보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개(), 발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

발 간 등 록 번 호
11-B552989-000215-01

1000km/h급 초고속 자기부상열차의 추진/부상/안내 일체형 All-in-One 시스템 원천기술 개발

최종보고서

2020. 2. 7

주관연구기관 / 한국교통대학교

공동연구기관 / 부산외국어대학교

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

Land , Infrastructure and Transport

R&D Report

18CTAP-C142921-01

일체형 All-in-One 시스템 원천기술 개발

1000km/h급 초고속 자기부상열차의 추진 / 부상 / 안내

국토교통과학기술진흥원

국 토 교 통 부

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘1000km/h급 초고속 자기부상열차의 추진/부상/안내 일체형 All-In-One 시스템 원천기술 개발’(연구개발 기간 : 2018.04.01 ~ 2019.12.31) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2020. 2. 7.

주관연구기관명 : 한국교통대학교 산학협력단 전 문 수 (인)

협동연구기관명 : 부산동아대학교 산학협력단 이 정 배 (인)

주관연구기관책임자: 이 형 우

공동연구기관책임자: 류 법 모

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C142921-01	해당 단계 연구 기간	2019.01.01.~ 2019.12.31.	단계구분	2 / 2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	1000km/h급 초고속 자기부상열차의 추진/부상/안내 일체형 All-in-One 시스템 원천기술 개발			
	세부과제명				
연구책임자	이 형 우	해당단계 참여연구원 수	총: 16명 내부: 16명 외부: 0 명	해당단계 연구비	정부: 220,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:220,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16명 내부: 16명 외부: 0 명	총 연구비	정부: 370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국교통대학교 산학협력단				
국제공동연구	해당사항 없음				
공동연구	연구기관명: 부산외국어대학교			연구책임자: 류법모	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	본 연구개발 대상은 별도의 보안을 필요로 하지 않음

9대 성과 등록·기탁번호(연구개발성과활용계획서 참조)

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록·기탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황(연구개발성과활용계획서 참조)

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

○ 본 연구는 추진/부상/안내 기능을 위해 2가지 이상의 시스템을 사용하는 종래의 자기부상열차 시스템과는 달리 하나의 시스템안에서 추진/부상/안내 기능을 모두 수행할 수 있는 비대칭 양측식 선형유도전동기(NSDLIM)에 관한 연구이다.

○ 본 연구에서는 NSDLIM의 설계 및 특성 분석 기법과 성능 검증을 위한 축소-회전형 시험기 설계 및 제작 기법을 중점적으로 연구하였다.

보고서 면수 : 143p

요약문

연구의 목적 및 내용	**(1) 비대칭 양측식 선형유도전동기의 설계 기법 연구** ○ 비대칭 양측식 선형유도전동기 기본 설계 - 차량 운행 요구 사양(차량 길이, 중량, 요구 가속도, 요구 추진·부상·안내력)을 고려한 기본 설계 ○ 비대칭 양측식 선형유도전동기 상세 설계 - 2D/3D 유한 요소 해석을 통해 요구 추진·부상력 향상을 위한 1차측/2차측 파라미터 재설계 - 비대칭 양측식 선형유도전동기의 주요 파라미터(Airgap, Material, Reaction Plate, Number of Slot per Pole, Short-Pitch-Factor) 변화에 따른 추진/부상력 분석 - 고속 주행 시(1000km/h) 요구사항을 만족하는 주요 파라미터 도출 및 분석 **(2) 비대칭 양측식 선형유도전동기의 성능 측정을 위한 축소-회전형 시험기 설계 및 제작** ○ 축소-회전형 시험기용 비대칭 양측식 선형유도전동기 설계 - 기초 운행 요구 사양 선정 및 목표 사양 선정 ○ 축소-회전형 시험기용 비대칭 양측식 선형유도전동기 전자기적 특성 분석 - 2차원 유한요소 해석용 모델 설계 및 해석 ○ 축소-회전형 시험기 제작 ○ 성능 시험을 통한 All-in-One 시스템 성능 평가 및 설계 타당성 검토 **(3) 비대칭 양측식 선형유도전동기 추진/부상/안내력 성능 특성 해석기법 정립** ○ Analytical method 기반 종방향 단부효과에 의한 추진력 특성변화의 정량적인 분석 및 이를 통한 효율적인 해석모델 선택 프로세스 정립 (종방향 단부효과에 의한 추진력의 저하율을 기준으로 full 모델 및 1극 혹은 2극 주기모델 사용여부 판단) ○ 주기모델을 이용한 양측식 선형유도전동기의 추진력 성능해석을 위한 FEM solver 별 특성해석기법 정립 완료 ○ 2극 주기모델 및 2극 비주기 모델의 병용사용을 통한 종방향 단부효과를 고려할 수 있는 해석기법에 관한 연구 완료 ○ All-in-One 시스템의 부상력 해석을 위한 비대칭 조건에서의 횡방향 단부효과(Transverse edge effect) 해석을 위한 3차원 특성해석기법 정립 완료 ○ 공간고조파 해석기법과 2극 축소 해석모델을 이용한 선형유도전동기의 부상력 특성해석 기법 정립 완료 ○ 평형점 기준 변위에 따른 복원력에 해당하는 안내력에 대한 특성해석기법 정립 완료 ○ 종방향, 횡방향 단부효과를 고려한 안내력 해석용 2차원 및 3차원 Hybrid 특성해석기법 정립 완료
연구개발성과	○ 세계 최초의 추진, 부상, 안내 일체형 초고속 자기부상열차 기술 ○ 초고속 축소 회전형 시험기 구축 및 성능평가 기술
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 미래 친환경 초고속 신교통수단 구축을 위한 원천 기술 확보 ○ 철도 교통 분야 미래 성장 동력 및 고부가가치 창출 ○ 세계 최초의 국내 독자적 기술인 추진/부상/안내 일체형 시스템 개발에 따른 기술 선도 ○ 세계적 이슈인 아음속 캡슐 트레인(Hyperloop) 개발을 위한 핵심기술 확보 ○ 선형 전동기를 사용하는 여러 산업분야, 물류분야에 적용가능 - 지하를 통한 초고속 장거리 물류운송체계 구축 가능

국문핵심어	하이퍼루프	아음속	자기부상열차	일체형 시스템	비대칭 양측식 선형유도전동기
영문핵심어	Hyperloop	Subsonic speed	Maglev train	All-in-one system	Non-symmetric Double-sided Linear induction motor

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 10
2. 연구수행내용 및 성과 ····· 16
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 140
4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 143
붙임. 참고 문헌 ····· 143

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

〈 표 목 차 〉

<표 2-가-1> Virgin Hyperloop One 보유 시험장치 ····· 20
<표 2-가-2> 하이퍼루프 경진대회 참여 주요 팀 ····· 23
<표 2-가-3> Hyperloop One 특허 목록 ····· 32
<표 2-가-4> 자기부상열차의 주요 특허 현황 ····· 33
<표 2-가-5> 자기부상열차의 주요 논문 현황 ····· 35
<표 2-다-1> 속도 구간별 요구사양 분석 ····· 41
<표 2-다-2> 1000km/h급 초고속 자기부상열차용 NSDLIM의 설계를 위한 차량 요구사양 ···· 42
<표 2-다-3> NSDLIM 기본 설계 모델의 주요 사양 ····· 44
<표 2-다-4> NSDLIM 설계에 의해 도출된 기본 모델의 설계 결과 ····· 45
<표 2-다-5> 극수에 따른 슬립별 추력 정리(7kA 환산) ····· 49
<표 2-다-6> 재설계 모델의 설계 사양 비교 ····· 50
<표 2-다-7> 알루미늄의 도전율 ····· 56
<표 2-다-8> 상세 설계를 위한 NSDLIM의 1,2차측 파라미터 및 범위 ····· 60
<표 2-다-9> 파라미터 해석용 기준 모델 설계 사양 ····· 62
<표 2-다-10> 민감도 분석 결과 값(매극매상 슬롯 수=2) ····· 63
<표 2-다-11> 민감도 분석 결과 값(매극매상 슬롯 수=3) ····· 65
<표 2-다-12> 민감도 분석 결과 값(매극매상 슬롯 수=4) ····· 66
<표 2-다-13> 최종 모델 성능 비교 결과 값 ····· 66
<표 2-라-1> 선형유도전동기의 시간차분에서의 time step에 따른 성능해석 결과비교 (슬립 = 0.2) ···· 70
<표 2-라-2> 설계변수 변화에 따른 FDS 해석오차 검증을 위한 NSDLIM 주요 사양 ··· 77
<표 2-라-3> 주요 설계변수 변화에 따른 FDS 해석시간 및 해석오차 ····· 81
<표 2-라-4> 2차측 도전율 변경의 유효성 검증을 위한 LIM 사양 ····· 82
<표 2-라-5> 2차원 및 3차원 유한요소해석 비용 비교 ····· 84
<표 2-마-1> 상세 설계 모델의 주요 사이즈 ····· 94
<표 2-마-2> 축소-회전형 시험기 주요 사이즈 ····· 94
<표 2-마-3> 시험기 주요 사양 ····· 98
<표 2-마-4> 시험기 최종 사양 ····· 100
<표 2-마-5> 축소-회전형 시험기 2차원 유한요소 해석 조건 ····· 102
<표 2-마-6> 회전형 시험기의 해석기법 별 해석오차 ····· 107
<표 2-마-7> 부하 토크 계산 값 ····· 128
<표 2-마-8> 부상 높이에 따른 시험 결과 값 ····· 133
<표 2-마-9> 2차측 도전율 가변 파라미터 해석 결과 값 ····· 135

〈 그 림 목 차 〉

<그림 1-1> 하이퍼루프 개념도 ····· 10
<그림 1-2> 독일 Transrapid의 부상&추진 일체형 시스템(안내 별도) ····· 11
<그림 1-3> 일본 MLX의 부상&안내 일체형 시스템(추진 별도) ····· 11
<그림 1-4> 대표적 자기부상열차의 추진, 부상, 안내 일체화 현황 ····· 11
<그림 1-5> 비대칭 양측식 선형유도전동기(NSD-LIM)의 개념도 ····· 12
<그림 1-6> LIM의 종방향 단부효과의 발생원인 ····· 13
<그림 1-7> LIM의 횡방향 단부효과에 의한 2차측 와전류 분포현상 ····· 14
<그림 1-8> 유한요소해석을 이용한 LIM 기존 성능해석 모델 ····· 15
<그림 1-9> 비대칭 양측식 선형유도전동기(NSD-LIM)의 추진 및 부상력 ····· 15
<그림 2-가-1> 초전도 하이브리드 자기부상시스템(좌)과 튜브트레인 공력 해석 프로그램 개발(우) ····· 16
<그림 2-가-2> 루프형 LSM 소형시험장치(좌)와 차량·궤도 인터페이스 시험장치(우) ····· 17
<그림 2-가-3> 시제 차량(좌), 가이드웨이(우)와 시험선/차고(하) ····· 17
<그림 2-가-4> LSM 추진용 1T 급 초전도 전자석 시작품 및 공심형 LSM 시험기 ····· 18
<그림 2-가-5> UNIST 자체 제작 U-Loop 모형 ····· 19
<그림 2-가-6> 하이퍼루프 개념도 ····· 20
<그림 2-가-7> TransPod 캡슐의 프로토타입 ····· 21
<그림 2-가-8> 전두부 air compressor (좌)와 공기부상용 Ski (우) ····· 22
<그림 2-가-9> 하이퍼루프 추진장치 모형도(좌)와 하이퍼루프 추진장치 도면(우) ····· 22
<그림 2-가-10> 스위스 메트로 개념도 ····· 24
<그림 2-가-11> 동경-오사카 MLX 실용화 노선 ····· 24
<그림 2-가-12> 일본 MLX ····· 26
<그림 2-가-13> 독일의 Transrapid ····· 26
<그림 2-가-14> Transrapid 추진&부상 및 안내 ····· 27
<그림 2-가-15> 중국 서남교통대학교(SWJTU)의 HTS - ETT 시험 플랫폼 ····· 27
<그림 2-가-16> HTS 140m 길이 고속시험 플랫폼의 리니어 모터 구조 ····· 28
<그림 2-가-17> HTS Maglev 시스템 추진용 리니어 DC모터 개념도 ····· 28
<그림 2-가-18> HTS Maglev 시스템의 추진용 리니어 DC모터의 추진원리 ····· 28
<그림 2-가-19> 리니어 DC모터 프로토타입 ····· 28
<그림 2-가-20> 자기부상 관련기술을 보유한 상위 경쟁기업들의 포트폴리오 현황 ··· 30
<그림 2-가-21> 초고속 교통 육성 혁신기술의 중요성 ····· 30
<그림 2-가-22> 글로벌 시장의 잠재-수익 예측 ····· 30
<그림 2-가-23> 출원년도 및 국가별 특허출원 동향 ····· 31

<그림 2-가-24> 국가별/기술분류별 논문 발표 현황 ····· 34
<그림 2-나-1> 독일 초고속 자기부상열차 Transrapid의 추진, 부상, 안내 시스템 구조 ····· 36
<그림 2-나-2> 일본 MLX의 추진 부상 안내 ····· 37
<그림 2-나-3> NSDLIM의 구조도 ····· 37
<그림 2-나-4> 초고속 자기부상열차용 NSDLIM의 적용도 ····· 37
<그림 2-나-5> NSDLIM의 추진 원리 ····· 38
<그림 2-나-6> NSDLIM의 부상 원리 ····· 39
<그림 2-나-7> NSDLIM의 단면도(부상력) ····· 39
<그림 2-나-8> NSDLIM의 안내 원리 ····· 40
<그림 2-나-9> NSDLIM의 단면도(안내력) ····· 40
<그림 2-다-1> 시간별 거리 그래프 ····· 42
<그림 2-다-2> 시간별 속도 그래프 ····· 42
<그림 2-다-3> 시간별 가속도 그래프 ····· 42
<그림 2-다-4> NSDLIM 설계 프로세스 ····· 43
<그림 2-다-5> NSDLIM 기본 설계 모델의 주요 치수도 ····· 44
<그림 2-다-6> NSDLIM 축소 모델 ····· 46
<그림 2-다-7> 극수에 따른 슬립별 추력 ····· 47
<그림 2-다-8> 극수에 따른 슬립별 상전류peak 값 ····· 48
<그림 2-다-9> 극수에 따른 슬립별 추력 (환산값) ····· 49
<그림 2-다-10> NSDLIM 20극의 자속선 분포 (정격속도) ····· 50
<그림 2-다-11> NSDLIM 20극 모델의 자속밀도 분포 (정격속도) ····· 50
<그림 2-다-12> 28극 재설계 1 모델 ····· 51
<그림 2-다-13> NSDLIM 재설계 모델 ····· 51
<그림 2-다-14> 재설계 모델의 슬립별 추력 ····· 51
<그림 2-다-15> 재설계 모델의 슬립별 전류 ····· 52
<그림 2-다-16> 재설계 모델의 슬립별 추력 (7kA 환산) ····· 53
<그림 2-다-17> 재설계 모델의 자속선 분포 (정격속도) ····· 53
<그림 2-다-18> 재설계 모델의 자속밀도 분포 (정격속도) ····· 54
<그림 2-다-19> 간략화된 유도 전동기의 등가회로 ····· 54
<그림 2-다-20> 회전자의 저항에 따른 토크 특성 (회전형 유도전동기) ····· 55
<그림 2-다-21> 2차측 알루미늄 도전율에 따른 속도별 추력 특성 ····· 56
<그림 2-다-22> 2차측 알루미늄 도전율에 따른 속도별 전류 특성 ····· 56
<그림 2-다-23> 2차측 알루미늄 도전율에 따른 속도별 추력 특성 (7kA 환산) ····· 57
<그림 2-다-24> 알루미늄 1% 도전율 모델의 추력 환산값과 시뮬레이션 결과 ····· 57

<그림 2-다-25> 알루미늄 1% 도전율 모델의 전류 환산값과 시뮬레이션 결과 ···· 57
<그림 2-다-26> 2차측 알루미늄 도전율에 따른 자속선 분포 (정격속도) ····· 58
<그림 2-다-27> 2차측 알루미늄 도전율에 따른 자속밀도 분포 (정격속도) ····· 59
<그림 2-다-28> Symmetry 기능을 적용한 Half Model ····· 61
<그림 2-다-29> Half Model과 Full Model의 해석 결과 비교 ····· 61
<그림 2-다-30> 풀 모델과 주기 모델의 자계 해석 결과 비교 ····· 61
<그림 2-다-31> 파라미터 해석용 기준 모델 ····· 62
<그림 2-다-32> 매극매상 슬롯 수 2의 추진력 민감도 분석 ····· 63
<그림 2-다-33> 파라미터 해석 모델(매극매상 슬롯 수=3) ····· 64
<그림 2-다-34> 단절율 가변에 따른 추진력 민감도 분석(매극매상 슬롯 수=3) ····· 64
<그림 2-다-35> 파라미터 해석 모델(매극매상 슬롯 수=4) ····· 65
<그림 2-다-36> 단절율 가변에 따른 추진력 민감도 분석(매극매상 슬롯 수=4) ····· 65
<그림 2-다-37> 우수 모델 최종 성능 비교 ····· 66
<그림 2-다-38> 최종 모델 자계 해석 ····· 67
<그림 2-라-1> Transient solver를 이용한 선형유도전동기 성능해석 시 발생하는 과도구간 ···· 69
<그림 2-라-2> 해석시간 분할회수에 따른 선형유도전동기의 정상상태 해석오차 비교 ··· 70
<그림 2-라-3> Current sheet가 적용된 양측식 평판형 선형 유도전동기의 유한요소 해석모델 ··· 73
<그림 2-라-4> 기본파 이동자계만 존재하는 경우 해석방법에 따른 추진력 해석결과 비교 ··· 74
<그림 2-라-5> 5공간고조파 이동자계가 존재하는 경우 해석방법에 따른 추진력 해석 결과 비교 ·· 75
<그림 2-라-6> 7공간고조파 이동자계가 존재하는 경우 해석방법에 따른 추진력 해석 결과 비교 ·· 75
<그림 2-라-7> NSDLIM의 유한요소 해석을 위한 1극 1/2 해석모델 ····· 77
<그림 2-라-8> 공극길이 변화에 따른 TDS 및 FDS 해석결과 ····· 78
<그림 2-라-9> 극 피치 변화에 따른 TDS 및 FDS 해석결과 ····· 78
<그림 2-라-10> 권선법에 따른 TDS 및 FDS 해석결과 ····· 79
<그림 2-라-11> 유한요소해석 모델 ····· 83
<그림 2-라-12> 슬립에 따른 추진력 해석결과 (2D, 3D) ····· 84
<그림 2-라-13> 추진/부상력 해석을 위한 3차원 해석 모델링 및 Mesh ····· 85
<그림 2-라-14> Primary와 Secondary 중심 간 거리에 따른 Thrust force(추진력) 해석결과 ···· 86
<그림 2-라-15> 1차측과 2차측의 중심 간 거리에 따른 2차측 와전류 분포패턴 ···· 87
<그림 2-라-16> Primary와 Secondary 중심 간 거리에 따른 lateral force(부상력) 해석결과 ····· 88
<그림 2-라-17> 상세 설계모델의 성능해석을 위한 3차원 해석모델 (1극 full 모델) ····· 89
<그림 2-라-18> y축 변위에 따른 3차원 해석결과 ····· 90
<그림 2-라-19> z축 변위에 따른 3차원 해석결과 ····· 91
<그림 2-마-1> NSDLIM 축소-회전형 시험기 구조도 ····· 92

<그림 2-마-2> 축소-회전형 시험기 설계 순서도 ····· 93
<그림 2-마-3> NSDLIM 축소-회전형 시험기 구조도 ····· 94
<그림 2-마-4> 축소-회전형 시험기의 2차측 회전체 외경 계산 ····· 94
<그림 2-마-5> 축소-회전형 시험기의 주요 사이즈 ····· 95
<그림 2-마-6> 축소-회전형 시험기의 2차측 회전체 사이즈 ····· 95
<그림 2-마-7> 축소-회전형 시험기의 간략화된 회전체 구조도 ····· 96
<그림 2-마-8> 축소 회전형 시험기의 2차측 회전체 부피 계산 ····· 96
<그림 2-마-9> 축소-회전형 시험기의 성능 곡선 ····· 97
<그림 2-마-10> 축소-회전형 시험기 2차원 유한요소 해석 모델 ····· 101
<그림 2-마-11> 축소-회전형 시험기 2차원 유한요소 해석 ····· 102
<그림 2-마-12> 3차원 유한요소해석 모델 (1극 모델) ····· 103
<그림 2-마-13> 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 슬립 별 추진력 해석결과 104
<그림 2-마-14> 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 슬립 별 부상력 해석결과 105
<그림 2-마-15> 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 2차측 와전류 분포 해석결과 · 106
<그림 2-마-16> 시험기에 부착된 엔코더 ····· 123
<그림 2-마-17> 오실로스코프를 이용하여 측정한 d,q축 전류 ····· 123
<그림 2-마-18> 멀티미터 ····· 124
<그림 2-마-19> 벽면 전원부(단상 220V) ····· 124
<그림 2-마-20> 승압 변압기(3상 380V) ····· 125
<그림 2-마-21> 슬라이닥스 ····· 125
<그림 2-마-22> 컨버터 ····· 126
<그림 2-마-23> 인버터 ····· 126
<그림 2-마-24> NSDLIM 축소-회전형 시험기 성능 시험 로드맵 ····· 127
<그림 2-마-25> 시험기의 부하 토크 측정 메커니즘 ····· 128
<그림 2-마-26> 부하-토크 곡선 ····· 129
<그림 2-마-27> 기계적 토크 곡선 ····· 129
<그림 2-마-28> 전기적 토크 곡선 ····· 130
<그림 2-마-29> 추정된 부하 토크 곡선 ····· 131
<그림 2-마-30> 부상 높이에 따른 추진 토크 ····· 132
<그림 2-마-31> 부상 비율에 따른 추진 토크 및 토크 감소율 ····· 132
<그림 2-마-32> 성능 시험결과와 시뮬레이션간 결과 비교 ····· 134
<그림 2-마-33> 2차측 도전율 가변 파라미터 해석 ····· 135
<그림 2-마-34> 2D & 3D 시뮬레이션과 성능 시험간 최종 비교 ····· 136

1. 연구개발과제의 개요

세계화가 가속화되면서 친환경 초고속 장거리 교통수단에 대한 수요가 증가하여 아음속 튜브형 트레인 Hyperloop가 전 세계적으로 주목받고 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음.

㉮ Hyperloopone社, Hyperloop Transportation Technology社(HTT) 등은 하이퍼루프의 시험노선을 건설 및 시험중에 있으며 핵심기술을 확보중인 상황임

㉯ 또한 Hyperloop 출범 이전부터 미국, 스위스, 독일, 일본 등 여러 나라에서 아음속 튜브형 트레인 관련 핵심기술을 연구 및 개발해왔음

㉰ 하이퍼루프는 진공상태의 튜브 내에서 열차가 자기부상하여 음속에 가까운 속도로 주행하는 것으로 서울에서 부산까지 20분여 만에 갈 수 있는 신개념의 친환경 초고속 자기부상열차임

- 진공상태의 튜브관을 통해 공기저항을 크게 감소시켜 기존 초고속 자기부상열차의 최고속도인 603km/h의 한계를 넘어 음속에 가까운 1000km/h 이상의 최고속도를 자랑함
- 월등히 높은 가속도와 최고속도로 인해 통일 대한민국, 시베리아 횡단 철도에 대비하여 장거리 운송에 매우 유리하며 항공서비스보다 빠른 운행시간, 운행시격, 보다 나은 접근성을 가짐



그림 1-1 하이퍼루프 개념도

㉱ 하이퍼루프는 튜브의 제약적인 공간 내에서 추진, 부상, 안내를 위한 여러 장치들로 인해 시스템이 복잡하고 점유 공간이 증가하며 각 장치들의 인터페이스를 고려한 제어가 필요함

- 튜브 내에 여러 장치가 구성되어 차량과 튜브의 크기가 증가하고 구성이 복잡하여 유지보수비용과 제작비용 및 건설비용이 크게 증가함
- 각각의 추진, 부상, 안내 장치들은 서로 영향을 끼치므로 각 장치간의 인터페이스를 고려해야 하므로 제작 및 제어가 까다로움

㉲ 세계적으로 현재까지 연구 및 상용화된 기술로는 자기부상열차의 추진, 부상, 안내 중 2개의 기능을 동시에 하는 시스템이 존재하나, 모든 기능을 수행하는 시스템은 개발되지 않음

- 초고속 자기부상열차 선진국인 일본, 독일 등에서도 부상, 안내 일체형 시스템은 존재하나 추진, 부상, 안내 일체형 시스템은 존재하지 않음

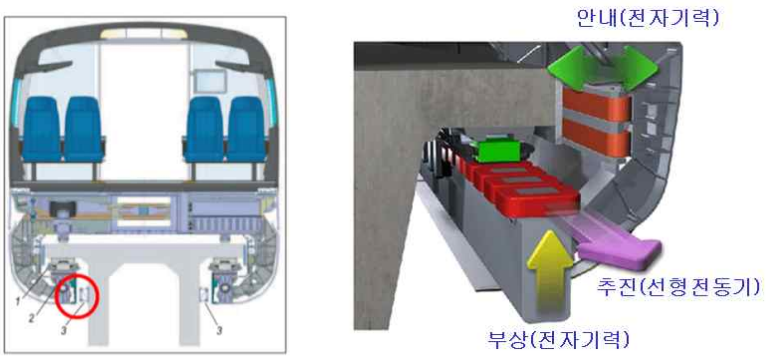


그림 1-2 독일 Transrapid의 부상&추진 일체형 시스템(안내 별도)

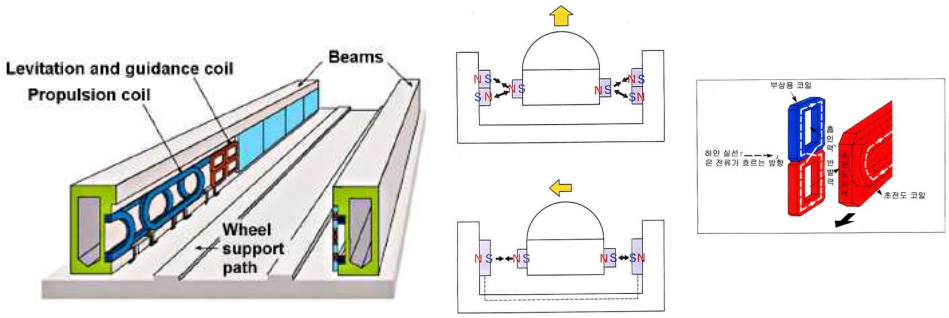


그림 1-3 일본 MLX의 부상&안내 일체형 시스템(추진 별도)

시스템	추진	부상	안내	자기장
Linimo/Ecobee	LIM	EMS	EMS	CM
Inductrack	LSM	EDS	EMS	PM
Cobra	LIM	EDS	EDS	SCM
Transrapid	LSM	EMS	EMS	CM
MLX	LSM	EDS	EDS	SCM

그림 1-4 대표적 자기부상열차의 추진, 부상, 안내 일체화 현황

㉮ 본 과제의 연구대상인 비대칭 양측식 선형유도전동기는 편측식 선형유도전동기의 추진원리, 횡방향효과, 수직력 특성을 이용하여 추진력, 부상력, 안내력이 모두 발생하는 구조를 가지고 있어 운행을 위한 모든 핵심기능의 수행이 가능하며, 이로 인해 시스템 구조와 유지보수가 간단해지고 튜브 및 차량의 크기가 감소하여 공간적, 비용적, 제어적, 운행적 이점을 가짐

㉯ 비대칭 양측식 선형유도전동기는 튜브 바닥에 1차측 계자 코일이 양쪽으로 설치되고 차량 하부에 2차측 리액션 플레이트가 수직으로 부착된 형태로 차량에는 얇은 도체판만 부착됨

- 차량에 얇은 도체판만이 부착되므로 차량의 제작이 간편하고 차량 경량화가 가능하여 제작비용이 감소하고 높은 가감속도를 가짐
- 기존의 선형동기전동기 방식의 초고속 자기부상 열차의 경우, 짧은 운행시격으로 다수의 차량을 제작해야 하는 튜브형 트레인에 적용 시 차량 하부에 영구자석을 부착해야 하므로 선형유도전동기에 비해 차량 제작 비용이 크게 증가함

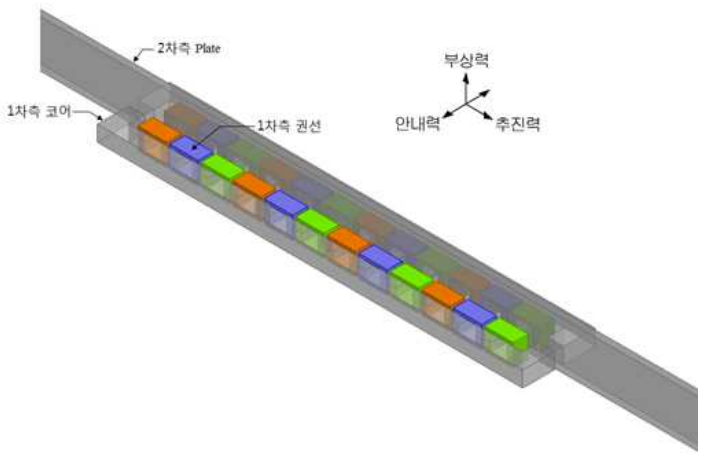
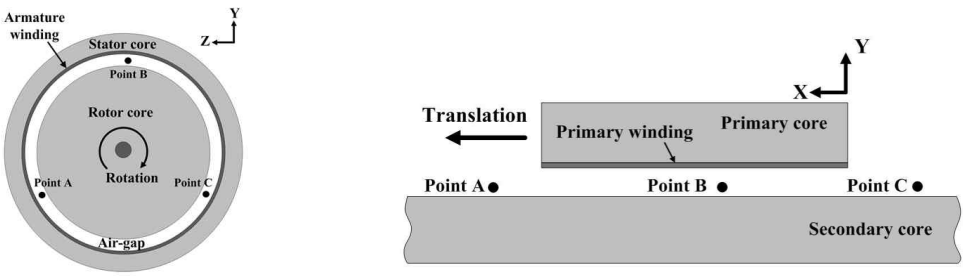


그림 1-5 비대칭 양측식 선형유도전동기(NSD-LIM)의 개념도

㉰ 비대칭 양측식 선형유도전동기를 이용한 추진, 부상, 안내 일체형 All-in-One 시스템은 세계 최초의 기술로서, 설계 및 해석 기술의 연구 개발이 필요함

- 자기부상 기술은 자계에 의해 발생하는 힘을 이용해 물체를 공중에 띄우는 기술로 자극간의 흡인력(EMS, Electro Magnetic Suspension) 또는 반발력(EDS, Electro Dynamic Suspension)을 이용하는 부상 방식이 있음
- EDS 방식은 부피와 무게가 작으면서도 강력한 자장을 발생시킬 수 있는 초전도 유도 반발식 자기부상 방식을 많이 이용하고 있음
- EDS 방식은 EMS 방식보다 제어가 간단하지만 초전도 유도 반발식 자기부상의 경우 초전도 상태를 유지하기 위한 비용과 기술적 어려움이 매우 크고, 정차 시 및 저속에서는 부상할 수 없어 별도의 지지기구가 필요함

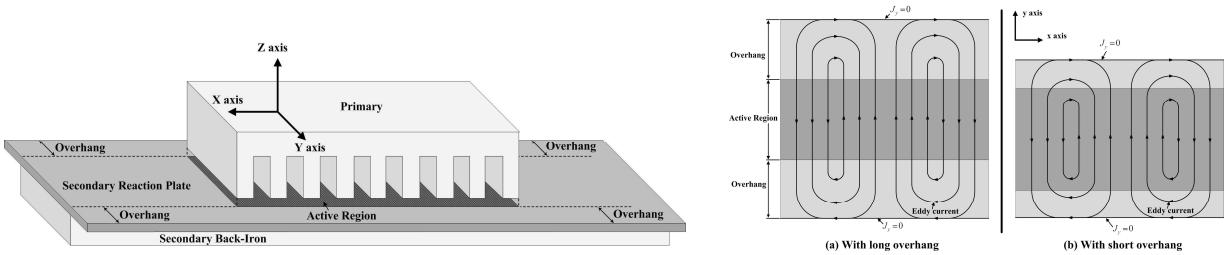
- EMS 방식은 정차 시 및 저속에서도 별도의 지지기구 없이 부상할 수 있으며, 상전도 전자석으로 구성이 가능하나, 공극센서를 이용하여 차량과 레일사이의 간격을 약 10mm로 유지하기 위한 폐루프 제어가 필수적이므로, 초고속에서는 적합하지 않음
- 또한, 부상방식과 별도로 추진을 위한 선형전동기 기술 및 안내를 위한 능동/수동 기술이 필요함
- 제안하는 All-in-One 시스템은 선형유도전동기(LIM, Linear Induction Motor)에서 발생하는 추진력/부상력/안내력을 모두 이용하는 시스템으로 추진력은 LIM의 Thrust force, 부상력은 LIM의 횡방향 변위에 따른 Lateral force, 안내력은 LIM의 Normal force를 이용함
- 본 시스템의 추진, 부상, 안내력은 비대칭 양측식 선형유도전동기 (NSD-LIM, Non-Symmetric Double-sided Linear Induction Motor)를 사용하므로, 2차측 리액션 플레이트의 정렬 위치와 재질, 다양한 형상 파라미터, 슬립주파수 등에 따라 특성이 모두 변화하기 때문에 요구조건을 만족하는 상세 및 최적 설계 연구가 매우 중요함
- LIM은 이동자의 길이가 이동방향인 종방향으로 유한하기 때문에 발생하는 종방향 단부효과와 이동방향의 수직인 횡방향으로의 길이가 유한한 동시에 시변자속에 의한 와전류의 형상이 동심형태인 관계로 발생하는 횡방향 단부효과로 인하여 이의 성능특성 해석이 어려워진다는 문제점을 가짐
- LIM은 유한한 이동자의 길이로 인하여 이동방향에 대하여 전기회로 및 자기회로 상에 불연속이 존재하며, 이로 인해 정상상태 이동자계에 추가적으로 비동기속도의 감쇄 이동자계가 발생됨. 이 비동기 감쇄 이동자계로 인해 종방향 단부효과라는 이상현상이 발생하여, 회전형 유도전동기의 동작특성과는 상이한 특성이 나타남.



(a) 회전형 유도기의 전기 및 자기회로의 연속성 (b) LIM의 전기 및 자기회로의 불연속성

그림 1-6 LIM의 종방향 단부효과의 발생원인

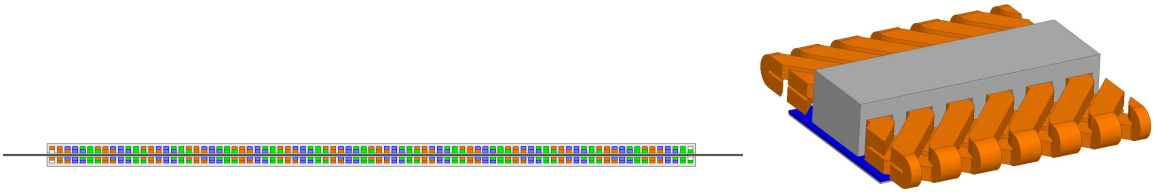
- LIM은 또한 이동방향에 수직인 횡방향으로도 유한한 길이를 가지며 2차측에 Ladder타입의 도체판을 사용하지 않는 이상 도체판에서 발생하는 와전류의 패턴형상이 수면에서의 물결파와 같은 동심형태로 나타남. LIM의 2차측 도체판은 공극자속과 상호작용하여 출력 힘을 발생시키는 액티브 영역과 공극자속과의 상호작용이 없는 오버행영역으로 구분되며, 횡방향 단부효과는 액티브 영역과 오버행 영역을 포함한 2차측 도체판의 횡방향 길이가 유한하기 때문에 발생함. 액티브 영역에서의 와전류의 분포는 동심형태로 발생하며, 발생된 와전류 중 추진력에 기여하는 액티브 영역에서의 횡방향 성분의 와전류 크기는 횡방향 단부효과에 의하여 감소함. 특히 1차측 이동자의 중심과 2차측의 중심 간 변위가 발생하여 일치하지 않는 경우에는 횡방향 단부효과에 의하여 횡방향 변위를 증가 혹은 감소시키는 방향으로의 Lateral force가 발생됨.



(a) LIM의 2차측 도체판의 영역구분 (b) LIM의 2차측 도체판에서의 와전류 분포형상

그림 1-7 LIM의 횡방향 단부효과에 의한 2차측 와전류 분포현상

- All-in-One 시스템의 추진력, 안내력, 부상력의 정확한 예측을 위해서는 LIM의 종방향 단부효과 및 횡방향 단부효과를 모두 고려할 수 있는 해석기법이 필요함. LIM의 성능특성 해석에는 크게 수학에 기반을 둔 해석적인 방법과 유한요소해석을 이용한 수치해석기법이 있으며, LIM의 실제적인 형상과 재질의 비선형성을 모두 고려한 정확한 해석을 위해서는 유한요소법을 이용하여야 함. 하지만 LIM의 종방향 단부효과와 횡방향 단부효과를 모두 고려한 정확한 성능해석을 위해서는 모든 극수를 포함한 전체 모델에 대한 3차원 유한요소해석이 요구됨. 현재의 일반적인 컴퓨터 자원으로는 LIM의 전체 모델에 대한 3차원 유한요소해석은 불가능하여, 기존 연구들에서는 횡방향 단부효과를 무시하고 전체 극수모델에 대한 2차원 유한요소해석을 통해 종방향 단부효과만을 고려하거나 1극이나 2극 모델에 대한 3차원 유한요소해석을 통해 횡방향 단부효과만을 고려하였음.



(a) 종방향 단부효과 고려가 가능한 2차원 해석모델 (b) 횡방향 단부효과 고려가 가능한 3차원 해석모델

그림 1-8 유한요소해석을 이용한 LIM 기존 성능해석 모델

- 하지만 All-in-One 시스템은 추진력은 LIM의 종방향 단부효과의 영향을 강하게 받는 Thrust force, 부상력은 횡방향 단부효과로 인하여 발생하는 Lateral force이므로 All-in-One 시스템의 정확한 성능해석을 위해서는 종방향 단부효과와 횡방향 단부효과를 동시에 고려할 수 있는 해석기법이 필요함. 현재의 제한된 컴퓨터 자원으로 이의 해석이 가능하기 위해서는 기존의 유한요소해석기법과 차별화된 새로운 해석기법의 개발 및 정립이 필요함.
- 또한 부상 시스템의 댐핑 및 고유주파수 결정 등을 위한 설계가 이루어져야 함

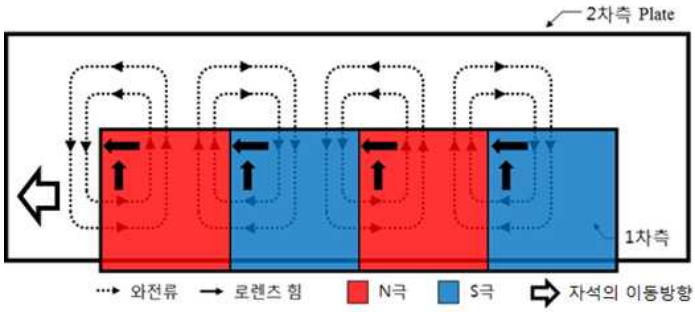


그림 1-9 비대칭 양측식 선형유도전동기(NSD-LIM)의 추진 및 부상력

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구개발 대상의 국내·외 현황

(1) 국내·외 기술 현황

(가) 국내 기술 현황

① 초고속 튜브철도 차량 핵심기술 개발

㉮ 수행기관 : 한국철도기술연구원 (주요사업 2009~2011)

㉯ 초고속 튜브트레인 시스템 인터페이스의 핵심 요소기술 분석 및 기술트리 작성

㉰ 리니어 추진 및 부상 시스템 연구를 통하여 700km/h급 초고속 선형동기전동기(Linear Synchronous Motor, 이하 LSM)를 설계하고 유한요소해석으로 검증함. 또한 초고속 LSM의 추진 제어 기법 정립 및 동특성 실험에 의한 검증을 수행하였으며 초전도 하이브리드 부상시스템 설계 및 제작과 성능 검증을 수행함

㉱ 공기저항 감소를 위한 파라미터 최적화, 3차원 공력해석 프로그램 개발, 튜브 내 진공도에 따른 공기저항 효과 실험, 아진공 튜브 주행시 터널 내 압력변동, 온도변화 특성 등 계측

㉲ 시스템 인터페이스 설계 로직 분석, 튜브 인프라-차량 인터페이스 모델 구축 및 파라미터 분석, 영향 평가 등 튜브 인프라-차량 인터페이스에 대한 연구를 진행함

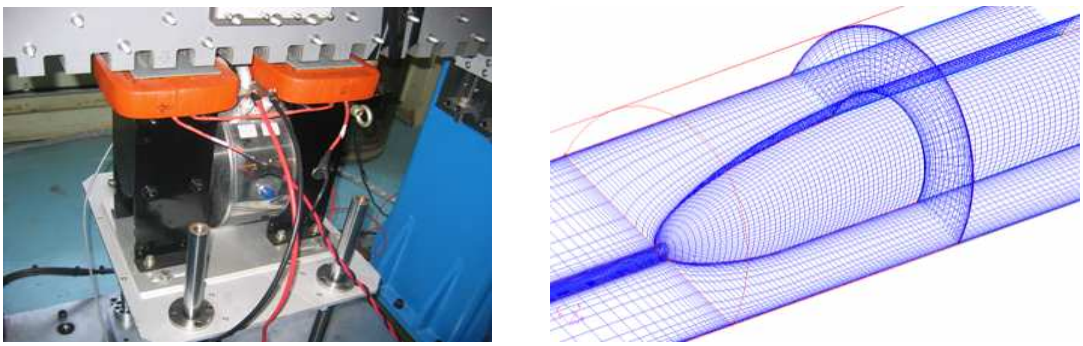


그림 2-가-1 초전도 하이브리드 자기부상시스템(좌)과 튜브트레인 공력 해석 프로그램 개발(우)

② 루프형 LSM 소형시험장치 및 차량·궤도시스템 간의 인터페이스 기술 개발

㉮ 수행기관 : 한국철도기술연구원(주관), 한국기계연구원(협동)

㉯ 루프형 LSM 시험장치 설계 및 단품 제작을 위하여 LSM 상세설계 및 해석, 추진 전 력시스템 상세설계 및 해석, 추진제어 및 섹션전환 알고리즘 개발 및 평가를 수행함

㉰ 궤도시스템간의 동적상호 작용분석을 위하여 차량 궤도 모델을 이용한 동적 상호작용 시뮬레이션을 실시하였으며 주행 및 부상 안정성, 승차감 확보를 위한 설계 요건을 제시함



그림 2-가-2 루프형 LSM 소형시험장치(좌)와 차량·궤도 인터페이스 시험장치(우)

③ 초고속 자기부상철도 핵심기술 개발

㉮ 수행기관 : 한국철도기술연구원(주관), 한국기계연구원(협동)

㉯ 사업형태 : 국토부 국가 R&D 사업(2011~2015)

㉰ 150m 단거리 자기부상 시험선 및 시제 차량을 확보하고, 급전시스템(500kVA)을 구축함

㉱ 모터용량(450kW/량), 최고 속도(30km/h), 가속도(1.1m/s2), 견인력(23.7kN)의 실차규모 자기

㉲ 부상 및 LSM 추진 기술을 국내 최초로 구현하였음



그림 2-가-3 시제 차량(좌), 가이드웨이(우)와 시험선/차고(하)

④ 600km/h급 레일식 초고속 철도 핵심기술 개발

㉮ 수행기관 : 한국철도기술연구원 (기관 고유사업 2013~2017)

㉯ 초고속열차용으로 휠-레일 가이드 방식에 추진시스템으로 선형전동기를 적용하여 점착력 제한 없이 높은 추진력을 이용하여 고속 주행이 가능한 열차로서, 초전도 LSM 추진 기술 및 계자용 초전도 전자석에 대한 연구가 진행되었음

㉰ 국내 최초로 초전도 공심형 LSM 추진에 성공한 바 있음

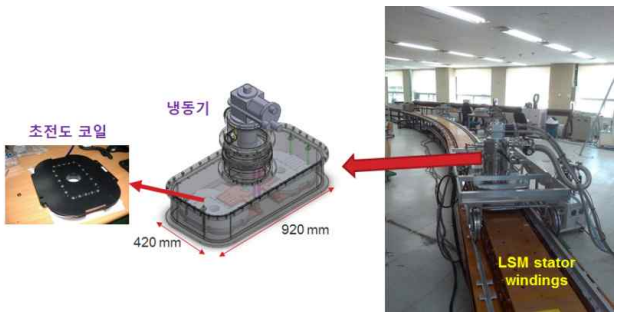


그림 2-가-4 LSM 추진용 1T 급 초전도 전자석 시작품 및 공심형 LSM 시험기

⑤ 아음속 캡슐 트레인 핵심 기술 개발

㉮ 수행기관 : 한국철도기술연구원 (BIG사업 2016~)

㉯ 캡슐 트레인의 안전 및 운영기술과 모듈 기반의 아음속 추진기술, 전자기-에어 하이브리드 부상기술, 튜브내 공력 및 주행안정화 기술, 아진공 튜브 및 기밀 유지 기술, 아음속 캡슐 제어 기술 개발

㉰ 통일 한국을 대비하여 부산~신의주간 1시간 주파가 가능하고, 향후 대륙 횡단 철도의 초고속화에 대비한 선제적 기술 대응 및 First mover로서, 세계 최초 아음속 캡슐트레인 개발하여 신개념 육상교통의 과학 기술 선도 목적으로 사업 추진

㉱ 일본의 MLX와 같은 초전도 방식의 LSM 추진 및 EDS 부상 방식 채택

㉲ 공심형 LSM 설계 및 해석 기술, 추진 제어 알고리즘 기술 등 확보

⑥ 하이퍼루프 핵심 요소기술 개발을 위한 유루프(U-Loop) 프로젝트

㉮ 수행기관 : 울산과학기술대학교(주관), 한국기계연구원(공동), 한국철도기술연구원 등, (2016~ 5년간 14억)

㉯ 하이퍼루프의 핵심 요소인 튜브 내 공기의 저항을 줄이고, 마찰을 최소화하는 열차 부상 및 추진 기술 개발

㉰ 공기역학과 동역학, 진동, 전두부의 콤프레서 등을 고려한 차량 캡슐에 대한 연구

㉱ 베터리와 스마트 그리드 등의 전력시스템, 선형전동기를 이용한 추진, 공기 혹은 자기 부상에 대한 연구

㉮ 튜브 내의 밀폐된 공간에서의 통신문제, 통신보안에 대한 연구

㉯ 2017년 10월 26일 제7차 대중교통 국제정책포럼에서 자체 제작 하이퍼루프 모델인 U-Loop의 축소 모형을 실제 구동

- 튜브 내의 기압을 1/1000기압 수준으로 아진공 상태를 유지
- 차체 부상을 위해 영구자석을 사용
- 추진을 위해 LIM 사용
- 향후 차체 부상을 위해 정밀제어가 가능한 전자석 및 초전도 자석 등의 사용 고려 및 고속 추진을 위해서 LSM의 사용 필요 예상



그림 2-가-5 UNIST 자체 제작 U-Loop 모형

㉰ 상기 내용에서 살펴본 바와 같이 자기부상철도의 추진 및 부상에 대한 핵심 기술에 대하여 부분적으로 연구가 수행되었으나 이는 기존의 독일 Transrapid와 같은 추진/부상 일체형, 일본의 MLX와 같은 초전도 계자를 사용하는 것으로, 하나의 시스템으로 추진, 부상, 안내를 구현하는 연구는 시도된 바가 없음

(나) 국외 기술 현황

① 초고속 튜브열차 하이퍼루프(Hyperloop)

㉮ 하이퍼루프 개요

- 0.001기압의 아진공 튜브 내를 공기부상식으로 운행하는 개념으로 최고목표속도는 1,220km/h
- LA-샌프란시스코(610km) 구간에 민간투자로 건설을 제안하였으며 추정 건설비는 약 6조 8천억원으로 예상됨
- 하이퍼루프의 주요 사양은 다음과 같음

· 목표속도 : 1,220km/h

· 차량크기 (너비×높이×길이)/무게 : 1.35×1.1×26m / 15톤(만차)

· 튜브직경/기압 : 2.23m / 0.001기압

· 탑승인원/시격 : 28명 / 2분(혼잡시간대 : 30초)

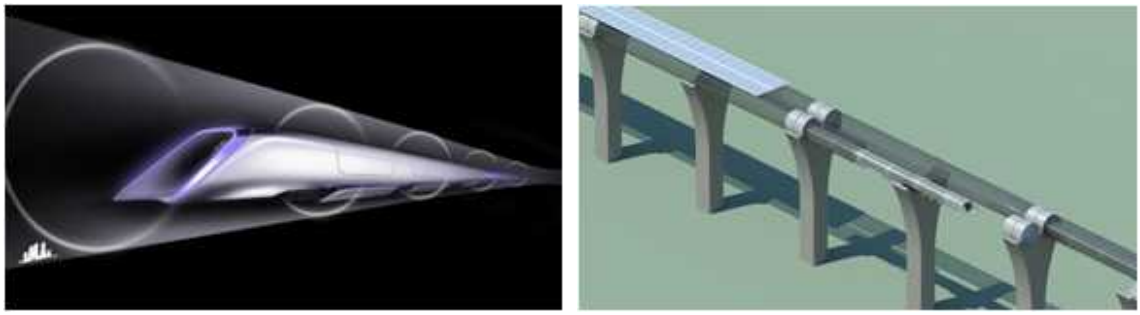


그림 2-가-6 하이퍼루프 개념도

㉯ 하이퍼루프 개발사 현황

- 미국의 Hyperloop One사는 1억불(1200억원)의 민간펀드를 투자하여 120여명의 전문기술자가 네바다 사막에서 시험선을 개발 중에 있음
- 또한, 핵심기술에 대한 테스트가 가능한 주요 시험장비를 구축하고 있음
- 추진방식은 LIM을 이용한 방식을 사용, 부상 및 안내방법은 영구자석 및 대항판을 이용한 EDS(유도반발식) 방식을 채택
- 2016년 5월, 네바다사막 1km 내외의 시험 선로에서 최고속도 187km/h의 추진 시험 진행함(LIM 추진방식으로 약 2.6G의 가속도 구현, 7000V 사용)
- 2017년 5월, 아진공 튜브 인프라 내부에서 제한적인 주행 테스트 최대가속도 0.5g 최대속도 112km/h
- 2017년 8월, 튜브 인프라 내부에서 실사이즈 하이퍼루프 차량 XP-1 Test Pod는 최대 가속도 1.0g 및 320km/h의 최대속도로 테스트

표 2-가-1 Virgin Hyperloop One 보유 시험장치

축소형 풍동시험장치	부상 시험장치	튜브 시험장치
		
저진공 상태에서 공기 흐름 및 압축 시험	저진공 상태에서 부상 시험	디자인, 오리피스, 누설, 용접 성능 등을 시험

- TransPod는 Hyperloop를 캐나다에 구현하기 위해 2015년에 설립된 캐나다 토론토 소재 회사, 2024년까지 캐나다에 하이퍼루프 노선을 건설하는 것을 목표로 지정
- 현재 Half 스케일의 캡슐차량 제작을 완료하였으며 Full 스케일의 캡슐차량을 공개 예정임
- 선형유도전동기와 압축공기를 이용한 추진시스템, 영구자석을 이용한 부상시스템



그림 2-가-7 TransPod 캡슐의 프로토타입

- 미국의 또 다른 회사인 HTT(Hyperloop Transportation Technologies)는 각 파트에 대한 간단한 시뮬레이션, 고찰 및 향후 계획이 포함된 “Crowdstorm Documentation” 배포함(2015년)
- 할바흐 배열(Halbach Array)을 이용한 수동적 자기부상(Passive Magnetic Levitation)방식
- 8km의 시험선을 Quay Valley(캘리포니아)에 건설 중에 있음
- Full-Scale 캡슐 Pod 제작 완료, 2020년 실제 승객을 탑승시킨 채 여객용 캡슐을 본격적으로 시험하기 위한 준비단계에 있음
- 중국우주과학공업그룹(CASIC)에서 추진 중인 중국형 하이퍼루프 T-Flight는 2020년까지 1,000km/h 속도의 차량에 필요한 기술을 개발하는 것을 목표
- 부상 방식은 초전도-영구자석 대항 방식으로 추정, 추진방식은 초전도자석 기반의 선형동기전동기 방식으로 추정
- 2017년 9월, 최대 시속 4000km로 달리는 ‘T-Flight’ 개발 계획 발표
- 3단계로 나누어 속도 및 구간을 건설 예정

· 1구간 : 후베이성 우한-양양 노선건설 및 1,000 km/h 달성
· 2구간 : 베이징-상하이-우한-청두-광저우 노선건설 및 2,000 km/h 달성
· 3구간 : 일대일로 노선건설 및 4,000 km/h 달성

㈐ 하이퍼루프 기술

- 전두부 Compressor 및 공기 부상

· 전면부 공기의 50%를 흡입함으로써 튜브 내 공기저항 감소
· 흡입된 공기는 20:1 비율로 압축

· 압축공기의 60%는 차량 뒷부분 노즐로 bypass
- 나머지 40%는 공기부상을 위해 사용
- 1.5×0.9m 크기의 공기부상용 스키(ski)를 통해 분사하여 부상
- 공기부상 공극 : 0.5~1.3mm

