



The Korean Institute of Electrical Engineers

Vol. 72, No. 4, APRIL 2023

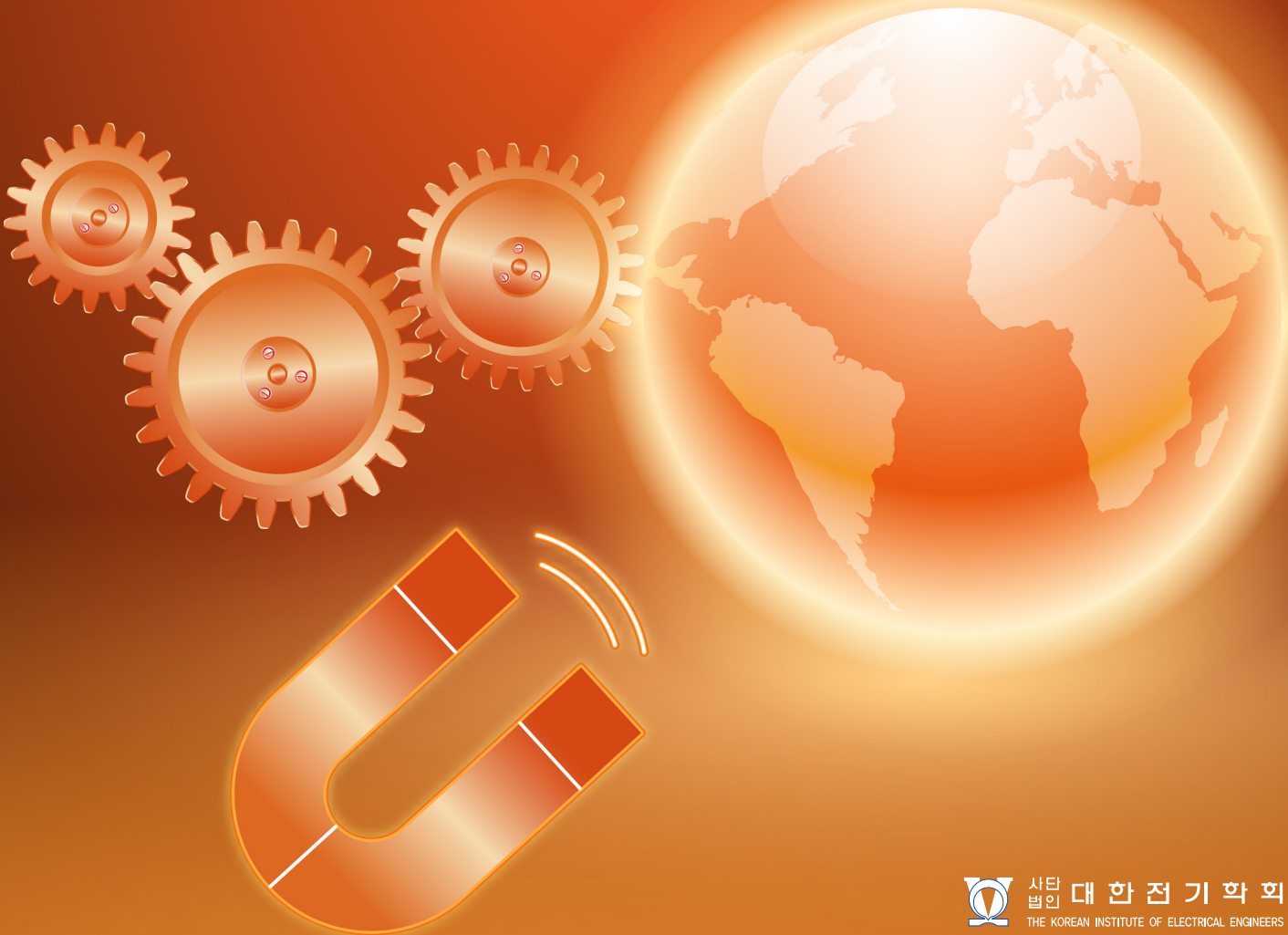
04

전기의 세계

기획 시리즈 비히토류 및 히토류 저감 모터 기술

전기공학랩페이스북 금오공과대학교 전력반도체 연구실 소개

자유 기고문 e-파워트레인 핵심부품 개발플랫폼 체계화 기술 개발 사례 소개



사단법인 대한전기학회
THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS



에너지 신기원을 여는 젊은 발상 대한전기학회



2023 제54회 대한전기학회 하계 학술대회

KIEE
Summer
Conference
2023

7.12(WED) ~ 7.15(SAT)
용평리조트 (강원도 평창군)

산업통상자원부장관상

- 산업통상자원부 표창
- 산업통상자원부 우수논문상

논문신청

■ 논문제목 접수

- 접수 마감 : 2023년 4월 24일(월)
- 학술대회 홈페이지(<http://conf.kiee.or.kr>)에서 접수

■ 논문(원문) 접수

- 논문(원문) 접수 마감 : 2023년 5월 22일(월)
- 학술대회 홈페이지(<http://conf.kiee.or.kr>)에서 접수

사전등록 신청

- 사전등록 : 2023년 5월 26일(금)까지

문의처

대한전기학회 사무국 학술팀

- 전 화 : (02)553-0156
- 이메일 : electran@kiee.or.kr
- 홈페이지 : <http://conf.kiee.or.kr>



주최 대한전기학회

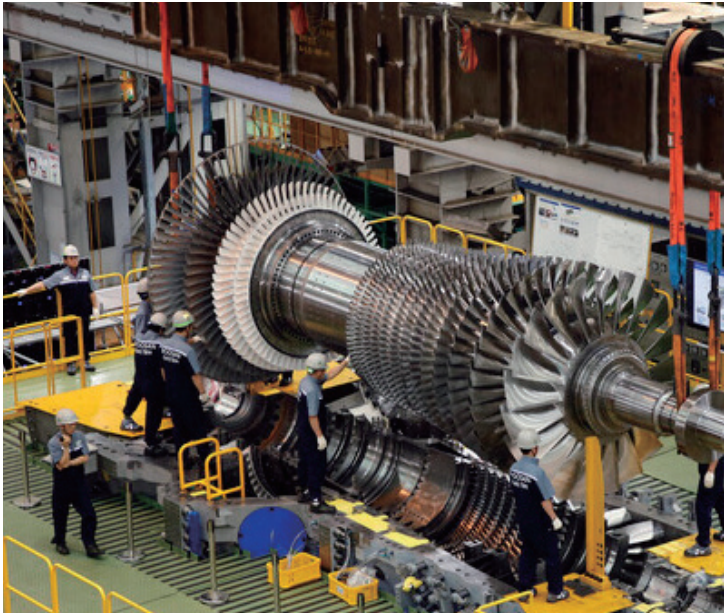
후원 한국과학기술단체총연합회 강원도관광재단 평창군 한국전력공사 한국전기공사협회 대한전기협회 한국전기안전공사

한국수자원공사 한국토지주택공사 한국수력원자력주 전력거래소 한국에너지 한국남부발전주 한국동서발전주 한국중부발전주

CONTENTS

The Korean Institute of Electrical Engineers

전기계뉴스



한전, 올해 배전 설비 보강에 7300억원 투입 | 2

한전KDN, 안산 수소시험도시 참여로 에너지ICT 사업 박차 | 3

서부발전, 국산화 가스터빈 최초 점화 | 3

기획시리즈 - 비히토류 및 히토류 저감 모터 기술

비히토류 매입형 영구자석 동기 모터의 다층 회전자 설계 기술 | 6

영구자석형 동기 전동기의 히토류 저감 기술에 관한 고찰 | 14

비히토류 및 히토류 저감 영구자석 전동기 연구 동향 | 21

전기공학랩페이스북

금오공과대학교 전력반도체 연구실 소개 | 28

자유기고문

e-파워트레인 핵심부품 개발플랫폼 체계화 기술 개발사례 소개 | 32

학회 소식

학회일지 | 38

회원 가입 안내 | 40

전기의 세계

KIEE Magazine

Vol. 72, No. 4, April 2023

발행일 2023년 4월 1일
발행인 이건영
편집인 허 진
발행처 사단법인 대한전기학회
(06130) 서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22
과학기술회관 1관 901호
Tel 02-553-0151 Fax 02-566-9957
http://www.kiee.or.kr

학회 본부 임원

회장 이건영
차기회장 이병준
부회장 노대석 이준호 장용무 김태균 유상석 박종배
이우철 김용상 이정환 최상열 손진근
협동부회장 박경중 신운용 안승원 오호진 원영진
이천구 장창익 최중수
감사 김정태 윤재영
총무이사 이방욱 한기선
재무이사 김규호 김슬기
기획·정책이사 송화창 김정수 정호성 박정욱
편집이사 장길수 남순열 허 진
학술이사 정성용 우정욱 윤성욱 주성관
회원·교육이사 이병국 김원희 배성우 이수연 이수형 조현중
사업이사 지명식 김석주 배재윤 손성용 송세현
차한주 최승연
산학협동이사 김경호 강홍성 기유경 김재호 김중남
남익석 박훈양 유홍국 윤순일 이기환
임철교 정재용 최옥만
국제이사 강승택 이교범 허 건
홍보이사 차준민 김홍섭 문종필 신상수 유희덕 이상복

부문회 회장

A부문 회장 박종배 B부문 회장 이우철
C부문 회장 김용상 D부문 회장 이정환
E부문 회장 최상열

전임 편집인

2016년 이병국 2017년~2018년 정인성
2019년~2021년 강승택 2022년~2023년 허 진

온라인

수협은행 1010-2175-5210(대한전기학회)
국민은행 349401-04-009338(대한전기학회)
지로번호 7510483

편집·디자인 드림기획 031-705-3812
인쇄 드림기획 031-705-3812

표지 2 2023 대한전기학회 하계학술대회
표지 3 알트소프트 표지 4 지화기술단

학회 사무국 직원별 담당 연락처(☎ 02-553-0151~7)

사무국장

김정훈 : 업무총괄, 하계학술대회, D부문회, 산업전기응용부회
electran@kiee.or.kr ☎ 0156

경영지원팀

팀장 이상필 : 총무, C부문회
elecproc@kiee.or.kr ☎ 0152

팀원 서영은 : 회원관리, 교육사업, 본부산하 연구회·위원회
account@kiee.or.kr ☎ 0155

팀원 최순례 : 재무회계, 정보화
member@kiee.or.kr ☎ 0154

편집팀

팀장 송호석 : 국문논문, 국문논문P, E부문회
elecjour@kiee.or.kr ☎ 0153

팀원 전필준 : 학회지, A부문회, 연구용역
jun@kiee.or.kr ☎ 0157

팀원 박소희 : 영문논문(JEET), B부문회, 국제, 여성과학기술위원회
jeet@kiee.or.kr ☎ 0151

전기계 뉴스



한전, 올해 배전 설비 보강에 7300억원 투입
설비 안전성·시민재해 예방성 제고...전년비 7.2% 예산 증액
전주·지중설비 보강, 특고압 전선 가공케이블 교체 등 지속 추진



한국전력 나주본사전경

한국전력이 산업재해 예방과 함께 설비 안전성 강화를 위해 올해 배전 설비 보강에 예산 7300억원을 투입한다. 중대재해처벌법 시행 후 안전이 화두로 떠오른 만큼 안전사고를 사전에 차단하고, 배전선로 노후화를 개선하기 위한 중장기 리노베이션(renovation)도 진행한다.

지난 13일 한전 배전운영처에 따르면 올해 국민 안전과 밀접한 배전설비 보강에 7300억원의 예산을 편성했다.

이는 전년 대비 7.2% 증액한 자본 예산으로 설비 안전성과 시민 재해 예방의 중요성이 함께 부각되고 있는 만큼 배전설비 안전관리에 집중한다는 뜻으로 풀이된다.

