 천문학적인 비용을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 최대 속도 550km/h의 실용화 노선 운행용 자기부상열차를 기준으로 LSM을 설계한 다음, 150m의 단거리 시험선 운행용 자기부상열차에 적합하도록 설계변경을 진행하였다.

이렇게 설계된 LSM은 유한요소법을 이용하여 특성 해석을 수행하였다. 자기부상열차의 특성상 LSM의 부상력은 항상 일정하게 유지되어야하기 때문에 부상력 일정 제어를 고려한 해석을 수행하였다. 이렇게 얻어진 해석 결과를 가지고 자기부상열차의 가속 성능 등의 운행 특성을 예측하였다.

자기부상열차의 최대 가속도 목표치는 1.1m/s^{2}이다. 이 최대 가속도를 달성하기 위해서 필요한 요구 추력은 LSM 1 Module당 5.13kN 이상이다. 이 요구 추력을 달성하기 위해서는 정격전류보다 큰 고정자 전류를 인가해야하는데, 고정자 전류가 증가함에 따라 부상력도 함께 증가하는 문제점이 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 약자속 제어법을 제안하였다. 전류위상각을 33deg에 고정하면 고정자 전류가 증가하여도 LSM의 부상력은 큰 변동이 없이 요구 부상력을 만족하였다. 이 상태에서 보다 정밀한 부상력 제어를 위해서는 부상전자석의 계자 전류 제어를 함께 사용해야 한다. 이러한 방식으로 자기부상열차의 최대 가속도 목표치인 1.1m/s^2 이상을 달성하는 것을 시뮬레이션으로 확인하였다.

한편으로, 1차년도에 고려하지 못했던 LSM 설계 파라미터에 대하여 분석을 실시하였다. 공극 길이, 고정자 치폭과 고정자 슬롯 개구폭을 설계 파라미터로 선정하였으며, 설계 파라미터의 변화가 추력 및 부상력 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

또한, 설계된 LSM을 단품 형태로 제작하였고, 추력측정을 실시하여 요구 추력을 만족하는 것을 확인함으로써 설계의 타당성을 증명하였다. 이 과정에서 추력측정 방법을 제안하였고, 제안한 방법에 대한 시뮬레이션을 수행하여 측정 방법의 타당성을 증명하였다.

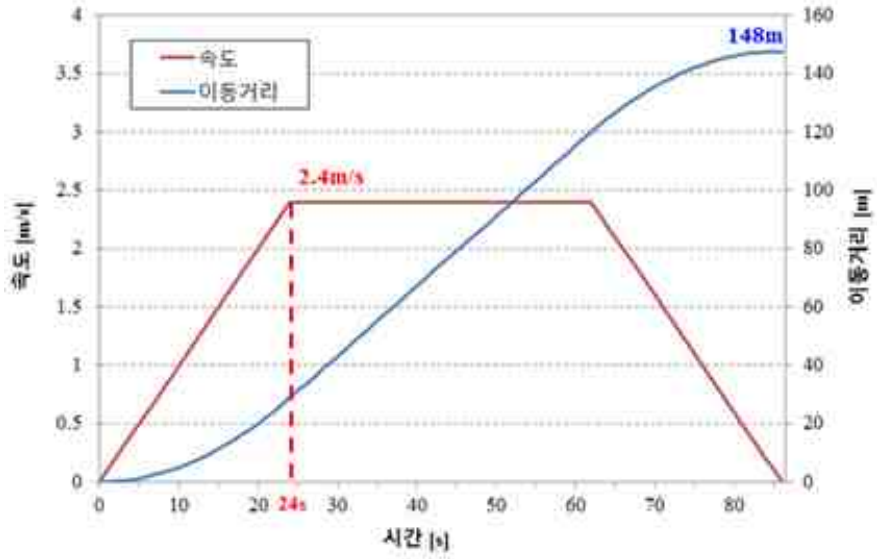
다. 현장구축 결과(3차년도)

(1) LSM 제어 성능시험을 위한 시험대차 설계 및 해석

(가) 중량 200kg급 시험대차 설계

① 시험대차 요구 추력 산정

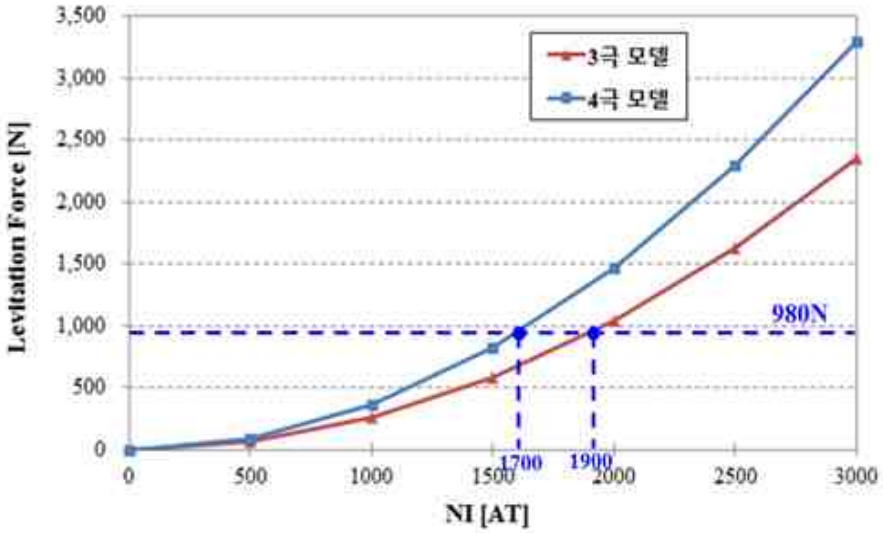
시험대차 출발 후, 최대속도 2.4m/s에 도달할 때까지의 가속시간 24s, 가속거리 28.8m. 최대속도 정속주행거리는 90.9m, 정속주행시간은 37.875s 총 주행거리는 148.5m, 총 주행시간은 85.875s(감속도는 가속도와 동일하다고 가정)



[그림 2.5.103] LSM 시험용 대차의 시간-속도, 시간-이동거리 그래프

② 부상전자석 극수 선정 및 권선 설계

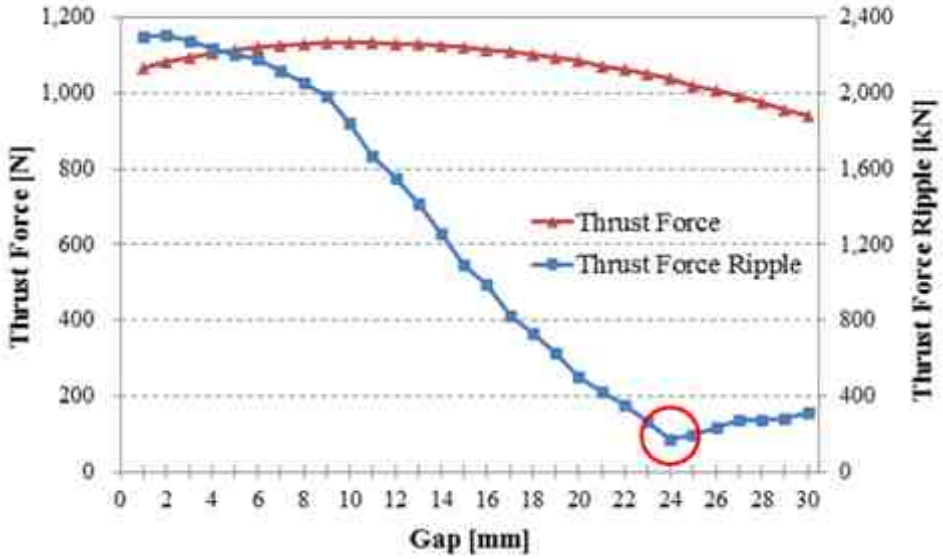
LSM 시험대차의 극수는 NI가 더 적은 4극으로 결정하였다.



[그림 2.5.104] 부상전자석 극수와 NI에 대한 부상력 특성

③ LSM 부상전자석 4극 모델의 세그먼트 간격 특성 해석

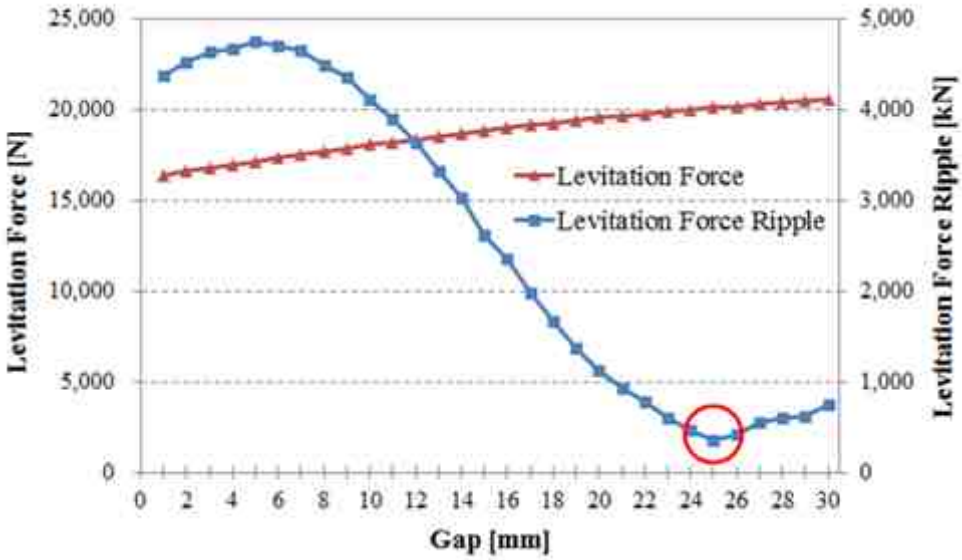
LSM 부상전자석 4극 모델의 세그먼트 사이의 공극 길이를 1mm부터 30mm까지 1mm 간격으로 늘려가면서 추력, 추력 리플, 부상력, 부상력 리플을 유한요소해석을 통해 계산하여, 다음 그림과 같이 부상전자석 세그먼트 공극 길이에 따른 추력 특성 그래프를 얻었다.



