20CTAP-C157784-01

공조용 SynRM 개발 최종보고서

가격과 효율 경쟁력을 갖는 철도

2022

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

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

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

발간등록번호 : 11-B552989-000523-01

R&D / 20CTAP-C157784-01

가격과 효율 경쟁력을 갖는 철도 역사 공조용 SynRM 개발 최종보고서

2022.04.11.

주관연구기관 / 한양대학교 산학협력단
참여연구기관 / ㈜로텍
㈜서보산전

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'가격과 효율 경쟁력을 갖는 철도 역사 공조용 SynRM 개발'(연구개발 기간 : 2020.04.13~ 2021.12.31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2022. 04. 11.

주관연구기관명 : 한양대학교 산학협력단 (대표자) 변중무 (인)
참여기관명 : ㈜ 로텍 (대표자) 김태훈 (인)
㈜ 서보산전 (대표자) 김덕민 (인)

주관연구기관책임자: 이 주
참여기관책임자: 김호기
조유환

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘가격과 효율 경쟁력을 갖는 철도 역사 공조용 SynRM 개발’(연구개발 기간 : 2020.04.13~2021.12.31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2022. 04. 11.

주관연구기관명 :	한양대학교 산학협력단	(대표자) 변중무	(인)
참여기관명 :	㈜ 로텍	(대표자) 김태훈	(인)
	㈜ 서보산전	(대표자) 김덕민	(인)

주관연구기관책임자: 이 주
참여기관책임자: 김호기
조유환

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)
공고번호	공고-제05호	연구개발과제번호		21CTAP-C157784-02
국가과학기술 표준분류	ED0301 70%	EA0904 30%		
연구주제	(대분류) 기존 수송시스템 혁신기술 도입	(중분류) 철도·항공 전략산업화	(소분류) 철도부품 국산화·표준화	

연구개발과제명	국문	가격과 효율 경쟁력을 갖는 철도 역사 공조용 SynRM 개발		
	영문	Development of SynRM with Competitive Price and Efficiency for Air Ventilation System in Railway Station		
주관연구개발기관	기관명	한양대학교 산학협력단	사업자등록번호	206-82-07306
	주소	(04763)서울시 성동구 왕십리로 222	법인등록번호	111171-0007522
연구책임자	성명	이 주	직위	정교수
	연락처	직장전화	휴대전화	
		전자우편	국가연구자번호	
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)		
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31 (9개월)		
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (1년)		

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지자체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	320,000	11,335	96,999	-	-	-	-	331,335	96,999	428,334	-
1년차	125,000	4,168	37,499	-	-	-	-	129,168	37,499	166,667	-
2년차	195,000	7,167	59,500	-	-	-	-	202,167	59,500	261,667	-

공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관	㈜로텍	김호기				공동	중소기업
	㈜서보산전	조유환				공동	중소기업
위탁연구개발기관							
연구개발기관 외 기관							

연구개발담당자 실무담당자	성명	박예지	직위	박사과정	
	연락처	직장전화	휴대전화		
		전자우편	국가연구자번호		

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 3 월 4 일

연구책임자 : 이 주 (직인)

주관연구개발기관의 장 : 한양대학교 산학협력단 하성규 (직인)

공동연구개발기관의 장 : ㈜ 로텍 김태훈 (직인)

위탁연구개발기관의 장 : ㈜ 서보산전 김덕민 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)
공고번호	공고-제05호	연구개발과제번호		21CTAP-C157784-02

국가과학기술 표준분류	ED0301	70%	EA0904	30%		
연구주제	(대분류) 기존 수송시스템 혁신기술 도입		(중분류) 철도・항공 전략산업화		(소분류) 철도부품 국산화・표준화	

연구개발과제명	국문	가격과 효율 경쟁력을 갖는 철도 역사 공조용 SynRM 개발		
	영문	Development of SynRM with Competitive Price and Efficiency for Air Ventilation System in Railway Station		
주관연구개발기관	기관명	한양대학교 산학협력단	사업자등록번호	206-82-07306
	주소	(04763)서울시 성동구 왕십리로 222	법인등록번호	111171-0007522
연구책임자	성명	이 주	직위	정교수
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)		
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31 (9개월)		
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (1년)		

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	320,000	11,335	96,999	-	-	-	-	331,335	96,999	428,334	-
1년차	125,000	4,168	37,499	-	-	-	-	129,168	37,499	166,667	-
2년차	195,000	7,167	59,500	-	-	-	-	202,167	59,500	261,667	-

공동연구개발기관 등	기관명	책임자	비고	
			역할	기관유형
공동연구개발기관	㈜로텍	김호기	공동	중소기업
	㈜서보산전	조유환	공동	중소기업
위탁연구개발기관				
연구개발기관 외 기관				—

연구개발담당자 실무담당자	성명	박예지	직위	박사과정

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 3 월 4 일

연구책임자 : 이 주 (직인)

주관연구개발기관의 장 : 한양대학교 산학협력단 하성규 (직인)

공동연구개발기관의 장 : ㈜ 로텍 김태훈 (직인)

위탁연구개발기관의 장 : ㈜ 서보산전 김덕민 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

기대효과	- 가격 경쟁력을 갖는 고효율 SynRM의 국산화 개발로 철도부품 시장의 신수요 창출 및 세계 고효율 전동기 시장 점유율 추가 확보 - 전동기의 효율 개선을 통해 공조 및 환기시스템이 장시간 가동되는 지하철 역사, 공항 등 다양한 산업분야에 적용하여 에너지 소비 저감 ○ 기대효과 - 기술적 측면 ▫ 고효율 SynRM 설계, 제작 기술력 확보를 통한 철도 부품 국산화로 기술경쟁력 확보 ▫ 향후 지하철 역사, 공항 등의 친환경 공조 및 환기 시스템 구축을 위한 기반 기술 확보 - 경제적・산업적 측면 ▫ 고효율 전동기를 필요로 하는 철도 부품 국산화로 국내 전동기 관련 산업의 신규 매출 및 일자리 창출 ▫ 국외기술에 의존중인 고효율 전동기 기술을 국산화하여 국내 전동시장의 활성화 및 유지보수 비용 최소화 ▫ 고효율 SynRM 적용 시 기존 송풍용 유도전동기 대비 고효율 및 고출력밀도로 인해 에너지 소비 감소로 연간 전기세 약 37억원 절감 가능 - 사회적 측면 ▫ 고효율 SynRM은 정부의 전동기 최저 효율제에 부합 및 온실가스 (CO2) 감축 목표 달성을 위해 고효율 SynRM 적용 시 온실가스 감축 목표에 기여 ▫ 고효율 전동기 개발로 녹색교통 취지에 적합하여 시너지 효과 극대화
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명정보	생물자원		정보	실물
	6	6		4								

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호

국문핵심어 (5개 이내)	고효율 전동기	동기릴럭턴스 전동기	압축기	송풍용 전동기	센서리스 제어
영문핵심어 (5개 이내)	High efficiency motor	Synchronous reluctance motor	Compressor	Fan motor	Sensorless control

< 요 약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="3">국토교통기술촉진연구사업</td><td colspan="2" rowspan="2">연구개발과제번호</td><td colspan="2" rowspan="2">21CTAP-C157784-02</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="3">국토교통기술혁신연구</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술표준분류</td><td>ED0301</td><td>70%</td><td>EA0904</td><td>30%</td><td colspan="2"></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">연구주제</td><td colspan="2">(대분류) 기존 수송시스템 혁신 기술 도입</td><td colspan="2">(중분류) 철도・항공 전략산업화</td><td colspan="2">(소분류) 철도부품 국산화・표준화</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">가격과 효율 경쟁력을 갖는 철도 역사 공조용 SynRM 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발기간</td><td colspan="6">2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 428,334 천원
(정부지원연구개발비 : 320,000 천원, 기관부담연구개발비 : 108,334 천원,
지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="3">기초[ ] 응용[ ] 개발[✔]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td colspan="2">기술성숙도</td><td colspan="2">착수시점 기준(4)
종료시점 목표(5)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [ ] 자유공모 [✔]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">비실용화</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구
개발
목표
및
내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">가격경쟁력을 갖는 고효율 압축기 및 송풍용 SynRM개발</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">○ 가격 경쟁력을 갖는 고효율 SynRM 전동기 최적 설계 연구
- 고효율 공조용 압축기 및 송풍용 SynRM 기초 설계
▫ 압축기 SynRM (5.5 kW / 7.5 kW / 45 kW) 용량에 따른 부하 특성 분석
▫ 송풍용 SynRM (7.5 kW / 30 kW / 55 kW) 용량에 따른 부하 특성 분석
▫ 국내외 논문 및 특허 조사를 통한 SynRM의 설계 기술 분석
▫ 자기등가회로 기반 SynRM 전자계 기초 설계
▫ Finite Element Analysis (FEA)를 통한 기초 모델의 검증 및 고효율화와 소형화를 위한 설계 파라미터 특성 파악 및 분석
- 고효율 공조용 압축기 및 송풍용 SynRM 효율 최적 설계
▫ 효율 개선 및 사이즈 최소화를 위해 약계자 제어 및 경제성을 고려한 SynRM 설계
▫ 최대 효율점 분석을 통한 효율 개선 연구
▫ 구조 해석을 통한 고속 회전시의 전동기 신뢰성 확보
▫ 최종 모델의 FEA 결과 및 공인시험기관에서의 시험 결과 비교 검증

○ 7.5kW급 SynRM 기구부 설계 및 제작기술 연구
- 7.5kW급 SynRM 기구부 설계
▫ 냉각방식 선정 및 구조 연구
▫ 축 하중 및 사용환경을 고려한 기구부 설계
- 전동기 특성 개선을 위한 고정자 및 회전자 철심 제작기술 개발
▫ 회전자 철심의 강성을 고려한 외경 가공 조건 연구
▫ 회전자 외경 가공 전후의 작업절차 개선을 통한 손실 저감 방안 연구
▫ 조립 공차 최소화를 위한 작업 공정 개선 방안 연구
- 7.5kW SynRM의 전자계 설계 결과를 기반으로 기구부 설계 및 시제품 제작
▫ 1차년도 연구결과를 기반으로 구축된 제작 프로세스 검토
▫ 2차년도 전자계 설계 결과를 기반으로 기구부 설계
▫ 성능 검증용 7.5kW SynRM 시작품 제작</td></tr>
</table>

			○ 고효율 SynRM용 센서리스 제어 연구 - 범용 고 용량 인버터의 구조 및 특징 분석 ▫ 파워 모듈의 사양 및 특성 파악 ▫ SMPS 전원 구성요소 및 용량 참조 ▫ 센서리스 기동 방법 및 특성 파악 - 공조 부하 특성 및 센서리스 알고리즘 연구 ▫ 압축기 및 팬의 부하 특성 파악 ▫ 부하에 따른 센서리스 기동 특성 파악 ▫ 부하의 변화에 대응하는 센서리스 알고리즘 연구 - 모터의 구동 사양에 따른 소자 선정 및 회로 설계 및 제작 ▫ 모터의 용량에 최적화된 하드웨어 구조 설계 ▫ 제어기 내부의 Layout 설계 - 공조 시스템의 부하 특성에 적합한 센서리스 알고리즘 개발 ▫ 압축기 및 팬 부하 특성에 대한 센서리스 구동 ▫ 센서리스 기동 시간 및 기동 안정성을 위한 알고리즘 개발 ▫ 최대 효율 운전을 위한 알고리즘 개발 및 특성 시험
	1년차	목표	○ 공조용 압축기 및 송풍용 고효율 SynRM의 기초 연구 ○ 공조용 압축기 및 환기용 전동기에 적합한 7.5 kW급 SynRM 기구부 설계 및 제작 기술 기초 연구 ○ 공조시스템 압축기 및 송풍용 7.5 kW급 SynRM에 적합한 동기 전동기용 센서리스 인버터 기초 연구
		내용	- 고효율 공조용 압축기 및 송풍용 SynRM 기초 설계 ▫ 압축기 SynRM (5.5 kW / 7.5 kW / 45 kW) 용량에 따른 부하 특성 분석 ▫ 송풍용 SynRM (7.5 kW / 30 kW / 55 kW) 용량에 따른 부하 특성 분석 ▫ 국내외 논문 및 특허 조사를 통한 SynRM의 설계 기술 분석 ▫ Induction motor (IM) 와 SynRM의 특성 비교 분석을 통해 SynRM의 이점 도출 ▫ 자기등가회로 기반 SynRM 전자계 기초 설계 ▫ Finite Element Analysis (FEA)를 통한 기초 모델의 검증 및 고효율화와 소형화를 위한 설계 파라미터 특성 파악 및 분석 - 7.5kW급 SynRM 기구부 설계 및 제작기술 기초 연구 ▫ 7.5kW급 SynRM 기구부 설계 · 냉각방식 선정 및 구조 연구 · 축하중 및 사용환경을 고려한 기구부 설계 ▫ 전동기 특성 개선을 위한 고정자 및 회전자 철심 제작기술 개발 · 회전자 철심의 강성을 고려한 외경 가공 조건 연구 · 회전자 외경 가공 전후의 작업절차 개선을 통한 손실 저감 방안 연구 · 조립 공차 최소화를 위한 작업 공정 개선 방안 연구 - 범용 고 용량 인버터의 구조 및 특징 분석 ▫ 인버터의 구조 파악 및 설계 팩터 참조 · 파워 모듈의 사양 및 특성 파악 · SMPS 전원 구성요소 및 용량 참조 · 센서리스 기동 방법 및 특성 파악 ▫ 공조 부하 특성 및 센서리스 알고리즘 연구 · 압축기 및 팬의 부하 특성 파악 · 부하에 따른 센서리스 기동 특성 파악 · 부하의 변화에 대응하는 센서리스 알고리즘 연구
	2년차	목표	○ 공조시스템 압축기 및 송풍용 SynRM의 최적 설계 연구 ○ 성능검증용 7.5kW급 SynRM 시작품 제작

			○ 공조시스템 압축기 및 환기용 전동기에 적합한 동기 전동기용 센서리스 인버터 제작 및 성능 평가
		내용	- 고효율 압축기 및 송풍용 SynRM 효율 최적 설계 ▫ 효율 개선 및 사이즈 최소화를 위해 약계자 제어를 고려한 SynRM 설계 ▫ 경제성을 고려한 SynRM 최적 설계 ▫ 효율맵 작성으로 최대 효율점 분석 ▫ 역률 및 출력 개선을 위한 회전자의 barrier, rib 개수, 두께, 각도 및 고정자 설계 ▫ 원가 절감을 위한 사이즈 최소화 ▫ 구조 해석을 통한 고속 회전시의 전동기 신뢰성 확보 ▫ 최종 모델의 FEA 결과 및 공인시험기관에서의 시험 결과 비교 검증 - SynRM 시제품 제작 ▫ 7.5kW SynRM의 전자계 설계 결과를 기반으로 기구부 설계 및 시제품 제작 · 1차년도 연구결과를 기반으로 구축된 제작 프로세스 검토 · 2차년도 전자계 설계 결과를 기반으로 기구부 설계 · 성능 검증용 7.5kW SynRM 시작품 제작 - 모터의 구동 사양에 따른 소자 선정 및 회로 설계 및 제작 ▫ 모터의 용량에 최적화된 하드웨어 구조 설계 ▫ 제어기 내부의 Layout 설계 - 공조 시스템의 부하 특성에 적합한 센서리스 알고리즘 개발 ▫ 압축기 및 팬 부하 특성에 대한 센서리스 구동 ▫ 센서리스 기동 시간 및 기동 안정성을 위한 알고리즘 개발 ▫ 최대 효율 운전을 위한 알고리즘 개발 및 특성 시험
연구개발성과			○ 핵심 연구성과 - 7.5 kW급 압축기 SynRM 시작품 ▫ 기존 유도전동기를 대체할 공조용 전동기로 효율 개선 및 원가 절감 - 7.5 kW급 송풍용 SynRM 시작품 ▫ 기존 유도전동기를 대체할 송풍용 전동기로 효율 개선 및 원가 절감 - 7.5 kW급 센서리스 제어기 ▫ 압축기 및 팬 부하 특성에 적합한 동기 전동기용 센서리스 인버터 ○ 핵심 연구성과 외 성과물 - 5.5 kW / 45 kW급 공조 공조용 SynRM 전자계 최적 설계 결과 - 30 kW / 55 kW급 송풍용 SynRM 전자계 최적 설계 결과 ○ 정량적 연구성과 - 논문 게재 : 6편 (국외 SCI 3편, 국내 SCI 3편) - 특허 출원 : 6건 (국내 특허출원 4건, 해외 특허출원 2건) - 시작품 : 4건 (7.5 kW급 압축기 SynRM 1대 및 제어기 1대, 7.5 kW급 송풍용 SynRM 1대 및 제어기 1대) <예상되는 연구개발성과 유형>

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 ·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물자원	정보	실물
예상성과 (N/Y)	Y	Y		Y							

연구개발성과 활용방안 및	○ 연구개발 성과의 활용 방안 - 향후 新교통시스템의 친환경 공조 및 환기시스템 구축을 위한 기반 기술 확보

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 ····· 6

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ····· 62

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) ····· 68

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ····· 68

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ····· 70

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

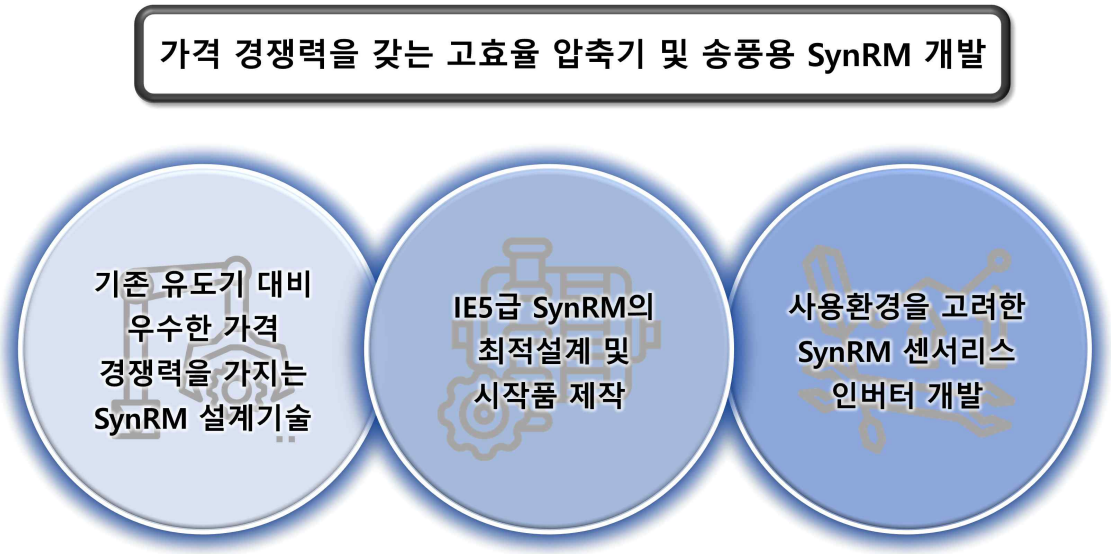


그림 1. 연구개발과제의 최종목표

○ 가격경쟁력을 갖는 고효율 압축기 및 송풍용 Synchronous reluctance motor (SynRM) 개발

- 고효율 공조용 압축기 및 송풍용 SynRM 최적 설계
  - ▹ 기존 유도전동기 대비 고출력밀도 및 고효율 특성을 가지는 SynRM 설계 연구
  - ▹ 주요 설계 파라미터 분석 및 출력 특성에 미치는 영향과 기계적 안정성을 고려한 최적 설계 연구
  - ▹ 설계 요구 사양 및 제약 조건을 만족하는 설계 파라미터의 최적 값 도출을 위한 최적 설계 기법 연구
  - ▹ SynRM의 출력밀도 개선을 통해 기존 유도전동기 원가 대비 97% 수준 달성
  - ▹ 현재 해외 선진사의 효율을 참고하여 최적 설계된 공조용 및 송풍용 SynRM의 효율 94% 이상 달성

- 공조용 압축기 및 송풍용 SynRM 제작 기술 연구
  - ▹ SynRM 회전자 구조의 취약한 강성 보안을 위한 외경 가공 연구
  - ▹ 전동기 제작 및 조립 시 공차 최소화를 위한 손실 저감 연구
  - ▹ 냉각방식 등 구동 환경을 고려한 기구부 설계 연구

- 성능 검증을 위한 SynRM 시작품과 센서리스 인버터 제작 및 시험
  - ▹ 회전자 철심 가공 시 강성 보완, 손실 저감을 위한 가공 방법 연구
  - ▹ 사용 환경을 고려한 공정 프로세스를 활용하여 공조용 및 송풍용 7.5kW SynRM 시작품 제작
  - ▹ 압축기 및 팬 부하의 특성 분석을 통한 센서리스 구동 알고리즘 연구
  - ▹ 전동기 최대 효율 운전을 위한 센서리스 인버터 시작품 제작 및 인버터 효율 95% 이상 달성

2) 연구개발과제의 년차별 목표

○ 1차년도 개발 목표

- 주관연구기관(한양대학교 에너지변환연구실): 공조용 압축기 및 송풍용 고효율 SynRM의 기초 연구
  - ▹ 고효율 공조용 압축기 및 송풍용 SynRM의 기초 설계
    - ▫ 압축기 SynRM (5.5 kW / 7.5 kW / 45 kW) 용량에 따른 부하 특성 분석
    - ▫ 송풍용 SynRM (7.5 kW / 30 kW / 55 kW) 용량에 따른 부하 특성 분석
    - ▫ 국내외 논문 및 특허 조사를 통한 SynRM의 설계 기술 분석
    - ▫ Induction motor (IM)와 SynRM의 특성 비교 분석을 통해 SynRM의 이점 도출
    - ▫ 자기등가회로 기반 SynRM 전자계 기초 설계
    - ▫ Finite Element Analysis (FEA)를 통한 기초 모델의 검증 및 고효율화와 소형화를 위한 설계 파라미터 특성 파악 및 분석

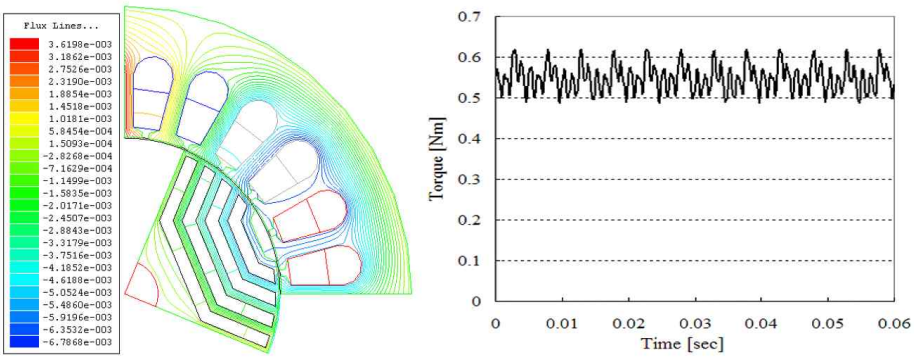


그림 2. SynRM 설계 및 해석

- 참여기관1 ((주)로텍): 공조용 압축기 및 환기용 전동기에 적합한 7.5 kW급 SynRM 기구부 설계 및 제작 기술 기초 연구
  - ▹ 7.5kW급 SynRM 기구부 설계 및 제작기술 기초 연구
    - ▫ 7.5kW급 SynRM 기구부 설계
      - · 냉각방식 선정 및 구조 연구
      - · 축하중 및 사용환경을 고려한 기구부 설계

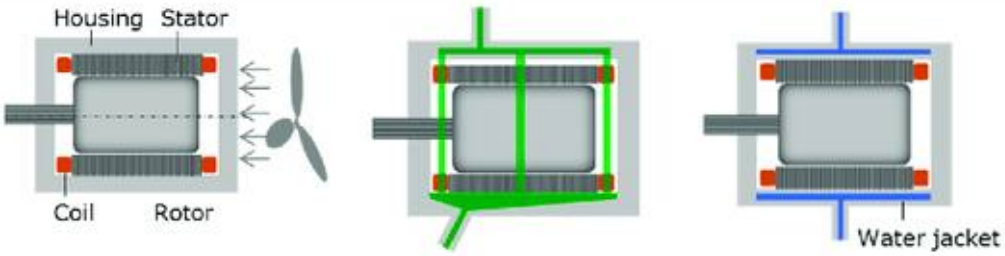


그림 3. 전동기 냉각구조 예시 (공냉, 유냉, 수냉)

    - ▫ 전동기 특성 개선을 위한 고정자 및 회전자 철심 제작기술 개발
      - · 회전자 철심의 강성을 고려한 외경 가공 조건 연구
      - · 회전자 외경 가공 전후의 작업절차 개선을 통한 손실 저감 방안 연구
      - · 조립 공차 최소화를 위한 작업 공정 개선 방안 연구

- 공동연구기관2 ((주)서보산전): 공조시스템 압축기 및 송풍용 7.5 kW급 SynRM에 적합한 동기 전동용 센서리스 인버터 기초 연구

▹ 범용 고 용량 인버터의 구조 및 특징 분석

▫ 인버터의 구조 파악 및 설계 팩터 참조

· 파워 모듈의 사양 및 특성 파악

· SMPS 전원 구성요소 및 용량 참조

· 센서리스 기동 방법 및 특성 파악

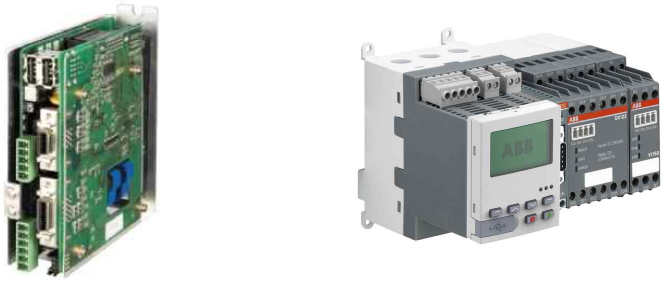


그림 4. 양산 중 인 고용량 인버터

▫ 공조 부하 특성 및 센서리스 알고리즘 연구

· 압축기 및 팬의 부하 특성 파악

· 부하에 따른 센서리스 기동 특성 파악

· 부하의 변화에 대응하는 센서리스 알고리즘 연구

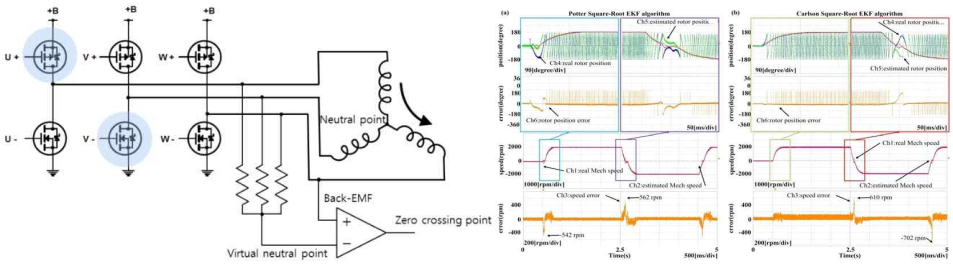


그림 5. 센서리스 구동회로 및 파형

○ 2차년도 개발 목표

– 주관연구기관 (한양대학교): 공조시스템 압축기 및 송풍용 SynRM의 최적 설계 연구

▹ 고효율 압축기 및 송풍용 SynRM 효율 최적 설계

▫ 효율 개선 및 사이즈 최소화를 위해 약계자 제어를 고려한 SynRM 설계

▫ 경제성을 고려한 SynRM 최적 설계

▫ 효율맵 작성으로 최대 효율점 분석

▫ 역률 및 출력 개선을 위한 회전자의 barrier, rib 개수, 두께, 각도 및 고정자 설계

▫ 원가 절감을 위한 사이즈 최소화

▫ 구조 해석을 통한 고속 회전시의 전동기 신뢰성 확보

▫ 최종 모델의 FEA 결과 및 공인시험기관에서의 시험 결과 비교 검증

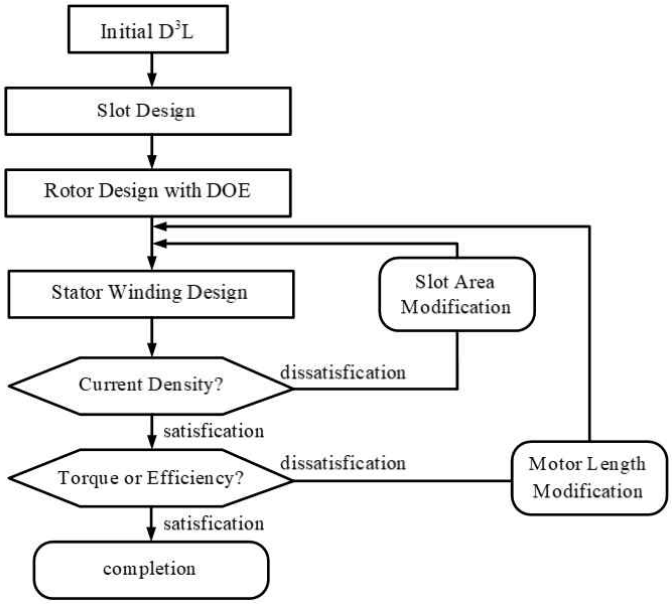


그림 6. 효율 개선을 위한 SynRM 설계 프로세스

- 공동연구기관1 ((주)로텍): 성능검증용 7.5kW급 SynRM 시작품 제작
  - ▹ SynRM 시제품 제작
    - ▫ 7.5kW SynRM의 전자계 설계 결과를 기반으로 기구부 설계 및 시제품 제작
      - · 1차년도 연구결과를 기반으로 구축된 제작 프로세스 검토
      - · 2차년도 전자계 설계 결과를 기반으로 기구부 설계
      - · 성능 검증용 7.5kW SynRM 시작품 제작

- 공동연구기관2 ((주)서보산전): 공조시스템 압축기 및 환기용 전동기에 적합한 동기 전동기용 센서리스 인버터 제작 및 성능 평가
  - ▹ 모터의 구동 사양에 따른 소자 선정 및 회로 설계 및 제작
    - ▫ 모터의 용량에 최적화된 하드웨어 구조 설계
    - ▫ 제어기 내부의 Layout 설계

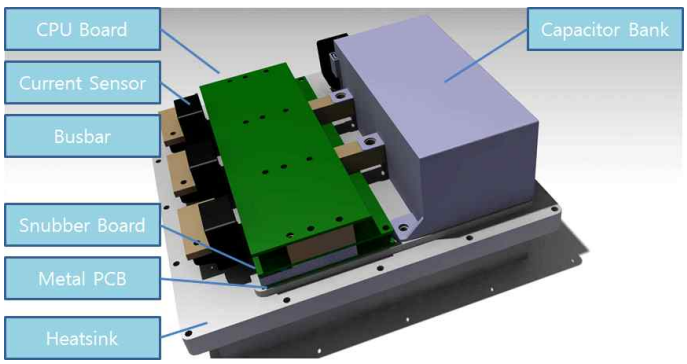


그림 7. 제어기 디자인 예시

    - ▫ 병렬 Power Module 접목
    - ▫ 스위칭 노이즈의 저감을 위한 Snubber 회로 개발
    - ▫ 대용량 파워 소자의 스위칭을 위한 Gate Driver 회로 개발
    - ▫ 전류 및 전압에 따른 하드웨어 Protection 기능 구현
    - ▫ Bootstrap 방식의 전원 설계로 회로 소형화 구현

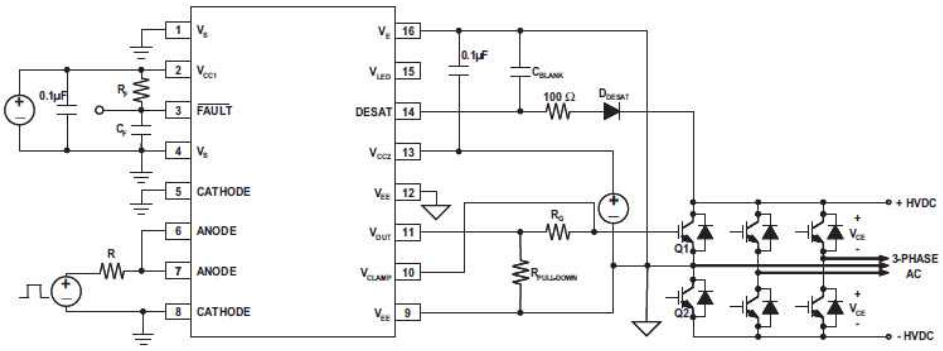


그림 8. 게이트 드라이버 구동 회로 예시

▹ 공조 시스템의 부하 특성에 적합한 센서리스 알고리즘 개발
- 압축기 및 팬 부하 특성에 대한 센서리스 구동
- 센서리스 기동 시간 및 기동 안정성을 위한 알고리즘 개발
- 최대 효율 운전을 위한 알고리즘 개발 및 특성 시험