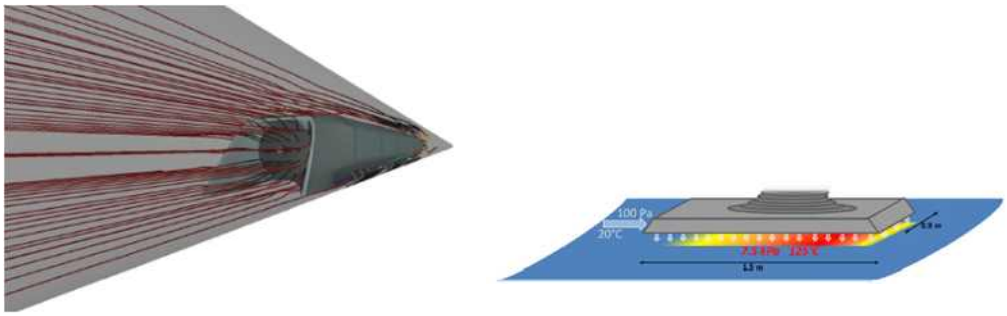


그림 2-가-8 전두부 air compressor (좌)와 공기부상용 Ski (우)

- 추진
· 지상고정자, 차상이동자 방식의 LIM 사용
· 지상고정자는 전체 노선 중 일부인 4km 길이에만 설치
· 고정자와 회전자 사이 공극 : 20mm
· 소요 전력 : 65MW

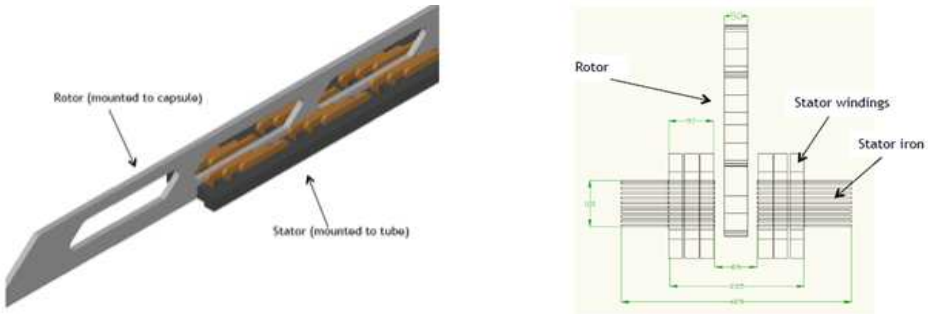
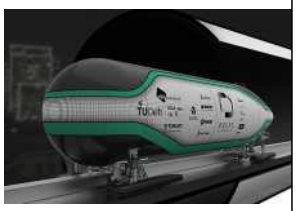


그림 2-가-9 하이퍼루프 추진장치 모형도(좌)와 하이퍼루프 추진장치 도면(우)

㉱ 하이퍼루프 경진대회
- SpaceX社 주관 캡슐차량 디자인 및 운행 경진대회로서 2015년 공고를 통해 지원한 120개 팀 중, 최종 경연에 참가할 30개 팀을 선별하였음
- 선별된 팀은 1.6km 시험선에서의 주행 경연을 통한 우승을 경쟁
- 독일 WARR팀이 시험선에서 0.9g의 가속도, 320km/h의 최고속도로 우승

표 2-가-2 하이퍼루프 경진대회 참여 주요 팀

Univ. Cincinnati	Keio Univ.	Lehigh Univ.	MIT
			
Delft Univ.	**Univ. Maryland**	**John's school**	**Carnegie Mellon**
			
Univ. Wisconsin	**Virginia Tech.**	**Univ. Munich**	**Univ. Waterloo**
			

② 스위스메트로(Swissmetro)

- 스위스에서는 산악지형에 적합한 초고속 지상운송수단 개발을 위하여 1987년부터 스위스메트로(Swissmetro) 프로젝트를 시작하여 2000년대 초반에 기초연구를 완료하였음
- 장기적으로는 목표속도 600~700km/h로 1,000km 반경 안에서 운행되는 중단거리 항공 교통에 대한 효과적이고 환경 친화적인 대안으로 연구됨
- 스위스메트로는 터널 내 압력이 낮을 경우 공기역학에 의한 aerodynamic drag를 감소시키기 위해 터널단면에 대한 열차의 단면적 비를 0.4로 하고 터널 내 압력을 대기압의 1/10으로 줄인 아진공 터널에서 운행하는 자기부상철도에 대한 연구를 진행하고 있음
- 스위스메트로 시스템은 다음과 같은 핵심기술을 가짐

· 내경 5m의 양방향 두 개의 터널을 갖는 완전한 지하 구조물
· 추진에 소요되는 에너지소모를 줄이기 위하여 터널내압을 저진공(0.1기압)으로 유지
· 500km/h 이상의 속도로 주행 가능한 LSM를 이용한 추진시스템
· 500m 연장에서 500km/h의 속도에 도달할 수 있도록 해주는 축소형 튜브 트레인 시험대(1/10)인 HISTAR 설계 완료

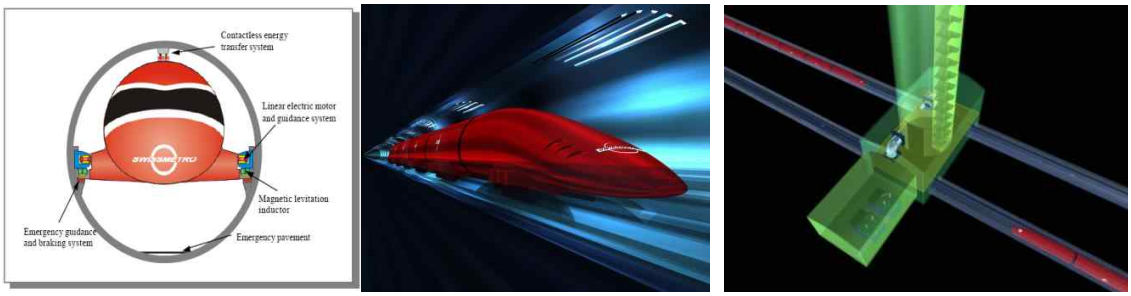
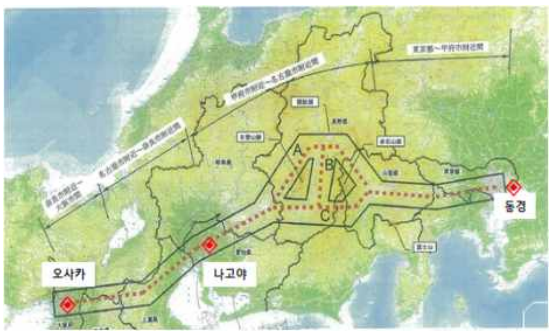


그림 2-가-10 스위스 메트로 개념도

③ 일본의 초고속 자기부상열차 MLX

㉮ MLX 개요

- 일본은 1970년 수립된 일본전국신간선 철도정비법(제4조)에 의한 기본계획에 따라 동경-오사카(500km) 간 초고속 자기부상철도 노선(Chuo Sinkansen) 건설을 위한 연구개발을 착수하였으며, 국토교통성 산하 리니어교통기술 평가위원회의 실용화 기술개발 완료 결정에 따라 2008년부터 JR-동해 주도로 실용화 노선 건설 확정함
  - · 기존 도카이도 신칸센 노선(도쿄~오사카)의 포화에 따른 대체선로 필요
  - · 기존 노선과의 이중화를 통한 지진 등의 재해 시 위험 분산 가능
- 2027년 동경-나고야(1단계:270km, 영업속도 500km/h) 개통을 위한 공사 진행 중
- 주요 연구 개발 이력
  - · 7km의 미야자키 시험선 건설(1977년) 및 517km/h의 최고속도 달성(1979년)
  - · 실제 영업노선의 일부로 활용될 18.4km의 야마나시 시험선 건설(1997년) 및 581km/h의 최고속도 달성(2003년)
  - · 1997년부터 2011년까지 총 874,000km의 시험 운행거리 달성
  - · 기존 MLX 시험선 연장 완료 (18.4km ⇒ 48km : 전체영업노선의 일부로 활용)
  - · 시제차량(5량1편성) 시운전 진행 중
  - · 603 km/h의 최고속도 달성 (2015년)





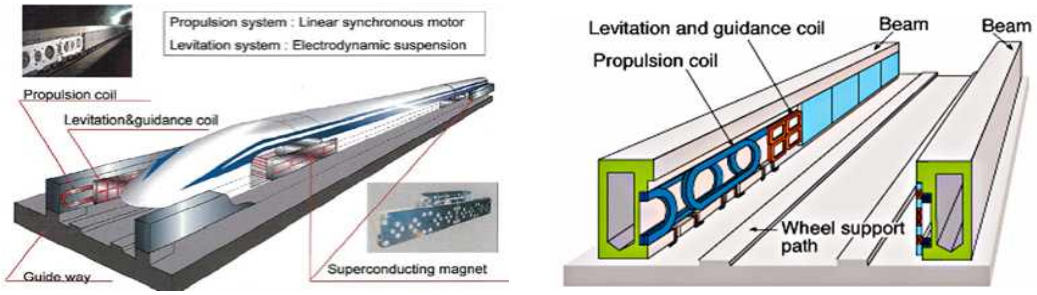
구분		거리[km]	소요시간[분]	공사비[억엔]
C노선	터널로 산맥 관통	438	67	84,400

그림 2-가-11 동경-오사카 MLX 실용화 노선

- 이미 개발 완료한 차량의 추진 및 부상 시스템 성능향상을 위한 연구를 진행하고 있음
  · 현재 실용화 노선에 투입될 차량은 NbTi 소재를 이용한 저온초전도 전자석이지만, 향후 고온초전도 전자석으로 대체하기 위한 연구를 진행하고 있음, 2005년 1세대 고온초전도 선재를 이용한 고온초전도 전자석을 개발하여 553km/h 주행시험에 성공
- 2세대 고온초전도 선재를 이용한 고온초전도 전자석 연구를 진행중에 있음
  · SuperPower 사의 SCS6050-AP 선재를 이용하여 실사이즈의 고온 초전도 코일 개발, 초전도 코일의 운전속도를 35K까지 높여 차상 전력을 줄이고, 전자석 냉각조 설계 단순화로 추진, 부상 성능의 향상 기대
- 차량의 추진, 부상, 안내를 하나의 지상코일계에서 가능한 추진-부상-안내 일체형 시스템 개발 및 차상 유도급전 시스템 개발을 진행하고 있다.

㉯ 기술 현황

- 추진시스템
  · 일본 초고속 자기부상열차 MLX는 야마나시에 시험선 및 전력시스템을 갖추고 있으며, MLX는 지상에 공심형 선형동기전동기가 설치되어 있으며 차상에 초전도 전자석이 탑재되어 이동자 역할을 수행하여 추진력을 생성함
- 초전도 자기부상시스템
  · Null-flux 코일을 사용한 EDS 자기부상
  · Null-flux 코일이 부상과 안내를 담당하는 부상/안내 일체형
  · 자기부상 및 선형동기전동기(LSM) 추진용 초전도 전자석은 액체 헬륨 냉각 방식의 저온 초전도 전자석 사용
  → 탑재된 초전도 전자석은 약 1000~1500회의 권선수를 가지는 4개의 Racetrack 형 코일을 N-S-N-S의 극배치가 되도록 교차직렬로 연결한 상태에서 500A의 전류를 통전하여 4.7T의 자장을 발생시킬 수 있는 구조로 제작
  → 1999년부터는 초전도전자석의 경량화 및 구조의 단순화를 목적으로 1세대 고온초전도 선재인 BSCCO를 사용한 고온초전도 전자석을 개발하였고, 2005년 주행시험에 성공함으로서 고온초전도 전자석에 의한 초고속 LSM의 실현 가능성을 확인한 바 있음
  → 최근 일본 RTRI에서 추진 성능 향상 및 건설비용 저감을 목적으로, 2세대 고온초전도체인 YBCO 선재를 이용한 고온 초전도 전자석을 개발 진행 중



(a) MLX 추진, 부상, 안내 (b) MLX 추진, 부상&안내 코일

그림 2-가-12 일본 MLX

④ 독일의 초고속 자기부상열차 Transrapid

㉮ Transrapid 개요

- 독일은 1970년대 바퀴식 열차의 속도한계 극복을 위한 대체 수단으로써 개발 시작
- 상전도 전자석을 이용한 흡인식 부상 방식(EMS)으로 인해 작은 부상공극(10mm)을 유지함
- 철심형 LSM 추진 방식으로 효율은 좋으나 550km/h 이상의 속도 구현 불가함
- 주요 개발 이력
  - 31.5km의 Emsland 시험선 건설(1987년) 및 450km/h의 최고속도 달성(1993년)
  - 세계최초 실용화 노선인 상하이~푸동공항(30km)노선 개통 및 운영(2002년~)
  - (하루 115회 운행, 누적운행 거리: 12.3백만km, 누적이용승객: 36.7백만명)
  - 영업철도로서 세계 최고운행속도(501km/h) 기록(2003년)
  - 2008년 Transrapid09 모델을 끝으로 더 이상의 연구개발은 없는 상태



(a) Transrapid 09 (b) 상하이 실용화 모델(TR08)

그림 2-가-13 독일의 Transrapid

㉯ 기술 현황

– 추진시스템

· 상전도 철심형 LSM 사용

· 이동자의 주자계와 지상 1차 LSM의 이동자계의 동기가 매우 중요

· 위치 검지용 상대위치 검출방식(Slot counter)과 절대위치 검지방식(INKREPA, Incremental Vehicle Location System) 채택

– 상전도 자기부상시스템

· 상전도 철심형 EMS 자기부상

· 상전도 계자코일이 추진과 부상을 담당하는 추진/부상 일체형

· 공극센서를 통해 약 10mm 부상 공극 유지

· 정차시 및 저속에서도 부상이 가능하나, 아음속에서의 부상제어 미지수

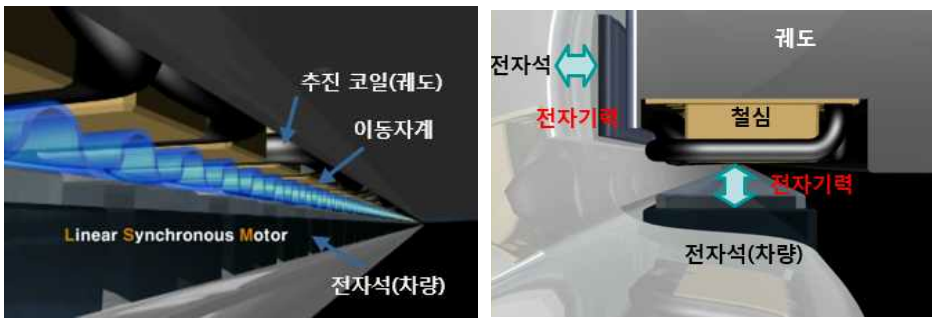


그림 2-가-14 Transrapid 추진&부상 및 안내

– 상기 내용에서 살펴본 바와 같이 전세계적으로 초고속 자기부상철도의 추진 및 부상, 안내에 대한 기술은 많은 연구가 수행되었으나, 독일 Transrapid는 추진/부상 일체와 안내 별도이며 일본의 MLX는 부상/안내 일체와 추진 별도로서, 하나의 시스템으로 추진, 부상, 안내를 구현한 사례는 없음

⑤ 중국 서남교통대학교 HTS Maglev Vehicle

㉮ ETT (Evacuated Tube Transport) 시스템



그림 2-가-15 중국 서남교통대학교(SWJTU)의 HTS - ETT 시험 플랫폼

– 2000년, 최초의 HTS 자기부상 시험 차량 "Century " 시험

– 2013년, 45m 길이의 링 구조의 궤도에서 시험주행

- 2014년, 첫 자기부상 진공튜브 시험 시스템 “Super Maglev” 제작 (50km/h, 1~0.1atm)
- 2019년 140m길이의 고속시험(430km/h, 0.05atm) 플랫폼 제작 완성 예정

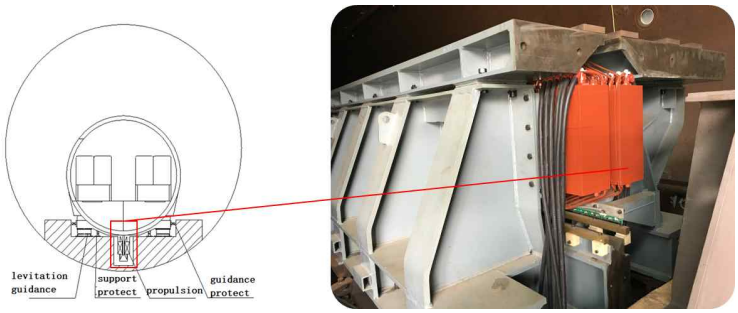


그림 2-가-16 HTS 140m 길이 고속시험 플랫폼의 리니어 모터 구조

㉯ HTS Maglev 시스템의 새로운 추진시스템, 리니어 DC모터

- 현재의 선형유도전동기를 이용한 HTS시스템에 비해 비용 절감이 가능하며, 고온초전도 자기부상 시스템에 더욱 적합
- 고온초전도체를 이용한 부상, 안내 및 리니어 DC모터를 이용한 추진
- 고온초전도체와 리니어 DC모터를 결합하여 추진, 부상, 안내력을 모두 만족

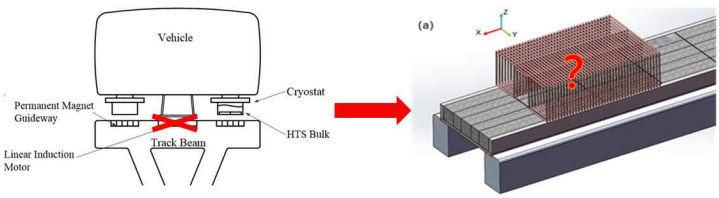


그림 2-가-17 HTS Maglev 시스템 추진용 리니어 DC모터 개념도

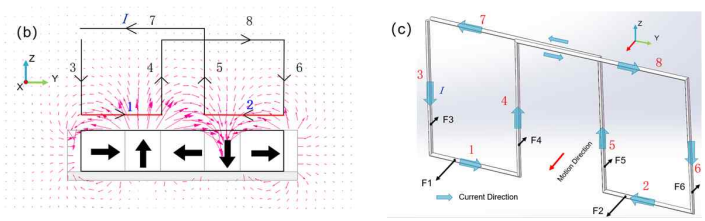


그림 2-가-18 HTS Maglev 시스템의 추진용 리니어 DC모터의 추진원리

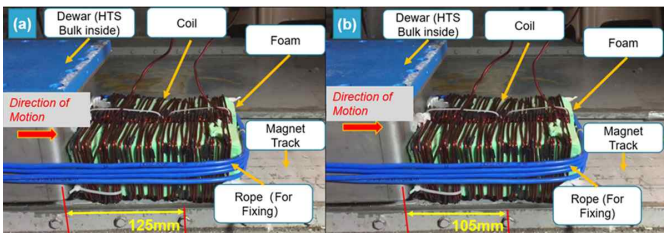


그림 2-가-19 리니어 DC모터 프로토타입

(2) 국내 · 외 시장 동향

(가) 국내외 시장 동향

① 국내외 철도시장 분석

㉮ 2010년 국내외 철도차량산업 매출액은 17,964억원으로 2009년 매출 14,499억원 대비 8%증가하는 추세이며, 세계 철도시장은 년간 약 4.5% 성장 중임

㉯ 철도 차량관련 전세계 신규/개량(New development and upgrade) 시장은 40억 유로(2011년 기준, 약 9.2조)로 Siemens, Balfour Beatty Rail 등이 시장을 주도하고 있음 (출처 : Worldwide Market for railway technology, 2012, 독일 SCI)

㉰ 철도산업 세계 시장 규모는 2014년 223조에서 2025년 610조원으로 성장이 예측됨

㉱ 아음속 캡슐 트레인이 상용화될 경우 세계시장의 약 30% 점유 시, 2025년 기준 183조원의 신산업 창출 효과 예상

② 자기부상기술 시장 분석

㉮ 자기부상 관련기술을 관할하는 글로벌 TOP20 특허사무소를 살펴보면 중국(1,859개), 미국(591개), 일본(505개), 한국(407개), 유럽연합(258개) 순위로 나타남

㉯ 자기부상 관련 특허 공개기술은 최근 3년간 미국, 중국, 일본을 중심으로 4,305건으로 세계 여러 국가에서 광범위하게 분포하고 있음

㉰ 자기부상 관련기술 경쟁기업들의 총수익, 특허소송 및 지역 수 등을 감안한 주요 요인들을 살펴보면, 버블크기가 큰 기업일수록 특허기술을 통한 기술사업화 능력이 크다는 것을 의미하고, 특허 포트폴리오의 크기와 그 특허에 의해 대표되는 다른 특허분류 수 및 특허인용 수 등에 의해 자기부상 경쟁기업의 전망(Landscape) 및 비전(Vision)을 알 수 있음

㉱ 특히, 오른쪽 상단에 위치한 Siemens AG 및 General Electric Company 가 주도적으로 자기부상 기술을 선도하고 있고 한국의 경우에는 좌측 하단에 위치한 한국기계연구원 및 삼성전기가 후발주자로 선진국의 기술을 따라가고 있은 실정임

㉲ 자기부상 기술은 초고속 교통 육성 혁신을 위한 가장 중요한 기술 중의 하나로서, 자기 부상 기술 중 일부는 서로 다른 산업 분야에서의 새로운 애플리케이션을 개발하기 위해 사용될 수 있고, 터빈과 같은 다른 산업 분야에 의한 환경오염을 줄이고, 도시화에 따른 초고속열차 개발에 도움을 줄 것임

㉳ 초고속 자기부상열차 기술의 도입은 항공, 교통, 전력 등 다른 산업에도 많은 영향을 미칠 것으로 예상되나, 높은 초기 비용으로 인하여 다른 산업 분야에서

다양한 응용 프로그램의 적용 및 실현하기까지는 많은 시간이 걸릴 것으로 예상됨

㈏ 글로벌 자기부상 기술시장은 2014년부터 2020년까지 49억7천만달러(약 5조8천억원)로 연평균복합성장률(CAGR)은 16.4% 성장할 것으로 전망됨. 이러한 성장은 다른 산업 분야에서 다양한 응용 프로그램을 통한 새로운 기술의 도입으로 향후 지속적으로 성장 될 것으로 예상됨

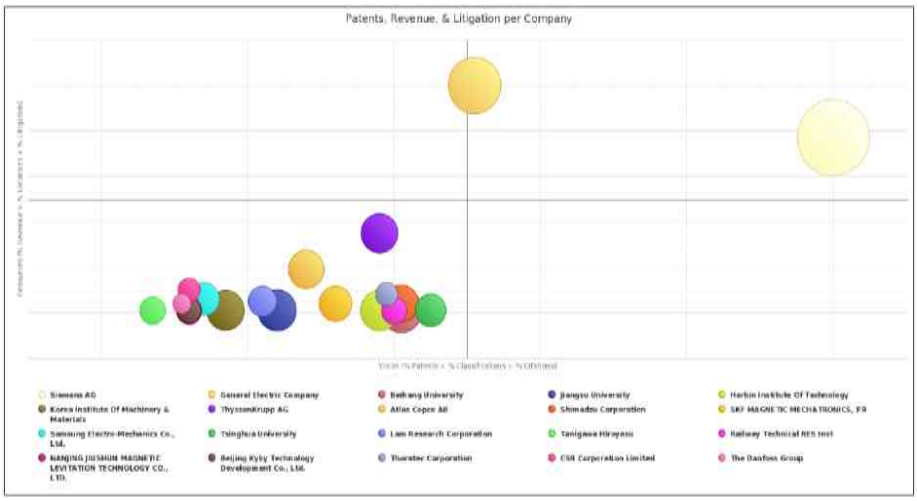


그림 2-가-20 자기부상 관련기술을 보유한 상위 경쟁기업들의 포트폴리오 현황

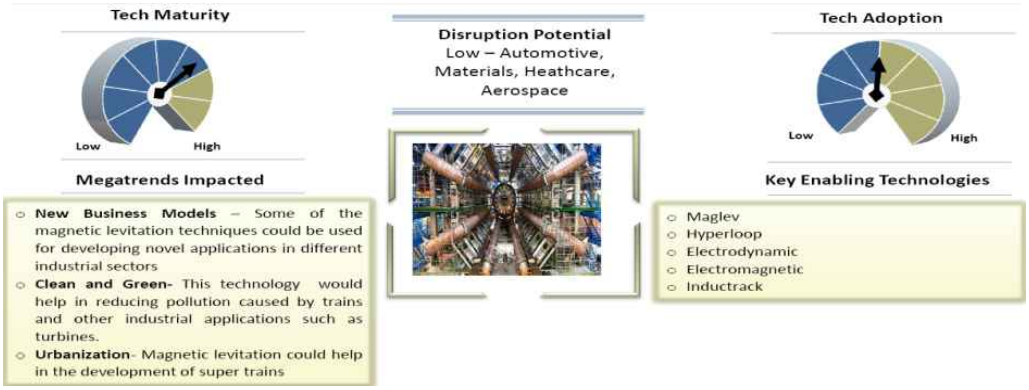


그림 2-가-21 초고속 교통 육성 혁신기술의 중요성

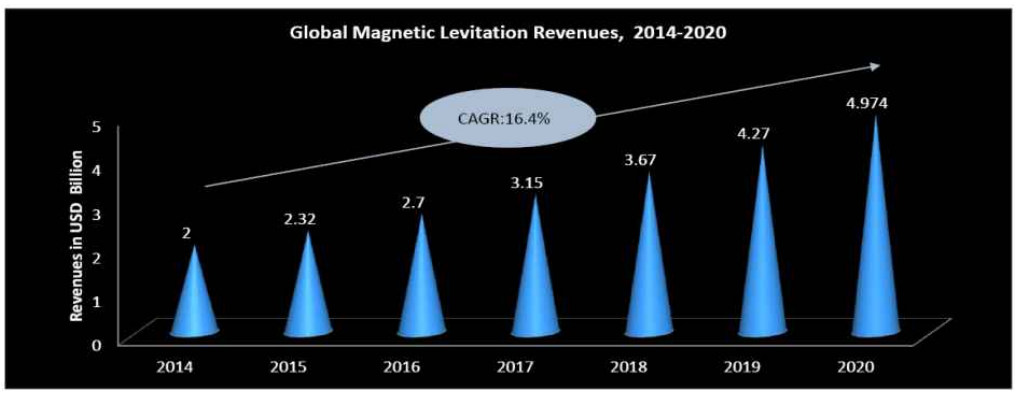


그림 2-가-22 글로벌 시장의 잠재-수익 예측

(3) 국내·외 논문 및 특허 현황

(가) 국내·외 특허 동향

㉮ 아음속 캡슐트레인 관련기술 분야의 특허동향을 살펴보면, 1990년부터 2015년도까지 총 314건의 관련 유효특허가 출원되었음. 1990년도 이후부터 최근에 이르기 까지 20건 내외의 특허가 매년 꾸준하게 출원되고 있음

㉯ 국가별 점유율 분포를 살펴보면, 과반수이상(51%)을 차지하고 있는 일본이 159건으로 최다이며, 미국(64건), 중국(56건), 한국(21건), 유럽(14건) 순으로 나타나며, 일본의 특허출원활동은 2000년대 중반 이전에 주로 나타난 반면, 우리나라와 중국은 주로 2000년대 중반 이후에 특허출원 활동이 나타나고 있어, 최근 관련 분야 관심이 증가하고 있다고 보여짐

㉰ 또한 일본의 특허출원활동이 2010년 이후에 주춤하고 있으나 1990년대 이후부터 2010년대에 이르기까지의 축적된 기술과 최근 간헐적으로 이루어지는 출원을 바탕으로 이 기술 분야를 선도하고 있는 것으로 나타남

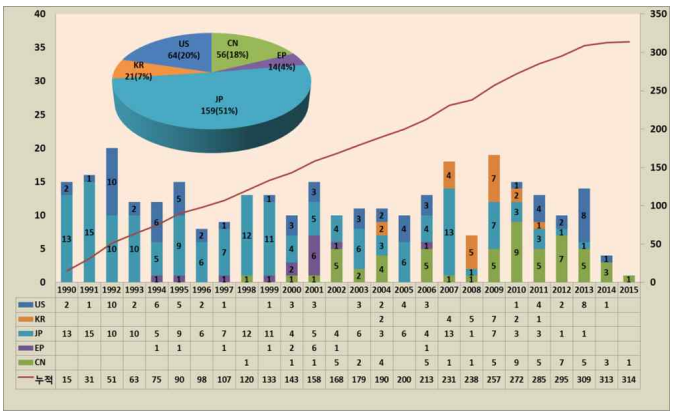


그림 2-가-23 출원년도 및 국가별 특허출원 동향

㉱ 주요 특허 현황을 보면 자기부상열차의 추진, 부상 기술이 대부분을 점유고 있으며 본 연구대상인 비대칭 양측식 선형유도전동기와 관련된 특허는 존재하지 않음

㉲ Hyperloop One 특허 동향

- 출원인명 : Hyperloop Technologies, INC. [한국특허청 출원인명 등록현황 : 하이퍼루프 테크놀로지스, 2015년 등록]
- 보유 미국 특허 22건, 본 기술 관련 유효 특허 22건
- 현재 공개된 특허 22건은 2015년 12월까지의 미국특허로서, 앞으로 공개 예정 구체적 구현기술 특허들에 대한 모니터링 필요
- 튜브 8건, 인프라 3건, 공력 1건, 부상 1건, 제동 2건, 시험장치 2건, 추진 5건에 대한 특허 공개

표 2-가-3 Hyperloop One 특허 목록

번호	구분	공개번호	발명의 내용
1	튜브	US9511959B	수중 튜브 (수중에 설치된 튜브와 물 밖의 구조체와 전기/기계적 연결)
2	튜브	US9517901B	튜브 구조 (3-Layers, Net-tension 내부벽, Compression 외부벽)
3	제동	US9533697B	공기주입 or 에어백 or 브레이크패드 등으로 감속기 구현, 중앙 제동 명령신호 전송시스템
4	튜브	US9566987B	텐트형 저압 환경 튜브 구조 (튜브 상부를 탄성재로 구성해 인장하중을 견디게 함)
5	인프라	US9599235B	튜브 유지보수 시 튜브 sealer의 airlock을 구동시켜 튜브 압력 상태 조정
6	부상	US9604798B	저압 환경 튜브 (저압 상태로 밀봉된 튜브, 부상 균형 잡기, 돌기에서 안정화, 분기의 회전문)
7	추진	US9641117B	튜브 내 POD측 및 선로측 로터와 스테이터를 구동 시 전력 공급 제어 장치
8	인프라	US9718630B	Switching station - 회전문으로 분기 경로를 연결시킴
9	추진	US2016-0229297A	전력 공급 시스템 (외부로부터 전력을 받아 추진력으로 사용)
10	튜브	US2016-0229646A	튜브 인프라 (항만/부두 화물을 POD를 이용해 적재해 승하역하는 튜브 운송 시스템)
11	튜브	US2016-0230350A	제조 장치 - 원통형으로 만든 튜브의 벽을 용접하는 기술
12	공력	US2016-0230768A	축류 압축기 (차량 전두부에 배치, 센서로 공기흐름 감지, 모터로 블레이드 작동)
13	튜브	US2016-0230915A	Expansion Joints와 Damper로 구현한 튜브 안정화 기술
14	추진	US2016-0233754A	LSM용 magnetically continuous winding 기술
15	제동	US2017-0066457A	중앙 제동 명령신호 전송 시스템에서 센서로 POD 및 튜브의 운행 변수를 수집해 모니터링 하는 장치
16	튜브	US2017-0106879A	텐트형 저압 환경 튜브 구조 (튜브 상부를 탄성재로 구성해 인장하중 견디게 함)
17	인프라	US2017-0146136A	튜브 유지보수 시 튜브 sealer의 airlock을 구동시켜 튜브 압력 상태 조정
18	추진	US2017-0207735A	스테이터에 전력 공급 시 진폭 및 주파수를 가변적으로 제어
19	시험장치	US2017-0102287A	가스 주입, 진공 흡배기 등으로 챔버의 압력을 테스트하는 기술
20	시험장치	US2017-0108405A	저압 챔버 내 설치된 로터에 상호 동작하는 베어링의 특성을 테스트하는 기술
21	추진	US2017-0126163A	선형모터에 전력 공급하는 모터 구동 시스템과 Line commutated Inverter제어 기술
22	튜브	US2017-0165786A	3 Layers 구조의 튜브 접합을 위한 레이저 빔 용접 방법

표 2-가-4 자기부상열차의 주요 특허 현황

공개번호	발명의 명칭	출원인	피인용수 (Forward)
US6758593B1	Pumping or mixing system using a levitating magnetic element, related system components, and related methods	LEVTECH INC	60
US5628252A	Method and apparatus for combined levitation and guidance along guideway curvature in electrodynamic magnetically levitated high speed vehicle	Power Superconductor Applications Corp	42
US5517924A	Double row loop-coil configuration for high-speed electrodynamic maglev suspension, guidance, propulsion and guideway directional switching	US ARMY	41
US6025769A	Strong high-temperature superconductor trapped field magnets	UNIV HOUSTON	38
US5628252A	Method and apparatus for combined levitation and guidance along guideway curvature in electrodynamic magnetically levitated high speed vehicle	Power Superconductor Applications Corp	37
US6415613B1	Cryogenic cooling system with cooldown and normal modes of operation	General Electric Company	36
US5641054A	Magnetic levitation conveyor apparatus	EBARA CORP	35
US7086778B2	System using a levitating, rotating pumping or mixing element and related methods	LEVTECH INC	29
US5809897A	Electromagnetic induction ground vehicle levitation guideway	Powell James	28
US5483111A	Method and apparatus for elimination of the exit-edge effect in high speed linear induction machines for maglev propulsion systems	Power Superconductor Applications Corp	28

(나) 국내·외 논문 동향

㉮ 1990년도부터 2015년도까지 총 175건의 관련 논문이 발표되었으며 일본, 중국, 미국, 한국을 포함한 주요 국가에서 아음속 추진/부상 및 열차제어(A기술) 분야에 집중된 것으로 나타났고, 캡슐트레인 주행용 아진공(B기술) 및 캡슐 차량(C기술) 분야의 연구는 많지 않음

㉯ A기술분야의 세부기술(소분류)별 논문 현황은 초전도 EDS 자기부상 기술(AB기술)에 대한 논문 발표 건수가 82%로 나타나 최다이고, 아음속 열차제어 및 고장진단 기술(AC기술) 10%, 고효율/소형 LSM 설계 및 추진 제어(AA기술) 7%, 주행 안정성 확보 기술(CC기술) 4% 순으로 부상기술에 관한 논문이 가장 많았으며, 추진/부상/안내 일체형 시스템에 관한 논문은 존재하지 않았음

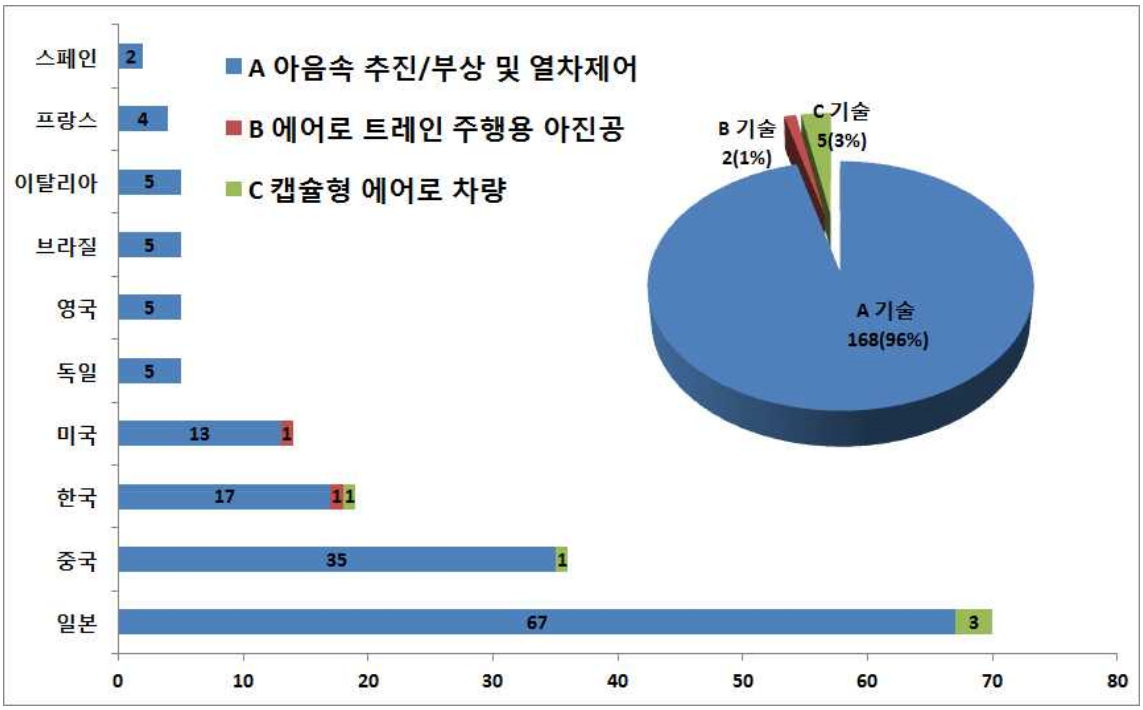


그림 2-가-24 국가별/기술분류별 논문 발표 현황

㉰ 주요 논문 현황은 아래와 같이 초전도 자기부상에 관한 논문이 대부분을 차지하고 있음

표 2-가-5 자기부상열차의 주요 논문현황

번호	논문제목	발표기관	저 널 명
1	Applications of bulk high-temperature superconductors	Argonne Natl. Lab.	Proceedings of the IEEE
2	Superconductor and magnet levitation devices	Univ. Houston	Review of Scientific Instruments
3	Development of magnesium diboride (MgB2) wires and magnets using in situ strand fabrication method	Hyper Tech Res. Inc	Physica C: Superconductivity and its Applications
4	The reactive liquid Mg infiltration process to produce large supercon ducting bulk MgB2 manufacts	Edison S.p.A	Cryogenics
5	Overview of MgB2 superconductor applications	Hyper Tech Res. Inc	International Journal of Applied Ceramic Technology
6	A levitation force and magnetic field distribution measurement system in three dimensions	Shaanxi Normal Univ.	Physica C: Superconductivity and its Applications
7	Preliminary study of a superconducting bulk magnet for the Maglev train	RTRI	IEEE Transactions on Applied Superconductivity
8	Characteristics of lift and restoring force in HTS bulk - Application to two-dimensional Maglev transporter	Waseda Univ.	IEEE Transactions on Applied Superconductivity
9	Free vibration of the high temperature superconducting maglev vehicle model	SW Jiaotong Univ.	IEEE Transactions on Applied Superconductivity
10	Cryogen-free hybrid magnet for magnetic levitation	Tohoku Univ.	Physica C: Superconductivity and its Applications
11	Mechanical resonance characteristics of a high-Tc superconducting levitation system	Keio Univ.	IEEE Transactions on Magnetics
12	Performance Advances of HTS Maglev Vehicle System in Three Essential As pects	SW Jiaotong Univ.	IEEE Transactions on Applied Superconductivity
13	Simulations and Tests of Super conducting Linear Bearings for a MAG LEV Prototype	Univ. Fed Riode Janeiro	IEEE Transactions on Applied Superconductivity
14	Performance of a cryogen-free 30 T- Class hybrid magnet	Tohoku Univ.	IEEE Transactions on Applied Superconductivity
15	High-Temperature Superconducting Linear Synchronous Motors Integrated With HTS Magnetic Levitation Components	Univ. Elect Sci & Technol China	IEEE Transactions on Applied Superconductivity

나. NSDLIM 개념 및 구동 메커니즘

(1) NSDLIM 개념

(가) NSDLIM 개념

초고속 자기부상 열차의 운행을 위해서는 추진, 부상, 안내를 위한 각각의 장치가 필요하며, 현재까지 개발된 초고속 자기부상 열차의 경우 부상/추진 일체형 또는 부상/안내 일체형 시스템이 사용되고 있다. 그림 2-나-1은 독일의 초고속 자기부상열차인 Transrapid로, 편측식 LSM을 이용하여 추진/부상을 하며 안내를 위한 별도의 전자석이 LSM 측면에 설치된다. 그림 2-나-2는 일본의 초고속 자기부상열차 MLX로, 편측식 LSM을 이용하여 추진하며, 계자 전자석으로는 초전도 전자석을 사용한다. 부상/ 안내를 위해 차상에 초전도 전자석과 궤도에 8자 모양의 Null Flux coil을 이용한다. 본 연구 개발에서 제안하는 NSDLIM(Non-Symmetric Double-sided Linear Induction Motor)은 그림 2-나-3과 같으며, 양 측면에 3상 권선이 감긴 1차측 1쌍이 궤도를 따라 양측면에 대칭으로 설치되어 있고, 그 사이에 얇은 2차측 도체판이 이동하는 간단한 형태이다. NSDLIM은 편측식 LIM의 추진원리, 횡방향효과, 수직력 특성을 이용하여 추진력, 부상력, 안내력이 모두 발생한다. 그림 2-나-4는 초고속 자기부상열차에 NSDLIM을 적용 시의 구조도를 보여주며, 그림에서 보는 바와 같이, NSDLIM 1쌍을 대칭으로 차량의 하부에 배치한다.

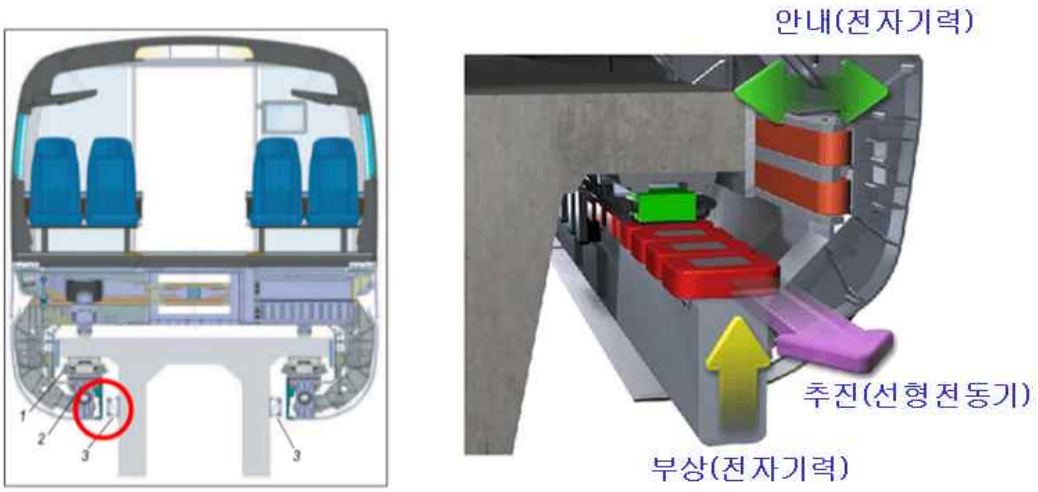
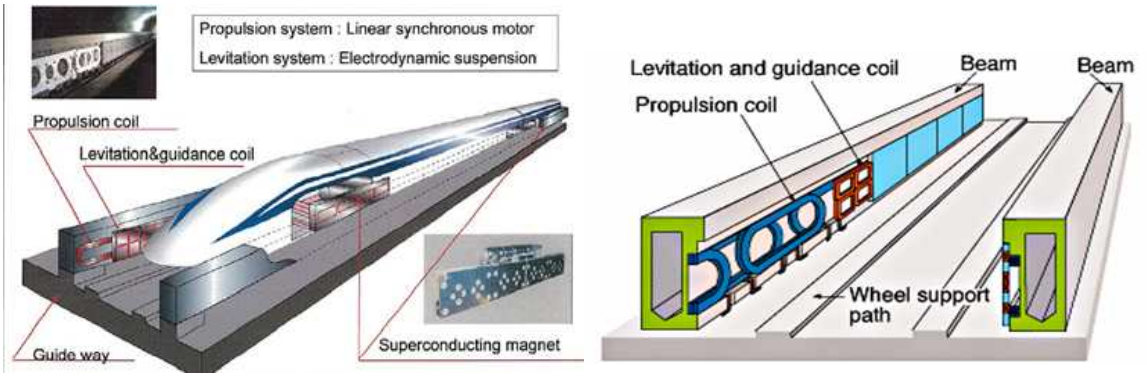


그림 2-나-1 독일 초고속 자기부상열차 Transrapid의 추진, 부상, 안내 시스템 구조



(a) MLX 추진, 부상, 안내 (b) MLX 추진, 부상&안내 코일

그림 2-나-2 일본 MLX의 추진 부상 안내

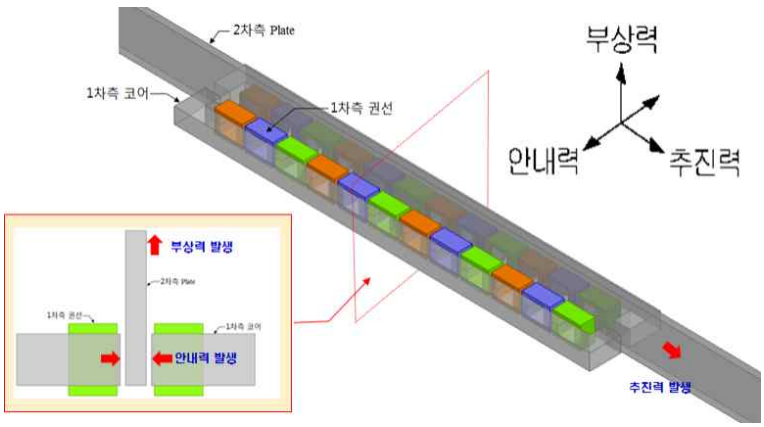


그림 2-나-3 NSDLIM의 구조도

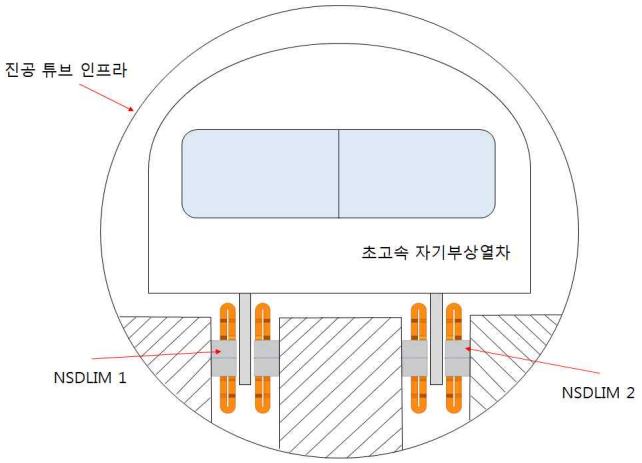


그림 2-나-4 초고속 자기부상열차용 NSDLIM의 적용도

(2) NSDLIM 구동 메커니즘

(가) NSDLIM의 추진/부상/안내

① 추진력 발생 원리

NSDLIM은 편측식 LIM과 같은 원리로 추진한다. 그림 2-나-5는 2차측 도체판과 그 위에 N극과 S극이 나열된 4극 형태의 자석을 나타내고 있다. 1차측 전기자 권선에 3상 전류를 흘려주면 그림과 같이 등가적으로 자석 배열이 형성되고, 형성된 자석이 이동하는 것과 같은 이동자계가 생성된다. 이때, 이동 자계에 의해 자석 배열이 왼쪽으로 이동할 경우, 식 (2.1)과 같이 페러데이 법칙에 의해 N극의 이동방향 앞에서는 N극을 상쇄하기 위해 S극을 만드는 와전류가 유도되고, N극의 뒤에서는 N극을 유지시키려는 N극을 만드는 와전류가 유도된다. S극의 경우에도 앞에서는 N극을 만드는 와전류가 생성되고 뒤에서는 S극을 만들려는 와전류가 생성되어 N극과 S극 사이에는 같은 방향의 와전류가 생성된다. 이동자계에 의한 자속이 도체판에 작용하고, 도체판에 유도된 와전류가 흐르므로 식 (2.2)와 같이 로렌츠 법칙에 의해 도체판이 힘을 받게 된다. 로렌츠 힘은 진행방향으로의 추진력과, 횡방향으로의 힘이 존재한다. 1차측과 2차측이 중앙에 정렬되어 있을 경우, 횡방향 힘은 서로 상쇄되어 추진력만 발생하게 된다.

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{d\lambda}{dt}\,[V] \tag{2.1}$$

($\boldsymbol{E}$ = 유도기전력, λ = 쇄교자속)

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{li} \times \boldsymbol{B}[N] \tag{2.2}$$

($\boldsymbol{F}$ = 로렌츠힘, $\boldsymbol{i}$ = 전류, $\boldsymbol{B}$ = 자속)

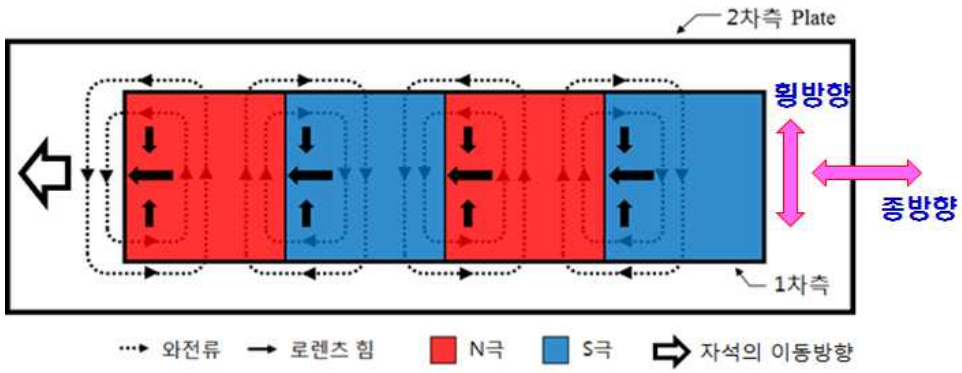


그림 2-나-5 NSDLIM의 추진 원리

② 부상력 발생 원리

NSDLIM의 부상력은 LIM의 횡방향 효과로 인해 발생한다. 횡방향 효과란 그림 2-나-6과 같이 1차측과 2차측이 서로 중앙 정렬되어 있지 않고 횡방향으로 틀어졌을 경우 횡방향으로 힘이 발생하는 효과이다. 1차측이 2차측과 횡방향으로 틀어진 상태에서 이동자계가 발생하면, 그로 인한 와전류는 온전히 흐르지 못하고 도체판 끝부분에서 왜곡되어 일그러지게 된다. 이때 이동자계가 하단부에 흐르는 전류와만 쇄교하므로 횡방향 힘이 발생한다. 횡방향 힘이 서로 상쇄되었던 중앙 정렬 상태와 달리 횡방향으로 틀어진 상태에서 더욱 틀어지려는 힘이 발생하게 된다. NSDLIM의 경우 그림 2-나-7의 NSDLIM의 단면도에서 보이듯 편측식 LIM과 달리 도체판이 세워진 상태로 이동하기 때문에 편측식 LIM에서의 횡방향 힘은 NSDLIM에서 부상력으로 작용하게 된다.

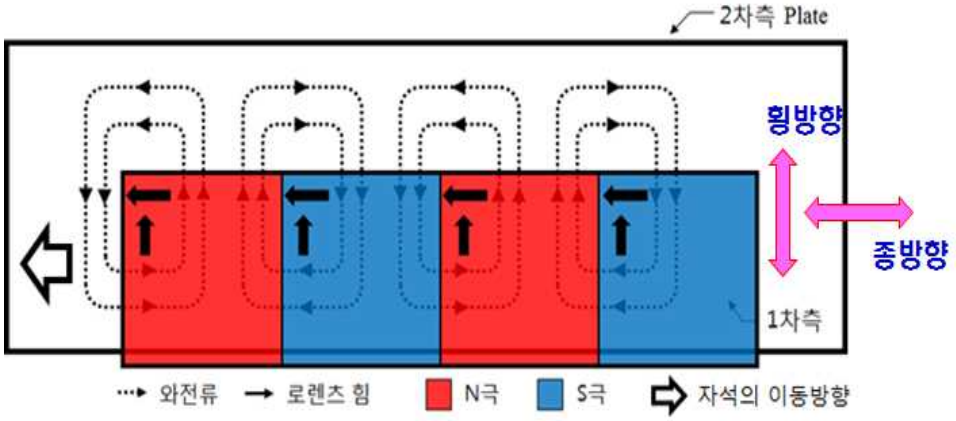


그림 2-나-6 NSDLIM의 부상 원리

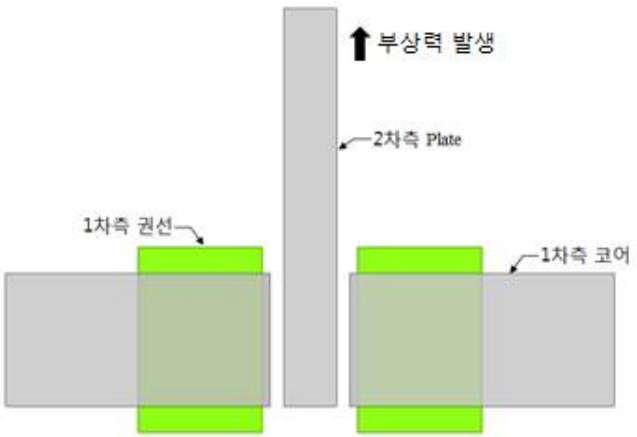


그림 2-나-7 NSDLIM의 단면도(부상력)

③ 안내력 발생 원리

NSDLIM의 안내력은 편측식 LIM의 수직력 특성으로 인해 발생한다. LIM의 2차측은 도체판과 자성체 판(back iron)으로 구성되어 있으므로, 자속에 의해 자성체와 붙으려는 흡인력과, 유도 와전류로 발생되는 반발자계에 의한 반발력이 함께 존재한다. 초고속 주행의 경우, 반발자계에 의한 반발력이 흡인력보다 크므로, 이를 이용하여 안내(중앙정렬)한다. 그림 2-나-8과 같이 이동자계에 의해 와전류가 유도되면, 와전류로 인한 반발자계가 생성되는데, 이 반발자계는 이동자계와 서로 반대되므로 서로 밀어내는 반발력이 발생하게 된다. NSDLIM의 경우 그림 2-나-9와 같이 1차측과 2차측이 서로 밀어내기 때문에 2차측 이동자가 결국 중앙으로 정렬하려는 안내력이 발생하게 된다.