[그림 2.5.105] 부상전자석 세그먼트 공극 길이에 따른 추력 특성

세그먼트 공극 길이 24mm에서 추력 리플이 가장 작게 나타났으며, 추력은 세그먼트 공극 길이 10mm에서 가장 크게 나타났다.

다음 그림과 같이 부상전자석 세그먼트 공극 길이에 따른 부상력 특성 그래프도 얻었다.



[그림 2.5.106] 부상전자석 세그먼트 공극 길이에 따른 부상력 특성

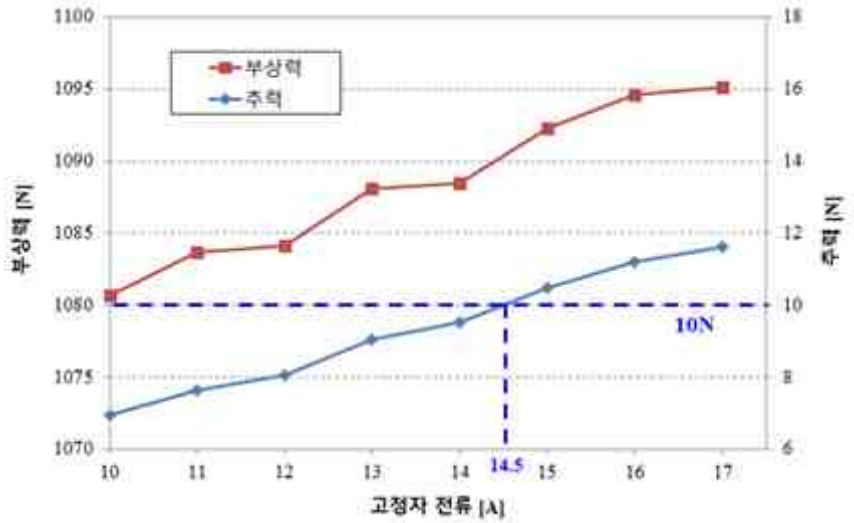
세그먼트 사이의 공극 길이가 늘어날수록 부상력은 증가하였으며, 부상력 리플은 세그먼트 공극 길이 25mm에서 가장 작게 나타났다.

따라서 4극 모델의 경우 추력 및 추력 리플 크기를 고려하여 세그먼트 공극 길이 24mm가 적당하다고 볼 수 있다.

④ LSM 시험대차의 요구 추력 만족을 위한 입력전류 계산

부상전자석의 계자 권선을 170턴으로 감고, 계자 전류 DC 10A를 인가하였고, D축 정렬된 상태(전류위상각 0deg)에서 고정자 권선에 3상 교류전류를 인가하였다.

고정자 전류 크기(Peak 값)에 따른 부상력 및 추력 특성을 다음 그림에 나타냈다.

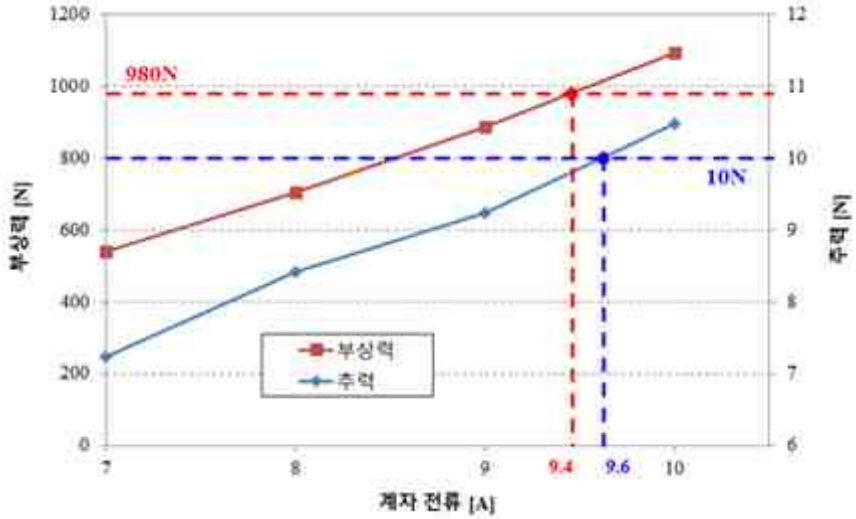


[그림 2.5.107] 고정자 전류 크기에 따른 부상력 및 추력 특성

고정자 전류 14.5A에서 요구 추력 10N을 만족하였으나, 부상력은 요구 부상력 980N을 모두 넘었다. 따라서 부상력 제어를 고려한 해석이 필요하다.

⑤ LSM 시험용 대차의 운전조건 설정

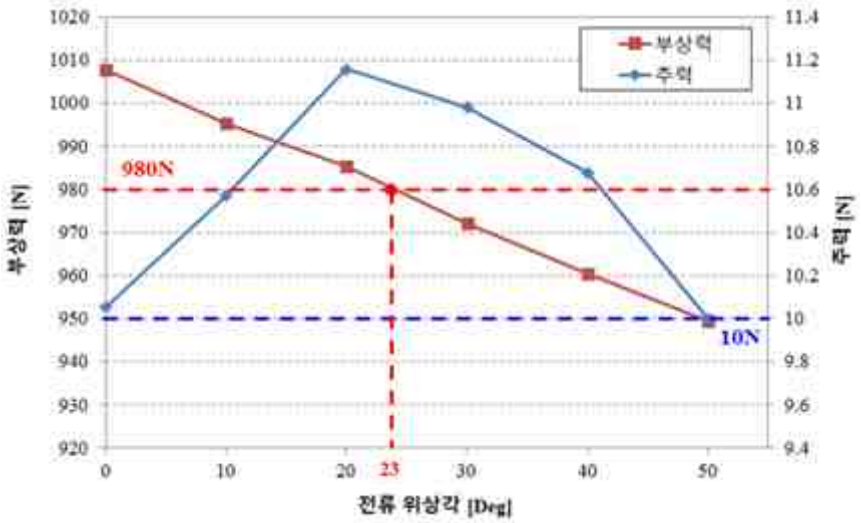
LSM 시험대차의 고정자 전류를 15A, 전류 위상각을 0deg로 고정하고 계자 전류를 바꿔가면서 특성 해석을 수행하여 다음 그래프를 얻었다.



[그림 2.5.108] 계자 전류 크기에 따른 부상력 및 추력 특성

부상 전자석의 계자 전류가 9.6A일 때 요구 추력 10N 만족하였으나, 계자 전류가 9.4A를 넘으면 요구 부상력 980N을 넘게 되어 부상 전자석이 고정자에 달라붙게 된다. 따라서 고정자 전류 15A, 전류 위상각 0deg에서는 운전 불가능하다.

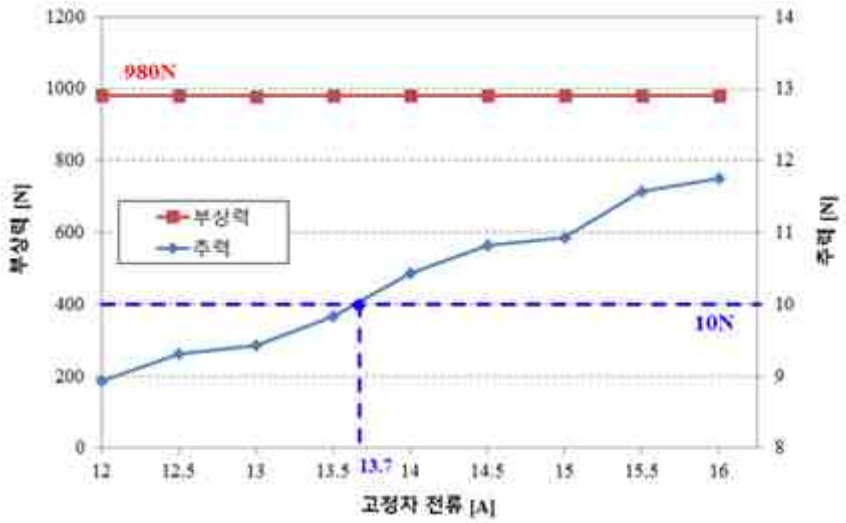
고정자 전류 15A, 계자 전류 9.6A에서 전류 위상각을 조정하였다. 다음 그림과 같이 전류 위상각이 증가함에 따라 부상력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 결국 전류 위상각 23deg에서 요구 부상력 980N 만족하였다. 따라서 시험용 대차의 LSM은 고정자 전류 15A, 계자 전류 9.6A, 전류 위상각 23deg에서 운전해야 한다.



[그림 2.5.109] 전류 위상각에 따른 부상력 및 추력 특성

이번에는 계자 전류 9.6A, 전류 위상각 23deg인 상태에서 고정자 전류를 조정하였다. 다음 그림과 같이 고정자 전류가 증가함에 따라 추력은 증가하지만 부상력은

거의 일정하다.



[그림 2.5.110] 고정자 전류 크기에 따른 부상력 및 추력 특성

그래프에서 고정자 전류 13.7A에서 요구 추력 10N을 만족한다. 따라서 고정자 전류 13.7A, 계자 전류 9.6A, 전류 위상각 23deg로 운전 시 요구 부상력과 요구 추력을 동시에 만족하면서 운전 가능하다.