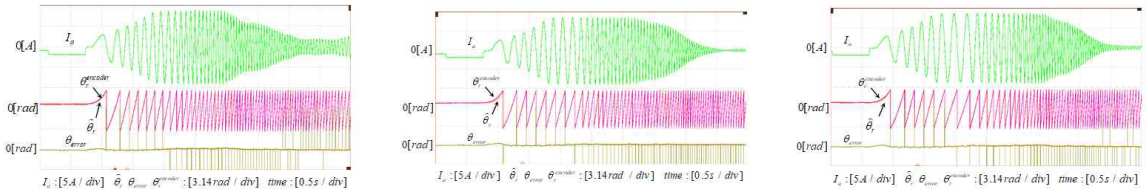


그림 9. 센서리스 구동 특성

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	고효율 공조용 압축기 및 송풍용 SynRM 기초 설계	공조용 및 송풍용 전동기의 제약 조건 및 요구 사양을 고려한 기초 설계 프로세스 개발	92.4% (독일/Siemens)	출력 7.5kW 이상 및 효율 92.4% 이상	해외 선진사 효율 기술 수준에 맞춤	20
		SynRM 회전자의 설계 파라미터 도출 및 유한요소 해석을 통한 경향성 분석	–	–	–	–
	공조용 압축기 · 송풍용 SynRM 제작기술 및 센서리스 인버터 기초 연구	기구부 강성 해석을 통한 구조 최적화 방안 검토	–	안전율 2.5 이상 (시뮬레이션 결과)	일반적인 기구부의 안정성을 나타내는 수치 기준에 맞춤	20
		범용 인버터 분석을 통한 센서리스 인버터의 알고리즘 개발	–	알고리즘 구현 (시뮬레이션 결과)	1차년도는 알고리즘 연구를 진행하고, 시작품 제작은 2차년도에 진행함	–
2년차 (2021)	고효율 공조용 압축기 및 송풍용 SynRM 최적 설계 및 시작품 제작	공조용 및 송풍용 SynRM의 최적 설계 및 시작품 제작	92.4% (독일/Siemens)	전동기 효율 94% 이상 기구부 안전율 3.0 이상	1차년도 중간발표의 피드백 의견 반영	20
	공조용 압축기 · 송풍용 SynRM의 센서리스 인버터 시작품 제작	공조용 및 송풍용 인버터의 시작품 제작	95% (스위스/ABB)	인버터 효율 95% 이상	해외 선진사 효율 기술 수준에 맞춤	20

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

가. 주관연구기관 (한양대학교 에너지변환연구실)

○ 1차년도 연구내용

- 기존 압축 및 송풍용 전동기 사양 조사
  - ▹ 기존 압축 및 송풍용 전동기는 유도전동기를 사용하고 제어기가 없으며 계통 전원을 사용하는 직입구동 방식을 채택함
  - ▹ 압축기의 경우 고속을 채택하지만 계통전압을 사용할 경우 60Hz로 입력주파수가 고정되기 때문에 극수를 작게 가져감

$$\omega_e = \frac{P}{2}\omega_m \tag{1}$$

  - ▹ 표 1과 2는 각각 압축 및 송풍용 유도전동기의 사양을 나타냄

표 1. 공조용 유도전동기 모델명과 사양

압축기 모델명	모터 종류	모터 용량 [kW]	정격 속도 [rpm]	정격 주파수 [Hz]
ZR81KC	3상 2극 농형 유도전동기	5.5	3500	60
ZR108KC	3상 2극 농형 유도전동기	7.5	3500	60
RC2-200B	3상 2극 농형 유도전동기	45	3550	60

표 2. 송풍기용 유도전동기 모델명과 사양

모터 종류	모터 용량 [kW]	정격 속도 [rpm]	정격 주파수 [Hz]	정격 전류 [A_{rms}]
3상 4극 농형 유도전동기	7.5	1750	60	16.5
3상 4극 농형 유도전동기	30	1760	60	58
3상 4극 농형 유도전동기	55	1760	60	105.3

- SynRM의 특성
  - ▹ 그림 10과 같은 SynRM의 벡터도를 통해 특성 분석이 가능함

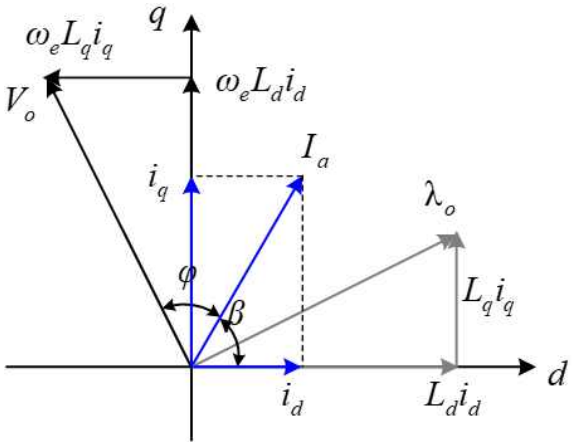


그림 10. SynRM의 dq축 벡터도

▹ 벡터도로부터 아래와 같은 SynRM의 특성식을 얻을 수 있음

$$V_o = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \omega\sqrt{(L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \tag{2}$$

$$T = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(L_d - L_q) i_d i_q = \frac{3P}{8}(L_d - L_q) I_a^2 \sin 2\beta \tag{3}$$

$$PF = \cos\phi = \frac{\rho - 1}{\sqrt{\frac{\rho^2}{\cos^2\beta} + \frac{1}{\sin^2\beta}}} \tag{4}$$

$$\tan\beta = \sqrt{\rho}$$

$$PF_{\max} = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \tag{5}$$

- SynRM 설계 제약 사항 선정
  ▹ SynRM은 동기전동기이기 때문에 계통 전원을 직접 사용할 수 없고 제어용 인버터가 필수적으로 요구됨
  ▹ 인버터의 DC link 전압은 계통 전압에 의해 결정되며 3상 AC 계통 전압을 DC로 바꿔주는 정류기가 필요함
  ▹ 그림 11은 유도전동기를 SynRM으로 대체할 경우 시스템의 개략도를 보여주며 전압 제한을 선정할 때 정류기를 고려해야함

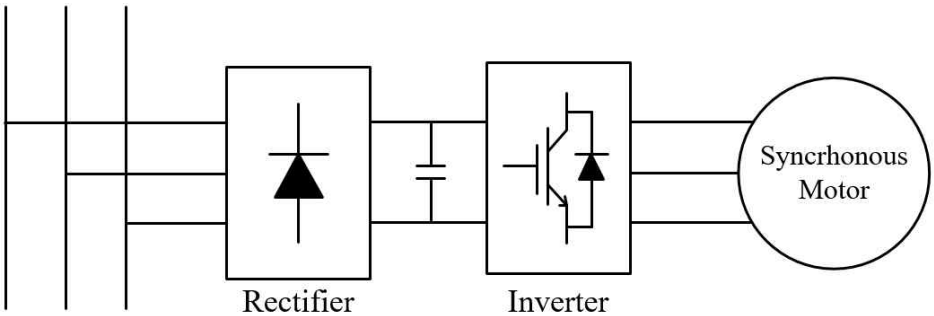


그림 11. SynRM의 시스템

▹ 계통 전압의 선간전압은 380V_{rms}이며 10%의 마진을 두어 전압제한을 선정할 때 인버터의 DC link 전압은 식 (6)과 같이 계산됨

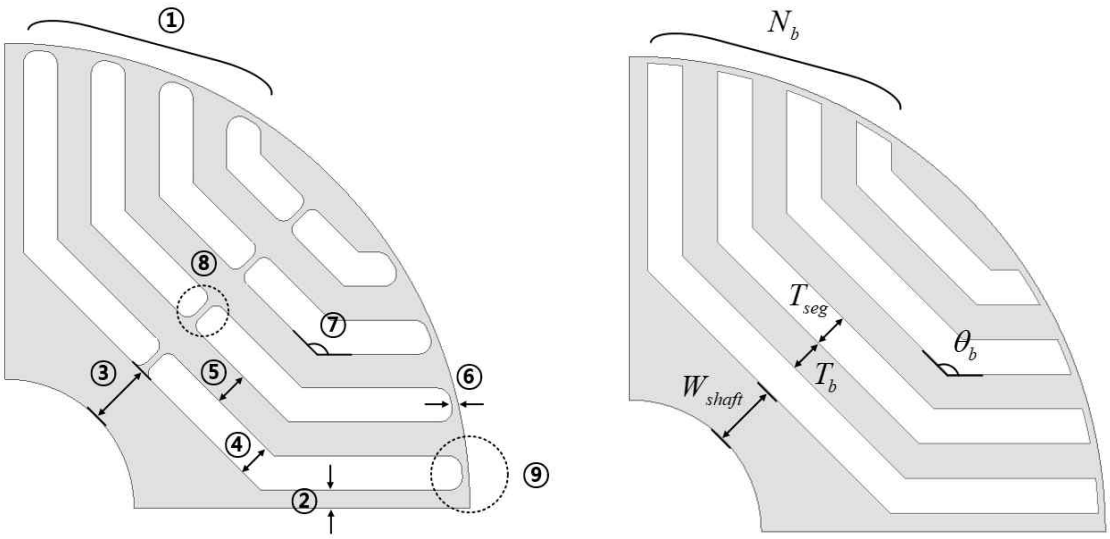
$$V_{dc} = 0.9\frac{3\sqrt{6}\,V_{l}}{\pi} = 450\,[\mathrm{V}] \tag{6}$$

▹ 공간 벡터 전압 변조방식(SVPWM : Space Vector Pulse Width Modulation)을 사용할 경우 전동기의 전압 제한은 식 (7)과 같음

$$V_a = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} = 259.8\,[\mathrm{V}] \tag{7}$$

▹ 냉각방식은 공냉 방식으로 가정하여 전류밀도제한을 4~5A_{rms}/mm^2 이하로 선정함

- SynRM의 기초 설계 변수



(a) (b)

그림 12. (a) SynRM의 설계 변수 (b) 기초 설계 변수

표 3. SynRM 회전자의 설계 파라미터

번호	종류
1	자속 장벽 수 (Barrier 수)
2	자속 장벽 밑변 길이
3	첫 번째 배리어와 샤프트 사이의 거리
4	자속 장벽 두께
5	세그먼트 두께
6	Rib 두께
7	자속 장벽 각도
8	브릿지 두께
9	자속 장벽 라운드

▹ SynRM의 출력 특성은 배리어 형상에 의해 결정되면 그림 12와 같은 설계 변수가 존재함
▹ 배리어 형상에 따라 자기 포화 및 누설 자속 등에 영향을 미치므로 각 설계 변수에 대한 출력 특성을 확인할 필요가 있음
▹ 기초 설계 단계에서 설계 변수를 간소화하기 위해 Rib과 Bridge의 두께, d축 자로 두께, 배리어 라운딩은 설계 변수에서 제외함
▹ 기초 설계된 모델에서 제외된 설계 변수에 대한 분석을 통해 각 설계 변수의 크기가 출력 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 2차년도에 진행함

- SynRM의 기초 설계 프로세스 구축
▹ 기초 설계 프로세스는 그림 13과 같음
▹ 턴수와 전류의 적절한 분배를 통해 요구하는 토크와 전압 제한을 넘지 않는 선에서 설계를 진행함

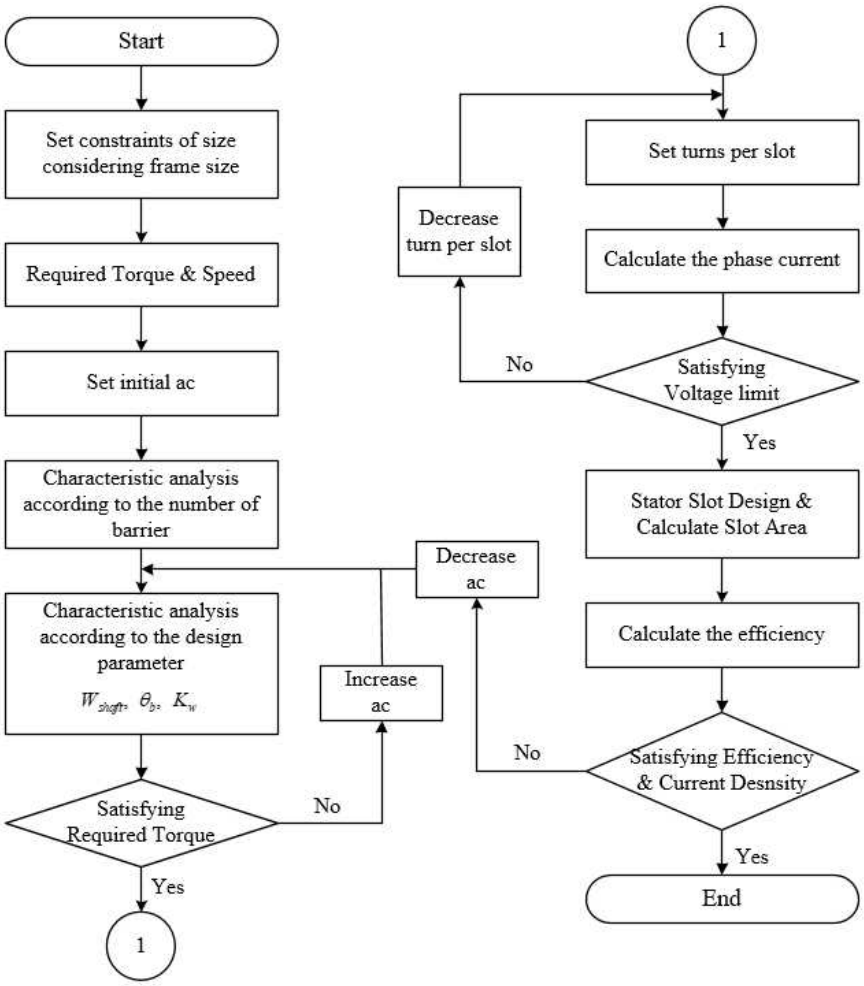


그림 13. SynRM 기초 설계 프로세스

○ 2차년도 연구 내용
- 자속 장벽 밑변 길이에 따른 특성 분석
▹ 그림 14와 같이 자속 장벽 밑변 길이에 따라 돌극비가 달라지기 때문에 출력 및 효율이 달라지므로 최적화 필요

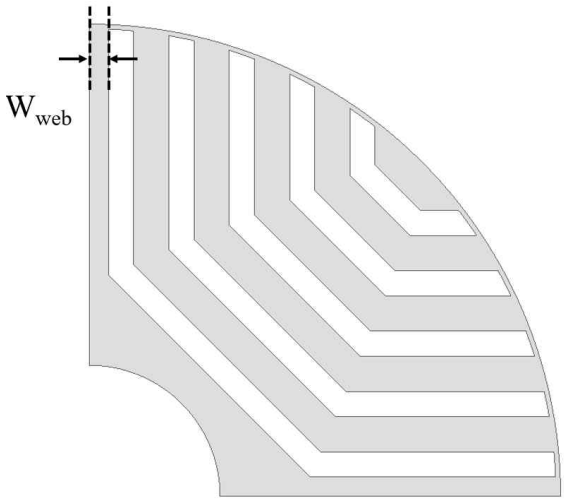
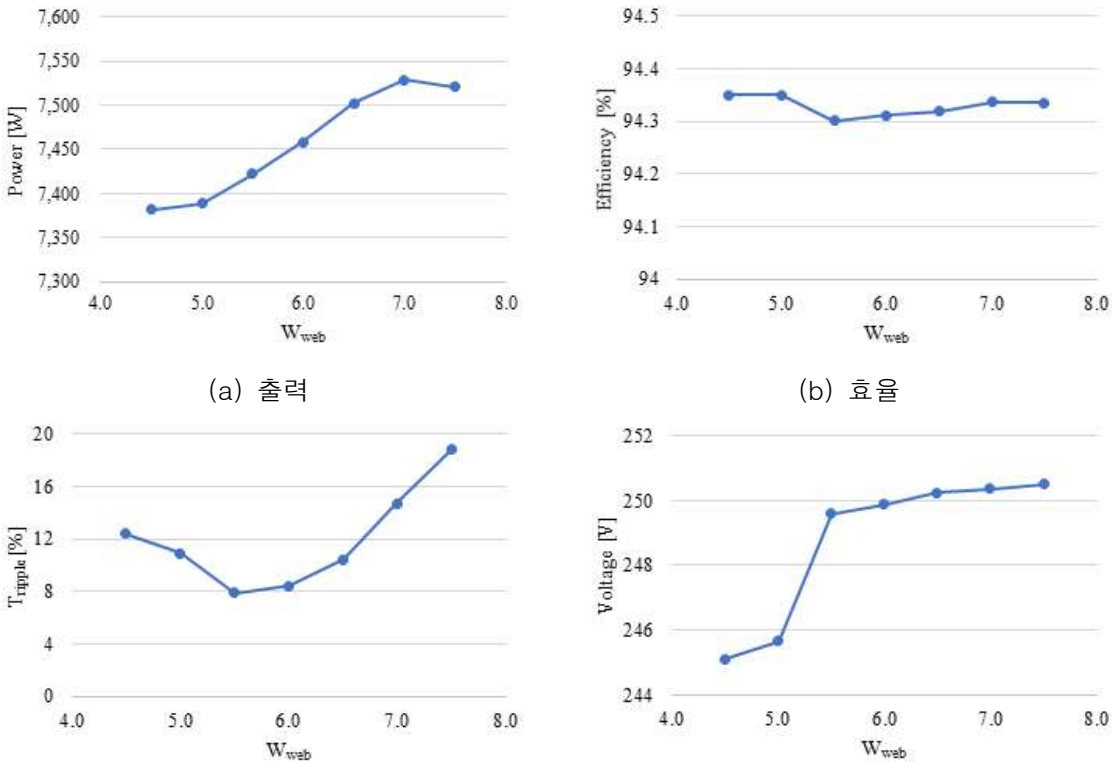


그림 14. 자속 장벽 밑변 길이

- ▹ 자속 장벽 밑변 길이가 매우 작을 경우 강성에 문제가 생길 수 있고 크게 되면 회전자 세그먼트 포화로 출력이 저하될 수 있음
- ▹ 또한 자속 밑변 길이와 회전자 세그먼트 길이 차이가 클수록 공극 자기저항 분포 및 공극자속밀도의 왜곡이 심해져 토크 리플의 크기 증가함
- ▹ 그림 15는 자속 장벽 밑변 길이에 따른 출력 특성을 나타내며, 길이가 커질수록 효율 차이는 적으나 출력이 증가하는 특성을 보임
- ▹ 전압 제한은 모두 만족하며, 토크 리플이 커질 수 있으므로 적절한 토크 리플의 크기와 높은 출력을 갖는 자속 장벽 밑변 길이 선정 필요



(a) 출력 (b) 효율

(c) 토크 리플 (d) 출력 전압

그림 15. 자속 장벽 밑변 길이에 따른 출력 특성

- Rib 두께에 따른 출력 특성 분석
  - ▹ 그림 16과 같이 SynRM은 회전자 내에 배리어가 존재하므로 회전자 구조를 지지하기 위해 외곽에 Rib 구조가 필수적으로 요구됨

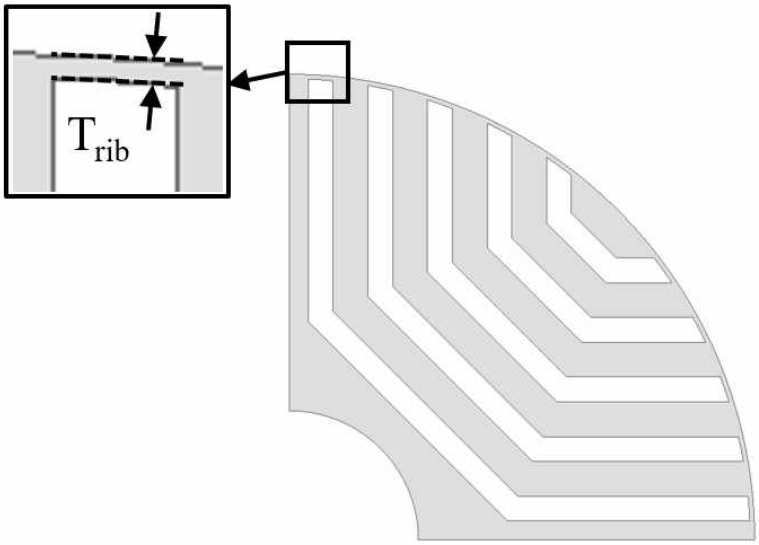
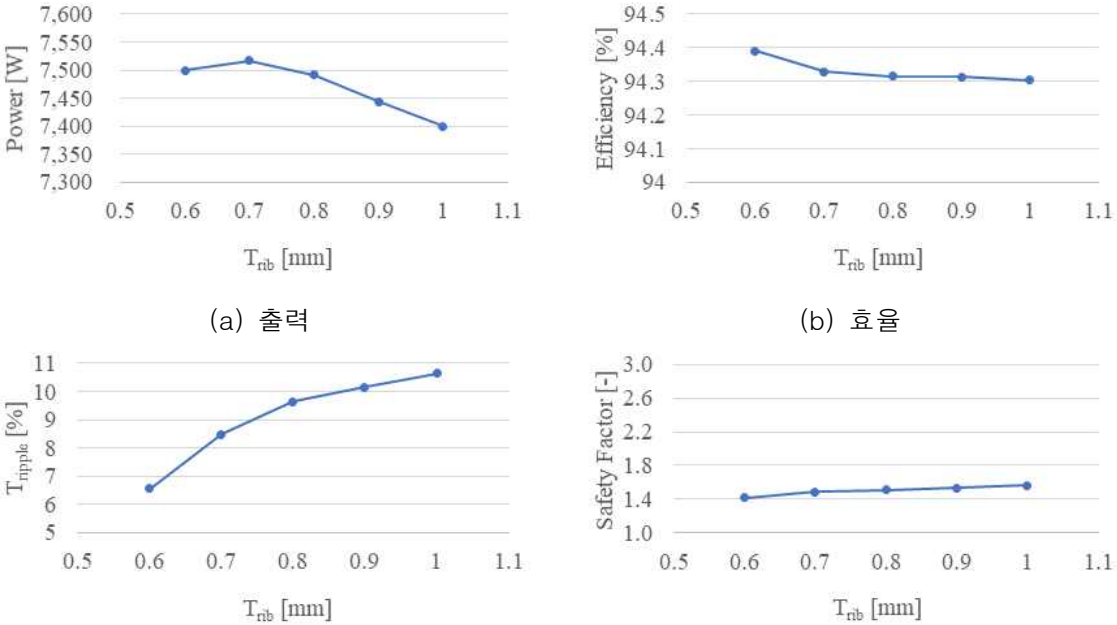


그림 16. Rib 구조의 두께

- Rib 두께의 크기가 설계 변수가 될 수 있는데, 두께가 크면 회전자의 강성이 증가하여 안전율이 높아지지만 Rib을 통한 누설로 인하여 출력 및 효율이 저감됨
- 앞서 선정한 최소 안전율 2 이상을 만족하는 내에서 최대의 출력과 효율을 만족시키기 위하여 Rib 두께 크기의 최적화 필요



(a) 출력 (b) 효율

(c) 토크 리플 (d) 안전율

그림 17. Rib 두께에 따른 출력 특성

- 그림 17과 같이 Rib 두께가 증가하면 누설 자속의 증가로 출력이 감소하지만, Rib 두께가 매우 작게 되면 작은 Rib을 거의 공극으로 볼 수 있게 되어 평균 공극길이가 증가하고 출력이 감소함
- Rib 두께의 증가로 효율은 감소하고 공극과 맞닿는 면에서 누설 자속의 증가로 공극에서의 자속밀도가 왜곡되어 토크 리플이 증가함
- Rib 두께의 증가로 안전율이 소폭 상승하는 것을 확인할 수 있음
- 공극의 평균 자기저항과 누설자속, 토크리플, 안전율 등을 고려하여 적절한 Rib 두께를 선정하는 절차가 필요함

- Bridge 두께에 따른 출력 특성 분석
  - ▹ 송풍용 SynRM은 1750 RPM이고 공조용 SynRM은 3500RPM으로 공조용의 경우 회전속도가 송풍용의 두 배 이며 그만큼 회전자 자체가 받는 응력도 높음
  - ▹ 공조용 SynRM은 Rib 두께만으로 안전율 2 이상을 만족하지 못하는 것을 확인하였고, 따라서 추가 지지구조를 선정해야함
  - ▹ 그림 18과 같이 배리어의 중심 부분에 추가 지지구조를 배치시켜 세그먼트끼리 연결시키는 구조를 추가하였고 이를 Bridge라고 정의함

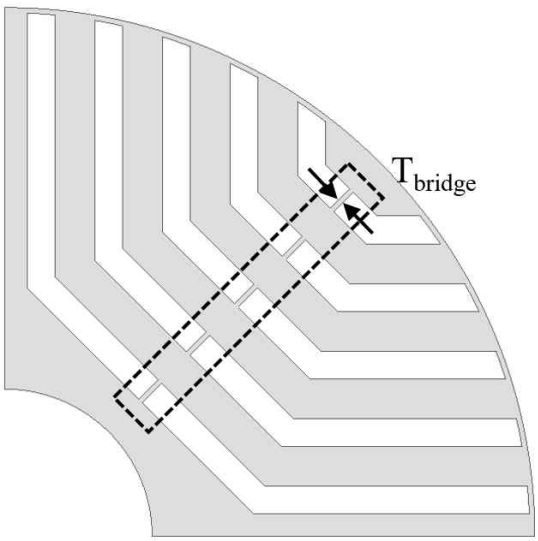
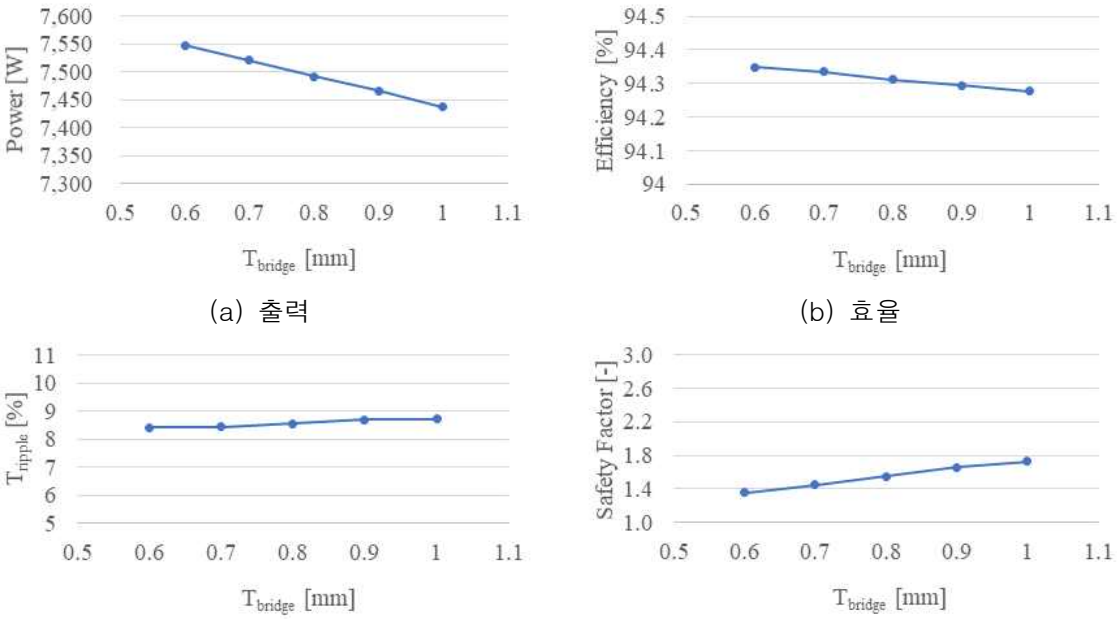


그림 18. Bridge 구조 추가

  - ▹ 전동기 운전 시 발생하는 응력이 Rib과 Bridge에 분산되기 때문에 회전자에 가해지는 최대 응력의 크기가 작아지고 안전율이 증가함



(a) 출력 (b) 효율

(c) 토크 리플 (d) 안전율

그림 19. Bridge 두께에 따른 출력 특성

  - ▹ 그림 19를 살펴보면, Rib과 마찬가지로 Bridge의 두께가 두꺼워지면 누설 자속이 증가하기 때문에 출력이 감소하는 것을 확인할 수 있음
  - ▹ Rib과 다르게 Bridge는 등가 공극 길이에 영향을 주지 않기 때문에 토크 리플의 크기는 거의 영향을 받지 않음

▹ 효율의 크기 또한 거의 영향이 없고, 안전율은 Rib 두께 보다 약간 더 영향을 미치는 것으로 확인할 수 있음

- 자속 장벽 라운드에 따른 출력 특성 분석
  ▹ 그림 20과 같이 SynRM 배리어 구조 제작 공정 시 자속 장벽에서 꺾이는 꼭짓점 부근에서 필수적으로 라운드가 발생함

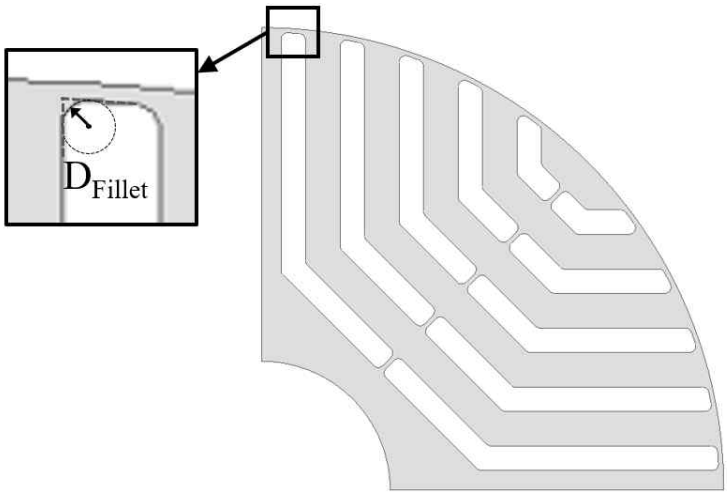
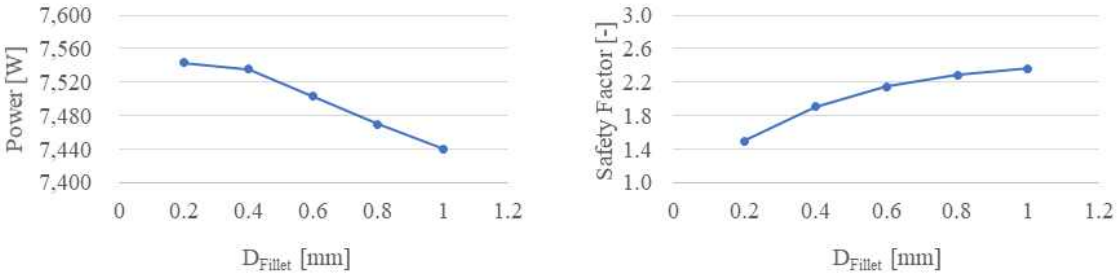


그림 20. 자속 장벽 라운드의 크기

▹ 자속 장벽 라운드 크기에 따라 Rib과 Bridge와 같은 지지구조의 평균 두께가 증가하는 효과로 안전율이 증가함
▹ 최소 자속 장벽 라운드의 크기를 0.2mm로 선정하고 자속 장벽 라운드 크기에 따른 안전율 크기를 분석



(a) 출력 (b) 안전율

그림 21. 자속 장벽 라운드에 따른 출력 특성

▹ 자속 장벽 라운드의 크기가 커질수록 평균 Rib 및 Bridge 두께가 커지는 효과가 있으므로 누설 자속이 증가해 출력이 감소함
▹ 자속 장벽 라운드의 크기가 커질수록 평균 Rib 및 Bridge 두께가 커져 최대 발생 응력의 크기가 줄어들기 때문에 안전율이 증가하는 경향성을 보임
▹ 전동기 설계 시 안전율이 많이 낮을 경우 자속 장벽 라운드 최적화를 통해 요구 안전율을 만족할 수 있음