먼저 전주의 넘어짐 사고를 예방하기 위해 전국 1000만기가 넘는 전주에 대해 불량개소 점검 및 내부진단을 통해 보강을 시행한다.

특히 연약지반의 전주와 장기사용 전주 등에 대한 보강에 집중한다. 특고압 전선의 안전성 강화를 위해 전선 광학진단을 새롭게 도입, 저압 전선의 경우 수목 가지와의 접촉 개소를 중점 점검해 정비할 계획이다. 이렇듯 가공설비 보강사업에는 총 4900억원을 투입해 안전성을 강화한다.

전력구 화재와 상습 침수지역 내 감전사고 등 지중설비 사고 예방을 위해 비난연 케이블을 난연 케이블로 교체하고, 케이블 접속함을 설치하는 등 화재사고를 적극 예방한다. 이를 위해 지중선로 VLF진단·보강 및 저압설비 누전점검·보강 등 지중설비 보강에 예산 1200억원을 투입한다.

이 밖에 도로공사, 통행불편, 구내활용 등에 앞서 배전설비가 적기에 이설되도록 전년 대비 11% 증액한 지장이설 예산 4700억원을 투입할 방침이다.

한전은 자연재해 피해를 줄일 수 있도록 노후화된 배전선로 리노베이션도 진행한다.

최근 기후변화에 따른 산불 발생빈도가 증가하는 추세이므로 건조·강풍 다발지역의 전력설비 화재 예방을 위해 산악지 경과, 인근 선로의 특고압 전선을 절연성능이 우수한 특고압 가공케이블(AITC)로 교체하는 사업을 진행 중이다.

정전 발생을 최소화하고, 설비운영 신뢰성을 한층 강화하기 위해 오는 2026년까지 산악지역 296km 길이의 전선을 케이블로 교체한다는 복안이다.

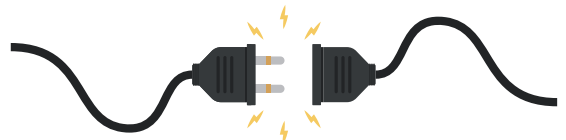
한전은 노후설비 보강을 위해 배전설비의 상태판정 건전도 평가 기준 개선을 통해 설비 관리 신뢰도 제고를 추진한다. 주상변압기는 부하율을 고려한 수명손실률을 추가 반영하고, 지상변압기의 경우 절연성능이 저하되면서 발생하는 퓨란 측정농도 값에 따라 변압기 수명을 예측하는 기술을 도입해 설비보강에 나선다.

또한 콘크리트 전주의 부러짐 사고 예방을 위해 단계적으로 취약지역에 대한 특별점검 및 보강을 지속한다. 해안가 등 연약지반, 20년 이상 사용한 저압전주, 차량 진출입 부딪힘 우려 전주에 대해 2024년까지 보강할 예정이다.

또한 강풍지역에 운영 중인 기자재 고장 예방을 위해 강풍에 의해 전선이 탈락되지 않도록 구조개선, 신자재 개발 등을 지속 추진하고 있다.

이 밖에도 지중 배전설비 침수 시 계통 차단 등 안전한 설비 운영방안과 침수 후 유지보수를 위한 기준 마련을 위해 연구를 진행하고 있다.

국토지리정보원 등 침수정보를 활용해 지역·선로별 지중설비 상습 침수지역에 대한 맵(Map)을 구축하고, 대규모 침수피해 대응을 위해 안전성 기반 시공기준 및 유지보수 방안 등을 마련할 계획이다.



전기계 뉴스

한전KDN, 안산 수소시범도시 참여로 에너지ICT 사업 박차 전주 완주 이어 안산서도 수소시범도시 통합운영센터 구축 안전한 수소도시 구축, 에너지ICT 특화 솔루션 제공 기대



한전KDN이 수소시범도시 통합관리센터 구축 관련 회의를 진행하고 있다.(제공=한전KDN)

한전KDN(사장 김장현)이 안산도시개발에서 발주한 안산 수소 시범도시 통합운영센터 구축사업자로 선정됐다고 10일 밝혔다.

한전KDN은 지난해 전주 완주에 이어 안산 수소시범도시 통합 운영센터 구축업무를 수행하고 있다.

수소시범도시는 수소경제 활성화를 위해 국토교통부 주관하에 시행되고 있는 사업으로 울산광역시, 안산시, 전주 완주 등 3개 지자체가 시범도시로 지정돼 현재 수소도시로 조성 중이다.

한전KDN이 구축하고 있는 통합운영센터는 수소의 생산에서 소비까지 수소도시의 안전성 제고와 효율적 운영을 지원하는 수소 도시 콘트롤타워로, 주요 수소 인프라(수소생산, 저장 및 공급, 활용 관련 시스템)의 전주기 운영 및 안전 정보를 실시간으로 수집

분석 관리해 빅데이터 기반의 도시 에너지 예측 운영이 가능하도록 돕는다.

특히 한전KDN 전력계통 전 과정(발전-급전-송변전-배전-판매)에 걸친 ICT서비스를 통해 쌓아온 에너지플랫폼 기술을 수소에 접목해 수소의 생산, 이동, 전력, 기상 현황 등 정보 가용성을 높이고, 디지털 트윈 및 GIS기반 수소 인프라와 배관 정보를 가시화해 통합자산관리 서비스를 제공한다는 것이 특징이다.

한전KDN은 안산 수소도시 인근의 수전해(시화호) 시스템과 연계해 타 수소 도시와 차별화된 서비스를 제공하고, 수소 생태계 활성화에 필수적인 다양한 부가서비스로 국민에게 신뢰받는 에너지 자원으로의 수소가 될 것으로 기대하고 있다.

한전KDN은 자사의 에너지ICT 기술을 집약해 자체 개발한 수소 에너지 특화솔루션(K-H2EMS Cloud)은 하이브리드 클라우드 플랫폼과 접목해 보안성이 우수하면서도 개방적인 시스템을 제공하고, 향후 수소도시 간 상호 운영성을 강화, 정부 차원의 다양한 디지털기반 대국민 서비스가 가능할 수 있다고 전했다.

한전KDN 관계자는 “전주 완주 및 안산 수소시범도시 통합안전 운영센터의 성공적 구축과 실증 과정에서 습득한 경험을 통해 안정적인 수소도시 운영과 에너지 융합 관리에 집중하고 있다”며 “미래를 준비하는 수소시범도시 구축에 기여하고 급변하는 국제 에너지 변화에 적극 대응할 수 있는 에너지ICT 전문기업의 역할에 최선을 다 할 것”이라고 말했다.

서부발전, 국산화 가스터빈 최초 점화 세계 5번째 가스터빈 기술 보유국 위한 밑거름 다져

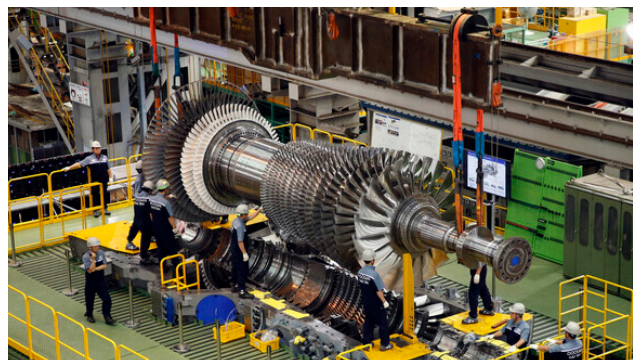
서부발전이 국내 최초로 국산화된 발전용 가스터빈 점화에 성공했다. 실증운전이 끝나면 한국은 세계에서 다섯 번째로 발전용 가스터빈 기술을 확보한 나라가 된다.

6일 한국서부발전(사장 박형덕)에 따르면 김포열병합발전소에 설치된 한국형 가스터빈이 최근 최초로 점화됐다.

270MW급 한국형 가스터빈은 지난해 4월 서부발전이 건설 중인 김포열병합발전소에 안착된 이후 정밀 시공과 각종 시험을 거쳤다.

한국형 가스터빈 최초점화는 순수 국내기술로 제작된 가스터빈의 안전성을 확인하고 한국형 가스복합발전의 실증 기반을 구축했다는 점에서 의미가 크다는 게 서부발전 측의 설명이다.

서부발전은 최초점화 이후 종합 시운전을 거쳐 오는 7월 상업운전에 들어가 2025년까지 실증운전을 시행할 계획이다. 실증운전이 성공적으로 완료되면 우리나라는 미국, 일본, 독일, 이탈리아에



김포열병합발전소에 설치된 국산 발전용 가스터빈 실물.(제공=서부발전)

이어 세계 다섯 번째로 대형 발전용 가스터빈 설계·제작·운영 기술을 보유한 국가가 된다.

서부발전 관계자는 “차질 없는 실증운전으로 가스터빈 국산화에 성공하고 안정적인 발전소 운영을 통해 국가 전력공급과 지역사회 열공급에 책임을 다하겠다”고 말했다.



기획시리즈

비히토류 및 히토류 저감 모터 기술

비히토류 매입형 영구자석 동기 모터의 다층 회전자 설계 기술

영구자석형 동기 전동기의 히토류 저감 기술에 관한 고찰

비히토류 및 히토류 저감 영구자석 전동기 연구 동향

비희토류 및 희토류 저감 모터 기술



담당 편집위원

이기덕 책임연구원

한국전자기술연구원
지능메카트로닉스연구센터



대한전기학회 회원 그리고 독자 여러분 안녕하십니까, 저는 한국전자기술연구원 지능메카트로닉스연구센터에서 모터/발전기/변압기 등 전기기기 관련 연구를 하고 있는 이기덕입니다.

자동차가 내연기관에서 전기차로 변화하면서 모터 산업에도 많은 변화가 있었습니다. 기존에는 모터의 고효율, 고정밀 관련 기술 개발이 주를 이루었으나 2010년도 전후로 전기차 구동모터를 개발하면서 고효율, 고내구 기술에 대한 많은 연구가 수행됨에 따라 전기차용 구동모터 기술이 상용화 수준으로 발전하였습니다. 전기차용 구동모터의 고효율화를 위해 대부분이 영구자석 모터를 적용하고 있고 높은 에너지밀도를 갖는 네오디뮴 마그넷을 적용하고 있습니다. 네오디뮴 마그넷의 주 재료인 네오디뮴과 디스프로슘은 희토류 계열로 전량 수입이며, 전체의 90% 이상을 중국에 의존하고 있습니다. 중국은 희토류 등 자원 무기화 정책에 대한 일환으로 21년도 12월 세계 최대 규모의 희토류 국영기업을 출범하였고 이후 희토류 가격의 상승 및 변동폭이 확대되었습니다. 네오디뮴 마그넷은 전기차용 구동모터뿐만 아니라 도심 항공 모빌리티(UAM), 서보모터 등 다양한 모터의 주요 재료로 사용되고 있어 국내외에서 비희토류 및 희토류 저감 모터에 대한 관심과 다양한 연구가 수행하고 있습니다. 이

번 기획시리즈는 국내에서 비희토류 및 희토류 저감 모터 관련 연구를 수행 중이신 세분의 교수님께서 준비해주신 소중한 기술동향 원고로 구성하였습니다.

첫 번째 원고인 “비희토류 매입형 영구자석 동기 모터의 다층 회전자 설계 기술”은 비희토류 원소인 Ferrite 영구자석을 이용한 다층 IPMSM의 회전자를 설계하는 방법을 소개하고 있습니다. 두 번째 원고인 “영구자석형 동기 전동기의 희토류 저감 기술에 관한 고찰”은 희토류 원소를 저감하기 위한 영구자석의 다양한 기술과 이를 기반으로 한 모터 설계 기술에 대하여 소개하고 있습니다. 마지막 원고인 “비희토류 및 희토류 저감 영구자석 전동기 연구 동향”은 중희토류 배제 영구자석 활용 전동기, 희토류 영구자석 사용량 저감 전동기, 페라이트 영구자석 활용 전동기에 대하여 소개하고 있습니다.