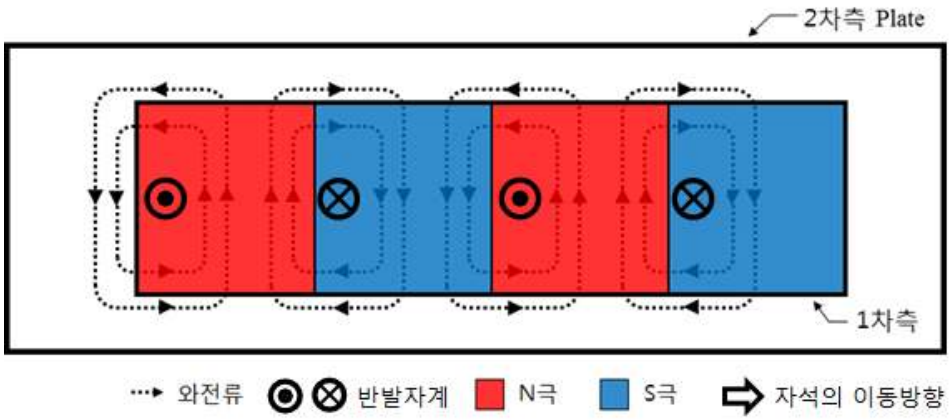


그림 2-나-8 NSDLIM의 안내 원리

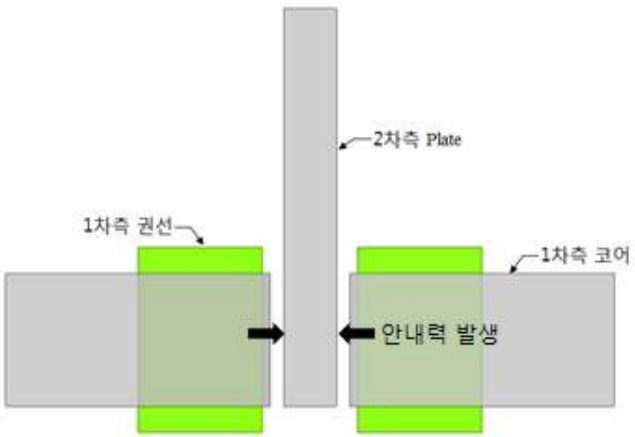


그림 2-나-9 NSDLIM의 단면도(안내력)

다. NSDLIM 설계

(1) 초고속 자기부상열차 요구사양 분석

(가) NSDLIM의 요구사양

NSDLIM의 기본 설계를 위해서 먼저 초고속 자기부상열차의 운행 요구사양을 분석하였다. 열차의 속도 구간별 가속도 요구사항은 다음과 같다.

㉮ 0 ~ 480km/h 구간

: 480km/h 도달까지 초기 가속도 1.1m/s2 에서 4.9m/s2까지 일정하게 증가

㉯ 480 ~ 1000km/h 구간

: 가속도 4.9m/s2를 유지하면서 1000km/h 까지 가속

위 요구사항 분석을 통한 속도 구간별 가속도, 속도, 거리를 시간에 대한 함수로 표현하여 표 2-다-1에 나타내었다.

표 2-다-1 속도 구간별 요구사양 분석

$0\,[km/h]$	⟹	$480\,[km/h]$	⟹	$1000\,[km/h]$
$a=1.1\,[m/s^2]$	$a=1.1+0.0855t\,[m/s^2]$	$a=4.9\,[m/s^2]$	$a=4.9\,[m/s^2]$	$a=4.9\,[m/s^2]$
$v=0\,[km/h]$	$v=1.1t+\frac{1}{2}0.08\,[km/h]$	$v=480\,[km/h]$	$v=\frac{480}{3.6}+4.9t\,[km/h]$	$v=1000\,[km/h]$
$s=0\,[m]$	$s=\frac{1}{2}\times 1.1t^2+\frac{1}{6}0.0855t^3\,[m]$	$s=2337.45\,[m]$	$s=\frac{480}{3.6}t+\frac{4.9}{2}t^2\,[m]$	$s=8396.9\,[m]$
$t=0\,[s]$		$t=4.44\dot{}\,[s]$		$t=73.92\,[s]$

표 2-다-1을 통하여 요구 가속도, 가속구간의 길이, 가속 시간 등의 요구사항을 알 수 있다. 시간별 거리, 속도, 가속도 그래프는 다음 그림 2-다-1, 2-다-2, 2-다-3과 같다.

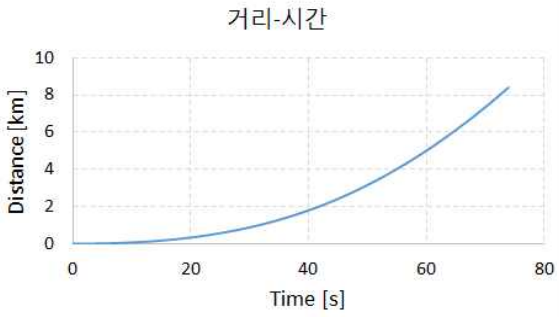


그림 2-다-1 시간별 거리 그래프

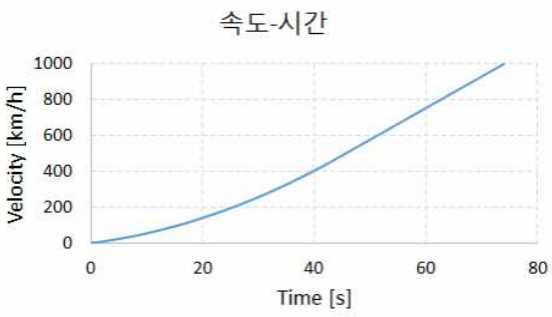


그림 2-다-2 시간별 속도 그래프

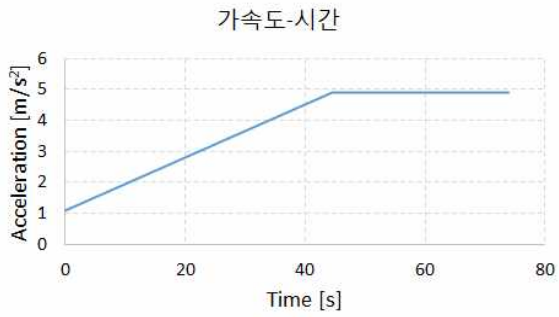


그림 2-다-3 시간별 가속도 그래프

앞선 내용을 바탕으로 1000km/h급 초고속 자기부상열차용 NSDLIM의 설계를 위한 차량의 요구사양을 표 2-다-2에 정리하였다. NSDLIM을 포함한 열차의 전체 중량은 20ton이고, 이를 4.9m/s2로 가속하기 위해 요구되는 추력은 마진을 고려하여 110kN이다. 열차는 출발부터 최고속도까지 가속하여 1000km/h의 최고속도로 주행하기 때문에 정격속도를 1000km/h로 설정하였다. 출력은 요구 추력과 정격속도의 곱으로 총 30.6MW이며, 열차 크기를 고려하여 제한 길이는 26m로 설정하였다.

표 2-다-2 1000km/h급 초고속 자기부상열차용 NSDLIM의 설계를 위한 차량 요구사양

Content	Specification	Unit
차량 총 중량	20	ton
정격속도(최고속도)	1000	km/h
요구 가속도	4.9	m/s2
요구 추력	110	kN
출력	30.6	MW
NSDLIM 제한 길이	26	m

(2) NSDLIM 기본 설계

NSDLIM은 초고속 자기부상열차 차량 하부 양측에 2 module이 적용된다. 2장 2절의 요구사항을 바탕으로 장하분배 및 자기등가회로법을 이용한 LIM 설계 기법을 적용하여 기본 모델을 설계하였다. 그림 2-다-4는 본 연구에서 적용한 NSDLIM 설계 프로세스를 보여준다. 초고속 자기부상열차용 NSDLIM의 경우, 초고속으로 운영되는 시스템이므로 구조적 특성상 공극이 매우 큰 시스템이기 때문에 목표 역률과 효율은 각각 30%와 70%로 낮게 선정하였고 대용량 시스템임을 감안하여 상전압과 상전류 값을 크게 선정하였다. NSDLIM은 근본적으로 유도전동기이므로 고조파를 줄이기 위해 분포단절 2층권으로 권선을 배치하였으며, 정격슬립은 0.2로 가정하였다. 표 2-다-3에 NSDLIM 기본 설계 모델의 주요 사양을 정리하였으며, 기본 설계 모델의 주요 치수도 및 설계 결과를 각각 그림 2-다-5와 표 2-다-4에 나타내었다.

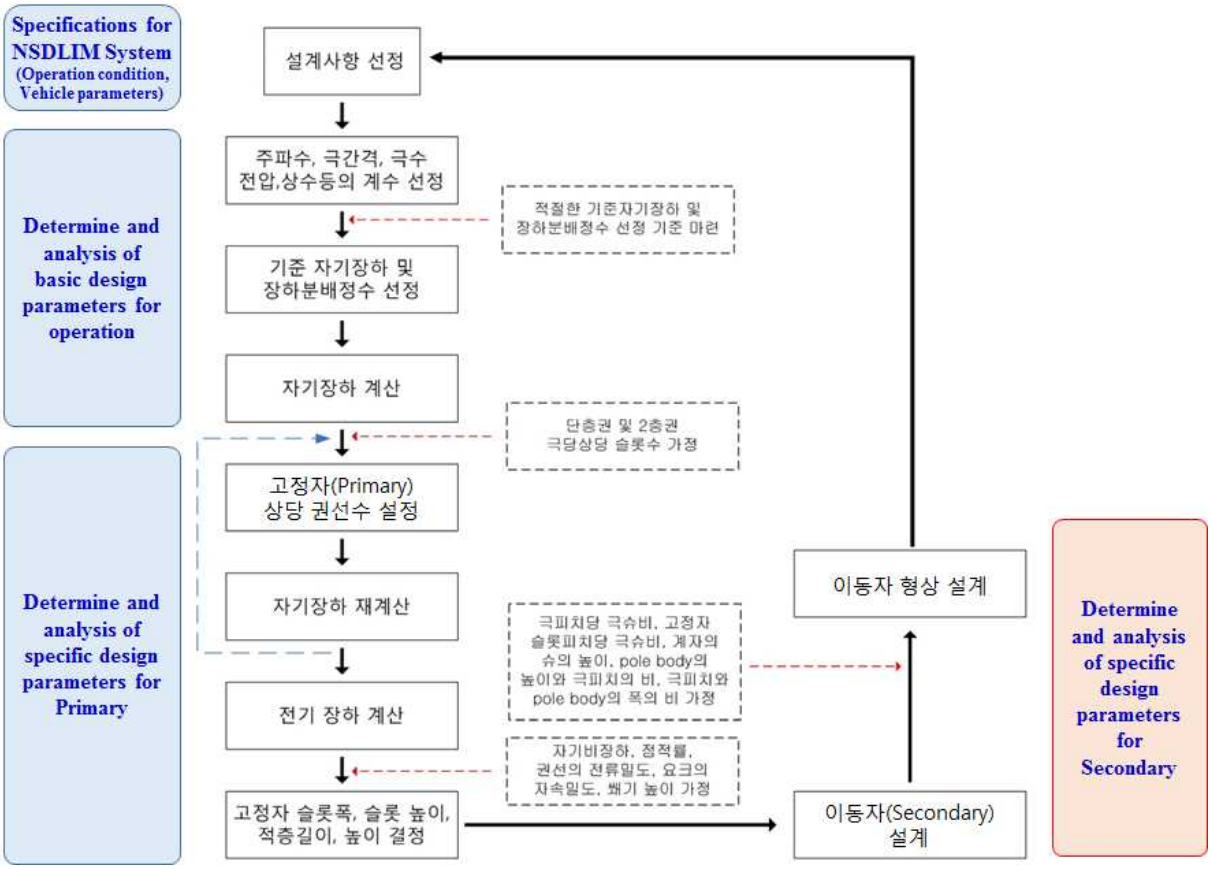
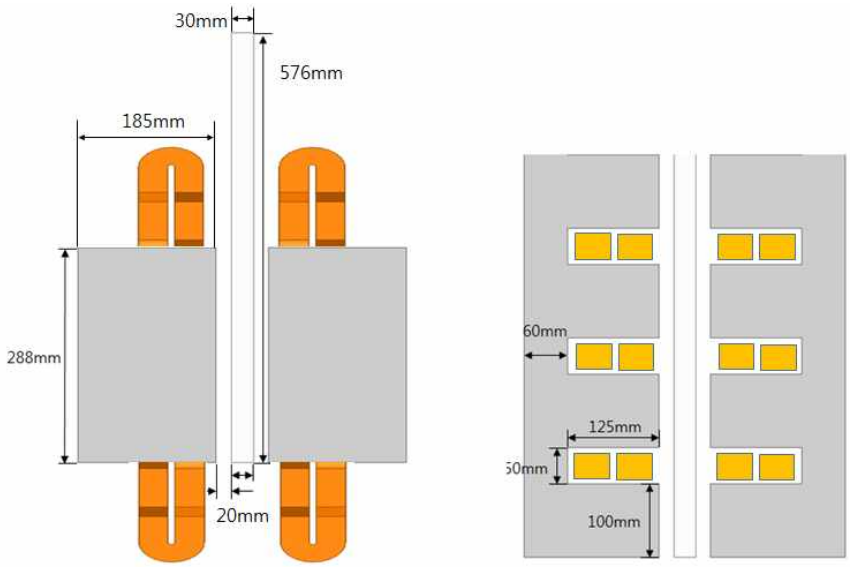


그림 2-다-4 NSDLIM 설계 프로세스

표 2-다-3 NSDLIM 기본 설계 모델의 주요 사양

Content	Specification	Unit
출력	15.3	MW
정격속도(최고속도)	1000	km/h
권선법	분포단절 2층권	-
목표 효율	70	%
목표 역률	30	%
상전압	6930	Vph,peak
상전류	7000	Iph,peak
정격 슬립	0.2	-
동기주파수	386	Hz
동기속도	1250	km/h
극간격	450	mm
기계적 공극	20	mm
극 수	56	-
상당직렬턴수	56	-
1코일당 턴 수	1	-
전류밀도	4	Arms/mm2
점적률	40	%
1차측 재질	35PN230 (S08)	-
2차측 재질	Al	-



(a) NSDLIM의 단면도 (b) NSDLIM의 측면도

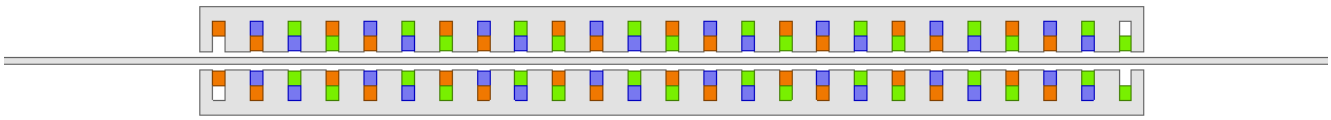
그림 2-다-5 NSDLIM 기본 설계 모델의 주요 치수도

표 2-다-4 NSDLIM 설계에 의해 도출된 기본 모델의 설계 결과

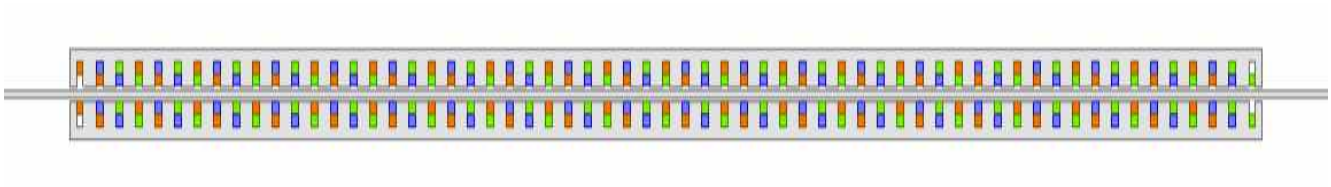
Content	Specification	Unit
전체 길이	26.2	m
공극	20	mm
2차측 두께	30	mm
2차측 높이	576	mm
슬롯 너비	50	mm
슬롯 깊이	125	mm
쐐기 깊이	5	mm
치 너비	100	mm
적층 길이	288	mm
요크 너비	60	mm

(3) NSDLIM 기본 설계 모델 해석

일반적으로 초고속 자기부상열차에 적용되는 선형전동기의 경우, 3상 고정자가 지상궤도 전체에 설치되며, 이동자가 차량에 설치되는 구조를 갖기 때문에 전자기적 특성 분석을 위한 해석 시 선형전동기의 전체 모델을 가지고 유한요소법을 이용한 해석을 수행하는 것은 물리적으로 불가능하다. 따라서 전체 모델의 주기성을 고려하여 부분 모델로 해석을 수행하고 해석 결과에 주기적 배수를 곱하는 방법이 일반적이다. 본 연구에서도 초고속 자기부상열차용 차량에 맞추어 기본 설계된 NSDLIM은 길이가 26m로 전체 모델을 모델링하여 해석하는 것은 요소수가 많아 시간이 오래 걸리고, 해석 프로그램의 허용 크기를 초과하여 해석이 불가능하다. 또한 NSDLIM은 튜브에 1차측이 길게 설치되어있고 차상에 부착된 2차측 도체판이 1차측 사이를 이동하는 시스템으로, 이동조건을 주어야 하는 해석 특성 상 1차측을 2차측보다 길게 설계해야 하므로 유한요소의 개수가 크게 늘어나고 해석시간이 증가하게 된다. 따라서 요소의 수를 줄여 해석 시간을 단축하기 위해 2차측 도체판을 길게 하고 1차측을 짧게 모델링하였으며 실제와는 달리 1차측에 이동조건을 주었다. 극수별 추진력을 분석하여 전체모델의 추진력을 추정할 수 있도록 8극부터 20극 까지 4극 단위로 극수별 축소 모델을 모델링하였다. 그림 2-다-6은 NSDLIM 8극과 20극 축소 모델이다.



(a) 8극



(b) 20극

그림 2-다-6 NSDLIM 축소 모델

LIM 해석을 위해서는 1차측의 3상 권선에 식 (2.3)과 같이 3상 평형의 전압을 인가하여 이동자계를 생성해야 한다. 극수별 모델의 전압 크기는 식 (2.4)와 같이 56극 전체 모델을 기준으로 12,000V를 극수비에 맞게 나누어 입력하였다.

$$V_a = Vsin(2\pi f_s t)\,[V] \quad (2.3)$$
$$V_b = Vsin(2\pi f_s t - 120^\circ)\,[V]$$
$$V_c = Vsin(2\pi f_s t - 240\circ)\,[V]$$

$$V = 12000/56 \times P\,[V] \quad (2.4)$$

유도전동기는 슬립에 따라 토크가 변동된다. 슬립은 이동자계 주파수와 이동자 주파수의 단위화된 상대속도이며 식 (2.5)과 같다.

$$s = \frac{f_s - f}{f_s} \quad (2.5)$$

이에 대해 이동자의 속도를 표현하면 다음 식 (2.6)과 같다.

$$V = 2\tau f_s(1-s)\,[m/s] \quad (2.6)$$

여기서, P는 극수, f_s는 동기주파수 f는 이동자 주파수, τ는 극 간격을 의미한다.

따라서 동기주파수는 386Hz, 전압은 극수비에 맞게 변수로 가변하여 인가하는 방법으로 유한요소 해석을 진행하였다. 정격속도 1000km/h에서의 추진력 검증을 위하여 동기속도 1250km/h부터 800km/h 까지 속도별 추진력과 전류를 해석하였다. 극수에 따른 속도별 추력과 상전류 값을 그림 2-다-7과 2-다-8에 나타내었다.

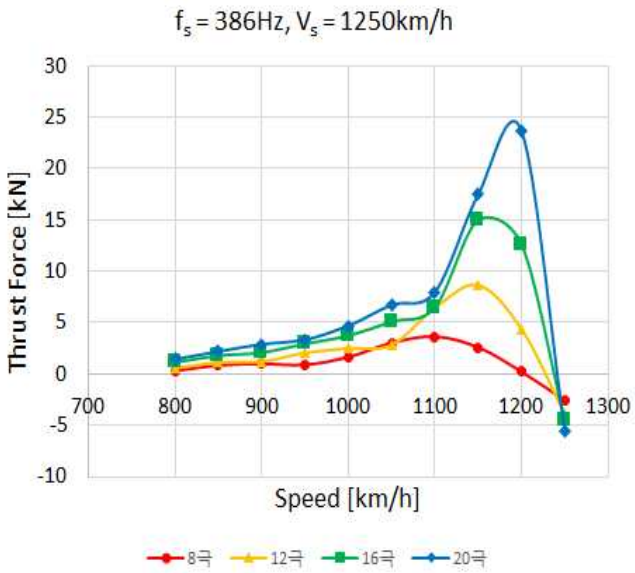


그림 2-다-7 극수에 따른 슬립별 추력

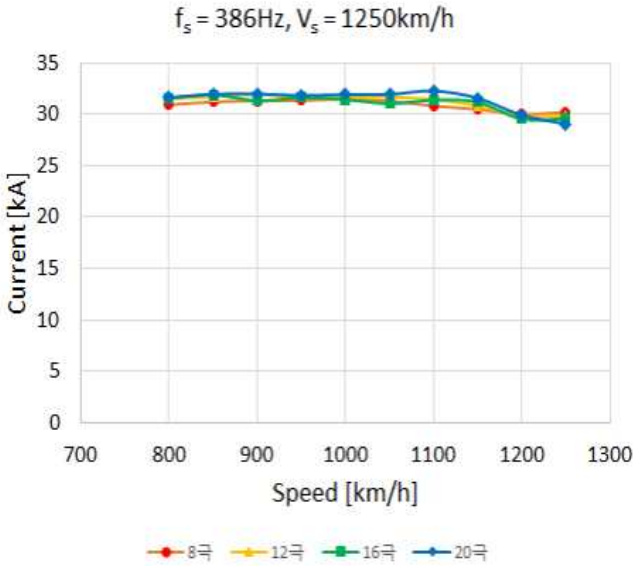


그림 2-다-8 극수에 따른 슬립별 상전류peak 값

해석 결과를 보면 NSDLIM의 상전류 peak 값은 7kA인데 비해 너무 많은 전류가 입력되는 것을 볼 수 있다. LIM의 등가회로 분석을 통해 얻은 추진력 식은 (2.6)과 같이 전류의 제곱에 비례하므로, 전류를 7kA 값으로 환산하고, 이의 제곱에 비례하여 추력 값도 환산하면 7kA 인가시의 추력 값을 계산할 수 있다. 아래의 계산식 (2.7)과 (2.8)을 통해 슬립별 전류를 7kA로 환산했을 경우의 슬립별 추력을 구하면 그림 2-다-9와 같다. 이때 최대 추력, 최대 추력이 발생하는 속도, 정격속도에서의 추력을 표 2-다-5에 정리하였다.

$$F = \frac{3I_1^2 R_2}{2\tau f s\left\{\left(\frac{1}{sG}\right)^2 + 1\right\}}\,[V] \tag{2.6}$$

$$I_{7kA} = I_1 \times \left(\frac{7}{I_1}\right)[kA] \tag{2.7}$$

$$F_{7kA} = F \times \left(\frac{7}{I_1}\right)^2 [kN] \tag{2.8}$$

여기서 추력 식의 다른 항은 변화가 없으므로 무시하고, 인가 전류 I_1만을 고려하여 계산하였다. 그림 2-다-9를 보면 슬립이 0인 동기 속도에서의 추력이 음의 값을 가진다. 이는 동기속도에서의 추력이 0인 회전형 유도전동기와 달리 LIM의 동적 단부효과로 인해 제동력이 발생하기 때문이다. 결과적으로 표 2-다-5의 7kA 인가 시 추력을 보면, 극수에 따라 최대 추력이 발생하는 슬립이 각각 다르고, 최대 추력의 크기 또한 비선형적으로 변하여 규칙을 찾아보기 힘들다. 또한 추력의 크기가 매우 작아 요구추력을 만족하지 못한다. 그림 2-다-10과 2-다-11은 정격 속도에서 20극 모델의 자속선 분포와 자속밀도 분포를 보여준다.

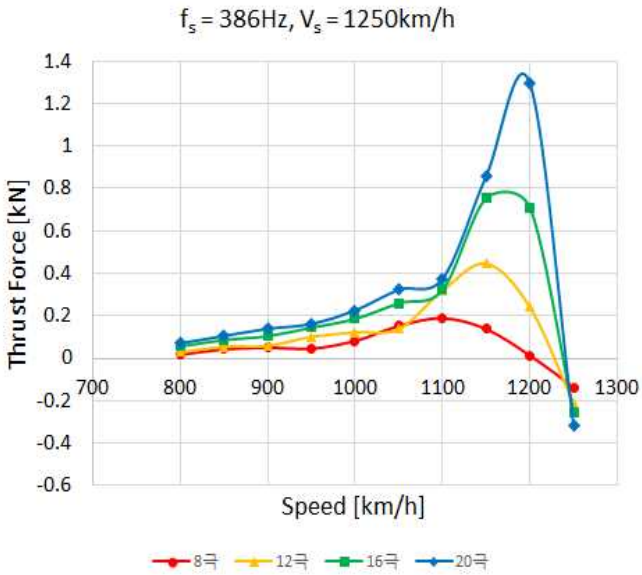


그림 2-다-9 극수에 따른 슬립별 추력 (환산값)

표 2-다-5 극수에 따른 슬립별 추력 정리(7kA 환산)

	8극	12극	16극	20극
추력 (1000 km/h)	80.8 [N]	121.6 [N]	185.3 [N]	224.9 [N]
최대 추력	188.1 [N]	446.1 [N]	754.5 [N]	1294.6 [N]
최대추력 속도	1100 [km/h]	1150 [km/h]	1150 [km/h]	1200 [km/h]

그림 2-다-10과 2-다-11의 자속선과 자속밀도 분포를 보면, 자속이 2차측을 넘어 쇄교하지 못하고, 누설이 많은 것을 볼 수 있으며, 백요크 부분에서 자속밀도의 포화현상이 일어나는 것을 볼 수 있다. 따라서 극수별 축소 모델 해석의 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

㉮ 극수에 따른 추력과 최대추력슬립의 변화가 규칙적이지 않아 56극 전체 모델의 추진력을 추정하기가 어렵고, 1/n 모델의 추력을 단순히 n배 하여 56극 전체모델의 추력과 슬립 추정을 할 수 없음

㉯ 7kA 인가 시의 최대추력을 56극으로 환산하여 계산해도 요구추력 55kN에 비해 매우 부족함

㉰ 자속선 분포를 보았을 때, 1차측의 자속이 2차측을 지나지 않고 누설되며, 요크 부분에서 자속의 포화현상이 발생

㉱ 설계된 기본 모델은 적절하지 않으며 자속누설과 포화 개선, 추력 향상을 위한 재설계가 필요함

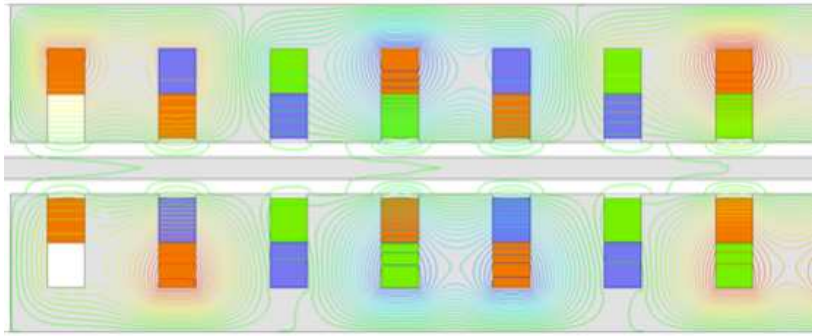


그림 2-다-10 NSDLIM 20극의 자속선 분포 (정격속도)

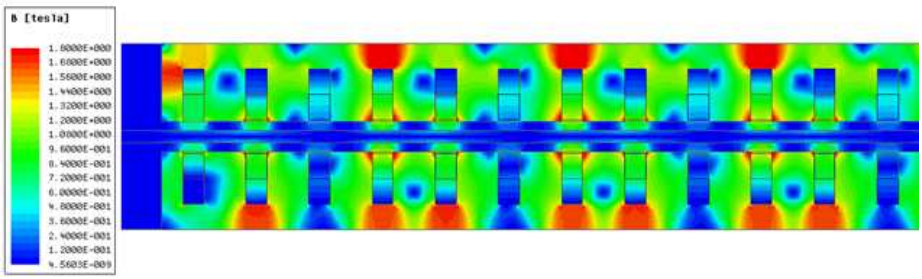


그림 2-다-11 NSDLIM 20극 모델의 자속밀도 분포 (정격속도)

표 2-다-6 재설계 모델의 설계 사양 비교

	재설계 모델 1	재설계 모델 2	재설계 모델 3
고정자 변경	치폭 100mm→50mm, 슬롯폭50mm→100mm	재설계 모델 1과 동일	재설계 모델 1과 동일
공극 변경	-	공극 1/2로 변경	재설계 모델 1과 동일
이동자 변경	-	2차측 도체판의 두께 1/2로 변경	2차측 AL판 중앙 10mm에 S08 추가

기본 모델의 문제점인 낮은 추력, 자속 누설 및 포화를 개선하기 위한 파라미터로 치 너비와 슬롯 너비, 공극, 2차측의 재질을 고려하여 재설계 하였다. 추진력 해석 후 간단히 2배를 하여 56극 전체 모델의 추력을 예측하기 위해 1/2모델인 28극으로 재설계 모델의 극수를 설정하였다. 재설계 1 모델은 기본 모델의 자속포화의 문제를 해결하기 위해 치폭을 100mm에서 50mm로, 슬롯 폭을 50mm에서 100mm로 변경하여 설계하였다. 재설계 2 모델은 와전류의 영향을 줄이기 위해 재설계 1 모델에서 공극과 2차측 도체판의 두께를 1/2로 줄여 설계 하였다. 재설계 3 모델은 편측식 LIM에 대한 특성을 고려하여 재설계 1 모델에서 2차측 알루미늄판 중앙 10mm에 S08재질을 추가하여 설계하였다. 그림 2-다-12에 재설계 1 모델의 28극모델을 나타내었고, 그림 2-다-13에 3개 28극 재설계 모델을 확대하여 나타내었으며, 표 2-다-6에 재설계 모델의 설계 사양을 비교하여 정리하였다.

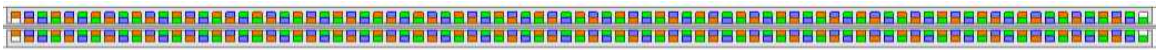
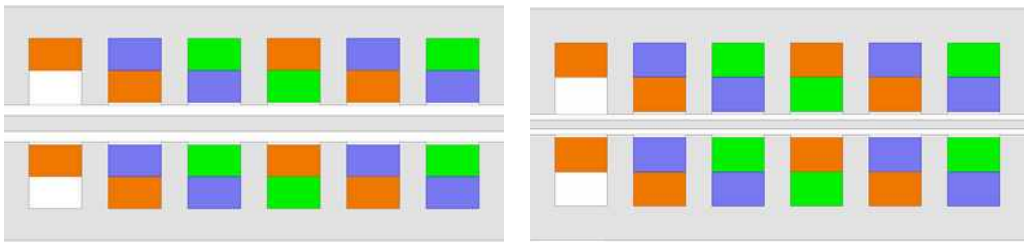
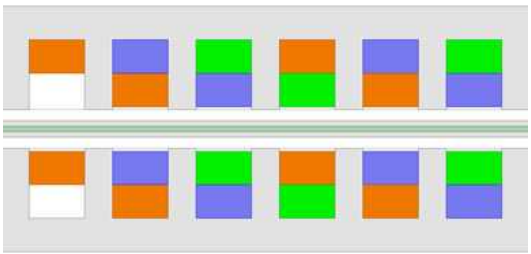


그림 2-다-12 28극 재설계 1 모델



(a) 재설계 모델 1　　(b) 재설계 모델 2



(c) 재설계 모델 3

그림 2-다-13 NSDLIM 재설계 모델

앞선 해석과 같이 동기 주파수는 386Hz, 28극이므로 전압은 전체 모델의 전압(12000V)의 1/2로 6000V를 인가하여 유한요소 해석을 진행하였다. 재설계 모델의 슬립별 추력과 상전류는 그림 2-다-14와 그림 2-다-15 이다.

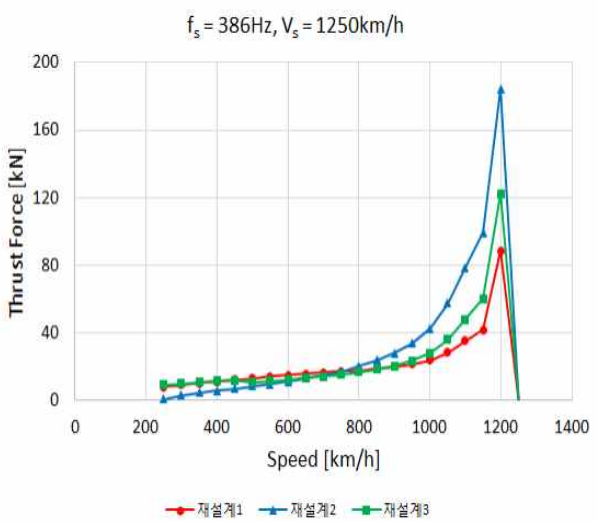


그림 2-다-14 재설계 모델의 슬립별 추력

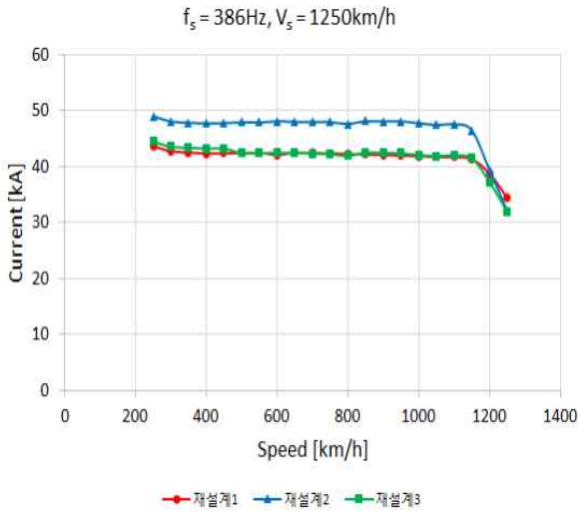


그림 2-다-15 재설계 모델의 슬립별 전류

그림 2-다-14와 2-다-15를 보면 추력이 매우 높게 나오지만 그에 비해 전류도 매우 큰 것을 볼 수가 있다. 그림 상으로는 추력의 비교가 어려우므로 같은 전류조건 하에서 추력을 비교하기 위해 앞의 식 (2.7)과 (2.8)을 이용하여 슬립별 추력을 환산한다. 따라서 7kA 인가시의 슬립별 추력 그래프는 그림 2-다-16과 같이 된다. 그림 2-다-17에서 재설계2 모델의 추력이 가장 크고, 재설계3 모델의 추력이 두 번째로 크다. 추력의 크기는 정격속도에서 약 1kN, 최대 추력 또한 6kN으로 모두 요구추력을 만족하기에는 많이 부족하다. 또한 최대추력이 발생하는 슬립이 매우 작아 정격속도에서의 추력이 더욱 낮아진다. 그림 2-다-17과 그림 2-다-18은 각각 재설계 모델의 자속선과 자속밀도 분포를 보여준다.

재설계1 모델의 경우 자속선은 기초 모델과의 차이가 거의 없으며, 자속포화는 일어나지 않는다. 재설계2 모델의 경우 공극과 2차측 도체판의 두께가 작아지면서 자속의 누설이 개선되었으며 자속포화 또한 문제되지 않는다. 재설계3 모델의 경우 2차측 도체판 중앙에 S08을 삽입함으로써 자속누설이 개선되었으며, 자속포화 또한 일어나지 않는다. 따라서 다음과 같이 결과를 정리하였다.

㉮ NSDLIM 재설계를 통하여 추력이 향상되었으나 요구추력 55kN을 만족하지는 못하여 추력향상이 필요.

㉯ 최대추력이 발생하는 슬립이 매우 작아 정격속도 부근에서 최대추력이 발생하도록 파라미터 조정이 필요

㉰ 치 너비와 슬롯 너비 변경으로 자속누설은 개선되지 않았지만 자속포화가 개선됨

㉱ 공극의 감소는 자속 누설과 추력향상을 크게 개선 파라미터 이지만 실질적으로 구조적 한계 때문에 공극을 감소시키기는 어려움

㉲ 2차측 재질이 자속 누설과 추력 향상에 영향을 주므로 2차측 파라미터 조정을 통한 재설계가 필요

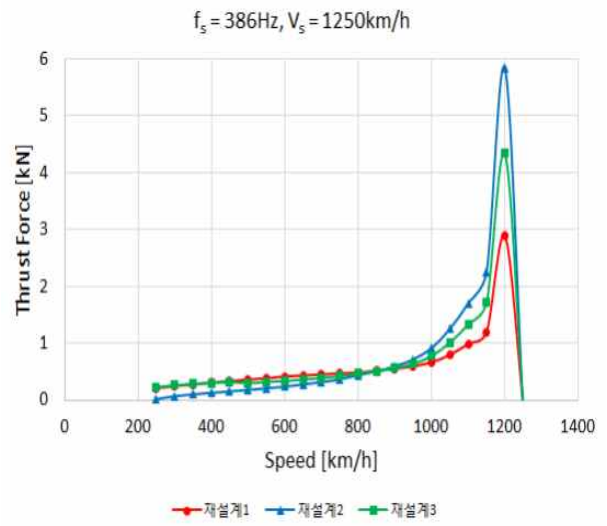
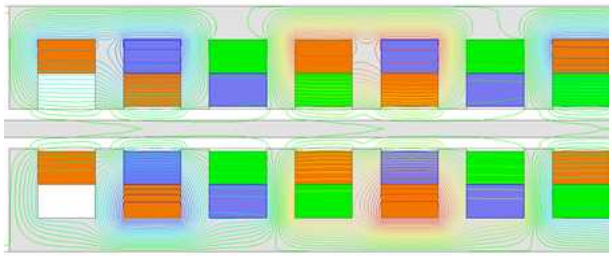
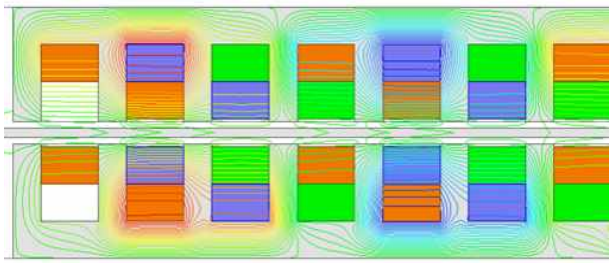


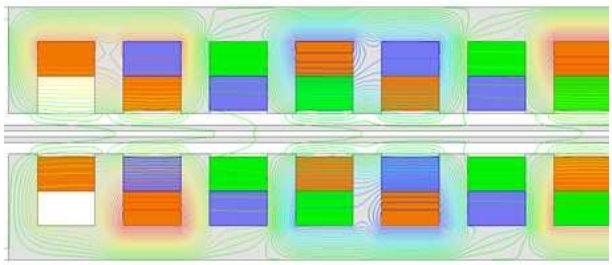
그림 2-다-16 재설계 모델의 슬립별 추력 (7kA 환산)



(a) 재설계 모델 1

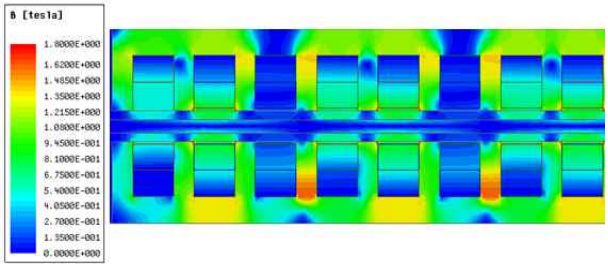


(b) 재설계 모델 2

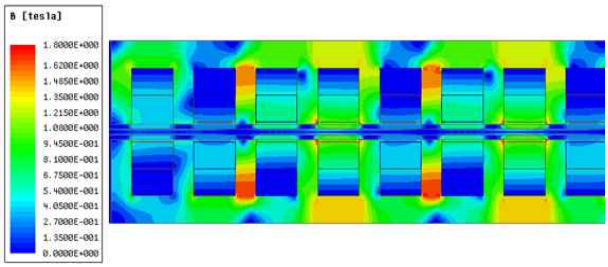


(c) 재설계 모델 3

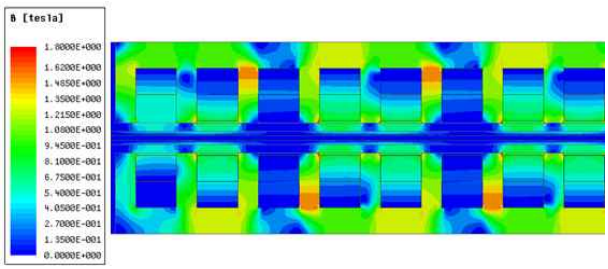
그림 2-다-17 재설계 모델의 자속선 분포 (정격속도)



(a) 재설계 모델 1



(b) 재설계 모델 2



(c) 재설계 모델 3

그림 2-다-18 재설계 모델의 자속밀도 분포 (정격속도)

앞선 해석에서 2차측의 재질변경이 자속 누설을 개선하고 추력을 향상시키는 것을 확인하였다. 이는 2차측의 재질이 바뀜으로 인해 저항의 변화에 의한 것으로 볼 수 있다. 이러한 2차측 저항 변화에 의한 추력의 특성변화는 간단히 회전형 유도전동기의 등가회로 분석을 통해 알 수 있다. 그림 2-다-19는 간략화된 유도전동기의 등가회로이고, 식 (2.9)는 등가회로 분석을 통해 도출된 토크이다.

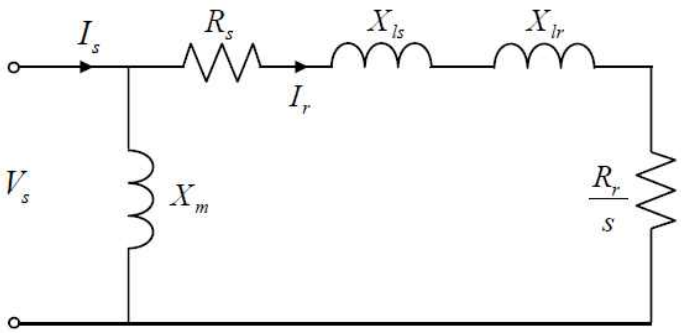


그림 2-다-19 간략화된 유도 전동기의 등가회로

$$T = \frac{3}{2\pi f} \frac{V_s^2}{(R_1 + R_2/s)^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2} \frac{R_r}{s} \tag{2.9}$$

여기서 최대 토크가 발생하는 슬립을 구하기 위해 식 (2.8)을 슬립에 대한 식으로 미분하면 최대 토크가 발생하는 슬립이 (2.10)과 같이 된다.

$$\frac{dT}{ds} = 0$$

$$s_{\max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_s^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} \tag{2.10}$$

이를 통해 2차측 저항 R_2가 최대추력이 발생하는 슬립과 비례한다는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 2-다-20과 같이 2차측 저항이 커짐으로 인해 최대 추력이 발생하는 슬립이 커지게 된다. 앞선 해석에서 기초모델과 재설계 모델 모두 최대 추력 발생 슬립이 매우 낮았으므로, 2차측 저항을 높임으로써 2차측의 도전율을 낮추고, 정격속도에서 최대추력이 발생할 수 있도록 조정이 가능하다. 따라서 이번에는 2차측 중앙에 S08이 삽입된 재설계3 모델을 바탕으로 알루미늄 판의 도전율을 변경하여 설계하였다. 알루미늄의 도전율은 원래 알루미늄의 도전율을 가지는 Al_100%를 기준으로 총 6개의 도전율을 가지는 모델을 해석하였다. 표 2-다-7은 알루미늄 도전율을 나타낸다. 도전율 이외의 해석조건은 이전과 모두 동일하며 해석 결과는 그림 2-다-21, 2-다-22, 2-다-23에 나타내었다. 그림 2-다-21과 2-다-22를 보면 도전율이 감소하여 2차측 저항이 증가함에 따라 최대추력 슬립이 크게 변한 것을 볼 수 있다.

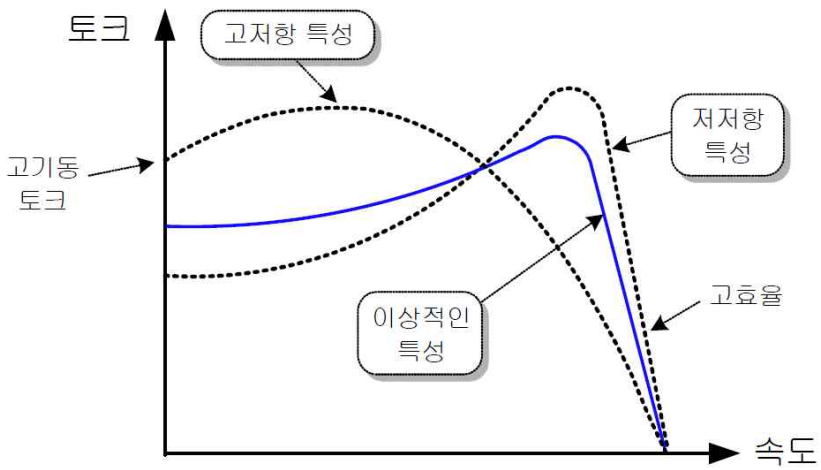


그림 2-다-20 회전자의 저항에 따른 토크 특성 (회전형 유도전동기)

표 2-다-7 알루미늄의 도전율

알루미늄의 도전율(%)	도전율
Al_100%	38,000,000 [siemens/m]
Al_50%	19,000,000 [siemens/m]
Al_20%	7,600,000 [siemens/m]
Al_10%	3,800,000 [siemens/m]
Al_5%	1,900,000 [siemens/m]
Al_1%	380,000 [siemens/m]

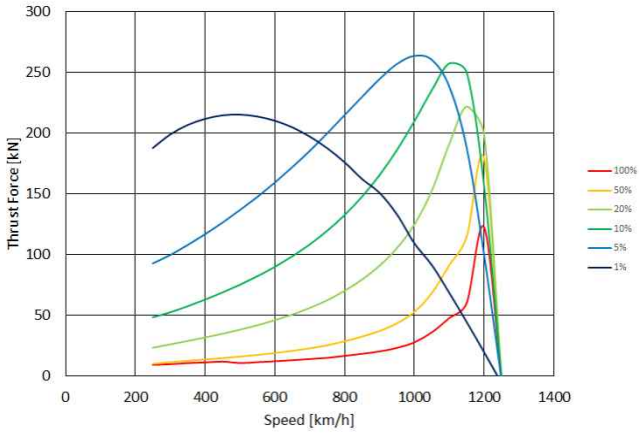


그림 2-다-21 2차측 알루미늄 도전율에 따른 속도별 추력 특성

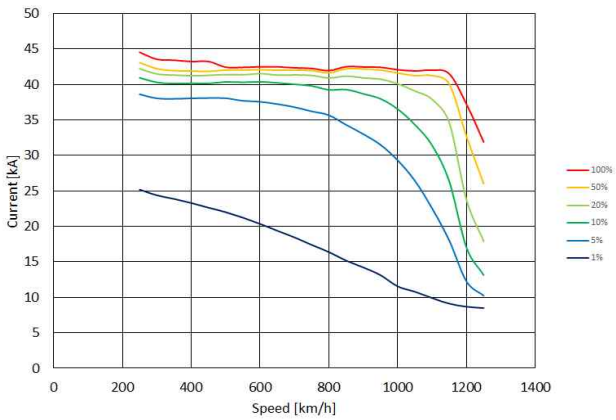


그림 2-다-22 2차측 알루미늄 도전율에 따른 속도별 전류 특성

그림 2-다-23에 7kA 인가시의 추력 그래프를 보면 도전율이 작아짐에 따라 점점 최대 추력이 증가하고, 최대 추력 슬립 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 결국 알루미늄 도전율의 1% 도전율을 가지는 모델이 정격속도 1000km/h에서 최대 추력을 발생시킨다. 최대 추력의 크기는 약 40kN으로, 56극일 경우 80kN의 추진력이 발생한다고 가정하면

요구추력 55kN을 충분히 만족한다. 따라서 알루미늄도전율 1% 모델을 요구 추력을 만족하는 최종 모델로 선정하였고 최종모델의 추력 환산 값과 실제 7kA 인가시의 추력을 비교하여 검증하였다. 환산 값은 시뮬레이션 결과를 수학적 식만을 이용해 계산한 값으로, 검증이 필요하다. 검증을 위해 그림 2-다-22의 슬립별 전류의 값을 7kA로 맞추기 위하여 슬립별 전압을 조절하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 2-다-24와 2-다-25에 환산 추력과 전류 값을 비교하여 나타내었다.

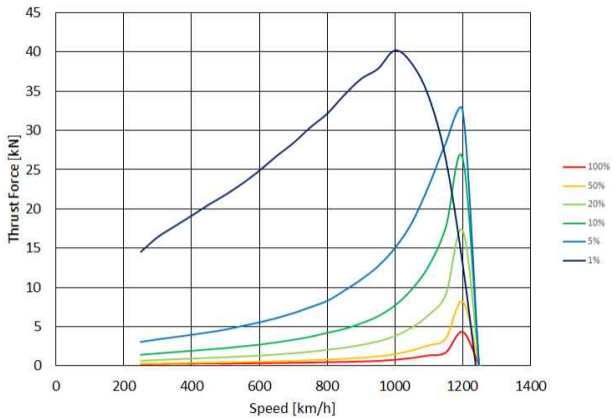


그림 2-다-23 2차측 알루미늄 도전율에 따른 속도별 추력 특성 (7kA 환산)

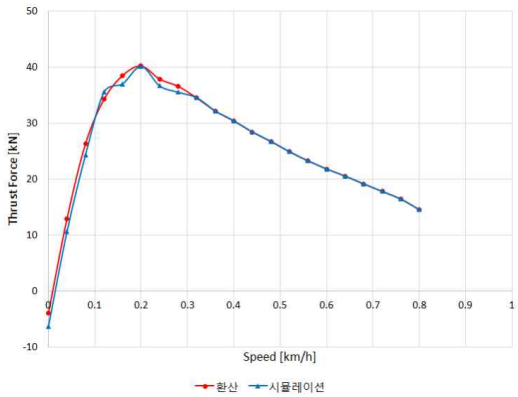


그림 2-다-24 알루미늄 1% 도전율 모델의 추력 환산값과 시뮬레이션 결과

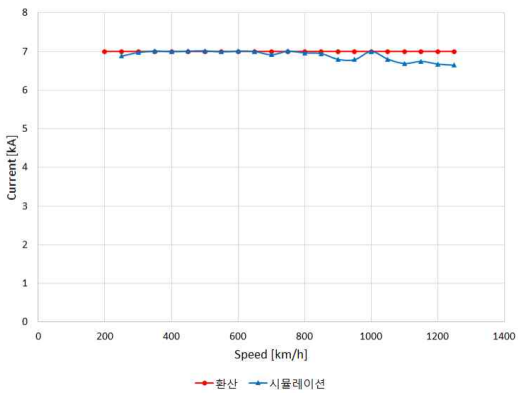
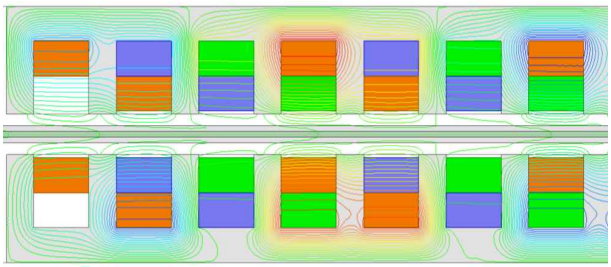
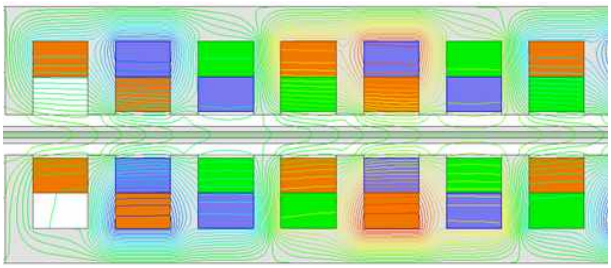


그림 2-다-25 알루미늄 1% 도전율 모델의 전류 환산값과 시뮬레이션 결과

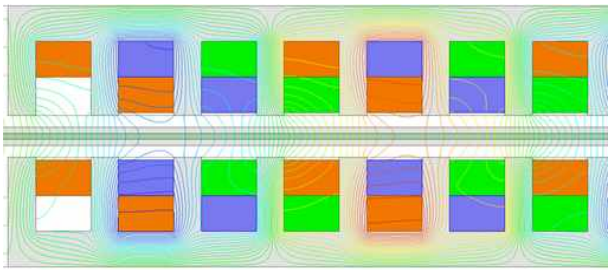
그림 2-다-26은 정격속도에서 2차측 알루미늄 도전율에 따른 자속선 분포도 이다. 자속선 분포를 보면 도전율이 낮을수록 정격속도에서 누설 자속이 적게 발생됨을 알 수 있다. 또한 그림 2-다-27과 같이 도전율이 낮을수록 자속밀도가 낮아 포화 문제가 발생하지 않는다.