- 압축 및 송풍용 SynRM 운전 시 회전자 강성 및 안전율
  ▹ 회전자 회전 시 Rib, Bridge 등 강성에 취약한 구조로 높은 응력이 가해지며 이로 인해 회전자의 영구적 변형이 발생할 수 있음
  ▹ 전동기 운전 시 발생하는 최대 응력을 견딜 수 있는 적당한 Rib과 Bridge 두께 선정이 필요하며, 발생한 최대 응력을 통해 안전율을 계산할 수 있으며, 통상적으로 안전율이 2 이상일 경우 안정하

다고 판단함

▹ 일반적으로 안전율은 식 (10)과 같이 계산하여 산출함

$$Safety\ Factor = \frac{Tensile\ Yield\ Strength}{Generated\ Maximum\ Stress} \tag{10}$$

▹ 여기서 Tensile Yield Strength는 인장 항복 강도이며, 그림 22에서 항복이 일어나는 지점이 인장 항복 강도임 (항복 : 힘이 사라져도 변형이 지속되는 상태)

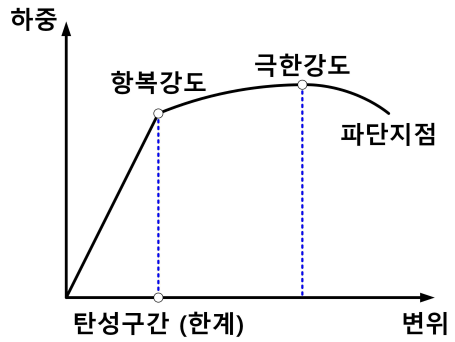


그림 22. 하중에 따른 항복 및 극한강도의 정의

▹ Tensile Yield Strength는 재질 특성으로 나타나며, 철심에 사용되는 강판 및 주요 재질별 Tensile Yield Strength은 표 4와 같음

▹ 본 과제에서 사용된 재질은 50PN470으로 표 4에 나타난것과 같은 Tensile Yield Strength를 가짐

표 4. 재질별 Tensile Yield Strength

재 질	Tensile Yield Strength [MPa]
Steel (35PN230)	440
Steel (35PN440)	273
Steel (50PN470)	265
SUS	207
NdFeB	100
Copper	70

▹ 공조용 SynRM의 경우, Bridge가 없는 경우 송풍용 대비 상대적으로 높은 회전속도에 의해 Rib 구조에 매우 높은 응력이 발생하여 회전자에 변형이 생길 수 있음

▹ 그림 23와 같이 Bridge 구조를 적용하지 않는 경우 Rib 부근에서 매우 큰 응력이 발생하여 안전율이 약 0.7 정도로 나타나는 것을 확인함

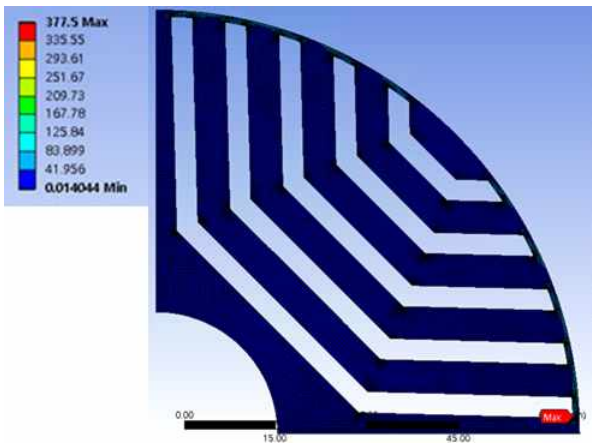
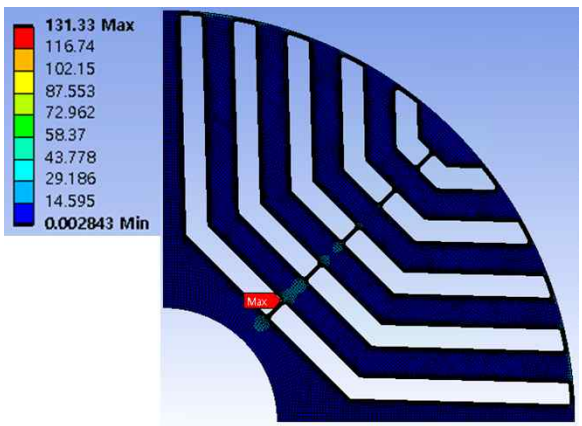
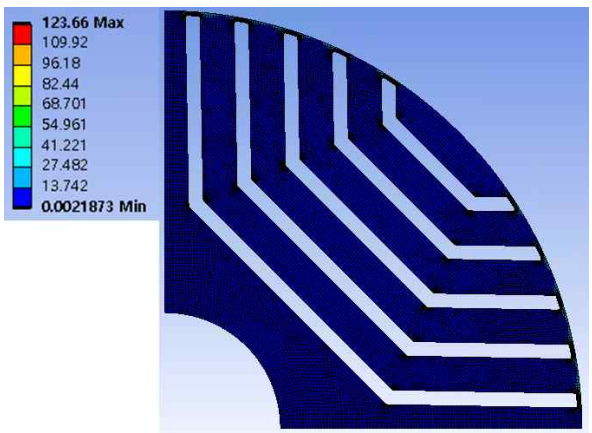


그림 23. 공조용 SynRM의 Bridge 구조를 추가하지 않았을 경우 강성 해석 결과

- ▹ 따라서 발생한 최대 응력을 분산시키기 위해 Bridge 구조를 추가하여 최적 설계를 진행하였고, 이때 최대 발생 응력이 기존 377.5MPa에서 131.33MPa로 저감되어 안전율 2 이상을 만족하는 것으로 확인
- ▹ 압축 및 송풍용 SynRM의 강성 해석 결과를 각각 그림 24에 나타내었고, 6개의 모델 모두 안전율 2 이상을 만족하는 것으로 확인 (표 5, 6 참고)



(a) 공조용



(b) 송풍용

그림 24. 압축 및 송풍용 7.5kW급 SynRM의 강성 해석 결과

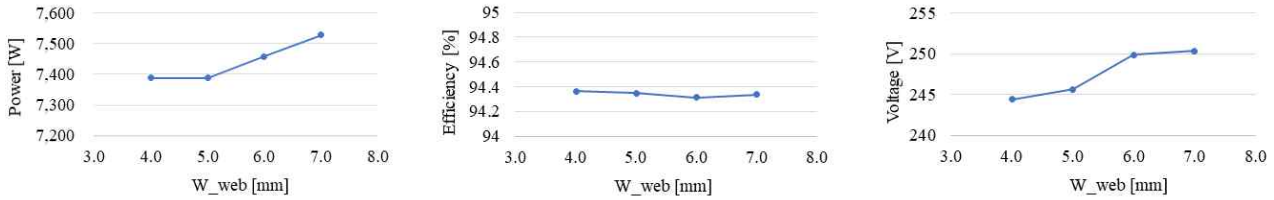
표 5. 공조용 SynRM의 용량대별 최대 발생 응력 및 안전율

항 목	최대 발생 응력	안전율
공조용 5.5kW SynRM	127.97	2.07
공조용 7.5kW SynRM	131.33	2.02
공조용 45kW SynRM	128.95	2.06

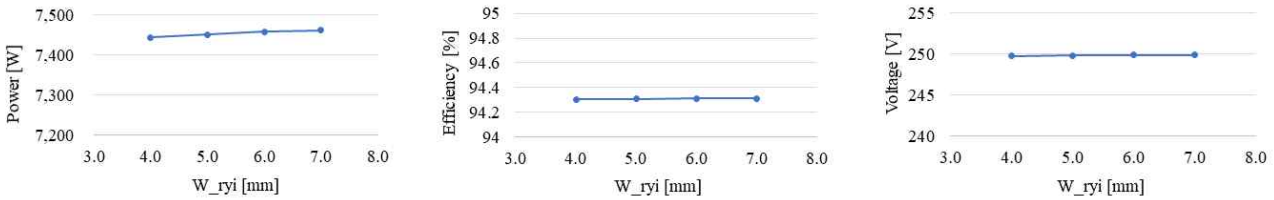
표 6. 송풍용 SynRM의 용량대별 최대 발생 응력 및 안전율

항 목	최대 발생 응력	안전율
송풍용 7.5kW SynRM	123.66	2.14
송풍용 30kW SynRM	126.79	2.09
송풍용 55kW SynRM	128.64	2.06

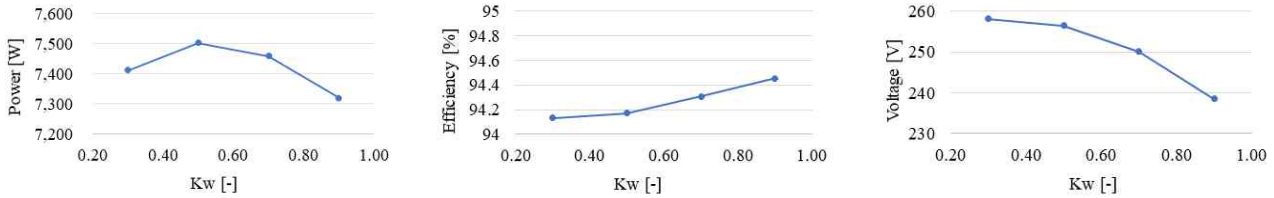
- 회전자 형상 변수에 따른 경향성 및 민감도 분석
  - ▹ SynRM 회전자는 다양한 형상 변수를 가지고, 각 변수의 크기에 따라 출력 및 효율에 미치는 영향의 정도가 다름
  - ▹ SynRM 회전자 형상에 다양한 설계 변수가 있고 이 변수에 따라 다양한 조합의 형상이 만들어 질 수 있으므로, 모든 변수를 고려하여 설계를 진행할 경우 오랜 시간이 소모됨
  - ▹ 따라서 다양한 형상 설계 변수가 출력 및 효율, 전압 등에 미치는 영향의 크기를 분석하여 설계를 진행하는데 이를 민감도 분석이라 정의함
  - ▹ 민감도 분석을 통해 출력 및 효율 등에 영향을 크게 미치는 주 설계 변수 및 범위를 선정하고 해당 변수에 대한 최적 설계를 우선적으로 진행
  - ▹ 배리어 개수를 5개로 고정하고 Rib과 Bridge, 자속 장벽 라운드는 안전율을 만족하지 않을 경우 재설계를 진행하기로 하며 나머지 설계 변수에 따른 출력의 민감도를 분석



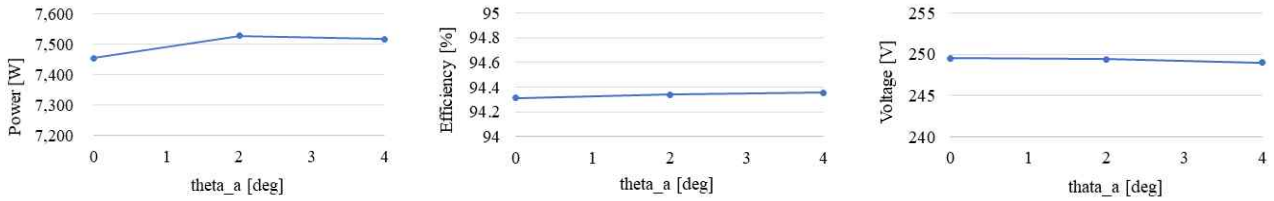
(a) 자속 장벽(W_{web}) 밑변 길이에 따른 민감도 분석 그래프



(b) 첫 번째 배리어와 샤프트 사이의 거리(W_{ryi})에 따른 민감도 분석 그래프



(c) 세그먼트와 배리어 길이의 비율(K_w)에 따른 민감도 분석 그래프



(d) 자속 장벽 각도(θ_a)에 따른 민감도 분석 그래프

그림 25. 7.5kW급 SynRM의 설계 변수에 따른 민감도 분석 그래프

  - ▹ 민감도 분석 결과, 세그먼트와 배리어 길이의 비율이 출력에 가장 큰 영향을 미치므로 후에 최적 설계 시 해당 변수의 가중치를 상대적으로 높게, 나머지 설계 변수는 비슷한 가중치로 낮게 선정

- RSM을 통한 고효율 SynRM 형상 최적 설계
  - ▹ SynRM을 설계 하는 경우 요소별 다변수를 포함하고 있어 단일 변수에 대한 설계 과정으로는 최적 설계 모델 도출이 어려움

▹ 단일 변수에 대한 출력 특성 결과와 다변수의 조합에 대한 출력 특성 결과와 다르기 때문에 다변수의 변화에 따른 분석이 필수적임

▹ 동시 다발적인 주요 설계 변수의 조합에 따른 출력 특성의 교호 작용을 분석하고 최적 결과 값을 도출하기 위해 반응표면분석을 진행함

▹ 반응표면분석은 관심 영역 전체에 속한 임의의 목적함수의 수준에서 결과값을 예측하고, 이를 통해 원하는 목적함수의 결과값을 얻을 수 있도록 하는 변수의 수준을 최적화하는 통계 분석법임

▹ 설계자가 주요 인자를 알고 있는 경우 주요 인자들 사이의 교호 작용을 파악하여 최소의 데이터로 최적의 계수를 구할 수 있는 방법임

▹ 반응표면분석에서 독립변수 x_1, x_2, $\cdots$, x_n와 종속변수 y간의 함수를 f 로 나타내면, $y=f(x)$로 나타내고, 이때 함수를 반응함수라 하며, 독립변수가 k인 2차 회귀모형에 대한 반응함수는 식 (8)과 같음

$$y=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta_i x_i+\sum_{i\le j}^{k}\beta_{ij}x_i x_j+\epsilon \tag{8}$$

▹ 회귀 분석을 토대로 변수들 간의 관련성을 규명하기 위해서는 반응 함수를 추정하여 종속변수의 값을 추론함

▹ 다중 회귀 분석의 기본적인 절차는 '자료 탐색 -> 회귀 분석 수행 -> 모형 선정 -> 모형 검토 -> 예측에 활용' 와 같은 순으로 진행됨

▹ 반응 표면 설계의 기본 유형으로 중심 합성 계획법 설계와 Box-Behnken 설계가 있으며, 본 연구에서는 중심 합성 계획법(CCD)을 이용함

▹ 중심 합성 계획법은 1차 회귀모형으로 추정 불가능한 2차 회귀모형에 대한 곡면적인 변화를 추정할 수 있음

▹ 중심 합성 설계법은 가상의 정육면체를 형성하며 그림 26과 같이 크게 요인점(꼭지점, Factorial points), 축점(Axial points), 중심점(Center Points)의 3부분으로 이루어져 있기 때문에 변수의 수준 변화에 따라 발생되는 반응량의 변화를 추정할 수 있음

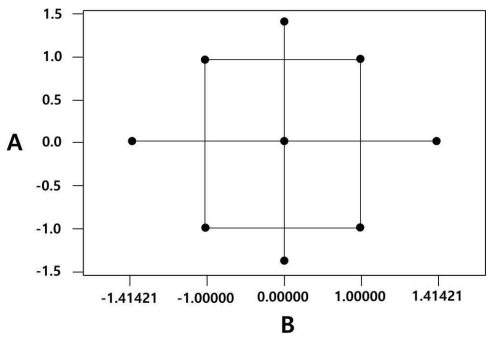


그림 26. 중심 합성 설계법 예시

▹ 중심 합성 설계법을 이용하여 실험계획 및 통계분석을 수행을 위해 통계 소프트웨어를 활용하여 주요 설계 파라미터를 이용하여 최적 설계를 진행하였으며, 다음과 같은 순서로 구성됨

1) 입력 변수의 샘플 포인트를 설정하고 순환 계산을 통해 목적 함수의 해당 값 도출

2) 도출된 값을 1차 혹은 2차 회귀 모형에 적합시킴

3) 모형의 적합성을 검토하여 최적조건을 구함

▹ 표 7과 같이 최적 설계를 위한 목적 함수로 출력, 전압, 효율이 있으며 출력은 최소 7.5kW, 상전압은 최대 259.8V, 그리고 효율은 최소 94% 이상을 목적으로 둠

▹ 최적 설계를 위한 설계 변수로 자속 장벽 밑변 길이, 첫 번째 배리어와 샤프트 사이의 거리, 돌극비, 그리고 자속 장벽 각도로 선정하여 표 7에 나타냄

표 7. 설계 목적 함수 및 설계 변수

항 목		내 용
목적 함수	출력	최소 7.5 kW 이상
	전압	최대 259.8 V 이하
	효율	최소 94 % 이상
설계 변수	자속 장벽 밑변 길이	2.5 ~ 12.5 mm
	첫 번째 배리어와 샤프트 사이의 거리	2.5 ~ 12.5 mm
	돌극비	0.25 ~ 1.25
	자속 장벽 각도	-1.5 ~ 4 deg

▹ 선정한 설계 변수의 최소값과 최대값을 선정하고, 설계 변수에 따라 출력된 목적 함수를 이용하여 반응 표면법을 진행하여 그림 27과 같이 설계 변수의 최적값을 도출함

▹ 도출된 반응 표면법의 결과를 바탕으로 유한요소해석을 통해 설계 변수 최적화를 진행함

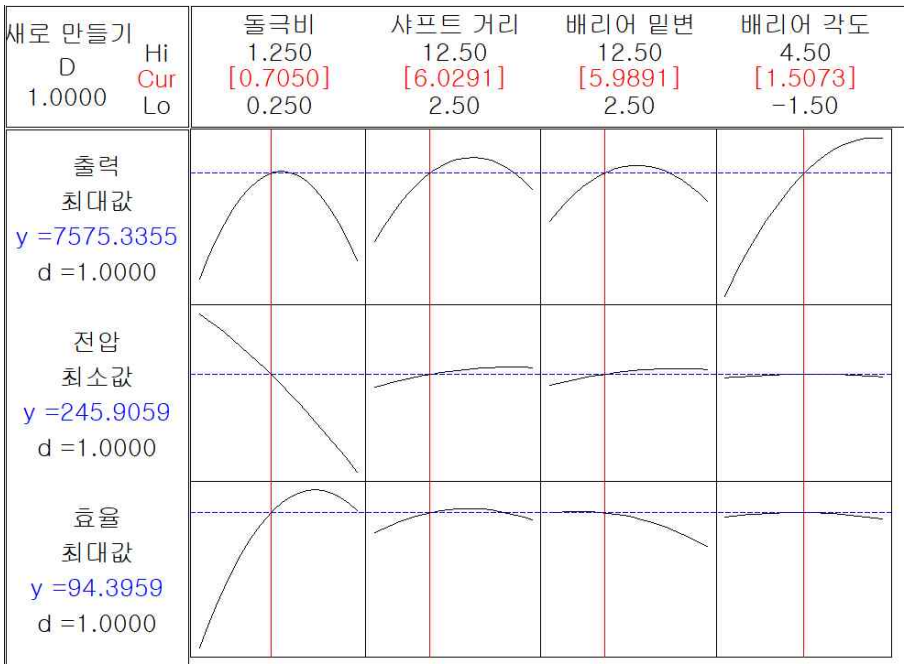


그림 27. RSM을 통한 공조용 7.5kW급 SynRM의 최적 설계 과정

▹ 공동연구기관인 ㈜로텍에서 최종 모델의 제작성 검토 중 기존의 공극 길이가 0.45mm로 매우 작아 제작성에 문제가 있고 실제 제작 시 회전자와 고정자 간의 마찰이 발생할 수 있어 공극 길이 0.5mm로 개선을 요청함

▹ 따라서 공조용 7.5kW급 SynRM의 공극 길이를 0.5mm로 변경하였고, 공극 길이의 증가로 전체 자기 저항이 증가하여 출력이 감소함

▹ 공극 길이의 증가에 따라 출력이 감소하였으므로, 턴수 및 입력 전류, 고정자 및 회전자 형상 등을 조절하여 요구 출력을 만족시켰고 이를 표 8에 정리함

표 8. 공극 길이 변경에 따른 개선 전·후 모델의 출력 특성

항목	개선 전 모델	개선 후 모델	Unit
회전자 외경	139.1	144	mm
토크	20.49	20.51	Nm
출력	7.51	7.52	kW
동손	133.61	120.07	W
효율	94.19	94.32	%
전압	246.23	252.26	V

- 공조용 및 송풍용 SynRM의 용량대별 운전 포인트에 따른 효율맵(Efficiency Map)
  - ▹ 전동기의 운전 시 부하 조건 또는 외부 요인 등에 의하여 운전 포인트가 달라질 수 있고, 각 운전 포인트에서 갖는 출력, 손실 등의 값도 달라짐
  - ▹ 전동기 운전 시 운전 포인트가 달라질 수 있으므로 운전 포인트별 효율의 값을 파악하여 최대의 효율을 갖는 포인트에서 운전시키는 것이 중요함
  - ▹ 운전 속도와 입력 전류에 따른 토크의 크기를 통해 각 운전 포인트 별 효율의 값을 그래프로 나타낸 것을 효율맵이라고 정의함
  - ▹ 효율은 식 (9)와 같이 출력, 동손 및 철손, 그리고 표류부하손의 식으로 구할 수 있음

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{copper} + P_{core} + P_{stray}} \tag{9}$$

  - ▹ 전동기의 운전 속도별로 전류의 값을 다르게 하고 각 전류의 값에서 최대의 토크를 발생시키는 전류 위상각을 찾음
  - ▹ 찾은 전류와 위상각에서 전압제한을 만족하지 못하는 경우 전류와 위상각의 크기를 재설정 후 반복 해석 진행
  - ▹ 그림 28는 효율맵 작성을 위한 전류 및 위상각을 찾는 흐름도를 나타냄

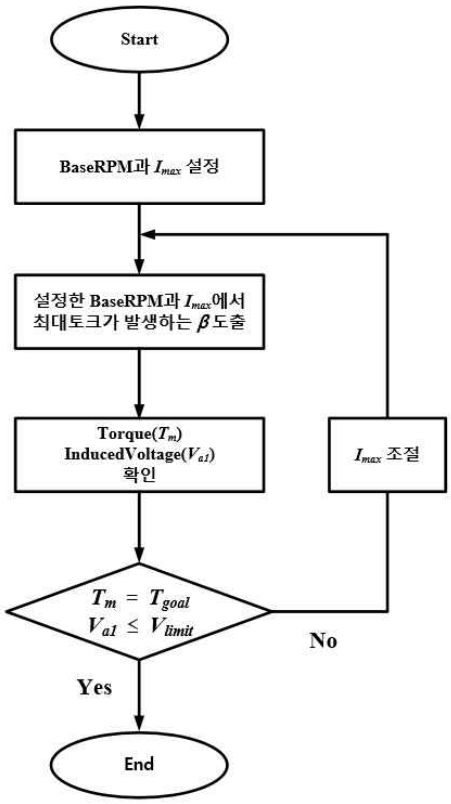
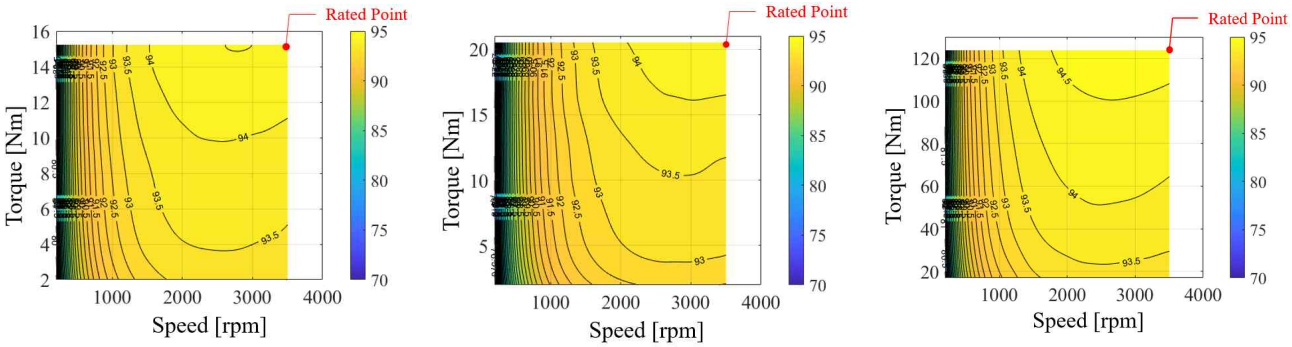


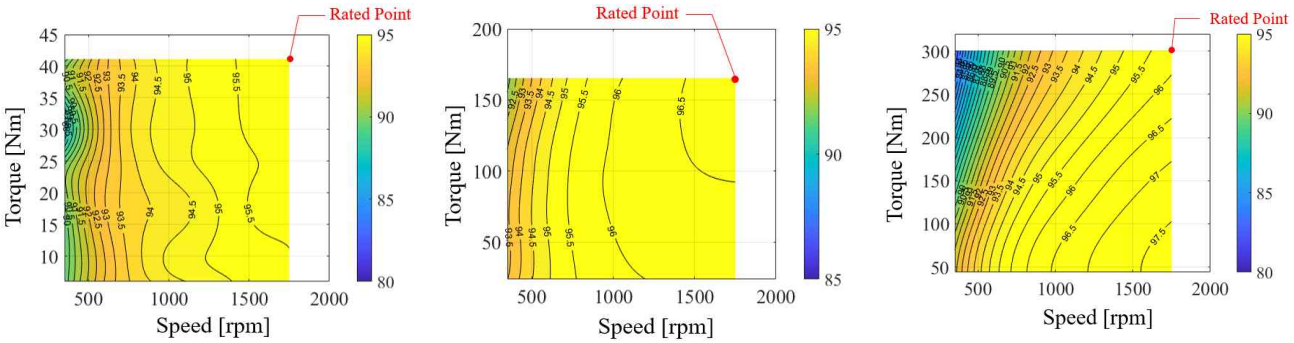
그림 28. 효율맵의 목표 전류 및 최대 토크의 위상각 조합 흐름도

- ▹ 속도 및 전류 별 출력, 손실 등을 확인하여 효율 표를 작성하고, 작성된 효율 표를 바탕으로 조금 더 정확한 그래프를 위해 데이터 값을 구간별 보간(Interpolation) 진행
- ▹ 보간된 효율 데이터를 통해 Contour 맵을 그림으로써 전동기의 운전 구간 별 효율의 값을 얻을 수 있음



(a) 5.5 kW (b) 7.5 kW (c) 45 kW

그림 29. 공조용 SynRM의 용량대별 효율맵



(a) 7.5 kW (b) 30 kW (c) 55 kW

그림 30. 송풍용 SynRM의 용량대별 효율맵

▹ 저속 구간에서 동손은 일정하고 철손은 주파수에 비례하기 때문에 줄어들지만 출력도 주파수에 비례하기 때문에 낮은 효율 경향성을 보임

▹ 저토크 구간에서 입력전류가 작기 때문에 이에 비례적으로 동손, 철손, 출력 모두 낮은 값을 가지며 고토크 구간과의 효율 차이는 약 1% 정도로 나타남

- 공조용 및 송풍용 SynRM 최적 설계 모델 특성 결과

▹ 그림 31은 SynRM 설계 시 제약 사항 선정 및 기초 모델, 그리고 최적 설계 모델 도출까지의 프로세스를 나타냄

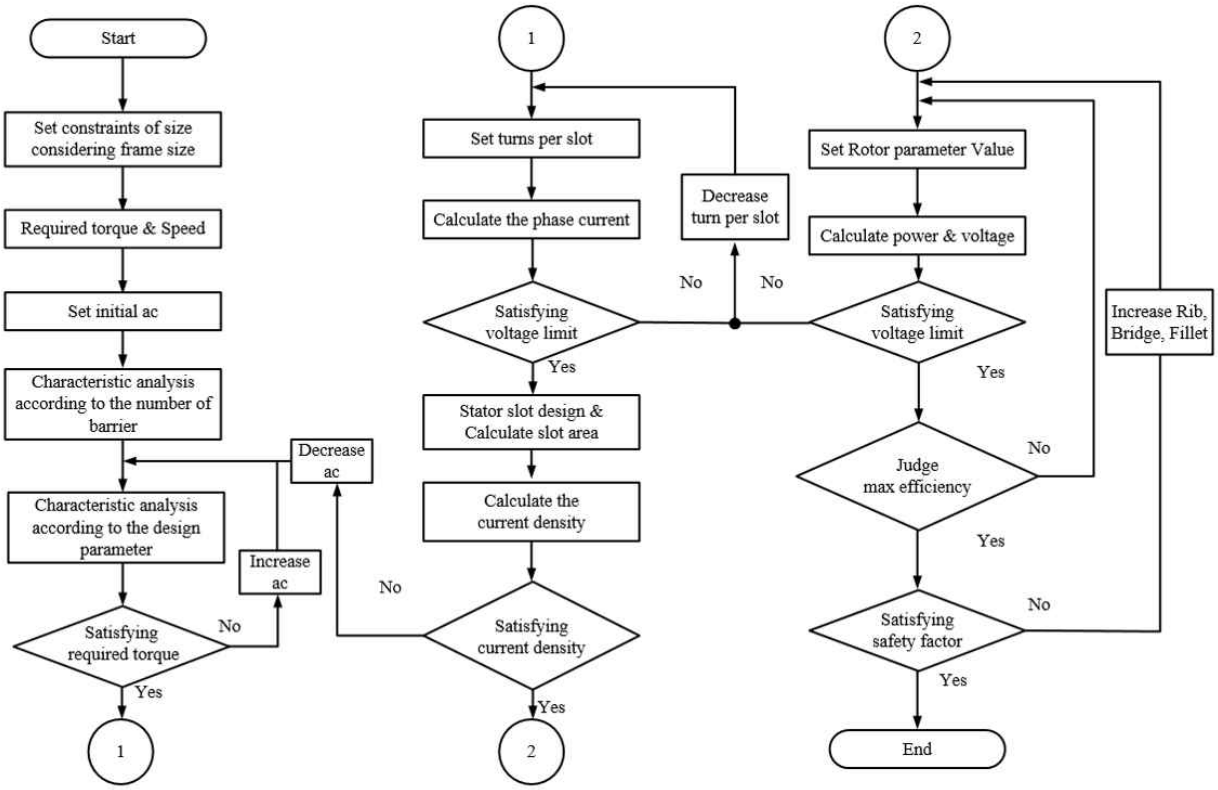
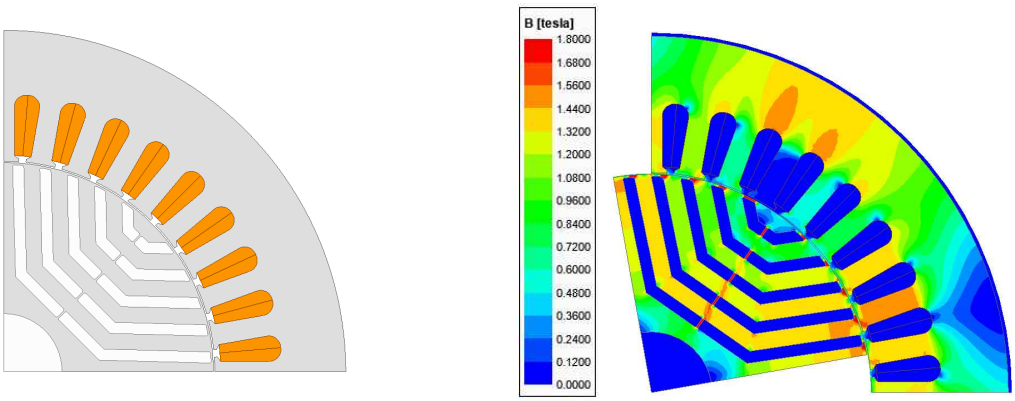


그림 31. SynRM 전체 설계 프로세스

- 공조용 및 송풍용 SynRM 최적 설계 모델 결과

▹ 7.5kW 모델의 최적 설계모델의 FEA 결과와 자속 포화도는 그림 32에, 설계 파라미터 결과값들은 표9, 10에 나타내었음

▹ FEA 결과 6개의 모델 모두 목표 효율 94% 이상을 만족하였고, 제작한 모델에 대해 실험한 결과 또한 목표 효율을 만족하는 것을 확인함



(a) (b)