국내 산·학·연에서 희토류 가격 및 수급 불안정 문제 해결을 위한 다양한 연구 수행이 이루어지고 있기에 향후 희토류 수급 문제에 빠른 대응이 가능할 것으로 기대하며, 금번 3월호의 전기의 세계를 위하여 수고하신 임명섭 교수님, 강동우 교수님 및 김원호 교수님을 포함한 관계하신 모든 분들께 감사의 인사를 드리며, 기획시리즈 소개의 글을 마칩니다.

비희토류 매입형 영구자석 동기 모터의 다층 회전자 설계 기술

Multi-layer Rotor Design of Rare-earth Free Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

박민로 | 순천향대학교 정영훈 | 현대자동차

임명섭 | 한양대학교

Park, Min-Ro | Soonchunhyang University

Jung, Young-Hoon | Hyundai Motor Company

Lim, Myung-Seop | Hanyang University



요약

본 원고는 비희토류 원소인 Ferrite 영구자석을 이용한 다층 IPMSM의 회전자를 설계하는 방법을 제시한다. Ferrite 영구자석의 잔류자속밀도와 보자력을 보완하기 위해 다층의 영구자석 배치와 고정자 코일의 권선 수를 증가시키지만, 이는 회전자의 기계적 안정성 저하, 전압 초과, 영구자석 불가역 감자를 야기하게 된다. 따라서 본 원고에서는 이러한 특성들을 고려하는 설계 방법을 소개하고 검증한다.

Abstract

This paper presents a method for designing a multi-layer rotor of a IPMSM using ferrite permanent magnets, a non-rare earth element. To compensate for the low remanence and coercive force of ferrite permanent magnets, the multi-layer arrangement of the permanent magnets and the winding number of stator coils are increased, but this causes a decrease in mechanical stability of the rotor, overvoltage, and permanent magnet irreversible demagnetization. Therefore, in this paper, a design method considering these characteristics is introduced and verified.

1. 서론

최근 전기 자동차에 관한 관심이 높아지면서 내연기관을 대체할 수 있는 전기 모터의 수요가 증가하고 있다. 차량을 구동하는 전기 모터는 한정된 공간 내에서 목표 출력과 효율을 충족해야 하므로 고출력 밀도와 높은 효율을 요구한다. 따라서, 네오디뮴(Nd, Neodymium) 영구자석을 사용한 매입형 영구자석 동기 모터(IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 이러한 특성을 만족시키는 가장 매력적인 모터 중 하나이다[1]. 그러나 Nd 영구자석은 공급이 불안정하고 국제 상황에 따라 가격

변동이 크다는 문제가 있다. 이러한 이유로, Nd 영구자석을 사용한 IPMSM을 대체할 수 있는 비희토류 또는 희토류 저감 모터에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. 영구자석을 사용하지 않는 유도 모터, 권선 계자형 동기 모터, 동기 릴럭턴스 모터가 대표적이며 최근에는 소량의 Nd 영구자석 또는 페라이트(Ferrite) 영구자석을 사용한 영구자석 보조 동기 릴럭턴스 모터도 활발히 연구되고 있다. 또한, Ferrite 영구자석의 사용량을 극대화하기 위하여 자석의 구조를 Spoke 형태로 배치한 자속 집중형 동기 모터와 영구자석을 다층으로 배치한 다층 IPMSM 연구되고 있다. 그중에서도, Nd 영구자석 대비 낮은 잔류 자속 밀도의 Ferrite 영구자석을 사

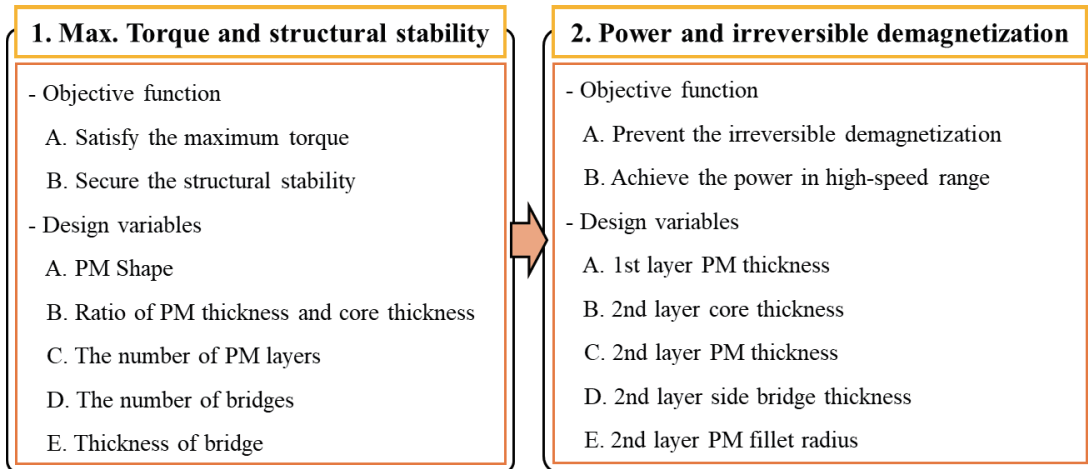


그림 1 Ferrite 영구자석을 사용한 다층 IPMSM 설계 과정

용한 다층 IPMSM은 릴럭턴스 토크 (Reluctance torque)를 적극적으로 활용하여 부족한 마그네틱 토크 (Magnetic torque)를 보완하기 때문에 비히토틀류 IPMSM으로 주목받고 있다[2].

하지만, 앞서 언급하였듯이 Ferrite 영구자석은 낮은 잔류 자속 밀도와 보자력을 가지기 때문에 이를 사용한 모터 설계 시에 다음과 같은 특성들을 고려해야 한다. 먼저, 낮은 잔류 자속 밀도로 인한 토크 감소를 극복하기 위해 영구자석 사용량을 증가시키고, 영구자석의 층수를 증가시켜, 마그네틱 토크 감소를 최소화하고 릴럭턴스 토크를 최대화해야 한다. 하지만, 이는 고속 운전 시 회전자의 기계적 안정성을 저하시키게 된다. 또한, 고정자 코일의 권선 수를 증가시켜 전기자 기자력을 확보하여 부족한 계자 기자력을 보완할 수 있지만, 이는 인덕턴스 전압 강하를 상승시켜 부족한 전압으로 인한 출력 저하를 초래하게 된다. 그리고 Ferrite 영구자석의 낮은 보자력과 증가된 전기자 기자력은 결국 영구자석의 불가역 감자를 발생시키는 원인이 된다.

따라서, 본 원고는 전기 자동차 구동용으로 Ferrite 영구자석을 사용하는 다층 IPMSM의 출력 및 토크뿐만 아니라 불가역 감자, 기계적 안정성과 같은 특성들을 분석하고 이를 개선하는 설계 방법을 제안한다. [그림 1]은 본 원고에서 제안하는 Ferrite 영구자석을 사용하는 다층 IPMSM의 설계 과정과 목표 그리고 주요 설계 변수를 보여준다. 먼저, 모터의 사이즈와 직결되는 특성인 토크와 기계적 안정성에 대해 분석하고 이를 확보하는 설계를 진행한다. 주어진 사이즈 내에서 목표하는 최대 토크를 달성하고 기계

적 안정성이 보장되는지를 결정한다. 다음으로 고속 영역에서의 출력 만족과 불가역 감자를 방지하기 위한 설계를 수행한다. 모터가 고속으로 구동되면 유기 전압의 크기가 증가하여 단자 전압에 이르게 되며, 약자속 제어에 의한 전류 위상각이 증가하게 된다. 따라서 고속 영역에서 출력 만족과 불가역 감자 여부를 검토하고 이를 개선한다. 마지막으로, 설계된 모터를 제작하여 실험한 결과를 통해 제안한 설계 방법을 검증한다.

2. 해석 및 설계 조건

모터의 특성을 해석하고 설계하기 위한 조건은 다음과 같다. 모터의 고속 회전을 고려하여 회전자 철심은 고강도 전기강판인 35PNT600Y가 사용되었다. 35PNT600Y의 두께는 0.35 mm이며 항복 강도는 620 MPa이다. 고정자 철심은 두께가 0.27 mm인 27PNX1350F이며, 자속 밀도가 1.0 T, 주파수가 400 Hz 조건에서 철손이 13.5 W/kg이다. Ferrite 영구자석의 잔류자속밀도는 100 °C에서 0.392 T이며, Ferrite 영구자석의 저온 불가역 감자 특성을 고려하여 불가역 감자 특성은 -40 °C에서 검토되었다. 불가역 감자는 감자 해석 전과 후의 무부하 쇠교자속 비를 감자율(DR, Demagnetization Ratio)로 정의하여 약조건인 최대 전류 300Arms의 1.2배, 전류 위상각 90° 조건에서 감자율이 1% 미만이면 불가역 감자가 발생하지 않았다고 판단하였다[3]. 기계적 안정성은 전기강판의 항복강도 대비 최대 응력의 비를 안전 계수

(SF, Safety Factor)로 정의하여 최대 속도 15,000rpm의 1.2배 속도에서 안전 계수가 1.2 이상이면 기계적 안정성이 확보되었다고 판단하였다.

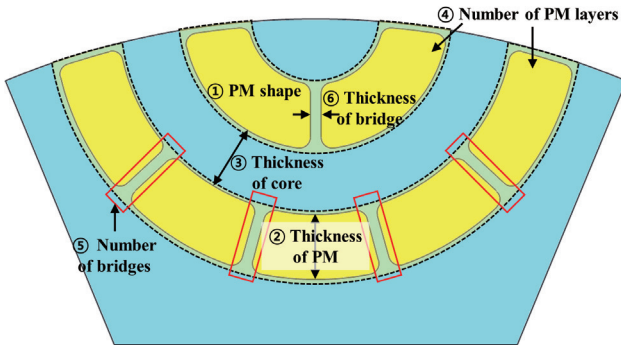
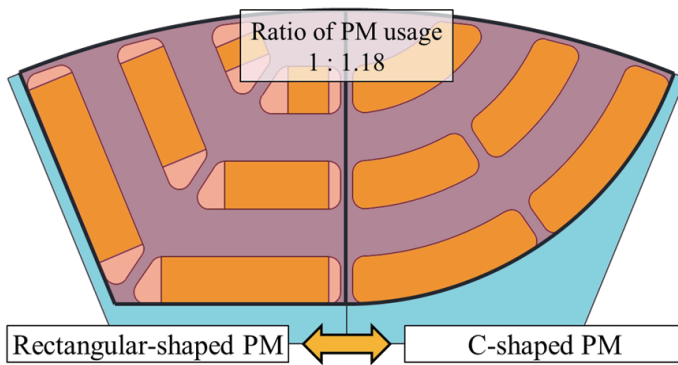
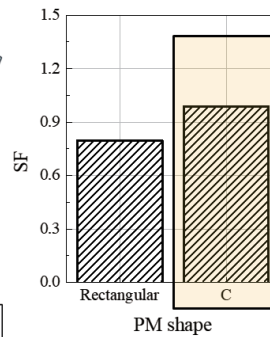


