

초고속 추진 및 시스템 엔지니어링 기술개발

최종보고서

2015. 3.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관/한국철도기술연구원
협동연구기관/우진산전
위탁연구기관/한양대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "초고속 자기부상철도 핵심기술개발"과제(세부과제 "초고속 추진 및 시스템 엔지니어링 기술개발")의 보고서로 제출합니다.

2015. 03.

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원

주관연구책임자 : 한영재

연구원 : 이창영, 김이현, 조정민

" : 이진호(기계), 이진호(토목)

" : 배덕영, 신현철

공동연구기관명 : 한국철도시설공단

공동연구책임자 : 정남철

공동연구기관명 : 우진산전

공동연구책임자 : 이은규

보고서 요약서

과제고유번호	11PRTD -B061485	해 당 단 계 연 구 기 간	2011.12.23.~ 2015.3.29	단 계 구 분	(해당단계)/ (총 단 계)
연 구 사 업 명	미래철도기술개발사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	초고속 자기부상철도 핵심기술개발			
	단위과제명 (주관)	초고속 추진 및 시스템 엔지니어링 기술개발			
	단위과제명 (공동)	초고속철도 가이드웨이 기술개발 및 단거리 시험선 구축			
	단위과제명 (공동)	추진 및 전력시스템 기술개발			
연 구 책 임 자	한영재	총연구기간 참 여 연구원수	총: 41명 내부: 38명 외부: 3명	총연구비	정부 : 1,358천원 기업 : 946.7천원 계 : 2,304.7천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한국철도기술연구원 자기부상철도연구팀		공동기관명	한국철도시설공단, 우진산전(주)	
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	939p

(목적)

- 설계속도 550km/h 자기부상추진전력시스템 개발 및 150m 단거리 시험선 구축을 통해 성능 검증

(목표)

- 3MVA급 추진전력시스템 개발
- TR07급 최대추력 및 가감속도 달성

(성과)

- 최고 가(감)속도 1.1m/s^2 의 LSM 추진제어기술 개발 및 성능 검증
- 550km/h급 LSM의 6개 마그네틱모듈에 요구되는 추력 24.88kN 달성
- 가이드웨이 동특성 분석을 통한 설계사양 제시 및 시뮬레이션 모델 정립
- 종합계측시스템 구축 및 운영을 통한 실험자료 DB화 및 분석
- 시스템 인터페이스 기술개발을 통한 최적의 개별사양 도출
- 국내최초 LSM 기반 가이드웨이 개발
- 3MVA급 초고속 자기부상철도용 전력시스템 구축
- IEC61850의 통신규약을 적용한 SCADA 시스템 개발 및 실험

(기대성과 및 활용계획)

- 550km/h급 초고속 자기부상철도 개발시 연구자료로 활용
- LSM 기반 신교통시스템 적용시 기초자료로 활용
- 중저속 자기부상열차의 추진효율 향상을 위한 활용 검토

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	초고속, 선형동기전동기, 추진 인버터, 전력모니터링장치
	영 어	Super-speed, Linear Synchronous Motor, Propulsion Inverter, SCADA

요 약 문

I. 제 목

초고속 추진 및 시스템 엔지니어링 기술 개발

II. 연구개발과제 개요

1. 필요성

최근 지구온난화 및 원유 공급 감소 또는 고갈로 에너지 효율성 높고 저탄소 녹색성장을 주도할 수 있는 철도산업에 대한 관심이 고조되고 있다. 철도산업은 정부정책기조에 따라 기존 철도의 노선을 활용하면서도 운송 밀도를 최대한 높이기 위해 바퀴식 철도의 증속방안에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 자기부상 열차는 높은 가감속도의 특징을 지니고 있어 배차간격의 최소화가 가능하다. 또한 초고속 자기부상철도는 바퀴식 철도의 초고속화에는 따르는 문제점인 초고속 주행시 차량의 탈선, 차량의 대전력 에너지 급전, 철도기준에서 정하는 안전거리 내에서의 제동, 에너지 효율 저하, 바퀴와 레일사이의 마찰로 인한 소음문제 등에 대한 해결방안으로 필요성이 대두되고 있다.

- 초고속 자기부상은 대차가 궤도를 감싼 구조적인 특징으로 탈선염려가 없음
- 또한, 비접촉 추진방식으로 인해 바퀴로 인한 소음문제가 해소
- 지상 1차 추진전력 공급시스템으로 인해 대용량 전력의 차량 공급문제를 해소
- 초고속 주행 중 추진 장치에 문제 발생으로 인한 급제동시 차량 하부에 스키드 패드(Skid pads)로 급제동이 가능함

또한 초고속 자기부상철도는 에너지 효율이 높은 경제적인 교통수단으로써, 단위 수송당(인-km) 온실가스 배출량이 자동차의 38%, 항공기의 17%에 불과하고, 같은 궤도운송시스템인 고속철도에 비해서도 77%에 불과하고 단위수송당 에너지 소비율이 항공기의 80% 수준에 불과하므로, 화석에너지의 고갈이 예상되는 미래에 장거리 고속 이동 수단으로써 중요성이 확대되고 있다

2. 목적

본 과제의 연구목적은 지상 1차 선형동기전동기에 의해 구동되는 550km/h급 초고속 자기부상철도시스템용 추진전력시스템의 설계기술을 검증하기 위한 것으로써, 1단계 연구에서는 최대속도 550km/h의 초고속 자기부상철도에서 요구되는 추진전력시스템과 150m 길이의 단거리 시험선 구축하고, 이를 이용하여 시스템 목표사양의 만족여부를 실험을 통해 검증하는 것이다.

3. 범위

연 차	연구 개발 범위
1차년도	시스템 통합 및 총괄 관리 계획 수립
	시스템 인터페이스 설계 항목 도출 및 시스템 요구사항 추적 관리
	성능 예측 시스템 구축 계획 수립 및 발주
	가이드웨이 기술 조사 및 분석 및 단거리 시험선 설계
	3MVA급 고효율 고신뢰성의 전력시스템 설계
	3MVA급 Long Stator LSM 시스템 요구사항 도출 및 개념 설계
2차년도	시스템 통합 및 총괄 관리 계획 이행 및 구성품 요구사항 추적 관리
	성능 예측시스템 구축 및 Lab Test
	가이드웨이 성능 시뮬레이션 및 단거리 시험선 구축
	3MVA급 고효율 고신뢰성의 전력시스템 제작 및 보완
	3MVA급 Long Stator LSM 추진시스템 상세 설계 및 해석기술 개발
3차년도	시스템 통합 및 총괄 관리 이행 및 인터페이스 조정
	가이드웨이 성능 해석 및 검증 단거리 시험선 구축 완료
	3MVA급 고효율 고신뢰성의 전력시스템 구축 및 기본 성능시험
	3MVA급 Long Stator LSM 인버터 시험 자체시험 및 보완
4차년도	시스템 인터페이스 성능 평가 및 설계 확정
	가이드웨이 해석기술 정립 및 초고속철도 단거리 시험선 유지관리 지침(안) 수립
	3MVA급 고효율 고신뢰성의 전력시스템시험 및 평가(단거리 시험선)
	3MVA급 Long Stator LSM 인버터 시험 및 평가(단거리 시험선)

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

1. 추진전력시스템 및 가이드웨이 사양

시스템 구분	상세 구분	시스템 사양
추진전력 시스템	3상 변압기	▪ 형식 : 건식, 자냉식 ▪ 용량 : 3MVA ▪ 전압비 : 22,9KVAC/590VAC ▪ 결선방식 : DELTA-DELTA-WYE
	PWM 컨버터	▪ 형식 : 냉각팬을 이용한 강제냉각 ▪ 용량 : 1MVA ▪ 전압 : 입력 3상 590VAC, 출력 : 950VDC
	LSM 추진 인버터	▪ 형식 : 냉각팬을 이용한 강제냉각 ▪ 용량 : 500KVA ▪ 전압 : 입력 DC950VDC, 출력 : 3상 670VAC
	에너지 세이버	▪ 형식 : 양방향 초퍼방식 ▪ 용량 : 3.2MJ(캐패시스턴스 : 23.6F) ▪ 전압 : 최대전압 DC682V
	LSM 사양	▪ 최대추력 : 180KN (3량 1편성 구성시) ▪ LSM 단위모듈 추력 : - 연속정격 : 3.95kN (340A) - 순시정격 : 5.2kN (450A)
가이드웨이 시스템	가이드웨이 길이	▪ 가이드웨이 타입 I : 13.44m ▪ 가이드웨이 타입 II : 4.1m
	가이드웨이 형상	▪ Gauge : 2,600mm ▪ Guideway hover clearance slide plane : 516mm
	가이드웨이 호버 허용오차	▪ Guideway hover clearance in beam bay : 516mm ▪ Relative difference hover clearances at beam joint
	가이드웨이 폭 허용오차	▪ Gauge width in beam bay : ± 3mm ▪ Relative Gauge difference at beam joint : ± 1 mm