그림 32. (a) 7.5kW SynRM 모델 형상 (b) 자속 포화도

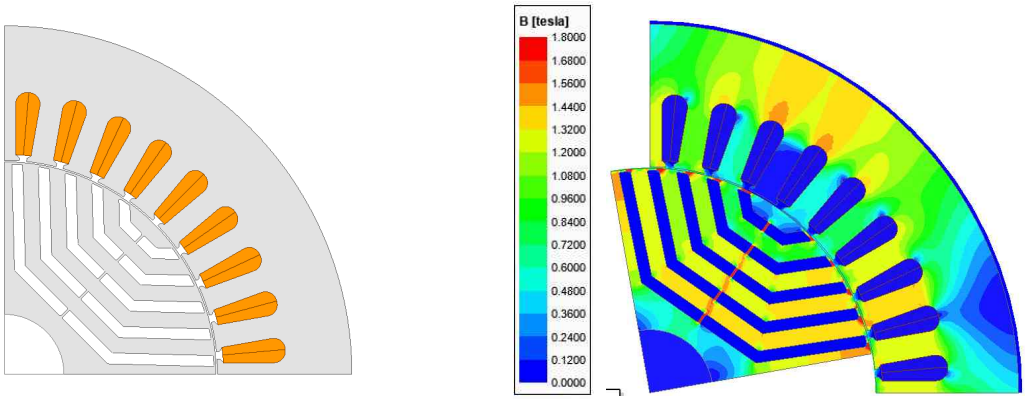
표 9. 설계 사양 및 출력특성

항목	7.5kW SynRM FEA 결과	Unit
토크	20.51	Nm
출력	7.52	kW
전류밀도	3.43	A_{rms}/mm^2
동손	120.07	W
효율 (FEA)	94.32	%
효율 (실험)	94.47	%
전압	252.26	V

표 10. 7.5kW 설계 파라미터 결과값

항목	값	Unit
고정자 외경	235	mm
고정자 내경	145	mm
회전자 외경	144	mm
회전자 내경	40	mm
적층길이	105	mm
공극길이	0.5	mm
요크 두께	22	mm
배리어 개수	5	-
배리어 두께	3.8	mm
턴수	18×2	-
병렬회로 수	4	-
점적률	37	%
코어 재질	50PN470	-

▹ 7.5kW SynRM 설계 프로세스와 동일하게 적용하여 5.5kW, 45kW SynRM의 기초 설계를 진행함
▹ 그림 33와 표 11, 12에는 5.5kW 모델의 형상과 파라미터 결과값, 출력 특성을 나타내었으며, 그림 34와 표 13, 14에는 45kW 모델의 형상과 파라미터 결과값, 출력 특성을 나타내었음



(a) (b)

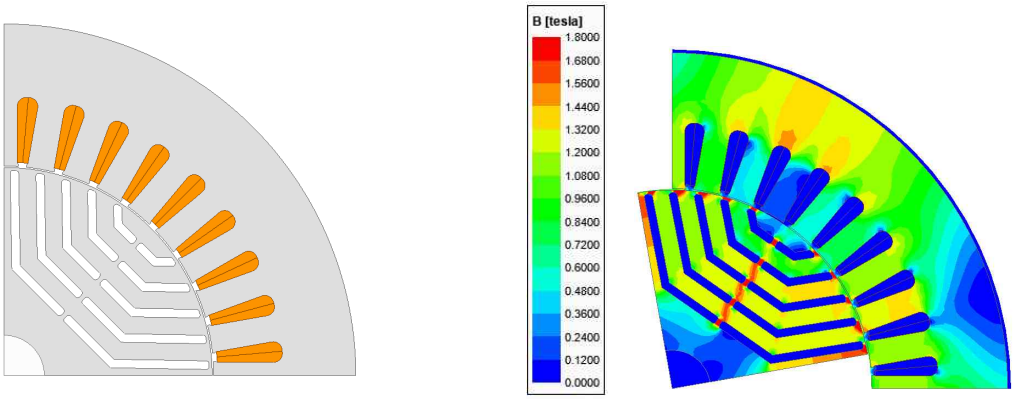
그림 33. (a) 5.5kW SynRM 모델 형상 (b) 자속 포화도

표 11. 설계 사양 및 출력특성

항목	5.5kW SynRM FEA 결과	Unit
토크	15.10	Nm
출력	5.53	kW
전류밀도	3.38	A_{rms}/mm^2
동손	97.98	W
효율	94.17	%
전압	254.63	V

표 12. 5.5kW 설계 파라미터 결과값

항목	값	Unit
고정자 외경	233	mm
고정자 내경	143	mm
회전자 외경	142	mm
회전자 내경	40	mm
적층길이	90	mm
공극길이	0.5	mm
요크 두께	22	mm
배리어 개수	5	-
배리어 두께	3.6	mm
턴수	22×2	-
병렬회로 수	4	-
점적률	37	%
코어 재질	50PN470	-



(a) (b)

그림 34. (a) 45kW SynRM 모델 형상 (b) 자속 포화도

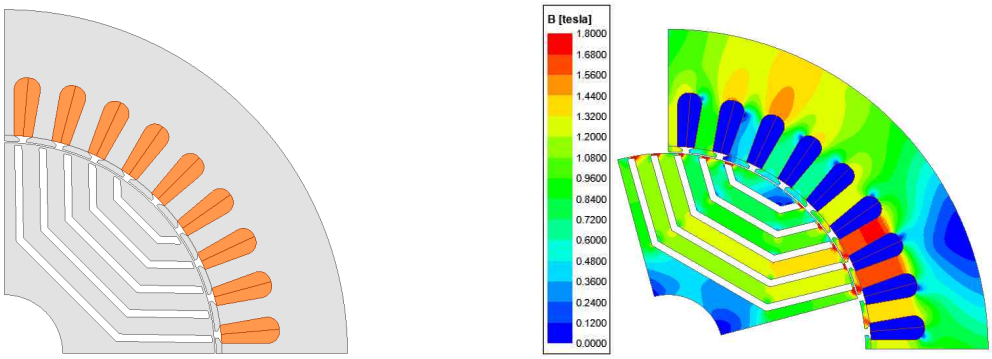
표 13. 설계 사양 및 출력특성

항목	45kW SynRM FEA 결과	Unit
토크	123.8	Nm
출력	45.38	kW
전류밀도	3.76	A_{rms}/mm^2
동손	514.39	W
효율	94.7	%
전압	246.9	V

표 14. 45kW 설계 파라미터 결과값

항목	값	Unit
고정자 외경	349	mm
고정자 내경	208	mm
회전자 외경	206.5	mm
회전자 내경	40	mm
적층길이	300	mm
공극길이	0.75	mm
요크 두께	36	mm
배리어 개수	5	-
배리어 두께	4.2	mm
턴수	4×2	-
병렬회로 수	4	-
점적률	30	%
코어 재질	50PN470	-

▫ 동일한 설계 프로세스를 이용하여 7.5kW, 30kW, 55kW의 송풍용 SynRM의 기초 설계를 진행함
▫ 그림 35~37과 표 15~20에는 각각 7.5kW, 30kW, 55kW 모델의 형상과 파라미터 결과값, 출력 특성을 나타내었음



(a) (b)

그림 35. (a) 7.5kW SynRM 모델 형상 (b) 자속 포화도

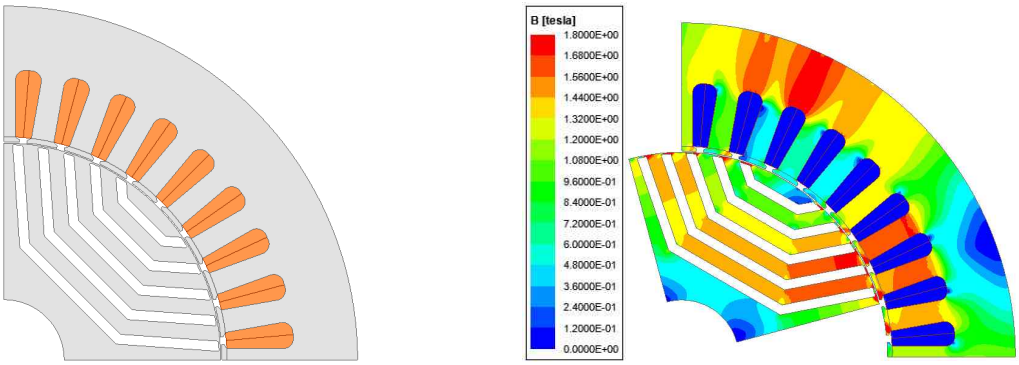
표 15. 설계 사양 및 출력특성

항목	7.5kW SynRM FEA 결과	Unit
토크	42.61	Nm
출력	7.59	kW
전류밀도	4.15	A_{rms}/mm^2
동손	142.83	W
효율 (FEA)	95.40	%
효율 (실험)	94.01	%
전압	231.03	V

표16. 7.5kW 설계 파라미터 결과값

항목	값	Unit
고정자 외경	235	mm
고정자 내경	145	mm
회전자 외경	144	mm
회전자 내경	40	mm
적층길이	155	mm
공극길이	0.5	mm
요크 두께	23	mm
배리어 개수	5	-
배리어 두께	5.9	mm

턴수	11	-
병렬회로 수	2	-
점적률	37.09	%
코어 재질	50PN470	-



(a) (b)

그림 36. (a) 30kW SynRM 모델 형상 (b) 자속 포화도

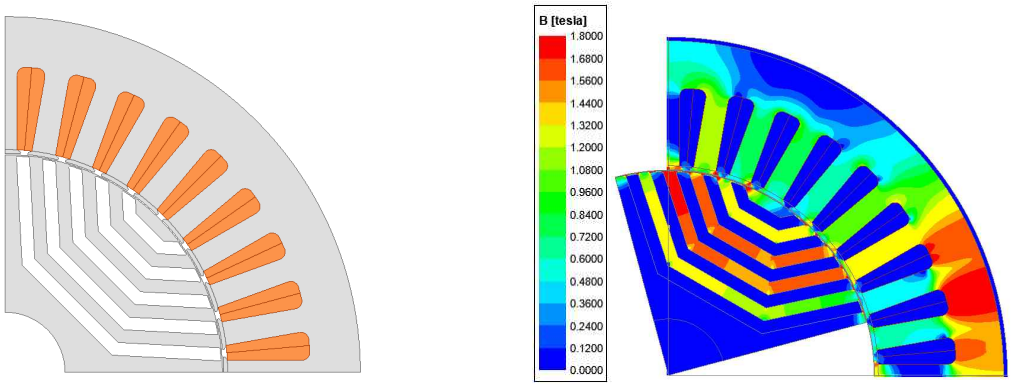
표 17. 설계 사양 및 출력특성

항목	30kW SynRM FEA 결과	Unit
토크	176.13	Nm
출력	31.90	kW
전류밀도	4.10	A_{rms}/mm^2
동손	559.90	W
효율	96.31	%
전압	256.93	V

표18. 30kW 설계 파라미터 결과값

항목	값	Unit
고정자 외경	279	mm
고정자 내경	172	mm
회전자 외경	171	mm
회전자 내경	47.5	mm
적층길이	290	mm
공극길이	0.5	mm
요크 두께	25	mm
배리어 개수	5	-
배리어 두께	6.0	mm

턴수	10	-
병렬회로 수	4	-
점적률	39.38	%
코어 재질	50PN470	-



(a) (b)

그림 37. (a) 55kW SynRM 모델 형상 (b) 자속 포화도

표 19. 설계 사양 및 출력특성

항목	55kW SynRM FEA 결과	Unit
토크	310.16	Nm
출력	57.05	kW
전류밀도	3.73	A_{rms}/mm^2
동손	598.71	W
효율	95.83	%
전압	253.09	V

표 20. 55kW 설계 파라미터 결과값

항목	값	Unit
고정자 외경	356	mm
고정자 내경	219	mm
회전자 외경	217.8	mm
회전자 내경	60	mm
적층길이	255	mm
공극길이	0.5	mm
요크 두께	25	mm
배리어 개수	5	-

배리어 두께	6.5	mm
턴수	5	-
병렬회로 수	2	-
점적률	39.3	%
코어 재질	50PN470	-

- SynRM 최적 설계 모델 원가 절감 효과 분석
  ▹ 현재 사용되고 있는 압축 및 공조용 유도전동기와 상용 인버터 용량대별 가격의 경우 아래의 표 21과 같음

표 21. 상용 유도전동기 및 인버터 가격 (H社)

용량 [kW]	구분	가격 [천원]
5.5	전동기	513
	인버터	572
7.5	전동기	1,093
	인버터	715
30	전동기	4,066
	인버터	2,466
45	전동기	5,150
	인버터	3,317
55	전동기	6,810
	인버터	3,695

▹ 현재 상용중인 IE5급 SynRM의 전동기 및 인버터 용량대별 가격은 아래의 표 22와 같음 (ABB 社)

표 22. 용량별 IE5급 SynRM 가격 분석 (판매가)

용량 [kW]	구분	가격 [천원]
5.5	전동기	1,540
	인버터	6,280
7.5	전동기	1,890
	인버터	6,520

30	전동기	4,960
	인버터	8,640
45	전동기	6,980
	인버터	10,090
55	전동기	8,090
	인버터	10,820

▹ 본 과제에서 개발한 공조용 및 송풍용 SynRM의 7.5kW 전동기 및 제어용 인버터의 원가 가격은 다음 표 23과 같음

▹ 기존 상용 유도전동기의 판매가 대비 본 과제에서 개발한 7.5kW급 SynRM의 제작 단가는 약 7% 저감되었고, 제작 공정 및 금형 최적화를 통한 양산 진행 시 그 이상의 저감 효과를 기대할 수 있음

▹ SynRM의 경우 동기전동기이기 때문에 상용 전원을 사용할 수 없으므로 제어용 인버터에 정류 회로가 추가되고, 고속 스위칭 소자의 활용 때문에 단가가 일부 상승함

▹ SynRM 제어용 인버터 소자의 최적화 작업 및 양산화를 통해 인버터 가격 저감이 가능함

표 23. 공조용 및 송풍용 7.5kW 시작품 원가

용량 [kW]	구분	가격 [천원]
7.5	전동기	1,015
	인버터	1,000

- TRL 단계 분석 및 시작품 공인인증 시험 진행 및 성적서 발급 진행

▹ 본 개발 과제의 목표인 TRL 5단계는 확정된 소재/부품/시스템 시작품 제작 및 성능 평가 단계를 의미함

▫ 확정된 소재/부품/시스템의 실험실 시작품 제작 및 성능 평가가 완료된 단계

▫ 개발 대상의 생산을 고려하여 설계하나 실제 제작한 시작품 샘플은 1~수개 미만인 단계

▫ 경제성을 고려하지 않고 기술의 핵심성능으로만 볼 때, 실제로 판매가 될 수 있는 정도로 목표 성능을 달성한 단계

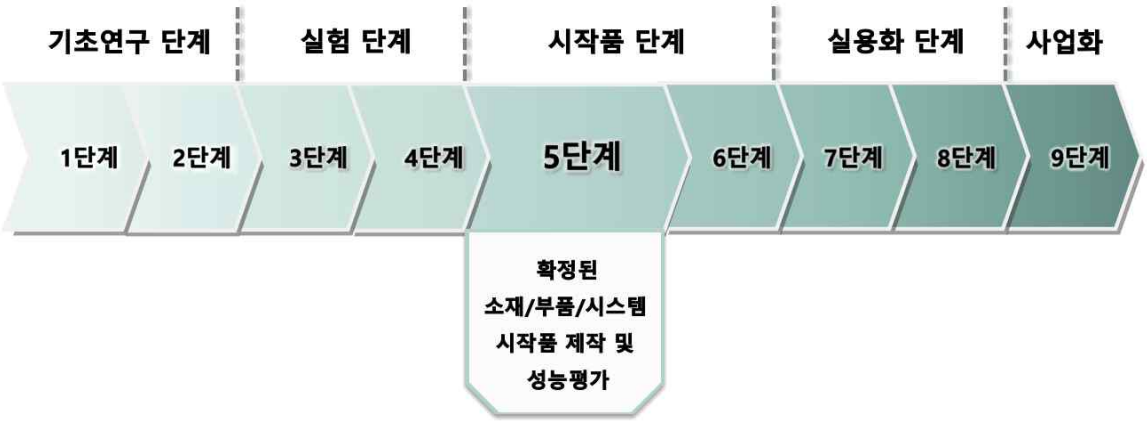
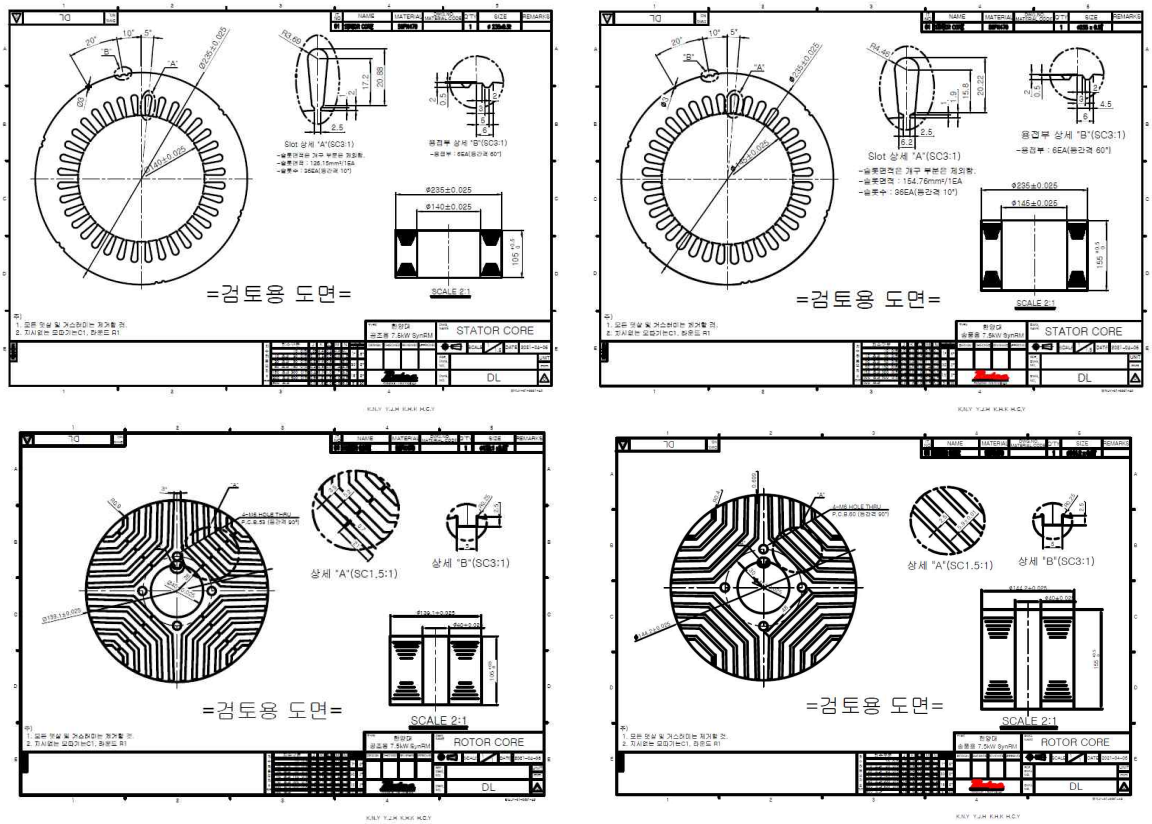


그림 38. TRL 단계

- ▹ 현재 공조용 및 송풍용 시스템에 적용될 수 있도록 외경 고정 및 적층 길이 저감하는 방향으로 사이즈를 도출하였으며, 적용된 부품 소재 등은 수급 안정성 및 가격 경쟁력 측면에서 안정적임
- ▹ 산업 현장에서 필요로 하는 요구 사양 및 제약 조건을 모두 만족하는 출력 특성을 가지므로 본 기술의 핵심 성능을 적용하는 데에 이상 없음
- ▹ 상용 유도전동기 대비 우수한 효율 특성을 가지므로 실제 공조 및 송풍 시스템에 적용할 경우 에너지 소비 저감이 가능함
- ▹ 추후 개발한 SynRM의 상용화를 위해서는 TRL 7단계 달성이 필요하며, TRL 7는 신뢰성 평가 및 수요기업 평가가 필요함
- ▹ 이를 위해서는 실제 환경에서의 성능 검증을 진행하고, 필요한 부품 대해 신뢰성 평가를 진행해야 함
- ▹ TRL 7단계의 평가가 완료되면 시제품 인증 및 표준화를 통해 TRL 8단계를 달성할 수 있으며, 제품화 단계를 모두 만족시킬 수 있음
- ▹ 그림 39는 제작한 압축 및 송풍용 7.5kW급 SynRM의 도면을, 그림 40은 해당 SynRM의 시편을 나타냄



(a) 공조용 (b) 송풍용

그림 39. 공조용 및 송풍용 7.5kW SynRM 도면

(a) 공조용

(b) 송풍용

그림 40. 압축 및 공조용 7.5kW급 SynRM 시편

- ▹ 연구 결과 타당성을 증명하기 위해 압축 및 송풍용 7.5kW SynRM을 제작하여 실험을 진행하였고 공조용은 94.47%, 송풍용은 94.01%로 두 모델 모두 효율 94% 이상 만족하는 것을 확인하였으며, 표 24에 시험시 전동기 출력 데이터를 나타내었음
- ▹ 제작한 압축 및 송풍용 7.5kW급 SynRM 두 대는 국가공인인증기관에서 시험을 통해 그림 41과 같이 성적서를 발급 받음

표 24. 공조용 및 송풍용 75kW 시험 데이터

구분	항목	값	단위
공조용	회전속도	3,501	rpm
	토크	20.48	Nm
	전동기 출력	7.51	kW
	전동기 효율	94.47	%
	역률	0.55	-
송풍용	회전속도	1,802	rpm
	토크	40.38	Nm
	전동기 출력	7.62	kW
	전동기 효율	94.01	%
	역률	0.75	-

KTC Korea Testing Certification

시험성적서

성적서 번호 : T2021-12334

회 사 명 : 한양대학교 산학협력단
대 표 자 : 하성규 연락처 : 010-8293-8977
주 소 : 서울특별시 성동구 왕십리로 222 (사근동, 한양대학교내 한양종합기술연구원115호)

1. 시 료 명 : 송풍 및 공조용 7.5kW SynRM
· 규격 및 형식 : 7.5 kW
2. 성적서의 용도 : 국토교통부 제출용
3. 접수일자 : 2021.11.03
4. 시험일자 : 2021.11.11 - 2021.11.17
5. 시험방법 : 의뢰자 제시 시험방법
6. 시험결과 : (시험결과 참조)

시험자 : 김용호 김용호 승인자 : 최병연 최병연

1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않습니다.
2. 이 성적서는 우리 시험연구원의 사전 동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서의 진위여부는 홈페이지(www.ktc.re.kr)에서 확인할 수 있습니다.

2021 년 12 월 10 일

한국기계전기전자시험연구원장

한국기계전기전자시험연구원장인

www.ktc.re.kr 15809 경기도 군포시 흥한대로27번길 22
TEL : 1899-7654

서식P708-05(Rev.4) Page : 1 of 5 Code NO : K5P9-C2N8-UJ3B

KTC Korea Testing Certification

시 험 결 과

성적서 번호 : T2021-12334

1. 시험개요
본 시험성적서는 의뢰자가 제시한 시료(송풍 및 공조용 7.5kW SynRM)에 대하여 전동기 효율 시험을 수행한 결과임.

2. 적용 또는 인용규격
의뢰자 제시 시험방법

3. 시료정보
1) 시료명 : 송풍 및 공조용 7.5kW SynRM
2) 시료사양 : 7.5 kW
3) 제조사 : 주식회사 로텍
4) 시료사진

<송풍용 7.5kW SynRM> <공조용 7.5kW SynRM>

서식P708-06 (Rev.2) Page : 2 of 5 Code NO : K5P9-C2N8-UJ3B

KTC Korea Testing Certification

시 험 결 과

성적서 번호 : T2021-12334

4. 시험조건 및 방법

시험항목	시험조건 및 방법
효율	· 의뢰자가 제시한 시료(송풍용 7.5kW SynRM)를 다이나모미터에 설치함. · 시료 제어기에 DC 550 V 를 인가함. · 제어기로 회전속도를 증가하여 1 800 r/min 으로 구동함. · 다이나모미터로 부하를 증가하여 의뢰자가 제시한 기계적출력(7.5 kW) 지점의 특성을 측정함.
효율	· 의뢰자가 제시한 시료(공조용 7.5kW SynRM)를 다이나모미터에 설치함. · 시료 제어기에 3상 380 V 를 인가함. · 다이나모미터로 회전속도를 증가하여 3 500 r/min 으로 구동함. · 제어기로 부하를 증가하여 의뢰자가 제시한 기계적출력(7.5 kW) 지점의 특성을 측정함.

서식P708-06 (Rev.2) Page : 3 of 5 Code NO : K5P9-C2N8-UJ3B

KTC Korea Testing Certification

시 험 결 과

성적서 번호 : T2021-12334

5. 시험 결과

5.1. 효율 (송풍용 7.5kW SynRM)

구분	회전속도	토크	기계적출력	전동기입력선간전압	전동기입력상전류	전동기역률	전동기입력
	[r/min]	[Nm]	[kW]	[V]	[A]	[-]	[kW]
측정치	1 802	40.38	7.62	280.84	22.29	0.75	8.11

구분	제어기입력전압	제어기입력전류	제어기 입력	전동기 효율	제어기 효율	전체효율
	[V]	[A]	[kW]	[%]	[%]	[%]
측정치	546.97	15.47	8.46	94.01	95.83	90.09

5.2. 효율 (공조용 7.5kW SynRM)

구분	회전속도	토크	기계적출력	전동기입력선간전압	전동기입력상전류	전동기역률	전동기입력
	[r/min]	[Nm]	[kW]	[V]	[A]	[-]	[kW]
측정치	3 501	20.48	7.51	296.47	22.41	0.55	7.95

구분	제어기입력전압	제어기입력전류	제어기 입력	전동기 효율	제어기 효율	전체효율
	[V]	[A]	[kW]	[%]	[%]	[%]
측정치	380.04	15.95	8.16	94.47	97.39	92.01

서식P708-06 (Rev.2) Page : 4 of 5 Code NO : K5P9-C2N8-UJ3B

KTC Korea Testing Certification

시 험 결 과

성적서 번호 : T2021-12334

6. 시험사진

<효율 (송풍용 7.5kW SynRM) 시험 사진>

<효율 (공조용 7.5kW SynRM) 시험 사진>

끝.

서식P708-06 (Rev.2) Page : 5 of 5 Code NO : K5P9-C2N8-UJ3B

그림 41. 공조용 및 송풍용 7.5kW SynRM 공인인증 성적서

▹ 개발한 압축기용 및 송풍용 SynRM의 상용화를 위하여 진행할 수 있는 추가 규격 시험은 부하 운전 환경 조건을 적용하여 진행할 수 있음

▹ 현재 SynRM에 대한 규격 시험은 따로 존재하지 않으며, 표 25의 내용은 일반적인 회전기기 및 산업용 유도기에 적용되는 시험 방법임

표 25. 전동기 규격시험 항목

종류	정의 및 시험 방법
효율특성시험	전동기 크기와 정격에 따라 3가지 방법으로 효율 결정이 가능함 (KS C IEC60034-2-1) 1. 동력계를 사용하여 입력 및 출력 전력의 직접 측정. 프레임 크기 180mm이하의 모든 기기 및 모든 정격의 회전기기 적용가능 2. 추가 부하 손실의 결정을 위한, 전체 부하 시험 및 단락 시험을 갖는 개별 손실의 합을 산출. 프레임 크기 180mm 이상의 모든 기기 및 최대 2MW 정격 출력의 회전기기에 적용 가능 3. 총 손실 제회한 개별 손실의 합을 산출. 추가 부하 손실의 결정을 위한 회로 단락 시험 2MW 이상 정격 출력의 회전기기에 적용 가능
출력(정격)시험	운전 환경 상태에서 전원을 공급하여 총 6가지(연속 운전 사용에 대한 정격 / 단시간 사용에 대한 정격 / 주기적 사용에 대한 정격 / 비주기적 사용에 대한 정격 / 분산형 정부하를 갖는 사용에 대한 정격 / 등가부하에 대한 정격) 중에 알맞은 상태의 정격 분류를 사용하여 측정함. 일정 시간 동안 동력을 전달할 수 있는 전동기의 최고 평균출력을 도출함 (KS C IEC60034-1)
소음시험	암소음 및 조위에서의 반사음이 되도록 적은 장소에서 KS C 1502 규격에 적합한 보통 소음계를 사용하고, 주파수 보정은 A 특성으로 하여 소음계의 지시가 변동할 때는 몇 회 측정의 평균값으로 산출함 (KS C 4204)
온도포화시험	권선의 온도 및 기타 부분의 온도를 측정하는 방법으로 저항법, 매입온도계(ETD)법, 온도계법이 있음. 시험 방법 및 결정은 정격조건 하에서 각 권선의 가장 뜨거운 지점의 온도는 일반적으로 절연 시스템의 하의 된 열 등급 온도를 초과하지 않는 것으로 도출함 (KS C IEC60034-1)
손실분리시험	다이나모미터를 통해 부하를 조절하고 전압, 주파수, 출력 등을 측정하여 각각의 손실을 계산함 (IEEE Std 112-2004)
내전압시험	시험 전압의 주파수는 제조공장에서의 전력 주파수이어야 하며, 전압 파형은 정현파에 가까워야 함. 시험 전압까지 안정되게 상승시키거나 시험전압의 5% 이하의 전압만큼씩 단계적으로 상승시켜야 하며, 1/2 전압에서 시험전압까지 상승시키는 데 10초 이상 걸려야 하며, 그 시험 전압을 1분 동안 유지해야함 (KS C IEC60034-1)
절연저항시험	전동기의 건전성 확인 및 전기화재 예방 등을 위해 절연저항계를 통하여 절연저항을 측정하고 시험 기준을 판단함 (IEEE Std 43-2000)
진동특성시험	정격 전압, 정격 주파수에서 무부하 운전시의 진동을 측정하며, 사인파형의 평형한 공급전원을 이용함. 측정법은 진동계를 사용 범위에서 최대 진폭의 0.1이하의 최소 지시 눈금을 갖는 것을 사용하고, 가능한 한 각 베어링에 가까운 부분에서 상하방향, 횡방향 및 축방향에 대해 측정함. 각 측정값 중 최곳값을 전동기의 진동값으로 산출함 (KS C 4204)

나. 공동연구기관1 ((주)로텍)

○ 1차년도 연구 내용

- 철도역사용 공조기 사용현황 조사
  - ▹ 지하철 역사용 공조기 설비 구성 조사
    - ▫ 대전 지하철 1호선을 기준으로 실사용 중인 공조기용 전동기 사양 조사
    - ▫ 기존 전동기는 대부분 부하와 전동기 사이에 벨트로 연결되어 있음

▫ 벨트와 풀리 사이의 미끄러짐 등으로 인해 손실이 발생하므로 효율적이지 못함

그림 42. 대전 1호선 공조설비 구성

- 7.5kW급 SynRM 기구부 설계
  - ▹ 기구부 기초설계
    - ▫ 실사용 중인 제품 정보를 취합하여 가장 범용적으로 사양하는 형태를 기반으로 전동기 외함 기초설계
    - ▫ 공조기의 풍량 및 전동기 운전속도를 기반으로 팬 사이즈를 역산하여 축 중량 추정
    - ▫ 전자계 설계 결과를 기반으로 세부 형상 설계
  - ▹ 냉각방식 선정
    - ▫ 공조용의 경우, 전동기를 냉각시키기 위해 회전자 축에 팬을 부착하는 형태로 구성
    - ▫ 송풍용 팬에 전동기가 직결되는 경우, 부하에 의해 발생되는 바람으로 냉각이 가능하지만, 다음 그림 43과 같이 벨트 방식 시스템에 적용할 경우, 공조용과 동일하게 회전자 축에 팬을 부착하는 형태로 구성할 필요가 있음

그림 43. 대용량 송풍장치 구성 예시

  - ▹ 기구부 강성해석을 통한 구조 최적화
    - ▫ 전자계 설계 목표사양 및 기구부 기초설계 결과를 토대로 기술자문을 통해 기구부 강성해석 수행
    - ▫ 전동기 자중, 구동 시 발생하는 가진력, 각 부품의 고유진동수 등 다양한 인자를 고려하여 구조해석 진행 후 보강