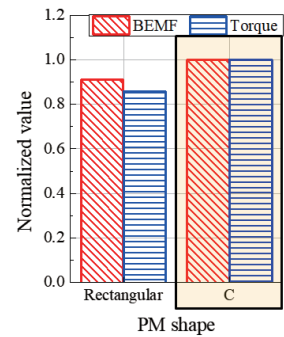
그림 2 토크 만족 설계를 위한 설계 변수



(a) 영구자석 형상



(b) 안전 계수



(c) 역기전력 및 토크

그림 3 영구자석 형상에 따른 특성

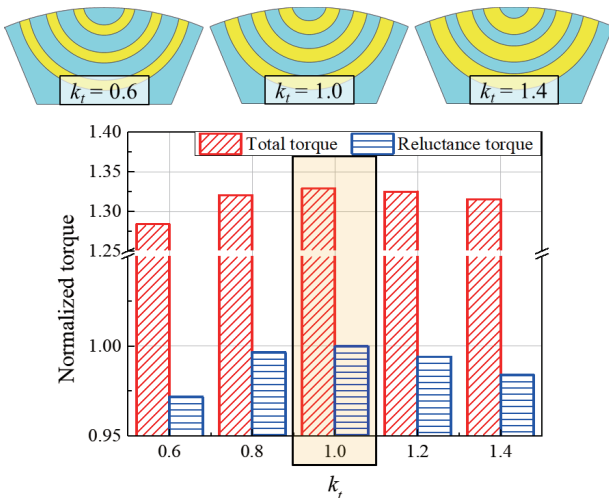


그림 4 k_t 에 따른 토크 특성

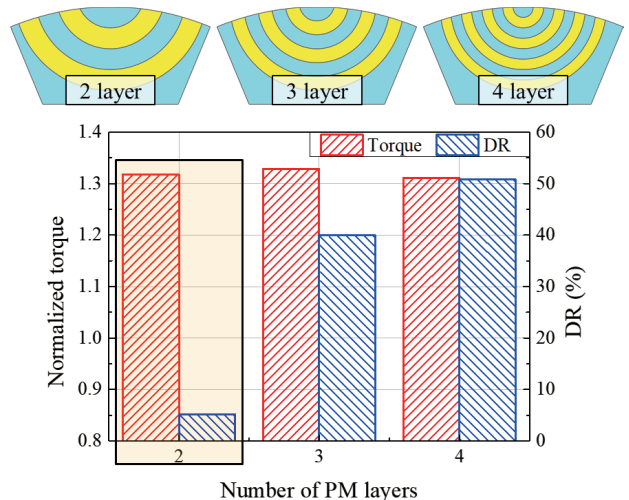


그림 5 영구자석 층수에 따른 특성

3.1 영구자석 형상

첫 번째로, 구조적 특성에 주요한 영향을 미치는 영구자석 형상을 결정한다. 본 원고에서는 일반적으로 사용하는 직사각형의 영구자석과 C 형상의 영구자석을 비교하였다. 일반적으로 모터에 가해지는 최대 응력은 [그림 3(a)]의 빨간 영역이 작아질수록 감소한다[4]. 따라서 C 형상의 영구자석을 사용할 경우, 영구자석 사용량을 증가시키면서 회전자의 최대 응력을 감소시킬 수 있다. 그 결과, [그림 3(b)]에서 보여주듯이 C 형상의 영구자석을 사용하여 직사각형 영구자석보다 최대 응력이 감소하고 SF가 증가하였다. 또한, [그림 3(c)]에서 볼 수 있듯이, C 형상 영구자석 사용량이 직사각형 형상 영구자석보다 많아서, C 형상 영구자석의 BEMF와 토크가 더 높게 발생하였다. 따라서 이 원고에서는 C 형상 영구자석을 사용하였다.

3.2 영구자석과 철심의 두께 비

영구자석 두께는 릴럭턴스 토크에 영향을 미치므로 토크 특성을 고려하여 영구자석 두께와 코어 두께의 비율을 결정한다. 이때, 영구자석 두께와 회전자 철심 두께의 비율을 k_t 로 정의하였으며, 영구자석 두께와 코어 두께의 총합은 일정한 조건에서 비교하였다.

[그림 4]는 각각 k_t 에 따른 회전자 형상과 토크 특성을 나타낸다. [그림 4]와 같이 $k_t=1.0$ 일 때 릴럭턴스 토크와 총 토크는 최대값이다. 따라서 영구자석 두께와 회전자 철심 두께의 비율은 1.0

으로 선택한다.

3.3 영구자석 층수

영구자석 층수는 토크 특성과 불가역 감자를 고려하여 결정한다. 영구자석 층수가 증가함에 따라 영구자석 두께는 감소하지만 총 영구자석 두께는 모든 모델에서 동일하다(k_t 일정). 따라서, 불가역 감자 특성은 영구자석 두께에 많은 영향을 받기 때문에 함께 검토되었다. [그림 5]는 영구자석 층수에 따른 회전자 형상을 보여준다. 이때 모든 모델의 리브(Rib)와 브릿지(Bridge)는 무시하여 기계적 특성은 고려하지 않았다. [그림 5]에서 보는 바와 같이 2층의 토크는 다른 층과 크게 다르지 않다. 그러나 영구자석 층의 수가 증가함에 따라 영구자석 두께가 감소하기 때문에 불가역 감자를 방지하는 데 유리한 2층으로 영구자석 층수를 결정하였다.

3.4 브릿지 수

브릿지 수는 토크, 안전 계수, 감자율을 고려하여 결정한다. [그림 6]은 브릿지의 두께는 1.0mm로 고정된 조건에서 브릿지 수에 따른 회전자 형상과 특성을 보여준다. [그림 6]에서 볼 수 있듯이 안전 계수는 브릿지의 수가 증가함에 따라 증가하지만, 감자율과 토크는 브릿지 수가 증가할수록 감소한다. 따라서, 안전 계수를 만족하는 조건에서 토크가 가장 높도록 브릿지 수를 4개로 선정하였다.

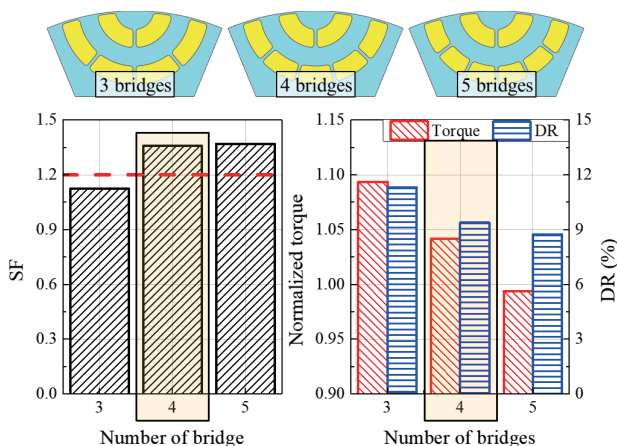


그림 6 브릿지 수에 따른 특성

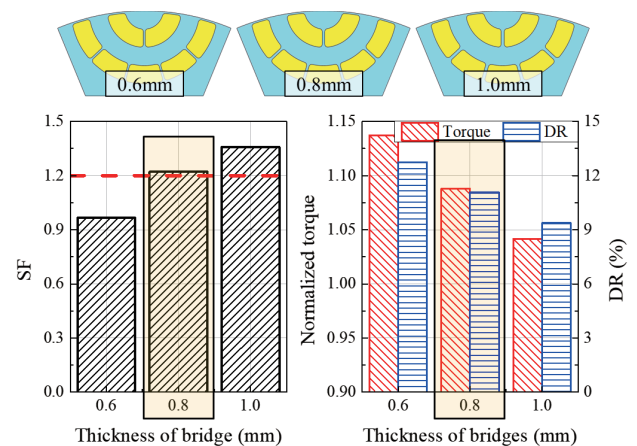


그림 7 브릿지 두께에 따른 특성

3.5 브릿지 두께

브릿지 수와 마찬가지로 브릿지 두께도 토크, 안전 계수, 감자율을 고려하여 결정한다. [그림 7]은 브릿지의 두께에 따른 회전자 형상과 특성을 보여준다. 브릿지의 두께가 감소함에 따라 안전 계수가 감소하고 토크와 감자율이 증가한다. 따라서, 마찬가지로 안전 계수를 만족하는 조건에서 토크가 가장 높도록 브릿지 두께를 0.8mm로 결정하였다.

3.6 초기 모델 성능 곡선

설계된 초기모델의 회전 속도에 따른 토크와 출력 성능 곡선은 d축, q축 등가회로를 이용하여 계산하며, [그림 8]과 같다. 현재 주어진 사이즈, 제한 전류 내에서 최대 토크는 만족하지만, 고속 운전 영역(9,000 rpm 이후)에서는 토크와 출력을 만족하지 못한다. 또한, 초기 모델의 안전 계수와 감자율은 각각 1.22와 11.1%로 불가역 감자가 발생한다. 따라서 다음 단계에서는, 고속에서의 출력 만족과 감자율을 감소시키는 설계를 진행한다.

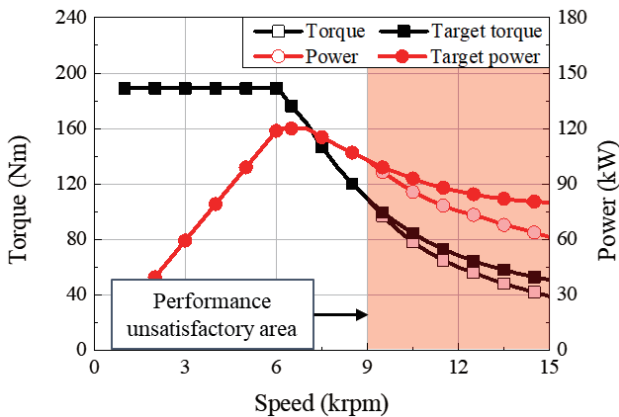


그림 8 초기 모델의 성능 곡선

4. 고속 영역 출력 만족 및 불가역 감자 방지 설계

4.1 설계 방향 결정

앞선 결과에서 볼 수 있듯이, 초기 모델은 속도가 증가함에 따라 유기 전압이 증가하여 고속 운전 영역에서는 충분히 전류를 공급해줄 수 없게 목표하는 토크와 출력을 달성하지 못했다. 이는 초

기 모델의 전압 성분의 벡터도를 나타내는 [그림 9(a)]에서 볼 수 있듯이, 인덕턴스에 의한 전압 강하 성분이 큰 비중을 차지하면서 전압과 전류의 위상차인 역률각이 증가하여 전압 벡터가 3사분면에 위치하며 크기가 증가하였기 때문이다. 따라서, 고속 영역에서의 출력 만족을 위해 유기 전압을 감소시키기 위해서는 전압 벡터를 2사분면에 가깝게 위치시켜야 한다. 그러므로 [그림 9(b)]와 같이 d축과 q축 인덕턴스에 의한 유도 전압은 감소시키고 영구자석에 의한 유도 전압은 증가시켜야 한다.

다음으로, 감자율을 줄이기 위해, 국부적으로 불가역 감자가 발생한 영구자석 부분을 자속 장벽(Flux barrier)으로 대체하는 것이다. 초기 모델의 감자 해석 결과 [그림 10]에서 볼 수 있듯이, 2층의 영구자석에서 회전자 리브에 인접한 영구자석의 불가역 감자는 크게 발생하였다. 따라서, 이 부분에 자속 장벽을 배치하여 리브 근처를 흐르는 자속에 의한 영구자석 불가역 감자를 방지하였다. 또한, 불가역 감자를 고려하여 영구자석의 두께를 결정한다.