(a) Al 100%

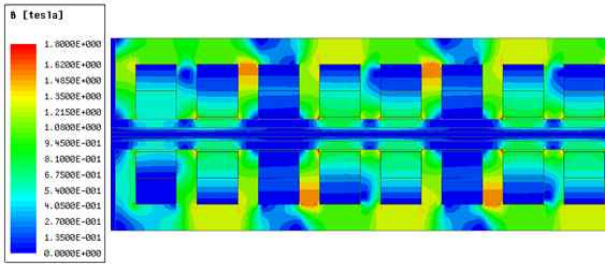


(b) Al 20%

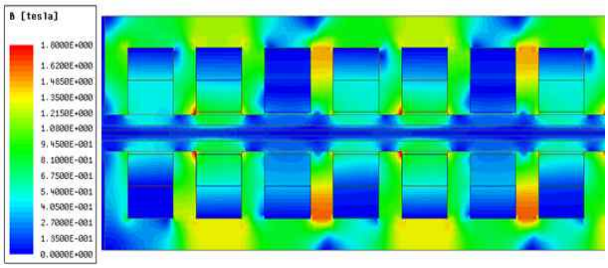


(c) Al 1%

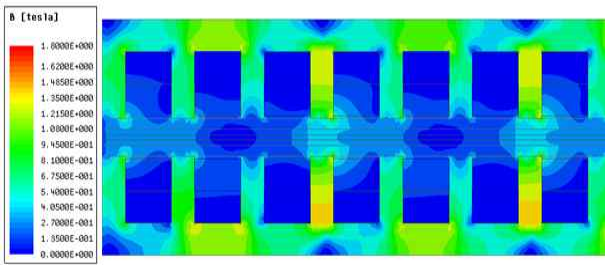
그림 2-다-26 2차측 알루미늄 도전율에 따른 자속선 분포 (정격속도)



(a) Al 100%



(b) Al 20%



(c) Al 1%

그림 2-다-27 2차측 알루미늄 도전율에 따른 자속밀도 분포 (정격속도)

(4) NSDLIM 상세 설계

앞선 기본 설계를 통하여 자속 누설 및 포화를 개선하고, 요구 추력을 만족하는 알루미늄 도전율 1% 모델을 도출하였다. 그러나 경험적인 설계 기법을 통해 NSDLIM의 부상력은 추진력의 1/2만큼 발생하며, 이를 통해 앞선 기본 설계 모델의 추진력인 80kN으로는 요구 부상력인 110kN을 달성할 수 없다. 따라서 출력 특성에 영향을 미치는 1,2차측 설계 파라미터들의 선정 및 특성 분석을 통해 추진력을 향상시킬 수 있는 설계가 추가적으로 필요하다. 경험적인 설계 기법을 적용하여 NSDLIM의 상세 설계를 위한 파라미터와 범위를 다음과 같이 선정하였다. 또한, NSDLIM의 정확한 성능 분석을 위해서는 부상력과 안내력을 확인할 수 있는 3D Transient 해석이 필수적이나 2D Transient 대비 Mesh의 개수가 10배 이상 급증하기 때문에 과도한 해석 시간이 소요된다. 따라서 3절에서는 파라미터 해석의 효율적인 수행을 위해 추진력만을 확인할 수 있는 2D Transient 해석을 진행하였다. 파라미터 선정 근거는 다음과 같다.

㉮ 공극 : 편측식 LIM과는 달리 이중 공극을 가지는 NSDLIM의 구조를 고려하여 선정

㉯ 매극매상 슬롯 수 : NASA 및 MIT의 연구 자료를 검토하여 초고속 양측식 LIM의 경우 4이상의 매극매상 슬롯 수를 사용하는 것을 고려하여 선정.

㉰ 2차측 도체판의 두께 : 2차측 도체판의 두께에 따라 자기적 공극에 영향을 미쳐 출력 특성에 영향을 주는 것을 고려하여 선정.

표 2-다-8 상세 설계를 위한 NSDLIM의 1,2차측 파라미터 및 범위

Parameter	Value	Prameter	Value
공극	10 ~ 25 [mm] (5mm step)	매극매상 슬롯 수	2, 3, 4
2차측 도체판 두께	10 ~ 30 [mm] (10mm step)	단절율	5/6, 6/9~8/9, 9/12~11/12

또한, 그림 2-다-28과 같이 전자기 특성 해석 Tool의 Symmetry 기능을 이용한 Half Model을 사용할 경우 기존 Full Model 해석 시 소요되는 시간의 1/2 수준까지 해석 시간을 감소시킬 수 있기 때문에 Half Model의 적용 타당성 검증을 수행하였다.



그림 2-다-28 Symmetry 기능을 적용한 Half Model

그림 2-다-29는 Half Model과 Full Model 간 해석 오차 검증 결과이다. 해석 결과 값을 비교해보면 Full Model과 오차가 거의 없다. 또한, 그림 2-다-30의 자계 해석 결과도 Full Model과 매우 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 파라미터 해석을 위한 Half Model의 적용은 타당하며, 이를 통해 해석 시간을 기존 수준의 1/2배 감소하여 이후 파라미터 해석의 효율성을 증가시킬 수 있다.

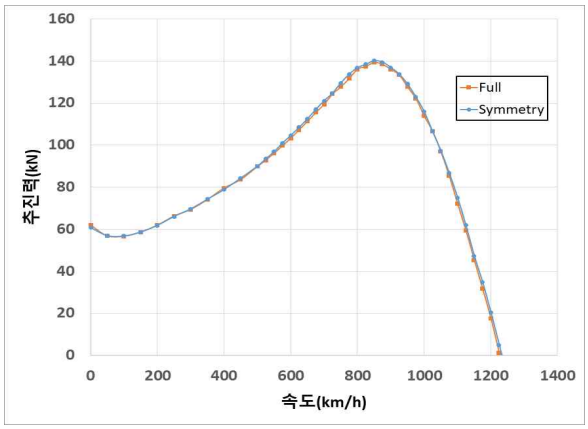
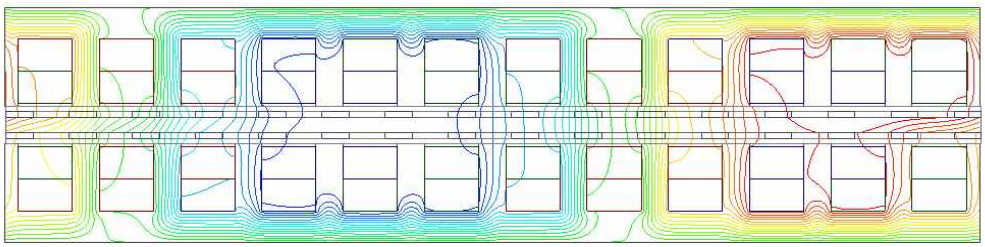
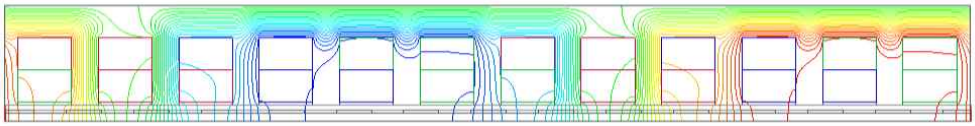


그림 2-다-29 Half Model과 Full Model의 해석 결과 비교



(a) 풀 모델의 자속선



(b) 주기 모델의 자속선

그림 2-다-30 풀 모델과 주기 모델의 자계 해석 결과 비교

그림 2-다-31과 표 2-다-9는 파라미터 해석을 위한 기본 해석 모델 및 설계 사양이다. 기본 설계 결과를 참고하여, 1차측 사양을 동일하게 적용하였고 2차측 도체판의 두께는 Half Model을 적용하였기 때문에 편측 10mm, 공극은 20mm, 매극매상 슬롯 수는 2인 모델을 기준 모델로 선정하였다. 2차측 리액션 플레이트의 재질은 Stainless_Steel로 선정하였는데, 이는 앞선 기본 설계 모델의 결과인 도전율 1%인 재질은 존재하지 않는 재질이며, 상세 설계 이후 실제 성능 시험을 위해서는 시중에서 사용되고 있는 재질 중 비자성체이며, 자속 포화를 고려하여 도전율이 Aluminum의 1%에 가까운 재질을 사용하여야 하기 때문이다. 따라서 Stainless_Steel는 도전율이 1,100,000siemens/m로 Aluminum의 약 3%의 도전율을 가지고 있고, 강체이기 때문에 추가적인 강성 확보에 유리하여 상세 설계에서 2차측 리액션 플레이트의 재질로 선정하였다.

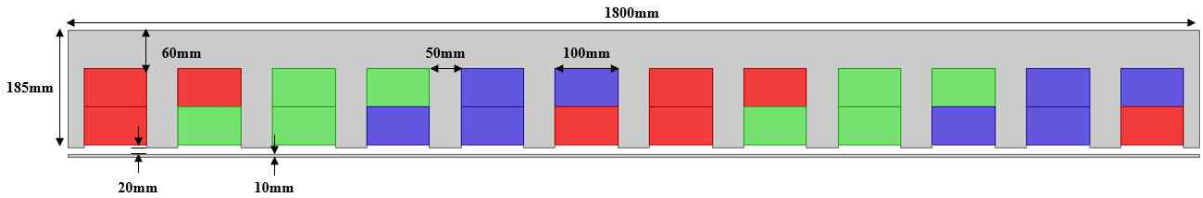


그림 2-다-31 파라미터 해석용 기준 모델

표 2-다-9 파라미터 해석용 기준 모델 설계 사양

Content	Specification	Unit
1차측 길이	1800	mm
1차측 높이	185	mm
2차측 리액션 플레이트 재질	Stainless_Steel	
2차측 리액션 플레이트 두께	20	mm
1차측 슬롯 너비	50	mm
1차측 슬롯 깊이	125	mm
공극	20	mm
치 너비	100	mm
적층 길이	288	mm
요크 너비	60	mm
매극매상 슬롯 수	2	
단절율	5/6	
극 수	28	
동기 주파수	386	Hz
정격 슬립	0.2	s
정격 속도	1000	km/h

(5) NSDLIM 상세 설계 모델 2차원 유한요소 해석

해석의 효율성을 위하여 기준 모델의 매극매상 수 2인 경우에서 공극·2차측 도체판 두께와 추진력간의 민감도 분석을 우선적으로 수행한 후 가장 우수한 성능을 보이는 모델의 2차측 도체판 두께와 공극을 고정하여 추후 파라미터 해석을 수행하였다. 그림 2-다-32와 표 2-다-10은 매극매상 슬롯 수가 2인 경우, 공극·2차측 도체판 두께와 추진력간의 민감도 분석 결과이다. 총 12개 모델에 대한 해석을 수행하였으며, 정격슬립[0.2s] 구간에서의 추진력만을 측정하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

㉮ 2차측 도체판의 두께 변화에 대한 추진력의 민감도는 전체적으로 매우 크며. 2차측 도체판의 두께가 10mm 일 때 가장 우수한 추진력 보인다.

㉯ 공극 변화에 대한 추진력의 민감도는 2차측 도체판 두께 변화 대비 상대적으로 작으며, 공극의 길이가 10mm 일 경우 가장 우수한 성능을 보인다.

㉰ 따라서 매극매상 슬롯 수 2에서 가장 우수한 성능을 보이는 모델은 공극이 10mm, 2차측 도체판 두께 10mm 모델이다.

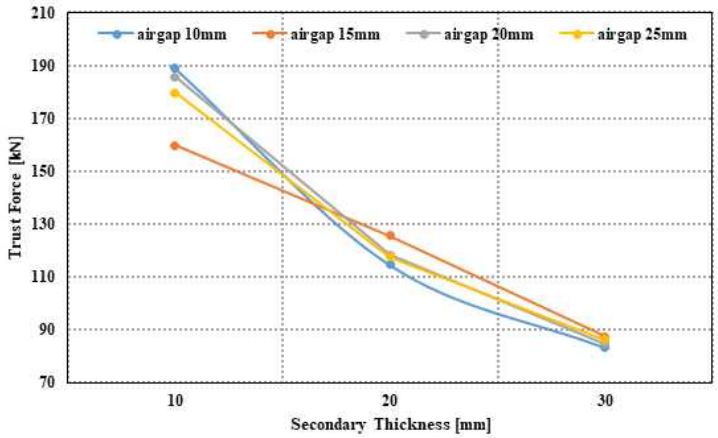


그림 2-다-32 매극매상 슬롯 수 2의 추진력 민감도 분석

표 2-다-10 민감도 분석 결과 값(매극매상 슬롯 수=2)

		2차측 도체판 두께 [mm]		
		10	20	30
공극 [mm]	10	188.91 [kN]	114.46 [kN]	83.24 [kN]
	15	159.73 [kN]	125.55 [kN]	87.33 [kN]
	20	185.73 [kN]	118.34 [kN]	84.66 [kN]
	25	179.77 [kN]	117.53 [kN]	86.23 [kN]

앞선 매극매상 슬롯 수 2에서의 파라미터 해석 결과를 통해 2차측 두께와 공극을 10mm로 고정하였다. 그림 2-다-33과 2-다-34, 표 2-다-11은 매극매상 슬롯 수 3의 파라미터 해석 모델 및 단절율 가변에 따른 추진력 민감도 분석 결과이다. 동일 슬립에서 최대 추진력 값을 비교한 매극매상 슬롯 수 2의 해석과는 달리 매극매상 슬롯 수 3의 해석은 파라미터의 개수와 범위가 한정되었기 때문에 토크-속도 곡선에서 운전 영역에 대해 해석을 수행하였다. 특이 사항으로는 매극매상 슬롯 수가 증가하면 극간격 또한 증가해야 하지만 이후 NSDLIM의 성능 시험을 위한 시험기의 제작성을 고려하여 기준 모델의 극간격인 900mnm을 유지하였다. 극간격이 고정됨에 따라 치와 슬롯의 너비는 경험적인 설계 기법을 적용하여 1:2의 비율로 설계하였다. 해석 시 인가 전류는 기준 모델의 인가 전류인 7kA를 기준으로 2/3 값인 4.6kA를 인가하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

㉮ 단절율 변화에 따른 토크-속도 곡선의 파형은 크게 변화하지 않는다.
㉯ 최대 추진력 발생 슬립은 0~0.1s로 정격 슬립보다 감소하였으나 단절율 변화에 따라 크게 변화하지 않는다.
㉰ 매극매상 슬롯 수가 증가할수록 최대 발생 추진력은 증가하며, 단절율 변화에 따라서도 증가한다.
㉱ 민감도 분석 결과 가장 우수한 성능을 보이는 모델은 매극매상 슬롯 수 3에서 8/9 단절율 모델이다.

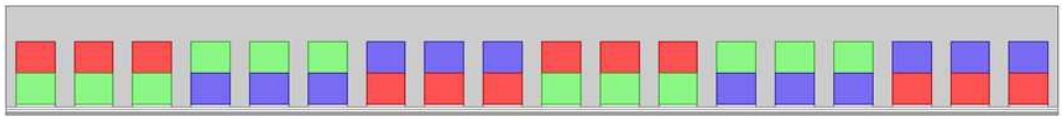


그림 2-다-33 파라미터 해석 모델(매극매상 슬롯 수=3)

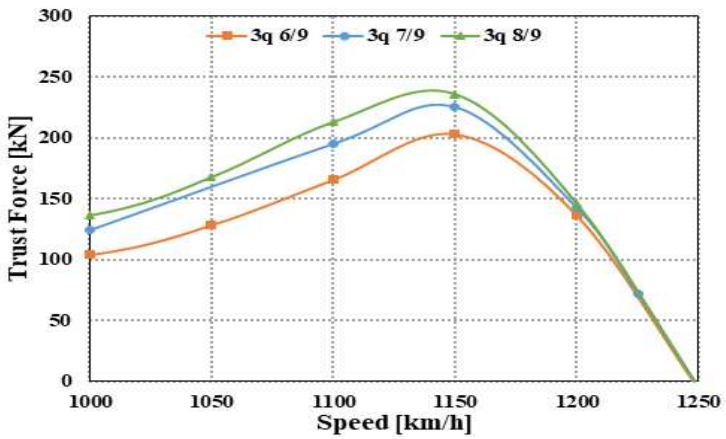


그림 2-다-34 단절율 가변에 따른 추진력 민감도 분석(매극매상 슬롯 수=3)

표 2-다-11 민감도 분석 결과 값(매극매상 슬롯 수=3)

		매극매상 슬롯 수	
		3	
단절율	최대 추진력	6/9	202.97 [kN]
		7/9	225.71 [kN[
		8/9	235.89 [kN]

그림 2-다-35와 2-다-36, 표 2-다-12는 매극매상 슬롯 수 3의 파라미터 해석 모델 및 단절율 가변에 따른 추진력 민감도 분석 결과이다. 매극매상 슬롯 수 3의 해석과 같은 운전 영역을 해석하였으며, 극간격 또한 900mm로 유지하였다. 치와 슬롯의 너비 또한 1:2 비율을 동일하게 적용하였으며, 해석 시 인가 전류는 기준 모델의 인가 전류인 7kA를 기준으로 2/4 값인 3.5kA를 인가하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

㉮ 단절율 변화에 따른 토크-속도 곡선의 파형은 크게 변화하지 않는다
㉯ 최대 추진력 발생 슬립은 0~0.1s로 정격 슬립보다 감소하였으나 단절율 변화에 따라 크게 변화하지 않는다.
㉰ 매극매상 슬롯 수가 증가할수록 최대 발생 추진력은 증가하며, 단절율 변화에 따라서도 증가한다.
㉱ 민감도 분석 결과 가장 우수한 성능을 보이는 모델은 매극매상 슬롯 수 4에서 10/12 단절율 모델이다.

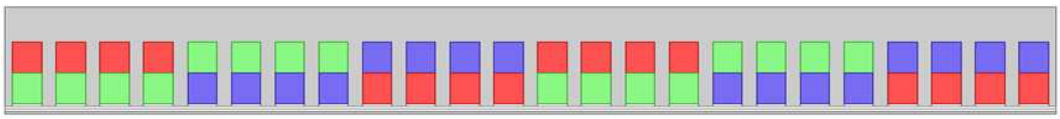


그림 2-다-35 파라미터 해석 모델(매극매상 슬롯 수=4)

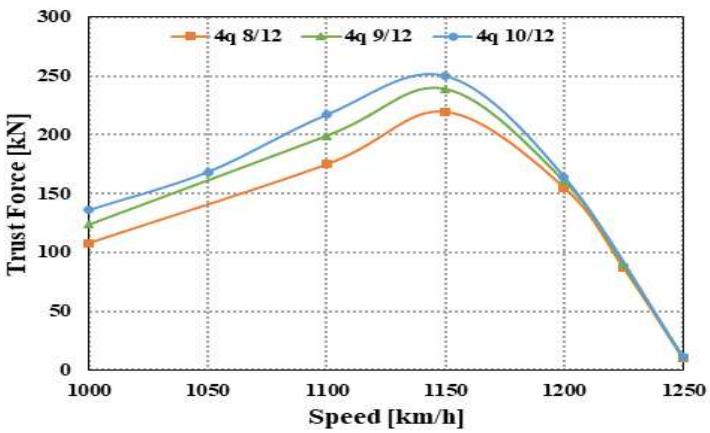


그림 2-다-36 단절율 가변에 따른 추진력 민감도 분석(매극매상 슬롯 수=4)

표 2-다-12 민감도 분석 결과 값(매극매상 슬롯 수=4)

		매극매상 슬롯 수	
		4	
단절율	최대 추진력	8/12	219.52 [kN]
		9/12	238.74 [kN]
		10/12	249.85 [kN]

그림 2-다-37과 표 2-다-13은 앞선 파라미터 해석 결과들 중 가장 우수한 성능을 보이는 모델들 간의 최종 비교 결과이다. 비교 결과는 다음과 같다.

㉮ 매극매상 슬롯 수가 증가할수록 최대 추진력은 일정 수준 이상 증가한다.

㉯ 최대 추진력 발생 슬립은 매극매상 슬롯 수 2는 0.2s, 매극매상 슬롯 수 3, 4는 0~0.1s로 정격 슬립보다 감소하였으나 단절율 변화에 따라 크게 변화하지 않는다.

㉰ 비교 분석 결과 최종적인 NSDLIM의 상세 설계 모델은 매극매상 슬롯 수 4에서 10/12 단절율 모델이다.

㉱ 추진력의 경우 기본 설계 모델의 1 module의 추진력(40kN) 대비 약 6배 이상 증가하였다.

㉲ 앞선 부상력은 추진력의 1/2배 만큼 발생한다는 경험적 설계 기법을 적용하게 되면, 상세 설계 모델의 부상력은 249.85kN의 1/2인 124.925kN으로 요구 부상력은 110kN을 만족한다.

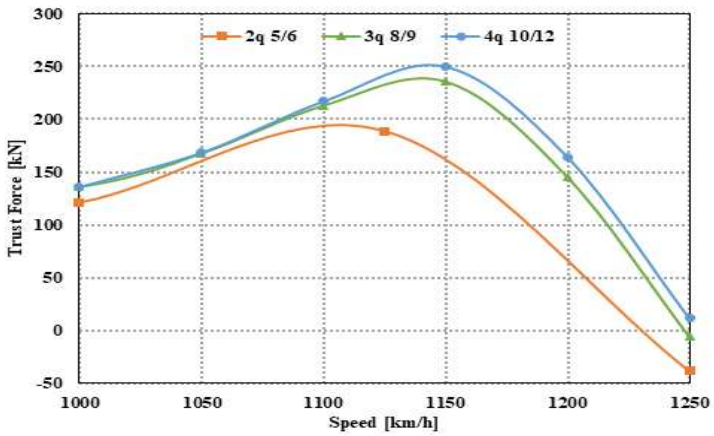
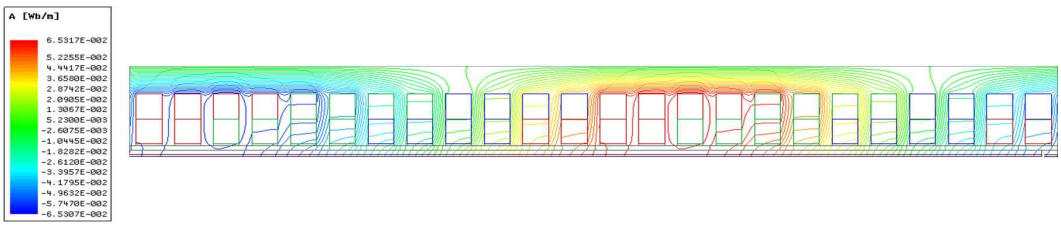


그림 2-다-37 우수 모델 최종 성능 비교

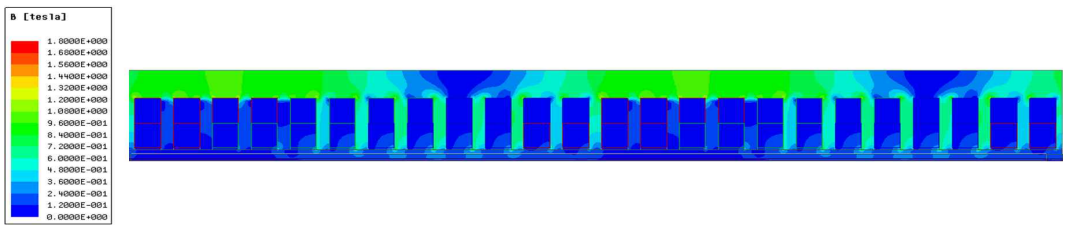
표 2-다-13 최종 모델 성능 비교 결과 값

		매극매상 슬롯 수					
		2		3		4	
단절율	최대 추진력	5/6	188.91 [kN]	8/9	235.89 [kN]	**10/12**	**249.85 [kN]**

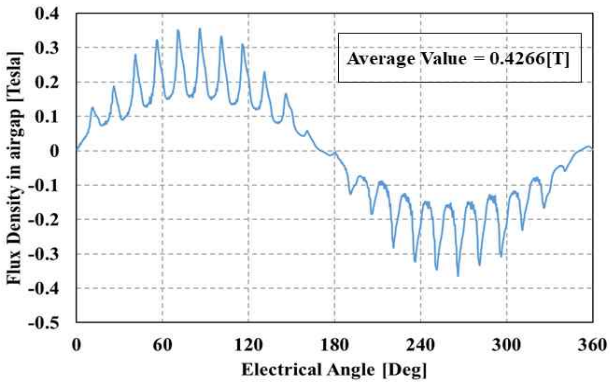
그림 2-다-38은 상세 설계를 통해 도출된 최종 성능 향상 모델에 대한 자계 해석결과이다. 정격 슬립에서 해석을 수행하였으며, 유도전동기의 특성상 과도구간이 긴점을 고려하여 완전히 안정영역에 수렴하였을 때의 해석 결과 값을 도시하였다. 해석결과를 분석해보면 자속밀도의 포화는 일어나지 않는다. 또한, 평균 공극자속밀도는 0.4266T이며, 이는 NSDLIM의 경우 양측식인 1차측의 구조로 인해 이중 공극을 갖고, 이로 인해 자기적인 공극이 일반적인 편측식 LIM보다 매우 크기 때문이다.



(a) 자속선도



(b) 포화자속밀도



(c) 공극자속밀도

그림 2-다-38 최종 모델 자계 해석

라. NSDLIM의 3차원 유한요소 해석 (부산외국어대학교)

(1) NSDLIM의 3차원 해석 기법 도출

NSDLIM은 비대칭적인 구조를 통해 추진력과 부상력을 동시에 발생시키는 관계로 이의 정확한 성능해석을 위해서는 비대칭성을 고려할 수 있는 3차원 해석이 필수적이다. 2차원 해석을 통해서는 1차측과 2차측이 서로 비대칭적인 정렬상태에서 발생하는 NSDLIM의 부상력 계산이 원리적으로 불가능하다. NSDLIM의 추진력 계산의 경우에는 2차원 해석으로 해석결과를 얻을 수는 있으나, 이는 1차측과 2차측이 대칭적인 정렬상태에 대한 해석결과로 비대칭적인 정렬상태를 가지는 NSDLIM의 정확한 추진력은 아니다. NSDLIM에서 발생하는 안내력의 경우 역시 2차원으로는 고려할 수 없는 이동방향에 수직인 적층방향으로의 위치 변화에 따른 위치 복원력을 계산해야하기 때문에 일반적인 2차원 해석으로는 해석이 불가능하며, 3차원 해석이 필요하다. 결과적으로 NSDLIM의 추진력, 부상력, 안내력에 대한 성능해석을 위해서는 3차원 해석이 필수적이다.

하지만 LIM은 다음 3가지 점에서 성능해석에 고비용이 발생한다. 첫째는 영구자석형 동기기와 같은 타전동기의 성능해석에서는 발생하지 않는 해석상의 과도구간이 발생하여, 해석시간이 길어진다는 문제점이다. 이는 전기각으로 1주기 혹은 1/2주기만 해석해도 정상상태의 성능해석결과를 바로 얻을 수 있는 동기기와 달리 유도 전동기에서는 수치해석상의 과도상태 발생으로 전기각으로 몇 주기 이상의 해석을 진행한 이후에야 정상상태의 성능특성 결과를 얻을 수 있다. 두 번째 문제로는 앞선 1절에서 설명한 종방향 단부효과로 인하여 대칭성을 이용한 1극 또는 2극의 주기모델을 사용 시 해석오차가 발생한다는 것이다. 이를 해결하기 위해서는 주기 모델이 아닌 전체 극이 고려된 full 모델을 사용한 성능해석이 필요하나, 부상력, 안내력 계산을 위해 3차원 해석이 필수적인 NSDLIM의 full 모델에 대한 3차원 해석은 현실적으로 불가능하다. 추가적으로 LIM에서 발생하는 횡방향 단부효과를 고려하기 위해서는 3차원 해석이 필요하여, 일반적으로 LIM의 해석비용을 상승시키지만, 기본적으로 NSDLIM은 3차원 해석이 필요한 관계로 횡방향 단부효과를 고려하기 위한 해석비용 상승은 없다.

(가) Transient Domain solver를 이용한 NSDLIM의 성능해석

Transient Domain solver(TDS)를 이용한 유한요소해석은 재질의 비선형, 입력전류의 시간고조파 및 해석 영역 안에 위치한 물체들 간의 상대운동들을 모두 고려할 수 있어서, 회전형 및 LIM의 성능해석에 가장 일반적으로 사용되고 있다. 이 TDS의 지배방정식은 식(2.11)과 같다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \overrightarrow{A} = J_s - \sigma \frac{\partial \overrightarrow{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V + \sigma v \times \nabla \times \overrightarrow{A} \qquad (2.11)$$

여기서, μ는 투자율, A는 자기벡터 포텐셜, Js는 전류밀도, σ는 도전율, V는 전압, v는 물체의 이동속도를 각각 의미한다.

① 수치해석상의 과도구간

TDS를 이용한 유도 전동기의 성능해석 시 그림 2-라-1에 나타난 것과 같은 해석상의 과도시간이 발생한다. 이는 해석이 시작되는 순간인 t=0를 기점으로 2차측 도체에 스텝 함수형태의 급격한 자속변화가 발생하기 때문이다. 이는 실제 물리적으로 발생하는 현상이 아니며, 유한요소해석을 이용하여 일정한 속도로 이동 중인 2차측과 일정한 전압원 혹은 전류원으로 구동 중인 유도 전동기를 유한요소해석을 통해 해석할 때 발생하는 해석상의 과도상태이다. 이와 같은 해석상의 과도구간은 유한요소해석의 계산 알고리즘 개선을 통해 저감할 수는 있으나, 원리적으로 완전히 제거하는 것은 불가능하다. 유한요소해석을 이용하여 유도전동기의 성능해석이 가능한 유한요소해석 기반 상용 소프트웨어 중 사용도가 높은 미국 Ansys의 Maxwell과 일본 Jsol의 Jmag Desinger 모두 그림 2-라-1과 같은 해석상의 과도영역이 발생한다.

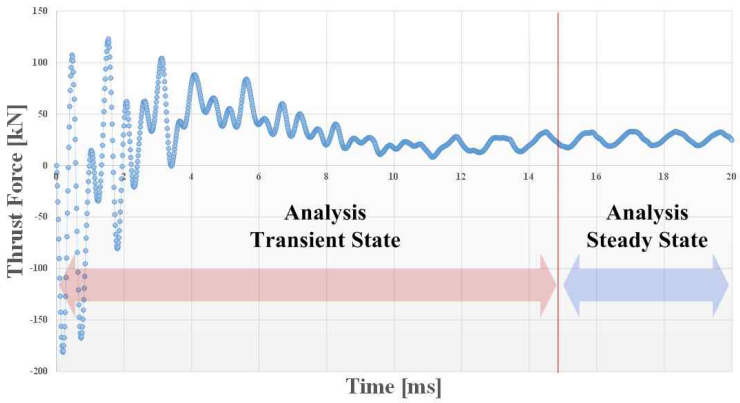


그림 2-라-1 Transient solver를 이용한 선형유도전동기 성능해석 시 발생하는 과도구간

② 시간차분의 time step에 따른 정상상태 해석오차

TDS를 이용한 유도전동기 해석 시 전체 해석시간을 유한개로 분할하는 시간 차분으로 해석이 진행된다. 동기기와 달리 유도 전동기의 경우 전체 해석시간을 분할하는 횟수에 따라 추진력과 같은 성능특성 해석결과에 유의미한 차이가 발생한다. 이는 유도 전동기의 2차측 도체에서 발생하는 유도전류가 이 해석시간을 분할하는 횟수에 의해 영향을 받기 때문이다. 그림 2-라-2에 전기각 360도를 분할하는 횟수에 따른 LIM의 추진력 해석결과를 나타내었다.

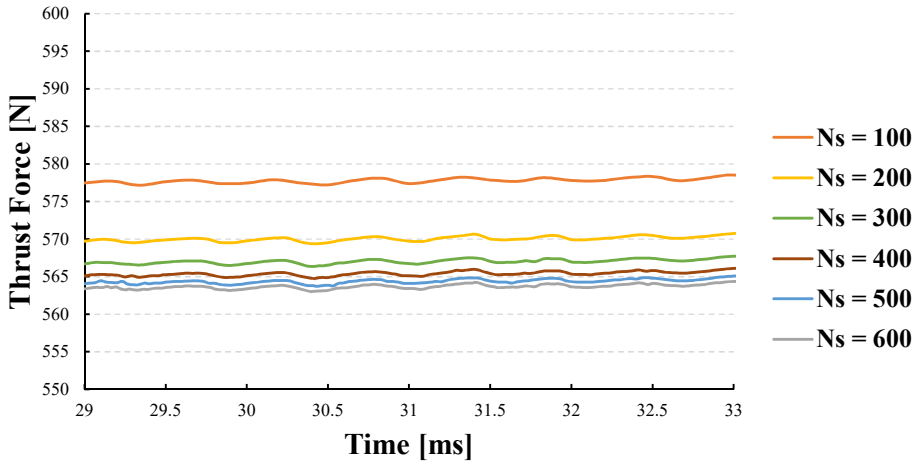


그림 2-라-2 해석시간 분할회수에 따른 선형유도전동기의 정상상태 해석오차 비교

해석분할 횟수에 따른 LIM의 해석결과의 변화 추이를 정량적으로 분석하기 위하여 표 2-라-1에 분할횟수에 따른 추진력 해석결과의 변화율을 나타내었다. 이때 해석에 사용된 해석모델의 mesh와 재질, 형상, 슬립은 모두 동일하며, 오직 전기각 360도에 해당하는 해석시간을 분할하는 횟수만 상이하다. 표 2-라-1에 나타난 것과 같이 전기각 360도를 분할하는 횟수가 증가할수록 해석결과의 변화율은 작아지면서 특정 결과에 수렴하는 특성이 나타난다. 그리고 분할횟수의 증가는 표 2-라-1에도 나타나 있듯이 비례적으로 해석시간의 증가를 가져온다. 유도 전동기의 경제적이면서, 정확한 성능특성해석을 위해서는 적절한 수준의 분할횟수의 선정이 필요하다. 결과적으로 TDS를 이용한 유도 전동기의 성능특성해석은 그림 2-라-1의 해석상의 과도영역과 표 2-라-1에 나타난 적절한 수준의 분할횟수 필요성들로 인하여 상당한 해석시간이 요구된다는 특징을 가지고 있다.

표 2-라-1 선형유도전동기의 시간차분에서의 time step에 따른 성능해석 결과비교 (슬립 = 0.2)

해석 횟수	추진력 [N]	변화율 [%]	해석 시간 [sec]
50	590.4	-	40
100	578.0	2.14%	63
150	573.0	0.87%	89
200	570.3	0.48%	125
250	568.5	0.31%	146
300	567.2	0.22%	177
350	566.3	0.16%	214
400	565.6	0.13%	238
450	565.0	0.10%	267
500	564.6	0.08%	305
550	564.2	0.07%	337
600	563.9	0.06%	371

(나) 공간고조파(Frequency Domain Solver)를 이용한 LIM 성능해석

유한요소해석기법의 일종인 Frequency Domain Solver(FDS)에서는 TDS와 달리 해석영역 안 물체들은 모두 정지 상태로, 물체 간 상대운동을 고려할 수 없다는 한계를 가진다. 또한 해석영역 안에 존재하는 자속밀도와 자계세기와 같은 모든 물리량은 동일한 주파수의 정현함수를 형태를 가져야 한다는 제약 역시 존재한다. 하지만 FDS에서는 원리적으로 TDS에서 발생하는 해석상의 과도구간이 존재하지 않으며, TDS와 달리 특정 slip에서의 정상상태에서의 성능특성을 단 1회의 해석으로 계산할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그래서 FDS를 이용하여 유도 전동기이 성능해석을 수행할 수 있다면, TDS에 비해 그 해석시간을 극단적으로 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이의 지배방정식은 식 (2.12)와 같다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu}(\nabla \times \vec{A}) = (\sigma + j\omega\epsilon)(-j\omega\vec{A} - \nabla\phi) \tag{2.12}$$

여기서, μ는 투자율, A는 자기벡터 포텐셜, σ는 도전율, ε는 유전율, ω는 각주파수, φ자기스칼라 포텐셜을 각각 의미한다.

FDS를 이용한 유한요소해석에서 해석영역 안의 물체들 간 상대운동을 고려할 수 없기 때문에, 1차측과 2차측 사이의 상대운동이 없는 기동상태에서의 특성해석과 같은 제한적인 상황에서만 이용되었다. 이는 일반적인 회전형 유도 전동기의 2차측은 농형바 형상의 회전자로, 회전자의 상대이동 시 회전자 코어의 고정자 코어 사이의 상대운동 뿐만 아니라 고정자 코어와 회전자 도체 사이에서도 상대운동이 발생하여 해석영역 내 물체들의 상대운동 고려가 불가능한 FDS의 적용에 문제가 있기 때문이다. 하지만 평판형 LIM의 경우 2차측이 일체형 도체판이며, 2차측에 자기적인 돌극구조가 없기 때문에 2차측인 이동자가 이동하더라도, 1차측인 고정자와 2차측인 이동자 사이의 자기적인 형상이나 와전류의 경로인 도체 형상과 같은 유효한 형상의 변화가 없다. 결과적으로 전자기적인 관점에서 해석영역 안에서의 물체들의 상대운동이 없기 때문에, FDS를 이용한 평판형 LIM의 정확한 성능특성 해석이 가능하며, 만약 NSDLIM이 2차측이 평판형 구조로 설계된다면, NSDLIM 역시 FDS의 적용이 가능하다.

① FDS를 이용한 NSDLIM의 성능해석기법 정립

FDS를 이용해서 NSDLIM의 성능해석을 위해서는 1차측 이동자계와 2차측 사이의 상대운동을 고려할 수 있는 방안이 필요하다. 하지만 해석영역 안에 물체들 간 상대운동을 고려할 수 없는 FDS는 간접적인 방법으로 이를 구현해야 한다. NSDLIM의 1차측에 f라는 전원주파수를 가지는 입력전원을 인간할 경우, 공극 상에는 극 피치 τ와 전원주파수 f로

결정되는 식 (2.13)과 같은 이동자계가 생성된다.

$$v_1 = 2\tau f \tag{2.13}$$

식 (2.13)의 이동자계는 기본파 성분에 대한 이동자계를 나타내며, 만약 공간고조파가 존재할 경우 각 공간고조파에 대한 이동자계의 이동속도는 식 (2.14)와 같이 기본파 속도와 비교하여, 고조파 차수인 N만큼 작아진다.

$$v_N = \frac{v_1}{N} \tag{2.14}$$

만약 공극 상에 기본파 성분의 이동자계만 존재한다면, 2차측과 이동자계 사이의 상대운동에 의하여, 식 (2.15)으로 표현되는 기본파 슬립이 정의될 수 있다.

$$s_1 = \frac{v_1 - v}{v_1} \tag{2.15}$$

여기서, v_1은 기본파 성분에 대한 이동자계의 속도, v는 2차측 도체의 이동속도를 나타낸다.

NSDLIM의 동작상태에서 2차측 도체판에 유도되는 전압과 전류의 주파수는 식 (2.15)의 슬립에 입력전원의 주파수 f를 곱한 식 (2.16)의 슬립 주파수 f1을 가진다.

$$f_1 = s_1 f \tag{2.16}$$

해석영역 안에서 물체들 간의 상대운동이 가능한 TDS를 이용하여, NSDLIM의 성능해석을 수행할 경우, 기본파 성분에 의한 2차측 도체판의 유도 전압, 전류의 주파수는 식 (2.16)과 같다. FDS를 이용한 NSDLIM의 성능해석 시 1차측에 입력되는 입력전원의 주파수를 원래의 전원 주파수 f 대신 식 (2.16)의 슬립 주파수를 입력할 경우 1차측과 2차측 사이의 상대운동이 없는 FDS의 특성 상 2차측 도체판에 유도되는 주파수는 TDS와 동일하게 된다. 결과적으로 1차측에 전원주파수 f를 입력하고 TDS로 해석한 경우와 1차측에 전원주파수 s1f를 입력하고 FDS로 해석한 경우는 2차측에 동일한 주파수와 동일한 크기를 가지는 유도전류가 발생한다. 이는 곧 슬립 주파수를 이용한 FDS는 TDS와 동일한 성능해석이 가능하다는 것을 의미한다.

만약 이동자가 자기적인 요철구조가 없는 평판일 경우에는 이동자의 이동에도 이동자의

자기적인 형상에는 변화가 없다. 그래서 전류원 해석을 수행한다는 가정 하에 이동자를 정지시키고, 고정자 전기자 코일에 원래의 전원 주파수가 아닌 슬립 주파수인 식 (2.16)를 입력시킨 FDS의 해석결과와 이동자를 속도 v로 이동시키고, 1차측 고정자 전기자 코일에 전원 주파수 f를 입력한 TDS의 해석결과는 동일하다.

② Current sheet 해석모델을 이용한 FDS 해석방법의 타당섬 검증

1차측과 2차측 사이의 상대운동을 1차측에 입력되는 전원주파수의 슬립주파수로 변조하여 성능해석을 수행하는 FDS 해석방법을 검증을 위하여, 기본파 성분만 존재하는 이상적인 해석모델을 이용하였다. 그림 2-라-3과 같이 얇은 current sheet가 사용된 LIM 해석모델을 이용하면, 공극 상에 존재하는 이동자계의 성분을 자유롭게 조절할 수 있다.일반적인 슬롯구조의 선형유도전동기는 슬롯구조와 전기자 코일의 비정현적인 배치로 공극에 극간 거리를 1/2 파장 길이로 가지는 기본파 성분 외에 공간고조파 성분이 포함되어 있다. 이와 같은 공간고조파 성분을 배제하기 위하여, 그림 2-라-3의 해석모델과 같이 얇은 도체판을 고정자의 공극부에 배치하고, 해당 도체판에 극간 거리를 1/2 파장길이로 가지며, 식 (2.17)과 같은 전원주파수를 주파수로 가지는 정현함수의 입력전류를 전류밀도로 배치하였다. 결과적으로 해당 해석모델의 공극부에는 고정자의 기본파 입력전류에 의하여, 오직 기본파 성분의 이동자계만 생성된다.

$$I(t) = I_{peak}\cos\left(2\pi f_1 t - \frac{\pi}{\tau}x\right) \tag{2.17}$$

여기서, I_{peak}는 입력전류밀도의 크기, t는 시간, τ는 극간 거리, x는 이동자의 이동방향으로의 거리를 각각 의미한다.

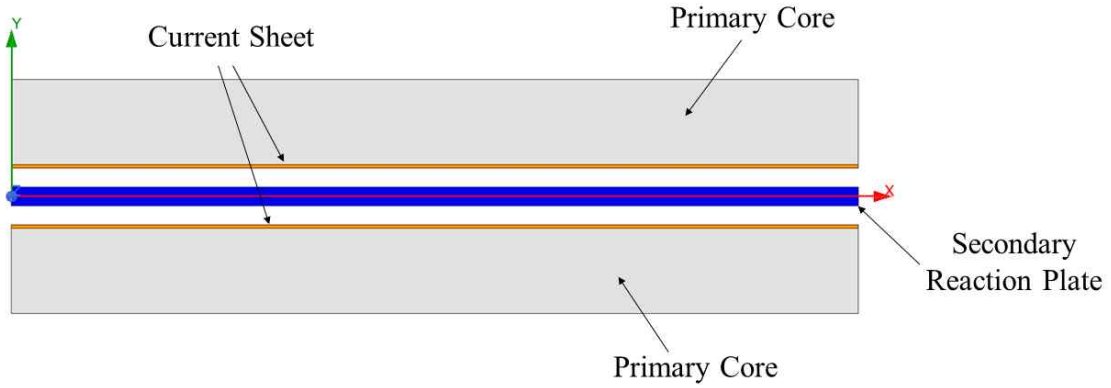


그림 2-라-3 Current sheet가 적용된 양측식 평판형 선형 유도전동기의 유한요소 해석모델

다음으로 해당 해석모델을 해석조건이 다른 2가지 경우에 대하여 TDS 방식으로 성능해석을 진행하였다. 첫 번째 해석조건은 1차측에 입력되는 전원주파수를 f로 고정하고, 2차측에 속도를 슬립에 맞춰 가변하는 것이다. 이는 일반적인 TDS 해석방식에 해당하는 해석조건이다. 두 번째 해석조건은 2차측의 속도 v를 0으로 고정시킨 상태에서 1차측에 입력되는 전원주파수를 슬립주파수로 가변하는 것이다. 이 두 번째 해석조건은 TDS로 수행되기는 하지만, FDS에 해당한다. 이와 같이 2가지 해석조건에 대한 추진력 해석결과 비교를 통하여, 슬립주파수 개념을 이용한 FDS와 TDS의 해석오차에 대한 정량적인 비교를 수행하였다. 동일한 사양을 가지는 그림 2-라-3의 해석모델에 대한 TDS 방식의 해석결과와 FDS 방식에 해당하는 해석결과를 그림 2-라-4에 나타내었다. 그림 2-라-4에 검은 실선은 TDS 방식으로 계산된 슬립에 따른 추진력 해석결과이며, 적색의 원들은 FDS 방식으로 계산된 슬립에 따른 추진력이다. 두 방식의 해석결과들의 비교를 통하여, 공극 자계에 기본파 성분만 존재할 경우 TDS 방식과 FDS 방식의 슬립에 따른 추진력 해석결과는 동일하다는 것을 확인할 수 있었다.

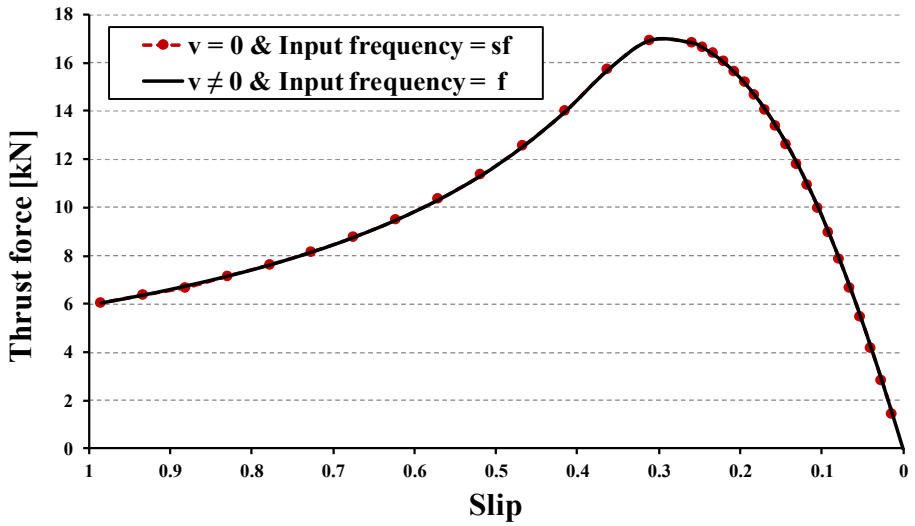


그림 2-라-4 기본파 이동자계만 존재하는 경우 해석방법에 따른 추진력 해석결과 비교

다음으로 그림 2-라-3의 해석모델의 current sheet에 기본파 성분이 아닌 기본파의 1/5의 극간거리를 가지는 5고조파 입력전류만을 존재할 경우 TDS와 FDS의 슬립에 따른 추진력 해석결과를 그림 2-라-5에 나타내었다. 그림 2-라-4와 동일하게 검은색 선은 TDS 해석결과를 적색 원은 FDS 해석방식의 추진력 해석결과를 각각 나타내고 있다. 하지만 기본파만 존재하는 경우의 해석결과인 그림 2-라-4와 달리 그림 2-라-5는 두 해석방식 별 해석결과에 상당한 해석오차가 발생하였다.

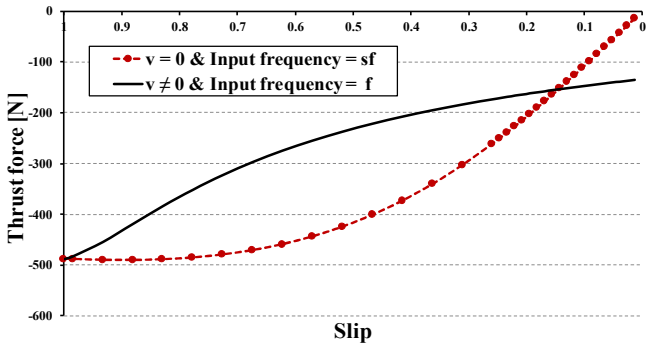


그림 2-라-5 5 공간고조파 이동자계가 존재하는 경우 해석방법에 따른 추진력 해석 결과 비교

그리고 7차 공간고조파만 current sheet에 존재하는 경우에 대한 두 해석방식 별 슬립 별 추진력 해석결과를 그림 2-라-6에 나타내었다.

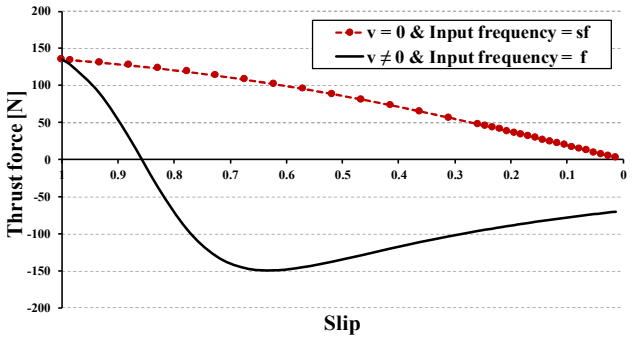


그림 2-라-6 7 공간고조파 이동자계가 존재하는 경우 해석방법에 따른 추진력 해석 결과 비교

결과적으로 그림 2-라-4와 같이 기본파 이동자계만을 가지는 경우 평판형 유도전동기의 슬립 별 추진력 해석결과는 이동자와 고정자 사이의 상대운동을 FDS에서 사용하고 있는 슬립 주파수 개념을 이용한 계산한 결과와 일치한다. 하지만 그림 2-라-5와 2-라-6에 나타나 있는 바와 같이 만약 공간고조파가 존재할 경우에는 슬립 주파수로 계산된 추진력과 이동자가 실제 이동하는 경우의 해석결과는 슬립이 1인 정지 상태를 제외한 모든 슬립구간에서 상당한 차이가 발생한다. 이와 같이 공간고조파에서 해석오차가 발생하는 원인은 공간고조파의 이동자계는 기본파의 이동자계보다 고조파 차수만큼 작은 속도로 이동하므로, 공간고조파에 의한 이동자 도체에 유도되는 유도전류의 주파수는 식 (2.16)의 슬립 주파수와 다르기 때문이다. 5고조파의 공간고조파와 이동자의 상대운동에 의해 이동자의 도체 유도전류의 주파수를 구해보면 식 (2.18)과 같다. 5고조파는 기본파의 이동자계인 v_{s1}의 1/5의 속도로 반대 방향으로 이동하기 때문에, 이동자의 도체의 유도전류의 주파수는 식 (2.16)이 아닌 식 (2.18)과 같이 슬립 s_1의 함수로 표현된다.

$$s_5 f = \frac{-\frac{v_{s1}}{5} - v}{-\frac{v_{s1}}{5}} f = \frac{-\frac{v_{s1}}{5} - v_s(1-s_1)}{-\frac{v_{s1}}{5}} f = (6-5s_1) f \tag{2.18}$$

유사하게 7고주파의 이동자계에 의하여 이동자의 도체에 유도되는 전류의 주파수는 식 (2.19)와 같다.

$$s_7 f = \frac{\frac{v_{s1}}{7} - v}{\frac{v_{s1}}{7}} f = \frac{\frac{v_{s1}}{7} - v_s(1-s_1)}{\frac{v_{s1}}{7}} f = (7s_1 - 6) f \tag{2.19}$$

결과적으로 기본파가 아닌 공간고조파에 의한 이동자 유도전류의 주파수는 식 (2.16)과는 상이한 식 (2.18)과 식 (2.19)와 같은 주파수를 가진다. 그래서 만약 해석하는 NSDLIM이 공간고조파 성분을 가지고 있다면, 이동자의 이동을 식 (2.16)으로 표현되는 기본파 성분에 대한 슬립주파수를 이용하여 고려하는 FDS의 해석결과는 TDS와 다른 값을 가지게 된다.