2. 수행내용 및 결과

연구 내용	연구 결과
시스템 통합 및 총괄관리계획 수립	4개의 시스템으로 하위 시스템을 분리하고 하위시스템 재분류 - 하위시스템별 요소기술들을 정리 및 해당 요소기술 정립 - 시스템 개발의 전체 공정 및 조직도 등 정의
시스템 인터페이스 설계항목 도출 및 계획 수립	시스템엔지니어링 관리 도구 설치 및 시스템엔지니어링 적용을 위한 환경 구축
성능 계측 시스템 구축 계획 수립	- 초고속 자기부상철도 및 기타 철도 분야 계측시스템 국내외 사례 수집 및 분석 - 초고속 자기부상철도 지상 계측시스템 세부 측정 항목 도출 - 계측 항목에 따른 지상계측장비 사양 제시 및 장비 구축
가이드웨이 기술 조사 및 분석	- 해외 가이드웨이 개발 사례조사 및 요구성능 정의 - 가이드웨이 설계하중 및 설계기준 제시
초고속철도 단거리 시험선 설계	단거리 시험선 설계 및 공정 관리
3MVA급 고효율 고신뢰성의 전력시스템 설계	- 변전소 보호시스템 및 감시장치의 기본사양을 정의하고, IEC61850 규격에 적합한 시스템을 설계함 - 전력공급계통 단선도를 작성 및 인터페이스 항목의 정립 및 컨버터 제어 시뮬레이션을 실시함 - 에너지 세이버의 기존 시스템을 조사하고, 시스템 회로 설계 및 외함, Layout 배치 구성을 실시함
3MVA급 Long Stator LSM 인버터 설계	- 대용량, 고전력용 인버터 구현을 위한 필요 요소를 파악하고, 이에 적합한 전압변조기법 가능 - 도시철도의 전력감시장치 시스템에 대한 조사 분석을 실시 및 최적의 시스템 구성방안의 도출 및 정립함
Long Stator LSM 최적화 설계	- 주행 최고 속도 550km/h를 위한 LSM의 주행 부하 및 가속 성능을 위한 요구 출력 산정 - 자기등가회로법을 통한 LSM 설계식 도출 및 기초 모델 설계 - LSM 기초 모델의 설계 파라미터 분석을 통한 LSM 최적화 설계
LSM 추진 인버터 제어기술개발	- Long Stator LSM 제어기술 조사 및 분석 - LSM 제어기술 개발을 위한 시뮬레이션 모델개발 및 시뮬레이션 모델을 통한 알고리즘 검증 150m 단거리 시험선에서의 추진시스템 제어알고리즘 시험 및 결과분석 - LSM 추진시스템 종합성능시험 및 평가

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

(1) 초고속 자기부상철도 추진시스템 핵심기술 개발

(가) 550km/h급 초고속 자기부상철도 추력 달성

- 3량 1편성 구성(Magnet Module : 46ea)시 550km/h 달성을 위한 요구추력 : 180[kN]
- 단위 Magnet Module당 추력 : 3.92kN
- SUMA550 (Magnet Module : 6ea) 요구 추력/ 달성 추력 : 23.49kN/ 24.88kN

(나) 실용화 차량수준의 최대 가(감)속도 달성

- 상하이 자기부상열차 TR07 최대 가(감)속도 : 가속도 1.1m/s^2 (감속도 : 1.4m/s^2)
- SUMA550의 최대 가(감)속도 : 1.13m/s^2 (감속도 : 1.75m/s^2)

(다) ATO 운전 및 오차율 기준치 달성

- 속도 프로파일 생성을 위한 파라미터 : 최대저크, 최대 가속도, 최고속도, Costing Time
- ATO 운전 오차율 : 위치오차 0.5%이내

(2) 고효율 LSM 추진제어 알고리즘 성능 확인

(가) 초고속 자기부상열차 자속위치 추정기 성능 확인

- 차량으로부터 차량 자속위치정보 수신 시 통신장애 또는 위치검출 실패로 인한 차량 자속위치 측정값 손실 발생 $\Rightarrow$ LSM 출력전류 왜곡 및 추진효율 저하
- 차량 자속위치 추정기 개발로 인한 선형 자속위치 추정가능 $\Rightarrow$ LSM 출력 전류파형 개선 및 추진효율 상승

(나) 국외 자속위치 추정기 및 개발 알고리즘 비교

- 독일 초고속 자기부상열차는 차량시스템 모델베이스 기반 차량자속위치 추정기 활용
 - 차량으로부터 위치정보수신주기 : 20msec ~ 30msec

- 위치정보 분해능 : 7mm
- 중국 상하이 초고속 자기부상열차 차량자속위치 추정방식
 - Lagrange interpolation(보간법) 원리 적용 $\Rightarrow$ 위치추정오차 보정시 불연속 발생
- SUMA550 차량자속위치 추정방식
 - 전차원 속도관측기 원리 적용 $\Rightarrow$ 위치추정오차 보정시 불연속 발생 없음
 - 차량으로부터 위치정보수신주기 : 최대 30msec
 - 차량자속위치 추정기 오차 : 최대 5mm이내

(다) LSM 출력전류 개선 확인

- 초고속 자기부상열차 추진을 위한 LSM 추진력 발생시 1msec 주기로 업데이트되는 정보 적용시 전류 왜곡으로인한 200Hz 대역의 고주파 발생
- 차량 자속위치 추정기 적용시 LSM 전류에 고조파 개선 확인

V. 연구목표 달성 및 효과

연구목표	성과 지표	목표치	달성치 및 효과
		달성도	
LSM 추진제어기 개발	최고 속도	8m/s	▪ 최대 속도 8.45m/s 달성
		100%	
	최고 가속도	1.1m/s ²	▪ 최대 가속도 1.13m/s ² 달성
		100%	
	ATO 성능	오차율 10%이내	▪ ATO 오차율 0.5% 달성
		100%	
LSM 설계기술개발	최대 추력	23.49kN	▪ 최대추력 24.88 kN달성
		100%	
가이드웨이 동특성 분석	가이드웨이 동적 성능분석	동적성능 분석 1건	▪ 동해석기법 개발 및 동적성능분석 완료
		100%	
종합 계측시스템 구축 및 운영	현장 구축 및 운영	시스템 구축 1건	▪ 추진전력, 차량성능, 궤도 성능, 종합계측시스템 구축완료
		100%	
시스템 I/F 기술개발	통합데이터 베이스 구축	DB구축	
		100%	
정량적 성과	특허출원/등록	15건	▪ 15건
		100%	
	논문게재	9건	▪ 5건
		56%	
	논문발표	10건	▪ 26건
		100%	
	프로그램 등록	18건	▪ 18건
		100%	

VI. 연구성과 활용계획

- 550km/h급 초고속 자기부상철도의 추진전력시스템 기술개발 및 가이드웨이 시스템 기술개발을 위한 핵심기술을 확보하여 향후 550km/h급 자기부상철도 기술개발을 위한 기초자료로 활용하며, 초고속 지상 교통망 구축시 활용
- 산업 전반에 걸친 자동화에 리니어 모터의 활발한 응용을 위한 기반기술 확보
- 초고속 자기부상열차 가이드웨이의 요구조건 및 설계기준 정립에 활용되어 가이드웨이 경제성 제고에 기여할 것으로 기대됨(과다 설계에 따른 시공비 증가를 억제함으로써 건설비 대비 약 20% 절감 가능 예상)

목 차

제 1 장 연구개발과제 개요	1
제1절 연구개발의 목적 및 필요성	1
제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징	5
제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황	6
제4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치	10
제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과	17
제1절 시스템 엔지니어링 기술개발	17
제2절 종합계측시스템 기술개발	75
제3절 단거리 시험선 구축	180
제4절 초고속 자기부상열차 가이드웨이 해석기술 개발	235
제5절 LSM 설계 및 해석기술 개발	283
제6절 LSM 추진제어 기술 개발	412
제7절 추진인버터장치 개발	477
제8절 전력컨버터 개발	532
제9절 에너지세이버 개발	594
제10절 위치검지시스템 개발	658
제11절 전력감시장치 개발	700
제12절 전력설비 및 전원공급장치	854
제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적	915
제1절 LSM 추진전력시스템 기술	915
제 4 장 연구목표 달성 및 효과	921
제1절 연구개발 최종목표 달성도	921
제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석	926
제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석	935
제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석	936
제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	938
제1절 연구성과 향후 활용방안	938
제2절 추가연구 필요성 등	939