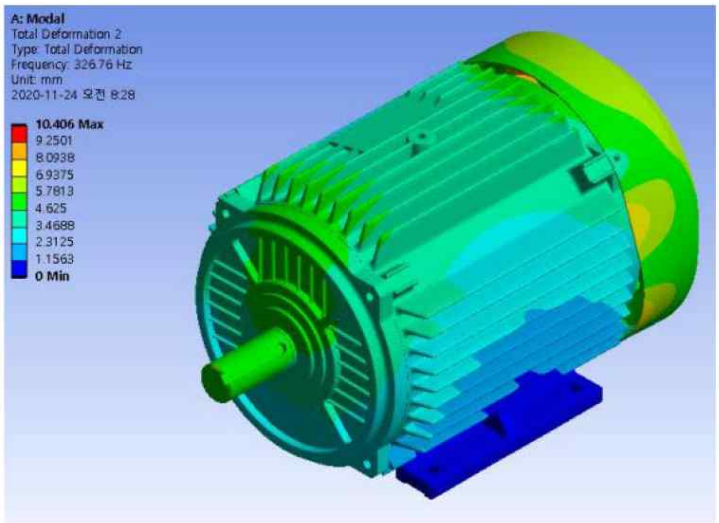
- 전동기 특성 개선을 위한 고정자 및 회전자 철심 제작 기술 개발
  - ▹ 회전자 철심의 강성을 고려한 외경 가공 조건 연구

- 회전자 외경 가공은 회전자의 진원도를 개선하여 표류부하손 저감 효과가 있음
- 외경 가공 시 절삭 공구로 과한 힘이 가해지면 회전자 철심은 의도한 형상과 달리 일그러지는 현상이 발생됨
- 절삭 공구에 의해 일그러진 상태에서 가공할 경우, 설계 의도와는 전혀 다른 특성이 나타남은 물론, 가공 도중에 회전자 철심이 파손될 가능성이 높음
- 회전자 설계 확정 후 강성 해석을 통해 각 부 가공 조건에 대해 최적화 진행 예정

– 냉각방식을 고려한 전동기 강성해석 수행

▹ model 해석 조건의 중요 포인트
- 하우징 및 샤프트를 포함한 전동기 형상 모델링
- 전동기의 각 파트별 물성 데이터 확보
- 파트 간 contact 옵션 활성화

▹ model 해석을 진행하여 고유 진동수 확인



	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	203.74
2	2.	326.76
3	3.	372.98
4	4.	424.44
5	5.	425.02
6	6.	487.71

그림 44. 전동기 고유 진동수 확인

▹ Harmonics response 해석 수행
- 1800rpm, 30Hz의 해석 결과에서는 공진 주파수의 범위를 벗어나 발생하는 응력의 최댓값이 14Mpa로 낮게 분석됨

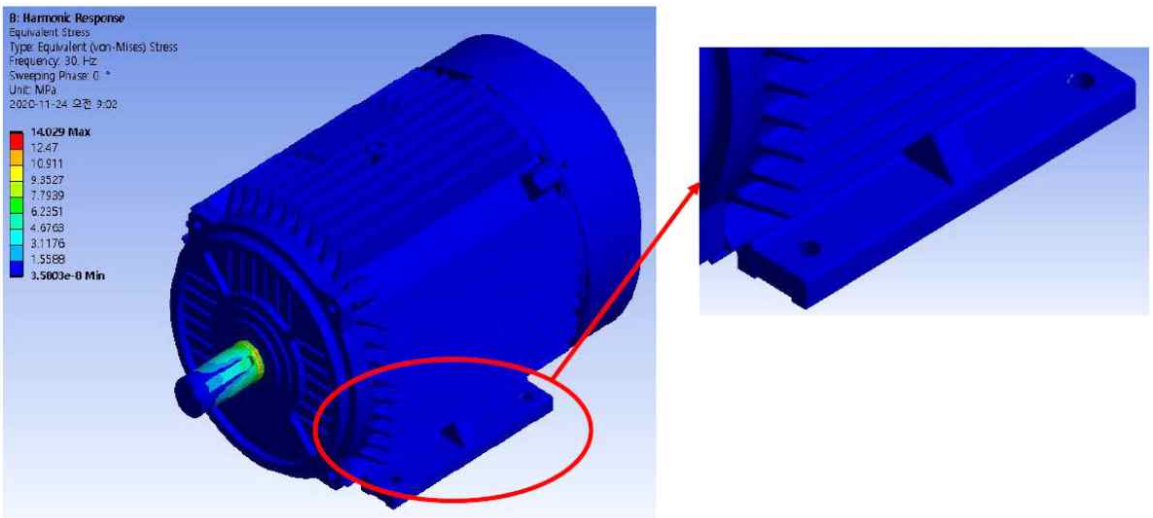


그림 45. Harmonics response 해석 수행

▫ 1800rpm, 37Hz의 해석 결과에서는 공진 주파수 내에서 결과값, 응력의 최댓값이 308Mpa로 낮게 분석됨

▫ 이때 안전율은 420MPa/119.3MPa=3.52로 측정됨

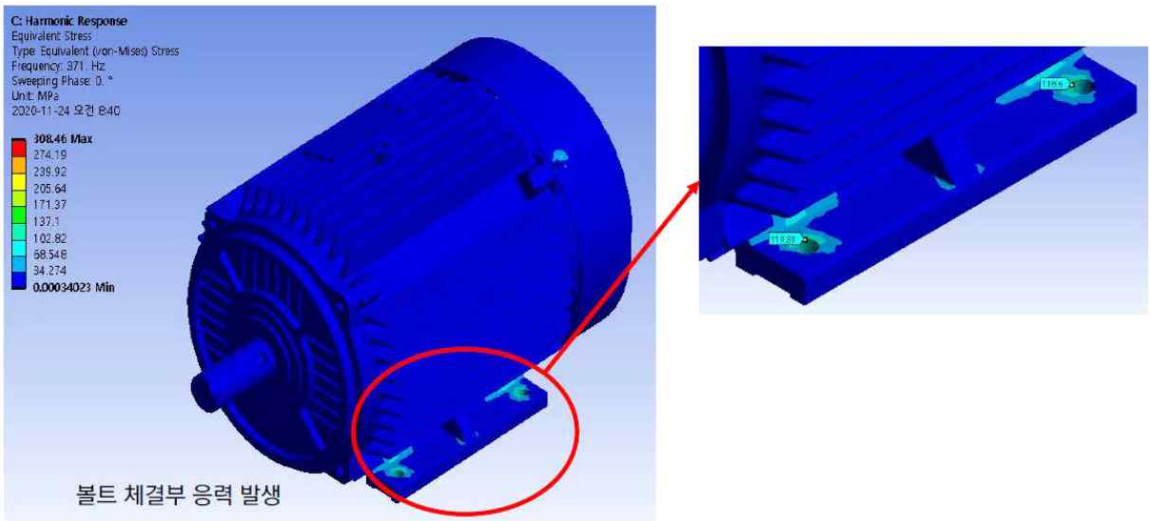


그림 46. Harmonics response 해석 수행

○ 2차년도 연구 내용

- SynRM 제작 프로세스 및 원가 검토

▹ 제작 공정 검토

▫ SynRM 제작공정은 회전자 제작을 제외한 고정자 제작/가공품 제작 등과 같은 나머지 공정은 동일

▫ SynRM은 회전자가 외경 가공 과정에서 바이트가 누르는 힘에 의해 파손될 가능성이 매우 높을 것으로 예상되어 철심 금형을 자동 적층 방식 적용하여 외경 가공 생략

▫ 회전자 다이캐스팅 및 외경 가공 생략 ⇨ 원가 저감 효과(재료비 및 임가공비) 4% 내외로 추정

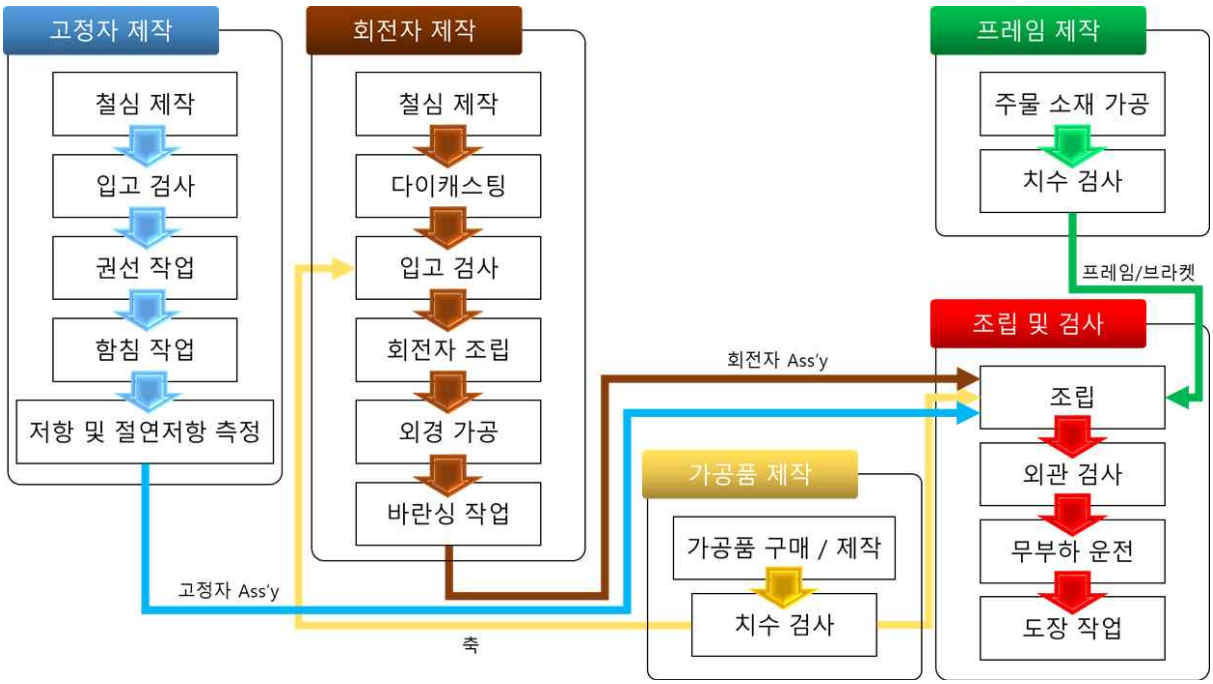


그림 47. 유도전동기 제작공정

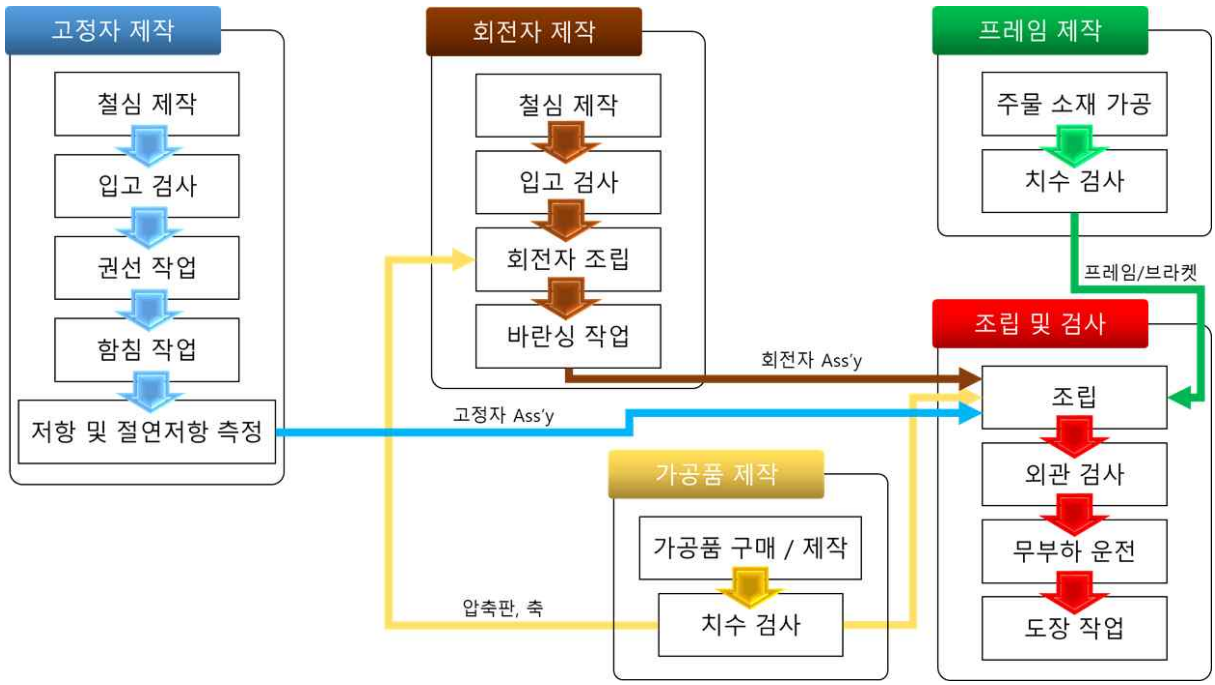


그림 48. SynRM 제작공정

- 7.5kW SynRM 시제품 제작
  - ▹ 고정자 및 회전자 철심
    - ▫ 고정자 철심 : 와이어 컷팅 후 외경 용접
    - ▫ 회전자 철심 : 레이저 컷팅 후 축에 삽입하며 적층한 뒤 압축판으로 고정

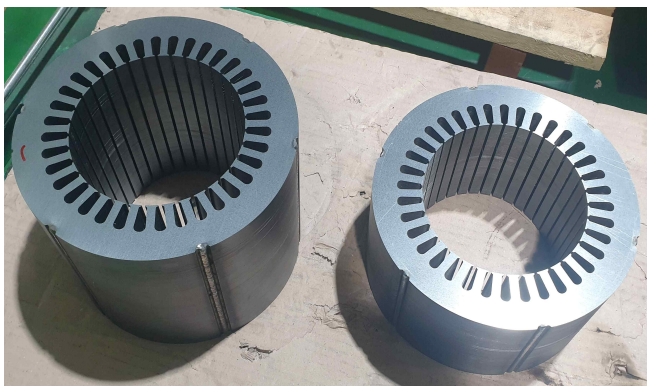


그림 49. 고정자 철심

그림 50. 회전자 철심

▹ 고정자

- 고정자 철심에 절연지삽입 / 권선삽입 / 결선작업 / 함침작업을 순차적으로 실시
- 함침 작업 완료 후 저항 측정, 절연저항 측정, 내전압 시험 실시
- 모든 공정 완료 후 프레임 열박음 실시

그림 51. 고정자 실물사진

▹ 회전자

- 축을 지그에 꽂은 상태에서 압축판-철심-압축판 순서대로 삽입하여 적층 완료
- 적층 작업 완료 후 회전자 철심 고정용 링 열박음 작업 실시
- 바란싱 작업 완료 후 방청 작업 실시하여 부식 방지

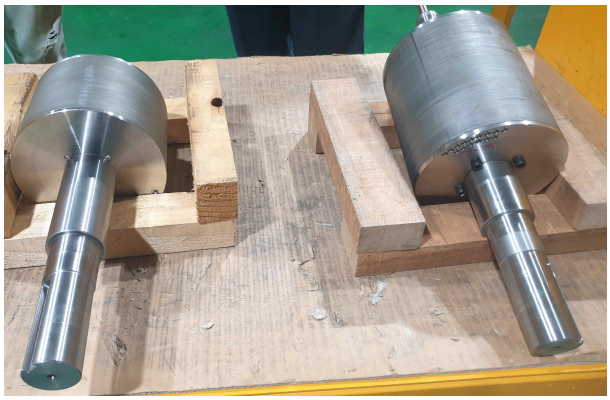


그림 52. 회전자 실물사진

▹ 프레임(Frame)

- 열 발산이 원활하게 이루어질 수 있도록 방열핀 배치
- 하부 마운팅 부분 강성 확보를 위해 두께 증가 (10mm⇨15mm)
- 공조용/송풍용 공용으로 사용
- 주조로 소재 제작 후 가공하여 완성

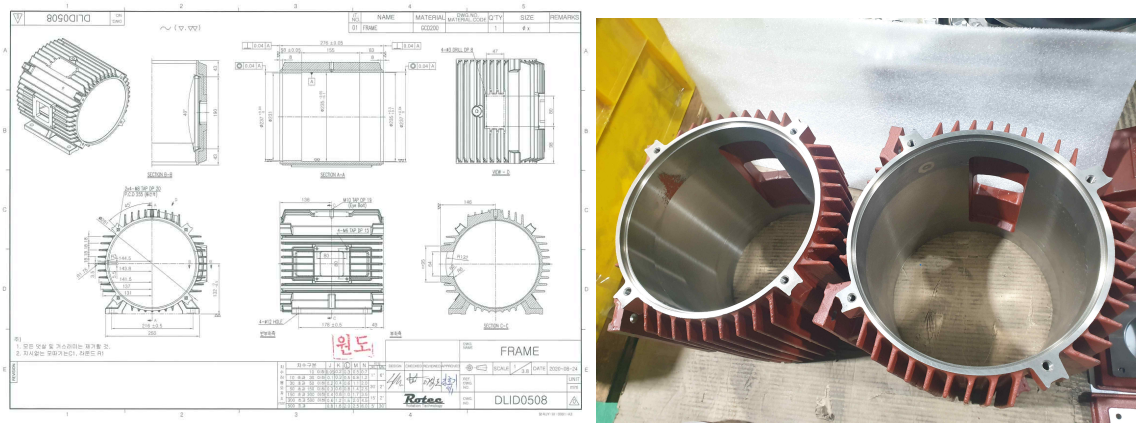


그림 53. 프레임 도면 및 실물 사진

▹ 브라켓(Bracket)

- 베어링 열 발산을 위한 핀형상 설계
- 볼트 체결부 강성 확보를 위한 덧살 4개소 추가
- 공조용/송풍용 공용으로 사용
- 주조로 소재 제작 후 가공하여 완성

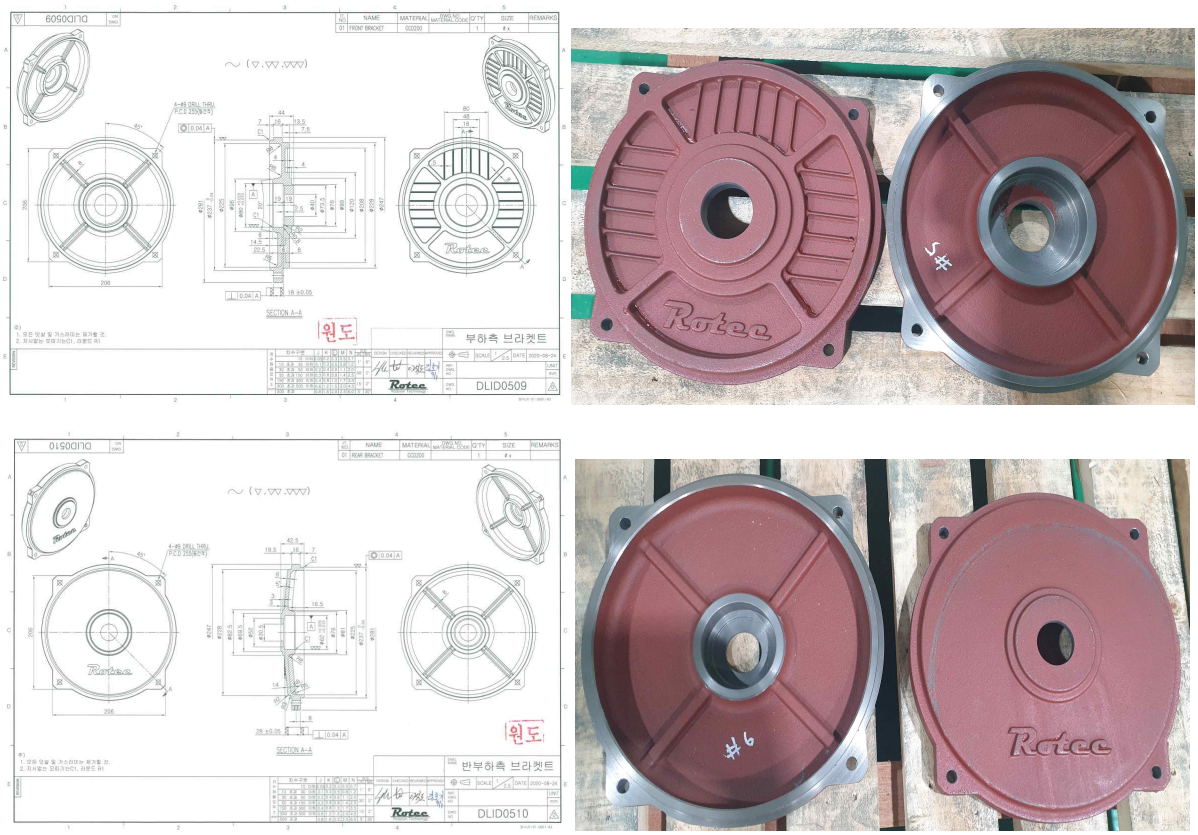


그림 54. 브라켓 도면 및 실물 사진

▹ 축(Shaft)

- 축 중량 고려하여 베어링 선정 후 설계에 반영
- 공조용/송풍용 적층에 맞춰서 세부 형상 설계

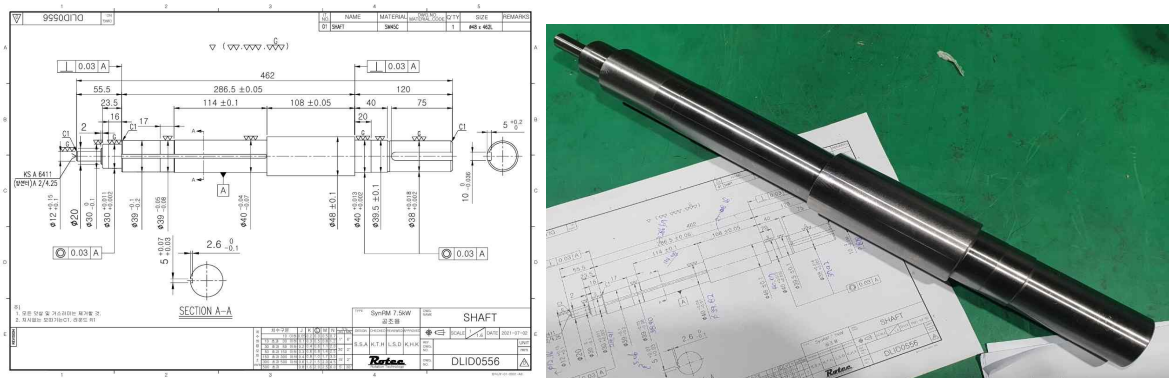


그림 55. 공조용 축 도면 및 실물사진

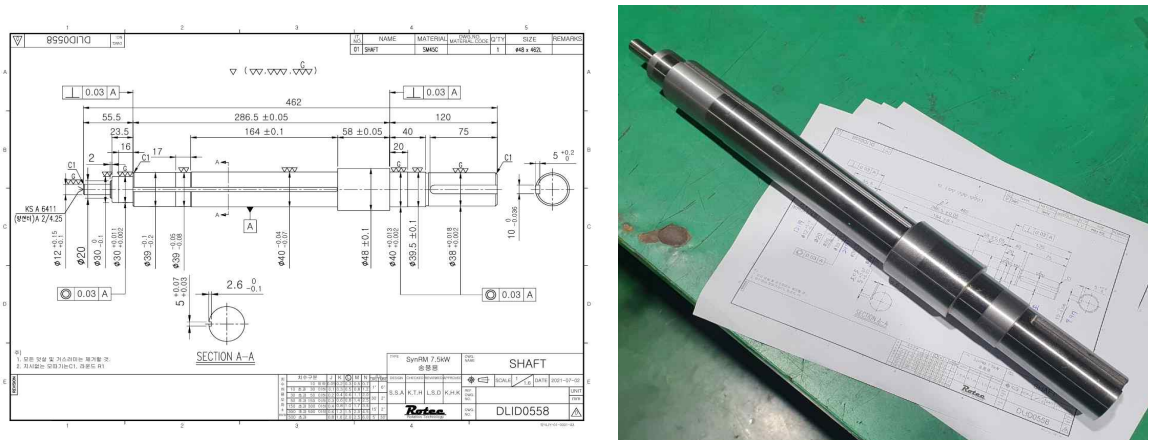


그림 56. 송풍용 축 도면 및 실물사진

▹ 단자박스(Terminal box)

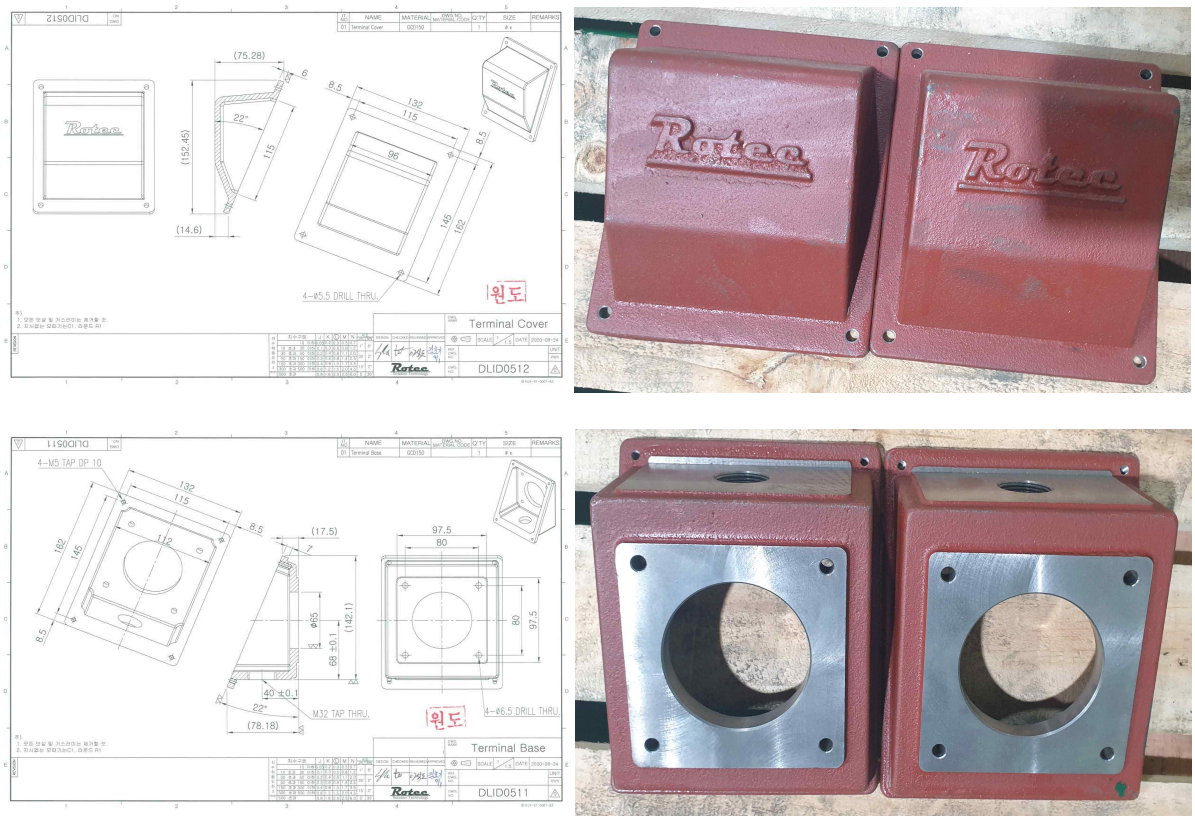


그림 57. 단자박스 도면 및 실물 사진

▹ 완제품

▫ 부품 조립 후 자체 성능평가 실시(상용 인버터 이용하여 구동)

▫ 성능평가 후 주요 부분 마스킹 후 도장 작업 완료

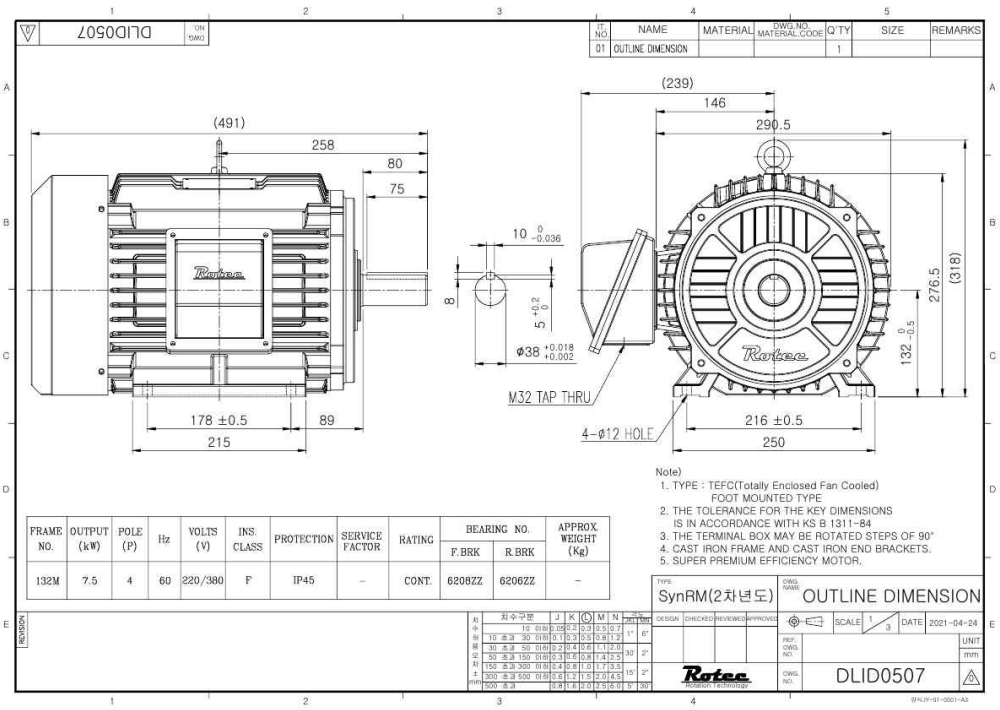


그림 58. 송풍용 및 공조용 시제품 도면

그림 59. 완제품 실물사진(좌:도장前, 우:도장後)

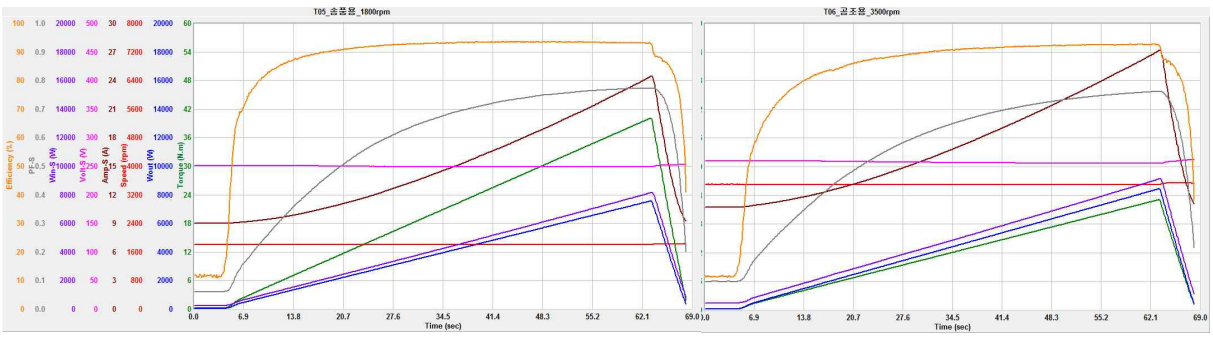


그림 60. 송풍용 및 공조용 시제품 성능측정 결과

- 진동 내구 시험

▹ 시험조건

- KS C IEC 60068-2-6 [환경시험 제 2-6부 : 진동(정현파)] 기반으로 진폭 및 진동가속도 선정
- KS C IEC 60068-2-6에서는 실제 환경의 진동 특성을 명확하게 알 수 있다면 그 가혹도를 토대로 실시할 것을 권장하지만, 가혹도 추정이 어려운 경우에 임의로 선택할 수 있는 보기를 부속서로 제공
- 가진기의 사양과 시험대상의 중량을 고려하여 주파수 범위, 진폭 및 가속도 선정
- 적용 예시에 따르면 10~150Hz 범위 내에서 실시해도 무방하나 보다 가혹한 조건에서 시험하기 위해 한 단계 윗등급인 10~500Hz 범위로 선정하였으며 주파수 범위에 따라 가혹도를 달리하여 실시
- 다른 축에 비해 비교적 많은 진동이 가해질 수밖에 없는 Z축 가혹도를 높여 진행
- 10~25Hz : ±0.6mm(Z방향), ±0.3mm (X,Y방향)
- 25~500Hz : 30m/s²(Z방향), 15m/s² (X,Y방향)
- 시험 순서 : Z, X, Y 방향 순으로 진행
- 각 방향별로 8시간 가진 후 육안으로 변형 및 파손 발생 여부 검사
- 마운트 변형 발생 여부, 베어링 소음 발생 여부, 볼트 풀림 발생 여부 등을 검사