(나) 중량 1,000kg급 시험대차 설계

① 시험대차 운전 특성 및 요구 추력 산정

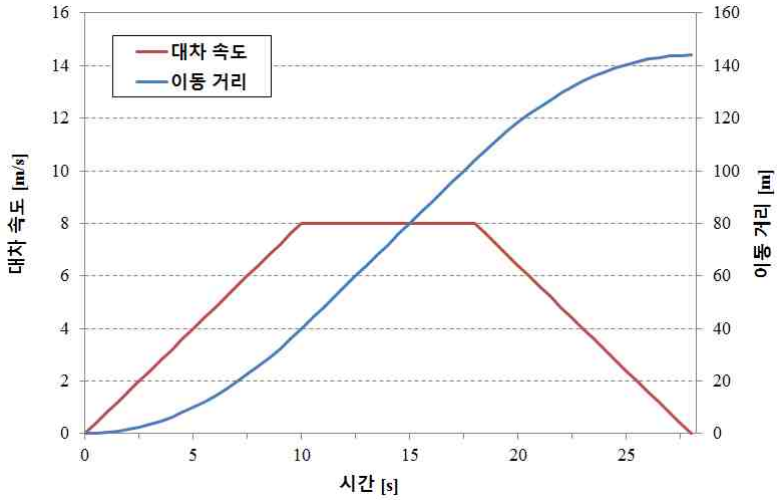
LSM 시험대차가 150m 노선에서 가속을 시작하여 최대속도 28.8km/h를 달성하고 최대속도로 일정시간 주행 후 안전하게 정지해야 한다. LSM 시험대차의 최대 가속도를 0.8m/s^{2}으로 가정하면, 최대 가속도를 달성하기 위해 필요한 LSM 1대의 요구 추력은 400N이다.

② 150m 선로에서 LSM 시험대차 주행 특성 분석

시험대차의 경우, 30km/h 이하의 저속으로 운행하기 때문에 주행저항이 크지 않다. 따라서 계산상의 편의를 위해 주행저항을 무시하고 가속도 계산하였다.

LSM이 정지 상태에서 28.8km/h까지 가속 시 고정자 전류 520A(rms) 전류위상각 0deg, 계자전류 4A 유지할 경우, 4극 LSM 모듈 1개의 발생 추력은 400N이며, 시험대차는 4극 LSM 모듈 2개를 가지므로 총 발생 추력은 800N이 된다.

총 중량 1,000kg의 LSM 시험대차의 추력이 800N일 때, 최대 가속도는 0.8m/s^{2}이 된다.



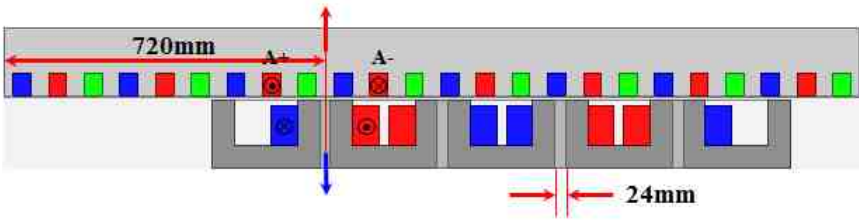
[그림 2.5.111] 시험대차의 시간에 대한 속도 및 이동거리 그래프

최대 가속도와 최대 감속도가 동일하다고 가정하여 위 그림과 같은 그래프를 얻었다. 시험대차의 전체 길이를 약 5m로 가정하면, 150m 주행선로에서 주행 가능한 거리는 145m 미만이다. 또한 각 구간별 주행 거리 및 시간은 다음과 같다.

- 0초부터 10초까지 약 0.8m/s^{2}으로 가속, 가속거리는 약 40m
- 10초부터 18초까지 약 8초간 최대속도 28.8km/h(8m/s)로 정속 주행
- 18초부터 28초까지 약 10초간 약 -0.8m/s^{2}으로 감속, 감속거리는 약 40m.
- 총 주행 시간은 28초, 주행 거리는 144m

③ 계자 권선 설계

LSM 시험대차 설계를 위해 다음 그림과 같이 4극 LSM을 모델링하였다. 해석 모델의 고정자 권선은 4턴, 고정자의 극 피치는 240mm, 계자 권선은 360턴이며, 계자의 극 피치는 264mm(=240mm+24mm)이다. 또한 초기위치 설정을 위해 720mm 이동시켰다(D축 정렬, 전류위상각 0deg)

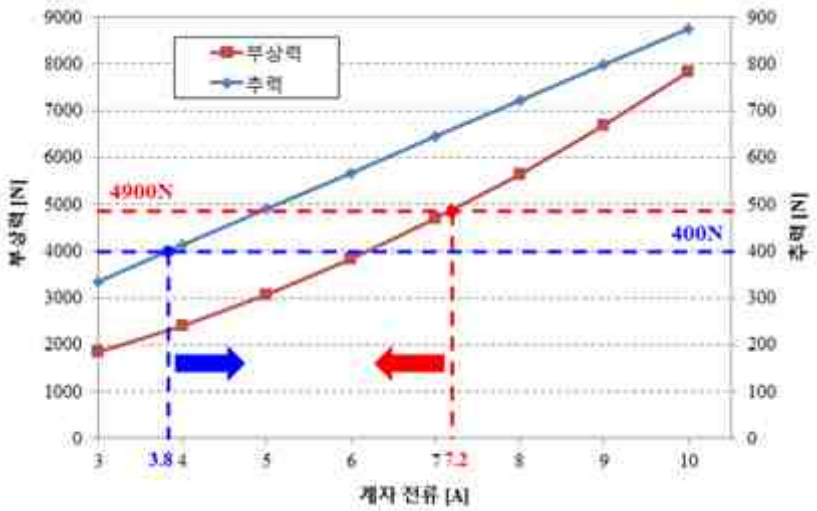


[그림 2.5.112] LSM 부상전자석 4극 모델

④ 계자 전류 크기에 따른 LSM 특성

[그림 2.5.113]와 같이 계자 전류가 약 3.8A 이상일 때 요구 추력 400N을 만족시켰다. 그러나 부상전자석이 고정자에 붙지 않기 위해서는 요구 부상력 4,900N보다

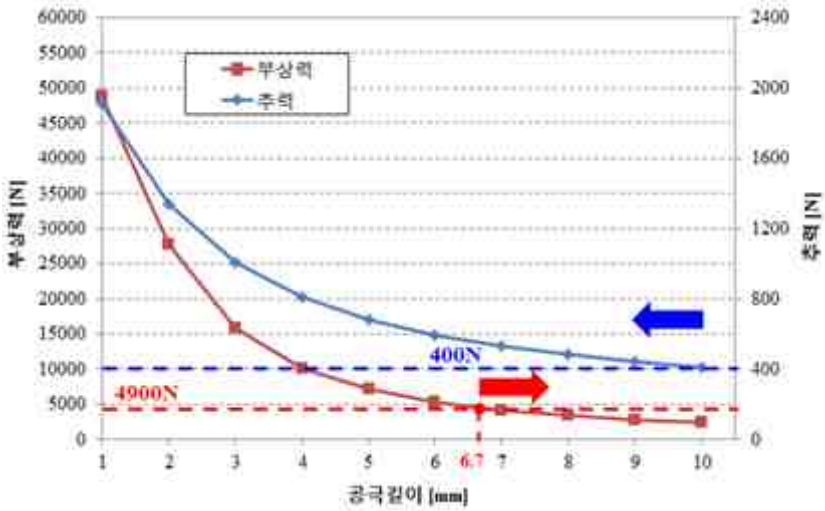
작아야 하므로, 계자 전류는 약 7.2A 이상 인가해서는 안 된다. 따라서 시험대차의 계자 전류는 3.8A~7.2A 범위에서 선정해야 한다. 시험대차가 시험선을 운행할 때, 공극길이가 순간적으로 10mm 이하로 줄어들 수 있으므로, 부상력이 최대한 낮은 것이 유리하다. 따라서 계자 전류를 4A로 결정하였다.



[그림 2.5.113] 계자 전류 크기에 따른 LSM의 부상력 및 추력 특성

⑤ 공극길이에 따른 LSM 특성

이 상태에서 공극길이를 10mm부터 1mm까지 변경하면서 LSM의 추력 및 부상력 특성을 해석하여 다음 그림과 같은 그래프를 얻었다.



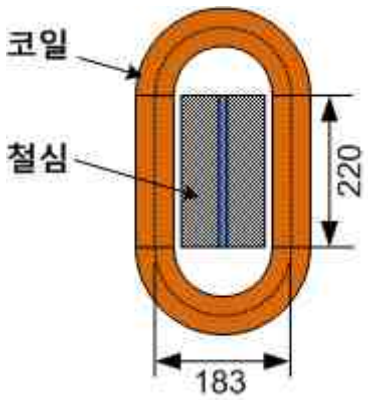
[그림 2.5.114] 공극길이에 따른 LSM의 부상력 및 추력 특성

위의 그래프와 같이 공극길이가 약 6.7mm 이하로 줄어들게 되면 LSM의 부상력

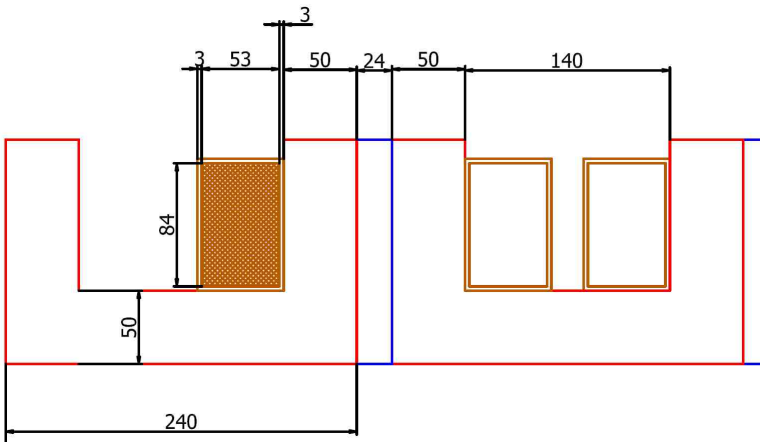
이 요구 부상력 4,900N보다 커져서 부상전자석이 고정자에 달라붙게 된다. 따라서 공극길이가 약 6.7mm보다 줄어들지 않도록 유지해야 한다.

⑥ LSM 시험대차의 계자 권선 저항 계산

LSM 시험대차의 전자석 계자는 정격전류 10A, 권선 수 360턴이다. 계자의 전류밀도를 2A/mm^{2}으로 설정할 경우, 코일 직경 약 2.5mm가 된다. 계자 권선의 피복 두께 및 환동선 권선 시행을 고려하여 코일 영역 결정하였으며, 다음 그림과 같이 코일이 감긴다고 가정하였다.