그림 목차

[그림 1.1.1] 교통수단별 속도대비 소요에너지 비교표	1
[그림 1.1.2] 운송시스템별 소음 비교	2
[그림 1.1.3] 초고속 자기부상철도 추진시스템(LSM)	3
[그림 1.1.4] 초고속 자기부상열차 및 단거리 시험선 개발 조감도	4
[그림 1.3.1] 루프형 LSM 소형시험장치 및 차량 궤도인터페이스 시험장치	6
[그림 1.3.2] 일본 초고속 자기부상철도 세계신기록 속도(603km/h) 달성	7
[그림 1.3.3] Chuo Shinkansen 노선도	8
[그림 1.3.4] 중국 초고속 자기부상철도 운행 정시율	9
[그림 1.3.5] 중국에서 제작한 Transrapid	9
[그림 1.3.6] Tnenerife 노선	10
[그림 1.4.1] 차량 위치 추정 관측기 설계기술	11
[그림 1.4.2] 차량 위치 추정기 설계를 위한 모델 구축	11
[그림 1.4.3] 자속 추정기 기반 초고속 자기부상철도 추진제어기 블록	12
[그림 1.4.4] 차량 위치 추정 자속 추정기 적용 전후 결과	12
[그림 2.1.1] 하위시스템 분류초고속 자기부상철도 (Level 0)	18
[그림 2.1.2] 추진 및 제어시스템 (Level 1)	20
[그림 2.1.3] 선로구축물시스템 (Level 1)	20
[그림 2.1.4] 차량시스템 (Level 1)	21
[그림 2.1.5] 성능계측시스템 (Level 1)	21
[그림 2.1.6] 정의(요구조건 관리) 프로세스 업무 트리	22
[그림 2.1.7] 요구조건 추적성 관리 화면	22
[그림 2.1.8] 시스템 인터페이스 관리 화면	23
[그림 2.1.9] 초고속 자기부상철도 시스템 최상위 기능	24
[그림 2.1.10] 정상운행 시나리오의 EFFBD	24
[그림 2.1.11] 부상시스템 작동에 대한 EFFBD	25
[그림 2.1.12] 안내 시스템 작동에 대한 EFFBD	27
[그림 2.1.13] 추진 시스템 작동에 대한 EFFBD	27
[그림 2.1.14] 정상 제동에 대한 EFFBD	28
[그림 2.1.15] 와전류 제동에 대한 EFFBD	29
[그림 2.1.16] 고장 운행1의 EFFBD - 선로 전력공급 실패	29
[그림 2.1.17] 위치확인1	30
[그림 2.1.18] 고장 운행2의 EFFBD - 위치확인장치의 고장	30
[그림 2.1.19] 비상 운행의 EFFBD - 차량 내 화재 발생	31
[그림 2.1.20] 초고속 자기부상철도 시스템 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)	32
[그림 2.1.21] 추진 및 전력 시스템 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)	33

[그림 2.1.22]	선로구축물 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)	35
[그림 2.1.23]	차량 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)	36
[그림 2.1.24]	성능계측 시스템의 물리적 아키텍처 다이어그램(PAD)	37
[그림 2.1.25]	설계 및 구현 프로세스 업무 트리	38
[그림 2.1.26]	요구사항 추적성 조회(Top Down) 화면	39
[그림 2.1.27]	요구사항 추적성 조회(Bottom Up) 화면	39
[그림 2.1.28]	시스템 엔지니어링 Vee모델 상의 검증 개념도	41
[그림 2.1.29]	요구사항(설계사양) - 시험 간 추적 관계	42
[그림 2.1.30]	검증 프로세스 업무 트리	42
[그림 2.1.31]	구성품 시험 조회 화면	51
[그림 2.1.32]	PAD(4차년도 조정) - Level 1(전체)	52
[그림 2.1.33]	PAD(4차년도 조정) - Level 1(추진 및 전력→성능계측)	53
[그림 2.1.34]	인터페이스 정보 - Level 1(추진 및 전력→성능계측)	53
[그림 2.1.35]	PAD(4차년도 조정) - Level 2(추진제어용 인버터/컨버터/정류기→성능계측)	54
[그림 2.1.36]	인터페이스 정보 - Level 2(추진제어용 인버터→성능계측)	54
[그림 2.1.37]	인터페이스 정보 - Level 2(컨버터/정류기→성능계측)	55
[그림 2.1.38]	PAD(4차년도 조정) - Level 1(선로구축물→성능계측)	55
[그림 2.1.39]	인터페이스 정보 - Level 1(선로구축물→성능계측)	55
[그림 2.1.40]	PAD(4차년도 조정) - Level 1(차량→성능계측)	56
[그림 2.1.41]	인터페이스 정보 - Level 1(차량→성능계측)	56
[그림 2.1.42]	PAD(4차년도 조정) - Level 1(추진 및 전력→관제)	57
[그림 2.1.43]	인터페이스 정보 - Level 1(추진 및 전력→관제)	57
[그림 2.1.44]	인터페이스 정보 - Level 1(추진 및 전력→관제)	57
[그림 2.1.45]	종합시운전 시험별 절차서 첨부 조회 화면	58
[그림 2.1.46]	종합시운전 시험항목별 결과 조회 화면	58
[그림 2.1.47]	종합시운전 시험과 요구사항/설계사양 간 추적성 조회 화면	60
[그림 2.1.48]	시스템 데이터베이스 스키마	61
[그림 2.1.49]	시스템 데이터베이스 마스터 트리 구성 및 설명	66
[그림 2.1.50]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 기술개발목표	66
[그림 2.1.51]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 시스템 요구사항	67
[그림 2.1.52]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Top Down)	67
[그림 2.1.53]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Bottom Up)	68
[그림 2.1.54]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 기능분석	68
[그림 2.1.55]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 제품분할구조(PBS)	69
[그림 2.1.56]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 구성품 설계사양(추진 및 전력/차량 시스템)	69
[그림 2.1.57]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 구성품 설계사양(선로구축물 시스템)	70
[그림 2.1.58]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 구성품별 도면(추진 및 전력 시스템)	70
[그림 2.1.59]	데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Bottom Up)	71

[그림 2.1.60] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Top Down)	71
[그림 2.1.61] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 구성품 시험(추진 및 전력 시스템)	72
[그림 2.1.62] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 종합 시운전 시험 구성	72
[그림 2.1.63] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 종합 시운전 시험별 시험항목	73
[그림 2.1.64] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 종합 시운전 시험항목별 결과	73
[그림 2.1.65] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 요구사항 추적성(Bottom Up)	74
[그림 2.1.66] 데이터베이스 구축 결과 검증 - 연차별 실적 문서	74
[그림 2.2.1] 경량전철 계측시스템 주요 내용	78
[그림 2.2.2] 차세대 전동차 계측시스템 Layout	79
[그림 2.2.3] 가이드웨이 상태 측정 차량	80
[그림 2.2.4] 가이드웨이 모니터링 시스템 개념	80
[그림 2.2.5] Measurement units in the vehicle	81
[그림 2.2.6] Rail offset 측정 및 계산	81
[그림 2.2.7] 차량 속도와 연동된 sampling rate 구현	81
[그림 2.2.8] 분석 및 평가 프로그램	82
[그림 2.2.9] 이력관리 시스템	82
[그림 2.2.10] Stator Pack 체결정도 측정 장치	83
[그림 2.2.11] Lock-in-thermography를 이용한 궤도내 결함 측정 방법	83
[그림 2.2.12] 궤도의 동적 강성 측정 방법	84
[그림 2.2.13] Qualification test for flushing process	84
[그림 2.2.14] 가이드웨이 하단에 설치된 IPS-Test module	85
[그림 2.2.15] 하부에서 검사가 가능하도록 설계된 LSM 가이드웨이 모듈	86
[그림 2.2.16] 초고속 자기부상철도 계측시스템 구성도	87
[그림 2.2.17] 지상전력계통 배선도	90
[그림 2.2.18] 차고지 Layout	91
[그림 2.2.19] 궤도 Layout	95
[그림 2.2.20] 궤도모니터링차량 Layout(평면도)	97
[그림 2.2.21] 지상계측 관련 하드웨어 및 운영 소프트웨어 구성도	103
[그림 2.2.22] 전력실 1	103
[그림 2.2.23] 전력실 2	104
[그림 2.2.24] 궤도 계측 시스템 1	104
[그림 2.2.25] 궤도 계측 시스템 2	105
[그림 2.2.26] 궤도 모니터링 차량 계측 시스템 구성도	105
[그림 2.2.27] 신호/통신/환경 계측 시스템 구성도	106
[그림 2.2.28] 종합 계측 시스템 구성도	106
[그림 2.2.29] 운영 프로그램 구성도	106
[그림 2.2.30] 전체 계측 시스템 구성도	110
[그림 2.2.31] 단순화한 Test 구성도	111

[그림 2.2.32] PXI 시스템과 SCXI 장비	113
[그림 2.2.33] 임베디드 PC와 cDAQ 시스템	113
[그림 2.2.34] cRIO 시스템	113
[그림 2.2.35] 네트워크 허브	114
[그림 2.2.36] 계측시스템 테스트 프로그램 화면	115
[그림 2.2.37] 계측시스템 채널 설정 테스트 프로그램 화면	115
[그림 2.2.38] 종합 계측 동기화 테스트 프로그램 화면	116
[그림 2.2.39] 종합 계측, 파형에 동기화 테스트 화면	116
[그림 2.2.40] 지상전력 계측시스템 Rack 제작 구성도	120
[그림 2.2.41] 지상전력 계측시스템 Rack 제작 모습	121
[그림 2.2.42] 궤도 계측시스템 제작 모습	127
[그림 2.2.43] 궤도 모니터링 차량용 계측시스템 구성도	128
[그림 2.2.44] 궤도모니터링 차량용 계측시스템 제작 모습	136
[그림 2.2.45] 초고속 자기부상철도 종합계측시스템 프로그램 메인화면	137
[그림 2.2.46] 채널설정 전체 화면	138
[그림 2.2.47] 채널 calibration 전체 화면	140
[그림 2.2.48] Custom scale 입력 화면	143
[그림 2.2.49] Custom scale 입력 결과	145
[그림 2.2.50] 데이터 측정 화면	146
[그림 2.2.51] 컨버터 및 인버터 조합시험	147
[그림 2.2.52] 계측시스템 연결 및 모니터링	148
[그림 2.2.53] 전압변동시험 계측 결과	149
[그림 2.2.54] 정전시험 계측 결과	150
[그림 2.2.55] 지상전력 계측시스템 현장 설치	151
[그림 2.2.56] 지상전력 계측시스템 모니터	152
[그림 2.2.57] 지상전력 계측시스템 내부장치 및 배선	152
[그림 2.2.58] 배선 양호 점검	153
[그림 2.2.59] 궤도 계측 단자함	153
[그림 2.2.60] 궤도 계측 단자함 내부	154
[그림 2.2.61] 궤도 LSM 코일 온도센서 부착	154
[그림 2.2.62] 궤도 LSM 코어 온도센서 부착	155
[그림 2.2.63] 궤도 온도센서 배선	155
[그림 2.2.64] 궤도 온도 측정 장치	155
[그림 2.2.65] 궤도-제어실간 배선 처리(제어실 외부)	156
[그림 2.2.66] 궤도-제어실간 배선 처리(제어실 내부)	156
[그림 2.2.67] 차량 계측 시스템 설치	157
[그림 2.2.68] 궤도모니터링차량	158
[그림 2.2.69] 궤도모니터링차량 내 계측시스템	158