※가정: 단자전압(V_a) ≈ 유기전압(V_g)

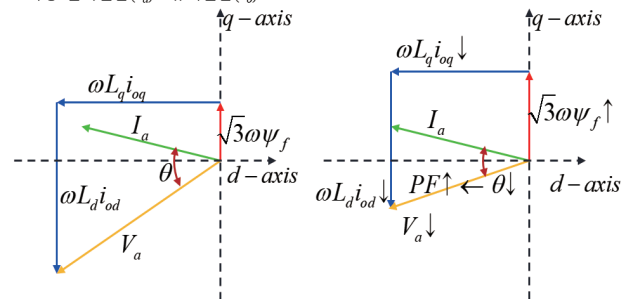


그림 9 전압, 전류 벡터도

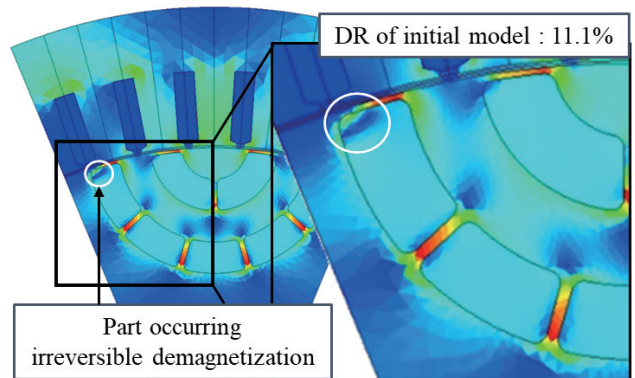


그림 10 초기 모델 감자해석 결과

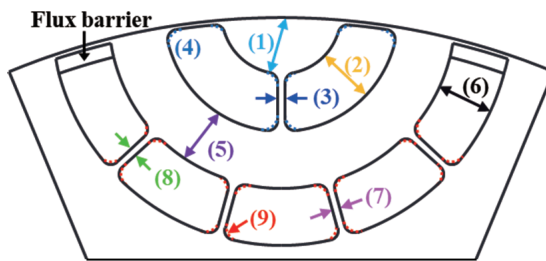
4.2 최적 설계

앞선 설계 방향을 기반으로 회전자의 여러 설계 변수 [그림 11]의 기여율 분석을 통한 주요 설계 인자를 결정하고 이를 통해 RSM (Response Surface Methodology)을 이용하여 최적 설계를 수행한다. 먼저, 분산 분석(ANOVA)을 통해 목적 함수에 크게 기여하는 주요 설계 인자를 결정한다. ANOVA를 사용하여 주요 설계 인자를 결정할 때의 목적 함수는 안전 계수, 기저 속도 (Base speed)에서의 토크, d, q축 인덕턴스, 영구자석에 의한 쇄교 자속 및 감자

율이다. [그림 12]는 목적 함수에 대한 설계 변수의 기여율을 각각 보여준다. 목적 함수에 큰 영향을 미치는 설계 변수는 각 목적 함수에 대한 기여율이 1, 2위인 것으로 선정하였다.

- (2) 1층 영구자석 두께 - (5) 2층 코어 두께
- (6) 2층 영구자석 두께 - (8) 2층 브릿지 두께
- (9) 2층 영구자석의 필렛(fillet) 반경

나머지 설계 변수는 변수 번호순으로 4mm, 0.6mm, 1.5mm, 0.9mm로 선정하였다.



Variable		Level		
No.	Name	Low	Middle	High
(1)	1st layer core thickness	3.5	4	4.5
(2)	1st layer PM thickness	8	8.5	9
(3)	1st layer bridge thickness	0.6	0.7	0.8
(4)	1st layer PM fillet radius	1.0	1.25	1.5
(5)	2nd layer core thickness	3.5	4	4.5
(6)	2nd layer PM thickness	8	8.5	9
(7)	2nd layer center bridge thickness	0.8	0.9	1.0
(8)	2nd layer side bridge thickness	0.8	0.9	1.0
(9)	2nd layer PM fillet radius	1.0	1.25	1.5

그림 11 주요 설계인자 선정을 위한 설계 변수

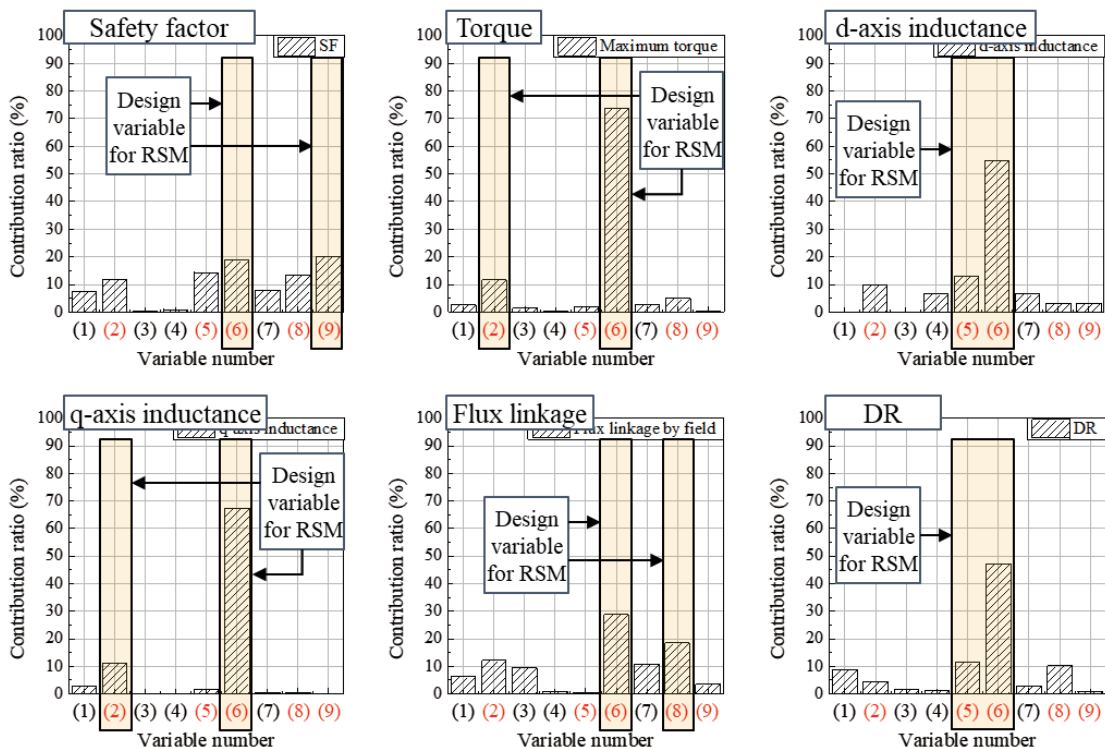


그림 12 설계 변수에 따른 기여율

다음으로 RSM은 ANOVA를 통해 선택된 주요 설계 인자를 이용하여 수행된다. 목적 함수와 설계 제약 조건은 [그림 13]과 같으며, 최적 설계 결과는 [그림 14]에서 보여준다. 안전 계수와 감자율은 각각 1.27과 0.07%이며, 토크와 출력은 초기 모델과 전 영역에서 목표 출력을 만족한다.

5. 실험 검증

설계 결과를 검증하기 위해 최종 모델을 제작하고 실험하여 측정된 실험 결과를 FEA의 결과와 비교한다. [그림 15]는 부하 실험 구성과 결과를 보여준다. 실험은 5,500rpm, 7,500rpm,

15,000rpm으로 진행하였으며, 차이는 5,500rpm에서 1.2%, 7,500rpm에서 1.4%, 15,000rpm에서 0.8%의 오차를 보여주어 실험의 토크와 FEA의 토크가 유사함을 알 수 있다. 또한, 제작된 모터는 최대 속도 15,000rpm에서 안정적으로 구동되어 15,000rpm에서의 기계적 안정성도 실험적으로 검증되었다.

6. 결 론

본 원고는 비회로류 모터 중 하나로 주목받고 있는 Ferrite 영구자석을 이용한 다층 IPMSM의 설계 방법을 제안하였다. Ferrite 영구자석은 희토류 원소인 Nd를 포함한 영구자석과 비교하여 상

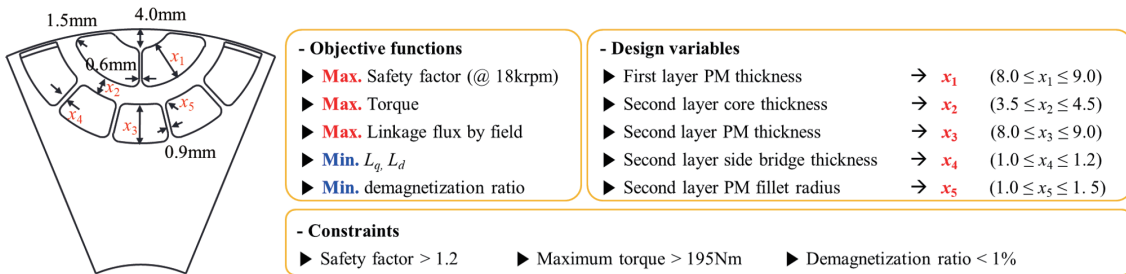


그림 13 최적설계목적 함수, 제한 조건, 설계 인자

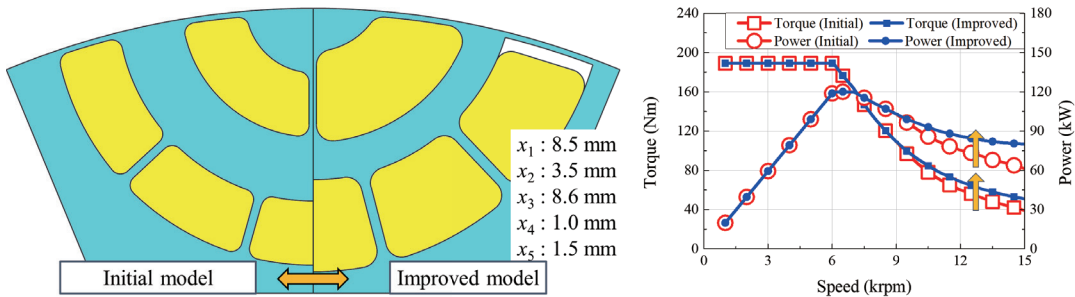


그림 14 최적 설계 결과 및 성능 곡선

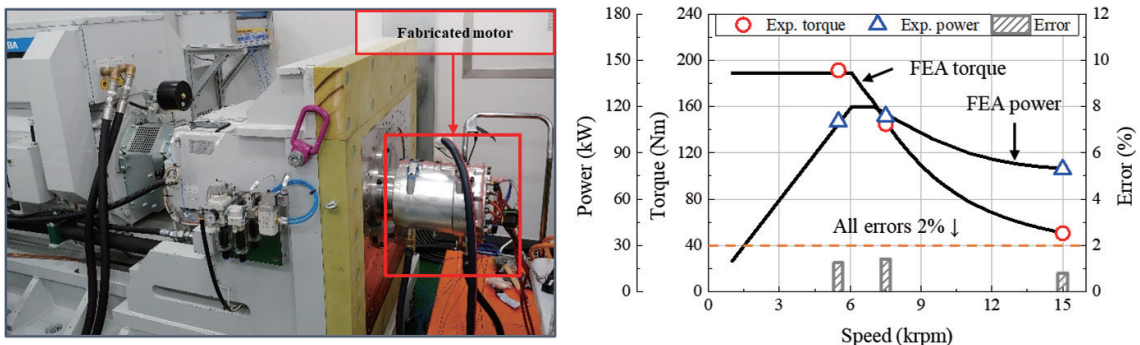


그림 15 부하 실험 구성 및 결과

대적으로 낮은 잔류 자속 밀도와 보자력을 가지기 때문에, 이를 극복하기 위하여 회전자 내 영구자석 사용량을 늘리고 고정자 코일의 권선 수를 증가시켜 설계해야 한다. 이러한 과정에서 모터의 기본적 성능인 토크, 출력 만족뿐만 아니라 기계적 안정성 확보, 영구자석 불가역 감자 특성들도 검토해야 한다. 따라서, 본 원고에서는 이러한 특성들을 만족하기 위한 설계 과정을 보여주었고, 이를 검증하기 위해 최종 설계 모델을 제작하고 실험 평가하였다.