[그림 2.5.115] 시험대차용 전자석 계자 권선



[그림 2.5.116] 시험대차용 전자석 계자 및 권선 사이즈

코일 1턴의 길이를 코일 영역 중앙 기준으로 계산하였으며, 코일의 재질을 알루미늄(비저항 2.65E-8Ωm)으로 가정하였다. 4개의 극 권선을 직렬로 연결한다고 가정하면, 4극 LSM 모듈 1개의 계자 권선 저항은 7.75Ω이 된다. 따라서 계자 권선에 정격전류 10A가 흐르기 위해서는 77.5V의 전압을 가해줘야 한다. 그러나 시험대차는 계자 권선 전류가 4A만 필요하므로, 31V의 전압만 걸어주면 된다. 만약, 4극 LSM 모듈 2개를 직렬 연결할 경우, 전체 계자 권선 저항은 15.5Ω이며, 4극 LSM

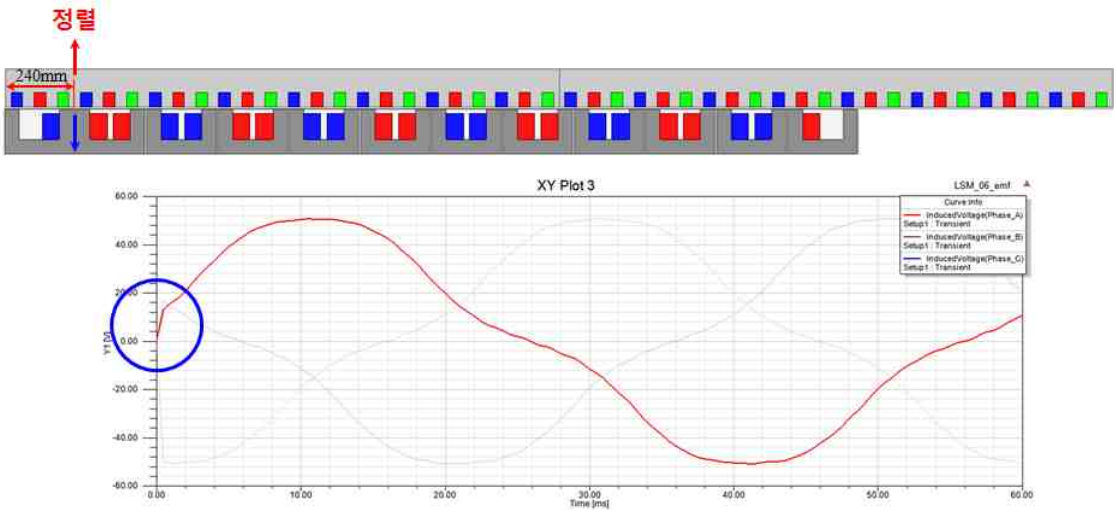
모듈 2개를 병렬 연결할 경우, 전체 계자 권선 저항은 3.88Ω이 된다.

(2) LSM 제어 정수 추출 해석

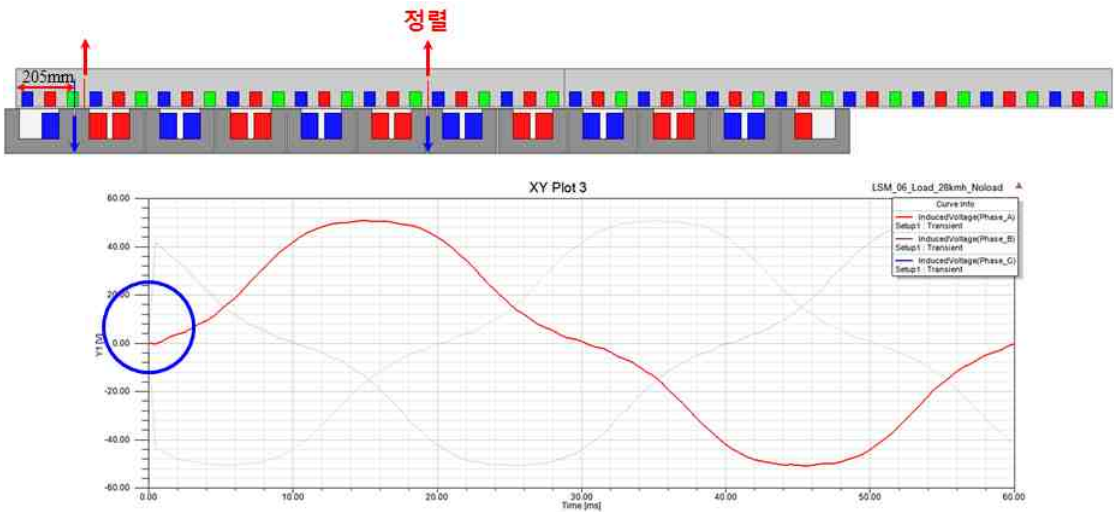
가) LSM D축 정렬 기준 변경

- 기존의 D축 정렬 기준: 고정자 권선 A상 기자력 축과 부상전자석의 첫 번째 극의 중심을 정렬
- 변경된 D축 정렬 기준: 고정자 권선 A상 기자력 축과 부상전자석의 여섯 번째 극의 중심을 정렬

기존의 D축 정렬 기준의 경우 다음 [그림 2.5.117]과 같이 A상의 무부하 역기전력의 위상이 약 26.2deg 앞서게 된다. 그러나 D축 정렬 기준을 부상전자석의 첫 번째 극이 아닌 [그림 2.5.118]와 같이 여섯 번째 극에 정렬시킬 경우, A상의 무부하 역기전력은 0V에서 시작하는 사인파가 된다.



[그림 2.5.117] 기존 D축 정렬에 의한 A상의 무부하 역기전력 파형

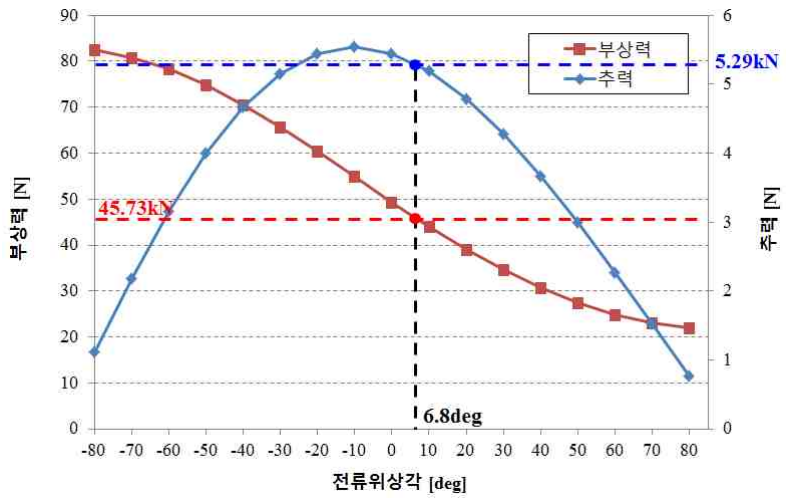


[그림 2.5.118] 변경된 D축 정렬에 의한 A상의 무부하 역기전력 파형

이렇게 D축 정렬 기준이 변경됨에 따라 기존의 LSM 운전 조건도 다음과 같이 변경되었다.

- 기존 450A, 33deg로 운전 → 450A, 6.8deg로 운전

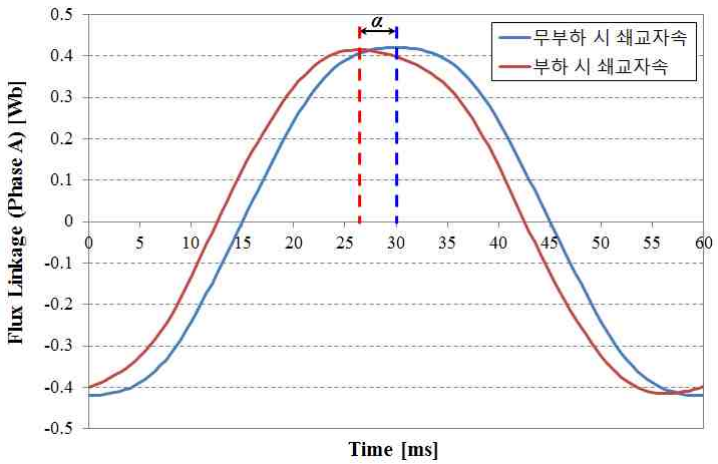
요구부상력 45.73kN을 만족시키며 요구추력 5.2kN을 만족하는 운전 조건은 다음과 같이 고정자 전류 450A에서 전류위상각 6.8deg일 때이다.