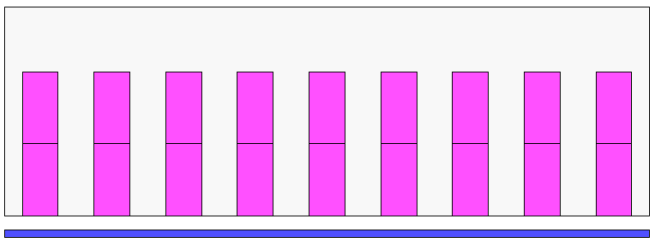
③ 공간고조파(Frequency) solver의 성능해석 오차원인 분석

앞선 분석을 통해 평판형 유도전동기의 공극자속 중 기본파성분에 의한 추진력에 대한 해석결과는 FDS와 TDS가 서로 잘 일치함을 확인하였다. FDS와 TDS의 해석결과 차이는 공극자속 중 공간고조파 성분에 의해서 발생하며, 이는 곧 FDS의 해석오차를 의미한다. 일반적인 전동기들은 고출력을 위하여 슬롯 구조를 사용하고 있으며, NSDLIM 역시 슬롯 구조를 사용하고 있다. 슬롯구조의 전동기에서는 슬롯구조에 의한 공간고조파를 피할 수 없으나, 유도전동기의 동작특성 상 공간고조파가 존재할 경우, crawling 현상으로 효율 및 역률특성이 불리한 고슬립 영역에서 동작할 수 있다는 문제가 있다. 그래서 유도전동기는 공간고조파 저감을 위한 단절 형태의 분포권 권선법과 같은 설계 기술들이 기본적으로 적용되고 있다. 또한 LIM은 대부분 공극 길이가 수 mm 이상으로 크기 때문에, 공극 자속 중 공간고조파 성분의 비중이 상당히 작은 편이다. 결과적으로 NSDLIM는 슬립 주파수 개념이 도입된 FDS를 사용하여, 허용 가능한 해석오차를 가지면서 해석시간이 효과적으로 절감된 특성해석이 가능하다. 비록 FDS는 기본파 성분이 아닌 공간고조파 성분에 대해서는 TDS와 상이한 해석결과가 발생하지만, 잘 설계된 선형 유도전동기의 경우에는 공간고조파 성분이 크기 않기 때문에, 영구자석 전동기에서 자기등가회로가 수행하는 설계 도구로서의 역할을 FDS가 담당할 수 있다. 이와 같은 측면에서 아래 표 2-라-2와 같은 사양의 NSDLIM를 기본파 슬립주파수 개념을 도입한 FDS를 이용하여 이의 슬립 별 추진력을 계산하였다. 이 때, NSDLIM의 극간 거리, 공극의 길이, 고정자 권선법과 같은

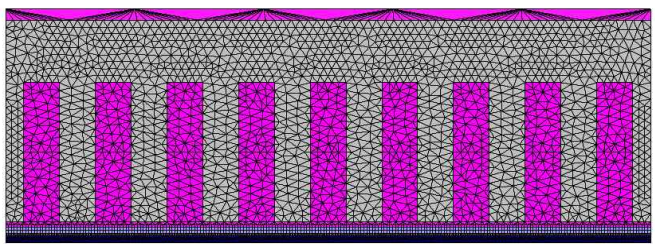
주요 설계 변수들을 변화시켜 가면서, FDS와 TDS 사이의 해석결과와 해석시간을 각각 비교하였다. 해당 성능해석은 2차원 해석으로 진행되었으며, 해석에는 전동기 성능해석 분야에서 연구소 및 산업계에서 많이 사용되고 있는 FEA 상용 SW인 Jmag Designer의 TDS와 FDS를 이용하였다. 그림 2-라-7에 유한요소 해석에 사용된 2차원 해석모델을 나타내었다. 해당 해석모델은 그림 2-라-7에 나타나 있는 바와 같이 주기성을 이용하여 이동방향으로 1극만 모델링되었으며, 이동방향에 수직한 방향으로는 대칭성을 이용하여, 편측식으로 1/2만 모델링 되었다. 해석은 전류원으로 수행되었으며, TDS에서는 2차측 도체판을 각 슬립에 해당하는 속도로 이동시켰으며, FDS에서는 고정자 권선에 입력되는 전류의 주파수를 전원 주파수에 슬립을 곱한 슬립 주파수를 입력하여 해석되었다.

표 2-라-2 설계변수 변화에 따른 FDS 해석오차 검증을 위한 NSDLIM 주요 사양

설계변수	단위	값
Pole pitch	mm	450
Slot pitch	mm	50
Number of Phase	-	3
Slot per pole per phase	-	3
Air gap length	mm	10
Turns per slot	-	4
Stack length	mm	100
Thickness of secondary plate	mm	10
Conductivity of secondary plate	S/m	1,390,000
Input Current	Apeak	1,000

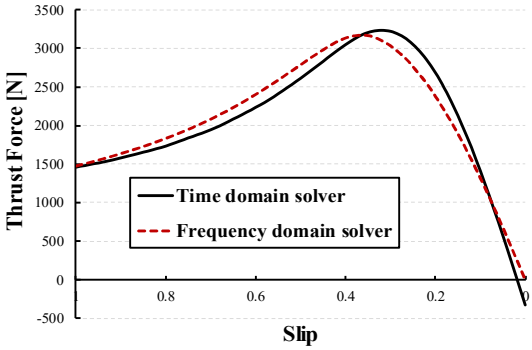


(a) Geometry information

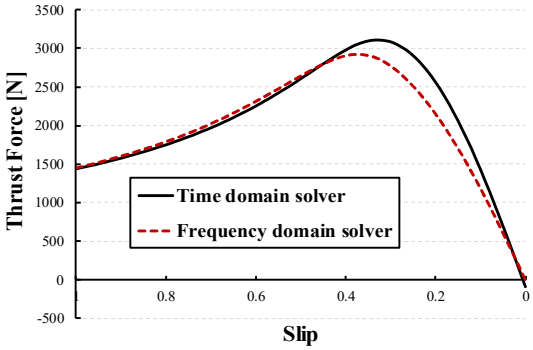


(b) Mesh information

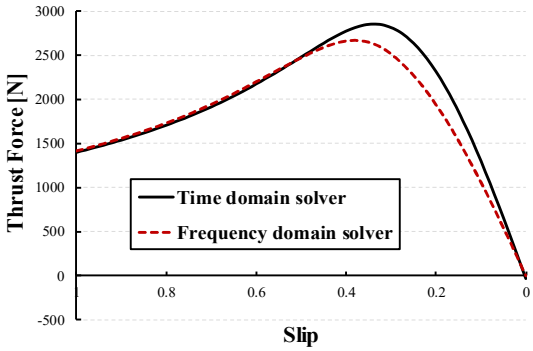
그림 2-라-7 NSDLIM의 유한요소 해석을 위한 1극 1/2 해석모델



(a) Air gap length = 5mm

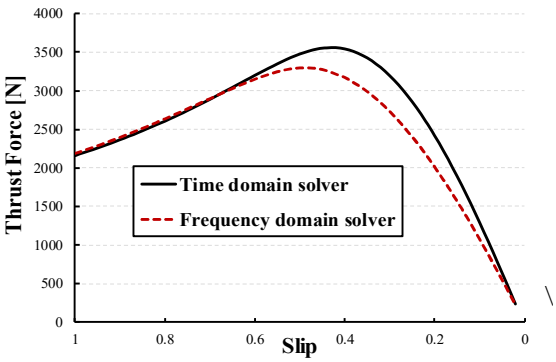


(b) Air gap length = 10mm

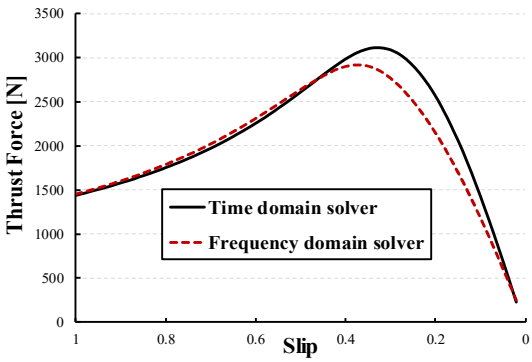


(c) Air gap length = 15mm

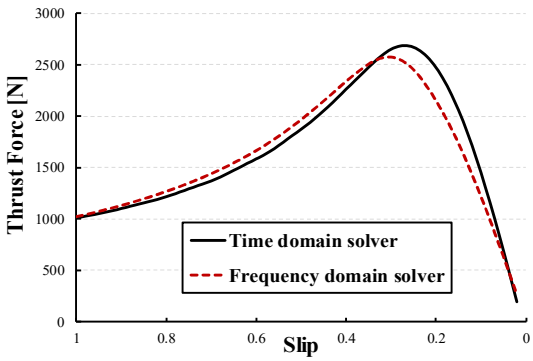
그림 2-라-8 공극길이 변화에 따른 TDS 및 FDS 해석결과



(a) Pole pitch = 360mm

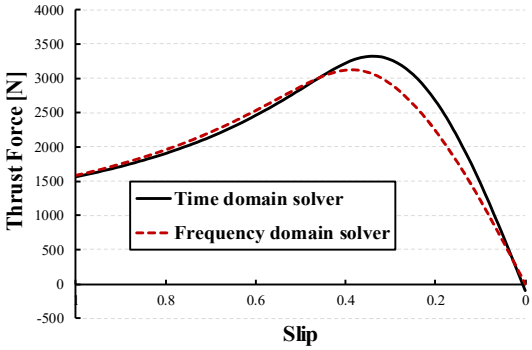


(b) Pole pitch = 450mm

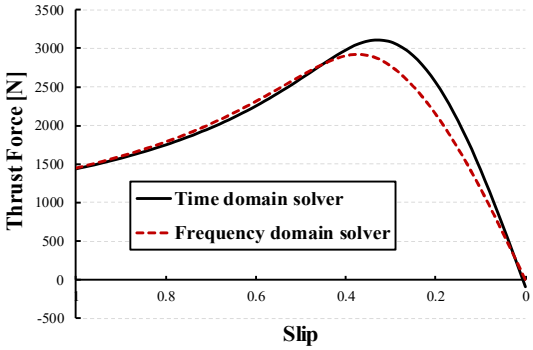


(c) Pole pitch = 5400mm

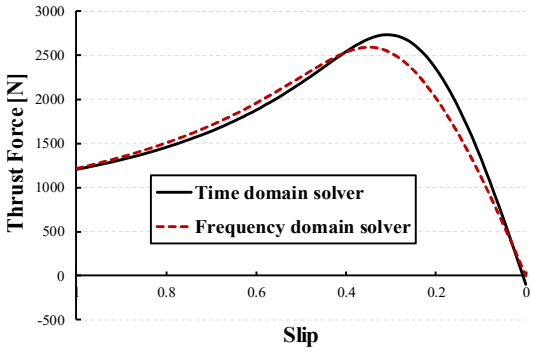
그림 2-라-9 극 피치 변화에 따른 TDS 및 FDS 해석결과



(a) Short pitch = 8/9



(b) Short pitch = 7/9



(c) Short pitch = 6/9

그림 2-라-10 권선법에 따른 TDS 및 FDS 해석결과

표 2-라-3에는 그림 2-라-8에서부터 그림 2-라-10까지의 각 주요 설계변수들의 변화에 따른 해석기법 별 해석시간과 TDS를 기준으로 계산된 FDS의 각 슬립 별 해석오차를 나타내었다. 이때, 두 해석기법에 사용된 해석모델은 동일한 mesh와 재질 및 경계조건이 사용되었다. 표 2-라-3의 해석시간 비교를 통해 FDS가 TDS와 비교하여, 적절한 수준의 해석오차를 가지면서 해석시간이 효과적으로 절감되었다는 사실을 확인할 수 있었다. 이 때, TDS의 경우에는 해석상의 과도시간이 종료된 후의 정상상태 결과를 얻기 위하여, 충분한 해석시간을 설정하였다. 표 2-라-3에 나타나 있듯이 각 해석모델들에 대해서, FDS는 TDS의 약 1/300 수준의 빠른 성능해석이 가능하다. 각 슬립에서의 해석결과는 0.5에서부터 1.0 사이의 고슬립 구간에서는 대부분 5% 미만의 작은 해석오차가 발생하였으며, 0.1에서 0.5까지의 저슬립 구간에서는 5~15% 정도의 해석오차가 발생하였다. 이와 같이 슬립 구간에 따라서 FDS와 TDS 사이의 해석오차가 변화하는 이유는 공극 상에 존재하는 공간고조파에 원인을 두고 있다. FDS는 2차측의 상대운동에 따른 슬립을 슬립 주파수라는 개념을 도입하여 고려한다. 만약 공극에 기본파 성분만 존재하는 경우에는 그림 2-라-4에 나타나 있는 바와 같이 FDS는 TDS 사이의 해석오차는 없다. 하지만 만약 공극 상에 5고조파, 7고조파와 같은 공간고조파 성분이 존재할 경우에는 FDS와 TDS의 해석결과는 그림 2-라-5와 그림 2-라-6에 나타나 있는

바와 같이 상당한 차이가 발생하며, 이는 곧 FDS의 해석오차이다. 공극에 5 공간고조파만 존재할 경우의 FDS와 TDS의 해석결과를 나타내는 그림 2-라-5을 살펴보면, TDS의 슬립에 따른 추진력 해석결과의 절대값은 슬립이 0~0.15정도의 구간을 제외한 모든 구간에서 FDS로 계산한 추진력보다 작다. 5 공간고조파는 기본파와는 반대인 역방향 이동자계이므로, 이로 인한 추진력은 기본파와 반대방향인 음의 추진력이다. 그래서 공극에 기본파와 더불어 5 공간고조파가 존재할 경우에는 0~0.15의 저슬립 구간을 제외한 전 영역에서 FDS로 계산된 추진력은 TDS보다 작아지는 경향이 나타난다. 다음으로 공극상에 7 공간고조파만 존재하는 경우인 그림 2-라-6을 보면, 7 공간고조파는 기본파의 이동자계와 이동방향은 동일하며, 이동속도는 1/7인 이동자계를 발생시키기 때문에 TDS의 해석결과에 나타나 있듯이 슬립이 0.857~1 사이의 구간에서는 양의 추진력이 발생하며, 0~0.857까지는 음의 추진력이 발생한다. 하지만 FDS로 계산된 추진력은 모든 슬립 영역에서 양의 추진력을 가지는 것으로 계산된다. 결과적으로 TDS를 기준으로 계산된 FDS의 해석오차는 슬립에 따라서 변화하며, 또한 공간고조파 성분에 따라서 그 변화 양상도 달라진다. 5 공간고조파의 FDS 해석오차는 슬립이 정확히 1인 지점과 약 0.15 부근인 2개 지점에서 최소가 되며, 슬립이 0.6~0.7 사이에서 최대가 된다. 7 공간고조파의 FDS 해석오차는 슬립이 1과 그 부근에서 최소가 되며, 슬립이 0.5~0.7 부근에서 최대가 된다. 이와 같은 5고조파, 7고조파의 공간고조파에 의해서 FDS의 해석오차가 발생하며, 이와 같은 해석오차는 슬립에 따라서 그 값이 변화하는 복잡한 양상이 나타난다. 결과적으로 NSDLIM의 성능해석에 FDS를 이용할 경우 TDS와 비교하여, 평균적으로 약 10% 수준의 해석오차를 가지는 해석결과를 3% 미만의 빠른 해석시간에 얻을 수 있었다. 더 나아가 FDS의 해석오차는 NSDLIM의 공간고조파 성분이 작을수록 이에 비례하여, 저감되므로 공간고조파 성분을 저감하는 설계가 필요한 NSDLIM의 3차원 성능해석을 위한 해석도구로 아주 적합하다. 끝으로 TDS 기반 NSDLIM의 3차원 해석은 이의 과도한 해석시간으로, FDS 기반의 NSDLIM의 3차원 해석이 경제적 측면을 고려한 유일한 해석기법이다. 2-라-3에는 그림 2-라-8에서부터 그림 2-라-10까지의 각 주요 설계변수들의 변화에 따른 해석기법 별 해석시간과 TDS를 기준으로 계산된 FDS의 각 슬립 별 해석오차를 나타내었다. 이때, 두 해석기법에 사용된 해석모델은 동일한 mesh와 재질 및 경계조건이 사용되었다. 표 2-라-3의 해석시간 비교를 통해 FDS가 TDS와 비교하여, 적절한 수준의 해석오차를 가지면서 해석시간이 효과적으로 절감되었다는 사실을 확인할 수 있었다. 이 때, TDS의 경우에는 해석상의 과도시간이 종료된 후의 정상상태 결과를 얻기 위하여, 충분한 해석시간을 설정하였다. 표 2-라-3에 나타나 있듯이 각 해석모델들에 대해서, FDS는 TDS의 약 1/300 수준의 빠른 성능해석이 가능하다. 각 슬립에서의 해석결과는 0.5~1.0 사이의 고슬립 구간에서는 대부분 5% 미만의 작은 해석오차가 발생하였으며, 0.1~0.5까지의 저슬립 구간에서는 5~15% 정도의 해석오차가 발생하였다. 결과적으로 NSDLIM의 성능해석에 FDS를

이용할 경우 TDS와 비교하여, 평균적으로 약 10% 수준의 해석오차를 가지는 해석결과를 3% 미만의 빠른 해석시간에 얻을 수 있었다. 더 나아가 FDS의 해석오차는 NSDLIM의 공간고조파 성분이 작을수록 이에 비례하여, 저감되므로 공간고조파 성분을 저감하는 설계가 필요한 NSDLIM의 3차원 성능해석을 위한 해석도구로 아주 적합하다. 끝으로 TDS 기반 NSDLIM의 3차원 해석은 이의 과도한 해석시간으로, FDS 기반의 NSDLIM의 3차원 해석이 경제적인 유일한 해석기법이다.

표 2-라-3 주요 설계변수 변화에 따른 FDS 해석시간 및 해석오차

구분		공극길이			극간 간격			권선법		
		5 mm	10 mm	15 mm	360 mm	450 mm	540 mm	단절 8/9	단절 7/9	단절 6/9
해석시간 [sec]	TDS	32,026	34,811	41,773	27,848	34,811	55,697	36,895	34,811	33,223
	FDS	115	125	153	98	125	205	127	125	118
슬립 별 해석오차	1.0	0.6%	0.9%	1.2%	1.2%	0.9%	0.6%	0.9%	0.9%	1.0%
	0.9	3.1%	1.7%	1.4%	1.3%	1.7%	2.4%	1.8%	1.7%	2.5%
	0.8	5.3%	2.3%	1.6%	1.1%	2.3%	3.9%	2.4%	2.3%	3.6%
	0.7	6.8%	2.7%	1.7%	0.3%	2.7%	4.8%	2.8%	2.7%	4.2%
	0.6	7.3%	2.6%	1.4%	1.6%	2.6%	5.1%	2.6%	2.6%	4.3%
	0.5	6.4%	1.3%	0.0%	5.3%	1.3%	4.9%	1.0%	1.3%	3.3%
	0.4	2.5%	2.6%	3.8%	10.5%	2.6%	3.4%	3.5%	2.6%	0.2%
	0.3	6.0%	10.2%	10.4%	14.5%	10.2%	2.8%	11.1%	10.2%	7.5%
	0.2	11.6%	16.1%	16.0%	16.8%	16.1%	13.0%	16.6%	16.1%	14.1%
	0.1	6.8%	17.0%	18.4%	16.6%	17.0%	16.2%	17.3%	17.0%	15.4%

④ NSDLIM의 2차원 해석과 3차원 해석의 비교를 통한 3차원 해석의 필요성

과거 여러 연구들에서 3차원 유한요소해석에 필요한 큰 메모리 용량과 과도한 계산시간이라는 문제점을 해결하기 위하여, 2차측 도체의 저항률을 증가시킨 2차원 유한요소해석으로 3차원 해석과 동등한 해석결과를 얻고자 하였다.

$$\rho_{et} \simeq \frac{1}{K_t}\rho_e \tag{2.20}$$

$$\left(k^2\alpha_e^2-1\right) = \left(k^2\alpha^2-1\right)\left[1-\frac{k\frac{2\alpha}{W_a}\tanh\frac{W_a}{2\alpha}}{\left(1-\frac{1}{\alpha}\tanh\frac{W_a}{2\alpha}\frac{\triangle_1}{\triangle_2}\right)}\right]$$

$$\simeq \left(k^2\alpha^2-1\right)\underbrace{\left[1+\frac{2k\alpha^2\triangle_2}{W_a\triangle_1}\right]}_{\hat{K_t}}$$

$$\left(\therefore \frac{\triangle_2}{\triangle_1} = \frac{1 - \triangle \tanh \frac{kW_a}{2}}{\tanh \frac{kW_a}{2} - \triangle} \right)$$

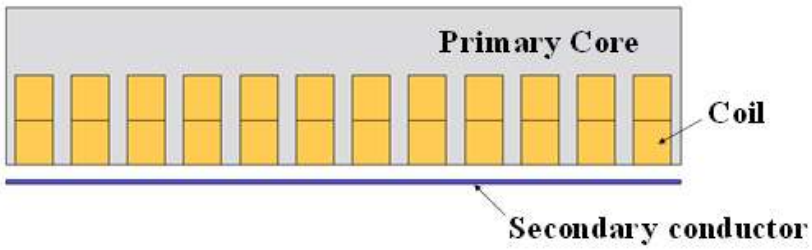
$$\left(\triangle = \frac{\tanh \frac{kW_a}{2} + \frac{\rho_c}{\rho_o} \tanh \left(\frac{kW_c}{2} - \frac{kW_o}{2} \right)}{1 + \frac{\rho_c}{\rho_o} \tanh \frac{kW_o}{2} \tanh \left(\frac{kW_c}{2} - \frac{kW_o}{2} \right)} \right)$$

단, k는 극 피치의 역수에 π를 곱한 파수, ρ_c는 액티브 영역에서의 2차측 도체판 도전율, ρ_o는 오버행 영역에서의 2차측 도체판의 도전율, W_a는 액티브 영역의 폭, W_o는 오버행 영역의 폭을 각각 의미한다.

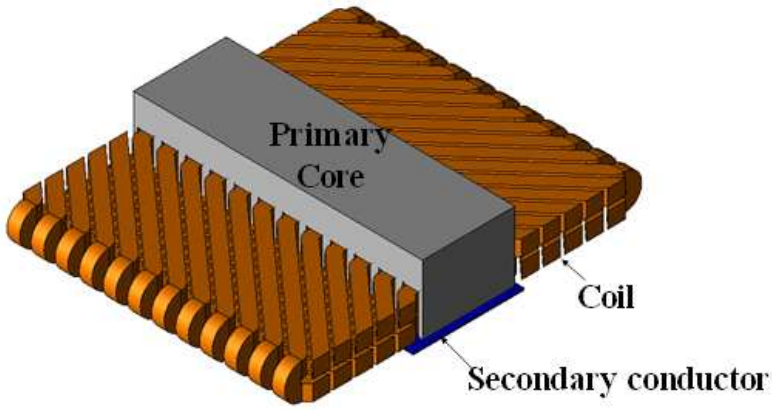
기존 도체판의 저항률을 변경하여, 3차원 유한요소해석결과를 얻을 수 있는지를 확인하기 위하여, 표 2-라-4의 사양을 가지는 LIM에 대한 2차원 및 3차원 유한요소해석을 진행하였다. 유한요소해석 모델은 그림 2-라-11에 나타나 있으며, 그림 2-라-11 (a)에 2차원 해석모델을 그림 2-라-11 (b)에 3차원 해석모델을 각각 나타내었다.

표 2-라-4 2차측 도전율 변경의 유효성 검증을 위한 LIM 사양

설계변수	단위	값
Pole pitch	mm	900
Slot pitch	mm	75
Number of Phase	-	3
Slot per pole per phase	-	4
Air gap length	mm	20
Turns per slot	-	1
Stack length	mm	288
Thickness of secondary conductor	mm	10
Input Current	Apeak	3,500



(a) 2차원 해석모델



(b) 3차원 해석모델

그림 2-라-11 유한요소해석 모델

그림 2-라-12에 주어진 사양의 LIM의 해석모델에 대한 2차원과 3차원 해석결과를 나타내었다. 해당 그림에 나타난 2차원 해석결과는 2차측 도체판의 저항률을 1배, 5배, 7배로 증가시킨 결과들이다. 하지만 그림에 나타나 있듯이 2차측 도체판의 저항률을 아무리 증가시키더라도, 파란 실선으로 표현되는 3차원 유한요소해석결과와 동등한 2차원 유한요소해석결과를 얻을 수 없었다. 이는 2차측 도체판의 저항률 변경만으로는, 실제 LIM에서 발생하는 3D 자로에 따른 누설 리액턴스 증가 및 유효 공극의 증가와 같은 3D 현상들을 모두 고려할 수 없다는 것을 의미한다. 결과적으로 LIM의 정확한 성능해석을 위해서는 3차원 유한요소해석이 필요하다. 표 2-라-5에는 2차원 해석과 3차원 해석이 필요한 mesh, 메모리 양 및 해석시간을 각각 비교한 것이다. 비록 3차원 해석이 2차원과 비교하여, 과도한 해석비용이 발생하기는 하지만, 정확한 성능해석을 위해서는 3차원 해석이 필수적이다. 마지막으로 본 2차원 유한요소해석 및 3차원 유한요소해석은 모두 앞에서 정리된 FDS 기반 유한요소해석이며, 만약 TDS 기반 유한요소해석을 사용하였다면, 표 2-라-5의 해석시간은 최소 수십배 이상 증가되어야 한다.

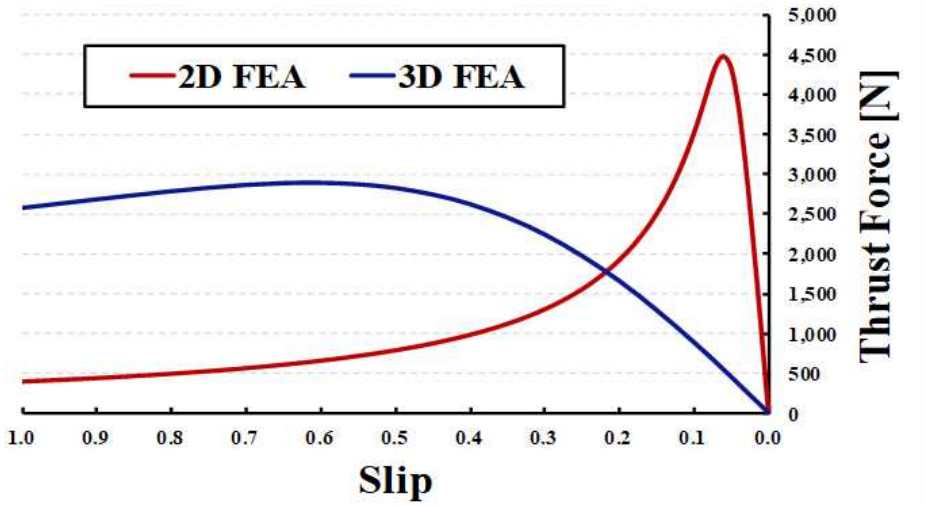


그림 2-라-12 슬립에 따른 추진력 해석결과 (2D, 3D)

표 2-라-5 2차원 및 3차원 유한요소해석 비용 비교

구분	Mesh 수 [개]	메모리 [Mbyte]	해석시간 [sec]
2차원 유한요소해석	8,808	156.5	9,052
3차원 유한요소해석	878,863	3,605.8	304

(2) NSDLIM 기본 설계 모델 3차원 유한요소 해석

3차원 해석모델을 이용하면 추진/부상/안내 일체형 NSDLIM의 횡방향 힘에 해당하는 부상력을 해석할 수 있다. 그림 2-라-13에 3차원 해석 시 사용된 해석 모델링 및 Mesh도를 나타내었다. 그림 2-라-13에서 보는 바와 같이, 양측식 모델이지만 해석 시간 단축을 위하여 경계조건을 고려한 편측식 모델링을 수행하였으며, mesh element의 개수는 약 27만개, 사용된 메모리의 크기는 817Mbyte, 슬립 0에서부터 1사이를 40개로 분할하여 모든 슬립에 대한 해석시간이 약 15시간 소요되었다. 해석시간의 경우는 사용된 컴퓨터 하드웨어 사양에 따라 증가 혹은 감소될 수 있다.

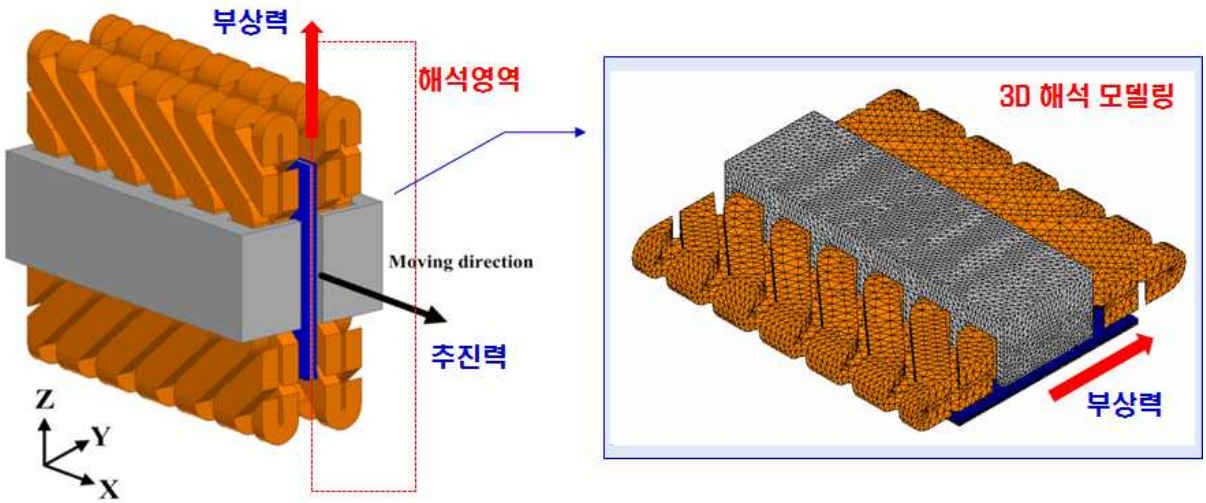


그림 2-라-13 추진/부상력 해석을 위한 3차원 해석 모델링 및 Mesh

(가) 추진력 특성 해석

먼저 NSDLIM의 추진력 특성을 분석하였다. 그림 2-라-13의 2극 모델에 대한 3차원 해석을 통해 추진력을 계산할 수 있으며, 이 계산결과는 그림 2-라-14와 같다. 부상력의 경우와 반대로 1차측과 2차측의 중심 간 거리가 증가할수록 추진력은 감소하는 것을 아래 그림에서 확인할 수 있다. 중심 간 거리가 0mm인 경우의 추진력이 모든 슬립 구간에서 제일 크며, 중심 간 거리가 증가할수록 추진력은 모든 슬립 구간에서 감소하는 경향을 나타낸다. 추진력의 감소정도는 본 과제에서 선정한 모델에서는 90mm를 기준으로 이보다 작은 구간에서는 그리 크지 않았으나, 90mm보다 큰 구간에서는 상대적으로 급격한 추진력 감소가 발생하였다. 이는 1차측과 2차측의 중심 간 거리가 특정한 값 이상으로 증가하면 오버행 영역이 감소하여, 추진력이 발생되는 2차측의 Active영역에서의 추진력 발생을 위한 성분의 와전류가 감소하기 때문이다. 추진/부상/안내 일체형 NSDLIM의 슬립 별 추진력 특성곡선은 공극이 상대적으로 큰 회전형 유도전동기의 특성곡선의 형태이다. 하지만 실제적인 LIM의 슬립 별 추진력 특성 곡선은 종방향 단부효과로 인하여 슬립이

0이 지점에서도 음이나 양의 추진력이 발생하는 특성이 나타난다. 이는 그림 2-라-14의 2극 해석모델에 주기경계조건을 적용하여 수행된 3차원 해석 결과와는 다른 경향으로, 이동자의 길이가 유한하여 입구단과 출구단에서 정상 이동자계와 상이한 속도로 진행되는 입구단파와 출구단파에 의한 현상이다.

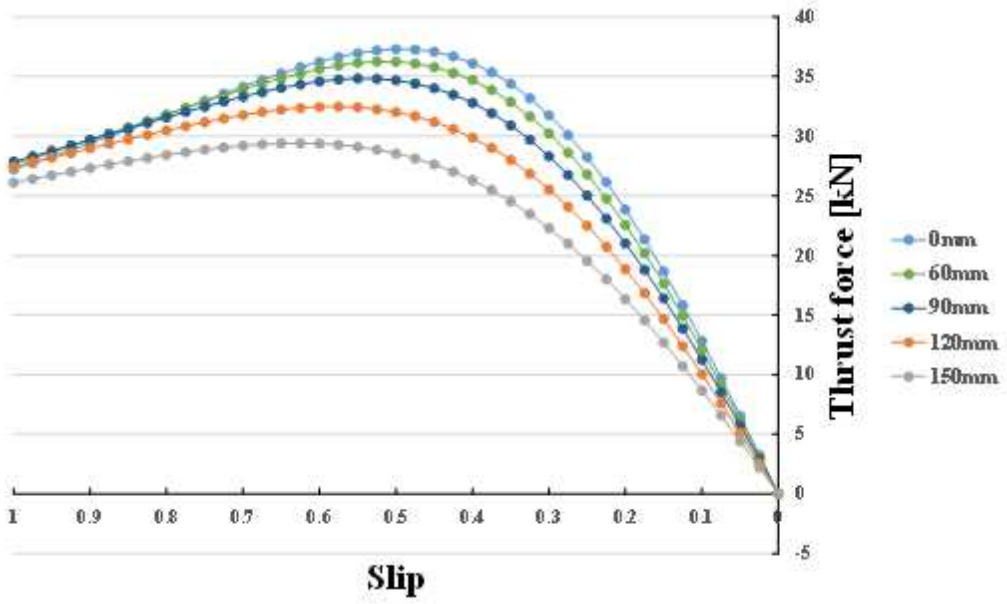
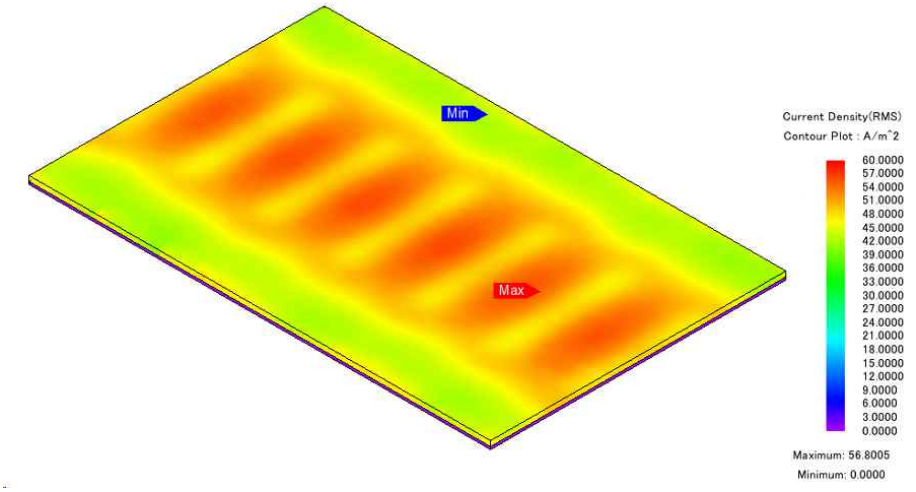


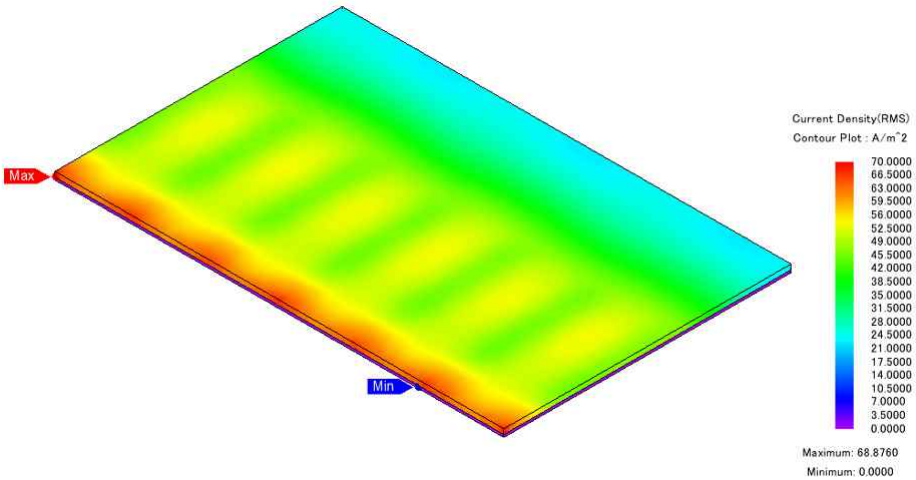
그림 2-라-14 Primary와 Secondary 중심 간 거리에 따른 Thrust force(추진력) 해석결과

(나) 부상력 특성 해석

그림 2-라-15는 NSDLIM의 부상력 해석을 위하여 1차측과 2차측의 중심이 서로 일치하는 경우 (a)와 일치하지 않는 offset이 존재할 경우 (b)에 대한 2차측의 와전류 분포를 각각 보여준다. 그림 2-라-15에서 보는 바와 같이, 1차측과 2차측의 중심이 서로 일치하는 경우 (a)는 NSDLIM의 2차측에 발생하는 와전류 분포가 횡방향으로 서로 대칭이나, 1차측과 2차측의 중심이 서로 일치하지 않는 경우(b)는 2차측에 발생하는 와전류 분포가 횡방향으로 서로 비대칭임을 확인할 수 있으며, 이러한 와전류의 횡방향으로의 비대칭이 부상력을 위한 lateral force의 원인이 된다는 것을 확인할 수 있다.



(a) 중심 일치 (Offset = 0mm)



(b) 중심 불일치 (Offset = 90mm)

그림 2-라-15 1차측과 2차측의 중심 간 거리에 따른 2차측 와전류 분포패턴

부상력 해석을 위해서는 1차측과 2차측의 중심 사이의 거리가 증가함에 따라 그림 2-라-15에 나타나 있는 z축 방향의 lateral force를 계산하여야 한다. 그림 2-라-16은 1차측과 2차측의 중심 사이의 거리를 0mm(중심이 서로 일치), 60mm, 90mm, 120mm, 150mm로 변화시켜 가면서 이때의 lateral force를 계산한 결과이다. 모든 결과들은 슬립이 0에서부터 1까지 모터링 모드에 해당하는 모든 슬립에 대하여 계산되었다. 슬립 간 간격은 앞서 설명한 바와 같이 총 40개로 분할되었다. 그림 2-라-16의 그래프에서 x축은 슬립을 나타내며, y축은 lateral force인 부상력을 나타낸다. y축의 lateral force는 1차측이 받는 힘으로 계산한 것으로 실제 이동자인 2차측은 이와 반대인 양의 값을 가진다. 결과적으로 이동자인 2차측에서는 양의 z축 방향으로 향하는 부상력이 발생하였다. 1차측과 2차측의 중심 간 거리가 증가할수록 부상력의 크기는 증가하는 경향이 나타나지만 중심 간 거리가 증가하더라도 부상력에 별다른 증가가 발생하지 않는 지점이 존재한다. 본

과제에서 선정한 NSDLIM의 사양에서는 이 값이 약 120mm으로, 1차측과 2차측의 중심 간 거리가 120mm를 기준으로 이보다 더 증가하더라도 이에 따른 부상력의 증가는 크지 않았다. 부상력은 또한 슬립 크기에도 영향을 받았으며, 1차측과 2차측의 중심 간 거리가 고정된 상태에서는 슬립이 증가할수록 부상력이 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 본 과제에서 검토한 사양의 부상력은 목표 부상력 대비 상당히 부족하였다. 이는 2차측의 재질 및 형상 재설계(Ladder type 적용, 공극 저감, 2차측 두께 저감 등)를 통해 추진력 저하 없이 부상력 개선이 가능할 것으로 사료되며, 제어적 측면에서도 부하각 조정 등을 통하여 추진력 대비 부상력 향상이 가능할 것으로 예상된다. 끝으로 본 해석에서 NSDLIM의 입력전류는 7kA이다.

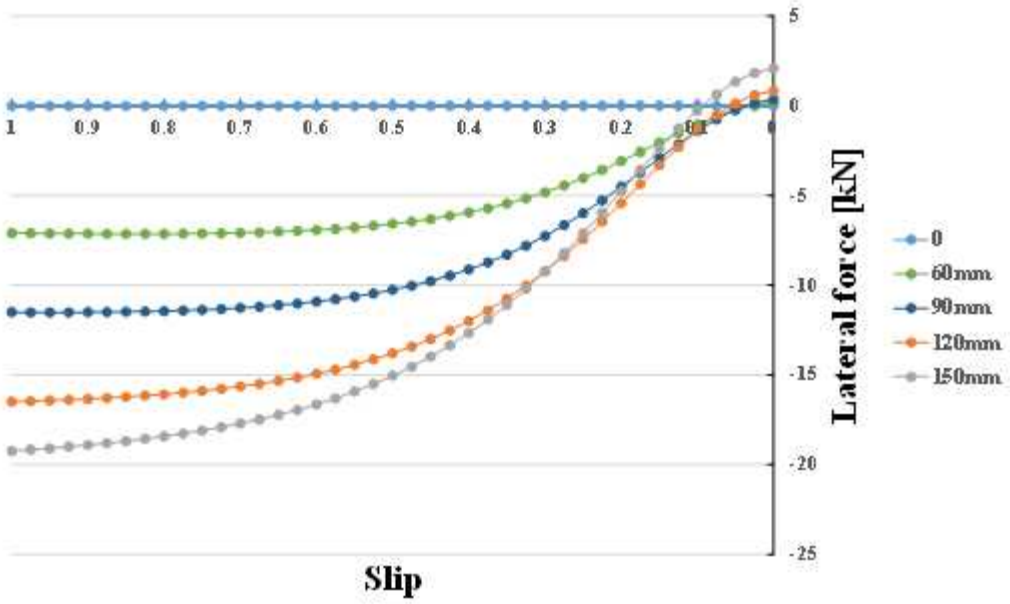
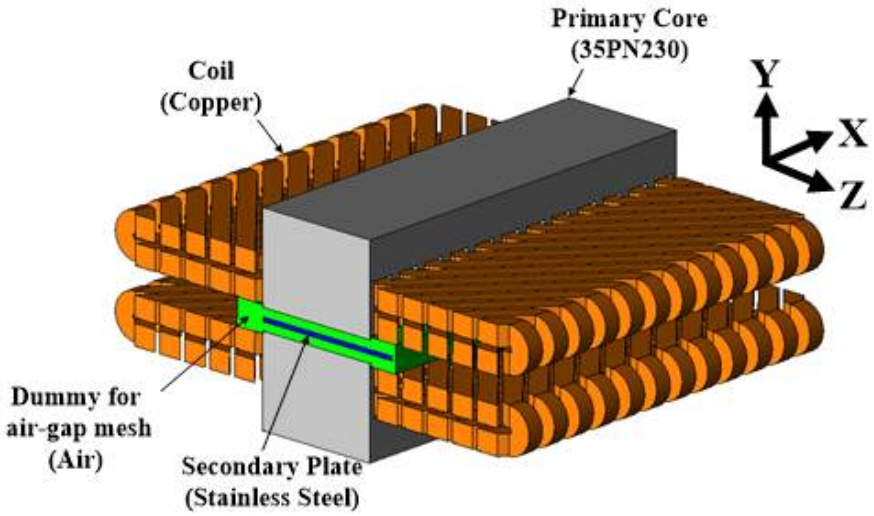


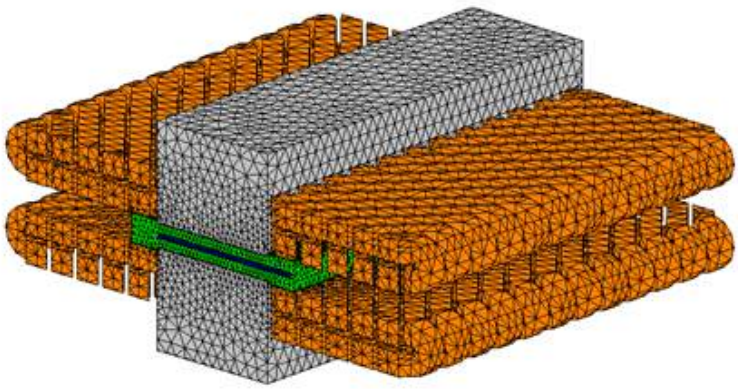
그림 2-라-16 Primary와 Secondary 중심 간 거리에 따른 lateral force(부상력) 해석결과

(3) NSDLIM 상세 설계 모델 3차원 유한요소 해석

최종 상세 설계된 NSDLIM의 성능해석을 위해서, 그림 2-라-17과 같이 1극 full 모델이 사용되었다. 2절에서 사용된 대칭성을 이용한 편측 해석모델과 달리 본 절에서는 양측이 모두 모델링되었다. 이는 1차측과 2차측 사이의 좌우 공극이 불일치하는 비대칭 상황에서 발생하는 안내력을 정확하게 해석하기 위해서이다.



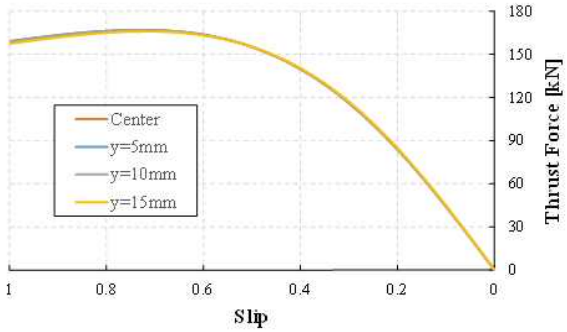
(a) 3차원 해석모델 형상



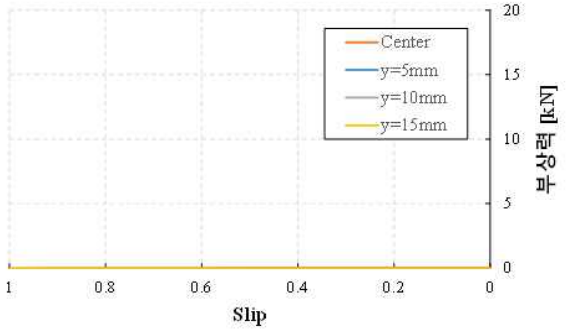
(b) Mesh

그림 2-라-17 상세 설계모델의 성능해석을 위한 3차원 해석모델 (1극 full 모델)

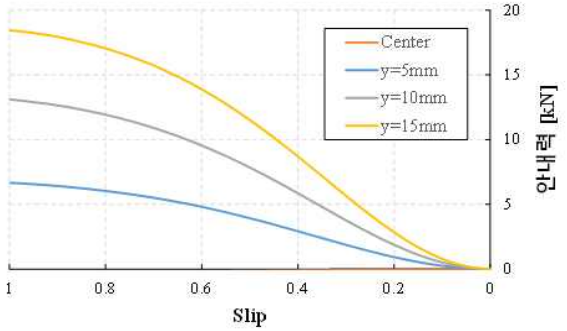
슬립 주파수가 적용된 FDS 기반 3차원 유한요소해석을 통하여, 우선 추진력을 해석하였다. NSDLIM의 2차측 이동방향은 x축방향이며, y축 방향으로 변위가 발생하여 1차측의 중심과 2차측의 중심이 일치하지 않는 비대칭성이 발생하면 부상력이 발생하게 된다. 다음으로 만약 z축 방향으로 2차측 변위가 발생하면, 1차측과 2차측 사이의 좌우 공극에 불균일이 발생하여, 2차측이 평형위치로 복원하려는 안내력이 발생하게 된다. 이제 각 경우에 대한 해석결과를 그림 2-라-18과 그림 2-라-19에 나타내었다. 그림 2-라-18은 z축 변위 없이 y축 변위만 발생한 경우에 대한 추진력, 부상력, 안내력 해석결과를 나타내었다. 그림 2-라-19는 이와 반대로 y축 변위없이 z축 변위만 발생한 경우의 추진력, 부상력, 안내력 해석결과이다.



(a) 슬립 별 추진력

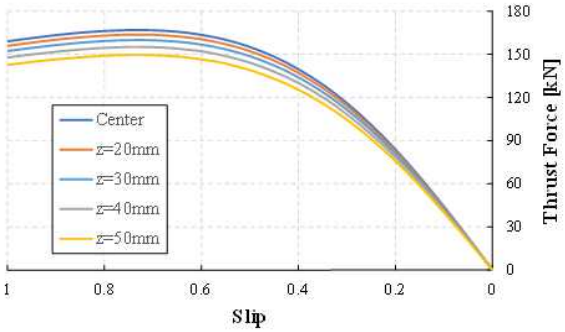


(b) 슬립 별 부상력

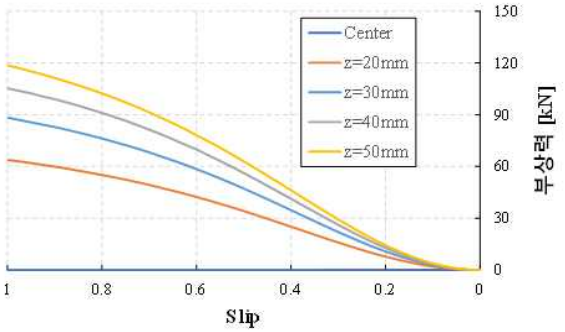


(c) 슬립 별 안내력

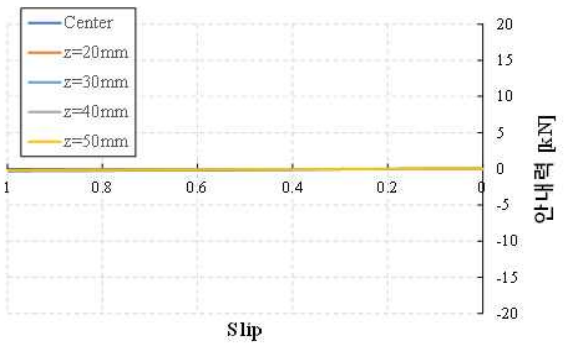
그림 2-라-18 y축 변위에 따른 3차원 해석결과



(a) 슬립 별 추진력



(b) 슬립 별 부상력



(c) 슬립 별 안내력

그림 2-라-19 z축 변위에 따른 3차원 해석결과

마. NSDLIM 축소-회전형 시험기 설계 및 제작

(1) NSDLIM 축소-회전형 시험기 개념 및 구조

일반적인 LIM 시험기는 중·저속으로 회전하기 때문에 회전 방향을 종방향으로 설계하여도 문제가 없다. 그러나 본 시험기의 경우 앞선 상세 설계 모델의 축소형 모델일지라도 회전속도는 상당히 빠르기 때문에 시험 안정성을 고려하여 종방향 회전이 아닌 횡방향 회전을 하도록 설계하였다. 시험 환경의 공간적·비용적인 제약으로 인해 무한 궤도를 가지는 회전형 시험기로 설계하였고, 이로 인해 선형유도전동기의 특징인 단부 효과는 발생하지 않는다. 또한, 엔코더(Encoder)를 회전자 상단부에 설치하여 각속도 및 각가속도를 측정한 후 동역학적 계산을 통해 추진력을 계산한다. 시험기의 구조를 살펴보면 회전자는 리액션 플레이트를 지지해주는 녹색 회전판과 회전판에 부착되어 링의 구조를 가지는 리액션 플레이트로 구성되어 있다. 고정자는 양측식 구조를 고려하여, 외측 고정자와 내측 고정자로 구성되어 있으며 권선이 감겨있다. 또한, 성능 시험 시 고정자의 위치를 고정하기 위해 Housing-Stator가 고정자의 외측을 감싸고 있으며 고정자 및 회전자를 지지해주는 Plate-Base와 Plate-Base를 지지해주는 Frame-Base가 있다. Shaft는 중앙에 회전체의 부상을 위해 고정된 Shaft-Boss와 회전자와 연결되어 회전하는 Shaft가 존재하고 그 사이에는 회전을 위한 베어링이 부착되어 있다. 또한, DSLIM의 부상 시 추진력 특성 분석을 위해 Shaft의 최하단부에 회전자의 높이 조절을 할 수 있는 Ball-Screw가 부착되어 있다.

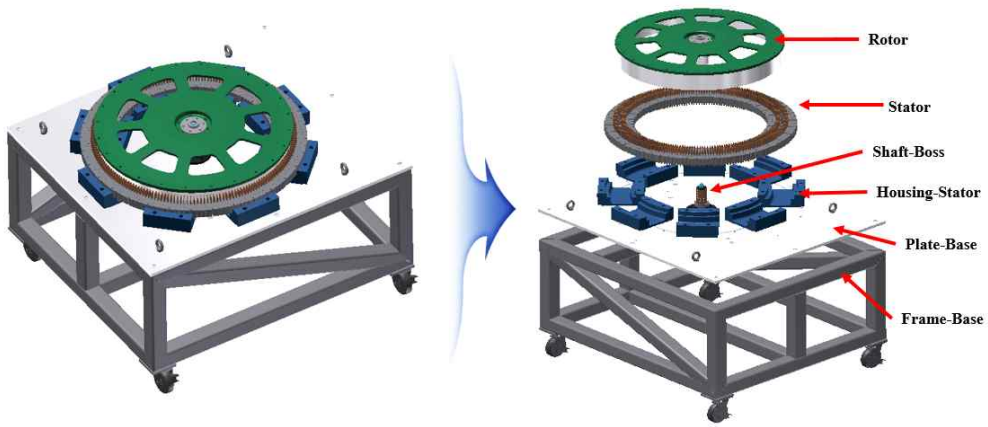


그림 2-마-1 NSDLIM 축소-회전형 시험기 구조도

(2) NSDLIM 축소-회전형 시험기 설계

(가) 축소-회전형 시험기의 설계 프로세스

그림 2-마-2는 축소-시험기의 설계 프로세스이며, 일반적인 LIM의 설계 프로세스를 참고하였다. 정격 속도, 극간격 등과 같은 초기 설정 값을 선정한 후 부하 계산을 통해 목표 견인력-토크 곡선을 도출하였고, 이를 통해 시험기의 전기적인 용량을 계산하였다. 전기적인 용량이 산정됨에 따라 상전압, 상전류 등과 같은 세부적인 전기적 사양을 계산하였고, 1차측과 2차측의 주요 치수를 계산하여 최종적인 축소-회전형 시험기의 설계하였다.