[참고문헌]

- [1] Young-Hoon Jung, et al. "Torque Ripple Reduction of IPMSM Applying Asymmetric Rotor Shape Under Certain Load Condition," IEEE Trans. Energy Convers., 33.1 (2018): 333-340
- [2] Dong-Kuk Lim, et al. "Analysis and Design of a Multi-Layered and Multi-Segmented Interior Permanent Magnet Motor by Using an Analytic Method," IEEE Trans. Magn., 50.6 (2014): Art. no. 8201308.
- [3] Min-Ro Park, et al. "Characteristics of IPMSM According to Rotor Design Considering Nonlinearity of Permanent Magnet," IEEE Trans. Magn., 52.3(2016): Art. no. 8101904.
- [4] Kyong-Soo Cha, et al. "Multipolar High-Speed IPMSM Design for EV Traction Considering Mechanical Stress," in 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal, QC, Canada, 2016, pp. 1-6.

저자소개

박민로(Park, Min-Ro)

2013년 충남대학교 전기공학과 졸업
 2020년 한양대학교 대학원 졸업(공학박사)
 2020년~2022년 한국로봇융합연구원 선임연구원
 2022년~현재 순천향대학교 조교수
 주 연구분야: 전기기기 전기-기계계 연성 해석 및 설계



정영훈(Jung, Young-Hoon)

2013년 한양대학교 기계공학부 졸업
 2020년 동 대학교 대학원 졸업(공학박사)
 2020년~현재 현대자동차 책임연구원
 주 연구분야: 전기기기 해석 및 설계, 차량 구동용 및 초고속 모터 설계



임명섭(Lim, Myung-Seop)

2012년 한양대학교 기계공학부 졸업
 2017년 동 대학교 대학원 졸업(공학박사)
 2017년~2018년 현대모비스 책임연구원
 2018년~2019년 영남대학교 조교수
 2019년~현재 한양대학교 조교수
 주 연구분야: 전기기기 멀티피직스 해석 및 설계, 모빌리티 시스템 해석



영구자석형 동기 전동기의 희토류 저감 기술에 관한 고찰

A Study on the Rare Earth Reduction Technology of Permanent Magnet Synchronous Motors

강동우 | 계명대학교

Kang, Dong-Woo | Keimyung University



요 약

본고는 최근 전기자동차, 친환경자동차라는 급성장하는 시장에서 주목받고 있는 모터 기술과 관련하여 기술하고 있다. 특히, 자원을 무기화하여 경제적 질서를 재편하려는 국가들로 인하여 자원 의존도에 따른 기술 개발 방향이 급변하는 시기에 희토원소를 활용한 영구자석형 모터 기술도 다양한 기술의 접목을 통해 더 안정적인 기술로 발전해 가려는 양상을 보이고 있다. 희토원소를 저감하기 위한 영구자석의 다양한 기술과 이를 기반으로 한 모터 설계 기술에 대해 살펴보는 것은 향후 모터 산업 및 기술발전의 흐름을 파악하는데 매우 중요한 기회가 되리라 생각된다.

Abstract

This article describes motor technology that has recently attracted attention in the rapidly growing market of eco-friendly vehicles. In particular, technology development strategies according to resource dependence are rapidly changing due to countries trying to reorganize economic order using resources. At this time, permanent magnet synchronous motor technology using rare earth elements is also developing into a more stable motor technology in the external market environment through the combination of various technologies. Looking at various permanent magnet technologies and motor design technologies to reduce rare earth elements will be a very important opportunity to understand future trends in motor technology development.

1. 서 론

자동차 산업에서의 전동화 부품 확대에 따른 모터 기술에 대한 관심이 어느 때보다 높다는 것을 체감할 수 있다. 전동화 기술의 핵심 부품중 하나인 모터 기술은 전자기적 현상에 대한 연구가 활발했었던 1800년대 초기부터 시작되었다. 당시 모터 기술은 축전된 직류 전기를 사용해야 했기 때문에 회전운동이 가능하도록 다양한 아이디어가 고안된 발명품들이 등장하면서 성장해 왔다. 이름에서 알 수 있듯이, 직류를 모터에 바로 인가하는 직류기

(DC Machine)는 오늘날에도 자동차의 다양한 전장품들에 적용되고 있다. 직류전동기는 로렌츠 힘으로 정의되는 힘 발생의 기본 원리를 활용하여 회전운동이 가능하도록 전기자와 계자의 구조를 가진다. 현재까지 정의된 일반적인 전기기기 구조에서는 전기자에 교류 전원을 공급해 주어야 한다. 하지만 직류전동기는 직류의 전력을 공급받기 때문에 이를 교류로 전환시키기 위한 정류자라는 기계 구조가 반드시 필요하다. 그런데 정류자를 사용하게 되면 순간적으로 전류의 극성이 바뀌는 정류현상이 동반된다. 이 정류현상은 브러시와 정류자편 간극에 아크가 발생되어 기기의

내구성의 문제를 야기한다. 이러한 단점들로 직류전동기가 사용되는 환경이 제한된다. 최근 자동차용으로 개발되는 모터 기술에 브러시와 정류자를 사용하지 않는 브러시리스 전동기를 적용하려는 이유도 이와 관련되어 있다.

현재 자동차용 주요 모터의 개수는 2030년까지 약 64개로 증가될 것으로 추산하고 있다. 물론 단순 기능을 담당하는 소형 모터의 개수는 이보다 훨씬 더 많다. 이 주요 모터는 Performance motors, Comport motors, Safety motors로 구분되어 성능향상, 연비개선, 편의성 강화 및 안전 보조 등 담당 기능이 다양해지고 있다. 특히, 기존에 없거나 성능 개선이 요구되는 신규 개발 기술들에 기존의 직류전동기를 적용하기 어려운 경우는 교류기(AC Machine) 적용을 검토하고 있는 경향을 보인다.

교류기는 1900년대를 지나오면서 니콜라 테슬라의 교류전력을 적용한 회전자기장 개념을 통해 그 기술이 정립되었다. 회전자기장은 시간적, 공간적으로 다상의 전기를 균등하게 배열함으로써 합성된 회전 기자력으로 정의할 수 있다. 교류기 기술의 탄생으로 인하여 모터는 보다 더 다양한 환경에 적합하도록 개발되어 교류전동기의 사용 영역을 확대하고 있다. 교류전동기는 계자의 형태와 계자 발생의 원리에 따라 구분한다. 대표적인 교류전동기로 유도전동기(Induction Motors)와 동기전동기(Synchronous Motors)가 있다. 유도전동기는 주로 산업의 동력용으로 많이 사용되어 왔으며 동기전동기는 제어 시스템을 통합한 서보 시스템과 같은 고급 어플리케이션이나 동력 공급을 위한 대형 플랜트에 사용되어왔다. 하지만 최근 중소형 시스템에도 동기전동기가 확대 적용될 수 있도록 많은 기술이 개발되어 유도전동기를 대체하는 사례가 증가하고 있고, 타입도 다양하게 연구되어 그 기술이 더욱 빠르게 성장해가고 있다.

본고의 주제에 다루게 될 영구자석형 동기전동기 기술은 영구자석이 계자 자속을 발생시키도록 구조화되어 있기 때문에 일부 산업계에서는 브러시리스 DC전동기(BLDC)라고도 불린다. 회전자에 배치된 영구자석의 형태 및 제어 방식을 고려하여 BLDC와 PMSM으로 구분되고 있으며, 타입별로 속도-토크의 특성이 다르게 정의된다. 모터에 사용되는 대표적인 영구자석으로는 알니코, 페라이트, Nd-Fe-B, Sm-Co가 있으며 각 소재는 적정 환경에 맞

게 사용되고 있다. 본고에서는 이러한 영구자석의 기본적인 특성과 모터 기술을 접목하여 자동차용 구동 모터에 사용되는 적당성 높은 영구자석 소재와 설계 조건에 대하여 기술하고자 한다.

2. 영구자석 소재의 가격 저감 기술 동향

모터에 사용되는 영구자석은 대표적으로 세라믹 자석인 페라이트 자석과 Sm-Co와 Nd-Fe-B와 같은 희토류 합금 자석이 있다. 페라이트 자석이 가진 가격 경쟁력으로 전체 영구자석형 모터 시장에서 매우 많은 사용량을 차지하고는 있으나, 고출력밀도 등의 개발 이슈로 인하여 희토류 합금 자석의 사용량이 급속도로 증가하고 있다. 이는 희토류 합금 자석의 최대 자기에너지적(BHmax)이 페라이트와 비교하여 매우 높기 때문이며 이로 인해 제한된 회전자의 체적내에 자석을 구조화하는데 더 여유로운 설계가 가능하다는 장점을 가지게 된다. 따라서 희토류 합금 자석의 가격만 적정하다면 가장 우선적으로 적용 검토를 해야 할 기술이라고 생각된다. 표 1에서 보는 바와 같이 희토류 원소를 구분할 수 있으며, 이중에서 영구자석의 소재로 사용이 가능한 세륨(Ce), 네오디뮴(Nd), 프라세오디뮴(Pr), 사마륨(Sm)에 터븀(Tb)과 디스프로슘(Dy) 등을 적용하여 성능이 보완된 고성능 자석 기술로 탄생하였다[1].

표 1 17개 학술적 희토류별 상품 용도

구분	원소명	용도
경(輕) 희토류	란타넘(La)	니켈수소 전지, 석유화학 촉매
	세륨(Ce)	강화유리, 촉매, 세라믹, 자석
	프라세오디뮴(Pr)	영구자석, 레이저, 페인트
	네오디뮴(Nd)	영구자석, 강화유리, 광학섬유
중(中) 희토류	프로메튬(Pm)	원자력 전지, 페인트
	사마륨(Sm)	영구자석, 중성자 흡수제
	유로퓸(Eu)	형광체, 형광유리
	가돌리늄(Gd)	합금첨가제, 형광체
중(重) 희토류	터븀(Tb)	영구자석, 레이저
	디스프로슘(Dy)	영구자석, 레이저
	홀뮴(Ho)	영구자석, 레이저
	어븀(Er)	합금 첨가제, 레이저
	툴륨(Tm)	X선 방출원, 형광체
	이터븀(Yb)	합금첨가제, 레이저
	루테튬(Lu)	석유화학 촉매, 강화유리
	스칸듐(Sc)	알루미늄 합금, 레이저
비란탄계	이트륨(Y)	형광체, 초전도체

출처 광물자원공사

그림 1에서 보는 바와 같이 동일한 자기에너지적을 가지기 위해서는 소재마다 그 형상이 달라진다[2]. 오늘날 전기차용 구동 모터로 Nd-Fe-B를 우선 검토하려는 이유가 그림 1을 통해서도 알 수 있다. 영구자석 동기전동기에서 회전자의 형상 설계에 가장 큰 영향을 미치는 것이 자석의 사이즈이다. 특히, 추진(Traction)용 구동 모터는 CPSR(Constant Power Speed Range)이 크기 때문에 회전자 내 배치되는 영구자석의 형상에 따른 출력의 가변성이 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 더 높은 최대 자기에너지적을 가지도록 영구자석 기술이 개발됨에 따라 모터의 사이즈 축소와 운전 범위의 확대 등을 예측할 수 있다.