[그림 2.2.70] 궤도모니터링차량 내 계측시스템	158
[그림 2.2.71] 종합 계측시스템 랙 및 스위치	159
[그림 2.2.72] 궤도 모니터링용 및 종합 계측시스템용 모니터	159
[그림 2.2.73] 검수고 안테나 및 모듈	160
[그림 2.2.74] 본선 안테나 및 모듈	160
[그림 2.2.75] 차량 안테나 및 내부 배선	161
[그림 2.2.76] 계측시스템 운영 소프트웨어	161
[그림 2.2.77] 모니터링 프로그램	162
[그림 2.2.78] 분석 프로그램	162
[그림 2.2.79] 추진전력 성능 계측	163
[그림 2.2.80] 차량 부상성능 계측	163
[그림 2.2.81] 궤도 성능 계측	163
[그림 2.2.82] 궤도 LSM Stator pack 단차 측정	164
[그림 2.2.83] 궤도 LSM stator pack 및 단차	164
[그림 2.2.84] 궤도 LSM stator pack 단차 측정 결과 그래프	165
[그림 2.2.85] 궤도 LSM stator pack 단차 측정 결과 정리	165
[그림 2.3.1] 독일의 초고속 자기부상철도 (Transrapid09)	185
[그림 2.3.2] TUV 시험선	187
[그림 2.3.3] Transrapid 선로 구조	188
[그림 2.3.4] Transrapid의 선로 전환기	188
[그림 2.3.5] 중국 상하이 초고속 자기부상철도 및 노선	189
[그림 2.3.6] 중·독 상하이 자기부상철도 착공식 및 궤도 운송	191
[그림 2.3.7] 룡양루역 외부 모습	191
[그림 2.3.8] 상하이 자기부상철도 선로	191
[그림 2.3.9] 선로 검측 및 유지보수를 위한 차량	192
[그림 2.3.10] 선로 부등침하 방지를 위한 3방향 조절 베어링	192
[그림 2.3.11] 전동 분기기 및 변전시설	193
[그림 2.3.12] 교량 신축이음부 형태	193
[그림 2.3.13] 일본 MLX 시제 차량	194
[그림 2.3.14] 일본 야마나시 시험선 노선 및 측벽 Guideway 구조물	195
[그림 2.3.15] 가이드웨이 구조	207
[그림 2.3.16] 하부구조물 철근조립 작업	208
[그림 2.3.17] 하부구조물 거푸집 설치 작업	209
[그림 2.3.18] 하부구조물 콘크리트타설 및 제작완료	210
[그림 2.2.19] 상부구조물 단면도	211
[그림 2.3.20] 상부구조물 제작	211
[그림 2.3.21] 검수고 철골공사	212
[그림 2.3.22] 검수고 외장판넬 공사	213

[그림 2.3.23] 검수고 조적공사 및 미장공사	214
[그림 2.3.24] 검수고 내장판넬공사 및 창호공사	215
[그림 2.3.25] 천장 텍스마감공사	216
[그림 2.3.26] 수장공사 페인트 마감	216
[그림 2.3.27] 관제실 악세스플로워 마감	216
[그림 2.3.28] 천장크레인 제작사양	217
[그림 2.3.29] 천장크레인 서면심사 결과	218
[그림 2.3.30] 천장크레인 시운전(산업안전공단 입회시험)	219
[그림 2.4.1] 궤도 및 Mono Block 침목	237
[그림 2.4.2] 건축한계	238
[그림 2.4.3] 궤도 중심간격	239
[그림 2.4.4] 일반 Transrapid 차량 및 가이드웨이, MSB-AG-Fahrweg Teil I, 2007	241
[그림 2.4.5] Transrapid 차량 및 subassemblies, MSB-AG-Fahrzeug Teil I, 2007	242
[그림 2.4.6] 자기부상 가이드웨이 개발	242
[그림 2.4.7] 자기부상열차의 하중분포	243
[그림 2.4.8] 궤도중심과 차량중심 위치	244
[그림 2.4.9] 차량 횡하중	245
[그림 2.4.10] 스키드 하중의 작용위치	246
[그림 2.4.11] 스키드 정상낙하하중(단위 : mm)	247
[그림 2.4.12] 스키드 최대낙하하중(단위 : mm)	247
[그림 2.4.13] 연직방향 스키드 활주하중(단위 : mm)	248
[그림 2.4.14] 교축직각방향 스키드 활주하중(단위 : mm)	248
[그림 2.4.15] 교축방향 스키드 활주하중(단위 : mm)	249
[그림 2.4.16] 콘크리트 및 강재 가이드웨이 횡단면도, MSB-AG-Fahrweg Teil II, 2007	249
[그림 2.4.17] 완충차막이	251
[그림 2.4.18] 중국의 MAGLEV관련 완충차막이 설치 현황	252
[그림 2.4.19] 강체질량 시스템	259
[그림 2.4.20] 가이드웨이의 irregularity	261
[그림 2.4.21] 강체 가이드웨이를 운행하는 강체질량의 부상공극과 변위	261
[그림 2.4.22] 유연한 가이드웨이를 운행하는 강체질량의 부상공극과 변위 (운행속도 $V=550km/h$)	263
[그림 2.4.23] 유연한 가이드웨이를 운행하는 강체질량의 부상공극과 변위 (운행속도 $V=200km/h$)	264
[그림 2.4.24] 유연한 가이드웨이를 운행하는 강체질량의 부상공극과 변위 (운행속도 $V=100km/h$)	265
[그림 2.4.25] 자기부상열차-가이드웨이 시스템 개념도	268
[그림 2.4.26] 객차의 자유물체도	270

[그림 2.4.27] 대차의 자유물체도	272
[그림 2.4.28] 가이드웨이의 자유물체도	275
[그림 2.4.29] 가이드웨이 irregularity의 정의	280
[그림 2.5.1] 속도 시간 곡선	286
[그림 2.5.2] 철도차량의 구배저항	287
[그림 2.5.3] 영역분할과 함수분포	289
[그림 2.5.4] LSM 부상전자석에서 세그먼트 사이의 공간	292
[그림 2.5.5] LSM 부상전자석 3극 모델	293
[그림 2.5.6] LSM 부상전자석 4극 모델	293
[그림 2.5.7] LSM 부상전자석 4극 모델	294
[그림 2.5.8] LSM 전자계 설계 모델	296
[그림 2.5.9] LSM 제작 모델(A-Type)	296
[그림 2.5.10] 자기부상열차용 LSM 기본 형상	297
[그림 2.5.11] LSM 설계 플로우	299
[그림 2.5.12] 자기부상열차의 부상전자석	300
[그림 2.5.13] 가이드웨이 단면	303
[그림 2.5.14] LSM 고정자 권선의 치수	303
[그림 2.5.15] LSM 기본 형상 및 치수	304
[그림 2.5.16] 고정자 슬롯 형상	307
[그림 2.5.17] 단거리 시험선 LSM 기본 설계 모델	310
[그림 2.5.18] 속도 시간 곡선	310
[그림 2.5.19] 550km/h급 초고속 자기부상열차의 견인력 산정	313
[그림 2.5.20] 자기부상열차의 구배 경사에 따른 주행저항 곡선	315
[그림 2.5.21] 고정자 치의 각 부분별 치수	320
[그림 2.5.22] 계자 설계 파라미터	322
[그림 2.5.23] LSM 기초설계 모델	323
[그림 2.5.24] LSM의 자기등가회로 모델	324
[그림 2.5.25] 간략화된 자기등가회로	324
[그림 2.5.26] 특성 해석 프로그램의 설계 값 입력 부분	327
[그림 2.5.27] LSM 특성 해석을 위한 설계 파라미터	327
[그림 2.5.28] 특성 해석을 위한 가정치 및 계산 값	328
[그림 2.5.29] 특성 해석 결과 값	329
[그림 2.5.30] LSM 유한요소 해석 모델	332
[그림 2.5.31] LSM 기초설계 모델의 권선 조건	333
[그림 2.5.32] LSM 기초설계 모델의 자속선도	333
[그림 2.5.33] Maxwell을 이용한 추력 및 수직력 해석 결과	334
[그림 2.5.34] Maxwell을 이용한 역기전력 해석 결과	334
[그림 2.5.35] JMAG을 이용한 추력 및 수직력 해석 결과	335