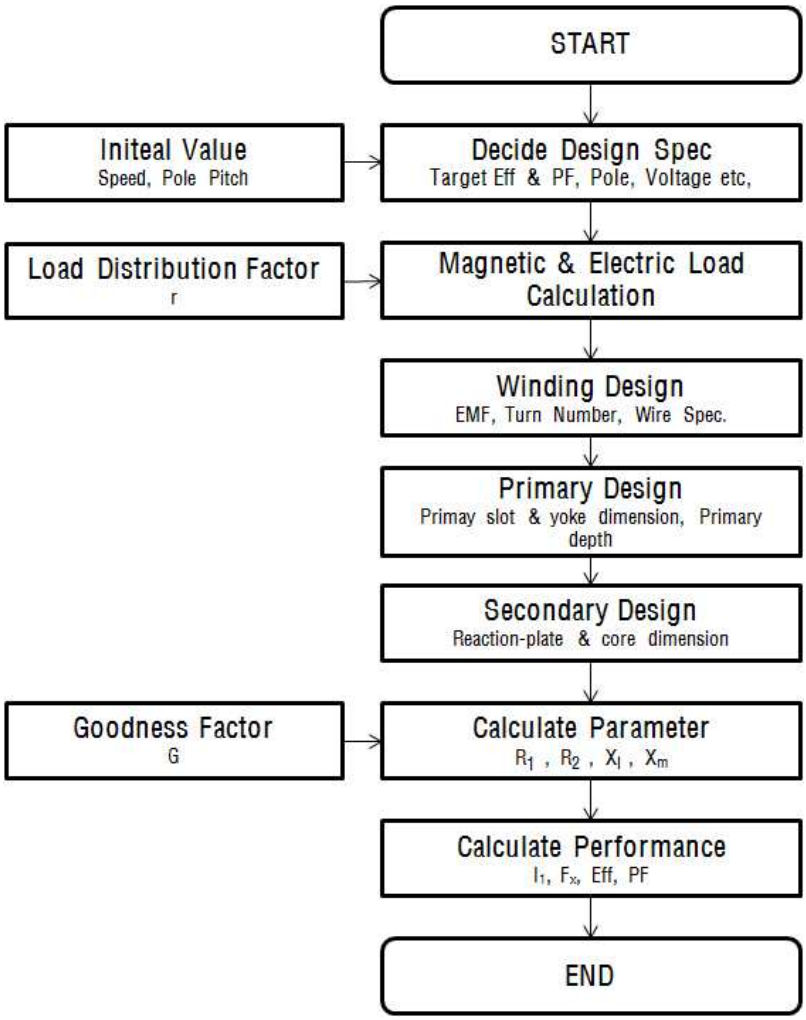


그림 2-마-2 축소-회전형 시험기 설계 순서도

(나) 축소-회전형 시험기의 사이즈 및 회전체(부하) 무게 선정

초기 설계를 위해 먼저 상세 설계 모델의 사이즈를 기준으로 시험기의 사이즈를 선정한 후 그림 2-마-3과 표 2-마-1에 상세 설계 모델의 주요 사이즈를 도시하였다. 주요 사이즈는 극간격은 900mm, 극수는 28극, 주기 모델의 1차측 1 moudle의 길이는 1800mm이다.

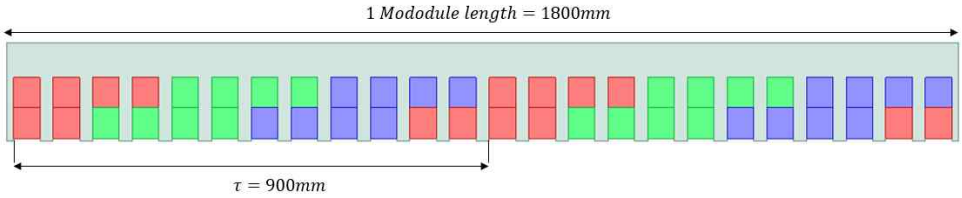


그림 2-마-3 NSDLIM 축소-회전형 시험기 구조도

표 2-마-1 상세 설계 모델의 주요 사이즈

사양	값	사양	값	사양	값
극간격[τ]	900[mm]	극수	28	1차측 1 module 길이	1800[mm]

축적비는 상세 설계 모델의 사이즈를 바탕으로 임의적으로 1/4로 선정하였고, 선정된 축적비를 적용하였을 경우 시험기의 사이즈는 표 2-마-2와 같다. 여기서 극수는 축적비를 적용하지 않고 임의적으로 선정하였다.

표 2-마-2 축소-회전형 시험기 주요 사이즈

사양	값	사양	값	사양	값
극간격[τ]	225[mm]	극수	16	1차측 1 module 길이	450[mm]

선정된 시험기의 사이즈를 통해 회전체의 외경을 계산할 수 있다. 그림 2-마-4는 2차측 회전체 외경의 계산을 위해 간단히 표기한 그림이며, 극간격과 극수를 곱하여 2차측 회전체의 원주를 구한 후 외경(D)을 아래와 같이 계산하였다. 계산 결과 외경은 1146.5mm으로 제작성을 고려하면 소수점 단위의 정밀 가공은 어렵기 때문에 2차측 회전체의 외경 값을 정수 값인 1100mm로 선정하였다.

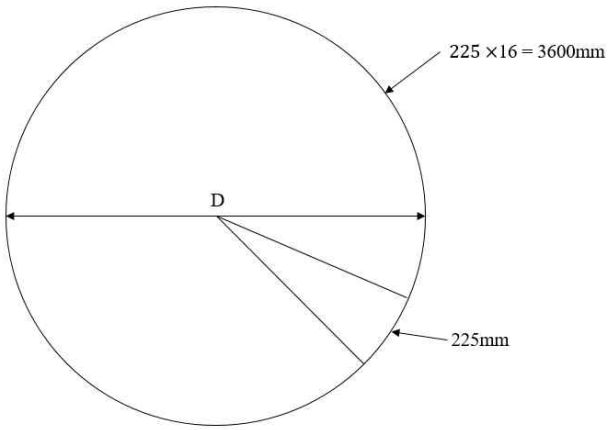


그림 2-마-4 축소-회전형 시험기의 2차측 회전체 외경 계산

$$3600 = \pi \times D$$

$$D = \frac{3600}{\pi} = 1146.5mm \simeq 1.1m$$

2차측 회전체의 외경의 재선정으로 인해 회전체의 원주, 극간격, 1차측 1 module의 길이를 아래와 같이 계산하였으며, 최종적인 사이즈를 그림 2-마-5, 2-마-6에 도시하였다.

$$2\text{차측 회전체의 원주} = \pi \times 1100[mm] = 3454[mm]$$

$$P \times \tau = \pi \times D$$

$$\tau = \frac{\pi \times D}{P}$$

$$\tau = \frac{\pi \times 1100}{16} = 215.9845[mm] \simeq 216[mm]$$

$$1\text{차측 1 module의 길이} = \tau \times 2 = 216 \times 2 = 432[mm]$$

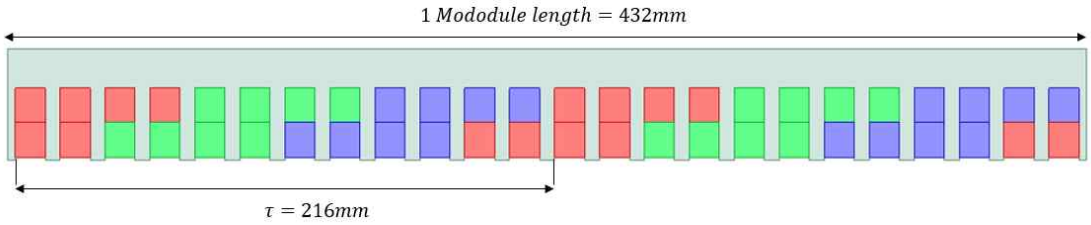


그림 2-마-5 축소-회전형 시험기의 주요 사이즈

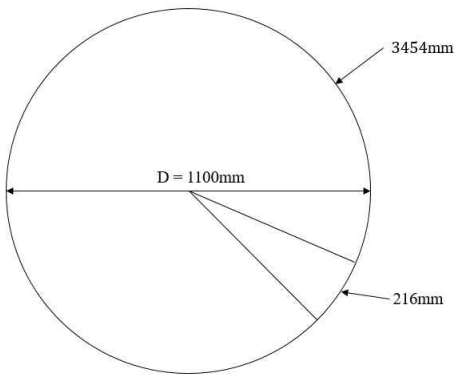


그림 2-마-6 축소-회전형 시험기의 2차측 회전체 사이즈

2차측 회전체의 원주 값을 통해 분당 회전수를 계산하여 선속도를 선정하였다. 시험 안전성을 고려하여 최고 rpm은 1000으로 임의 선정하였으며, 이때의 회전체의 선속도는

207.24[km/h]이다. 여기서 선속도를 200km/h로 하면 최대 회전수는 965rpm이다.

회전체의 무게(부하)를 선정하기 위해 그림 2-마-7에 2차측 회전체의 구조를 간단히 나타내었다. 2차측 회전체의 회전을 위한 구조물인 녹색 원판 재질의 경우 Aluminum 또는 Stainless_Steel을 사용하였고, 2차측 회전체의 재질은 Stainless_Steel로 선정하였다. 원판의 두께는 10mm로 임의 선정하였고, 원판의 외경은 2차측 회전체의 외경과 같은 1100mm이다. 상세 설계 모델의 해석 결과를 통해 2차측 회전체의 두께는 10mm, 적층 폭은 경험적인 설계 기법을 적용하여 1차측 적층길이인 50mm의 1.4배인 70mm로 선정하였다.

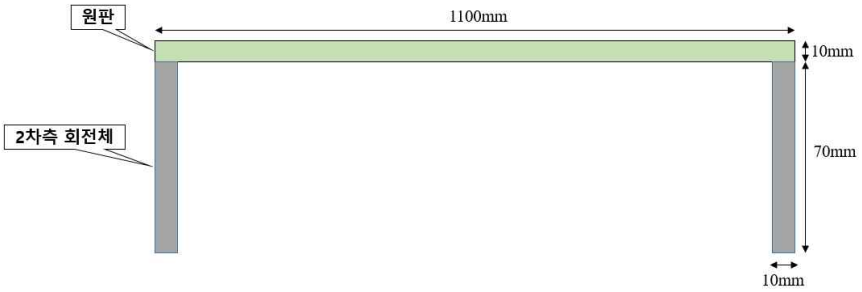


그림 2-마-7 축소-회전형 시험기의 간략화된 회전체 구조도

정확한 회전체의 부하 산정을 위해서 원판의 재질의 비중에 따른 2차측 회전체의 전체 무게를 다음과 같이 계산하였다.

$$Aluminum\text{의 비중} = 2.56\times10^{-6}[kg/mm^3]$$

$$Steel\_Stainless\text{의 비중} = 7.93\times10^{-6}[kg/mm^3]$$

① 원판의 무게

$$\text{면적} = \pi\times(D/2)^2 = \pi\times(550)^2 = 950{,}332[mm^2]$$

$$\text{부피} = \text{면적}\times\text{두께} = 950{,}332\times10 = 9.50332\times10^6[mm^3]$$

$$1)\ Aluminum = 9.50332\times10^6\times2.56\times10^{-6} = 24.3285kg$$

$$2)\ Steel\_Stainless = 9.50332\times10^6\times7.93\times10^{-6} = 75.36kg$$

② 회전체의 무게

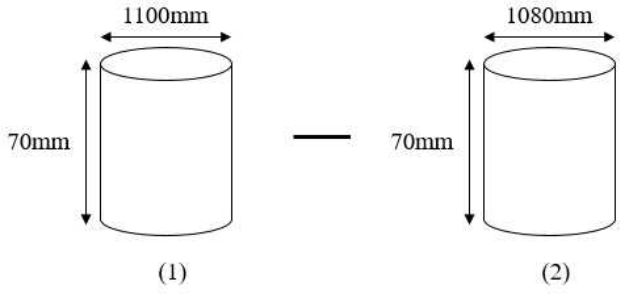


그림 2-마-8 축소 회전형 시험기의 2차측 회전체 부피 계산

$$(1)-(2)=\text{회전체의 부피}$$

$$=\pi\times550^2\times70-\pi\times540^2\times70$$

$$=\pi\times70\times(550^2-540^2)$$

$$=\pi\times70\times10.9\times10^3$$

$$=2.397\times10^6\,[mm^3]$$

$$\text{회전체의 무게}=\text{회전체의 부피}\times\text{비중}$$

2차측 재질에 대한 회전체의 총 무게는

$$Steel\_Stainless=2.397\times10^6\times7.93\times10^{-6}=19\,[kg]$$

$$\therefore\ W_{Steel\_Stainless}=75.36+19=98.86$$

계산 결과를 통해 원판과 2차측 회전체 재질은 Stainless_Steel로 선정하였으며, 설계 및 제작 편의성을 고려하여 회전체의 무게를 100kg으로 임의 선정하였다.

(다) 축소-회전형 시험기의 요구사양 분석

앞서 시험기의 사이즈 및 2차측 회전체의 무게를 계산하였다. 선정된 결과 값들을 통해 기동 시 견인력 및 부하를 계산하여 견인력-토크 곡선을 그림 2-마-9와 같이 도출하였다. 견인력-토크 곡선을 살펴보면 정토크 구간만을 사용하여 정격속도와 최고속도가 같고, 주행 저항의 경우 부상하여 주행하기 때문에 마찰 저항은 없고 회전체의 공기역학적 저항은 무시하며 Magnetic Drag Force만을 고려하여 약 22N이 발생될 것으로 추정할 수 있으며, 목표 견인력 54N 이하이므로 문제가 되지 않는다. 시험 성격 상 높은 가속도가 요구되지 않기 때문에 가속도는 0.5m/s² 으로 선정하고, 출력은 종단 속도에서 계산을 통해 3kW로 선정하였다. 요구 부상력은 중력을 고려하여 108N으로 선정하였다. 최종적인 요구 사양을 표 2-마-3에 정리하였다.

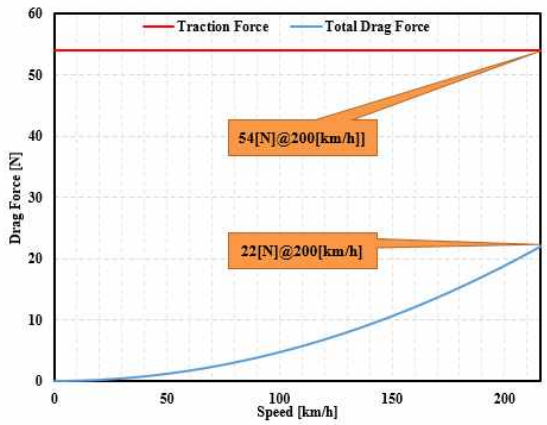


그림 2-마-9 축소-회전형 시험기의 성능 곡선

표 2-마-3 시험기 주요 사양

사양	값	사양	값
출력	3 [kW]	가속도	0.5 [m/s²]
정격 슬립	0.3 [s]	회전체 직경	1100 [mm]
요구추진력	54 [N]	최고 속도	200 [km/h]
요구 부상력	108 [N]	정격 속도	200 [km/h]

(라) 축소-회전형 시험기의 기본 설계

견인력-토크 곡선을 통해 축소-회전형 시험기의 요구사양을 분석하였다. 이를 통해, 시험기의 전기적인 용량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

㉮ DC 링크 전압 : 3상 380VLL,rms 기준으로 아래의 수식을 이용하여 계산

$$V_{DC} = \frac{3}{\pi}\sqrt{2}\,V_{LL,rms} = 1.35\,V_{LL,rms} = 513\,[V]$$

㉯ 선간전압 : 출력 가능 전압이 큰 SVPWM을 고려하여 아래의 수식을 이용하여 계산

$$V_{\max}(V_{ll,\max}) < V_{DC} \times \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

$$V_{\max} < 513 \times \frac{\sqrt{6}}{\pi} = 400\,[V]$$

㉰ 상전압과 최대 상전압 값 : DC 링크 전압 값을 통해 아래의 수식을 이용하여 계산

$$V_{ph,rms} = 513 \times \frac{1}{\sqrt{6}} = 209.4 \simeq 210[V_{rms}]$$

$$V_{ph,peak} = 210 \times \sqrt{2} = 297\,[V_{peak}]$$

㉱ 상전류 : 1차측의 구조가 양측식이기 때문에 편측 상전류를 아래의 수식을 이용하여 계산

$$I_{ph}\,[A] = \frac{P_{\max}[W]}{3 \times V_{ph,rms} \times \eta \times \cos\phi \times 2}$$

$$= \frac{3000\,[W]}{3 \times 210 \times 0.4 \times 2 \times 0.3} = 19.841[A] \simeq 20[A]$$

축소-회전형 시험기의 견인력-토크 곡선 도출 및 전기적 용량 산정에 따라서 설계 프로세스 상의 기본 설계 사양을 장하분배법을 적용해 먼저 결정해야 한다. 핵심적인 기본 설계 사양을 다음과 같이 정리하였다.

㉮ 극간격

- 일반적인 LIM의 설계 시 제작성을 고려하여 극간격과 공극의 비율인 τ/g를 20~25 사이로 설정하나 본 시험기는 1차측의 구조가 양측식이며, 이중 공극을 가지고 국내·외적으로 설계 사례가 많지 않기 때문에 τ/g를 72로 여유있게 선정하였다.
- 또한, 2차측 회전체의 외경은 1.1m이며, 이에 따른 극간격은 216mm이다.
- 따라서 본 시험기에서 극간격은 τ/g : 72, $\boldsymbol{\tau}$ = 216 [mm]이므로 공극은 3mm로 계산 후 선정하였다.

㉯ 기동 정격 슬립(s)

- 이중 공극을 고려하여 보통 연속 정격 시 slip인 0.15~0.3(일본의 경우 : 0.17)중 0.3으로 선정하였다.

㉰ 정격주파수(f_n)와 동기주파수(f_s)

- 정격속도 V_n = 200[㎞/h]이며, $V_n=(1-s)2\tau f_s$을 이용하여 아래의 수식을 이용하여 계산하였다.

$$\therefore f_s=\frac{V_n[m/s]}{(1-s)2\tau}=\frac{55.56}{(1-0.3)\times 2\times 0.216}=183.73hz\simeq 184hz$$

$$\therefore f_n=(1-s)f_s=184\times 0.7=128.8\simeq 129hz$$

㉱ 기준 효율과 역률

- 소형 LIM의 효율, 역률을 본 기기에 가정하여 아래의 수식을 이용하여 계산하였다.

$$\eta=0.4,\ \cos\Phi=0.3(\text{일반적으로}\ 0.1\le\eta\cdot\cos\le 0.4)$$

$$\eta\ \bullet\ \cos\Phi=0.12$$

㉲ 입력 전력 : 출력, 효율, 역률 값을 통해 아래의 수식을 이용하여 계산하였다.

$$P_{\in}\ [kVA]=\frac{P_{OUT}[kW]}{\eta\ \bullet\ \cos\Phi}=\frac{3}{0.12}=25[kVA]$$

㉳ 슬롯 단면적

- 시험기의 냉각 방식은 자연 냉각 방식을 사용한다.
- 슬롯 내 한 도체의 전류 밀도를 $J=4[A/mm^2]$로 선정하고 이에 요구되는 상전류를 위의 수식을 이용해 재계산한 후 슬롯 내 도체 단면적을 계산하였다.
- 점적률은 제작 시 환선을 사용하기 때문에 0.3으로 선정하였으며 이를 통해 최종적인 슬롯 단면적을 계산하였다.

$$A_c = 2(2\text{층권}) \times N \times \frac{I}{J} = 2 \times 4 \times 5 = 40[mm^2]$$

$$A_{slot} = \frac{A_c}{0.3} = \frac{40}{0.3} = 133.33[mm^2] \simeq 130[mm^2]$$

핵심 기본 설계 사양을 선정함에 따라 1,2차측의 주요 치수를 일반적인 회전형 유도전동기의 설계 기법을 이용하여 설계하였으며, 최종적인 축소-회전형 시험기의 설계 사양을 표 2-마-4에 나타내었다. 기계적 공극은 실제 성능 시험에서 1,2차측의 충돌 위험을 고려하여 앞선 상세 설계 모델의 공극인 10mm가 아닌 30mm를 초기 값으로 선정하였으며, 2차측 두께는 강성을 고려하여 20mm를 초기 값으로 선정하였다.

표 2-마-4 시험기 최종 사양

항목	단위	값	항목	단위	값
회전체 총 중량	kg	100	슬롯 단면적	㎟	130
기계적공극	mm	3	슬롯 수		194
정격선속도	km/h	200	슬롯폭	mm	10
동기선속도	km/h	286	슬롯깊이	mm	13
정격회전속도	rpm	965	쐐기깊이	mm	4
최고회전속도	rpm	965	슬롯간격	mm	18
가속도	km/h/s	0.5	매극매상 슬롯 수		4
상수		3	단절율		10/12
극수		16	1차측 적층폭	mm	50
정격슬립		0.3	1차측 높이	mm	27
연속정격	kW	3	1차측 1module 길이	mm	432
DC_Link전압	V	513	극간격	mm	216
상전압	Vrms	210	요크두께	mm	10
상전류(편측)	Arms	20	코일점적율		0.3
정격주파수	Hz	129	코일전류밀도	A/㎟	4
동기주파수	Hz	184	도체단면적	㎟	40
매극용량	kVA	25	1코일당턴수	Turns	4
효율		0.3	2차측도전율	siemens/m	1,100,000
역률		0.4	2차측 두께	mm	20

(3) NSDLIM 축소-회전형 시험기 설계 모델 전자기적 특성 분석

(가) 2차원 유한요소 해석

앞선 축소-회전형 시험기의 설계 결과를 바탕으로 하여 무한궤도를 갖는 회전형 유한요소 해석용 모델을 그림 2-마-10과 같이 설계한 후 2차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석 조건은 표 2-마-5와 같다. 해석의 효율성을 위해 1/4 주기 모델을 사용하고, 정격 구간의 추진력만을 해석한 후 16극으로 환산하였다. 회전형 유도전동기의 정확한 성능 분석을 위해서는 1차 저항과 누설 인덕턴스 값을 모두 고려하는 전압원 해석이 필수적이다. 따라서 이중 공극을 가지는 NSDLIM의 구조를 고려하여 아래의 수식을 이용하여 1차 저항 및 누설 인덕턴스를 계산한 후 전압원 해석을 수행하였다.

$$R_1 = \frac{1}{\sigma_c} \cdot \frac{2(h+l_{ce})}{I_{ph}} \cdot J_c \cdot N_{ph}$$

$$X_l = \frac{4\mu_o w N_{ph}^2}{p} \left\langle \left[\left\{ \frac{1}{12} \frac{h_s}{w_s} (1+3k_p) \right\} \cdot \left\{ 1+\frac{3}{p} \right\} + \left\{ \frac{5\left(\frac{g_{mag}}{w_s}\right)}{5+4\left(\frac{g_{mag}}{w_s}\right)} \right\} \right] \cdot \frac{h}{q} + 0.3(3k_p-1)l_{ce} \right\rangle$$

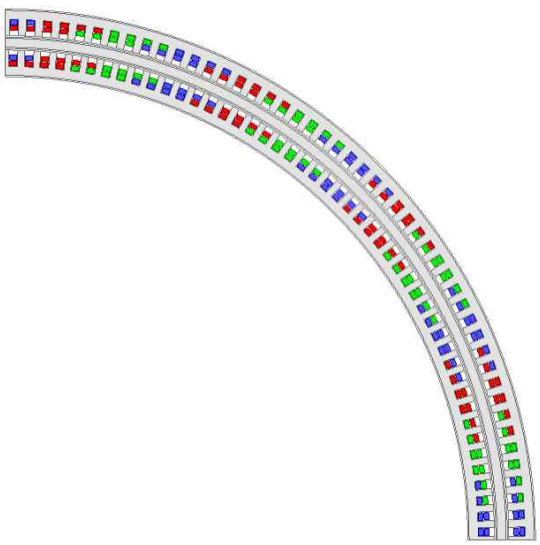


그림 2-마-10 축소-회전형 시험기 2차원 유한요소 해석 모델

표 2-마-5 축소-회전형 시험기 2차원 유한요소 해석 조건

항목	단위	값	항목	단위	값
2차측 두께(편측)	mm	10	극수		16
기계적 공극	mm	3	매극매상 슬롯 수		4
극간격	mm	216	단절율		10/12
동기주파수	hz	184	인가전류	Arms	20

그림 2-마-11은 축소-회전형 시험기의 설계 모델의 전류원 해석 결과이다. 해석 결과를 분석해보면 정격 슬립에서 63N의 토크가 발생하여 목표 토크인 54N을 만족한다.

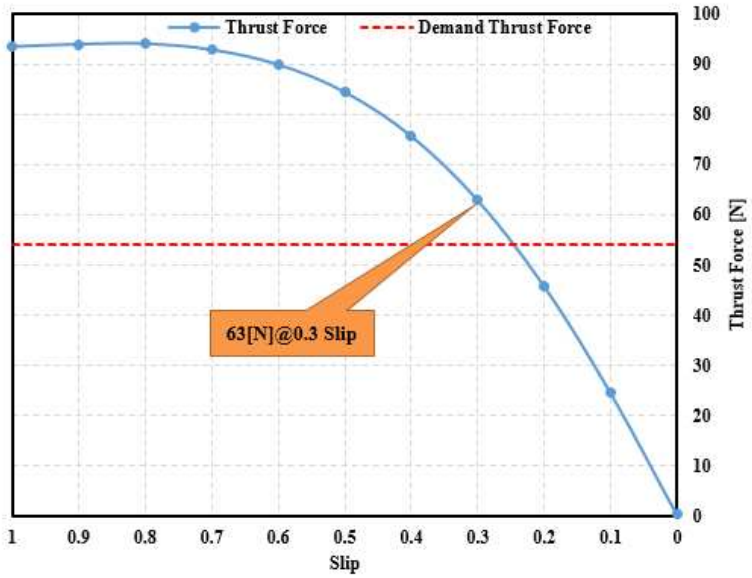
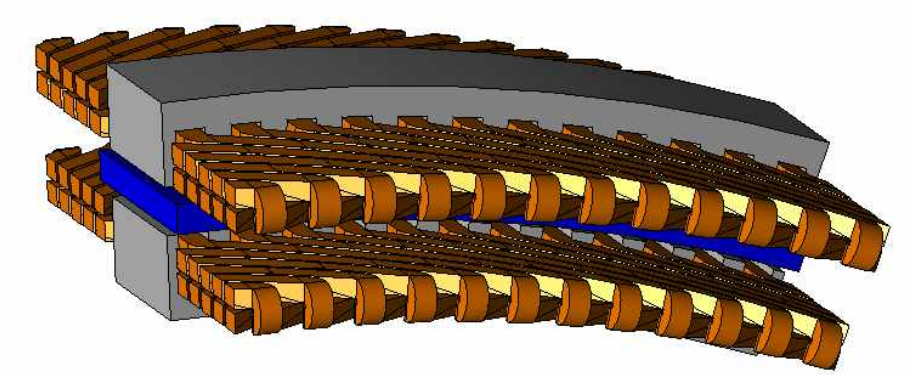


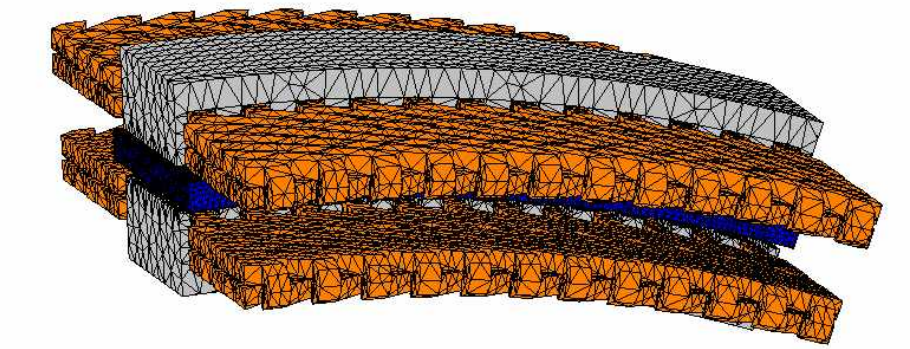
그림 2-마-11 축소-회전형 시험기 2차원 유한요소 해석

(나) 3차원 유한요소 해석

제작된 시험기의 부상력을 계산하기 위해서는 1차측과 2차측의 중심이 서로 일치하지 않는 비대칭 조건에서의 성능해석이 가능해야 한다. 이와 같은 비대칭성을 고려하기 위해서는 3차원 해석이 필수적이며, 본 과제에서 정립한 FDS 성능해석 기법을 통해 해석시간을 효과적으로 단축하였다. 또한 FDS 해석기법의 타당성을 추가로 검증하여 위하여, 기존 TDS 방식의 3D 해석도 병행하였다. 3D 성능해석에 사용된 해석 모델을 그림 2-마-12에 나타내었다. 그림 2-마-12 (a)는 해석모델의 형상 정보, 그림 2-마-12 (b)는 해석 모델의 mesh 정보를 각각 나타낸다. 회전자 방식으로 제작된 시험기는 주기성을 이용하여, 1극 모델로 모델링되었다.



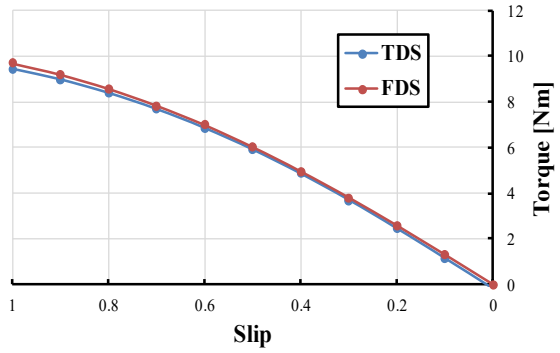
(a) 해석모델 형상



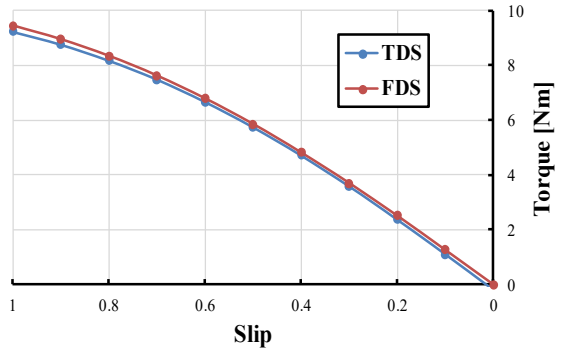
(b) Mesh

그림 2-마-12 3차원 유한요소해석 모델 (1극 모델)

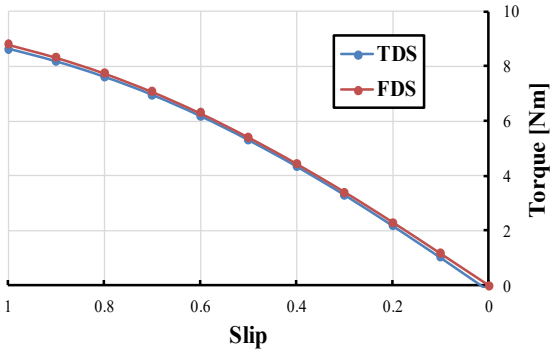
회전기 방식의 시험기에서 1차측과 2차측의 중심이 서로 일치하는 경우에 2차측에는 오직 회전방향으로의 힘인 추진력(토크)만 발생한다. 하지만 2차측의 중심이 2차측의 회전축 방향으로 이동하여, 1차측의 중심과 2차측의 중심이 불일치하는 경우에는 추진력과 더불어 추진력에 수직인 부상력도 같이 발생한다. 이와 같이 1차측과 2차측 중심 사이의 변위는 부상력을 결정하는 주요한 인자이다. 본 연구에서는 1차측과 2차측 중심 사이의 변위를 0mm(1차측과 2차측의 중심이 서로 일치하는 대칭적인 경우), 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm로 변화할 때, 각 경우에 대한 추진력과 부상력을 3D FDS와 TDS로 계산하여 비교하였다. 그림 2-마-13에 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 해석모델들의 추진력(토크)의 FDS와 TDS 해석결과들을 각각 나타내었다. 그림에 나타나 있듯이 두 해석기법 간 추진력 해석결과는 모든 변위에서 유사하였다.



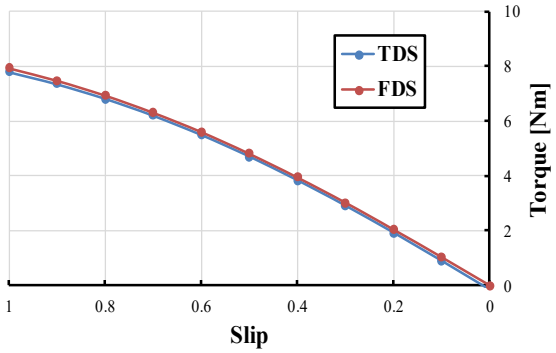
(a) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 0mm



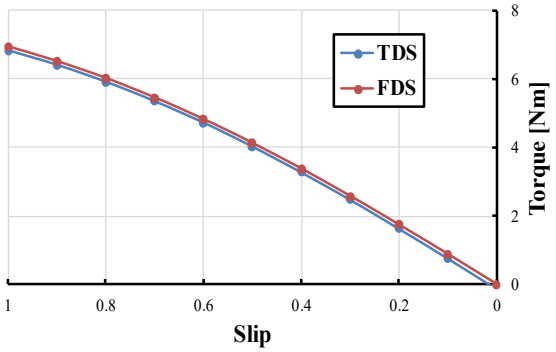
(b) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 5mm



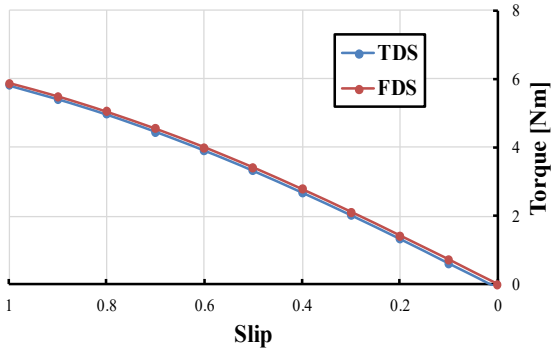
(c) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 10mm



(d) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 15mm



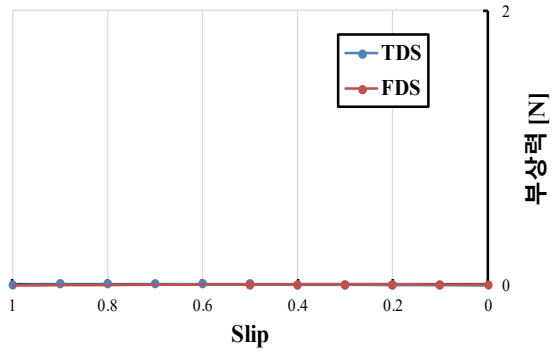
(e) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 20mm



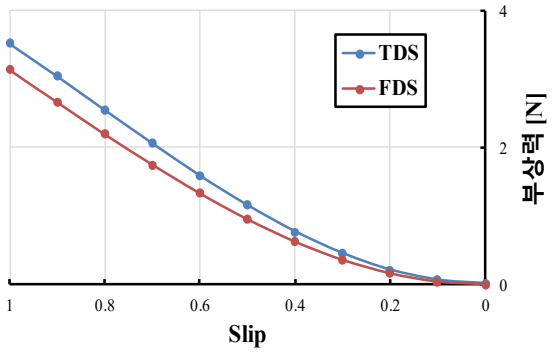
(f) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 25mm

그림 2-마-13 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 슬립 별 추진력 해석결과

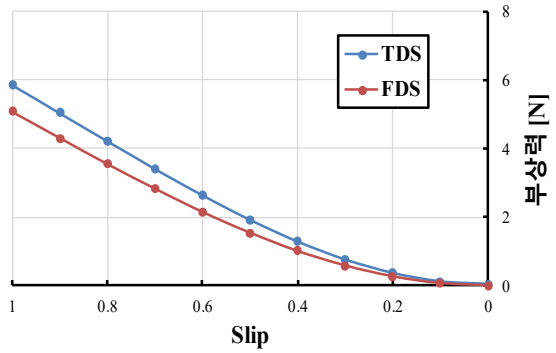
추가적으로 그림 2-마-14에 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 슬립 별 부상력 해석결과들을 각각 나타내었다. 부상력의 경우 FDS와 TDS 사이의 해석오차가 추진력의 경우보다 증가하였지만, 두 해석기법 간 해석결과가 동일한 경향성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.



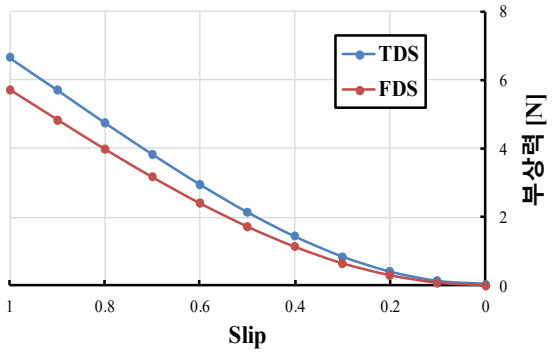
(a) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 0mm



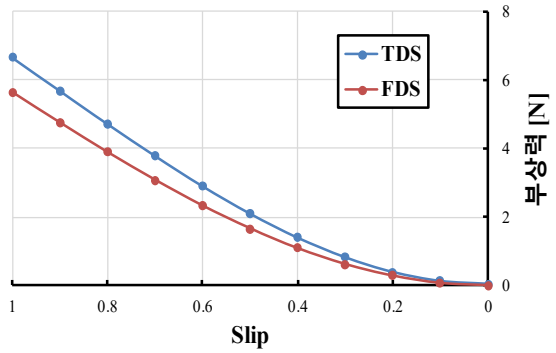
(b) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 5mm



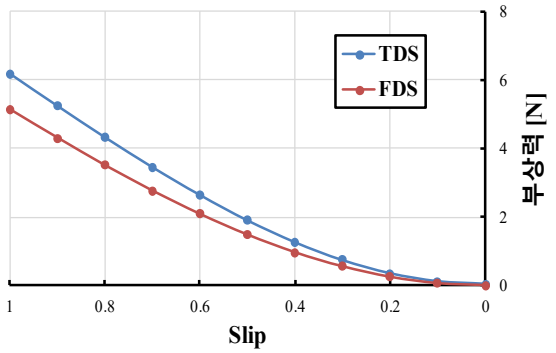
(c) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 10mm



(d) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 15mm



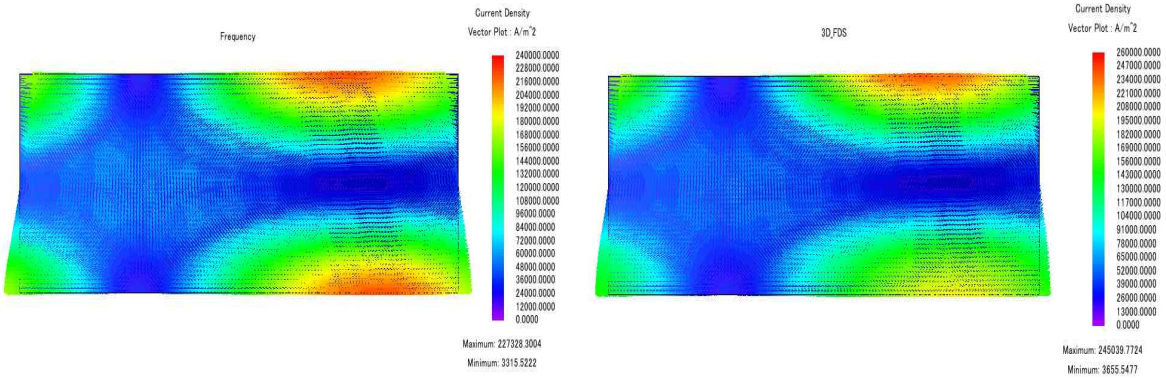
(e) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 20mm



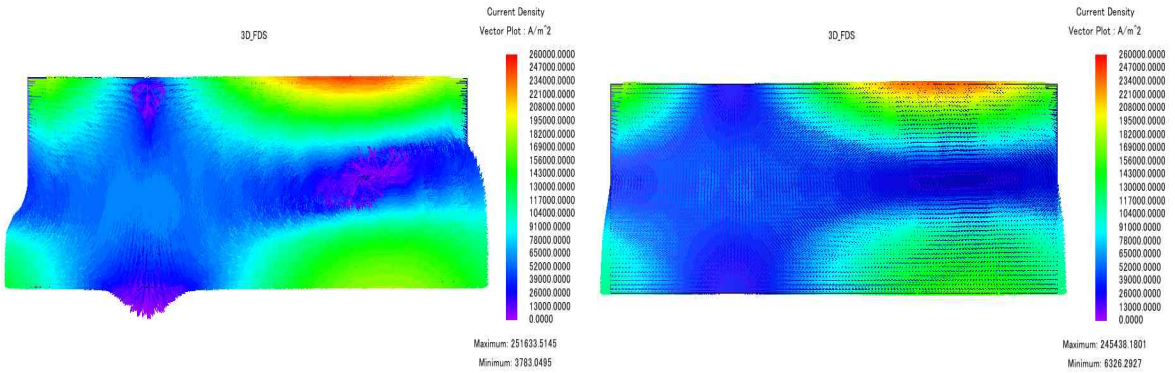
(f) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 25mm

그림 2-마-14 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 슬립 별 부상력 해석결과

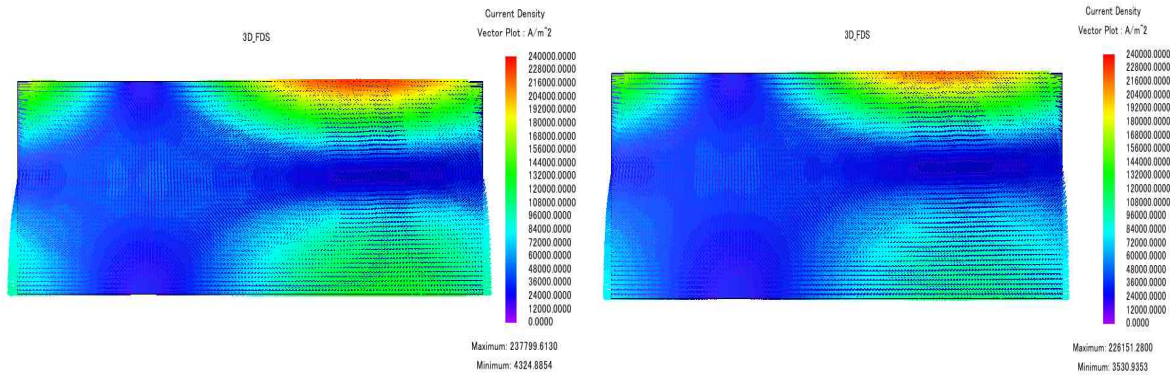
그림 2-마-15에 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 2차측 리액션 플레이트에 유도되는 전류의 분포 특성을 나타내었다. 변위가 0이어서 1차측과 2차측이 정렬된 그림 2-마-15 (a)에서 와전류 분포 특성은 2차측의 중심을 기준으로 상하 대칭인 것을 확인할 수 있다. 변위가 증가할수록 2차측 리액션 플레이트의 와전류 분포의 상하 대칭성은 사라진다. 이와 같은 비대칭성은 변위가 25mm로 가장 큰 그림 2-마-15 (f)에서 가장 크게 발생한다.



(a) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 0mm (b) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 5mm



(c) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 10mm (d) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 15mm



(e) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 20mm (f) 1차측과 2차측 사이의 변위 = 25mm

그림 2-마-15 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 2차측 와전류 분포 해석결과

앞선 그림 2-마-13과 그림 2-마-14는 1차측과 2차측 사이의 변위에 따른 추진력과 부상력의 해석결과를 그래프로 나타낸 것이다. 이와 달리 각 슬립에서의 추진력과 부상력의 해석오차의 정량적인 값을 표 2-마-6에 기재하였다. 이때 각 해석오차는 각 슬립에서의 TDS로 계산한 추진력과 부상력을 진해로 보고, 계산한 백분율 해석오차이다. 추진력의 경우 FDS의 해석오차는 추진력(토크)가 아주 작은 값을 가지는 슬립 0.1, 0.2을 제외한 전 슬립 영역에서 2% 정도에 불과하였다. 다음으로 1차측과 2차측의 중심 사이의 변위가 0mm인 경우에는 원리적으로 부상력이 발생하지 않으므로, 해당 모델의 해석오차는

고려되지 않았다. 변위가 5mm에서부터 25mm인 모델들에서 FDS의 부상력 해석오차는 추진력(토크)보다는 크게 발생하였다. 추진력(토크)와 유사하게 계산되는 부상력의 크기가 작은 0.1, 0.2 슬립 정도의 슬립을 제외한 영역에서는 약 20% 미만의 해석오차가 나타났다.

표 2-마-6 회전형 시험기의 해석기법 별 해석오차

구분		추진력						부상력					
		0mm	5mm	10mm	15mm	20mm	25mm	0mm	5mm	10mm	15mm	20mm	25mm
슬립 별 해석오차	0.1	13.6%	14.0%	14.7%	15.2%	16.7%	19.1%	-	36.4%	45.9%	45.4%	45.1%	47.7%
	0.2	5.3%	5.5%	5.9%	6.3%	7.1%	8.4%	-	24.0%	28.6%	28.7%	28.7%	30.0%
	0.3	2.9%	3.1%	3.4%	3.7%	4.3%	5.2%	-	20.9%	23.8%	23.9%	24.4%	25.4%
	0.4	2.1%	2.2%	2.4%	2.6%	3.0%	3.7%	-	18.9%	21.4%	21.7%	22.3%	23.3%
	0.5	1.9%	1.9%	2.0%	2.1%	2.4%	2.9%	-	17.6%	19.8%	20.1%	20.8%	22.0%
	0.6	1.8%	1.8%	1.8%	1.9%	2.0%	2.3%	-	16.3%	18.4%	18.9%	19.7%	20.9%
	0.7	1.9%	1.9%	1.8%	1.8%	1.8%	1.9%	-	15.1%	17.1%	17.7%	18.6%	19.9%
	0.8	2.1%	2.0%	1.9%	1.7%	1.6%	1.5%	-	13.8%	15.8%	16.5%	17.5%	18.9%
	0.9	2.3%	2.2%	1.9%	1.8%	1.5%	1.3%	-	12.4%	14.5%	15.3%	16.4%	17.9%
	1.0	2.5%	2.4%	2.1%	1.8%	1.5%	1.1%	-	10.9%	13.2%	14.1%	15.3%	16.9%

(4) NSDLIM 축소-회전형 시험기 시제품 제작

축소-회전형 시험기 제작은 전자기적 특성 해석 결과를 바탕으로 하여 제작되었으며, 단계별 제작 공정 사진을 첨부하였다.

(가) Core-Stator-Inner & Core-Stator-Outer

㉮ 최초 전자계해석등으로 설계된 코어를 기준으로 전자계 손실없이 가공성, 경제성 등을 고려하여, 상세 설계하였으며, 본 코어의 제작은, 전체 원형코어를 1/32 분할코어로 설계하며, 각각의 분할코어는 조립 돌기부를 설치하여 코어 조립 시 단단한 결속을 갖도록 한다.

㉯ 또한, 분할코어 결속력을 증가시키기 위해 코어적층 위아래에 원형판(5T철판)을 덧대어, 결속력증가 및 정밀도(동심원, 직각도)도 향상시킨다.