[그림 2.5.119] 변경된 D축 정렬 기준 전류위상각에 대한 추력 및 부상력 양상

(나) D축 Q축 인덕턴스 산정

• LSM의 고정자 권선에는 전류를 인가하지 않고 계자 권선에 DC 17A의 전류를 인가함
• D축 정렬된 상태에서 위의 조건으로 28.8km/h의 속도로 부상전자석을 이동시킬 경우, 시간에 따른 고정자 A상 권선에 쇄교하는 자속량의 변화는 다음 그림의 파란색 그래프와 같이 나타남



[그림 2.5.120] 부상전자석 이동에 따른 A상 권선의 쇄교자속 변화

• LSM의 고정자 권선에 450A의 3상 교류 전류를 전류위상각 6.8deg로 인가함
• 3상 교류 전원의 투입으로 부상전자석은 28.8km/h의 속도로 이동하게 됨
• 이때의 시간에 따른 고정자 A상 권선에 쇄교하는 자속량의 변화는 [그림 2.5.120]의 빨간색 그래프와 같이 α만큼의 위상차가 나타남
• LSM의 D축, Q축 인덕턴스를 다음 식을 통하여 계산함

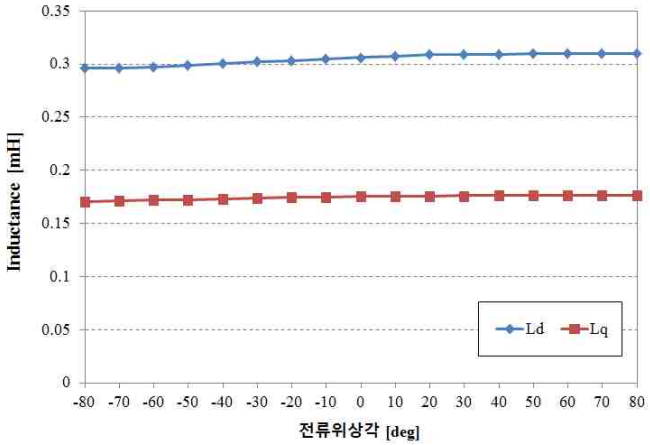
$$i_d = -I_a \sin\beta, \qquad i_q = I_a \cos\beta$$

$$\Psi_a = \sqrt{3}\Psi_{ua}, \qquad \Psi_o = \sqrt{3}\Psi_{uo}$$

$$L_d = \frac{\Psi_o \cos\alpha - \Psi_a}{i_d}, \qquad L_q = \frac{\Psi_o \sin\alpha}{i_q}$$

여기서, I_a : 상전류 최대치($450 \times \sqrt{2}$) [A]
Ψ_{ua} : 무부하 시 쇄교자속 실효값 [Wb]
Ψ_{uo} : 부하 시 쇄교자속 실효값 [Wb]
α : 무부하 시와 부하 시 쇄교자속 파형의 위상차 [deg]

전류위상각에 대한 D축, Q축 인덕턴스는 다음 그림과 같이 나타난다.



[그림 2.5.121] 전류위상각에 따른 D축, Q축 인덕턴스

D축, Q축 인덕턴스는 전류위상각에 따라 큰 변화가 없으며, 최대추력 운전 포인트인 전류 450A, 전류위상각 6.8deg에서의 인덕턴스는 다음과 같다.

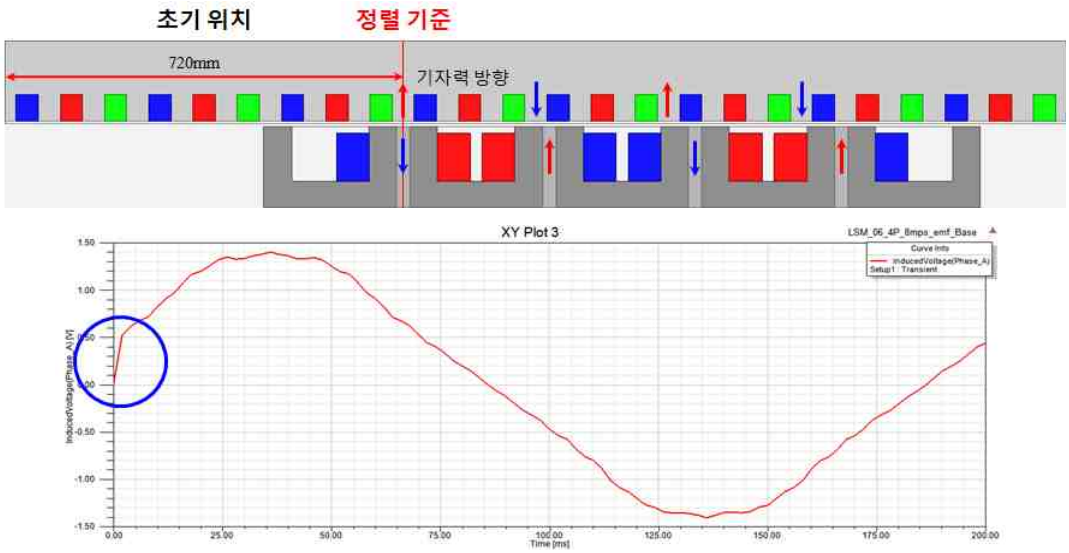
L_d : 0.308mH L_q : 0.176mH

(다) LSM 시험대차의 D축 정렬 기준 변경에 따른 운전조건 재계산

고정자 권선의 극피치는 240mm인 반면, LSM 시험대차 부상전자석의 극피치는 240+24mm로 모든 극에 대하여 기자력 축 정렬이 불가능하다. 따라서 부상전자석 1극에 대하여 정렬하면 나머지 극은 기자력 축이 어긋나게 된다.

• 기존의 D축 정렬 기준: 고정자 권선 A상 기자력 축과 부상전자석의 첫 번째 극의 중심을 정렬

기존의 D축 정렬 기준의 경우 [그림 2.5.122]과 같이 A상의 무부하 역기전력의 위상이 약간 앞선다. 무부하 역기전력의 위상이 0deg가 되도록 하려면, 부상전자석 모듈의 중심 부분이 [그림 2.5.123]와 같이 A상 권선의 중심에 오게 해야 한다. 이때의 초기 위치는 684mm가 된다.



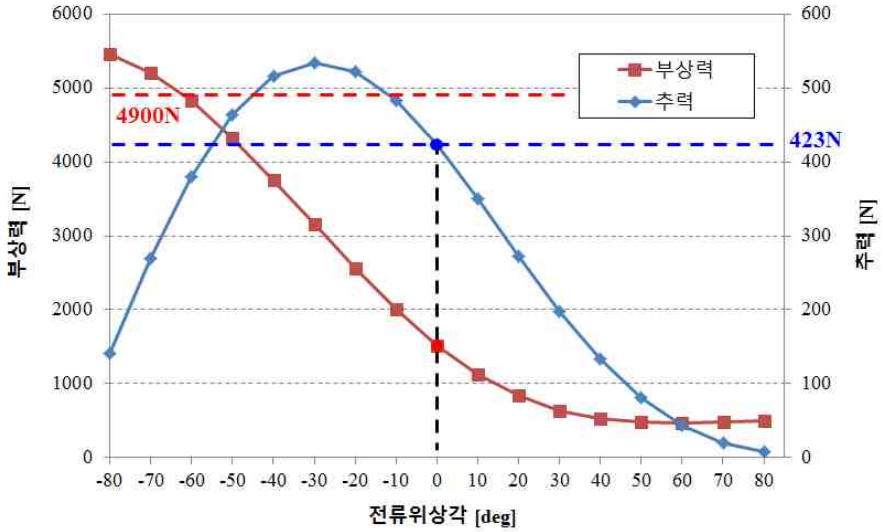
[그림 2.5.122] 기존 D축 정렬에 의한 A상의 무부하 역기전력 파형



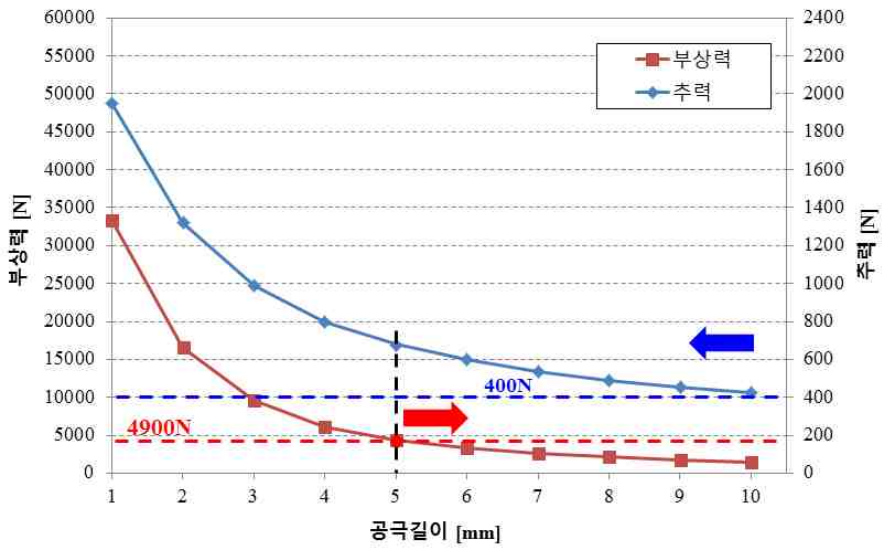
[그림 2.5.123] 변경된 D축 정렬에 의한 A상의 무부하 역기전력 파형

LSM 시험대차는 부상전자석에 의해 부상을 하지 않고, 바퀴를 통해 일정 공극을 유지한다. 따라서 부상전자석은 오직 추력 발생에만 관여하고, 부상력은 시험대차의 요구 부상력 4,900N을 넘어서는 안 된다. 따라서 LSM 시험대차의 운전조건은 계자 전류 4A, 고정자 전류 450A, 전류위상각 0deg가 된다.

다음 [그림 2.5.124]와 같이 상기 운전조건에서 부상력은 약 1,520N으로 요구 부상력(4,900N)보다 작아 부상전자석이 고정자 철심에 붙지 않으며, 추력은 약 423N으로 요구 추력 400N 이상을 만족한다.



[그림 2.5.124] 변경된 D축 정렬 기준에서 전류위상각에 대한 추력 및 부상력 양상



[그림 2.5.125] 고정자 전류 450A, 계자 전류 4A, 전류위상각 0deg

D축 정렬 기준 변경(초기 위치 변경)으로 공극길이에 대한 부상력의 크기가 전체적으로 줄어들었다. 따라서 기존의 초기 위치 720mm 조건에서는 공극길이 6.7mm 이상을 유지해야 했으나, 변경된 초기 위치 684mm 조건에서는 공극길이 5mm 이상을 유지해야 하므로 공극의 여유가 1.7mm 늘어났다.