[그림 2.5.36] JMAG을 이용한 역기전력 해석 결과	335
[그림 2.5.37] LSM 2차 설계 모델	336
[그림 2.5.38] 유한요소 해석을 위한 해석 모델	336
[그림 2.5.39] LSM의 부상력과 디텐트력 (무부하 해석)	337
[그림 2.5.40] LSM의 무부하 역기전력 파형	338
[그림 2.5.41] LSM 이동속도별 추력과 부상력	338
[그림 2.5.42] LSM 이동속도별 역기전력	339
[그림 2.5.43] LSM의 설계 변수	340
[그림 2.5.44] 계자 요크 폭에 따른 추력 및 부상력의 크기	341
[그림 2.5.45] 고정자 요크 폭에 따른 추력 및 부상력의 크기	342
[그림 2.5.46] 슬롯 개구 폭에 따른 출력 특성 비교	342
[그림 2.5.47] LSM 최적화 모델	343
[그림 2.5.48] LSM 기본 모델과 최적화 모델의 추력 파형 비교	344
[그림 2.5.49] LSM 기본 모델과 최적화 모델의 부상력 파형 비교	344
[그림 2.5.50] LSM 기본 모델과 최적화 모델의 역기전력 파형 비교	345
[그림 2.5.51] 단거리 시험선 운행용 자기부상열차의 속도-저항력 그래프	347
[그림 2.5.52] 부상전자석 설계 치수(만차 중량 22ton 모델)	349
[그림 2.5.53] 부상전자석 세그먼트 사이의 공극	349
[그림 2.5.54] 부상전자석 설계 치수(만차 중량 28ton 모델)	350
[그림 2.5.55] LSM 부상전자석에서 세그먼트 사이의 공간	350
[그림 2.5.56] 세그먼트 사이가 비자성체(Air)인 경우 LSM 자속선도	351
[그림 2.5.57] 세그먼트 사이가 비자성체(Air)인 경우 LSM 자속밀도분포	351
[그림 2.5.58] 세그먼트 사이가 자성체(S08)인 경우 LSM 자속선도	351
[그림 2.5.59] 세그먼트 사이가 자성체(S08)인 경우 LSM 자속밀도분포	351
[그림 2.5.60] 세그먼트 사이의 재질에 따른 추력 파형	352
[그림 2.5.61] 세그먼트 사이의 재질에 따른 부상력 파형	353
[그림 2.5.62] 세그먼트 사이 두께에 따른 추력 파형	354
[그림 2.5.63] 세그먼트 사이 두께에 따른 부상력 파형	354
[그림 2.5.64] LSM 설계 모델	355
[그림 2.5.65] LSM 특성해석을 위한 초기위치 설정 상태	356
[그림 2.5.66] 부상전자석의 첫 번째 극이 A상 권선축과 정렬된 경우	356
[그림 2.5.67] LSM 설계 모델의 추력 및 부상력 파형	357
[그림 2.5.68] 계자 전류 크기에 따른 LSM의 부상력 및 추력 특성(고정자 전류 340A)	358
[그림 2.5.69] 고정자 전류 크기에 대한 부상력 및 추력	358
[그림 2.5.70] 부상력 일정 제어 시 고정자 전류에 대한 계자전류 및 추력	359
[그림 2.5.71] 전류위상각 0deg일 때 입력 상전류	360
[그림 2.5.72] 전류위상각 33deg일 때 입력 상전류	360
[그림 2.5.73] 전류위상각에 대한 부상력 및 추력	361

[그림 2.5.74] 전류위상각 33deg일 때 상전류에 대한 부상력 및 추력	362
[그림 2.5.75] 부상공극 길이에 따른 LSM 추력 및 부상력 특성	364
[그림 2.5.76] 고정자 치의 슈(Shoe) 구조	365
[그림 2.5.77] 반폐 슬롯 고정자의 설계변수(슬롯 개구폭)	365
[그림 2.5.78] 슬롯 개구폭에 따른 LSM 출력 특성(부상력 제어 고려안함)	366
[그림 2.5.79] 슬롯 개구폭에 따른 LSM 출력 특성(부상력 제어 고려)	366
[그림 2.5.80] 개방 슬롯 고정자의 설계변수(고정자 치 폭)	367
[그림 2.5.81] 고정자 치폭에 따른 LSM 출력 특성(부상력 제어 고려)	368
[그림 2.5.82] 단거리 시험선 차량의 시간에 대한 속도 그래프	370
[그림 2.5.83] 자기부상열차의 속도에 대한 주행저항 그래프	371
[그림 2.5.84] 추진체의 시간에 대한 가속도 그래프	372
[그림 2.5.85] 자기부상열차의 시간에 대한 속도 및 이동거리 그래프	373
[그림 2.5.86] 3상 평형 전류에서 A상 전류가 0이 되는 순간	374
[그림 2.5.87] LSM 전류 인가 시 기자력 방향	374
[그림 2.5.88] DC 전원과 LSM 고정자 권선의 결선	375
[그림 2.5.89] LSM 고정자 끝단 결선	375
[그림 2.5.90] 부상전자석의 기준위치(76.5mm)	375
[그림 2.5.91] 입력전류 및 추진체 위치에 따른 LSM 추력 해석결과 그래프	376
[그림 2.5.92] 완성된 LSM 단품 모델	377
[그림 2.5.93] LSM의 추력측정을 위한 부상전자석 구조물과 로드셀	377
[그림 2.5.94] 부상전자석의 기준위치(403mm)	377
[그림 2.5.95] 입력전류 및 추진체 위치에 따른 LSM 추력측정 시뮬레이션 결과 그래프	378
[그림 2.5.96] 부상전자석의 기준위치 반대 방향(403mm)	379
[그림 2.5.97] 제작된 부상전자석의 기준위치 반대 방향(403mm)	379
[그림 2.5.98] 로드셀 디스플레이 장치	379
[그림 2.5.99] LSM 추력측정 결과 및 시뮬레이션 결과 그래프	380
[그림 2.5.100] LSM 고정자와 부상전자석의 기자력 방향(403mm 위치)	382
[그림 2.5.101] LSM 고정자와 부상전자석의 기자력 방향(443mm 위치)	382
[그림 2.5.102] LSM 고정자와 부상전자석의 기자력 방향(563mm 위치)	384
[그림 2.5.103] LSM 시험용 대차의 시간-속도, 시간-이동거리 그래프	386
[그림 2.5.104] 부상전자석 극수와 NI에 대한 부상력 특성	386
[그림 2.5.105] 부상전자석 세그먼트 공극 길이에 따른 추력 특성	387
[그림 2.5.106] 부상전자석 세그먼트 공극 길이에 따른 부상력 특성	387
[그림 2.5.107] 고정자 전류 크기에 따른 부상력 및 추력 특성	388
[그림 2.5.108] 계자 전류 크기에 따른 부상력 및 추력 특성	389
[그림 2.5.109] 전류 위상각에 따른 부상력 및 추력 특성	389
[그림 2.5.110] 고정자 전류 크기에 따른 부상력 및 추력 특성	390
[그림 2.5.111] 시험대차의 시간에 대한 속도 및 이동거리 그래프	391

[그림 2.5.112] LSM 부상전자석 4극 모델	391
[그림 2.5.113] 계자 전류 크기에 따른 LSM의 부상력 및 추력 특성	392
[그림 2.5.114] 공극길이에 따른 LSM의 부상력 및 추력 특성	392
[그림 2.5.115] 시험대차용 전자석 계자 권선	393
[그림 2.5.116] 시험대차용 전자석 계자 및 권선 사이즈	393
[그림 2.5.117] 기존 D축 정렬에 의한 A상의 무부하 역기전력 파형	394
[그림 2.5.118] 변경된 D축 정렬에 의한 A상의 무부하 역기전력 파형	395
[그림 2.5.119] 변경된 D축 정렬 기준 전류위상각에 대한 추력 및 부상력 양상	395
[그림 2.5.120] 부상전자석 이동에 따른 A상 권선의 쇄교자속 변화	396
[그림 2.5.121] 전류위상각에 따른 D축, Q축 인덕턴스	397
[그림 2.5.122] 기존 D축 정렬에 의한 A상의 무부하 역기전력 파형	398
[그림 2.5.123] 변경된 D축 정렬에 의한 A상의 무부하 역기전력 파형	398
[그림 2.5.124] 변경된 D축 정렬 기준에서 전류위상각에 대한 추력 및 부상력 양상 ...	399
[그림 2.5.125] 고정자 전류 450A, 계자 전류 4A, 전류위상각 0deg	399
[그림 2.5.126] 전류위상각에 따른 D축, Q축 인덕턴스	400
[그림 2.5.127] LSM 전자계 설계 모델과 제작 모델의 추력 및 부상력 특성 비교	401
[그림 2.5.128] LSM 전자계 설계 모델과 제작 모델의 역기전력 특성 비교	402
[그림 2.5.129] LSM Unit C-Type 설치 위치	402
[그림 2.5.130] LSM 제작 모델(C-Type)	403
[그림 2.5.131] LSM 제작 모델(C-Type) 유한요소해석 결과	403
[그림 2.5.132] LSM 고정자 연속 모델(A-Type)과 불연속 모델(C-Type)의 추력 및 부상력 특성 비교	404
[그림 2.5.133] LSM 고정자 A-Type과 C-Type의 역기전력 특성 비교	404
[그림 2.5.134] LSM 고정자 권선 배치도	405
[그림 2.5.135] 가이드웨이 거더	406
[그림 2.5.136] 가이드웨이 상판 구조물	406
[그림 2.5.137] LSM 고정자 권선 작업	407
[그림 2.5.138] LSM 단거리 시험선	407
[그림 2.5.139] 시험선 운행용 자기부상열차	408
[그림 2.5.140] 자기부상열차의 부상전자석	408
[그림 2.5.141] 부상전자석의 전류 파형 (공극 13mm)	409
[그림 2.5.142] LSM 유한요소해석 모델	409
[그림 2.5.143] 계자 전류에 따른 부상력 크기(공극 일정)	411
[그림 2.5.144] 공극길이에 따른 계자 전류 크기(부상력 일정)	411
[그림 2.6.1] GA사의 추진제어 블록도	414
[그림 2.6.2] G.A사의 자기부상열차 위치검지 관련 사진	415
[그림 2.6.3] 15°의 위상각 오차에 대한 전류 벡터도 및 추진전류의 변화	416
[그림 2.6.4] Heidenhain사의 5-fold interpolaton의 입출력 파형	416