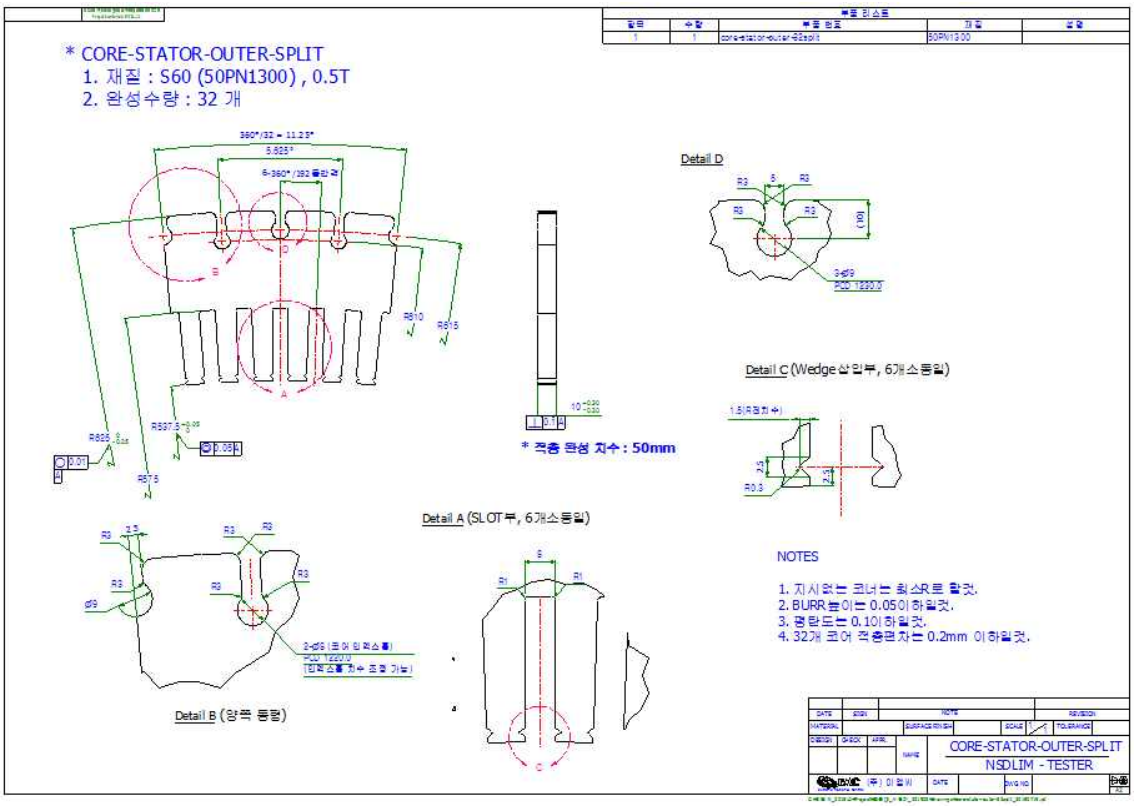
㉰ 재　　질 ; 50PN1300

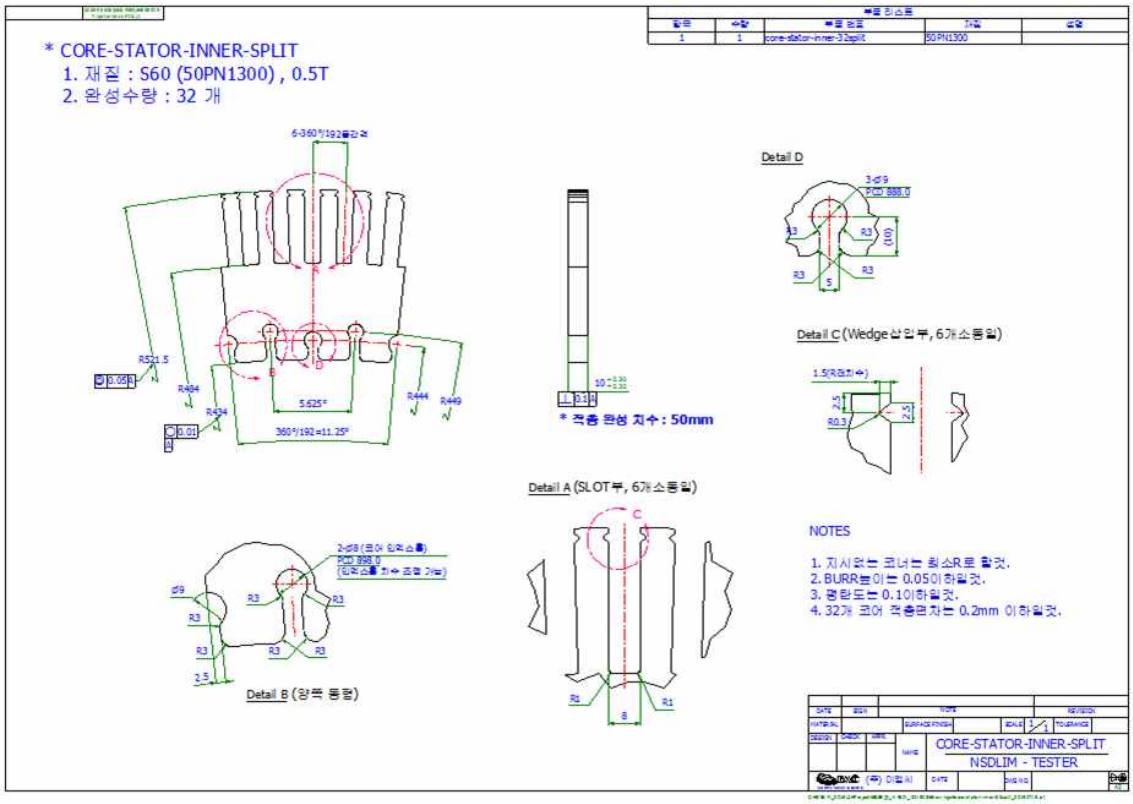
㉱ 주요 치수 ; T50

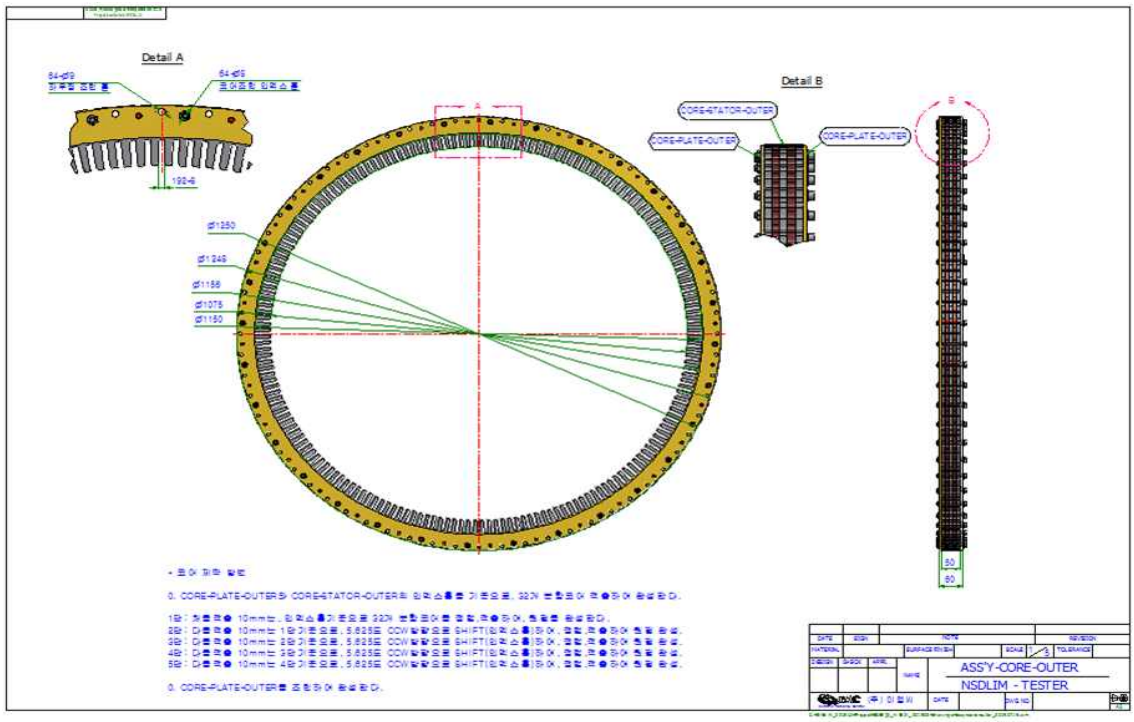
㉲ 가공 방법 ; 금형제작 , Pressing , 적층

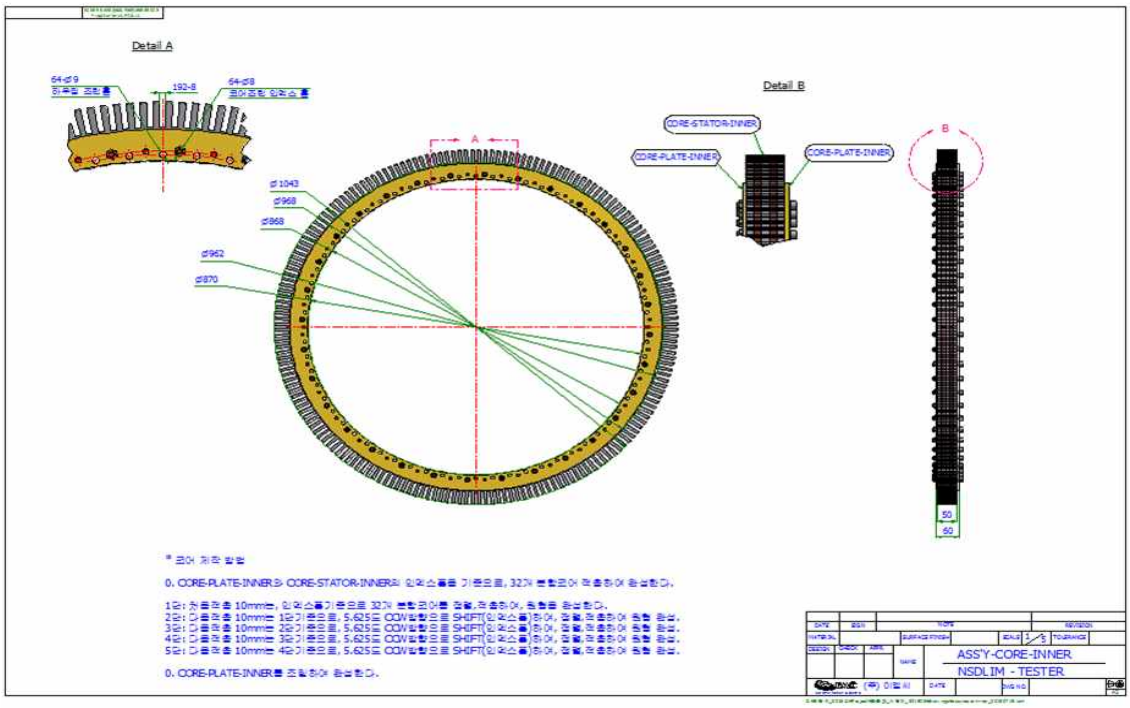
㉳ 주요 구조 도면

- 도면 : Core-Stator-Inner-Split , Core-Stator-Outer-Split




* CORE-STATOR-INNER-SPLIT
1. 재질 : S60 (50PN1300) , 0.5T
2. 완성수량 : 32 개
Detail D
Detail C (Wedge삽입부, 6개소동일)
* 적층 완성 치수 : 50mm
Detail A (SLOT부, 6개소동일)
Detail B (양쪽 동일)
NOTES
1. 지시없는 코너는 최소R로 할것.
2. BURR높이는 0.05이하일것.
3. 평탄도는 0.1이하일것.
4. 32개 코어 적층편차는 0.2mm 이하일것.
CORE-STATOR-INNER-SPLIT
NSDLIM - TESTER


Detail A
Detail B
CORE-STATOR-OUTER
CORE-PLATE-OUTER
CORE-PLATE-OUTER
ASS'Y-CORE-OUTER
NSDLIM - TESTER



(나) Ass'y-Stator-Inner & Ass'y-Stator-Outer

㉮ 최초 전자계해석등으로 설계된 와인딩 스펙을 기준으로 분포권 와인딩을 진행하였으며 원활한 와인딩 작업을 위해 와인딩 지그를 제작하여 작업의 편리성과 일관성을 향상하였다. 와인딩 코일선경은 작업용이성을 고려하여 1.5파이 선경의 에나멜동선을 2병렬로 와인딩하였다. 절연저항 및 내압규격 만족을 위해 절연slot-cell과 wedge를 사용하였으며 회전체와의 간섭회피 및 다른 기구물과의 절연 등을 고려하여 코일 와인딩의 정형기준도 설정하였다.

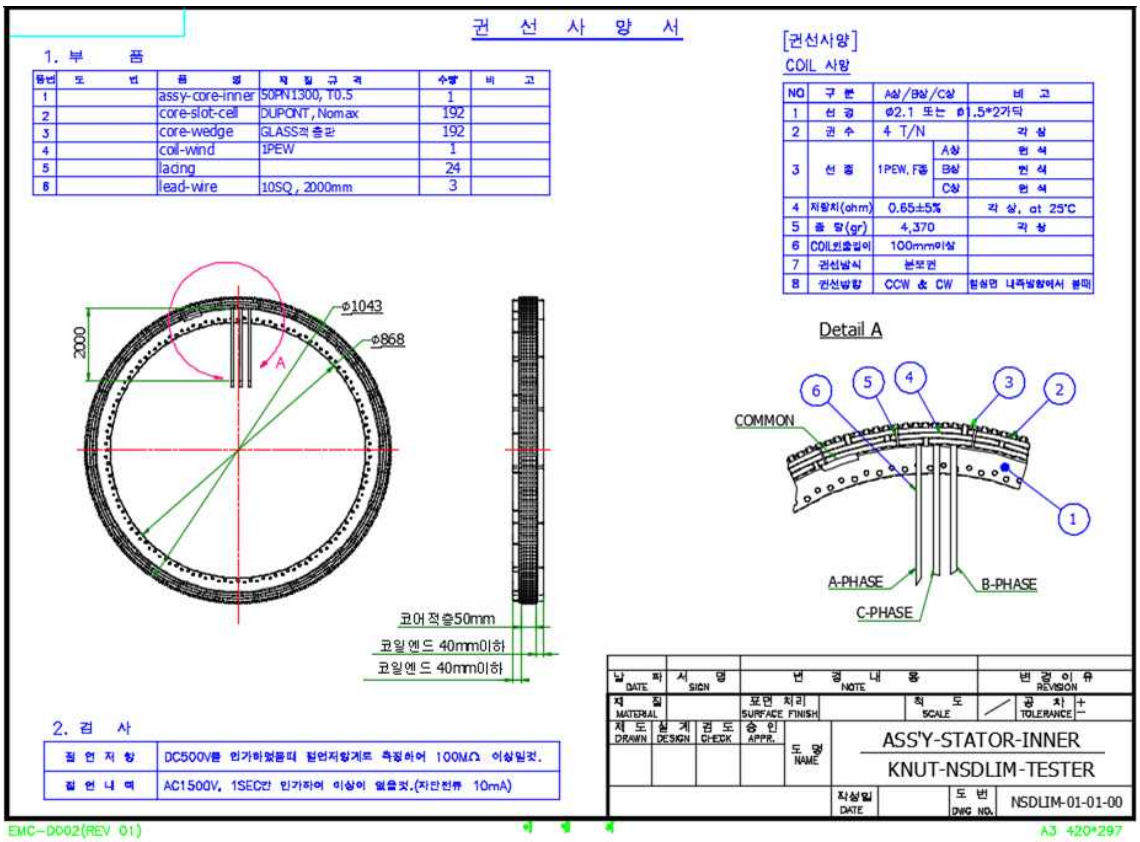
㉯ 와인딩/정형완료 후 저항/인덕턴스/절연저항/내압 규격 등 전동기 기본특성의 만족여부도 측정하였다.

㉰ 재 질 ; 코일 1PEW 1.5파이.

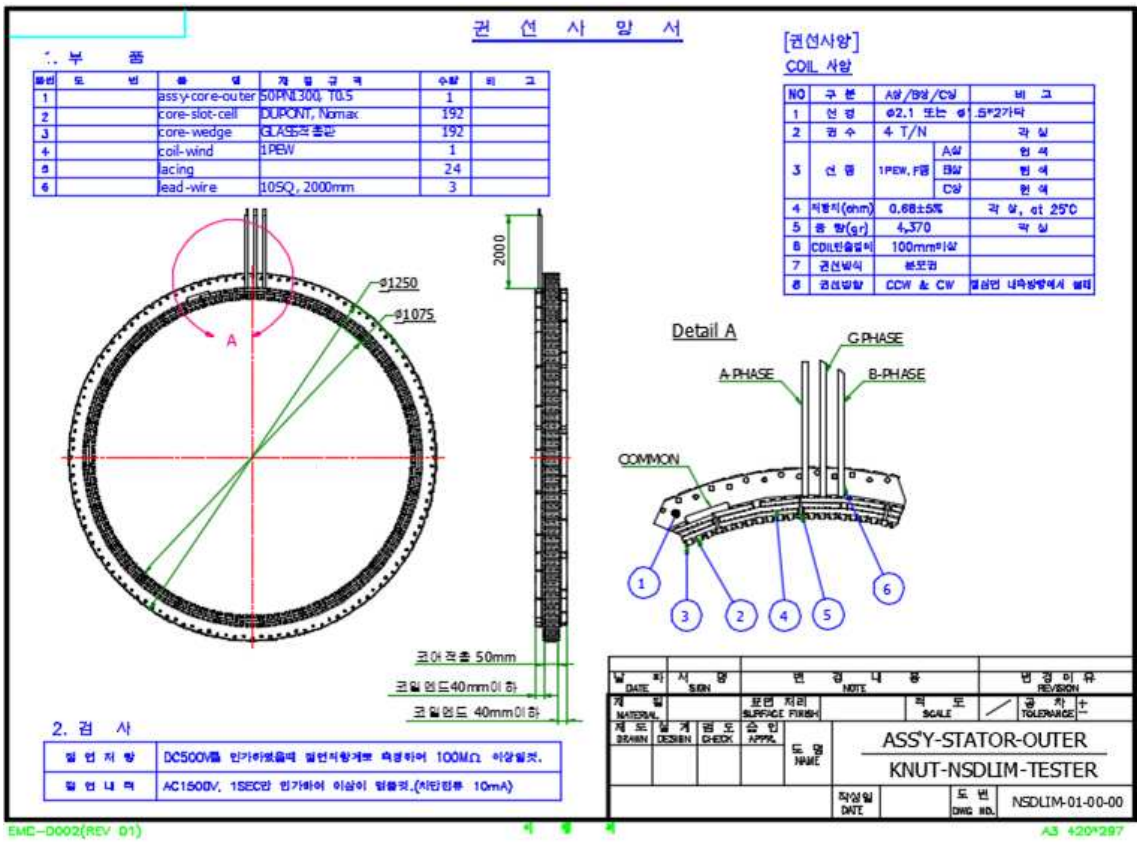
㉱ 가공 방법 ; 코일 와인딩/정형/레이싱 작업, 지그제작 작업

㉲ 주요 구조 도면

– 도면 ; Ass'y-Stator-Inner



– 도면 ; Ass'y-Stator-Outer



(다) Ass'y-Rotor ; Reaction-Ring

㉮ 최초 전자계해석등으로 설계된 코어를 기준으로, 전자계 손실 영향 없이 가공성, 경제성 등을 고려하여, 상세설계 진행함.

㉯ 리액션 링의 재질은 스테인레스(SUS304)재질을 사용하며, 외경이 큰 박판(두께 10mm)으로 구성되어 본 설계에서는 가공성, 경제성 등을 고려하여 스테인레스철판 20mm을 롤링 제작, 용접하여 완성한 후 정밀성 및 조립성이 요구되는 부위는 후가공하여 완성함. (고정자와 회전체의 공극은 3mm로 정밀회전이 요구됨.)

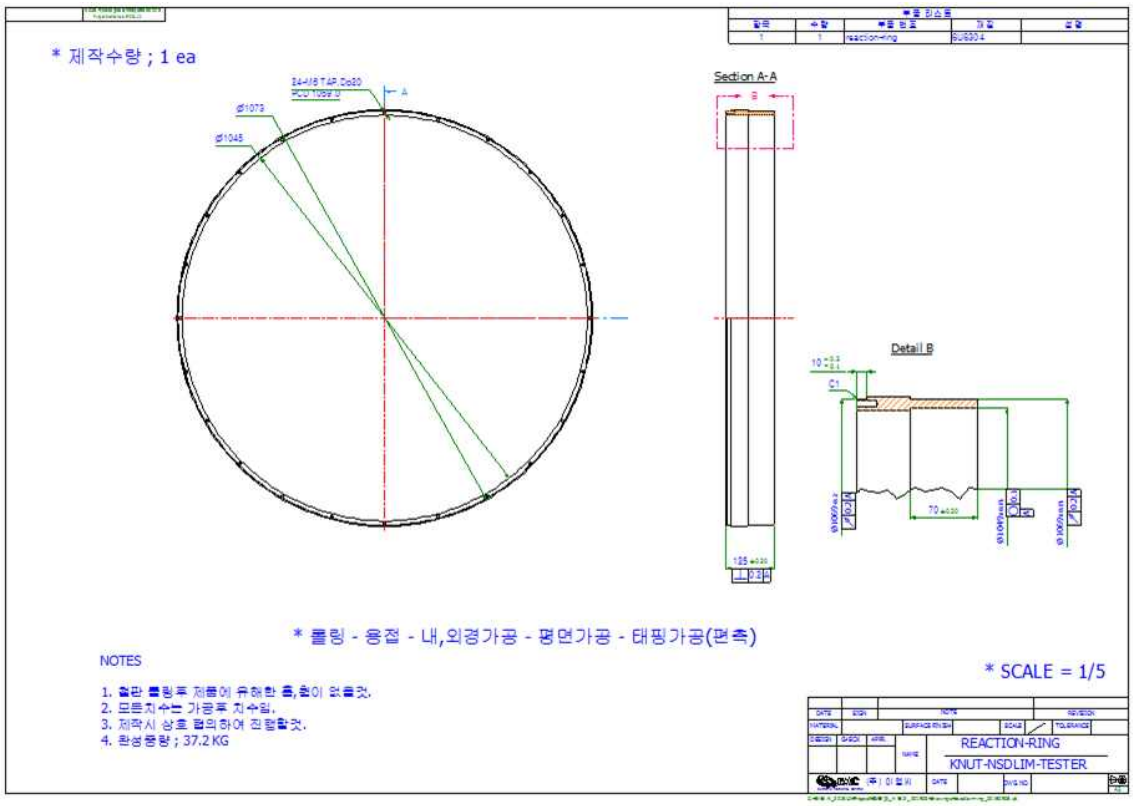
㉰ 재　　질 ; SUS304

㉱ 주요 치수 ; OD1069mm , T10

㉲ 가공 방법 ; 롤링 가공 후 용접 후 가공

㉳ 주요 구조 도면

- 도면 : Reaction-Ring



(라) Ass'y-Rotor ; Reaction-Plate

㉮ 큰 박판형상의 링코어를 견고하게 조립하기위한, 하우징의 구조는 일체형구조로 설계되었고, 본 하우징에 리액션링이 설치,조립됨으로서 견고한 회전구조를 실현하였고, 또한, 중심회전축의 조립을위한, 구조도 형성되어있다.

㉯ 회전체의 중량감소위해, 하우징의 중간부위는 관통홀 가공하였고, 이는 전체회전체의 구조적 안정성에 영향없는 한계내에서 가공되었다.

㉰ 하우징의 재질은 중량감소 및 전자계누설방지를 위해, 알루미늄재질(AL6061)을 채용하였으며, 전체적으로 회전시의 강도보강을 위한 설계가 진행되었다.

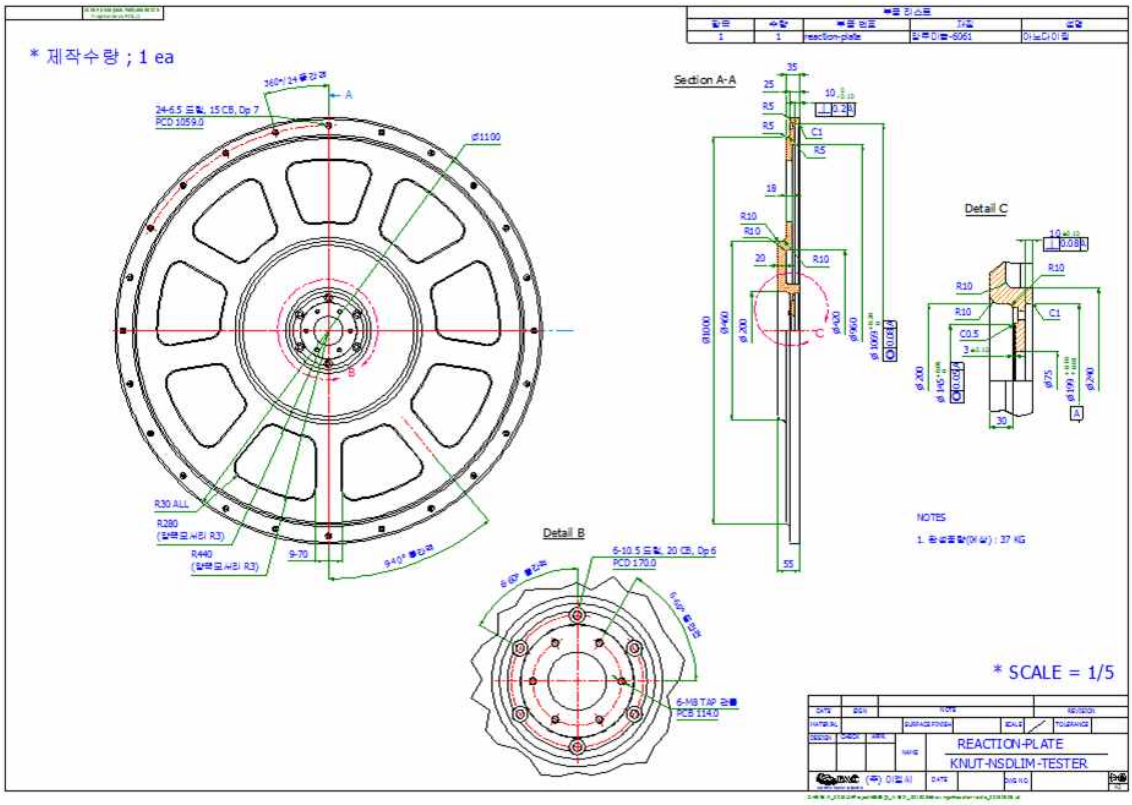
㉱ 재　　질 ; AL6061

㉲ 주요 치수 ; OD1100mm , T20

㉳ 가공 방법 ; MCT 가공

㉴ 주요 구조 도면

- 도면 : Reaction-Plate



(마) Shaft-Boss & Shaft-Ball-Guide

㉮ 축경은 이론 계산식에 의해 계산되었으며, 중량 저감을 위해 중공축으로 설계되어진다. 볼리테이너와의 내경, 외경 조합을 위해 중앙 고정단은 Shaft-Boss부품이 담당하고 볼리테이너의 내경이 조립, 접촉되게된다. Shaft-Ball-Guide부품은 볼리테이너의 외경과 조립, 접촉되어 Reaction부의 회전을 담당한다. 축의 형상은 베어링과의 조합 Reaction-Plate부와의 조립 등을 고려하여 형상 설계되어진다. 특히 볼리테이너와의 볼접촉에 의한 피로수명, 회전 안정성을 고려하여 재질은 SUJ2(베어링강)+고주파열처리로 가공되어진다.

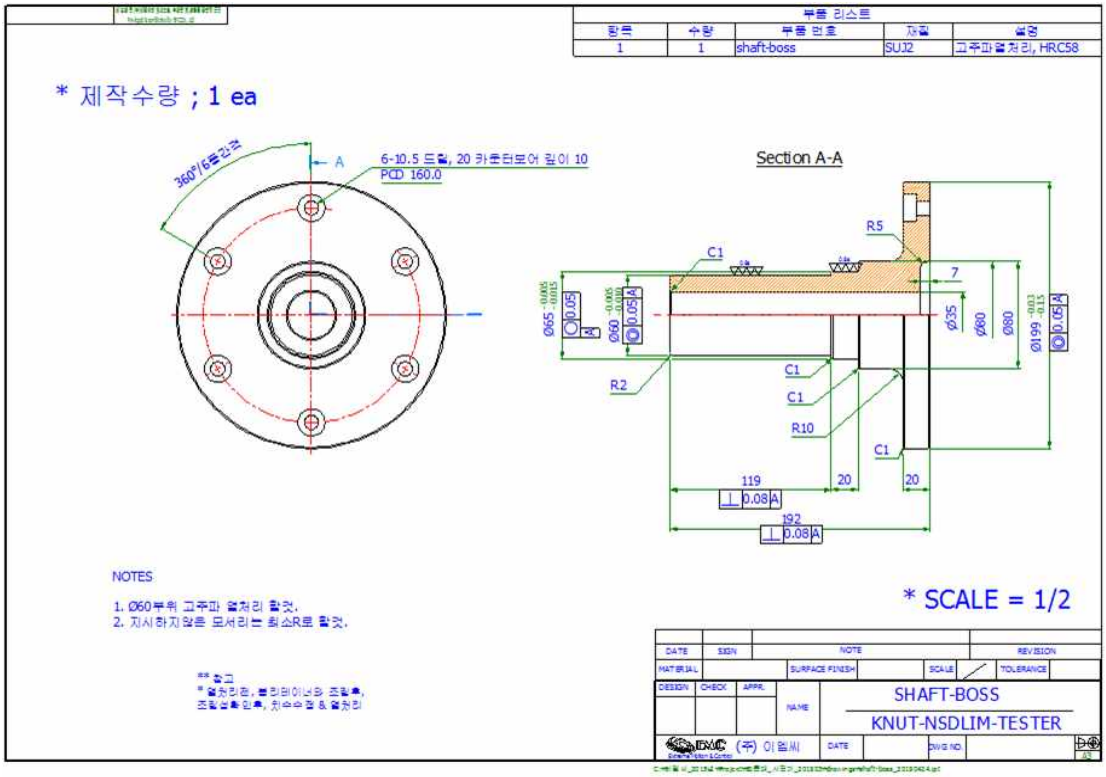
㉯ 재　　질 ; SUJ2 (베어링강)

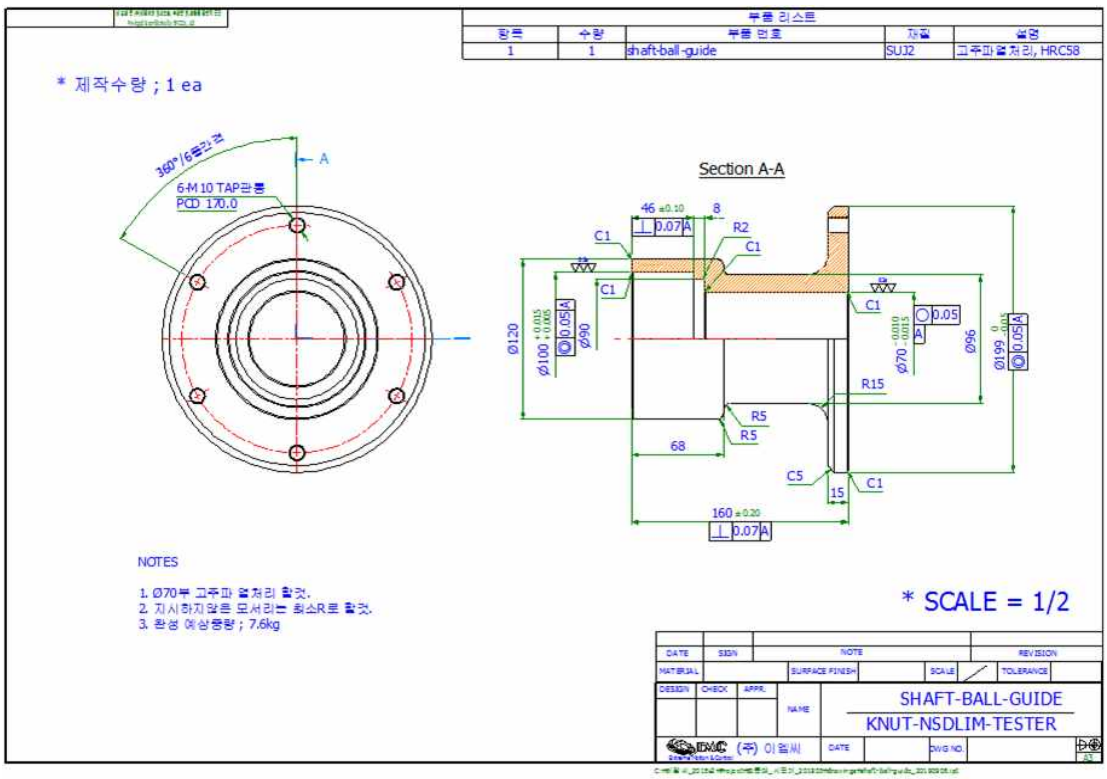
㉰ 주요 치수 ; Ø199 X L162 mm

㉱ 가공 방법 ; 황삭, 정삭, 연마, 열처리 등

㉲ 주요 구조 도면

- 도면 : Shaft-Boss Shaft-Ball-Guide





(바) ASS'Y-ROTOR (회전체)

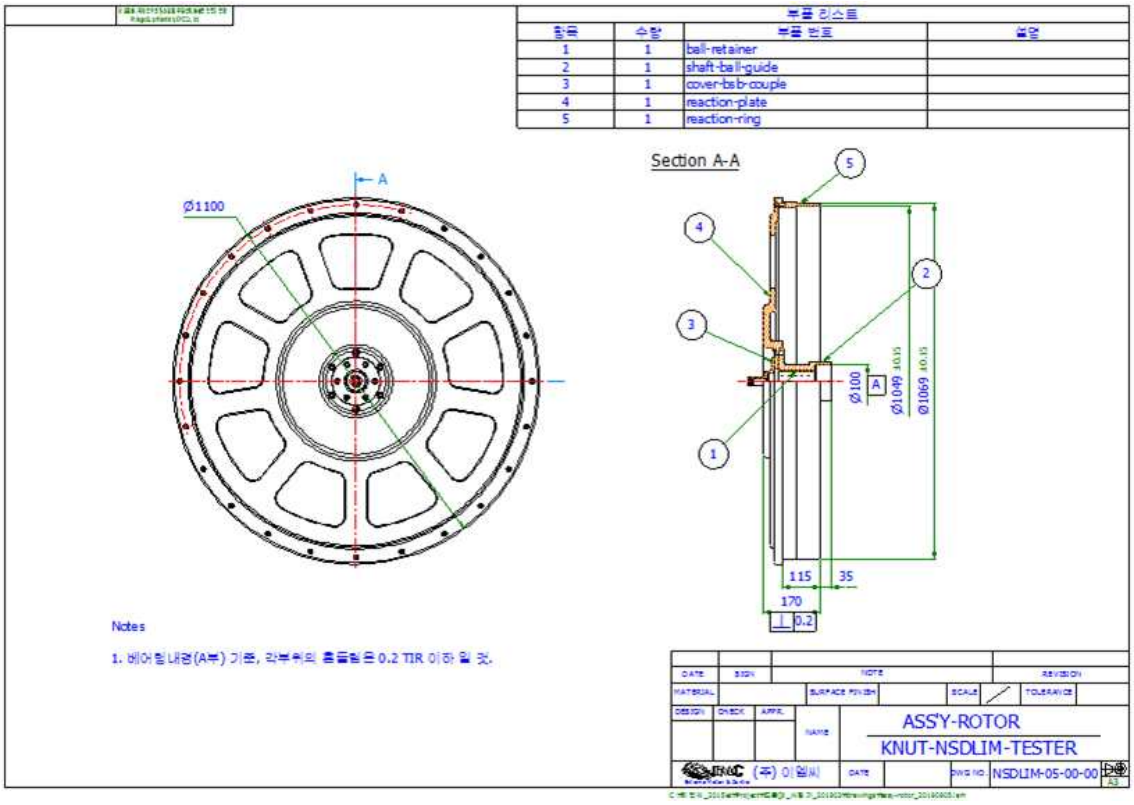
㉮ 회전체 직경이 1.1m이고 고속 회전하므로 충분한 강도설계 및 가공 정밀도가 중요시되며 회전시의 불균형량에 의한 진동 또한 중요한 품질요소이다. 따라서 불균형량은 발란싱(현장발란싱)을 통해 최소화시켜야 하며 현 규격은 2.5G 기준 3.3G으로 규격화시켰으나 목표치는 2G이하로 발란싱하여 충분히 안정된 운전가능하도록 한다.

㉯ 주요 치수 : Ø1100 X H170 mm

㉰ 가공 및 조립방법 : 정밀도향상을 위해 각 부품 조립시마다 정밀도체크 후 가공

㉱ 주요 구조 도면

- 도면 : ASS'Y-ROTOR



(사) ASS'Y-TESTER

㉮ 고강도 사각프레임으로 안착구조를 제작하고 그 위에 평면이 연마된 20T철판을 고정한다, 철판위에 순차적으로 고정자, 회전자를 견고하고 정밀하게 조립하여 완성한다.

㉯ 본 시험기는 회전체의 위치를 초기 기준으로 점차적으로 35mm까지 상승시키면서 회전에 의한 부상력을 테스트 하기위한 장비이다.

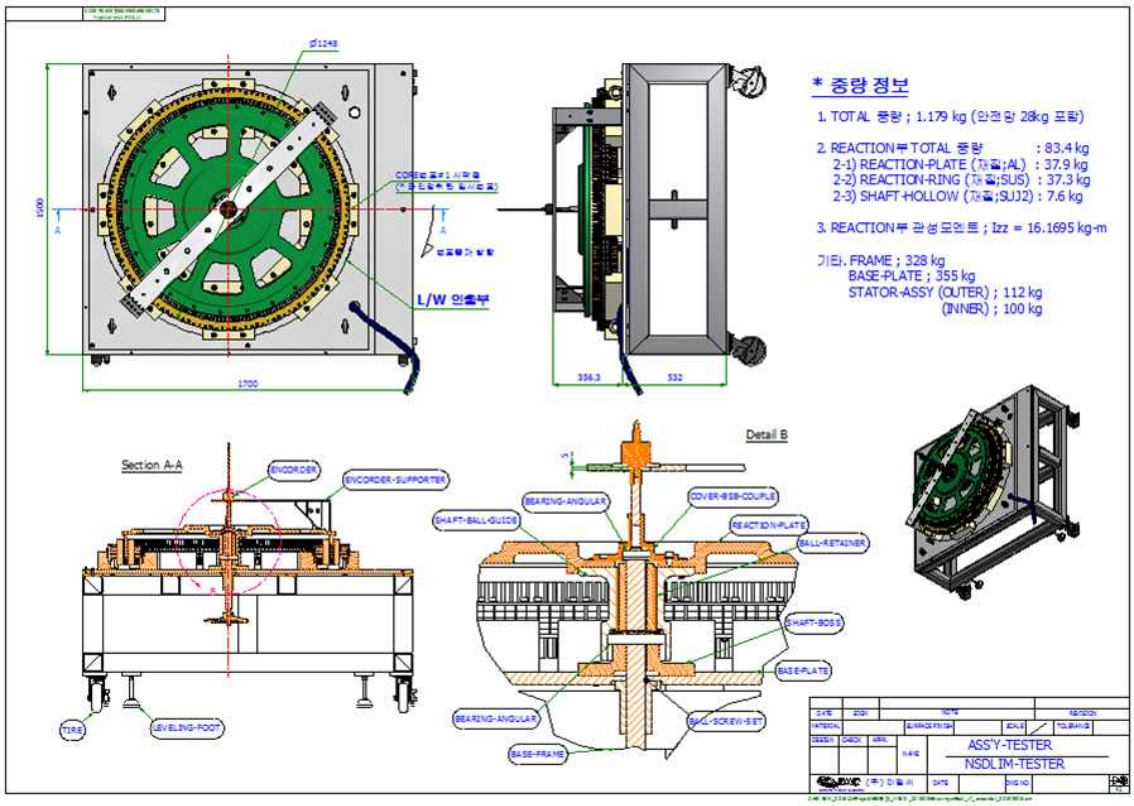
㉰ 따라서 회전체 위치를 가변하기 위한 상승, 하강 장치가 부착되어 있다.

㉱ 회전체위치 가변장치의 구조도 다음도면에 표시되어 있다.

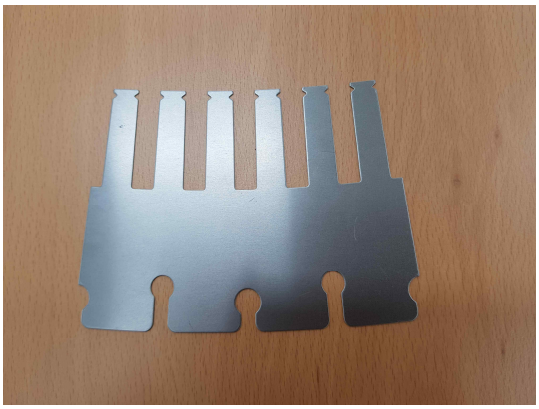
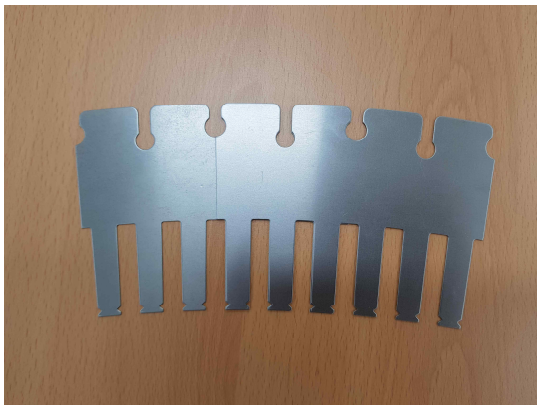
㉲ 주요 치수 ; 1700 X 1500 X H1406 mm

㉳ 주요 구조 도면

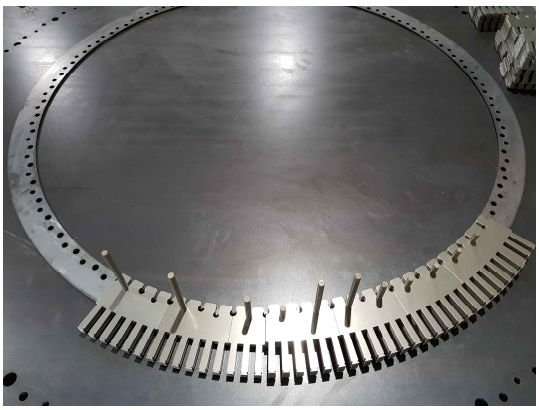
- 도면 : ASS'Y-TESTER



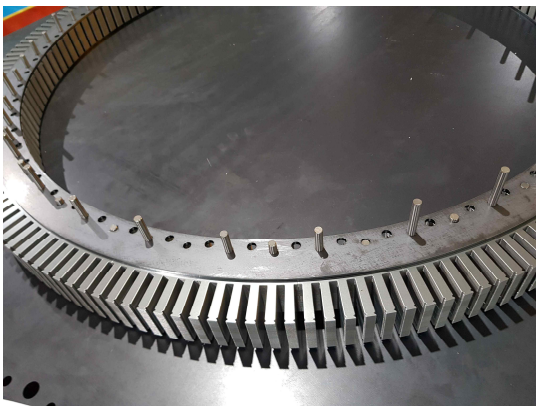
(아) 각 공정별 제작 사진

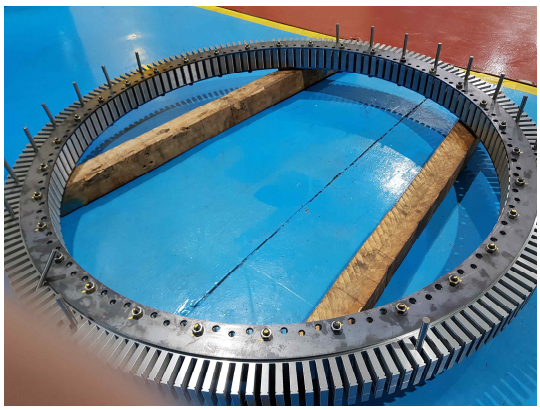
코어 낱장	
	
	

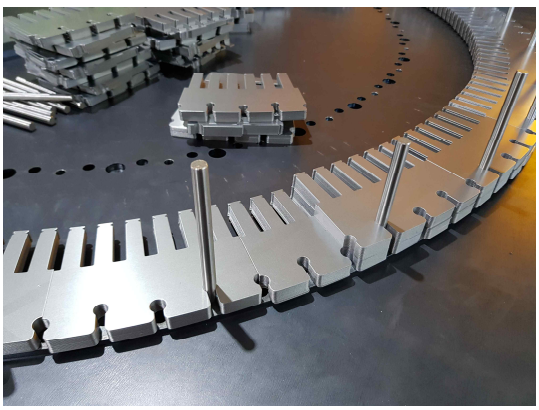
코어 조립

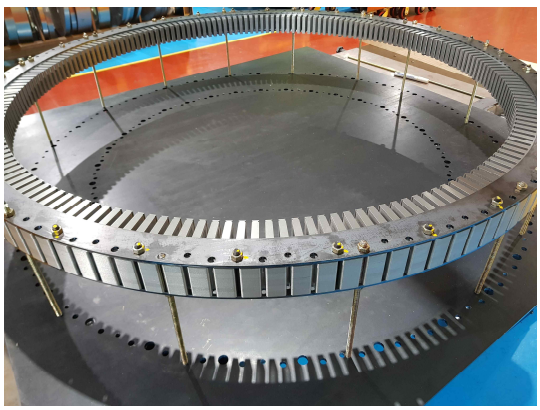




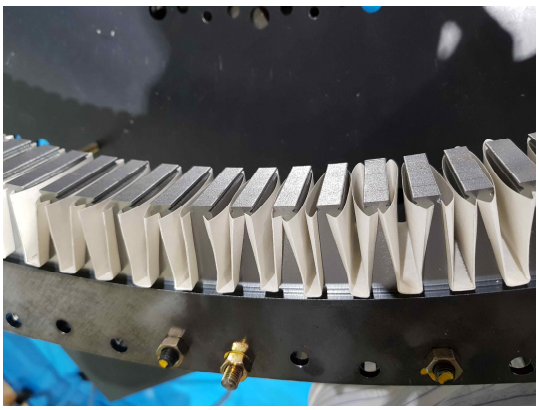


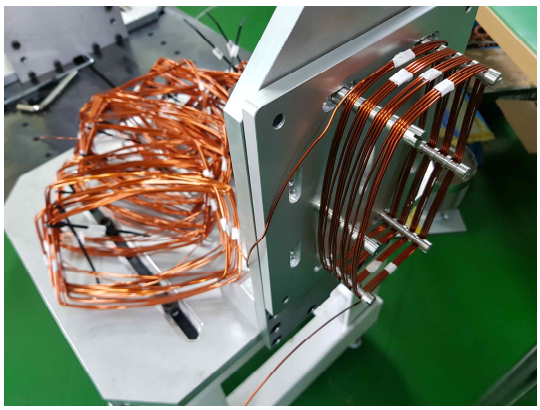


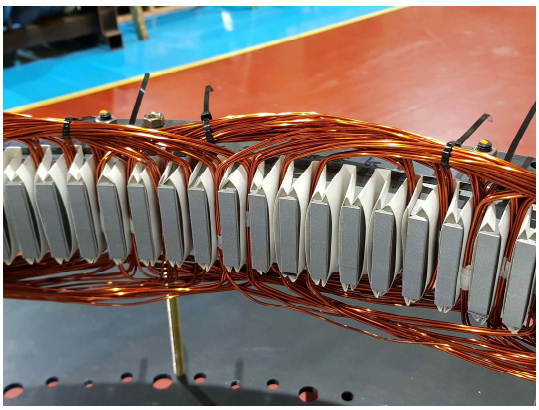


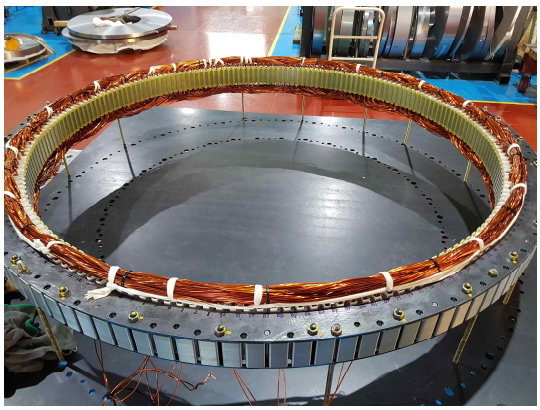


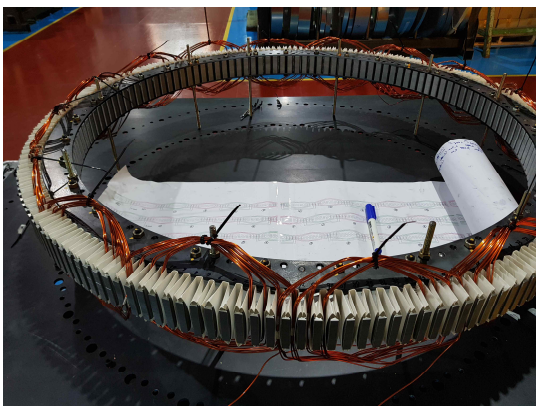
절연 & 와인딩

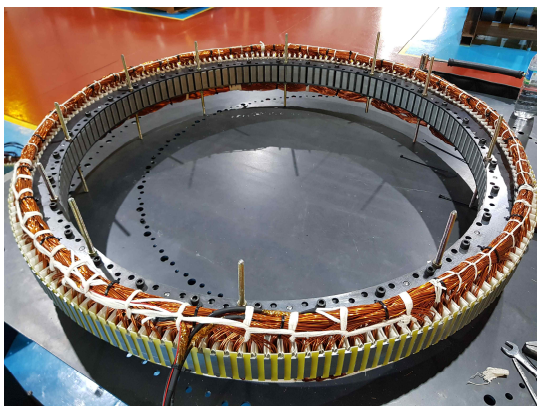




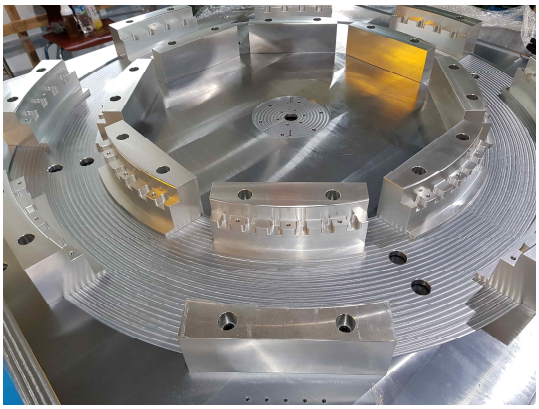
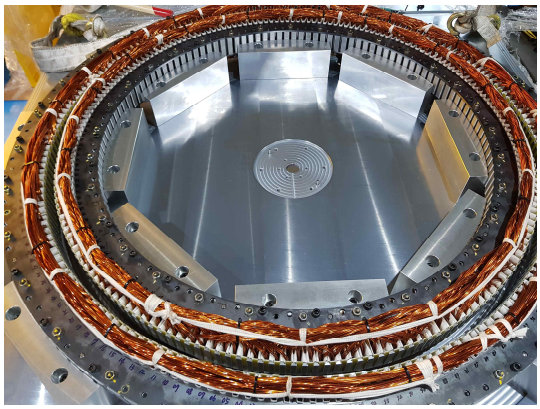
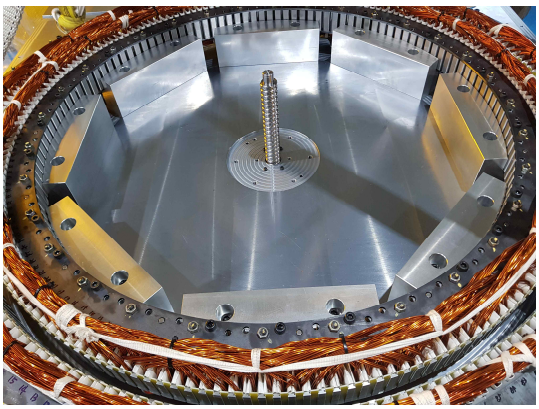
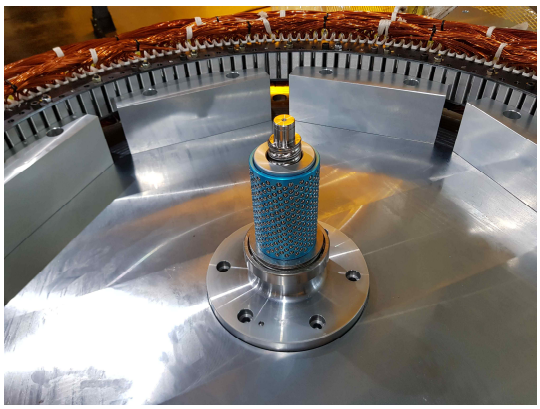


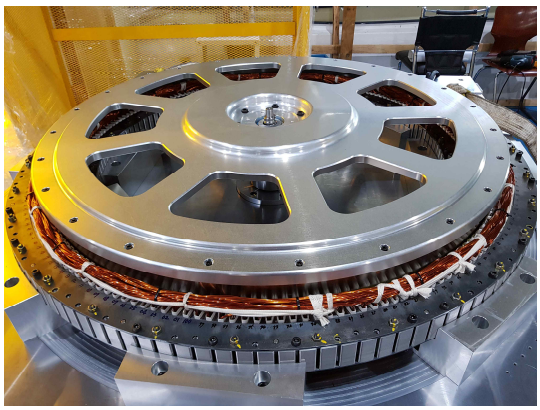


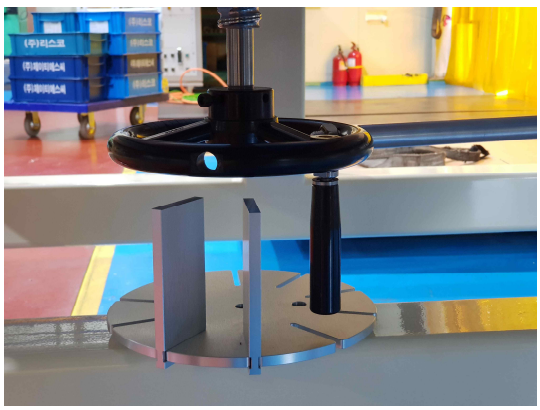




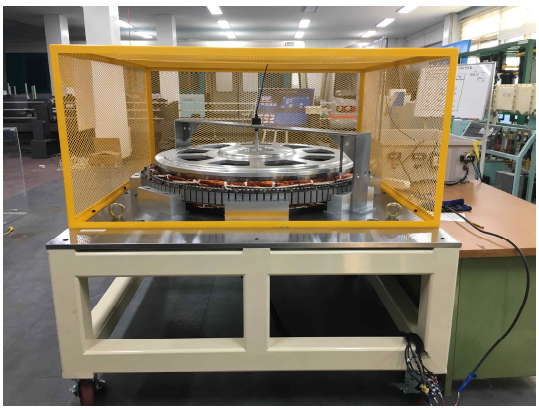
조 립

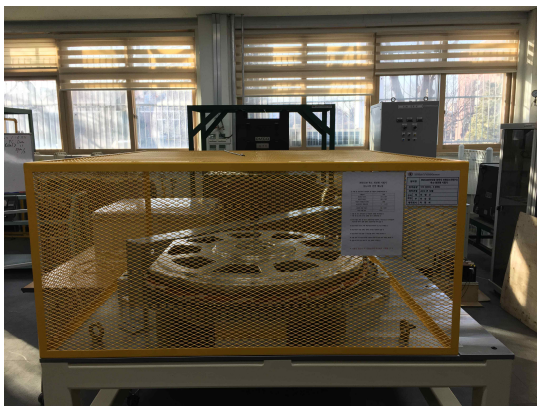





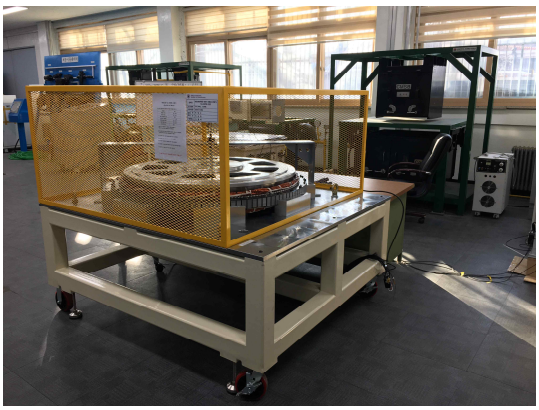




완성품









(5) NSDLIM 축소-회전형 시험기 성능 시험

(가) 성능 시험 제한 사항 검토

본 시험기는 다음과 같은 제한 사항을 갖는다.

① 토크 미터가 없는 시험기

㉮ 엔코더를 회전체와 연결되어 있는 축의 상단부에 설치하여 각속도 및 각가속도 정보를 실시간으로 측정한다.

㉯ 엔코더에서 측정한 각속도 및 각가속도 정보를 동역학적 추론을 이용하여 회전 속도에 따른 회전체 자체부하를 계산한다.

② 부하 가변이 불가능한 시험기

㉮ 회전체의 자체 관성 부하만이 존재하며, 그 관성 부하에 대한 1 point에서의 추진력만을 계산한다.

③ 실제 부상이 불가능한 시험기

㉮ 회전체의 안정적인 회전을 위해 리액션 링 상단부에 회전을 위한 구조물이 설치되었기 때문에, 요구 추진력 대비 부상력은 중력을 고려하였을 시 매우 크며 이로 인해 2차측의 부상은 불가능하다.

㉯ 따라서 본 성능 시험에서는 엔코더에서 측정된 정보를 이용하여 추진력만을 계산하며, 유한요소 시뮬레이션 결과와 비교 검증을 할 예정이다.

④ 특수한 구조를 갖는 전동기

㉮ NSDLIM은 1차측이 양측식이며 이중 공극을 가지는 특수한 구조의 선형 유도전동기로 다른 하이퍼루프용 추진 시스템과는 달리 세계 최초로 시도되는 연구이다.