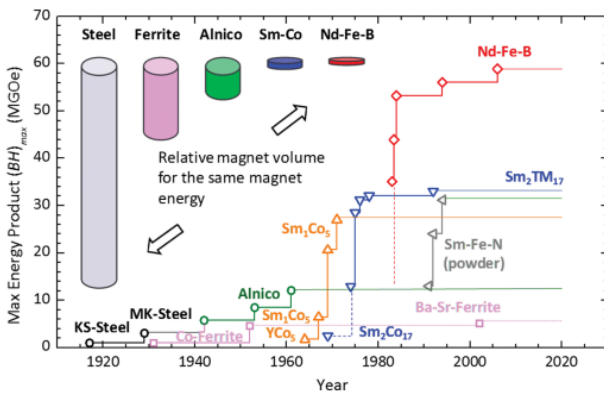


그림 1 경자성 재료의 최대 자기에너지적 및 유사에너지 밀도에 따른 자석 소재별 형상[2]

최근 미국과 유럽에서는 산업적 자원 안정화 전략 수립을 위해 빠르게 움직이고 있다. 특히 희토류와 리튬에 대한 공급망 다각화를 통해 자원 의존도에 대한 위협을 최소화하려고 노력하고

있다. 이러한 상황에서 고성능 자석에서 활용되는 중(重)희토원소의 가격이 불안정하고 다른 희토원소에 비해 매우 높은 원가의 이유로 탈(脫)희토 영구자석에 대한 기술 요구가 지속적으로 증가되고 있는 실정이다. 그동안 희토류 영구자석은 경(經)희토보다는 중(重)희토 소재를 저감하려고 많은 기술들을 개발해왔다. 대표적으로 입계확산 자석 기술이 있다. 1983년 Nd-Fe-B에 분말야금공정과 급냉 방법 등을 적용하여 Sm-Co대비 가격이 낮으면서도 높은 자기적 특성을 가진 영구자석 기술이 개발되면서 Sm-Co를 대체하여 시장에 빠르게 확산되어왔다. 고온의 환경 및 높은 감자 자속 등의 이유로 보자력을 높여달라는 시장의 요구에 대응하기 위해 가격이 매우 높은 디스프로슘(Dy), 터븀(Tb)과 같은 중(重)희토의 사용량이 증가된 고보자력 Nd-Fe-B 자석이 개발되었다.

그런데 2010년도 중국의 희토소재 수출 쿼터제로 인해 당시 모터에 적용되었던 영구자석의 소재 가격이 급격하게 상승하면서 희토류 자석에 대한 불안정 수급 이슈가 발생되었고, 현재는 WTO위반으로 수출쿼터제가 폐지되었으나 중국 정부를 통해 통제 및 감독 등으로 관리가 강화되어 관련 기업을 대형기업으로 통합함으로써 자원 관리를 위한 전략을 지속적으로 유지하고 있다. 이에 자석 업계는 자석의 보자력을 결정하는 주요 원소인 중(重)희토에 해당하는 Dy와 Tb의 사용량을 최소화하면서 보자력을 향상시키는 방법들을 개발함으로써 자석 가격 저감이 가능하게 되었다. 대표적인 중(重)희토 저감 기술은 입자를 미세화시

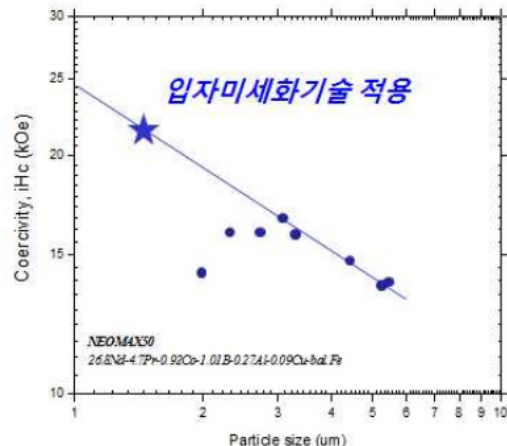
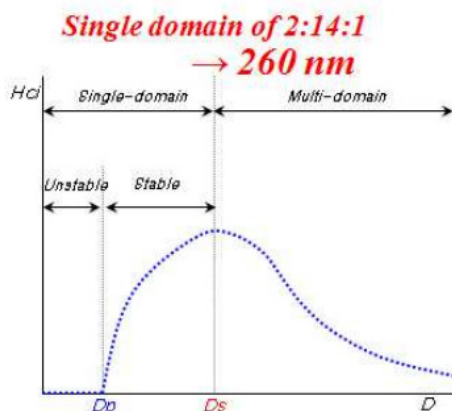


그림 2 입자미세화 기술의 입자 크기와 보자력 관계[4]

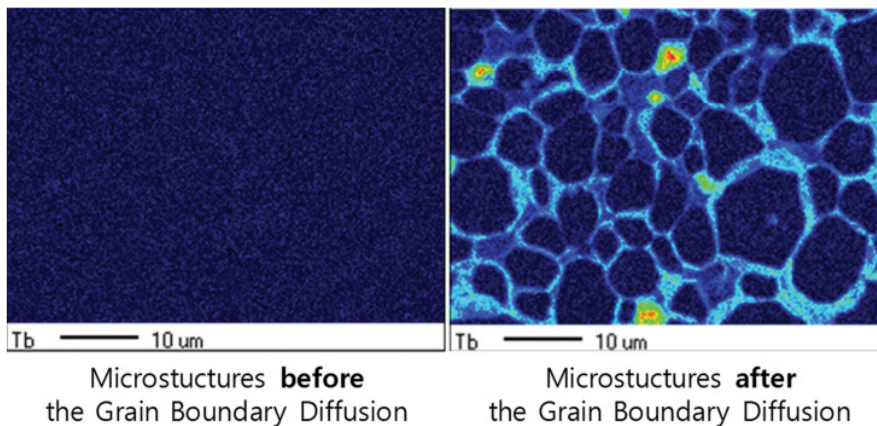


그림 3 입계확산 기술이 적용된 자석 사례[2]

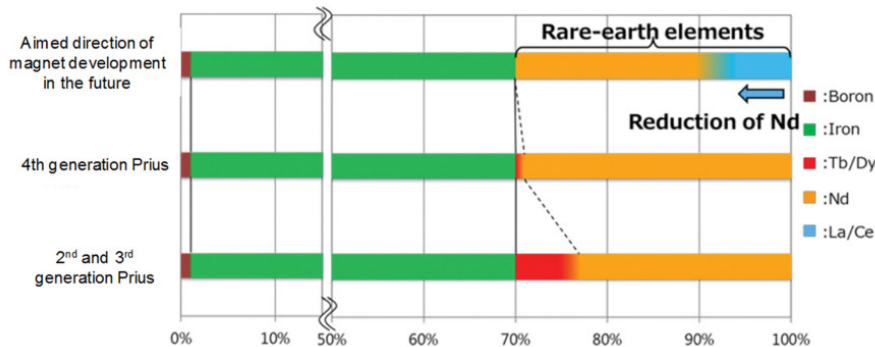


그림 4 Toyota Motor Corporation의 저가형 Nd-자석 개발 사례[5]

켜 자화 반전이 상대적으로 낮게 하여 보자력을 증가시키는 방법과 입자 계면을 Dy, Tb를 도포하는 방식을 사용하여 사용량 저감 및 보자력 유지가 가능한 방법이 연구되어 개발되었다[2]~[4]. 각각의 방법은 그림 2와 같은 입자미세화 기술과 그림 3과 같은 입계확산 기술로 명칭되어 현재의 가격 저감된 Nd-Fe-B 자석으로 최적화되어 현재 고출력밀도형 영구자석 동기전동기에 적용되고 있다.

현재 활발히 양산에 적용되고 있는 입자미세화 및 입계확산 기술 외에도 조성을 변화시켜 영구자석내 희토 원소를 저감하려는 자석기술이 개발되고 있다. 대표적으로 Nd치환 자석 기술이다. 2018년에 발표된 기술로 그림 4에서 보는 바와 같이 Nd 대신 La과 Ce을 사용하여 경희토 사용량을 저감시키는 방법을 개발하고 있다[5]. 현재까지 개발 중인 Nd치환 자석의 출력 수준은 최대 35SH 등급으로 자석의 가격 경쟁력이 높아 차세대 영구자석 기술로 중요도가 높아질 기술로 평가되고 있다.

3. 영구자석 사용량을 저감하기 위한 모터 기술

2장에서는 영구자석 자체의 가격을 저감하기 위해 희토류 원소를 저감시킬 수 있는 기술들을 알아보았다. 3장에서는 모터 설계적 측면에서 영구자석 자체의 사용량을 줄일 수 있는 설계기술에 대해 알아보려고 한다. 앞서 기술한 바와 같이 친환경 자동차 구동용 모터로는 영구자석을 적용한 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)가 친환경 자동차용 구동 시스템의 대부분의 시장을 차지하고 있다. 물론 영구자석을 배제하기 위해 다양한 기술이 적용되기도 한다. 한 예로 최근 BMW에서는 권선형 동기 전동기를 고출력화하여 출시한 바가 있다. 모터의 기술에 대해 자문을 하다보면, 어떤 타입의 모터가 친환경 자동차용 구동모터로 적합한지 묻는 질문을 가장 많이 받게 된다. 전자계 설계나 구조 설계 기술로 성능을 향상시키는 것은 현재의 높은 설계 기술 수준

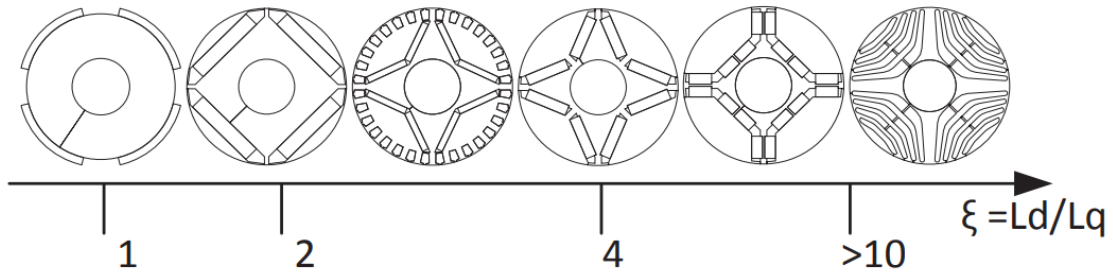


그림 5 회전자 돌극(Saliency Pole) 구조에 따른 인덕턴스 비예시[6]

을 고려하면 경쟁력 있는 제품을 개발하는데 난이도가 매우 높다. 오히려 재료적 측면이나 그동안 고려하지 못한 새로운 형태의 모터 기술로 전환이 되어야 경쟁력이 생길 것이다. 2020년 영국자동차산업협회에서 제시한 자동차용 구동모터의 기술 로드맵에서도 새로운 형태의 모터 구조 기술, 비출력밀도를 높이기 위한 소재 기술, 고효율을 달성하기 위한 고점적 권선 기술 등으로 전통적인 모터 기술과는 차별화시킬 수 있는 혁신적 기술이 개발되어 질 것으로 예측하고 있다. 특히, 탈회토류 자석 기술에 대한 요구와 기술 예측을 하고 있는 바, 영구자석 기술과 설계 기술은 현행의 영구자석 가격을 저감시키기 위한 기술 수준을 넘어 차별화된 기술을 요구하게 될 것으로 예상할 수 있다.

모터 설계적 관점에서도 자석의 사용량을 저감시킬 수 있는 타당성 높은 설계 기술을 도출하는 것이 당연하다고 판단된다. 영구자석형 동기전동기는 여러 전동기 타입들과 비교하여 고출력밀도, 고효율, 소형 경량화 등의 장점들을 가지고 있으며, 이러한 지표들은 최근 전동기의 비출력 증대라는 기술 경향에 비추어 영구자석형 동기전동기가 더 매력적인 솔루션이라는 생각을 갖게 된다. 특히, 회전자 내에 자석이 구성되는 매입 영구자석형 동기전동기(IPMSM)는 설계의 자유도가 높고 추가적인 릴럭턴스 토크의 활용으로 정출력 운전이 가능한 속도 범위를 확대할 수 있다는 장점으로 인하여 자동차 구동 시스템의 운전 특성에 적합성이 높은 기기라고 할 수 있다. 이러한 장점들을 극대화하기 위해 현재 양산중인 대부분의 영구자석형 동기 전동기는 v-shape의 자석 배치구조를 회전자에 적용하고 있다. 일반적으로 모터의 출력 토크는 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크로 구성이 되는데, 영구자석의 사용량을 줄이는 것은 마그네틱 토크가 상대적으로 줄

어든다는 것을 의미한다. 따라서 줄어든 토크를 보상하기 위해서 릴럭턴스 토크를 최대한으로 확보해야 하며, 이에 적합한 구조로 SynRM(Synchronous Reluctance Motor)이라고 부르는 릴럭턴스 전동기의 회전자 구조가 좋은 솔루션이 될 수 있다.