[그림 2.6.5] 저항 및 OP-AMP를 이용한 Interpolation 처리회로	417
[그림 2.6.6] 룩업 테이블과 트랙킹 카운터를 이용하는 디지털 인터폴레이션방식	417
[그림 2.6.7] Arctan 값을 계산하기위해 MPU를 이용하는 디지털 인터폴레이션 방식	418
[그림 2.6.8] TVE의 전력변환시스템에 대한 기본회로 블록도	419
[그림 2.6.9] 입력 변압기 (20kV-1040V, 4MVA x2EA)	419
[그림 2.6.10] 변압기 전력모드에 대한 파형 - 100% 출력설정	420
[그림 2.6.11] 출력 변압기 블록	421
[그림 2.6.12] 급전 시스템 PSCAD 부분 회로도	421
[그림 2.6.13] 4개의 PWM 인버터 블록	422
[그림 2.6.14] LSM 추진인버터의 모드별 동작	423
[그림 2.6.15] LSM 추진인버터의 모드별 출력 전압파형	423
[그림 2.6.16] 구동제어에 대한 블록도	424
[그림 2.6.17] 가속구간의 구동특성(최대속도 412.6km/h)	424
[그림 2.6.18] 직접 토크제어 (ABB 1999)	426
[그림 2.6.19] ABC축과 XY축	428
[그림 2.6.20] dq 좌표축	429
[그림 2.6.21] Simulink 모터 모델 블록	431
[그림 2.6.22] 3상 PWM 인버터	432
[그림 2.6.23] 3상 PWM 인버터 출력 전압 벡터	432
[그림 2.6.24] 지령 전압 벡터	433
[그림 2.6.25] 육샷 전압을 이용한 전압 변조 방식	433
[그림 2.6.26] SVPWM의 변조 파형	434
[그림 2.6.27] 육샷전압을 이용한 PWM 모델	435
[그림 2.6.28] 안티 와인드업 기능을 갖는 전류제어기 블록도	435
[그림 2.6.29] 안티와인드업 기능을 갖는 속도제어기 블록도	436
[그림 2.6.30] 위치 Estimator 블록도	438
[그림 2.6.31] 전차원 관측기를 적용한 LS-LSM 제어 시스템의 시뮬레이션 모델	438
[그림 2.6.32] 전력변환기 시뮬레이션 모델	440
[그림 2.6.33] 안티 와인드업 전류 제어기 보드선도	440
[그림 2.6.34] 안티와인드업 속도제어기에 대한 보드선도	441
[그림 2.6.35] 차량의 속도(상), 전류(중) 및 가속도(하)	442
[그림 2.6.36] 차량의 최고속도(상), 토크(중) 및 이동거리(하)	442
[그림 2.6.37] 차량의 속도(실선)및 추정속도(점선)와 추정위상각(실선) 및 추정위상각(점선)	443
[그림 2.6.38] TMS320F28335 내부 블록도	444
[그림 2.6.39] TMS320F28335의 기능	445
[그림 2.6.40] 제어기 설계 구성도	446
[그림 2.6.41] ADC Board Firmware 개발	447
[그림 2.6.42] AD board Check	447

[그림 2.6.43] 제어기의 PWM part Firmware 개발	448
[그림 2.6.44] PWM board Check	448
[그림 2.6.45] H형 추진인버터 블록	452
[그림 2.6.46] Transrapid 구동제어 블록	453
[그림 2.6.47] North Line 전력변환장치의 주회로	453
[그림 2.6.48] South-Line 인버터 주회로	454
[그림 2.6.49] 2대의 인버터와 추진 제어기 I/O 구성	455
[그림 2.6.50] 저주파수 전압출력의 경우 인버터 구성	456
[그림 2.6.51] 고주파수 전압출력의 경우 인버터 구성	456
[그림 2.6.52] 고주파수 전압출력의 경우 인버터 시뮬레이션 모델	457
[그림 2.6.53] 저주파수 전압출력의 경우 출력 파형	457
[그림 2.6.54] 고주파수 전압출력의 경우 출력 파형	458
[그림 2.6.55] 인버터 출력 PWM 전압 (Blue) 및 인버터 출력 전류(Red)	459
[그림 2.6.56] 인버터 출력 PWM 전압 (Blue) 및 인버터 출력 전류(Red)	460
[그림 2.6.57] 전력변환기와 제어기간의 wiring	461
[그림 2.6.58] 수신신호 및 PLL제어회로구성과 결과파형	462
[그림 2.6.59] 전차원 관측기를 적용한 LS-LSM 제어 시스템	463
[그림 2.6.60] 추진인버터 기본 운전특성	463
[그림 2.6.61] 추진인버터 전류제어기 특성시험	464
[그림 2.6.62] 추진인버터 전류제어기 특성시험	464
[그림 2.6.63] 추진인버터 전류제어기 특성시험	465
[그림 2.6.64] Manual 제어모드	466
[그림 2.6.65] ATO 제어모드	466
[그림 2.6.66] 차량주행시 전류(바코드 적용)	468
[그림 2.6.67] 차량주행시 전류(위치추정치 적용)	468
[그림 2.6.68] 추진인버터 추력시험	469
[그림 2.6.69] 추력 기록장치 구성도	469
[그림 2.6.70] 1차 추력시험	470
[그림 2.6.71] 2차 추력시험	470
[그림 2.6.72] 3차 추력시험	471
[그림 2.6.73] 1차 최고속도 시험시 차량 속도 및 LSM u상 전류	472
[그림 2.6.74] 2차 최고속도 시험시 차량 속도 및 LSM u상 전류	472
[그림 2.6.75] 3차 최고속도 시험시 차량 속도 및 LSM u상 전류	473
[그림 2.6.76] 1차 가감속 시험시 속도 및 LSM의 U상 전류	474
[그림 2.6.77] 2차 가감속 시험시 속도 및 LSM의 U상 전류	474
[그림 2.6.78] 3차 가감속 시험시 속도 및 LSM의 U상 전류	475
[그림 2.6.79] ATO 운전시 속도지령 및 속도, 토크지령 및 토크, U상전류	476
[그림 2.6.80] ATO 운전시 속도지령 및 속도, 이동위치 지령 및 차량 이동위치	476

[그림 2.7.1] NPC 3-레벨 DC/AC 전력변환 시스템	479
[그림 2.7.2] 3레벨 SVPWM 전압벡터도의 구분	480
[그림 2.7.3] 3레벨 SVPWM 전압벡터도의 영역구분	480
[그림 2.7.4] 전압벡터에 대한 중성점 전압의 영향	482
[그림 2.7.5] 시간오프셋에 따른 N-type, P-type small 전압벡터 인가시간의 변화	483
[그림 2.7.6] 자기부상형 철도차량 구동시스템	484
[그림 2.7.7] 전압센서의 내부구조	487
[그림 2.7.8] 직류단 전압 추정 비례적분 제어기	488
[그림 2.7.9] A-C상 통전 → A-B상 통전시 증가회로 및 전류흐름도	490
[그림 2.7.10] A-C상 통전시 증가회로 및 전류흐름도	491
[그림 2.7.11] A-C상 통전 → C상 Off시 증가회로 및 전류흐름도	493
[그림 2.7.12] B-C상 통전 → A-C상 통전시 증가회로 및 전류흐름도	494
[그림 2.7.13] A-C상 통전시 증가회로 및 전류흐름도	494
[그림 2.7.14] A-C상 통전 → Q1 off시 증가회로 및 전류흐름도	495
[그림 2.7.15] A-C상 통전 → B-C상 통전시 증가회로 및 전류흐름도	495
[그림 2.7.16] B-C상 통전시 증가회로 및 전류흐름도	495
[그림 2.7.17] 추진 인버터의 주회로	498
[그림 2.7.18] 인버터 외형	500
[그림 2.8.1] 3상 PWM 컨버터의 기본회로 및 동작원리	534
[그림 2.8.2] 3상 PWM 컨버터 제어 블록도	535
[그림 2.8.3] 정상분 전압 추출 블록도	540
[그림 2.8.4] Advanced SRF-PLL 제어블록도	541
[그림 2.8.5] LPF가 없는 PLL시스템의 제어기 모델링	542
[그림 2.8.6] LPF를 고려한 PLL시스템의 제어기 모델링	543
[그림 2.8.7] 초고속 자기부상열차용 전력변환기	544
[그림 2.8.8] PWM컨버터의 제어블록도	547
[그림 2.8.9] 비간섭 전류제어기	548
[그림 2.8.10] $G_{co}(s)$ 의 보드선도	548
[그림 2.8.11] PWM 컨버터의 전류제어 블록도	549
[그림 2.8.12] $G_{cc}(s)$ 의 bode 선도	550
[그림 2.8.13] TI TMS320F2812 주 제어기 블록도	551
[그림 2.8.14] LSM 전동기의 MATLAB/SIMLINK 모델	552
[그림 2.8.15] 기동시 센서 입력신호	552
[그림 2.8.16] 기동시 LSM의 선간 입력 전압	553
[그림 2.8.17] 기동시 LSM의 입력 전류 특성	553
[그림 2.8.18] 기동시 LSMD의역기전력 특성	554
[그림 2.8.19] PWM 컨버터의 Simulink 블록도	554
[그림 2.8.20] AC/DC 승압형 컨버터의 전력부분 Simulink 모델	555