(라) LSM 시험대차의 D축 Q축 인덕턴스 산정

• LSM의 고정자 권선에는 전류를 인가하지 않고 계자 권선에 DC 4A의 전류를 인가함

• 초기 위치 684mm에서 부상전자석을 이동시키며 시간에 따른 고정자 A상 권선에 쇄교하는 자속량을 변화를 계산함
• 다음으로 LSM의 고정자 권선에 450A의 3상 교류 전류를 전류위상각 10deg 간격으로 인가함
• 3상 교류 전원의 투입으로 부상전자석은 28.8km/h의 속도로 이동하게 됨
• 이때의 시간에 따른 고정자 A상 권선에 쇄교하는 자속량의 변화를 계산함
• LSM 시험대차의 D축, Q축 인덕턴스는 시제차량용 LSM 11극 모델과 동일하게 다음 식을 통하여 계산함

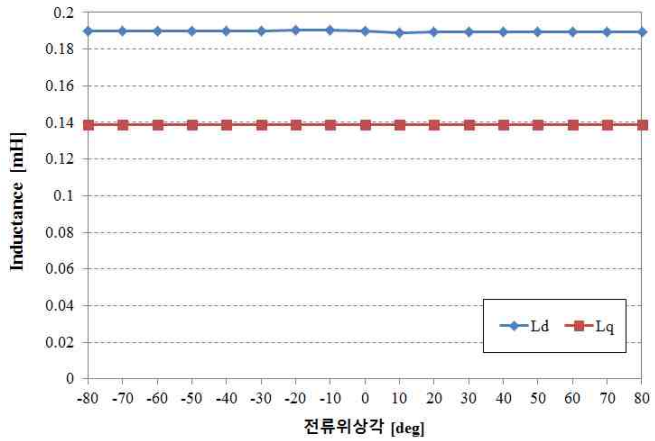
$$i_d = -I_a \sin\beta, \qquad i_q = I_a \cos\beta$$

$$\Psi_a = \sqrt{3}\Psi_{ua}, \qquad \Psi_o = \sqrt{3}\Psi_{uo}$$

$$L_d = \frac{\Psi_o \cos\alpha - \Psi_a}{i_d}, \qquad L_q = \frac{\Psi_o \sin\alpha}{i_q}$$

여기서, I_a : 상전류 최대치$(450 \times \sqrt{2})$ [A]
Ψ_{ua} : 무부하 시 쇄교자속 실효값 [Wb]
Ψ_{uo} : 부하 시 쇄교자속 실효값 [Wb]
α : 무부하 시와 부하 시 쇄교자속 파형의 위상차 [deg]

전류위상각에 대한 LSM 시험대차의 D축, Q축 인덕턴스는 다음 그림과 같이 나타난다.



[그림 2.5.126] 전류위상각에 따른 D축, Q축 인덕턴스

D축, Q축 인덕턴스는 전류위상각에 따라 큰 변화가 없으며, LSM 시험대차의 운전 포인트인 계자 전류 4A, 고정자 전류 450A, 전류위상각 0deg에서의 인덕턴스는 다

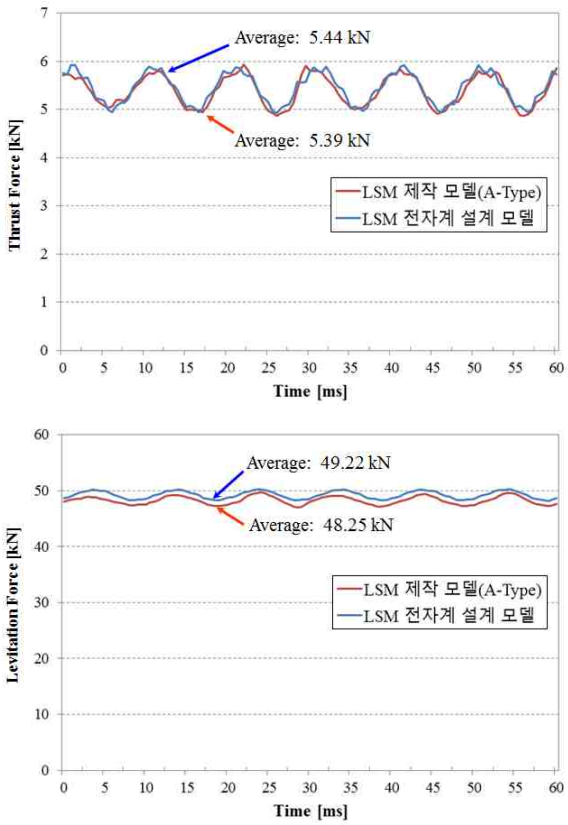
음과 같다.

L_d : 0.190mH L_q : 0.139mH

(3) LSM 제작모델 특성 해석 및 고정자 권선 배치 검토

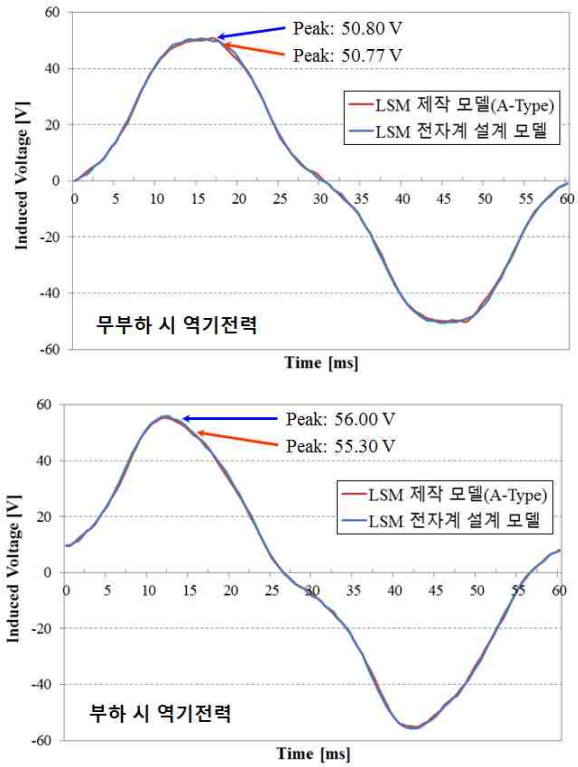
(가) LSM 전자계 설계 모델과 제작 모델의 출력 특성 비교

다음 [그림 2.5.127]의 그래프와 같이 LSM 제작 모델은 전자계 설계 모델에 비해서 추력은 약 1%, 부상력은 약 2%가 감소한다. 그러나 LSM의 요구 사양(추력 5.2kN 이상)은 만족한다.



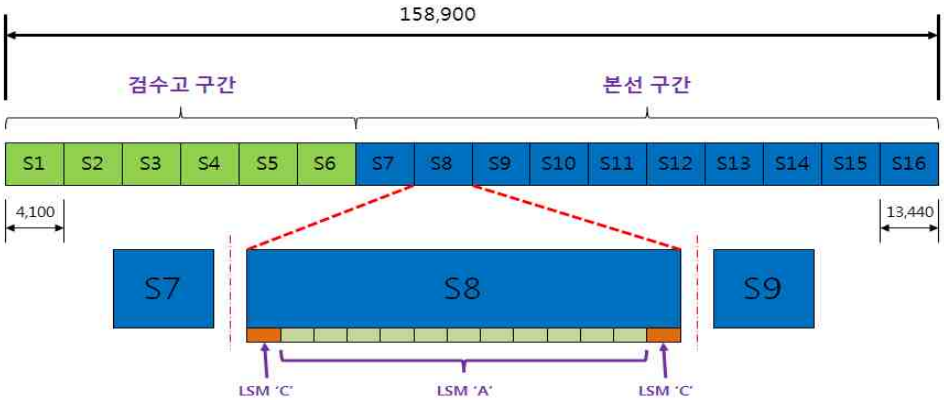
[그림 2.5.127] LSM 전자계 설계 모델과 제작 모델의 추력 및 부상력 특성 비교

다음 [그림 2.5.128]는 LSM 전자계 설계 모델과 제작 모델의 역기전력 특성을 비교한 그래프를 나타낸다. 무부하 시와 부하 시 역기전력의 경우, 두 모델이 거의 유사한 형태와 크기를 가진다. 따라서 LSM 제작 모델은 전자계 설계 모델에 비해 2% 미만의 아주 미미한 출력 저하만 존재한다.



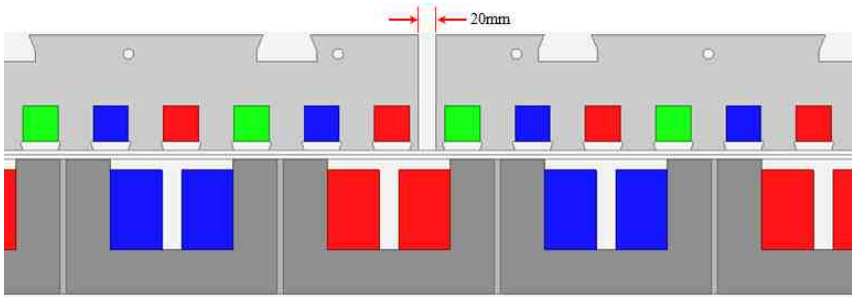
[그림 2.5.128] LSM 전자계 설계 모델과 제작 모델의 역기전력 특성 비교

(나) LSM 제작 모델 C-Type 특성 해석



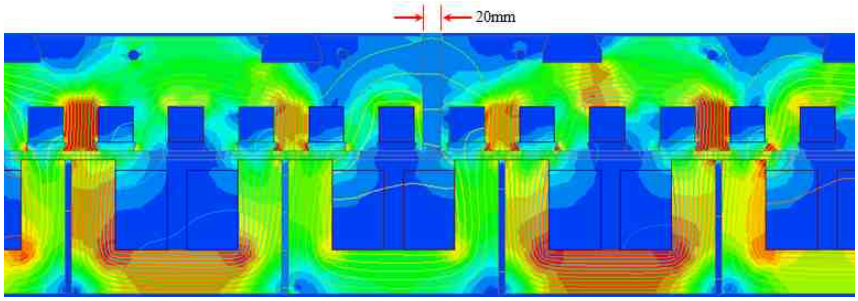
[그림 2.5.129] LSM Unit C-Type 설치 위치

자기부상열차 단거리 시험선(약 159m)에서 본선 구간의 LSM 고정자는 다음 [그림 2.5.130]과 같이 13.44m마다 20mm 간격으로 떨어져 있다.