㉯ 이로 인해 일반적인 유도전동기의 제어 기법을 적용할 경우 1,2차측 제어 파라미터의 예측이 불가능하여 시험환경을 고려한 적절한 제어 기법의 선택이 필요하다.

㉰ 따라서 유도전동기 제어 경험이 많은 외부 연구기관의 자문을 통해 본 시험기에 적용 가능한 제어 방안을 토의하였으며, 그 결과 벡터 제어를 통한 d, q축 전류 제어기법을 채택하였다.

(나) 시험환경구축

제한된 시험 조건을 고려한 시험 환경을 다음과 같이 구축하였다.

① 계측 장비

㉮ 엔코더(Encoder) : 회전체의 각 변위에 대한 정보를 실시간으로 수집하며, 내부 코딩 작업을 통해 각속도 및 각가속도로 변환되어 출력된다.



그림 2-마-16 시험기에 부착된 엔코더

㉯ 오실로스코프(Oscilloscope) : 본 시험기는 벡터 제어 중 전류 제어를 사용함. 전류 제어는 d축의 자속분 성분 전류와 q축의 토크분 전류를 이용하며, 자속분 전류를 고정하고 토크분 전류를 가변하여 그림 2-마-17과 같이 오실로스코프를 통해 인가 전류의 상태 및 파형을 확인할 수 있다.



그림 2-마-17 오실로스코프를 이용하여 측정한 d,q축 전류

㉰ 멀티미터(Multimeter) : 본 시험기는 인버터의 허용 전압보다 높은 DC Link 전압을 유지하여야 하기 때문에 슬라이닥스에서 조절된 DC Link 전압을 실시간으로 측정하기 위해 사용된다.



그림 2-마-18 멀티미터

㉱ 리더기(Leader) : 내부 코딩 프로세스에 의해 얻어진 각속도 및 각가속도 정보를 실시간으로 출력하며, 동시에 저장을 위해 사용된다.

② 전원 공급

본 시험기는 3상 380V를 이용하며, 시험 장소의 전원 상태를 고려하여 다음과 같이 전원부를 구성하였다.

㉮ 그림 2-마-19에 보이는 배전반에서 변압기로 단상 220V가 인가된다

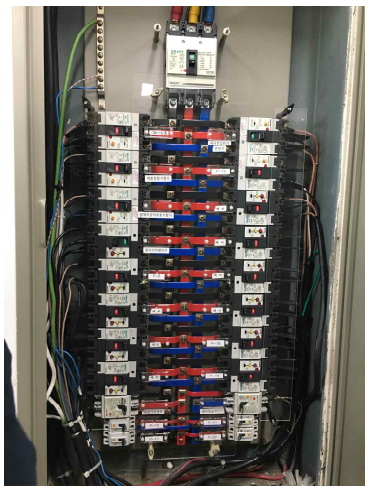


그림 2-마-19 벽면 전원부(단상 220V)

㉰ 인가된 단상 220V 전압은 그림 2-마-20의 변압기를 통해 3상 380V로 승압된다.



그림 2-마-20 승압 변압기(3상 380V)

㉱ 시험의 안전성을 위해 변압기에서 각 상당 전선을 2개로 구성하여 전류 밀도를 낮추었다.

㉲ 변압기에서 승압된 380V는 그림 2-마-21의 슬라이닥스를 통해 필요한 전압을 사용할 수 있도록 제어한다,



그림 2-마-21 슬라이닥스

㉮ 변압기에서 승압된 380V는 그림 2-마-22에 보이는 컨버터로 입력된다.

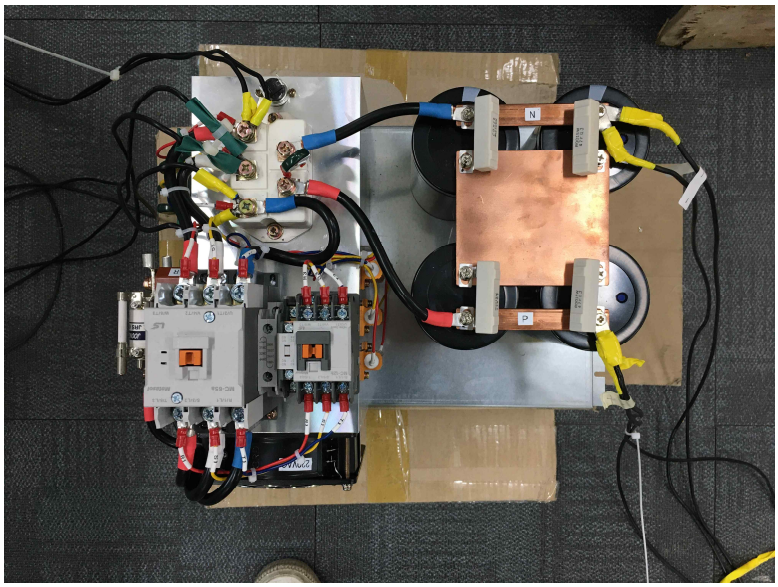


그림 2-마-22 컨버터

㉯ 입력된 380V는 컨버터를 통해 DC Link 전압으로 출력되며, 출력된 DC Link 전압은 그림 2-마-23의 인버터로 입력된다.

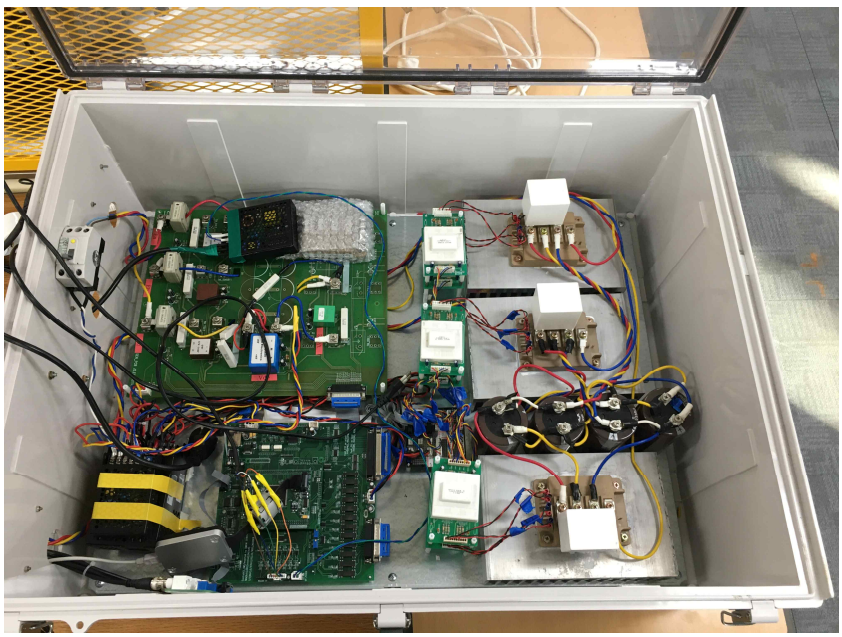


그림 2-마-23 인버터

㉰ 입력된 인버터의 DC Link 전압을 바탕으로 제어 프로그램을 통해 d,q축 전류로 내·외측 고정자에 입력된다.

(다) 성능 시험

제한 사항을 모두 고려하여 실제 성능 시험은 그림 2-마-24와 같은 과정을 통해 수행한다. 성능 시험 시 엔코더를 통해 얻을 수 있는 정보인 각속도, 각가속도 값을 동역학적 수식을 이용하여 시험기의 토크 및 추진력을 계산할 수 있다.



그림 2-마-24 NSDLIM 축소-회전형 시험기 성능 시험 로드맵

① 추진력 측정을 위한 동역학적 방정식은 아래와 같다.

$$[T_E]-[T_L]=[T_M]$$ ([전기적 토크]-[부하 토크]=[기계적 토크])

② 부하토크 측정

㉮ 부하의 변경이 불가능하기 때문에 2차측 회전체의 자체 무게에 의한 관성 부하만을 고려하였으며, 실제 성능 시험을 통해 엔코더에서 얻을 수 있는 정보인 각가속도와 각속도를 이용하여 계산한다.

㉯ 시험의 안전을 위해 전류 값을 서서히 증가하면서 인가하였으며, 임의의 전류 값을 유지할 경우 회전체의 회전 속도가 일정 속도에서 더 이상 증가하지 않고 포화된다.

㉰ 회전체 회전 속도의 포화는 곧 전기적 토크와 부하 토크가 평형을 이루기 때문이며, 포화 지점에서의 각가속도는 0의 값을 가져야한다.

㉱ 그러나 포화 지점의 각가속도 값이 완전히 0의 값을 가지기 위해서는 회전체의 관성으로 인해 매우 오랜 시간이 소요되며, 효율적인 성능 시험을 위해 포화 지점을 판단하는 기준을 순간 각가속도의 값이 $0.002[rpm/s^2]$에 도달하였을 때로 선정하였다.

㉲ 포화 지점까지의 시간 t와 속도를 알기 때문에 평균 각가속도를 계산할 수 있으며, 아래의 토크 수식을 이용하여 임의의 전류에 대응하는 속도에서의 부하 토크를 계산할 수 있다.

$$a_{avg}=\frac{w_1-w_0}{t_1-t_0}$$

$$T_L=Ja_{avg}$$

$$(J=16.1kg \cdot m^2)$$

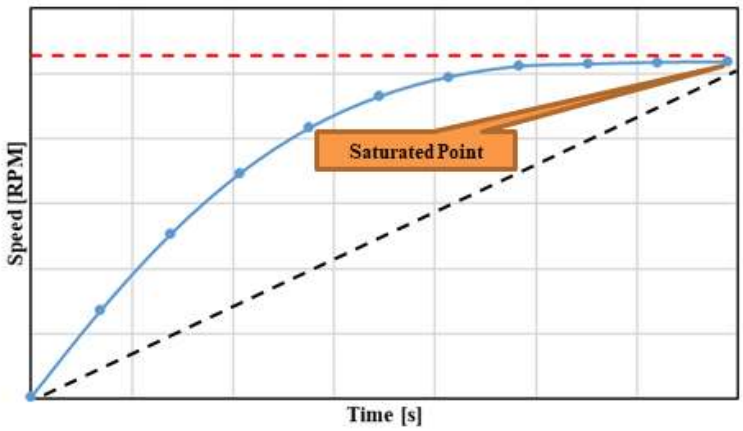


그림 2-마-25 시험기의 부하 토크 측정 메커니즘

표 2-마-7 부하 토크 계산 값

전류(Apeak)	속도(RPM)	부하 토크(Nm)	부하 힘(N)
5	43	0.0069175386	0.125773428
7	175	0.206906587	0.376193795
9	337	0.436305875	0.793283409
11	515	0.846735735	1.539519518
13	692	1.324389518	2.407980943
15	800	2.243907968	4.079832669
17	879	2.784935898	5.063519814
19	938	3.517206412	6.394920749
20	960	4.154793917	7.554170759

㉮ 여기서 임의의 인가 전류 값에 대한 포화 속도를 측정한 후 부하 토크의 정확한 계산을 위해 시험기를 완전히 정지한 후 측정된 인가 전류 값을 한 번에 인가하여 성능 시험을 수행하였으며, 최고 속도인 965RPM에 도달할 때의 인가 전류는 설계 전류의 1/2 값인 20Apeak임을 확인할 수 있다.

※ 여기서 설계 전류의 1/2 값은 시뮬레이션 상으로는 10Apeak이어야 하지만 외측 고정자와 내측 고정자 각각 전류를 인가하여야 하기 때문에 인버터 입력측에서의 입력 전류는 설계 전류의 2배이다.

㉯ 실제 시험을 통해 최고 속도 이상으로 속도가 증가할 경우 위험성이 있다고 판단하여, 시험의 안전성을 위해 최고 속도에 도달하는 인가 전류 값까지의 부하 토크를 계산하였다.

㉰ 9 point의 부하 토크를 계산한 후 Curve Fiting 작업을 수행하여 토크 곡선과 부하력 곡선을 도출하였으며, 지수 함수의 형태를 보인다. 또한, 그 값이 회전체의 무게를 고려하였을 시 매우 낮은 값을 가진다.

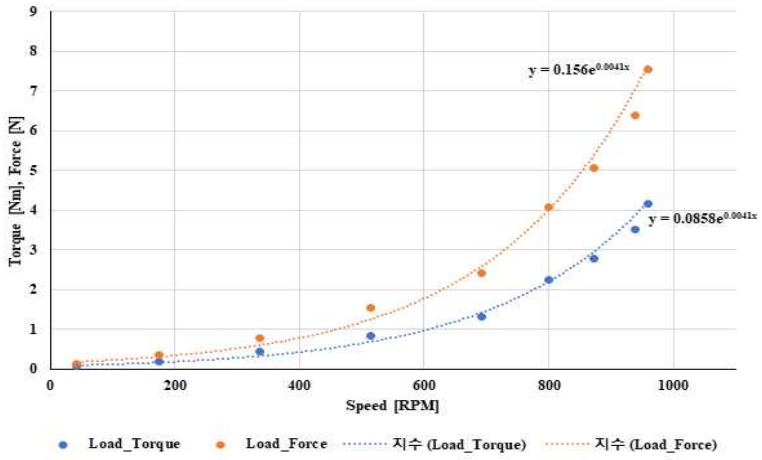


그림 2-마-26 부하-토크 곡선

③ 기계적 토크 곡선 도출

㉮ 앞선 부하 토크 곡선의 경우 포화 지점까지의 평균 각가속도를 이용하여 속도별 부하를 계산하였으나 기계적 토크의 경우 각속도가 측정되는 각 지점에서 내부 미분 프로세스를 통해 얻어지는 순간 각가속도를 이용하여 계산한다.

㉯ 계산된 순간 각가속도를 $T_M = Ja_{ins}$ $(J = 16.1kg \cdot m^2)$임을 이용하여 그림 2-마-27과 같이 기계적 토크 곡선을 도출하였다.

㉰ 단,내부 미분 프로세스 및 토크 계산을 위한 후처리 과정에서의 누적 오차를 고려할 경우 좌측 붉은 점선까지의 시험 데이터는 무의미한 데이터이다.

㉱ 시험의 안전성을 위해 정격 속도(965RPM@0.3s) 이상의 운행은 제한하였다.

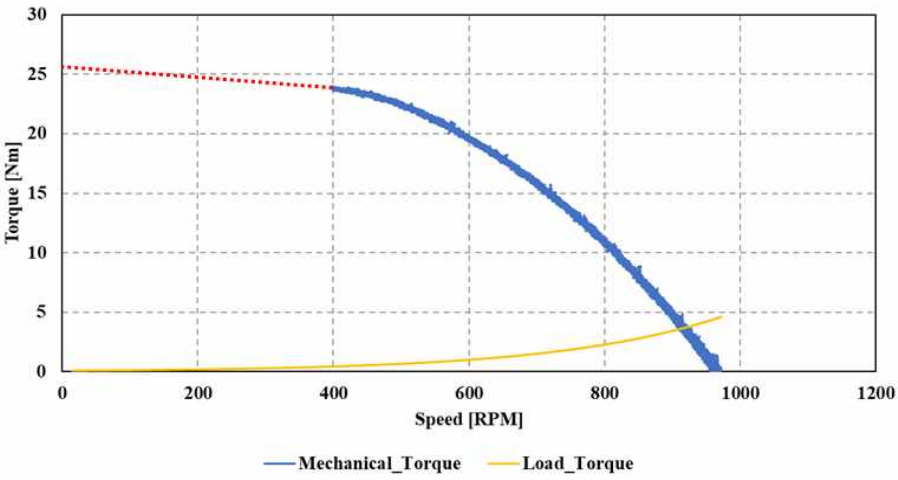


그림 2-마-27 기계적 토크 곡선

④ 전기적 토크 곡선 도출

㉮ 부하-토크 곡선 도출과 기계적 토크 곡선을 도출함에 따라 동역학적 방정식인 $[T_E]-[T_L]=[T_M]$ ([전기적 토크]-[부하 토크]=[기계적 토크])의 관계를 이용하여 전기적 토크 곡선을 그림 2-마-28과 같이 도출하였다.

㉯ 그러나 동기속도에서 전기적 토크는 0이라는 유도전동기의 특성을 고려하면, 그림 2-마-28의 전기적 토크 곡선은 동기속도인 1380RPM에 도달하지 않는 양상을 보인다.

㉰ 이는 측정된 부하 토크의 문제라도 판단되며, NSDLIM의 정확한 성능 측정을 위한 성능 시험 메커니즘을 재검토하였다.

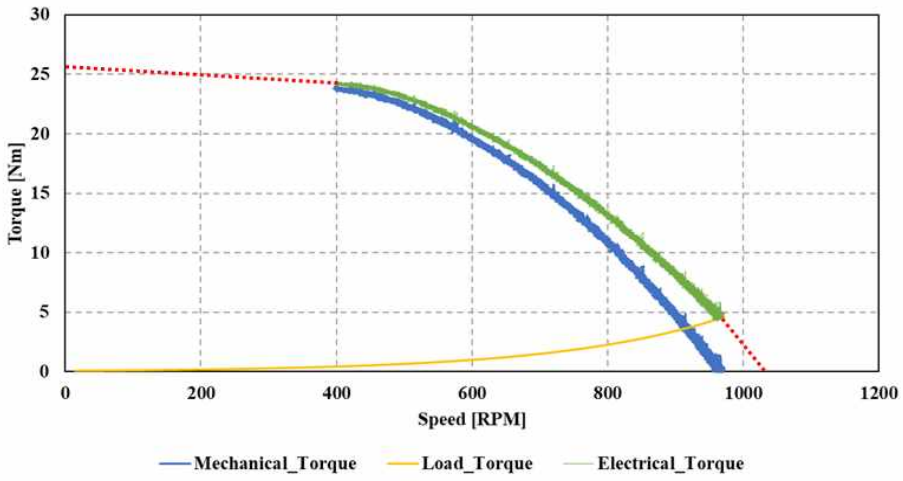


그림 2-마-28 전기적 토크 곡선

(다) 성능 시험 메커니즘 재검토

앞선 1절의 성능 시험 결과를 통해 부하-토크 곡선과 기계적 토크 곡선을 계산한 후 전기적 토크 곡선을 도출하였으나 도출된 곡선의 양상이 동기속도까지 도달하지 않음을 확인하였다. 이에 대한 원인은 다음과 같다.

① 일반적인 유도전동기 시험기에는 토크 미터와 부하용 서보 모터가 존재하나 본 시험기는 공간적·비용적 제약으로 인해 토크 미터와 부하 모터가 없어 부하 토크의 정확한 계측을 할 수 없다.

② 이로 인해 엔코더에서 측정한 각가속도, 각속도를 미분하여 부하 토크를 계산하였기 때문에 이 과정에서 오차가 발생하였을 수 있다.

③ 부하 토크 측정 메커니즘에서 순간 각가속도가 완전히 0이 되도록 측정할 경우 매우 오랜 시간이 소요되기 때문에 기존의 포화 지점의 선정 기준을 임의적으로 선정하였으나, 이는 측정자마다 상이하기 때문에 절대적인 기준이 존재하지 않는다.

④ 따라서 기존에 도출된 부하 토크 곡선은 정확하지 않으며, 동역학적인 추론을 통해 정확한 부하 토크 곡선을 다음의 근거를 통해 추정하였다.

㉮ 부하 토크 곡선 도출 결과를 통해 곡선의 형태는 지수 함수이다.

㉯ 유도전동기의 토크-슬립 곡선의 저슬립 영역은 선형적인 특성을 가진다.

㉰ 회전체의 부하가 정격 속도에서의 추진력과 일치하여 실제 시험을 통한 기계적 토크는 0이다.

위의 근거를 통해 동기속도에서 전기적 토크가 0이 되는 형태를 갖는 부하 토크 곡선을 그림 2-마-29과 같이 추정하였으며, 그에 따라 정격 속도에서의 전기적 토크 또한 증가한다(4.3Nm → 9.3Nm).

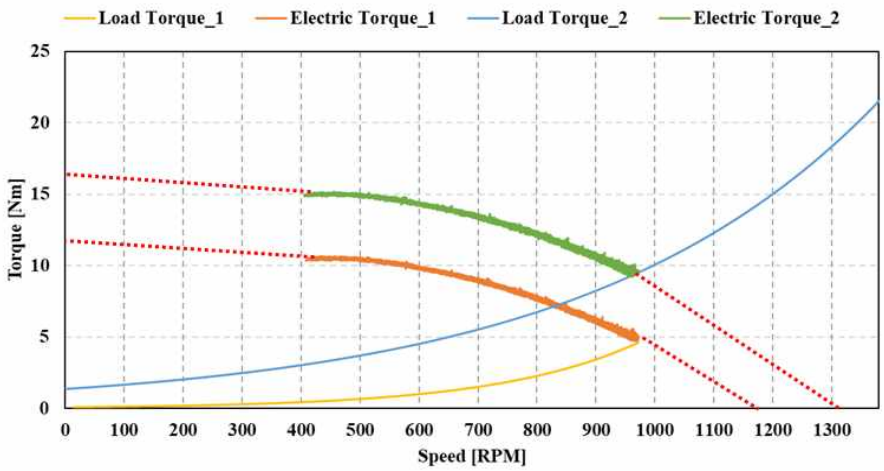


그림 2-마-29 추정된 부하 토크 곡선

(라) 부상 높이에 따른 추진 토크 측정

성능 시험 메커니즘 재검토를 통해 추정된 부하 토크 곡선을 바탕으로 정격 속도에서의 추진 토크를 계산하였다. NSDLIM은 부상하여 주행하기 때문에 부상 정도에 따른 특성 분석이 매우 중요하다. 따라서 시험기 하부에 장착된 볼 스크류를 조절하여 부상 정도에 따른 추진력을 측정하였다. 부상 정도는 1,2차측이 중앙정렬되어 있는 상태(1차측 하단부로부터 -10mm)를 기준으로 1차측 적층 길이의 1/2(최대 부상 높이 35mm)까지 부상하여 추진 토크를 계산하였다. 정격 속도를 달성하는 인가 전류인 20Apeak를 부상 정도에 따라 모두 동일하게 인가하였다. 계산된 전기적 토크 값과 추정된 부하 곡선을 대응하여 그림 2-마-30과 같이 부상 높이에 따른 추진 토크를 계산하였다.

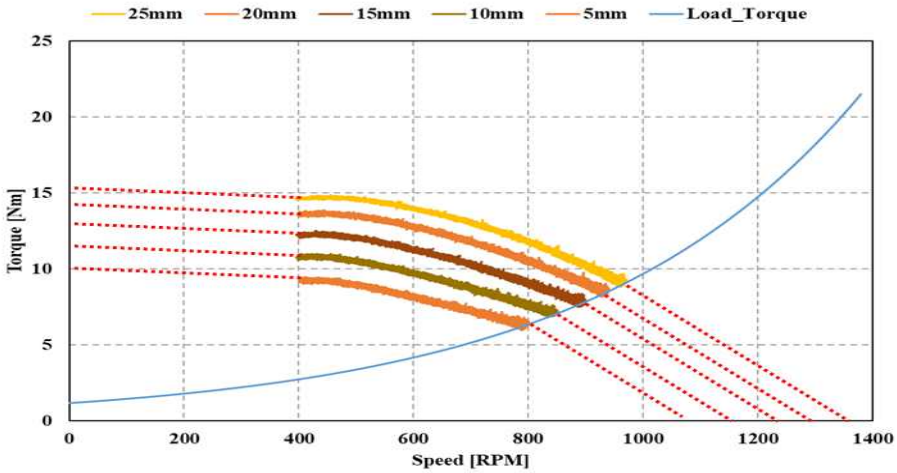


그림 2-마-30 부상 높이에 따른 추진 토크

제어 제원의 한계로 인해 부상 높이 25mm 이상에서는 제어가 되지 않아 시험의 안전성을 위해 20mm 까지만 측정하였다. 그림 2-마-30을 분석해보면 부상 높이가 증가함에 따라 최대 토크가 감소함을 확인할 수 있으며 토크 또한 감소한다. 이는 부상 높이가 증가할 경우 1차측과 쇄교하는 2차측 도체판에서 추진력을 발생시키는 자속 성분이 쇄교 면적의 감소로 인해 감소하기 때문이다. 그림 2-마-31은 부상 높이를 비율로 환산하였을 시 토크 값 및 토크 감소율이다. 부상 비율에 따라 추진 토크는 최소 6.4%에서 최대 29.3%까지 감소함을 확인할 수 있다.

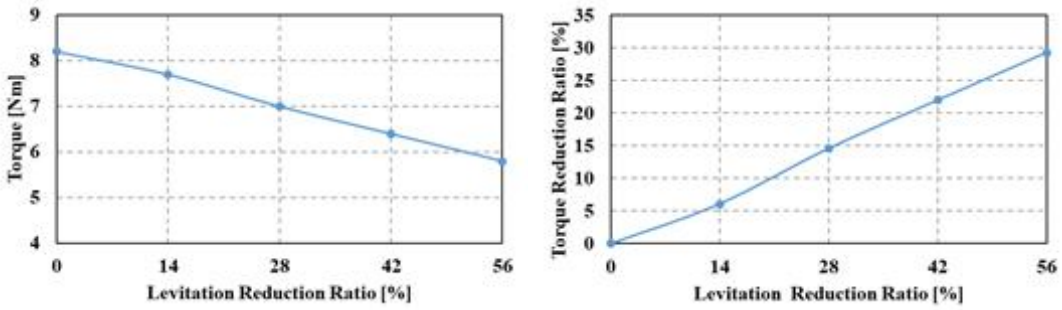


그림 2-마-31 부상 비율에 따른 추진 토크 및 토크 감소율

표 2-마-8 부상 높이에 따른 시험 결과 값

부상 높이(mm)	추진 토크(Nm)	회전속도(RPM)	부상 비율(%)	토크 감소율(%)
0	8.2	960	0	0
5	7.7	935	14	6.4
10	7	890	28	14.6
15	6.4	845	42	22
20	5.8	790	56	29.3

(6) NSDLIM 축소-회전형 시험기 성능 시험 결과 고찰

앞선 5절에서 NSDLIM의 1,2차측 중앙 정렬 시, 부상 시 추진 토크를 계산하였다. 계산된 결과들을 바탕으로 6절에서는 성능 시험 결과와 시뮬레이션간의 비교 결과를 고찰한다.

그림 2-마-32는 성능 시험과 시뮬레이션간의 비교 결과 그래프이다. 시험 결과 그래프를 분석해보면 좌측 붉은 점선으로 표시한 영역(0.7~1slip)은 측정의 정확도가 매우 떨어지는 무의미한 값이다. 이는 시험기 자체에 장착된 엔코더에서 각가속도를 얻기 위해 측정 포인트마다 수행되는 내부 미분과정에 의해 발생하는 오차와 미분된 각가속도를 추진 토크로 계산하는 과정에서 발생하는 누적 오차 때문이다. 또한 우측 붉은 점선으로 표시한 영역(0~0.3slip)은 시험의 안전성을 고려하여 정격속도 이상에서 운행할 경우 위험요소가 될 수 있다고 판단하여 측정이 불가한 영역이다. 결과적으로 중앙 부분의 영역(0.3~0.7slip)의 고찰만이 가능하다.

고찰에 앞서 성능 시험 결과 파형과 시뮬레이션 간의 비교가 가능한 이유를 다음과 같이 정리하였다.

① 벡터 제어 기법 중 전류 제어를 사용하여 인가 전류는 고정되고 측정 포인트별로 인가되는 전압이 다르다.
② 일반적으로전자기 해석 Tool을 이용한 시뮬레이션의 해석 조건은 전류원 해석과 전압원 해석이 존재한다.
③ 시험기의 제어 특성을 고려하면 인가 전류를 고정하고 측정 포인트별로 전압이 다른 전류원 해석 결과와 시험 결과를 비교하는 것이 타당하다.

성능 시험 결과와 시뮬레이션간의 비교 타당성이 충분하기 때문에 성능 시험 결과를 다음과 같이 고찰하였다.

① 2D Simulation과 3D Simulation를 보면 비례 추이가 발생한 것과 같은 양상을 보인다.

㉮ 이는 2차측 도체판에 생성되는 유도 전류를 1차원적(x,y축)으로만 고려하는 2D Simulation과 유도 전류를 2차원적(x,y,z축)으로 고려하는 3D Simulation간의 차이로 인해 발생한다.

㉯ 또한 2D Simulation에서는 전류원 해석의 경우 상저항 값과 누설 값을 고려하지 않고, 3D Simulation의 경우 저항 값 및 누설 값을 모두 고려한다. 이로 인해 2차 저항이 변동하게 되어 비례 추이와 유사한 현상이 발생한다.

㉰ 따라서 2D Simulation과 성능 시험 결과값의 비교를 위해서는 2차측 저항 값을 변동하여 해석을 재진행한 후 결과를 비교하여야 한다.

② 3D Simulation과 성능 시험 결과 값을 비교해보면 추진 토크의 절대 값은 상이하지만 파형의 형태는 매우 유사하다.

㉮ 이는 2차측 재질의 열처리 가공 과정에서 표면 도전율 손실과 투자율의 변화가 발생하여 시뮬레이션 상 2차측 재질의 전기적 물성치와 실제 제작된 2차측 재질의 전기적 물성치가 다르기 때문이다.

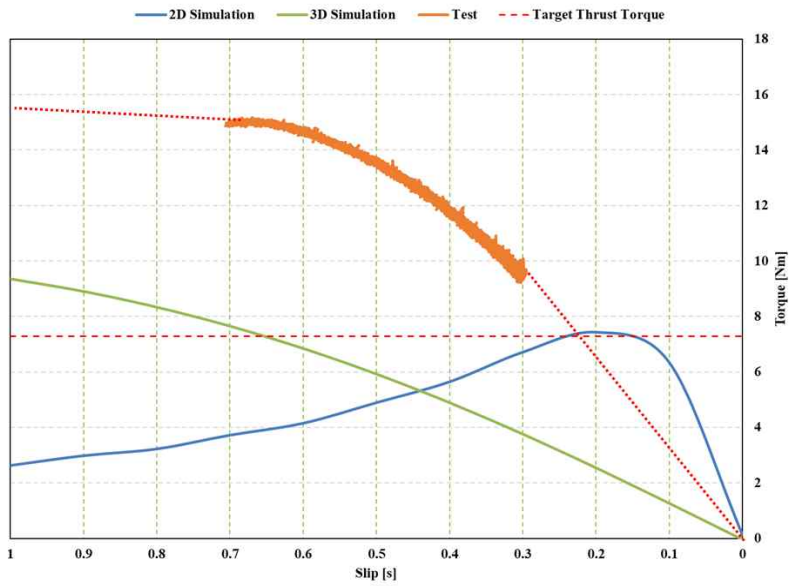


그림 2-마-32 성능 시험결과와 시뮬레이션간 결과 비교

2D Simulation과 성능 시험간의 유사성을 재검토하기 위해 2차측 저항을 가변하여 해석을 재수행하였으며, 해석 결과를 그림 2-마-33, 표 2-마-9에 도시하였다. 해석 결과를 분석해보면 2차측의 도전율이 감소함에 따라서 비례 추이 현상이 발생하며, 도전율 10%에서의 결과 값이 3D Simulation과 성능 시험 결과 값의 양상과 비슷함을 확인할 수 있다.

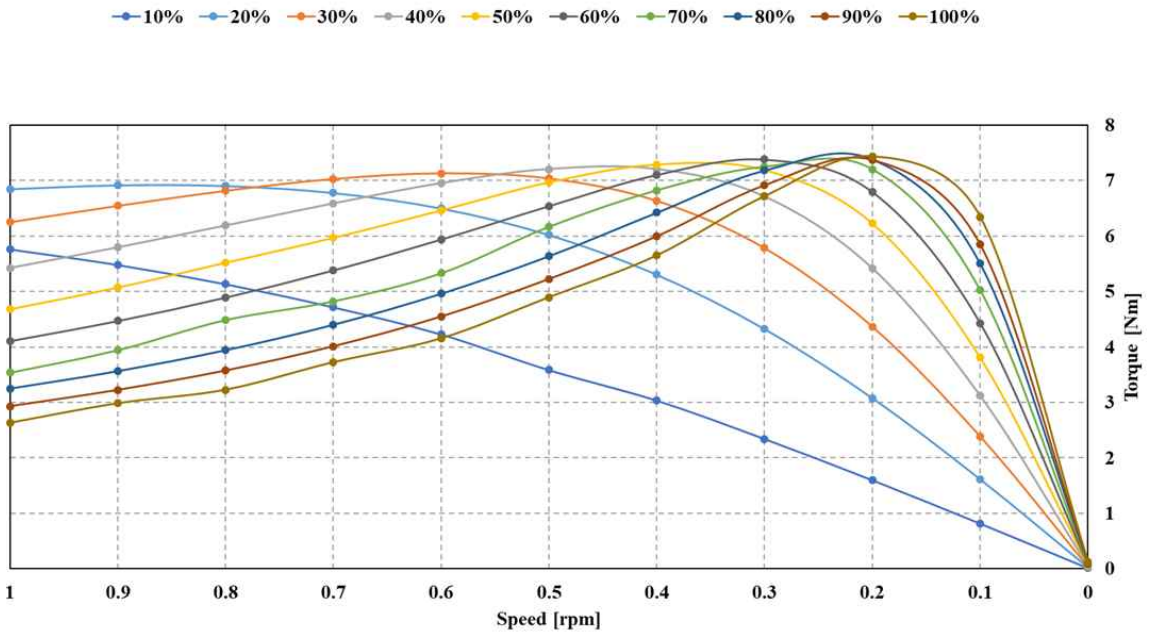


그림 2-마-33 2차측 도전율 가변 파라미터 해석

표 2-마-9 2차측 도전율 가변 파라미터 해석 결과 값

Slip	RPM	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1	0	5.7601	6.8482	6.2488	5.4222	4.6801	4.1068	3.5362	3.2475	2.9306	2.6297
0.9	137.9	5.4799	6.9175	6.5439	5.7934	5.0729	4.4694	3.9415	3.5622	3.225	2.982
0.8	275.8	5.1329	6.9052	6.815	6.1869	5.5195	4.8917	4.4857	3.9403	3.5746	3.2256
0.7	413.7	4.7156	6.7787	7.0287	6.5854	5.9685	5.3808	4.8228	4.3993	4.0126	3.7215
0.6	551.6	4.2261	6.4989	7.1309	6.9508	6.4631	5.9376	5.3277	4.9591	4.5495	4.1522
0.5	689.5	3.5834	6.0216	7.0383	7.2049	6.9684	6.5394	6.1653	5.6365	5.226	4.8937
0.4	827.4	3.0343	5.3058	6.6342	7.2037	7.2893	7.1009	6.8239	6.4207	5.9963	5.6472
0.3	965.3	2.3419	4.3242	5.7812	6.7092	7.1886	7.3774	7.2484	7.1829	6.9177	6.7151
0.2	1103.2	1.5977	3.0791	4.3662	5.4152	6.2245	6.793	7.2014	7.3837	7.3734	7.4334
0.1	1241.1	0.8157	1.6158	2.3876	3.1196	3.8052	4.4294	5.0228	5.4993	5.8463	6.3439
0	1379	0.0126	0.0254	0.0383	0.0511	0.0641	0.0771	0.0897	0.1029	0.1028	0.1282

도전율 10% 2D Simulation 결과와 3D Simulation 결과, 성능 시험 결과 값 간의 비교를 그림 2-마-34와 같이 수행하여, 최종적으로 축소-회전형 시험기를 이용한 NSDLIM의 성능 측정 및 고찰 결과를 정리하였다.

① 성능시험 결과로부터, 시뮬레이션과의 오차가 매우 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 시험기의 추진력 측정에 있어서 시험기의 구조적 한계로 토크메터 등 측정장비를 사용하지 않고 엔코더를 이용하여 얻은 속도값을 연산하여

얻은 값으로서, 가속도 계산 과정 중의 오차로 파악된다. 또한 시뮬레이션에 사용된 재질과 달리, 실험에 사용된 2차측 도전율의 가공과정에서의 재질 정수 변형이 영향을 준 것으로 사료된다.

② 시뮬레이션과 성능 시험 결과 값의 절대적인 추진 토크 값은 제한된 시험 조건에서 발생하는 측정 오차로 인해 차이가 발생하지만, 결과의 경향성은 파악할 수 있다.

③ 결과의 경향성을 파악할 수 있다는 것은 일반적인 LIM과는 달리 이중 공극과 양측식인 선형유도전동기인 NSDLIM의 성능 특성 예측이 일정 수준이상 가능하다는 것을 의미하며, 이는 제한된 시험조건을 고려하였을 경우 상당히 유의미한 성과이다.

④ 본 연구의 결과를 바탕으로 추후 시험기의 계측 장비 고도화 및 2D와 3D Simulation간의 해석 기법 고도화 연구를 통해 해석 오차를 줄일 가능성이 매우 높다고 판단된다.

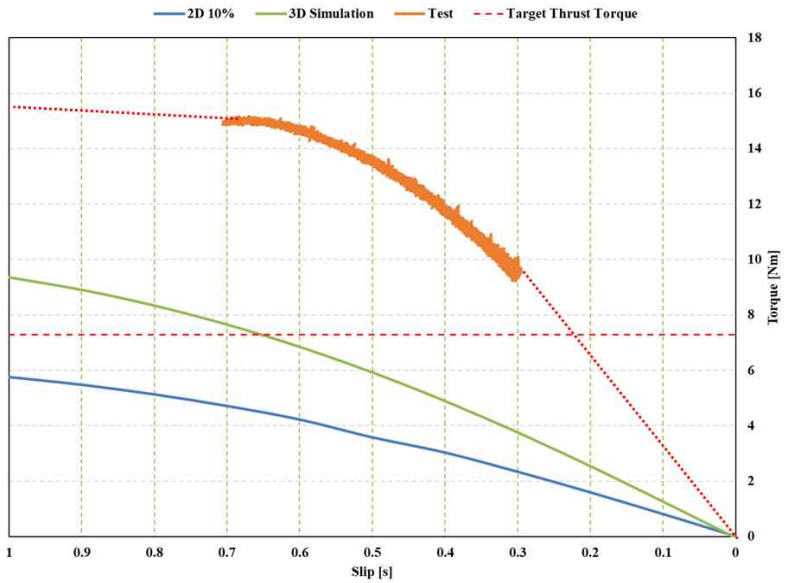


그림 2-마-34 2D & 3D 시뮬레이션과 성능 시험간 최종 비교

바. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구 개발을 통해 초고속 자기부상 열차의 추진, 부상, 안내 일체형 시스템으로 NSDLIM을 제안하고, 국내·외 기술 현황 조사 및 시스템의 적용 가능성과 타당성 분석을 진행하였다. 요구사항 분석을 통한 NSDLIM의 기본 모델을 설계하고, 2차원 성능 분석을 통한 피드백으로 통해 NSDLIM의 기본 설계를 수행하였다. 또한, 출력 특성에 영향을 미치는 1, 2차측 파라미터(공극, 2차측 도체판 두께, 매극매상 슬롯 수, 단절율)를 선정하여 성능 향상을 위한 상세 설계를 수행하였다. 상세 설계 결과 기본 설계 모델의 추진력 대비 약 5배 이상의 추진력을 확보하였으며, 이는 요구 부상력 만족을 위한 유의미한 설계 결과이다.

NSDLIM은 추진/부상/안내력이 하나의 시스템에서 모두 구현되기 때문에 정확한 전자기적 특성 분석을 위해서는 3차원 성능 분석이 필수적이다. 일반적으로 3차원 유한요소 해석 기법은 Time Domain Solver를 사용하나 해석 시간이 매우 길다는 단점이 있다. 하지만 본 연구에서는 선형유도전동기의 3차원 성능 특성 분석을 위해 공간고조파 개념을 적용한 Frequency Domain Solver에 대한 해석 기법을 정립함으로서 기존 Time Domain Solver 해석 시간의 1/10 수준까지 해석 시간을 단축하였으며, 해석 결과 비교를 통해 오차가 평균 10% 이내로 3차원 유한요소 해석의 경제성을 매우 향상시켰다.

공간고조파를 이용한 3차원 해석 기법의 정립을 통해 NSDLIM의 추진/부상/안내력의 정확한 특성 분석이 가능하며, 이는 향후 선형유도전동기의 3차원 특성 분석 기법에 대한 원천 기술로서 이용이 가능하고, 더 나아가 산업계 분야에서 활용성이 매우 높다고 판단된다.

또한, NSDLIM의 성능 검증을 위해 기존의 일반적인 LIM의 시험 장치와는 다른 새로운 형태의 축소-회전형 시험기의 설계 및 제작을 통해, 양측식 구조의 고속 선형유도전동기의 실용화를 위한 원천 기술을 확보하였다. 또한, 국내에서 양측식 구조의 고속 선형유도전동기를 제작한 것은 최초이며, 지속적인 연구개발을 통해 세계 하이퍼루프 실용화 시장 진입에 있어 본 연구개발 성과를 통해 상당한 경쟁력을 확보할 수 있다고 판단된다.

NSDLIM을 특수성과 제한된 시험 조건을 고려하여 추진력만을 측정할 수 있는 성능 시험을 수행하고 시뮬레이션과 성능 시험간의 결과를 비교하여 고찰하였다. 고찰 결과 제한적인 시험 환경으로 인해 측정된 추진력 결과 값의 절대치는 차이가 발생하지만 시뮬레이션과 성능 시험간의 추진력 파형의 경향성을 파악할 수 있었다. 일반적인 회전형 전동기의 경우, 공극이 작고 해석 기법 및 제작 기술이 발달되어 있기 때문에 시뮬레이션과 실제 제작된 전동기간의 특성 오차율이 적다. 그러나 본 연구의 NSDLIM은 특수한 구조로 인해 이중 공극을 가지고 있고, 이로 인해 누설되는 값을 정확히 예측할 수 없다. 따라서 본 연구에서 수행한 성능 시험 결과는 이중 공극으로 인해 예측이 매우

어려운 양측식 구조의 고속 선형유도전동기의 성능 특성 검증 기법에 대한 원천 기술을 확보했다고 사료된다.

본 연구에서 제시한 추진/부상/안내 일체형 All-in-One 시스템의 실용화를 위해서는 향후 다음과 같은 사항을 고려할 필요가 있다.

◦ 실모델 3D 해석 시간 단축 및 오차 저감에 대한 개선된 기법 도출
◦ 추진력 대비 부상력 증대를 위한 적정 운전 슬립(Slip) 도출
◦ 장계자형 NSDLIM의 경제성을 고려한 단계자형 모델 검토 및 이에 따른 종방향 단부 효과 저감 방안
◦ 1,000km/h 초고속 운행에 가능한 안전율 확보를 위한 공극 최소화 방안
◦ 차량의 1, 2차 현가장치를 고려한 동역학 해석

향후 연구로는 시험 계측 기법 및 장비의 고도화를 통해 NSDLIM의 부상력 및 안내력 측정을 통해 공간고조파를 이용한 3차원 특성 해석 기법 및 2차원 유한요소 해석 기법을 더욱 고도화시켜 하이퍼루프용 양측식 선형유도전동기 특성 해석 기법에 대한 독자적인 기술을 확보할 예정이다. 이를 바탕으로 추진/부상/안내력의 측정 및 검증을 통해 세계 최초의 추진/부상/안내 일체형 NSDLIM의 설계 타당성을 검증할 것이다.

또한, 자기부상열차의 핵심 힘인 부상력의 향상을 위해 본 연구에서 정립한 설계 기법과 해석 기법을 적용하여 추진력 대비 부상력 발생 비율을 향상하기 위한 연구개발을 수행할 예정이다.

사. 연구개발 성과

(1) 논문 게재 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	A Study of Non-Symmetric Double-Sided Linear Induction Motor for Hyperloop All-In-One System (Propulsion, Levitation, and Guidance)	IEEE Transactions on Magnetics	지우영	54	미국	IEEE	SCI	2018.11
2	하이퍼루프 적용을 위한 추진/부상/안내 일체형 DSLIM의 설계 연구	한국철도학회 논문집	서교영	22	대한민국	한국철도학회	비SCI	2019.11
3	Study on the Performance Analysis of Double Side Flat Type Linear Induction Motor Using Frequency Domain Solver	대한전기학회 논문지	이성구	68	대한민국	대한전기학회	비SCI	2019.12
4	Study on the Analysis Error by Transverse Edge Effect of Flat Type Linear Induction Motor	Journal of JAITC	이성구	9	대한민국	한국정보기술학회	비SCI	2019.12
5	Frequency Domain Solver를 이용한 평판형 선형유도전동기의 성능해석의 해석오차에 관한 연구	한국철도학회 논문집	이성구	21	대한민국	한국철도학회	비SCI	2018.12

(2) 특허 성과

번호	특허명	국명	출원			등록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	비대칭 양측식 선형유도전동기를 이용한 추진, 부상, 안내 일체형 시스템	대한민국	이형우	2017 04.13	10-20 17-00 47960	이형우	2019. 05.02.	10-20 17-00 47960	100
2	개선된 2차측 형상을 갖는 비대칭 선형유도전동기	대한민국	이형우	2018 11.20	10-20 18-01 43685	-	-	-	100
3	선형유도전동기를 이용한 스포크가 없는 1휠 자기부상 방식 모터사이클	대한민국	이형우	2019 09.10	10-20 19-01 12091	-	-	-	100

(3) 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	24th MAGLEV International Conference	지우영	2018.09.06	Emperor Alexander St.Petersburg State Transport University	러시아
2	64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials	서교영	2019.11.06	Rio All-Suite Hotel & Casino, Las Vegas	미국
3	2019 Spring Condference of the Korean Society for Railway	서교영	2019.05.23	여수엑스포컨벤션센터	대한민국
4	2019 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway	서교영	2019.11.14	휘닉스 제주	대한민국

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구 목표 및 목표 달성 여부

(1) 정성적 목표 및 달성 여부

연구 목표	목표 달성 여부	비중 (%)	달성도 (%)
○ All-in-One 시스템 기본설계/상세설계	○ 하이퍼루프를 포함한 초고속 자기부상열차의 추진, 부상, 안내 기술 및 성능평가 관련 기술 조사 및 분석 완료 ○ 비대칭 양측식 선형유도전동기 기본 설계 완료 - 차량 운행 요구 사양(차량 길이, 중량, 요구 가속도, 요구 추진·부상·안내력)을 고려한 기본 설계 ○ 비대칭 양측식 선형유도전동기 상세 설계 완료 - 2D/3D 유한 요소 해석을 통해 요구 추진·부상력 향상을 위한 1차측/2차측 파라미터 재설계	30	30
○ AII-In-One 시스템의 파라미터 분석	○ 비대칭 양측식 선형유도전동기의 주요 파라미터(Airgap, Material, Reaction Plate, Number of Slot per Pole, Short-Pitch-Factor) 변화에 따른 추진/부상력 분석 완료 ○ 초고속 주행 시(1000km/h) 요구사항을 만족하는 주요 파라미터 도출 및 분석 완료	30	30

○ 비대칭 양측식 선형유도전동기 추진력 / 부상력 / 안내력 특성해석기법 정립	○ 선형유도전동기에서 발생하는 종방향 및 횡방향 단부효과를 고려한 해석기법에 대한 기존 문헌 조사 ○ Analytical method 기반 종방향 단부효과에 의한 추진력 특성변화의 정량적인 분석 및 이를 통한 효율적인 해석모델 선택 프로세스 정립 (종방향 단부효과에 의한 추진력의 저하율을 기준으로 full 모델 및 1극 혹은 2극 주기모델 사용여부 판단) ○ 주기모델을 이용한 양측식 선형유도전동기의 추진력 성능 해석을 위한 FEM solver 별 특성해석기법 정립 완료 ○ 2극 주기모델 및 2극 비주기 모델의 병용사용을 통한 종방향 단부효과를 고려할 수 있는 해석기법에 관한 연구 완료 ○ All-in-One 시스템의 부상력 해석을 위한 비대칭 조건에서의 횡방향 단부효과(Transverse edge effect) 해석을 위한 3차원 특성해석기법 정립 완료 ○ 공간고조파 해석기법과 2극 축소 해석모델을 이용한 선형유도전동기의 부상력 특성해석 기법 정립 완료 ○ 평형점 기준 변위에 따른 복원력에 해당하는 안내력에 대한 특성해석기법 정립 완료 ○ 종방향, 횡방향 단부효과를 고려한 안내력 해석용 2차원 및 3차원 Hybrid 특성해석기법 정립 완료	20	20
○ 축소-회전형 시험기를 이용한 All-In-One 시스템 성능 검증	○ 축소-회전형 시험기용 비대칭 양측식 선형유도기 설계 및 제작 완료 ○ 축소-회전형 시험기를 이용한 NSDLIM의 성능 시험 및 결과 분석 완료	20	20
합계		100	100

(2) 정량적 목표 및 달성 여부

성과점검기준표에 명시된 정량적인 성과를 모두 달성하였으며, 추가적으로 SCI급 논문 1편, SCI-E급 논문 1편(게재 확정 및 행정 절차 진행중), KCI급 논문 1편을 설정 목표 대비 초과 달성하였다.

성과점검기준표(총괄)

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	1000km/h급 비대칭 양측식 선형유도 전동기 원천기술 개발	1-1	All-in-One 시스템 실 모델 설계	①	기본설계/상세설계 완료	시속 1000km 가속도 4.9m/s^2	-	전자계 해석	해석결과	10	특허 : 출원 1(1) 건 등록 1(1) 건 논문 : 1(1) 건 시제품 : 건 S/W : 건
					②	파라미터 분석	추진/부상/안내력 요구 만족	-	전자계 해석	해석결과	10	
					③	최종설계안 제시	시속 1000km 가속도 4.9m/s^2	-	전자계 해석	설계도면	10	
			1-2	축소 모델을 이용한 All-in-One 시스템의 성능 검증	①	축소 회전형 시험기 설계	최소 안전율내 최고 선속도	-	제작 사양서 및 도면	전문가 자문을 통한 유효성 검증	10	특허 : 출원 1(1)건 등록 건 논문 : 건 시제품 : 1 건 S/W : 건
					②	축소 회전형 시험기 및 구동드라이브제작	추진/부상 파라미터 측정가능 여부	-	제작 사양서 대비 육안검사	제작 보고서	20	
					③	성능 평가(안) 도출 및 성능 검증	추진/부상 파라미터 요구 만족	-	시험설비 활용측정	시험 성적서	10	
공동	2	All-in-One 시스템 특성해석 기법 개발	2-1	All-in-One 시스템 3자유도 힘 특성해석 기법 정립	①	2D 추진력 해석	기존 해석기법 대비 해석성능 향상 (해석시간 및 오차율)	시간 1/10, 오차 6% 이내	기존 2D/3D FEM 해석 및 시험기 성능과 비교 검증	해석결과 및 시험성적	10	특허 : 출원 건 등록 건 논문 : 3 (2) 건 시제품 : 건 S/W : 건
					②	3D 부상력 해석		오차 10% 이내			10	
					③	3D 안내력 해석		오차 10% 이내			10	
계											100	특허 : 출원 2 (2)건 등록 1 (1)건 논문 : 5 (3)(건 시제품 : 1(1) 건 S/W : 건

나. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

전체연도에 대한 정량적, 정성적 목표를 모두 달성하였다. 본 연구를 통해 추진/부상/안내력을 하나의 시스템에서 모두 발생시키는 비대칭 양측식 선형유도전동기(NSDLIM)의 3방향 힘을 시뮬레이션을 이용하여 분석하였고, 그에 대한 해석 기법들을 정립하였다. 또한, 성능 검증을 위한 새로운 형태의 축소-회전형 시험기를 설계하고 제작하여 제한된 시험 환경을 고려하여 NSDLIM의 추진력 성능을 검증하였다. 추가적으로 부상력 및 안내력에 대한 성능 검증을 위한 연구가 필수적으로 수행되어야하며, 이를 위한 해석 기법 및 계측 장비 고도화에 관한 연구가 수행되어야 한다. 향후 지속적인 연구 개발을 통해 NSDLIM에 대한 완성된 기술을 확보할 경우, 세계 최초의 기술로서 국가적 이익 증대 및 첨단 철도 산업 분야에 대한 주도적인 역할을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

본 연구 사업에서 도출된 NSDLIM(비대칭 양측식 선형유도전동기) 설계/해석 기법 및 축소 회전형 시험기를 통한 성능 검증 기술은 향후 “1000km/h 이상급 추진-부상-안내 일체형 초고속 자기부상열차의 연구 개발 사업”의 연구 기초 자료로 활용이 가능하다.

본 연구 사업에서 도출된 연구 결과물은 체계적인 관리가 가능하도록 구성이 되었으며, 초고속 자기부상열차 분야에 대한 발전 전략 수립의 기초 및 정부 정책 수립의 기초 자료로 활용이 가능하다.

본 연구에서 검토된 선행 연구 결과를 토대로 “NSDLIM(비대칭 양측식 선형유도전동기)를 이용한 1000km/h급 추진-부상-안내 일체형 All-In-One 시스템 핵심 기술 개발” 사업의 발굴을 위한 기획연구를 향후 추진할 계획이며, 기획연구를 수행하는 과정에서 관련 유관기관과의 협의체를 구성하여 본 사업 추진을 위한 다양한 협의를 수행할 계획이다.

본 연구의 설계 및 해석 기법을 적용하여 포스코에서 주관하는 “공기역학 및 전자기 시뮬레이션을 이용한 하이퍼루프 튜브구조물 철강재료 적용성 연구” 과제를 수행중이다.

붙임. 참고문헌

※ 해당사항 없음

비매품/무료
93530
9 791195 873661
ISBN 979-11-958736-6-1

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진 사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.