[그림 2.8.21] PWM 발생부	555
[그림 2.8.22] 3상 전력변환부 블록도	555
[그림 2.8.23] PWM 컨버터의 기동 및 운전시 각부파형	556
[그림 2.8.24] PWM 컨버터 구동시 각부파형	556
[그림 2.8.25] PWM 컨버터 회생시 각부파형	557
[그림 2.9.1] Electrochemical capacitor의 원리	596
[그림 2.9.2] 커패시터의 구조	597
[그림 2.9.3] 다공성 탄소 전극에서의 전하축적 개념	597
[그림 2.9.4] DC/DC Buck-Boost 초퍼의 구성	600
[그림 2.9.5] Buck 모드에서의 전류의 흐름	600
[그림 2.9.6] Boost 모드에서의 전류의 흐름	600
[그림 2.9.7] 초기 충전시 제어 기법	601
[그림 2.9.8] 전력모드 제어 기법	602
[그림 2.9.9] 에너지 저장 시스템 동작시퀀스(정상동작시)	603
[그림 2.9.10] 에너지 저장 시스템 보호동작시퀀스(조건 1)	604
[그림 2.9.11] 에너지 저장 시스템 보호동작시퀀스(조건 2)	604
[그림 2.9.12] 충, 방전 설정 전압 자동 조정 기법 제어 블록도	606
[그림 2.9.13] 슈퍼 캐패시터의 전력밀도와 충전시간	608
[그림 2.10.1] HSST 위치 검지 원리(연속 검지)	642
[그림 2.10.2] HSST 위치검지방식 (폐색검지)	643
[그림 2.10.3] 도플러센서 설치위치 및 출력 특성	643
[그림 2.10.4] MLU의 위치 검지 원리	644
[그림 2.10.5] MLX의 신규 위치검지 시스템의 구성	645
[그림 2.10.6] 광학식 상대위치 검지 시스템 구성	646
[그림 2.10.7] 선로의 고정 패턴 구조	646
[그림 2.10.8] Linear Synchronous Motor 구조	646
[그림 2.10.9] 센서의 코일 구조와 출력 신호	647
[그림 2.10.10] 열차내 센서 설치 위치 및 선로상 LRL 설치 구조	647
[그림 2.10.11] 일괄 인식 방식	648
[그림 2.10.12] 순차 인식 방식	648
[그림 2.10.13] 무선 통신 구조	649
[그림 2.10.14] 무선 통신 전송채널 토폴로지	649
[그림 2.10.15] 위치 신호의 데이터 프레임	650
[그림 2.10.16] RFID 시스템 구성도	651
[그림 2.10.17] RFID 시스템의 데이터 흐름도	651
[그림 2.10.18] 위치정보(상대/절대위치) 무선 통신 시스템 (2.4 GHz)	653
[그림 2.10.19] 차량 제어용 무선통신 시스템 (900MHz 대역)	654
[그림 2.10.20] 이동체 RF 모듈 (READER)	654

[그림 2.10.21] HSRFID 안테나	654
[그림 2.10.22] RFID 리더부 회로도	655
[그림 2.10.23] 고정체 RF 모듈 (TAG)	655
[그림 2.10.24] RFID Active Tag (선로부)	655
[그림 2.10.25] Antenna 지향각 : 90도 : -3dB	656
[그림 2.10.26] TAG 부 회로도	656
[그림 2.10.27] RFID READER 와 Peak Detect 분기방법	656
[그림 2.10.28] 단거리 시험선용 RFID 방식을 적용한 위치검지 시스템 구성도	657
[그림 2.10.29] 절대 위치 동기화	657
[그림 2.10.30] 단거리 시험선의 무선방식 구성도 (지상측)	658
[그림 2.10.31] 2.4GHz High Speed 절대위치 전송장치	658
[그림 2.10.32] 900MHz 무선모뎀	659
[그림 2.10.33] 열차무선제어장치 구성도	660
[그림 2.10.34] 위치검지시스템(PDS) PCB 외형	660
[그림 2.10.35] 위치검지시스템(PDS) 회로도	661
[그림 2.10.36] 바코드의 인식원리	662
[그림 2.10.37] 표준형 코드와 단축형 코드	663
[그림 2.10.38] 1차원 바코드와 2차원 바코드	664
[그림 2.10.39] 바코드 방식 구현 구성도	664
[그림 2.10.40] 바코드 분해능 시험(1mm 이동 시험)	664
[그림 2.10.41] 위치데이터 전송주기 시험(1ms 주기)	665
[그림 2.10.42] 위치데이터 전송지연 시험(무선 구간에서 1.79ms 지연)	665
[그림 2.10.43] 마스터 모뎀 (수신기) CAN 통신 기본사양	666
[그림 2.10.44] 자기식 인코더	666
[그림 2.10.45] 자기식 인코더	667
[그림 2.10.46] 자기식 인코더 설치	667
[그림 2.10.47] 자기식 인코더 배치	668
[그림 2.10.48] 자기식 센서 구성	669
[그림 2.10.49] 신호 처리 구성	669
[그림 2.10.50] 자기 펄스 변환 및 온도 특성	670
[그림 2.10.51] 마그네틱 위치센서 리딩 시험	671
[그림 2.10.52] 마커 리더기 회로	671
[그림 2.10.53] 마커 리딩 시험	672
[그림 2.11.1] SCADA 보안정책	708
[그림 2.11.2] 상호 운영의 편의성	709
[그림 2.11.3] 시스템 레벨 구성방식	709
[그림 2.11.4] 장기간 운용의 안정성	710
[그림 2.11.5] IEC 61850 표준 문서 구조	710

[그림 2.11.6] IEC 61850의 통신 매핑 방법	712
[그림 2.11.7] IEC 61850 데이터 모델링 과정	713
[그림 2.11.8] IEC 61850 모델링에 대한 총괄적 접근	714
[그림 2.11.9] 변전소 주요 설비에 대한 Logical Node 사례	715
[그림 2.11.10] 정보(Logical Node) 구성	717
[그림 2.11.11] 물리적 장치와 Logical Node의 매핑	717
[그림 2.11.12] Common data class의 위치	719
[그림 2.11.13] IEC 61850 각 파트별 상속에 대한 구성도	722
[그림 2.11.14] IEC 61850-7 각 파트별 상속 관계	723
[그림 2.11.15] IEC 61850-8-1 Communication protocols 구성도	724
[그림 2.11.16] 기본 데이터 모델 정의 (IEC 61850-7-2)	725
[그림 2.11.17] 서비스 모델에 대한 정의 (IEC 61850-7-2)	726
[그림 2.11.18] ACSI의 Server 구성 블록 다이어그램	727
[그림 2.11.19] Two-Party-Application-Association 구성도	728
[그림 2.11.20] MultiCast-Application-Association 구성도	729
[그림 2.11.21] IEC 61850-7-2이용한 Event 처리	729
[그림 2.11.22] GSE(Generic Substation Event) 모델	730
[그림 2.11.23] GOOSE(Generic Object Oriented Substation Event) 모델	731
[그림 2.11.24] GSSE(Generic Substation State Event) 모델	731
[그림 2.11.25] Garbage Collector 구성도	733
[그림 2.11.26] 멀티코어 최적화 SW Architecture 구성도	734
[그림 2.11.27] 플랫폼 독립적인 HMI SW Architecture	735
[그림 2.11.28] MPU(Main Process Unit) SW 구조	748
[그림 2.11.29] 통신모듈 SW 구조	749
[그림 2.11.30] MPU 외형도	757
[그림 2.11.31] MPU 입출력 보드	758
[그림 2.11.32] MPU IO 외형	758
[그림 2.11.33] SCADA 시스템 구성도	759
[그림 2.11.34] Main Sever H/W 이중화 구성	760
[그림 2.11.35] Main Sever 세부사양	761
[그림 2.11.36] 네트워크 장치 세부사양	762
[그림 2.11.37] HMI 세부사양	763
[그림 2.11.38] Event Logger 세부사양	764
[그림 2.11.39] 대형상황판 세부사양	765
[그림 2.11.40] MPU 세부사양	766
[그림 2.11.41] ESIO 세부사양	767
[그림 2.11.42] DI Module 세부사양	768
[그림 2.11.43] DO Module 세부사양	769