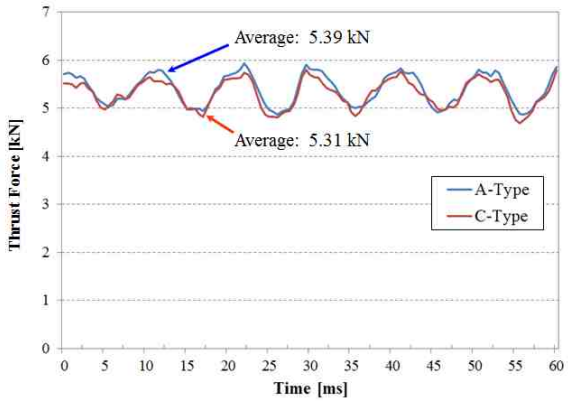
[그림 2.5.130] LSM 제작 모델(C-Type)

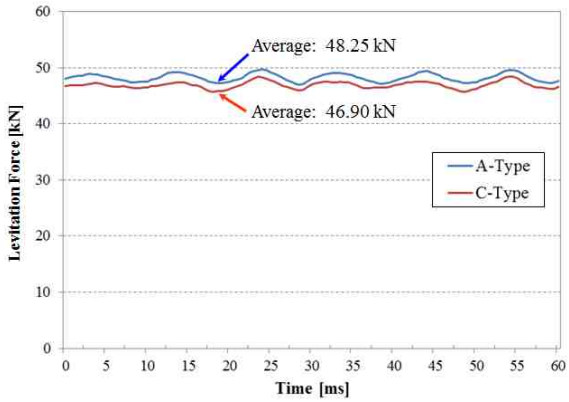
본선 구간에서 S8과 S9 사이의 LSM 고정자는 [그림 2.5.130]과 같이 모델링할 수 있다. 이 C-Type 모델의 유한요소해석 결과를 보면, [그림 2.5.131]와 같이 20mm 공극 부분에서 자속량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.



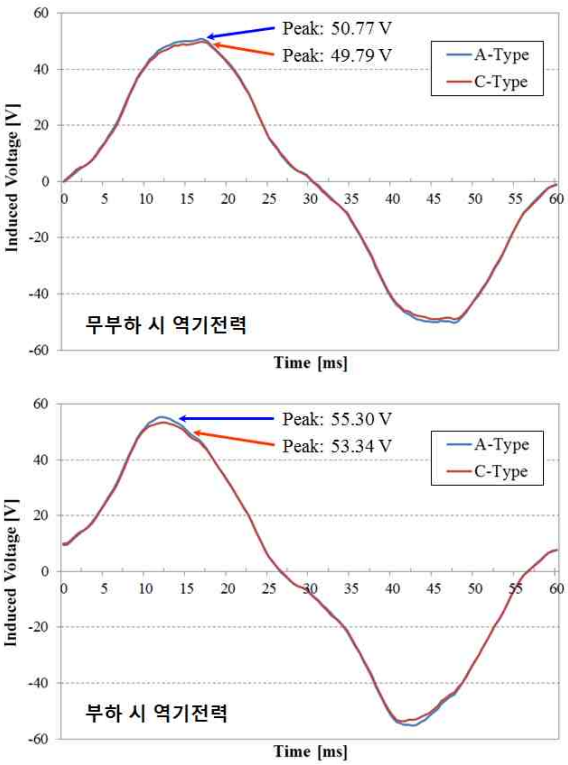
[그림 2.5.131 LSM] 제작 모델(C-Type) 유한요소해석 결과

다음 [그림 2.5.132]과 같이 LSM 고정자 불연속 모델(C-Type)은 연속 모델(A-Type)에 비해서 추력은 약 1.5%, 부상력은 약 2.8% 감소한다. 그러나 LSM 요구 사양은 만족한다.





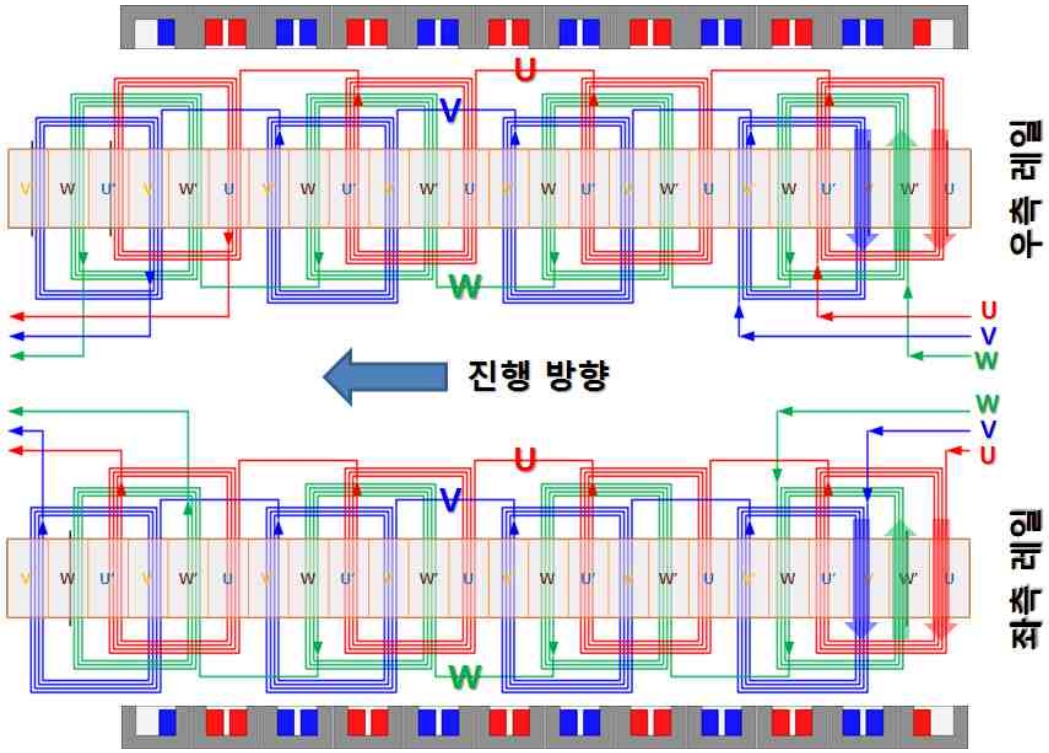
[그림 2.5.132] LSM 고정자 연속 모델(A-Type)과 불연속 모델(C-Type)의 추력 및 부상력 특성 비교



[그림 2.5.133] LSM 고정자 A-Type과 C-Type의 역기전력 특성 비교

[그림 2.5.133]는 LSM 고정자 연속 모델(A-Type)과 불연속 모델(C-Type)의 역기전력 특성을 비교한 그래프이다. LSM 고정자 불연속 모델의 역기전력 최댓값은 연속 모델에 비해서 무부하 시 약 1.9%, 부하 시 약 3.5% 감소된다. 따라서 LSM 고정자 이음매 부분은 정상적인 고정자 부분에 비해 약 3% 미만의 출력 저하가 발생하지만, LSM 요구 사양은 만족한다.

(다) LSM 고정자 권선 배치 검토



[그림 2.5.134] LSM 고정자 권선 배치도

[그림 2.5.134]는 가이드웨이 위에서 아래로 내려다본 LSM 고정자 권선 배치도를 나타낸다. 가이드웨이 안쪽에서부터 U, V, W상의 권선이 시작되며 순서와 방향을 주의하며 시공해야 한다.

라. LSM 성능 측정 시험(4차년도)

(1) 부상력 측정 시험

설계된 LSM의 부상력 측정은 로드 셀을 이용한 측정 대신에 실제 차량을 제작한 후 부상전자석 전류를 측정하는 것 대체하였고, 약 150m 길이의 LSM 단거리 시험선의 제작 과정 및 자기부상열차의 부상전자석 전류 측정 결과에 대하여 서술하였다.

(가) 단거리 시험선 LSM의 제작

약 150m 길이의 단거리 시험선 건설을 위해 부지를 선정하고 지반공사 및 접지시공을 실시하였다. 그 후 [그림 2.5.135]과 같이 전체길이가 약 150m가 되는 가이드웨이의 콘크리트 거더(girder)를 건설하였다. 콘크리트 거더는 열팽창을 고려하여 30m마다 20mm의 갭을 두었다.

콘크리트 거더 위에 올라갈 가이드웨이 상판 구조물[그림 2.5.135]을 약 13m 단위로 제작하고, 여기에 LSM 고정자를 조립한다. 여기서 고정자는 960mm 길이 단위로 나눠서 제작한 후 조립한다.



[그림 2.5.135] 가이드웨이 거더

[그림 2.5.137]과 같이 조립된 고정자에 권선을 시행하고 이탈방지를 위해 슬롯쐐기를 삽입하고 엔드턴을 가이드웨이 안쪽과 묶어준다.

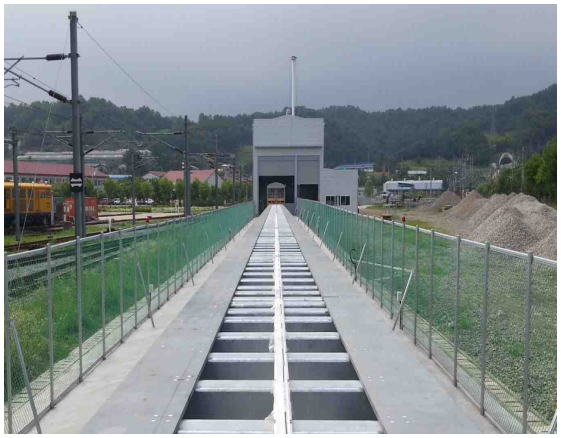
권선 작업까지 완료된 가이드웨이 상판을 콘크리트 거더 위에 올린 후 고정시켜서 [그림 2.5.138]와 같이 단거리 시험선을 완공하였다.