(a) (b) (c)

그림 61. (a) X방향 장착사진 (b) Y방향 장착사진 (c) Z방향 장착사진

- 반복적으로 가진 과정 도중 400~500Hz 구간에서 제어가 불안정한 현상을 보여 프로필 수정 후 진행
- 본격적인 내구시험 진행에 앞서 프로필 수정 후 검증작업을 진행
- 진동 주파수는 10~500Hz 범위 내에서 상승 및 하강을 반복

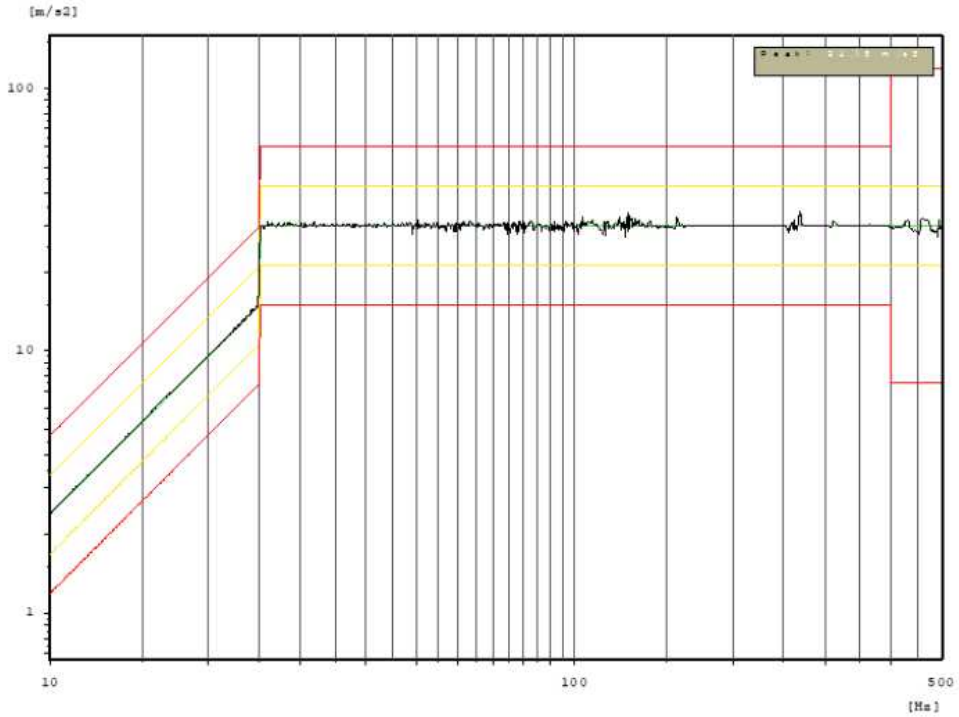
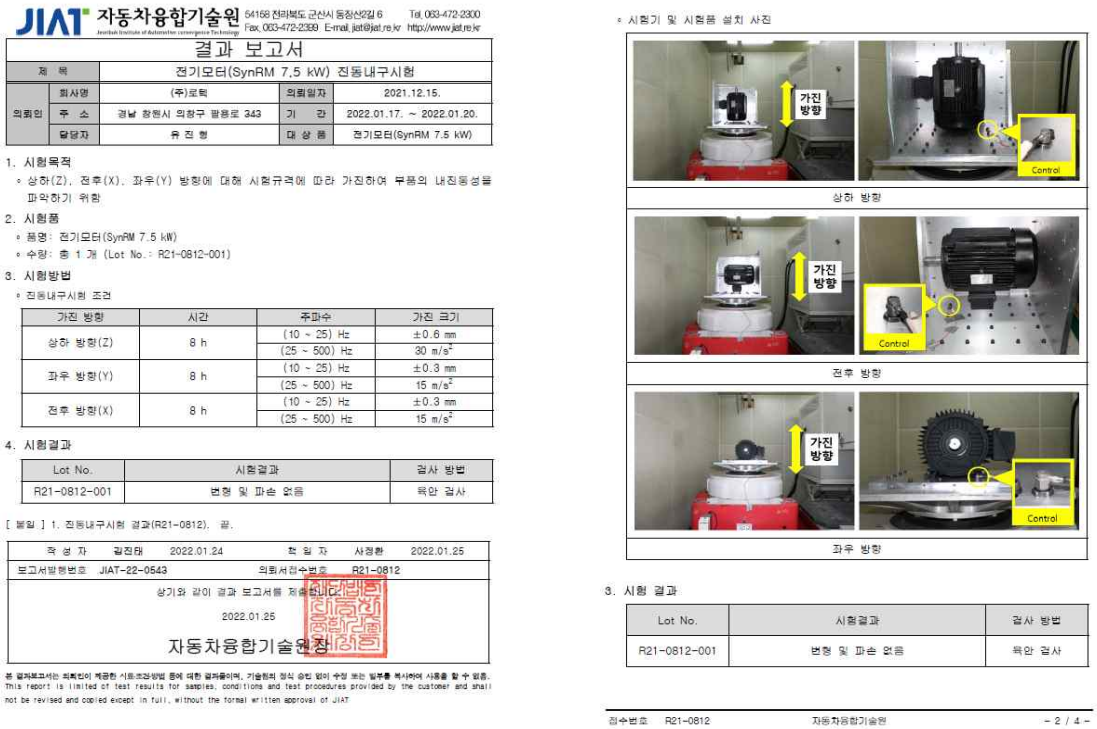


그림 62. Z방향 가진 Profile

▫ 시료는 8시간 시험 후 검사를 마친 뒤 방향을 전환한 뒤 다음 방향 시험을 연속 시행

▫ 일반적인 용도의 전동기 진동시험조건 대비 주파수 범위를 넓힌 상태에서 진폭을 2배 가까이 길게 설정한 상태에서 시험하여 안전율 3.0 이상임을 확인



JIAT 자동차융합기술원 Jeonbuk Institute of Automotive Convergence Technology
54168 전라북도 군산시 동장산2길 6 Tel. 063-472-2300
Fax. 063-472-2399 E-mail. jiat@jiat.re.kr http://www.jiat.re.kr

결과 보고서

제 목		전기모터(SynRM 7.5 kW) 진동내구시험		
의뢰인	회사명	(주)로텍	의뢰일자	2021.12.15.
	주 소	경남 창원시 의창구 팔용로 343	기 간	2022.01.17. ~ 2022.01.20.
	담당자	유 진 형	대 상 품	전기모터(SynRM 7.5 kW)

1. 시험목적
   - 상하(Z), 전후(X), 좌우(Y) 방향에 대해 시험규격에 따라 가진하여 부품의 내진동성을 파악하기 위함
2. 시험품
   - 품명: 전기모터(SynRM 7.5 kW)
   - 수량: 총 1 개 (Lot No.: R21-0812-001)
3. 시험방법
   - 진동내구시험 조건

가진 방향	시간	주파수	가진 크기
상하 방향(Z)	8 h	(10 ~ 25) Hz	±0.6 mm
		(25 ~ 500) Hz	30 m/s²
좌우 방향(Y)	8 h	(10 ~ 25) Hz	±0.3 mm
		(25 ~ 500) Hz	15 m/s²
전후 방향(X)	8 h	(10 ~ 25) Hz	±0.3 mm
		(25 ~ 500) Hz	15 m/s²

4. 시험결과

Lot No.	시험결과	검사 방법
R21-0812-001	변형 및 파손 없음	육안 검사

[붙임] 1. 진동내구시험 결과(R21-0812). 끝.

작 성 자	김진태	2022.01.24	책 임 자	사경환	2022.01.25
보고서발행번호	JIAT-22-0543		의뢰서접수번호	R21-0812	

상기와 같이 결과 보고서를 제출합니다.

2022.01.25

자동차융합기술원장

본 결과보고서는 의뢰인이 제공한 시료·조건·방법 등에 대한 결과물이며, 기술원의 정식 승인 없이 수정 또는 일부를 복사하여 사용을 할 수 없음.
This report is limited of test results for samples, conditions and test procedures provided by the customer and shall not be revised and copied except in full, without the formal written approval of JIAT

◦ 시험기 및 시험품 설치 사진

3. 시험 결과

Lot No.	시험결과	검사 방법
R21-0812-001	변형 및 파손 없음	육안 검사

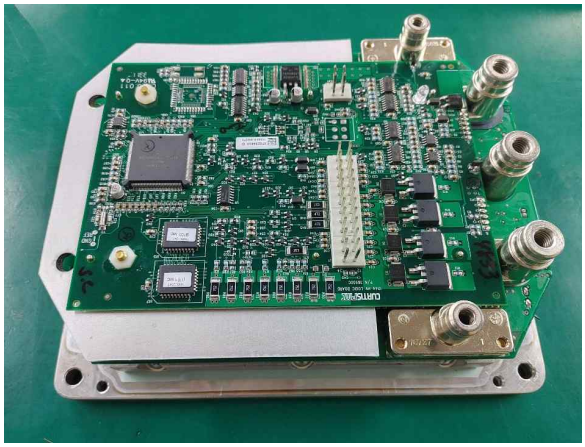
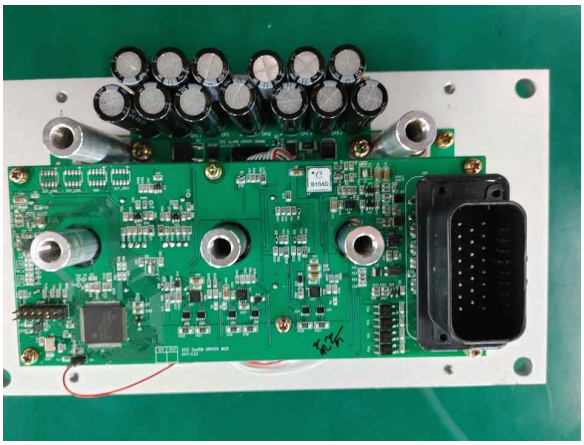
접수번호 R21-0812 자동차융합기술원 - 2 / 4 -

그림 63. 진동내구시험 결과보고서

다. 공동연구기관2 ((주)서보산전)

○ 1차년도 연구 내용

- 범용 고용량 인버터의 구조 및 특징 분석
  - ▹ 파워모듈 용량 및 하드웨어 토폴로지 확인

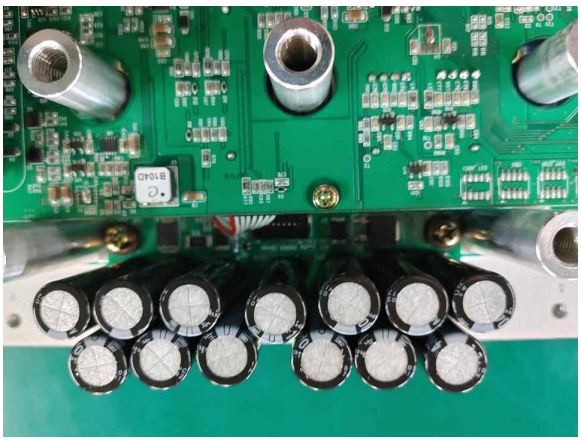



(a) (b)

그림 64. CURTIS 사 대용량 제어기 및 SynRM 대용량 제어기

- 대용량 인버터의 대전류 입출력 구조 확인
- 캐패시터 뱅크의 구조 및 용량 산정 기준 확인
- 신뢰성을 위한 방진/방수 설계 참고
- 외부 인터페이스 사양 및 통신 사양 참고

▹ SMPS 용량 산정 및 전원 방식 확인

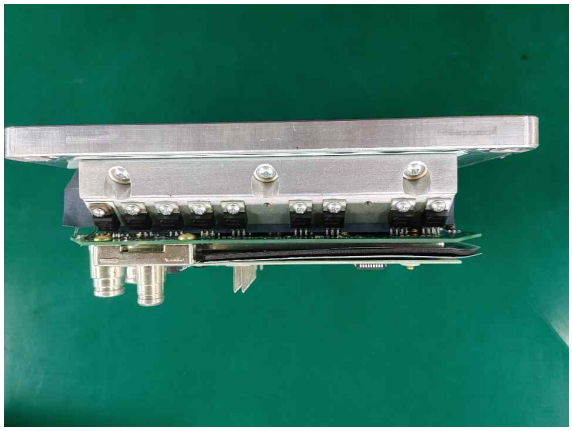


(a) (b)

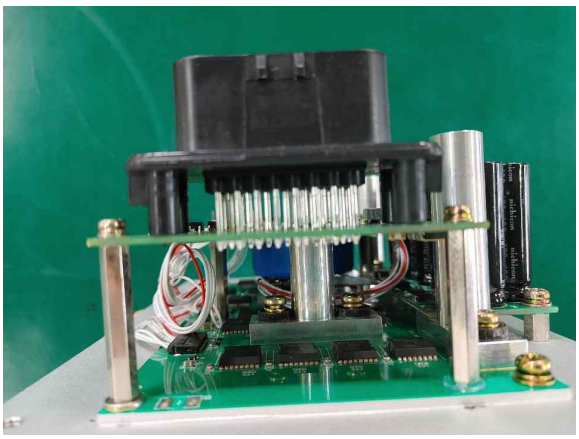
그림 65. SMPS 전원 회로 및 게이트 구동 부

- 게이트 구동 전원 방식 확인
- 전원 변환 회로 용량 및 구동 방식 확인
- 게이트 전원 전압 및 최대 전류 용량 참조

▹ 전류센서 등 고용량 소자 확인 및 특성 파악



(a)



(b)

그림 66. 전류센서 및 파워소자

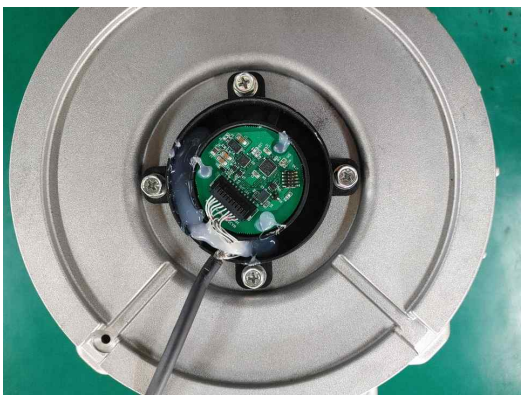
- ▫ 전류 센싱 방식 확인 및 참고
- ▫ 전류 센서 용량 및 최대 허용 용량 참고
- ▫ 전류 센서 배치 및 아날로그 회로 설계 참고

▹ 모터 및 위치 피드백 센서

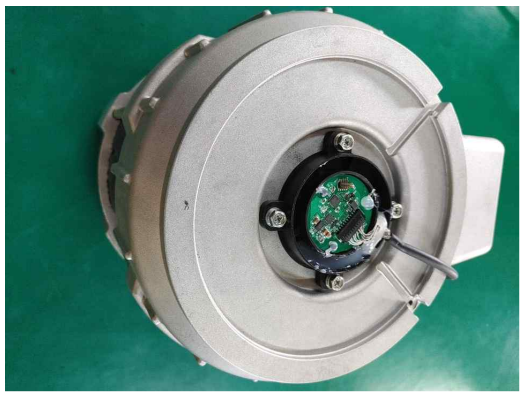
- ▫ 피드백 센서 방식 확인
- ▫ 인버터의 최대 용량 산정 참고

(a)

(b)



(c)



(d)

그림 67. 모터 및 위치 피드백 센서

– 범용 고용량 인버터의 구조 및 특징 분석

▹ 파워모듈 용량 및 하드웨어 토폴로지 확인

- ▫ 대 전류 용량을 구동하기 위한 Busbar 형태의 구조
- ▫ 필요한 경우 FAN을 장착하여 방열을 할 수 있도록 설계함

▫ 방진/방수를 위한 케이스 및 부스바에 고무 링으로 쉴링을 함
▫ 소형 차량용 제어기로 CAN 통신을 기본으로 사용함

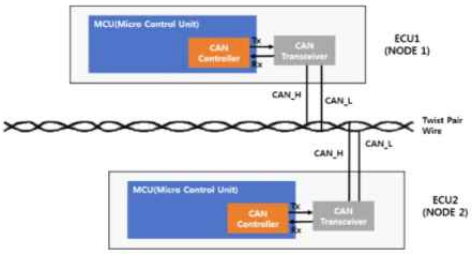
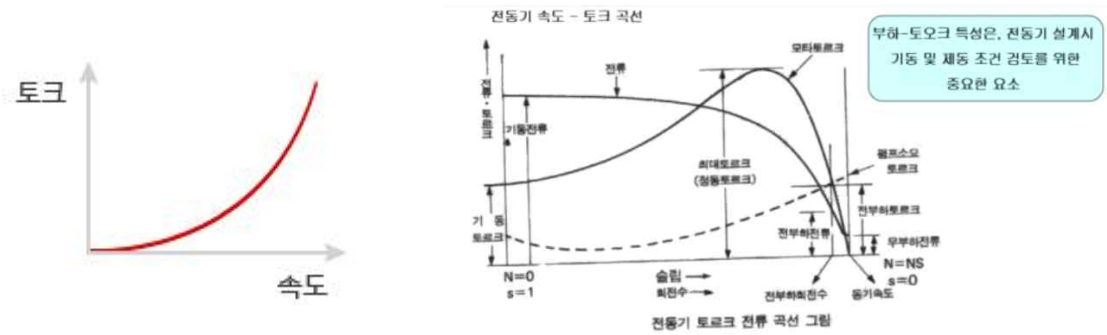


그림 68. 범용 고용량 인버터 구조

▹ SMPS 용량 산정 및 전원 방식 확인
▫ 저전압 입력은 Switching Regulator를 사용함
▫ 대용량의 게이트 구동을 위해 External Bus 방식의 Gate Driver을 사용함
▫ Bootstrap 방식의 게이트 전원을 사용하여 회로를 간소화함
▫ 고전압용의 경우 트랜스포머 내압의 문제로 Bootstrap 방식의 승압을 위한 회로를 추가한 전압을 사용한 설계가 필요 함

▹ 전류센서 등 고용량 소자 확인 및 특성 파악
▫ 파워모듈의 용량은 모터 최대 전류의 약1.5~2배 정도로 산정한 것으로 분석됨
▫ 전류 센서는 모터 최대 전류로 산정한 것으로 파악됨
▫ 파워 소자 용량은 팬 온도 특성 상 20℃ 기준으로 선정해도 가능함

- 공조 부하 특성 및 센서리스 알고리즘 연구
▹ 팬 부하 특성 파악 및 제어 방식 확인
▫ 토크가 속도의 제곱에 비례하는 특성
▫ 기동 시 부하가 없으므로 센서리스 적용에 적합
▫ 역기전압 측정 센서리스 방식 및 벡터제어 센서리스 제어 방식 특성 비교



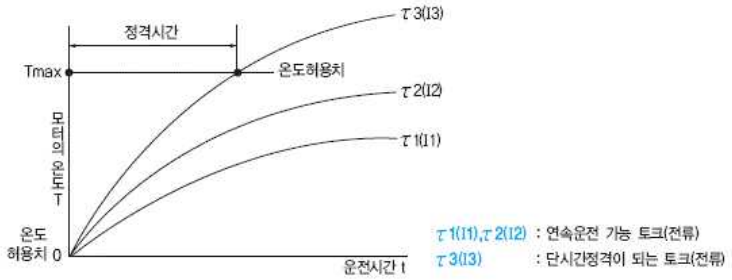
(a) (b)
그림 69. 팬 모터의 부하 특성 및 모터 부하 특성

▹ 부하 변동에 따른 제어 파라미터 확인
▫ 팬 부하 변화에 대한 파라미터 확인 및 제어 알고리즘
▫ 연속 구동 특성 상 최대 허용 토크 산정 기준 마련

$$I = J = WK^2 = \frac{GD^2}{4}$$

$$\text{기동시간 } t = \frac{GD^2 \cdot N}{375 \cdot \bar{T}}$$

$\bar{T}$: 평균 가속 토크

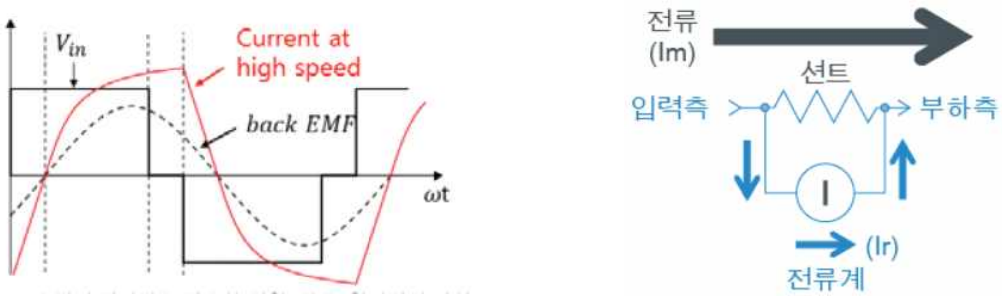


(a) (b)

그림 70. 팬 부하 특성에 대한 이너셔 계산 및 모터 허용 부하 특성

▹ 벡터제어 방식의 센서리스 제어 방식 연구

- 정현파 구동 방식 및 구형파 구동 방식의 토크리플 특성 비교
- 제어 방식에 따른 전류 센싱 방식에 대한 특성
- 전류 검출 방식에 대한 회전자 위치 추정 알고리즘 특성



(a) (b)

그림 71. 역기전압 검출 방식 제어 및 전류 측정 방식

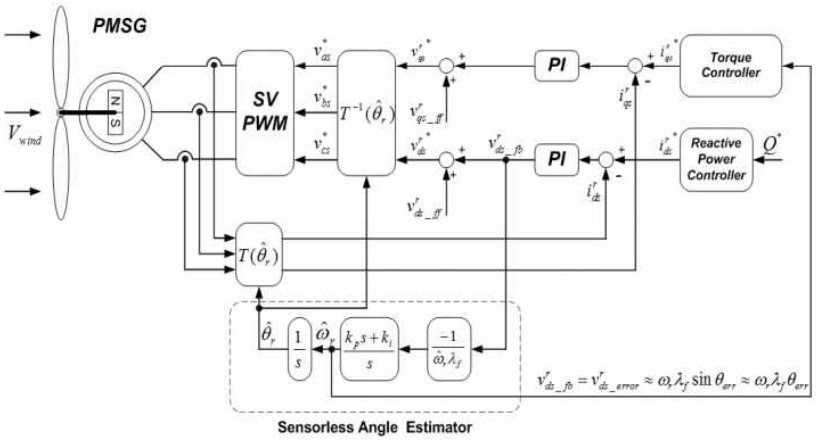
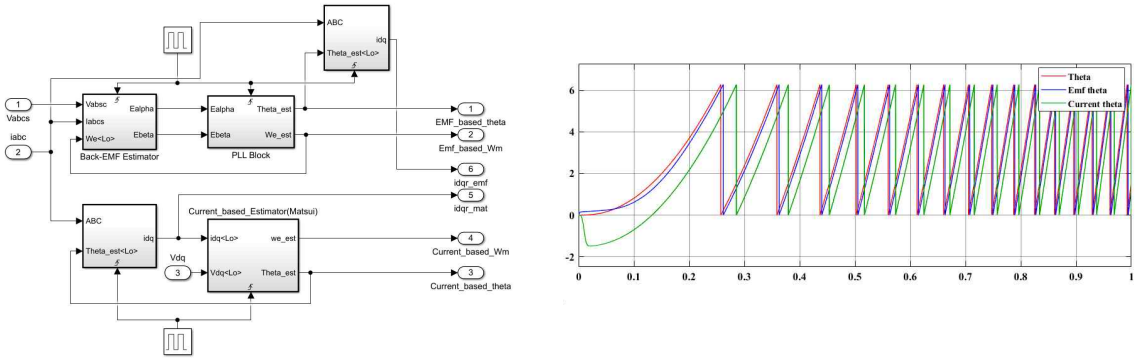


그림 72. 센서리스 벡터제어 제어 블록다이어그램

▹ 센서리스 제어 알고리즘 구현 및 시뮬레이션

- 전류 검출방식 및 역기전력 검출 방식을 통한 알고리즘 구축 및 시뮬레이션 구현
- 시뮬레이션 결과를 바탕으로 각 센서리스 방법에 대한 보완점 및 개선점 연구



(a) (b)

그림 73. 센서리스 알고리즘 시뮬레이션

▫ 정격 1740rpm의 7.5kW SynRM에 대해 구동 환경에서 인버터 효율 95.94% 측정 진행

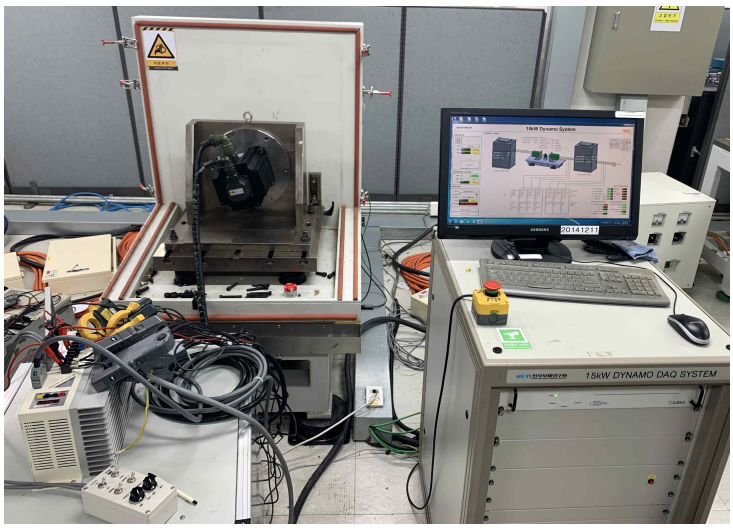


그림 74. 인버터 효율 측정 실험 환경

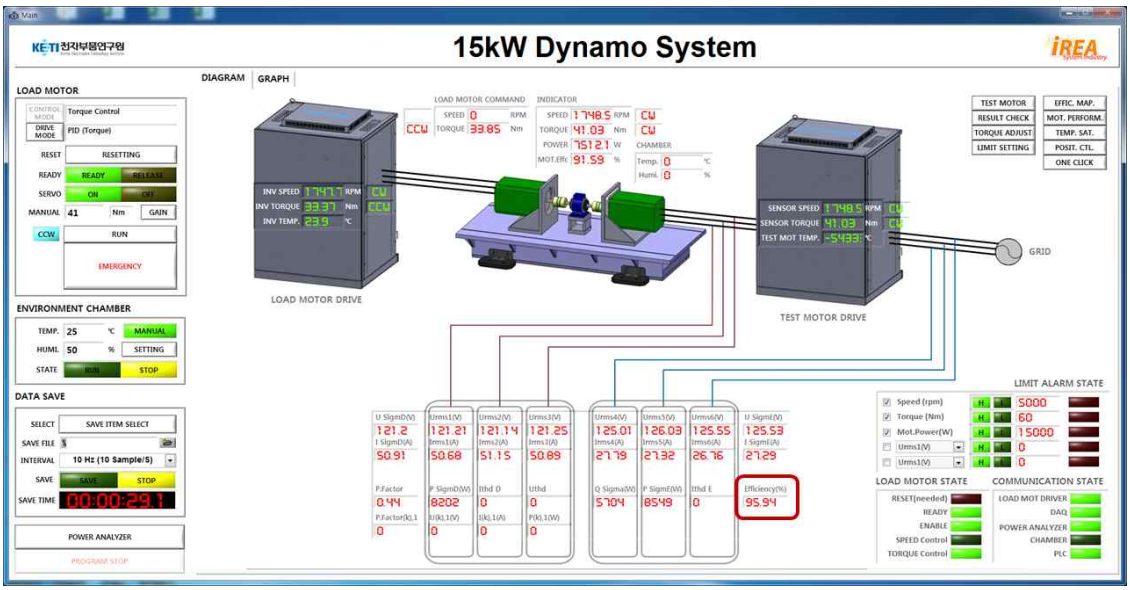


그림 75. 인버터 효율 측정 결과

○ 2차년도 연구 내용

- 7.5kW급 센서리스 제어기 설계 및 제작

  ▹ 모듈형 CPU 보드 설계

▫ 고속 DSP의 범용 CPU 모듈 설계
▫ 성능 시험 및 제어기 단가 절감을 위한 CPU 별 Pin Map 및 기능 호환 설계
▫ 스위칭 노이즈 저감 LPF(Low Pass Filter) 설계

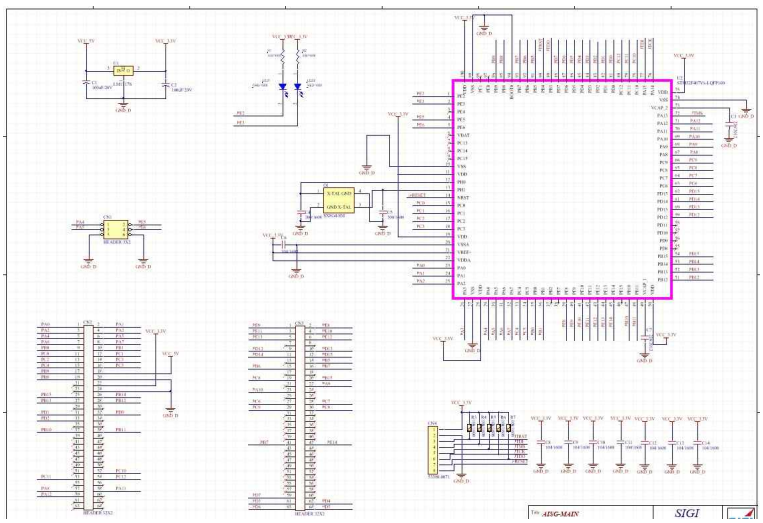


그림 76. STM CPU 모듈 회로도

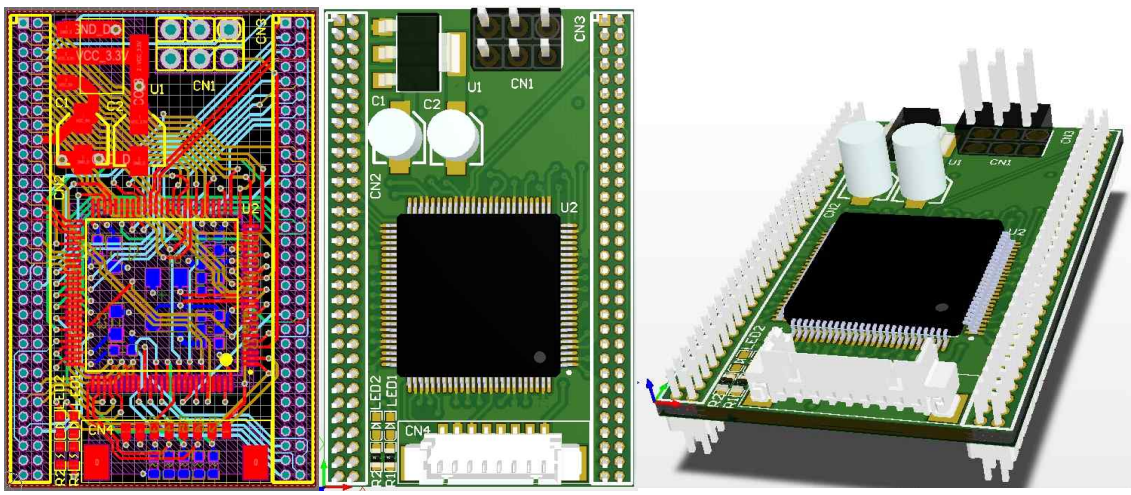


그림 77. STM CPU 모듈 Artwork 파일

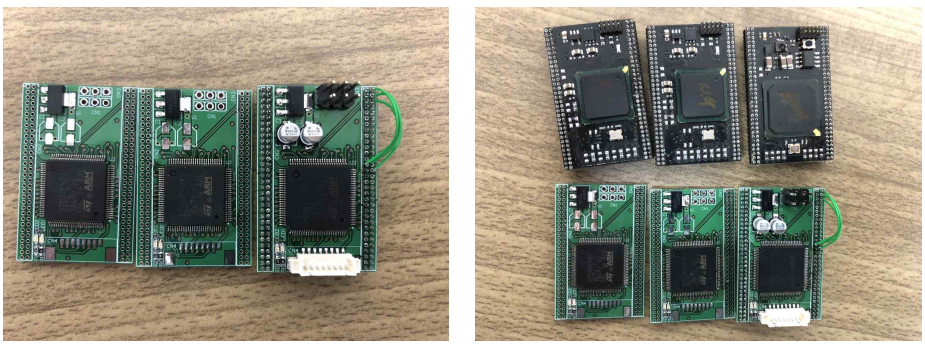


그림 78. CPU 모듈 보드

▹ Back-EMF 검출용 센서리스 보드 설계
▫ 역기전압 검출을 위한 CPU 보드 설계
▫ 전원 분리를 위해 Isolation 전원 및 소자 설계
▫ Encoder 및 Hall Sensor 등의 확장성을 고려한 여러 센서 입력 설계
▫ 모터 및 제어기 보호를 위해 과전류/저전압 등의 Alarm 신호 검출 설계