[그림 2.11.44] AI Module 세부사양	770
[그림 2.11.45] PDU Module 세부사양	771
[그림 2.11.46] 초고속 자기부상열차 SCADA 검사 (1)	774
[그림 2.11.47] 초고속 자기부상열차 SCADA 검사 (2)	774
[그림 2.11.48] 초고속 자기부상열차 SCADA 검사 (3)	775
[그림 2.11.49] 초고속 자기부상열차 SCADA 검사 (4)	775
[그림 2.12.1] 전력 시스템 단선도	867
[그림 2.12.2] 주변압기 명판	870
[그림 2.12.3] 주변압기 외형도면	871
[그림 2.12.4] 주변압기 주요 재료	872
[그림 2.12.5] 차량측 전원장치 공급 회로도	875
[그림 2.12.6] 보조변압기 명판	878
[그림 2.12.7] 보조변압기 외형도면	879
[그림 2.12.8] 보조변압기(150KVA) 외형	880
[그림 2.12.9] 변전설비의 정류기 단선도	882
[그림 2.12.10] 정류기 주회로	886
[그림 2.12.11] Power Circuit	887
[그림 2.12.12] 터미널블록 I/O	888
[그림 2.12.13] 정류기반 LAY OUT	889
[그림 2.12.14] CABLE INLET HOLE	890
[그림 2.12.15] INNER VIEW	890
[그림 2.12.16] 정류기 외형	891
[그림 2.12.17] 강체전차선	892
[그림 2.12.18] 지지애자	894
[그림 2.12.19] 지지애자의 유한요소 모델링	894
[그림 2.12.20] 지지애자의 x,y,z축 완전 구속 모습	895
[그림 2.12.21] 상부 Bracket Force 방향	896
[그림 2.12.22] CASE1 Model	896
[그림 2.12.23] CASE2 Model	897

표 목차

[표 1.2.1] 연구개발 범위	5
[표 2.1.1] 아키텍처 정의에 대한 다양한 정의 비교	32
[표 2.1.2] 추진 및 전력 시스템 수준 인터페이스	34
[표 2.1.3] 선로구축물 시스템 수준 인터페이스	35
[표 2.1.4] 차량 시스템 수준 인터페이스	36
[표 2.1.5] 성능계측 시스템 수준 인터페이스	38
[표 2.1.6] 구성품 시험별 시험항목 - 1세부	43
[표 2.1.7] 구성품 시험별 시험항목 - 2세부	45
[표 2.1.8] 종합시운전 시험 구분	58
[표 2.1.9] 아이템 타입(Item Type) 세부내용	62
[표 2.1.10] 아이템 타입 간 연결관계 세부내용	63
[표 2.1.11] 아이템 타입별 속성 세부내용	64
[표 2.2.1] 세부 계측시스템 별 시험평가 항목 및 상시모니터링 항목	88
[표 2.2.2] 지상전력 계측시스템 측정항목 상세 사항	91
[표 2.2.3] 지상전력 계측시스템에 필요한 계측장비 구성	94
[표 2.2.4] 궤도 계측시스템 측정항목 상세 사항	95
[표 2.2.5] 궤도 계측시스템에 필요한 계측장비 구성	96
[표 2.2.6] 궤도모니터링차량 측정항목 상세 사항	98
[표 2.2.7] 궤도모니터링차량에 필요한 계측장비 구성	98
[표 2.2.8] 차량 계측시스템 계측항목 및 센서종류	99
[표 2.2.9] 신호/통신/환경 계측시스템 측정항목 상세 사항	100
[표 2.2.10] 종합 계측시스템에 필요한 계측장비 구성	101
[표 2.2.11] 전체 계측 시스템 구분	111
[표 2.2.12] 지상전력 계측장비 상세 사양	117
[표 2.2.13] 지상전력 계측 Rack 제작 사양	119
[표 2.2.14] 레이저 변위계 사양	122
[표 2.2.15] 변형률계 사양	123
[표 2.2.16] 가속도계 사양	124
[표 2.2.17] 궤도 계측장비 상세 사양	125
[표 2.2.18] UPS 사양	128
[표 2.2.19] 궤도모니터링차량용 가속도 센서 사양	130
[표 2.2.20] 궤도모니터링차량용 자이로 센서 사양	131
[표 2.2.21] 레이저 변위 센서 사양	132
[표 2.2.22] 카메라 사양	133
[표 2.2.23] DVR 사양	134

[표 2.2.24] 궤도 모니터링 차량용 계측장비 상세 사양	135
[표 2.2.25] Title item 상세 설명	138
[표 2.2.26] Device 와 Module 정보 및 측정속도 상세 설명	139
[표 2.2.27] Command button 상세 설명	139
[표 2.2.28] 채널 calibration 관련 항목 상세 설명	140
[표 2.2.29] Custom scale 입력 방법	143
[표 2.2.30] 데이터 측정 화면 설명	146
[표 2.3.1] 속도에 따른 곡선 반경	188
[표 2.3.2] 중국 Shanghai 프로젝트	189
[표 2.4.1] TR 09의 구성품	241
[표 2.4.2] 열차하중의 종류 및 등분포하중	243
[표 2.4.3] 충격계수	244
[표 2.4.4] 자기 부상 가이드웨이의 특별 요구성능 (조건)	250
[표 2.4.5] 초고속 자기부상열차 완충차막이 성능요구조건	253
[표 2.4.6] Anis and Hedrick 모델 parameter	281
[표 2.4.7] USA FRA 모델 parameter	282
[표 2.5.1] 단거리 시험선 LSM 설계 결과	309
[표 2.5.2] 단거리 시험선 LSM 기본 모델의 설계 치수	309
[표 2.5.3] LSM 주요 설계사양	312
[표 2.5.4] 기기별 장하분배정수 및 기준자기장하의 예	317
[표 2.5.5] 분포계수	318
[표 2.5.6] 단절계수	319
[표 2.5.7] 용량 및 전압에 따른 전기비장하와 자기비장하	320
[표 2.5.8] LSM 속도에 따른 입력 전류와 주파수	337
[표 2.5.9] 이동속도별 추력, 부상력, 역기전력 특성	339
[표 2.5.10] LSM 설계 변수의 범위	341
[표 2.5.11] 단거리 시험선 자기부상열차의 주요 사양	346
[표 2.5.12] 부상전자석 철심 세그먼트 사이 두께에 따른 추력 및 부상력 해석 결과	353
[표 2.5.13] 단거리 시험선 자기부상열차의 설계 사양	355
[표 2.5.14] 입력전류 및 추진체 위치에 따른 LSM 추력측정 시뮬레이션 결과(단위: kN)	378
[표 2.5.15] 입력전류 및 추진체 위치에 따른 LSM 추력측정 시험 결과(단위: kN)	380
[표 2.6.1] LSM 주요 파라미터	439
[표 2.6.2] 추진인버터 및 제어기 파라미터	439
[표 2.6.3] 추진인버터 처리신호 및 전원레벨범위	450
[표 2.6.4] 추진인버터 기능 요구사항	450
[표 2.6.5] 추진인버터 마스터 컨트롤 유닛의 기능 요구사항	451
[표 2.6.6] 추진인버터 슬레이브 컨트롤 유닛에 대한 기능 요구사항	451

[표 2.6.7] 추진시스템 사양	459
[표 2.7.1] 사령 연계 신호 LIST 지령전압 벡터	481
[표 2.7.2] 고장진단 변수	486
[표 2.8.1] LSM 파라미터	550
[표 2.9.1] 캐패시터의 특성비교	598
[표 2.9.2] 슈퍼 캐패시터 모듈 사양	599
[표 2.10.1] RFID 방식 사양	652
[표 2.10.2] 무선모뎀 사양 (송신모드)	652
[표 2.10.3] 무선모뎀 사양 (수신모드)	653
[표 2.10.4] 자기식 인코더의 주요 전기적 특성	672
[표 2.11.1] 변전소 주요 설비에 대한 Logical Node	716
[표 2.11.2] XCBR에 대한 Logical Node 구성 사례	718
[표 2.11.3] 각 Logical Node에서 사용가능한 Common data classes	719
[표 2.11.4] Data 및 Data Attribute의 특징	720
[표 2.11.5] MV에 대한 Common data class 구성 사례	721
[표 2.11.6] IEC 61850 적합성 블록 표	752
[표 2.11.7] SCADA 소프트웨어	752
[표 2.11.8] HMI 소프트웨어	753
[표 2.11.9] RTU 소프트웨어	773
[표 2.12.1] 정격사양	869
[표 2.12.2] 전기적 특성	869
[표 2.12.3] 주변압기 권선의 절연내력	870
[표 2.12.4] 주변압기 시험 항목	873
[표 2.12.5] 시험인가 전압	874
[표 2.12.6] 보조변압기 정격사양	877
[표 2.12.7] 정격전압 및 탭전압	877
[표 2.12.8] 전기적 특성	877
[표 2.12.9] 보조변압기 권선의 절연내력	878
[표 2.12.10] 보조변압기 시험 항목	880
[표 2.12.11] 보조변압기 시험인가 전압	881
[표 2.12.12] 재질 및 구성	893
[표 2.12.13] 지지애자의 성능	893
[표 2.12.14] 지지애자의 재료의 물리적 성질	895
[표 2.12.15] 각 재료의 안전성 결과	896
[표 2.12.16] 10kg Force에 따른 CASE1의 결과	897
[표 2.12.17] 10kg Force에 따른 CASE2의 결과	897
[표 2.12.18] 강체전차선 검사 기준서	898
[표 2.12.19] 지지애자 검사 기준서	901

[표 4.3.1] 원천기술 개발로 인한 편익	936
[표 4.3.2] 경제성 분석 결과	936