[그림 2.5.136] 가이드웨이 상판 구조물



[그림 2.5.137] LSM 고정자 권선 작업



[그림 2.5.138] LSM 단거리 시험선

(나) 부상전자석 계자 전류의 측정

[그림 2.5.139]과 같이 완공된 가이드웨이에 자기부상열차 차량을 올려놓았다. 차량의 중량은 설계 단계에서 28ton이 될 것으로 예상하고 설계하였으나, 제작 후 측정한 중량은 약 26.5ton으로 약 1.5ton이 줄어들었다. 따라서 부상전자석 1모듈의 요구 부상력도 45.73kN에서 43.28kN으로 감소하였다.

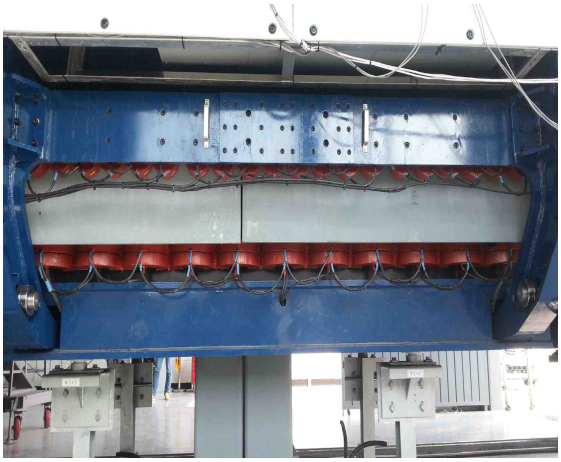
[그림 2.5.140]은 자기부상열차의 부상전자석 1모듈을 나타내며, 1모듈당 11개의 극을 갖는다. 차량이 정지된 상태에서 이 부상전자석에 전류를 인가하여 차량을 부상시켰다. 차량을 부상시키기 전에는 LSM의 공극길이가 20mm이고, 차량을 7mm만큼 부상시키면 LSM의 공극길이는 13mm가 된다. 이렇게 LSM의 공극길이가 13mm일 때 부상전자석의 계자 권선에 흐르는 전류는 [그림 2.5.141]와 같이 약 22A로 측정되었다.

LSM의 설계 시 조건과 측정 시 조건이 달라졌기 때문에 LSM 해석 모델을 측정 시와 동일한 조건으로 변경하여 2차원(2D) 유한요소해석을 실시하였다. 또한 횡방향 자속 및 엔드턴 누설 자속을 확인하기 위해서 3차원(3D) 유한요소해석도 함께 진행

하였으며, 2D 해석 결과와 비교하였다.



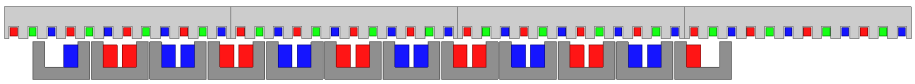
[그림 2.5.139] 시험선 운행용 자기부상열차



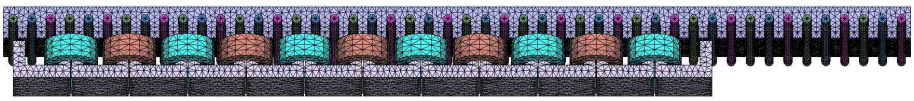
[그림 2.5.140] 자기부상열차의 부상전자석



[그림 2.5.141] 부상전자석의 전류 파형 (공극 13mm)



(a) 2D 모델



(a) 3D 모델

[그림 2.5.142] LSM 유한요소해석 모델

[그림 2.5.142]은 2D와 3D 유한요소해석 모델을 나타낸다. 두 모델 모두 13mm의 공극을 가지며 고정자 권선에는 전류를 인가하지 않고, 부상전자석에만 22A의 직류 전류를 인가하는 조건으로 해석하였다. 차량의 중량이 26.5ton이므로 해석 모델의 부상력이 43.28kN 수준으로 나와야 한다. 그러나 2D 해석 결과 부상력은 약 50.89kN으로 약 17.57% 더 높게 나왔으며, 3D 해석 결과도 약 51.90kN으로 약 19.91% 더 높게 나왔다.

3D 해석 모델의 부상력은 2D 해석 모델에 비해 약 2% 정도 높게 나왔다. 따라서 LSM의 횡방향 자속 및 엔드턴 누설 자속의 영향은 거의 없다고 볼 수 있다.

측정 오차의 원인은 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 첫 번째은 계측 오차다. LSM의 부상력 F_n은 바로 아래 두 개의 식으로부터 그 다음 식과 같이 표현되며,

유효 공극길이 g'가 일정할 때, 부상력 F_n은 계자 전류 I_f의 제곱에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$B_{gf} = \frac{\mu_0}{g'(1+k_{sat})} N_f I_f \qquad F_n = \frac{B_{gf}^2 \alpha_p \tau L_{stk}}{2\mu_0} N_{poles}$$

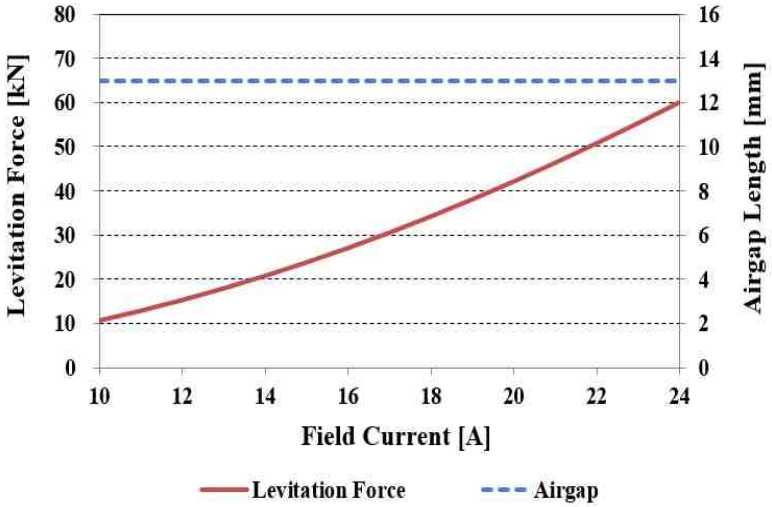
$$F_n = \mu_0 \tau_{p2} L_{stk} p \left(\frac{N_f I_f}{g'(1+k_{sat})} \right)^2$$

또한, [그림 2.5.143]는 LSM의 공극길이가 13mm로 일정할 때, 계자 전류에 따른 부상력 크기를 나타낸다. 이 그래프는 정확한 해석을 위해 2D 유한요소해석으로 구했다. 바로 위의 식과 같이 [그림 2.5.143]의 부상력 그래프도 계자전류에 제곱에 비례하는 형태를 보인다. 그래프에 따르면, LSM의 공극이 13mm일 때 계자 전류는 22A가 아닌 약 20.3A 정도로 측정되어야 한다. 즉, 1.7A가 계측 오차일 수도 있다.

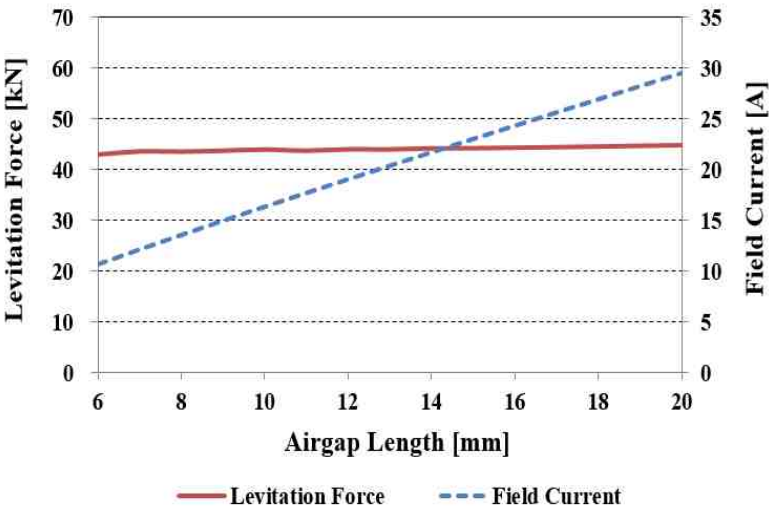
두 번째는 제작 공차에 의한 오차다. 계자 전류 I_f는 위의 첫째 줄의 제 1항의 식으로부터 아래 식과 같이 쓸 수 있다. 또한 부상력 F_n이 일정하려면 식 위의 첫째 줄의 제 2항의 식에 의해 공극자속밀도 B_{gf}가 일정해야 한다. 따라서 아래 식에서 B_{gf}가 일정할 때, 계자 전류 I_f는 유효 공극길이 g'에 비례한다.

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

또한 [그림 2.5.144]은 LSM 2D 해석 모델에서 부상력의 크기를 요구 부상력 43.28kN 수준에 맞췄을 때, 공극길이에 따른 계자 전류 크기를 나타낸다. 바로 위의 식과 같이 [그림 2.5.155]의 계자 전류그래프 또한 공극길이에 비례하는 것을 알 수 있다. 카터 계수는 공극길이에 따라 바뀌므로 공극길이와 유효 공극길이의 차이는 공극길이가 작을수록 커지는 경향이 있지만 여기서는 일정하다고 가정한다. 그래프에 따르면, 계자 전류가 22A일 때, LSM의 공극 길이는 약 14mm이다. 즉, 1mm의 오차가 발생하는데, 이것은 가이드웨이의 제작 공차일 수도 있다. [그림 2.5.136]과 같은 가이드웨이 상판 구조물 1블록의 길이는 약 13m에 달하며, 정밀한 제작이 쉽지 않아서 1mm의 제작 공차는 허용된다. 따라서 공극길이 13mm에서 [그림 2.5.143]와 같은 측정결과가 나올 수 있다. 결국, LSM의 부상전자석은 가이드웨이의 제작 공차를 고려하여 충분한 마진을 두고 설계해야 한다.



[그림 2.5.143] 계자 전류에 따른 부상력 크기(공극 일정)



[그림 2.5.144] 공극길이에 따른 계자 전류 크기(부상력 일정)