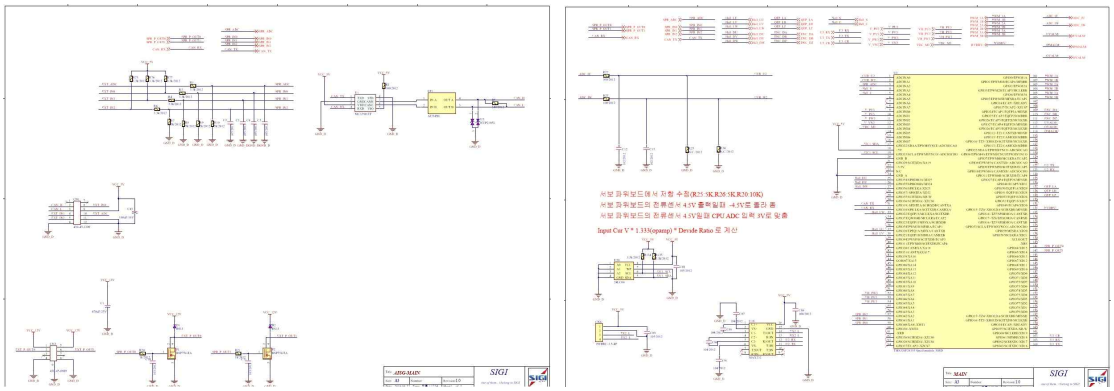


그림 79. CPU 보드 회로도

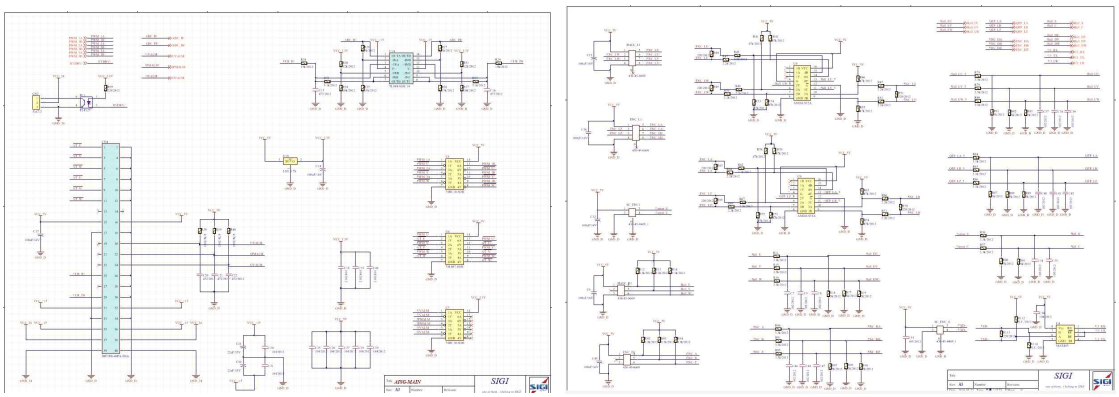


그림 80. Power Board 연결 Connector 회로도

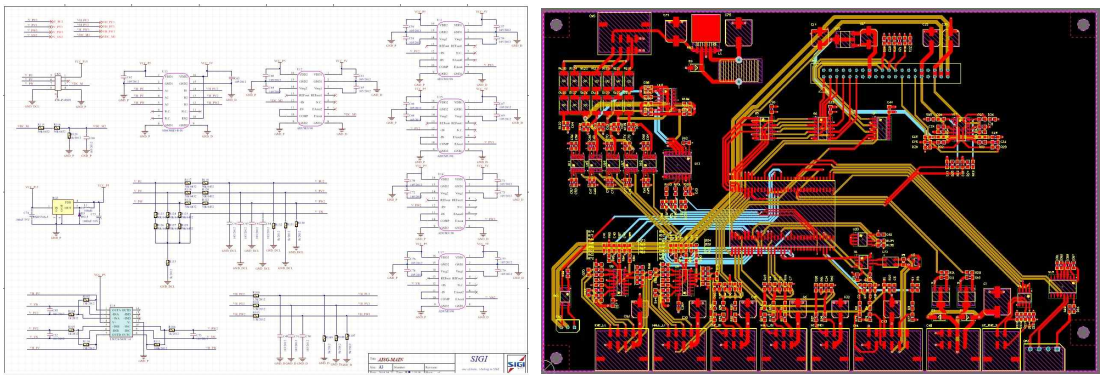


그림 81. 역기전압 검출 회로도 및 Artwork

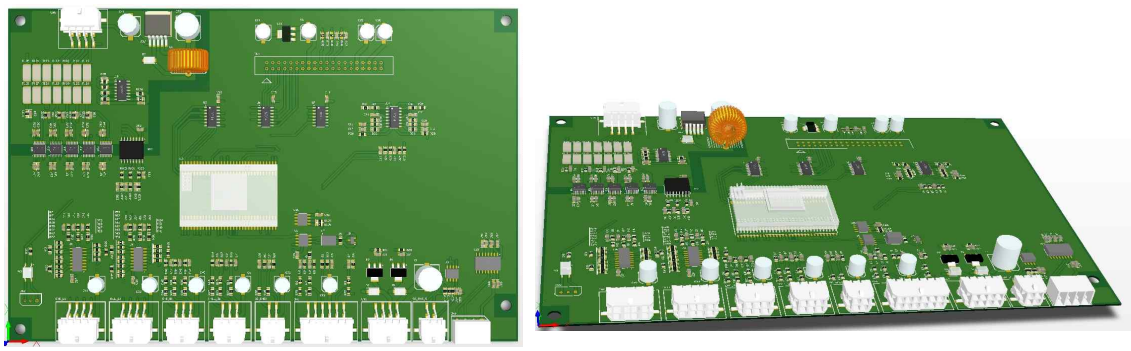


그림 82. CPU 보드의 Layout

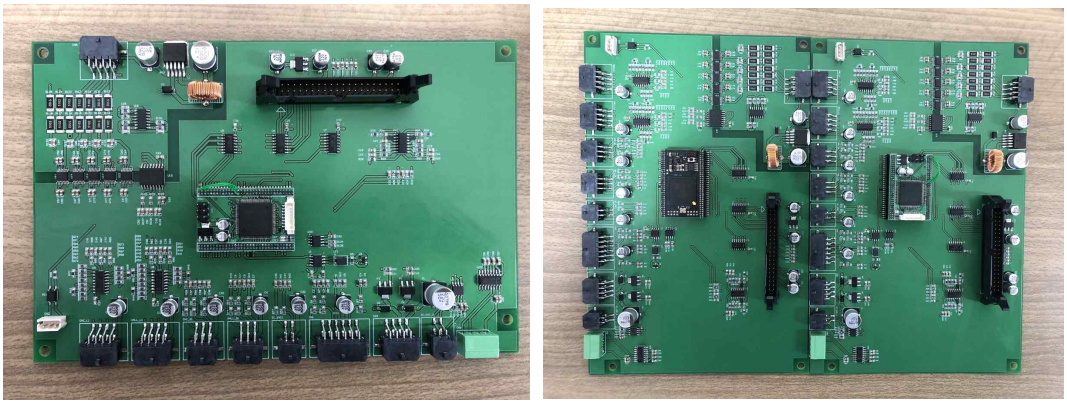


그림 83. CPU 보드

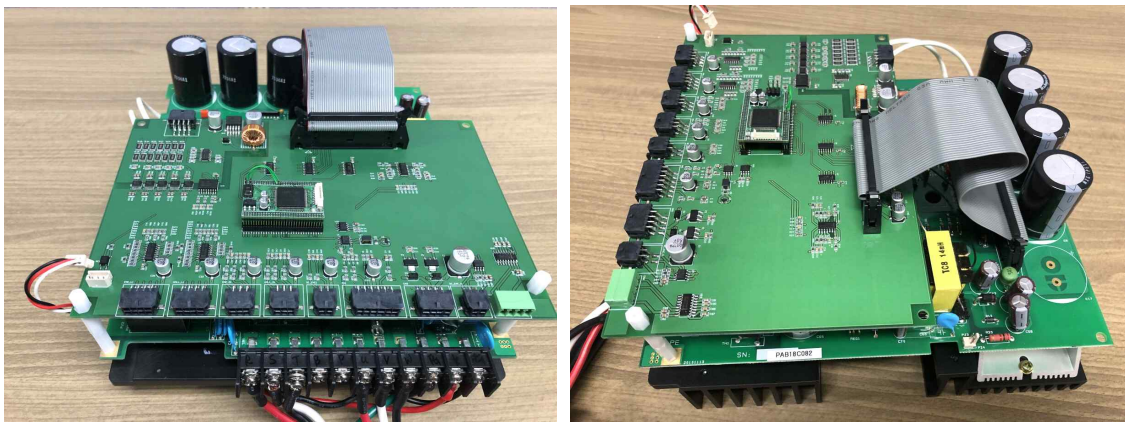


그림 84. 모터 드라이버

▹ 회로 최적화 설계

- 구동 및 양산을 위한 회로 최적화 설계
- 컴팩트한 사이즈 및 생산 단가를 위한 회로 간소화
- 외부 인터페이스 IO 및 엔코더 호환 사용
- 신뢰성을 위한 인증 기준 절연 이격거리 확보 Artwork

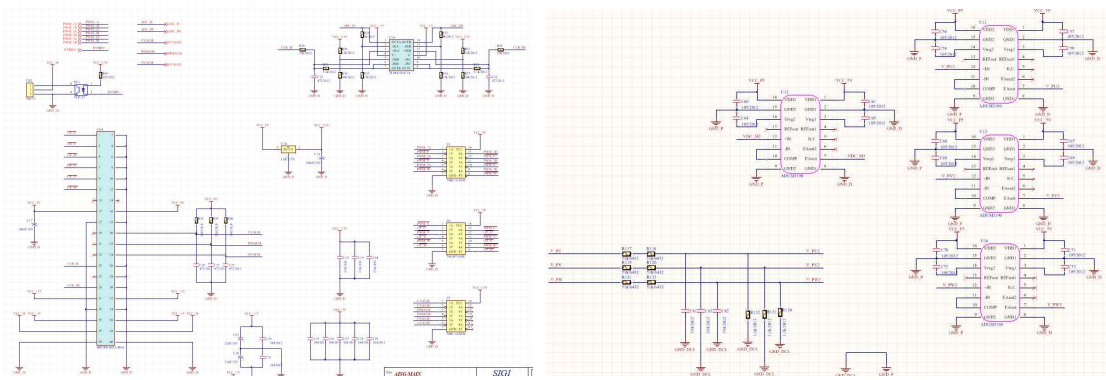


그림 85. 완성형 인버터 CPU 및 ADC 회로도

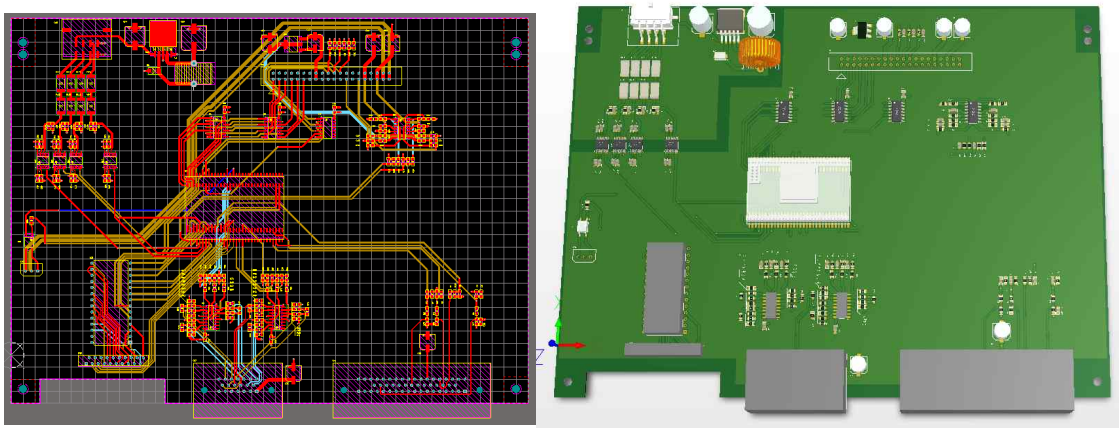


그림 86. 완성형 인버터 Artwork 파일

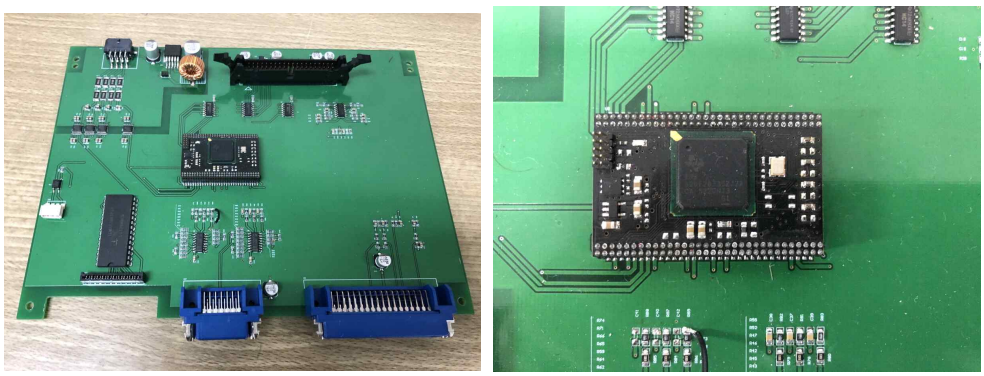


그림 87. 완성형 인버터 제어보드

▹ 파워 보드 및 방열 구조 설계 및 제작
- 완성형 인버터를 위한 파워보드 개발
- 고 용량의 IPM 및 브릿지 다이오드 선정
- 열 특성 시험 결과를 참고하여 방열 구조 설계
- 회생 전압에 대한 회로 및 회생 저항 추가
- 방열 특성 개선을 위한 Heatsink 제작
- 연속 구동 특성 시험을 위한 SMPS FAN 전원 추가 및 FAN 구동
- DC 및 AC 입력전원 시험을 위한 전원 입력 병렬 설계

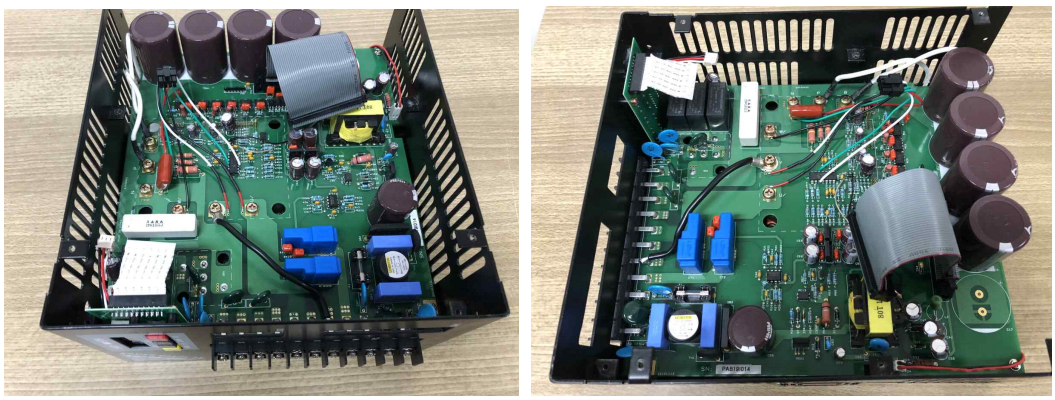


그림 88. 완성형 인버터 파워보드

▹ 인버터 케이스 및 외부 인터페이스 개발
- 방열 특성을 고려한 케이스 설계 및 제작
- 컴팩트한 디자인 및 파라미터 변경을 위한 인터페이스 설계

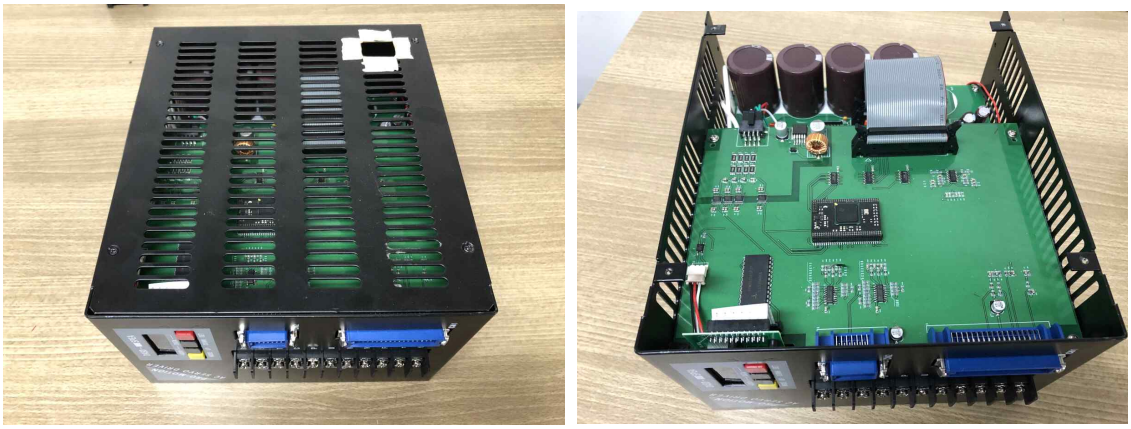


그림 89. 완성형 인버터

– 공조 시스템의 부하 특성에 적합한 센서리스 알고리즘 개발

▹ 압축기 및 팬 부하 특성에 대한 센서리스 구동

▫ 역기전력 BEMF 신호 샘플링을 위한 가상 중성점(Virtual Neutral Point) 재구성 알고리즘 개발

▫ 신뢰성 있는 역기전력 검출을 위한 Zero Crossing Point 검출 알고리즘 개발

▫ Majority 함수를 이용한 신호 샘플링

▫ 모터 구동 전압의 변경 및 여자(Commutate)

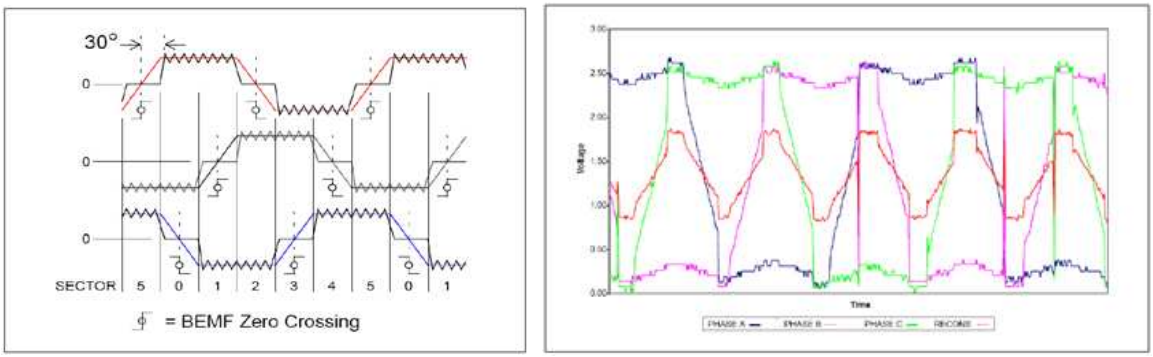


그림 90. 역기전압 검출 방식의 구동 알고리즘

▹ 인버터 전류 및 속도 제어 Loop 설계

▫ 파워 소자의 스위칭 속도를 고려한 PWM 주파수(10KHz)와 동기로 전류 제어 수행(100uS)

▫ d축, q축의 독립적인 PI 제어 수행

▫ 기동 전 전류의 Offset을 계산하여 제어 성능 향상

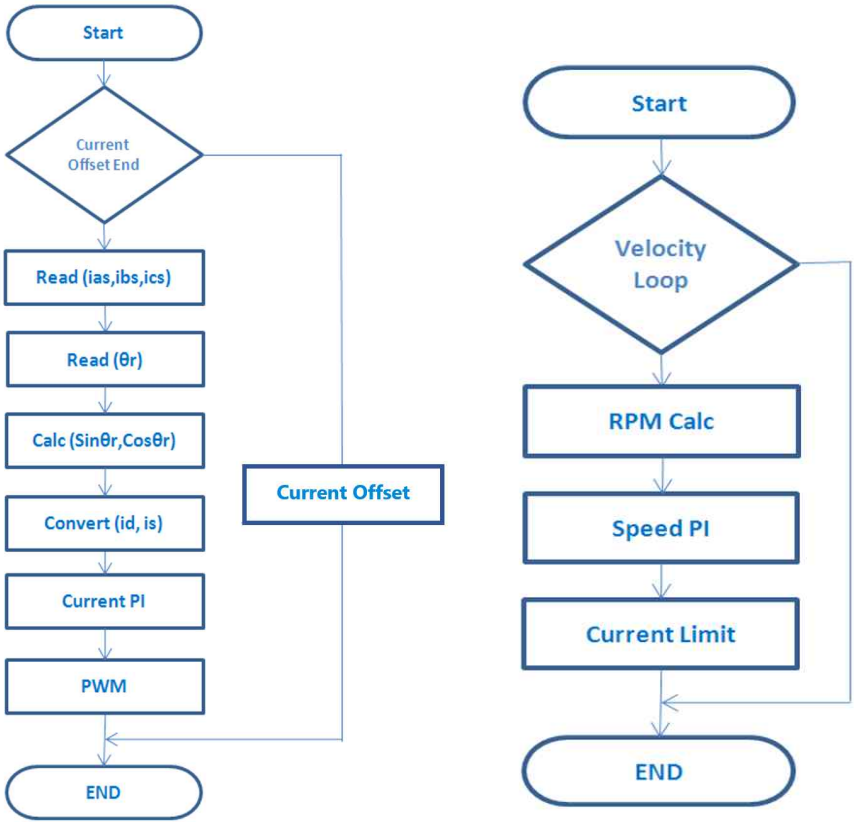


그림 91. 전류, 속도 제어 Loop

▫ Current Loop에서 400uS마다 분기하여 속도 제어
▫ MT Method의 정밀한 RPM 연산

$$RPM = 60\frac{f_c \times m_1}{P_{pr} \times m_2} \tag{11}$$

* fc : T Method Clock
* m2 : T Method Clock Count
* m1 : Encoder Pulse Count
* Ppr : Encoder Pulse

▫ 제어 특성 상 PI 제어기 구현
▫ 전류 제한 기능으로 과전류 시 제어기 보호

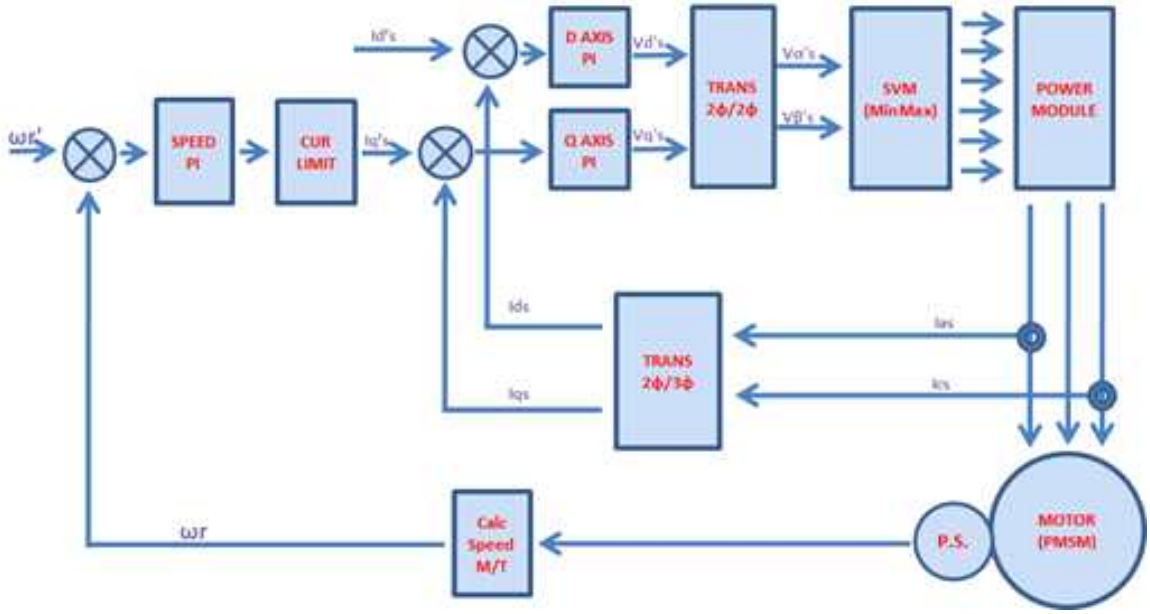


그림 92. 인버터 제어 블록도

▫ 시뮬레이션을 통한 응답 시험

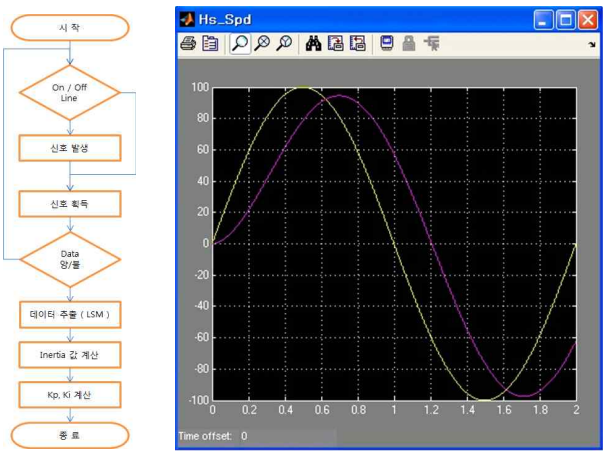


그림 93. 응답 시뮬레이션 결과

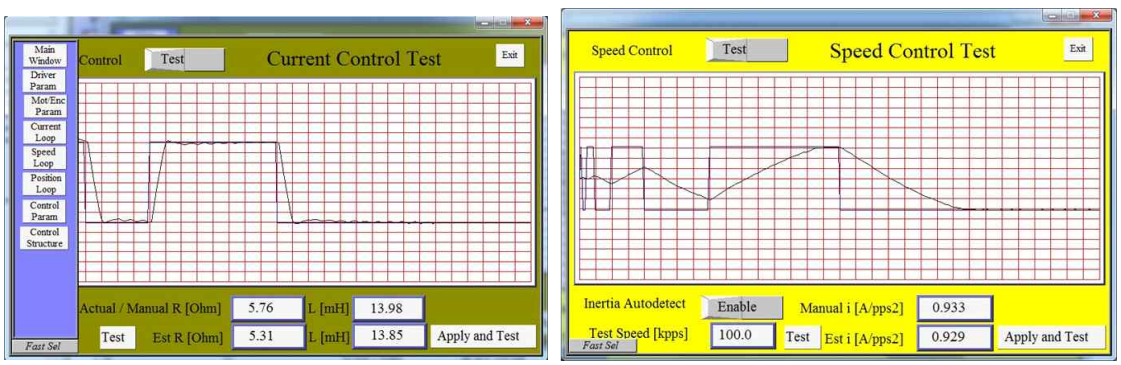


그림 94. 전류제어기 및 속도제어기 응답 시험

▹ 센서리스 기동 시간 및 기동 안정성을 위한 알고리즘 개발

▫ 모터의 파라미터(R,L등)로 역기전력을 계산

▫ 상전압 관계식에서 FLUX 성분을 검출

▫ 역기전력의 d축 전압과 q축 전압을 계산

▫ d축 전압과 q축 전압으로 θ 연산

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \Psi_{PM}\begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -L_q \\ L_d \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_e \Psi_{PM}\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \qquad u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt}$$

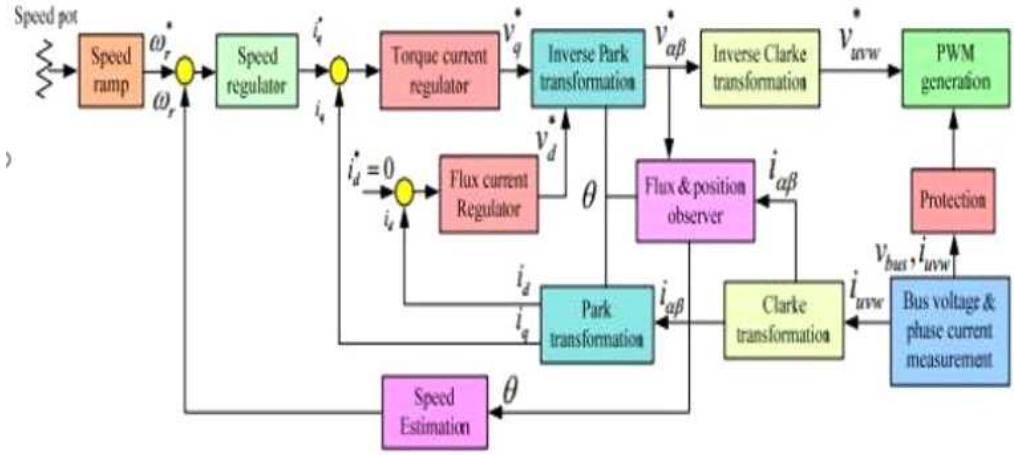


그림 95. 센서리스 벡터제어 블록 다이어그램

▹ 공조 시스템의 부하 특성에 적합한 센서리스 알고리즘 개발

▫ 공조 부하에 대한 특성 파악 및 구동

▫ 최대 효율 운전을 위한 알고리즘 개발

▫ 고효율 운전을 위한 특성 시험

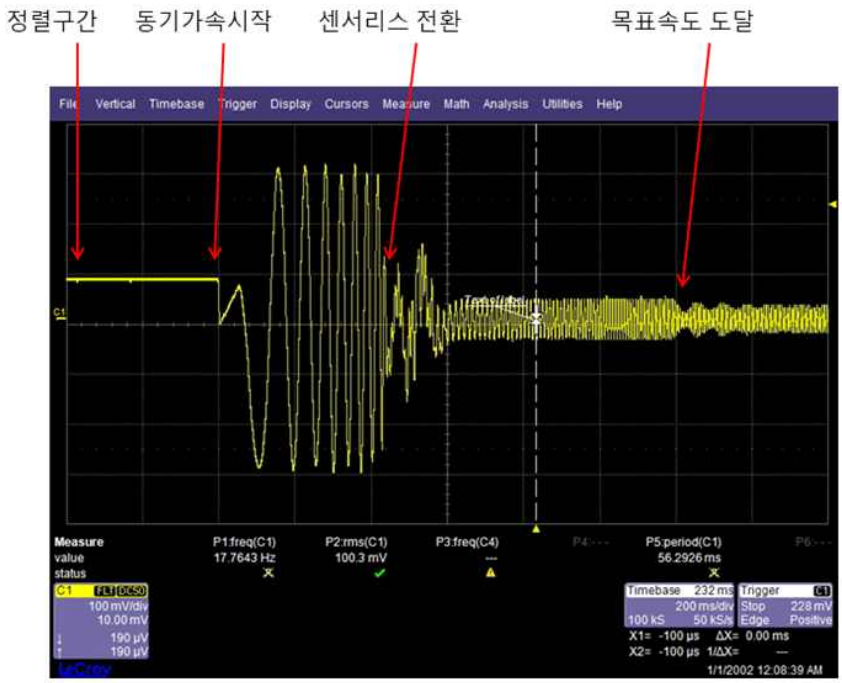


그림 96. 센서리스 기동 파형

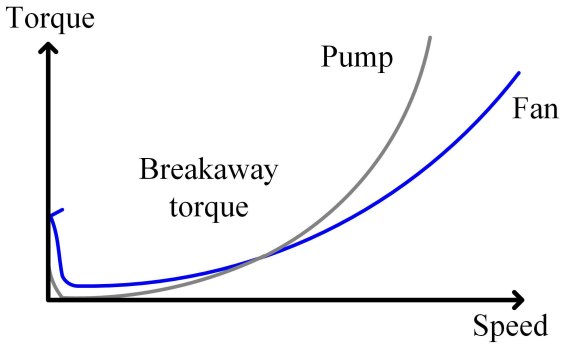


그림 97. 공조 및 팬 부하의 토크 특성

▹ 모터 성능 시험 및 인버터 효율 시험

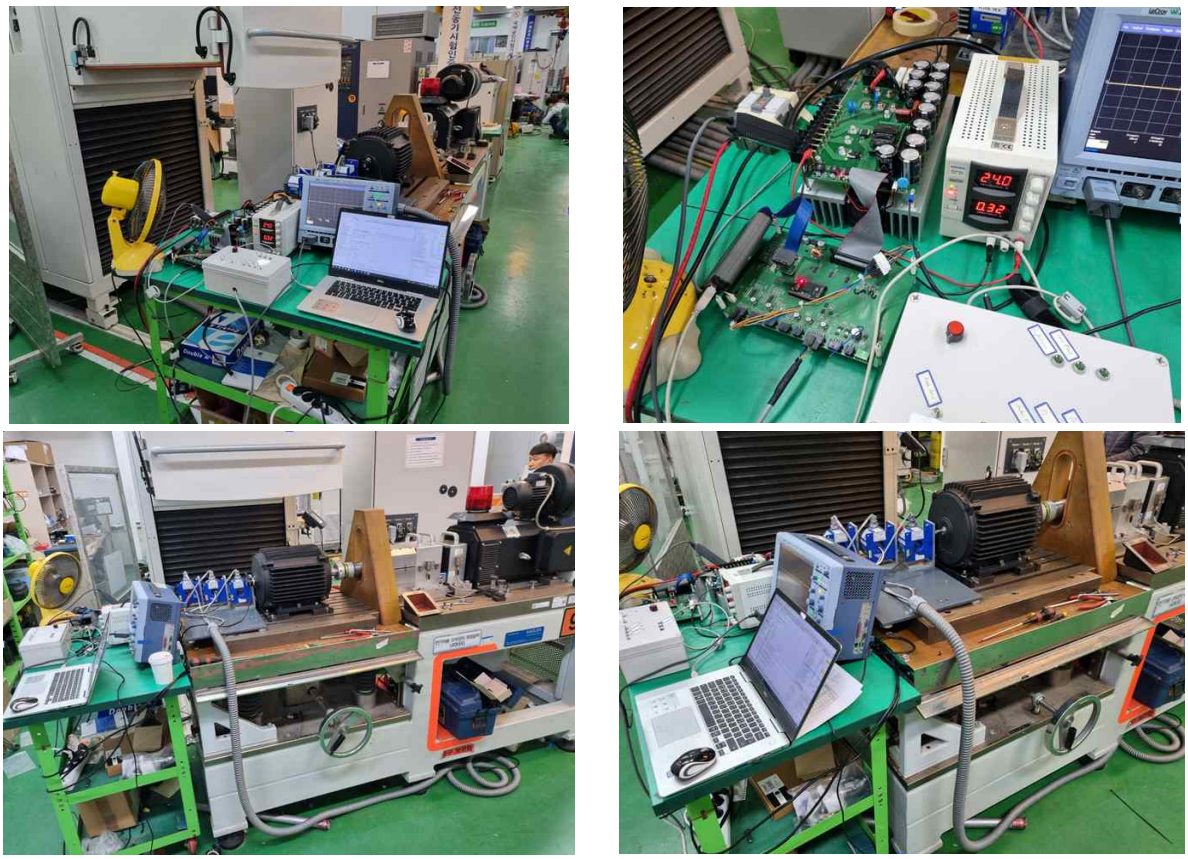


그림 98. 성능 시험 환경 사진

KTC
Korea Testing Certification

시험성적서

성적서 번호 : T2021-12849

회 사 명 : 한양대학교 산학협력단
대 표 자 : 하성규 연락처 : 010-8293-8977
주 소 : 서울특별시 성동구 왕십리로 222 (사근동, 한양대학교내 한양종합기술연구원115호)

1. 시 료 명 : 7.5kW SynRM 센서리스 제어용 인버터
· 규격 및 형식 : AC 380 V, 7.5 kW
2. 성적서의 용도 : 국토교통부 제출용
3. 접수일자 : 2021.11.18
4. 시험일자 : 2021.11.11 - 2021.11.17
5. 시험방법 : 의뢰자 제시 시험방법
6. 시험결과 : (시험결과 참조)

시험자 : 김용호 김용호 승인자 : 최병연 최병연

1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전적 제품에 대한 품질을 보증하지 않습니다.
2. 이 성적서는 우리 시험연구원의 사전 동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서의 진위여부는 홈페이지(www.ktc.re.kr)에서 확인할 수 있습니다.

2021 년 12 월 10 일

한국기계전기전자시험연구원장

한국기계전기전자시험연구원장인

www.ktc.re.kr 15809 경기도 군포시 홍안대로27번길 22
TEL : 1899-7654

서식P708-05(Rev.4) Page : 1 of 4 Code NO : UY6V-KMVJ-KVX3

KTC
Korea Testing Certification

시 험 결 과

성적서 번호 : T2021-12849

1. 시험개요

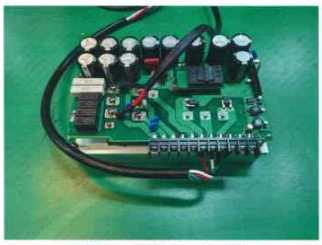
본 시험성적서는 의뢰자가 제시한 시료(7.5kW SynRM 센서리스 제어용 인버터)에 대하여 제어기 효율 시험을 수행한 결과임.

2. 적용 또는 인용규격

의뢰자 제시 시험방법

3. 시료정보

1) 시료명 : 7.5kW SynRM 센서리스 제어용 인버터
2) 시료사양 : AC 380V, 7.5 kW
3) 제조사 : 서보산전
4) 시료사진



<7.5kW SynRM 센서리스 제어용 인버터>

서식P708-06 (Rev.2) Page : 2 of 4 Code NO : UY6V-KMVJ-KVX3

KTC
Korea Testing Certification

시 험 결 과

성적서 번호 : T2021-12849

4. 시험조건 및 방법

시험항목	시험조건 및 방법
효율	- 의뢰자가 제시한 시료(7.5kW SynRM 센서리스 제어용 인버터)를 7.5kW SynRM와 같이 다이나모미터에 설치함. - 시료에 DC 550 V 를 인가함. - 다이나모미터로 회전속도를 증가하여 3500 r/min 으로 구동함. - 제어기로 부하를 증가하여 의뢰자가 제시한 전기적출력(7.6 kW) 지점의 특성을 측정함.

5. 시험 결과

5.1. 효율

구분	회전 속도	토크	기계적 출력	제어기 출력 선간전압	제어기 출력 상전류	전동기 역률	제어기 출력
	[r/min]	[N·m]	[kW]	[V]	[A]	[-]	[kW]
측정치	3 510.2	19.13	7.03	275.96	22.32	0.71	7.59

구분	제어기 입력전압	제어기 입력전류	제어기 입력	제어기 효율
	[V]	[A]	[kW]	[%]
측정치	547.07	14.58	7.97	95.22

서식P708-06 (Rev.2) Page : 3 of 4 Code NO : UY6V-KMVJ-KVX3

KTC
Korea Testing Certification

시 험 결 과

성적서 번호 : T2021-12849

6. 시험사진

<성능 시험 사진>

끝.

서식P708-06 (Rev.2) Page : 4 of 4 Code NO : UY6V-KMVJ-KVX3

그림 99. 7.5kW SynRM 센서리스 제어용 인버터 공인인증 성적서

라. 연구 개발 추진 체계

○ 구성원

연구개발과제	
과제명	가격과 효율 경쟁력을 갖는 철도 역사 공조용 SynRM개발

총 참 여 연 구 원
주관연구책임자 (이주)외 총 19명

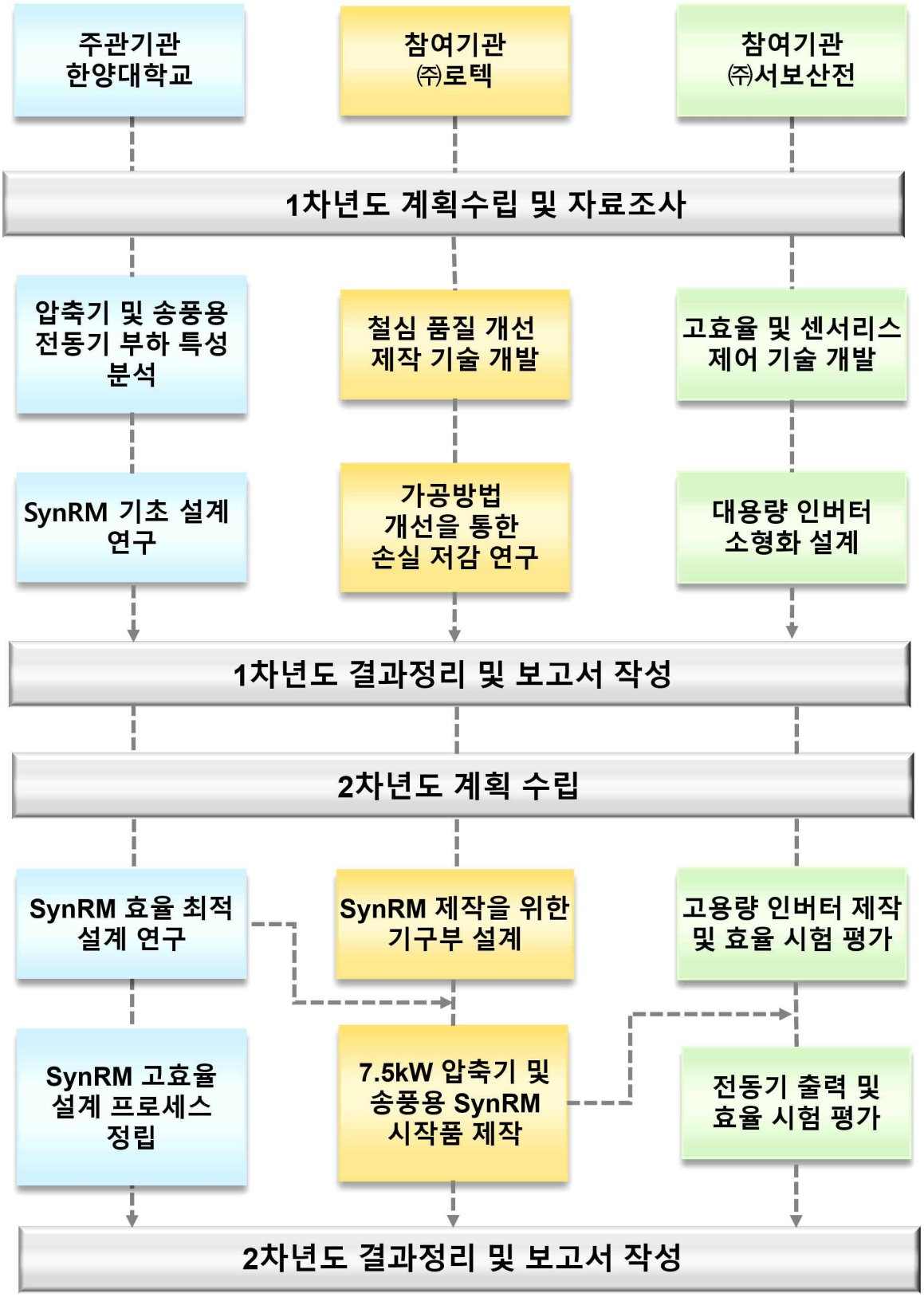
기 관 별 참 여 현 황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
중소기업	2	7
대 학	1	13
기 타	-	-

주관연구기관명
한양대학교 산학협력단
연구책임자명 (이주)외 12명
담당기술개발내용
▪ 고효율 압축기 및 송풍용 SynRM 기초 설계 연구 ▪ SynRM 효율 최적화 설계 기술 개발 ▪ 출력밀도 개선을 통한 SynRM 원가 절감 설계 연구 ▪ TRL 5 수준 이상의 기술 개발

[참여기관] ㈜로텍
기술연구소
연구책임자명 (김호기)외 4명
담당기술개발내용
▪ 고효율 전동기 제작 기술 개발 ▪ 전동기 기구부 설계 ▪ SynRM 시작기 제작

[참여기관] ㈜서보산전
기술연구소
(조유환)외 1 명
담당기술개발내용
▪ 센서리스 제어 알고리즘 개발 ▪ 고효율 전동기 제어 알고리즘 개발 ▪ 고용량 인버터 소형화 설계 ▪ 센서리스 구동 및 시험 평가

마. 1, 2차년도 추진 체계


주관기관
한양대학교
참여기관
㈜로텍
참여기관
㈜서보산전
1차년도 계획수립 및 자료조사
압축기 및 송풍용 전동기 부하 특성 분석
철심 품질 개선 제작 기술 개발
고효율 및 센서리스 제어 기술 개발
SynRM 기초 설계 연구
가공방법 개선을 통한 손실 저감 연구
대용량 인버터 소형화 설계
1차년도 결과정리 및 보고서 작성
2차년도 계획 수립
SynRM 효율 최적 설계 연구
SynRM 제작을 위한 기구부 설계
고용량 인버터 제작 및 효율 시험 평가
SynRM 고효율 설계 프로세스 정립
7.5kW 압축기 및 송풍용 SynRM 시작품 제작
전동기 출력 및 효율 시험 평가
2차년도 결과정리 및 보고서 작성

바. 추진일정

1차년도															
번호	연구내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	계획수립 및 자료조사													각 기관	-
2	고효율 압축기 및 송풍용 전동기 부하 특성 분석													한양대 학교	-
3	SynRM 기초 설계 연구													한양대 학교	-
4	SynRM 제작기술 개발													㈜로텍	-
5	SynRM 냉각구조 및 기구부 설계													㈜로텍	-
6	고용량 인버터의 구조 및 특성 파악													㈜서보 산전	-
7	SynRM 모터의 특성 및 공조 부하 특성 파악													㈜서보 산전	-
8	결과 정리 및 보고서 작성													각 기관	-
2차년도															
1	SynRM 효율 최적 설계 연구													한양대 학교	제작성 보완 및 강성 개선 설계에 따른 설계 기간 증가
2	SynRM 고효율 설계 프로세스 정립													한양대 학교	SynRM 최적설계와 병렬적으로 프로세스 정립 진행
3	전동기 기구부 설계 및 제작공정 보완													㈜로텍	-
4	전동기 시작품 제작													㈜로텍	SynRM 보완 설계에 따른 시작품 제작 일정 변경
5	고용량 인버터 제작 및 기본 구동													㈜서보 산전	-
6	전동기 출력 및 효율 시험 평가													각 기관	시작품 제작 일정 변경에 따른 시험 일정 변경
7	결과 정리 및 보고서 작성													각 기관	-

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

<주관연구기관 (한양대학교)>

○ SynRM의 설계 프로세스 구축
- SynRM의 자기 등가회로 특성 관계 분석과 설계 파라미터 도출 및 간소화를 통한 설계 프로세스 정립
- 산업 현장과 제작 공정을 고려한 요구 사양 분석 및 제약 사항 도출
- 설계 변수별 설계 목적함수에 미치는 영향에 따른 최적 설계 기법 적용

○ 기존 유도전동기 대비 효율 및 가격 경쟁력을 갖는 SynRM 설계
- IE5급 효율을 만족하는 SynRM 설계 및 제작 기술 확보
- 상용중인 유도전동기 및 해외 선진사의 IE5급 SynRM 대비 가격 경쟁력 확보

<공동연구기관1 ((주)로텍)>

○ SynRM 제작공정 및 공정관리 방안 체계화
- 기존 유도전동기 제작공정을 기반으로 차이점을 반영하여 제작공정 구성 완료
- 원주방향 압축력에 약한 구조적 특성을 지니는 회전자 구조를 고려하여 공정관리 방안 도출

○ SynRM 시작품 제작 및 성능평가
- 7.5kW SynRM 2종(공조용/송풍용) 시작품 제작
- 출력특성 및 진동내구시험을 통한 시작품 성능 평가

<공동연구기관2 ((주)서보산전)>

○ 센서리스 구동 알고리즘 개발
- 대용량 모터의 센서리스 기동 특성 및 방법
- SynRM 모터의 센서리스 제어 방법

○ SynRM 모터 구동 특성 및 제어 특성 파악
- SynRM 모터의 전류/속도 제어에 따른 응답 특성
- 각 제어기 별 튜닝 및 튜닝 방법

○ 공조 및 팬 부하에 대한 특성 파악
- 공조 부하의 제어의 특성 및 최대 효율 제어 특성
- 고 응답성의 제어 방법

(2) 정량적 연구개발성과

<주관연구기관 (한양대학교)>

○ 용량별 SynRM 최적 설계 기술
- 공조용 (5.5kW / 7.5kW / 45kW) 및 송풍용 (7.5kW / 30kW / 55kW)의 용량별 효율 최적 설계 완료
- 강성 해석을 통한 기계적 안정성 확보 및 최적 설계 기법을 통한 최적 설계 모델 도출
- 전동기 효율 94% 이상 구현 및 공인인증시험 완료
- 기존 유도전동기 원가 대비 97% 수준의 원가 절감 구현

<공동연구기관1 ((주)로텍)>

○ 7.5kW SynRM 기구적 안정성 검증
- 시료에 가해지는 응력이 통상적인 산업용 전동기 기준보다 3배 이상이 되도록 시험조건 선정하여 진동내구시험 실시

<공동연구기관2 ((주)서보산전)>

○ 7.5KW 급 인버터 개발

- 고 전압용 7.5KW 인버터 개발
- 대 전류 및 고 전압에 구동을 위한 게이트 회로 구현
- 1200V 150A 급 소자 선정 및 하드웨어 구현
- 고압 / 대전류의 인버터 토폴로지 개발

○ 인버터 효율 시험

- 7.5KW 인버터 효율 시험
- 7.5KW 출력에서 인버터 효율 95%이상 구현

< 정량적 연구성과 목표 항목 >

구분			1차년도 목표	1차년도 달성도(%)	2차년도 목표	2차년도 달성도(%)
국외 논문 게재	SCI		1	100	2	100
	비SCI					
	계		1	100	2	100
국내 논문 게재	SCI		1	100	2	100
	비SCI					
	계		1	100	2	100
특허 출원	국내		2	100	2	100
	국외		1	100	1	100
	계		3	100	3	100
특허 등록	국내					
	국외					
	계					
인력 양성	석사		1	100	0	
	박사		1	100	1	100
	계		2	100	1	100
기술 이전	계약 건수					
	계약액					
	징수액					
국제 표준화	기고서 제출					
	기고서 채택					
	표준안 채택					
국내 표준화	기고서 제출					
	기고서 채택					
	표준안 채택					
등록・기탁 대상 성과물	보고서 원문					
	연구시설 · 장비					
	기술요약정보					
	생명자원	생명정보				
		생물자원				
		신품종				
	소프트웨어					
	화학물					
기타	시제품		-	-	4	100
	성과 홍보					
	일자리 창출					

< 정량적 성과 최종 목표 항목 >

성과목표	세계최고수준주) (보유국/ 보유기업)	연구전 국내수준주)	목표치	가중치 (%)	평가기준	달성치
고효율 압축기 및 송풍용 SynRM 효율	92.4% (독일/Siemens)	89.5% (현재 적용 중 유도전동기)	94%	20	공인인증기관을 통한 시작품 시험성적서 발급	100
기구부 안전율	3.0	-	3.0 이상	20	KS B 0802	100
인버터 최대 효율	95% (스위스/ABB)	85	95		공인시험기관 시험평가	100

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	영구자석 동기전동기의 파라미터에 따른 오프라인 Inter-turn 고장진단 특성에 대한 연구	전기학회 논문지	김현우	10	대한민국	대한전기학회	SCI	2020.10.01	1975-8359	100
2	A Study on the Rotor Design of Line Start Synchronous Reluctance Motor for IE4 Efficiency and Improving Power Factor	Energies	Hyunwoo Kim	21	스위스	MDPI	SCI	2020.11.04	1996-1073	50
3	Study on Analysis and Design of Line-Start Synchronous Reluctance Motor Considering Rotor Slot Opening and Bridges	IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	Hyunwoo Kim	2	미국	IEEE	SCI	2021.06.28	0018-9464	50
4	Study on the Design of Six-Phase Surface Inset Permanent Magnet Synchronous Generator and Motor Considering the Power Factor and Torque Ripple	IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	Hyunwoo Kim	2	미국	IEEE	SCI	2021.06.29	0018-9464	50
5	라인 기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계 파라미터에 따른 동기속도 운전특성에 관한 연구	전기학회 논문지	김현우	10	대한민국	대한전기학회	SCI	2021.10.01	1975-8359	100
6	라인 기동식 릴럭턴스 전동기의 동기화 특성에 관한 연구	전기학회 논문지	김현우	1	대한민국	대한전기학회	SCI	2022.01.01	1975-8359	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

※해당사항 없음

□ 기술 요약 정보

※해당사항 없음

□ 보고서 원문

※해당사항 없음

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

※해당사항 없음

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	국내 특허 출원	출력 특성을 고려하여 q축 슬롯 구조를 개선한 라인 기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자	대한민국	한양대학교 산학협력단	2020.11.26	10-2020-0161526				50	활용 예정
2	국내 특허 출원	기계적 강성 및 출력 특성을 고려한 라인 기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자	대한민국	한양대학교 산학협력단	2020.11.26	10-2020-0161525				50	활용 예정
3	국외 특허 출원	출력 특성을 고려하여 q축 슬롯 구조를 개선한 라인 기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자	PCT	한양대학교 산학협력단	2020.12.15	PCT/KR2020/018382				50	활용 예정
4	국내 특허 출원	라인 기동식 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 배리어 구조	대한민국	한양대학교 산학협력단	2021.05.26	10-2021-0067588				50	활용 예정
5	국내 특허 출원	오버행 구조를 포함하는 라인 기동식 동기 릴럭턴스 전동기	대한민국	한양대학교 산학협력단	2021.05.27	10-2021-0068528				100	활용 예정
6	국외 특허 출원	기계적 강성 및 출력 특성을 고려한 라인 기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자	PCT	한양대학교 산학협력단	2021.10.26	PCT/KR2021/015063				100	활용 예정

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1		√									
2		√									
3		√									
4		√									
5		√									
6		√									

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

※해당사항 없음

□ 신기술 지정

※해당사항 없음

□ 기술 및 제품 인증

※해당사항 없음

□ 표준화

※해당사항 없음

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	7.5kW SynRM(공조용)	2021.09.27	㈜로텍	㈜로텍	철도역사 공조용	-	-	-
2	7.5kW SynRM(송풍용)	2021.09.27	㈜로텍	㈜로텍	철도역사 송풍용	-	-	-
3	센서리스 제어용 인버터(공조용)	2021.09.17	㈜서보산전	㈜서보산전	철도역사 공조용	-	-	-
4	센서리스 제어용 인버터(송풍용)	2021.09.17	㈜서보산전	㈜서보산전	철도역사 송풍용	-	-	-

□ 현장적용

※해당사항 없음

□ 기술 실시(이전)

※해당사항 없음

□ 사업화 투자실적

※해당사항 없음

□ 사업화 현황

※해당사항 없음

□ 매출 실적(누적)

※해당사항 없음

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

※해당사항 없음

□ 고용 창출

※해당사항 없음

□ 고용 효과

※해당사항 없음

□ 비용 절감(누적)

※해당사항 없음

□ 경제적 파급 효과

※해당사항 없음

□ 산업 지원(기술지도)

※해당사항 없음

□ 기술 무역

※해당사항 없음

[사회적 성과]

□ 법령 반영

※해당사항 없음

□ 정책활용 내용

※해당사항 없음

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

※해당사항 없음

□ 신진연구자 채용

※해당사항 없음

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
1	기업	2020	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
			√				√		√				
2	연구소	2020	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
				√			√		√				
3	기업	2021	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
			√				√		√				

□ 산업 기술 인력 양성

※해당사항 없음

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

※해당사항 없음

□ 국제화 협력성과

※해당사항 없음

□ 홍보 실적

※해당사항 없음

□ 포상 및 수상 실적

※해당사항 없음

[인프라 성과]

□ 연구시설・장비

※해당사항 없음

2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 공조용 및 송풍용 SynRM의 최적 설계 및 시작품 제작 (전동기 효율 94% 이상 달성) ○ 공조용 및 송풍용 센서리스 인버터 시작품 제작 (인버터 효율 95% 이상 달성)	○ SynRM 전동기 용량별 최적 설계 및 공인인증시험 - 공조용 SynRM (5.5kW / 7.5kW / 45kW) 최적 설계 - 송풍용 SynRM (7.5kW / 30kW / 55kW) 최적 설계 - 설계 검증 및 성능 시험을 위한 공조용 및 송풍용 SynRM의 7.5kW 시작품 제작 - 공조용 및 송풍용 SynRM의 공인인증기관에서의 시작품 시험을 통해 효율 94%이상 달성 확인 및 시험성적서 발급 완료 ○ SynRM 센서리스 인버터 개발 및 공인인증시험 - 센서리스 인버터 개발을 위한 구동회로 및 부하특성 분석 - 최대 효율 운전 알고리즘과 센서리스 구동 알고리즘 개발 및 시뮬레이션 구현 - 성능 검증을 위한 7.5kW급 센서리스 인버터 시작품 제작 - 센서리스 인버터의 공인인증기관에서의 시험 진행 및 인버터 효율 95% 달성에 대한 시험 성적서 발급 완료	*100*

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

※ 해당사항 없음

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 연구개발 성과

- 공조용 및 송풍용 SynRM 최적 설계 및 제작 기술 확보
  - ▹ SynRM의 경우 희토류 자석을 사용하지 않아 부품 수급 안정성과 가격 경쟁력 면에서 영구자석 기기보다 유리하며, 유도전동기와 달리 2차측 손실이 없어 에너지 소비 저감이 가능함
  - ▹ 현재 연구가 미비한 IE5급 SynRM의 최적 설계 기술을 확보하고, 실제 제약 조건을 고려한 시작품 제작을 통해 철도부품 시장에서의 국내 기술 경쟁력을 향상 시킬 수 있음

- SynRM 센서리스 인버터 개발
  - ▹ 모터 용량에 따른 최고 효율 운전을 위해 범용 고용량 인버터의 구조 및 특성을 분석하여 최적화된 하드웨어 구조를 도출하여 기존 시스템에 적용 할 수 있음
  - ▹ 실제 운전시 부하 변동을 반영하여 최대 효율 운전을 위한 제어 알고리즘 도출 및 구현을 통해 전동기 시스템의 성능 개선이 기대됨

○ 연구 성과물의 기대효과

- 기술적 측면
  - ▹ 향후 지하철 역사, 공항 등의 지속적인 환경 개선을 위한 친환경 공조 및 환기 시스템 구축에 필요한 기반 기술 확보
  - ▹ 고효율 SynRM의 설계, 제어 및 제작 기술 간의 연계성을 높여 국내 철도 부품 관련 업체들의 기술 경쟁력 확보
  - ▹ 고효율 전동기가 필요한 철도 외의 가전, 군수 등 주요 산업으로의 유도전동기 대체 비희토류 전동기 설계 기술을 적용시켜 산업용 전동기의 혁신적인 효율 향상 실현
- 경제적·산업적 측면
  - ▹ IE5급 효율을 만족하는 비희토류 전동기 기술 확보를 통해 희토류 자원 의존도 저감 및 에너지·환경 규제 대응 가능
  - ▹ 높은 해외 의존도를 가지는 고효율 전동기 기술의 국산화를 통해 철도 부품의 내수 시장 활성화 완화 및 국가 경쟁력 강화
  - ▹ 지하철 역사의 공조 및 송풍용 전동기를 고효율 SynRM으로 대체할 경우 약 3%의 효율 향상으로 연간 약 37억원 절감 가능
- 사회적 측면
  - ▹ 기존의 낮은 효율을 갖는 공조용 및 송풍용 유도전동기를 대체할 수 있는 고효율 SynRM 개발을 통해 탄소중립 및 온실가스 감축 정책 등에 기여 가능
  - ▹ 노후화된 지하철 역사의 공조 및 환기 시스템에 고효율 SynRM을 적용함으로써 공기질 개선 정책 대응 및 전력 절약으로 친환경 시스템으로의 전환 가능
  - ▹ 산학 공동 개발을 통해 산업친화적인 비희토류 전동기의 설계, 제어 및 제작 기술에 능통한 전동기 전문 인력 양성

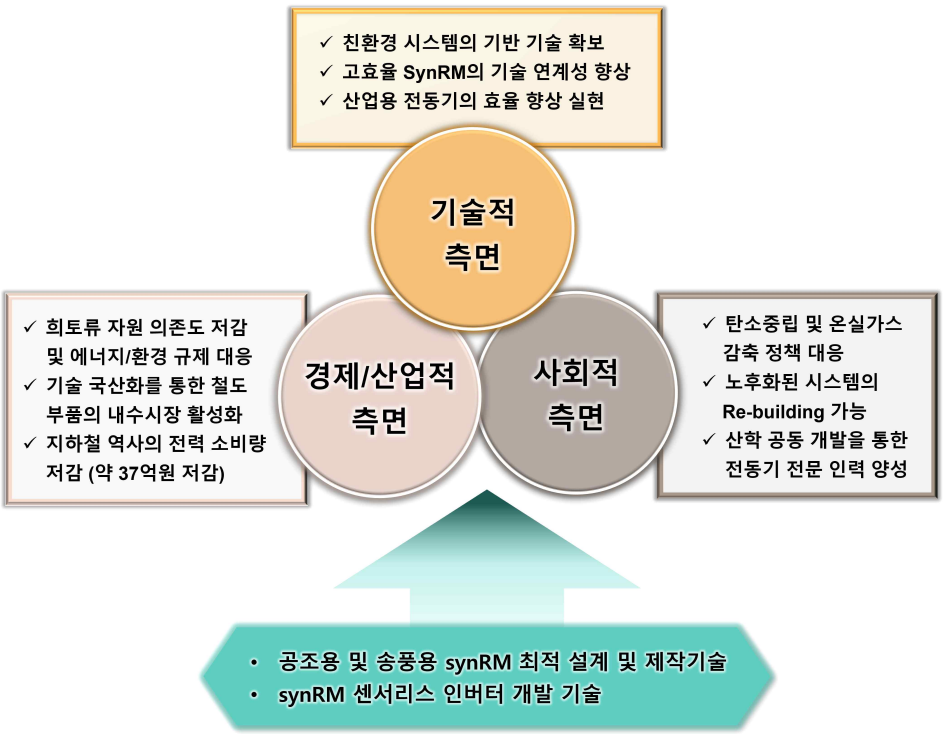


그림 100. 연구개발성과의 기여 효과

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ IE5급 달성 (전동기 효율 94%, 제어기 효율 95%) 및 기존 유도기 대비 유리한 가격 경쟁력 등을 통한 친환경 공조 및 환기 시스템의 기반 기술을 확보함으로써 향후 新교통시스템에 적용할 수 있음

○ 해외 선진사가 독점하고 있는 고효율 전동기 기술을 국내 전동기 및 철도 부품 관련 제작업체 및 수요처로 기술 이전을 진행하여 국외 의존도 저감 가능

○ 공조용 및 송풍용 고효율 SynRM과 센서리스 제어기의 설계 및 제작 기술 확보를 통해 국내 기업 경쟁력 향상

○ 높은 가격 경쟁력을 가지는 고효율 SynRM의 국산화 개발을 통해 고효율 전동기의 글로벌 시장 진출 및 철도 부품 시장의 신수요 창출

○ 지하철 역사 뿐만 아니라 공조 및 환기 시스템이 장시간 가동되는 다양한 산업 분야에 활용하여 에너지 소비 저감 가능

○ 낙후 되어 있는 공조 및 환기 시스템의 인프라 및 환경 유지 비용 개선 가능

○ 고효율 전동기 설계 기술의 지속적인 연구 개발을 통해 전반적인 산업 분야에 적용할 수 있는 다목적 고효율 전동기 설계 및 제작 기술로의 저변 확장

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 '가격과 효율 경쟁력을 갖는 철도 역사 공조용 SynRM개발' 연구개발과제 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

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

ISBN : 978-89-7218-745-5 (93560)