그림 5에서 보는 바와 같이 SynRM은 자석을 사용하지 않고 d-q 축으로 정의되는 자기적 2상의 릴럭턴스 차이를 활용한 순수 릴럭턴스 토크 전동기 기술이다. 자석을 사용하지 않기 때문에 전기자로부터의 기자력으로 토크를 발생시키다보니, 효율 및 출력밀도 특성에서는 영구자석형 동기전동기와 비교하여 낮은 특성을 가지고 있어서 적정 기술로는 후순위에 밀려나 있는 타입이다.

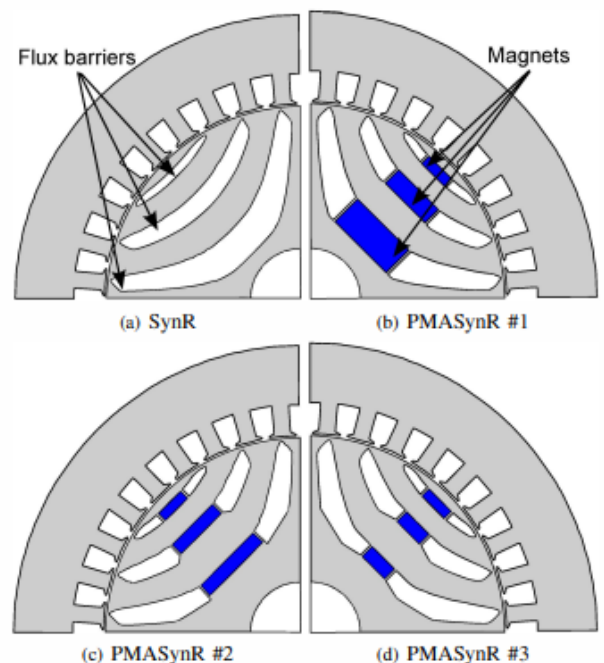


그림 6 SynRM(a)과 PMA SynRM(b)~(d) 구조의 비교[7]

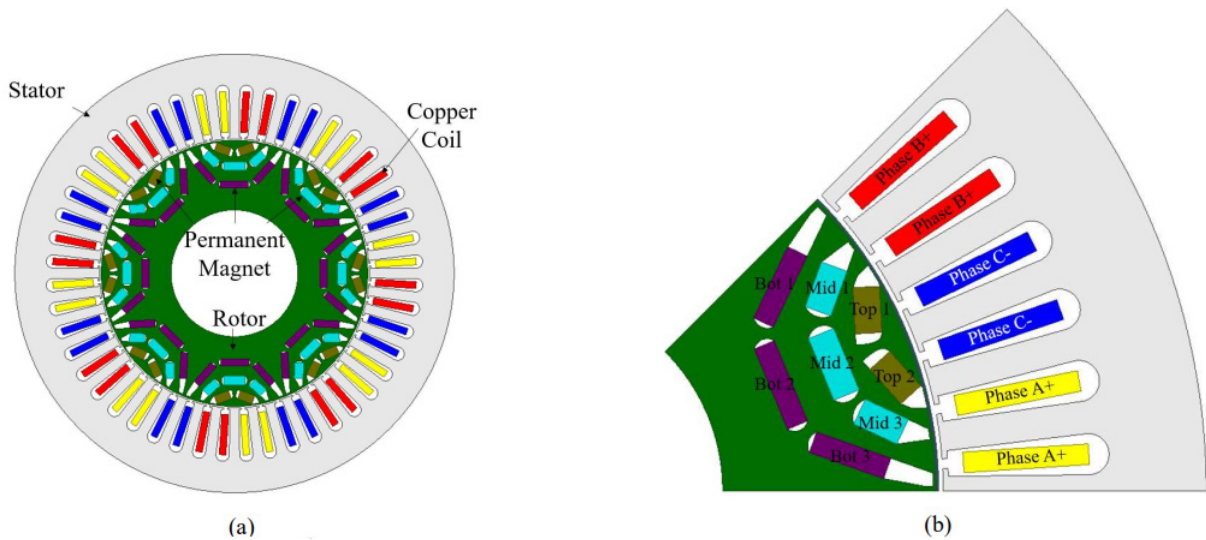


그림 7 하이브리드 방식의 PMA SynRM 구조[8]

그런데 그림 6과 같이 영구자석을 일부 활용하여 마그네틱 토크를 발생시키면서도 릴럭턴스 토크를 최대한 활용할 수 있는 PMA SynRM(Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motor)기술이 다시 부각되면서 SynRM 설계 기술과 자석 기술을 융합하여 전기차 구동용 모터 기술로서 적정성을 검증해 나가고 있다[6]~[7].

PMA SynRM 구조는 영구자석의 사용량을 최소화하면서 릴럭턴스 토크를 증가시켜야 하기 때문에 마그네틱 토크를 최소한으로 저감시키면서도 릴럭턴스 토크를 극대화할 수 있는 자기적 구조 설계기술이 필요하다. 기술 초기에는 페라이트 자석을 적용하면서 내구성 및 출력 특성 개선을 위한 구조에 많은 연구가 진행이 되었다. 최근에는 희토류 자석을 사용하여 Flux barrier를 증가시키면서 보다 릴럭턴스 토크의 양을 증가시킬 수 있는 구조가 연구되고 있다. 또한, 고출력 사양으로 적용되면서 발생 토크에 따른 회전자 Flux barrier 끝단의 rib 변형과 삽입된 자석의 후착자 특성에 대한 기술이 검토되고 있다. 이러한 연구중에는 출력 특성 및 착자성을 동시에 향상시킬 수 있도록 그림 7과 같은 하이브리드 방식으로 페라이트 자석과 희토류 자석을 동시에 적용하는 연구도 수행되고 있다[8]. 특히, Flux barrier의 최적 설계 과정에서 자기경로(Flux path)는 후착자 공정시 착자가 원활하지 못하는 구조로 설계될 수 있기 때문에 반드시 착자 성능에 대한 분석이 수반되어야 한다.

4. 결 론

본고에서는 최근 자동차용 구동 시스템으로 전동화의 핵심 부품 중 하나인 모터 기술에 대해 고찰해 보았다. 특히, 비출력을 향상시키려는 업계의 기술 방향성에 따라 영구자석 소재의 사용은 앞으로도 더욱 많아질 것으로 예측된다. 하지만, 고성능의 영구자석에 사용되는 희토원소의 수급 불안정성으로 인하여 탈희토 영구자석에 대한 요구도 지속적으로 증가하고 있다. 이에 현재 개발된 입자미세화 기술과 입계확산 기술 등을 통해 영구자석에 사용되는 중(重)희토 저감이 가능해졌으며, 경(輕)희토를 Ce 등으로 치환하는 대체 기술의 개발로 인하여 상대적으로 가격이 낮은 저가형 희토 영구자석 제품이 모터에 적용되어 앞으로의 영구자석형 동기 전동기 기술은 더욱 확대될 것으로 예상된다. 이에 영구자석 사용량을 저감시킬 수 있는 모터 설계기술이 병행된다면 현재보다는 더욱 경쟁력 있는 모터 제품을 만날 수 있게 되리라 기대할 수 있다.

[참고문헌]

- [1] 정우형, 이윤식, 김윤희, 김진주, “글로벌 희토류 산업 동향”, 대한무역투자진흥공사, 2019.7
- [2] 김수민, 이현숙, 이우영, “희토류 영구자석의 현황과 전망”, Journal of the Korean Magnetics Society, 2018.11

- [3] 최철진, 박지훈, 임정태, 김종우, “영구자석 재료의 개발현황 및 향후 발전 방향”, 대한금속재료학회지, 2021.11
- [4] 성림첨단산업, “하이브리드차 구동모터용 중희토철감형 희토류영구자석 개발”, 산업통상자원부, 2016.10
- [5] Toyota Motor Corporation, “Toyota Develops New Magnet for Electric Motors Aiming to Reduce Use of Critical Rare-Earth Element by up to 50%”, 2018.2
- [6] T. Mohanarajah M. Nagrial J. Rizk A. Hellany, “Permanent Magnet Optimization in PM Assisted Synchronous Reluctance Machines”, 2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics, 2018
- [7] Enrico Carraro, Micheie Degano, Nicola Bianchi, “Permanent Magnet Volume Minimization in Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motors”, 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, 2013
- [8] Hoyun Won, Yang-Ki Hong, Minyeong Choi, Briana Bryant, Jonathan Platt, Seungdeog Choi, “Cost-Effectiveness Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicle”, 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2021

저자소개

강동우(Kang, Dong-Woo)

2006년 한양대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업
 2011년 동 대학교 대학원 졸업(공학박사)
 2011년~2014년 삼성전자 모터개발그룹(책임)
 2014년~현재 계명대학교 전자전기공학부 (부교수)
 현재 당 학회 B부문회 논문편집이사
 주 연구분야: 전기기기, 친환경 자동차 전동화 시스템





비희토류 및 희토류 저감 영구자석 전동기 연구 동향

Research Trends for Rare-Earth Free or Reduced Permanent Magnet Motors

김원호 | 가천대학교

Kim, Won-Ho | Gachon University



요 약

최근 희토류 가격 및 수급 불안정 문제는 많은 산업에 영향을 주고 있다. 희토류 자석을 주로 사용하는 전동기 분야도 이에 대한 대책이 절실하다. 본고에서는 중희토류 배재 영구자석 활용 전동기, 희토류 영구자석 사용량 저감 전동기, 페라이트 영구자석 활용 전동기에 대한 소개를 통해 새로운 해결 방안을 도출하고자 한다.

Abstract

Recently, instability issues regarding rare earth resource prices and supply and demand are affecting many industries. In the motor field, which mainly uses rare earth magnets, countermeasures against this are urgently needed. In this paper, i try to derive a new solution by introducing heavy rare earth permanent magnets motors, reduced rare-earth permanent magnets motors, and ferrite permanent magnets motors.

1. 서 론

최근 고성능 영구자석 전동기는 전기자동차를 비롯하여 로봇, 드론 등의 전력기반 구동 시스템 분야의 주요 핵심 부품으로 자리 잡았다[1]. 수요의 급증에 따라 고성능화 및 원가 절감의 요구가 늘고 있으나, 희토류 가격 폭등 및 중국의 수출 통제 정책으로 인해 희토류 원소재의 수급이 불안정하여 관련 산업에 어려움이 증폭되고 있다. 최근에도 코로나 이후 중국의 경제활동 재개로 희토류 산화물과 복합제품의 가격 지수가 3개월 사이 30% 이상 급등하며 관련 분야 제품의 원가 부담이 더욱 가중되고 있

다. 근본적인 해결의 위해서는 정부 주도의 희토류 자원의 안정적인 수급도 중요한 화두지만, 희토류를 배재하거나 희토류 사용을 줄인 영구자석 소재를 활용한 전동기 기술의 개발 또한 반드시 병행되어야 한다.

본고는 대표적인 희토류 자석인 네오디뮴 (Neodymium, Nd) 자석에서 중희토류인 디스프로슘 (Dysprosium, Dy)을 사용하지 않는 영구자석을 활용한 전동기, 희토류 자석의 사용량 자체를 줄이는 새로운 컨시퀀트 폴 (Consequent Pole) 전동기, 비희토류 자석인 페라이트 (Ferrite) 자석을 활용한 새로운 자속 집중형 전동기에 대하여 소개하고자 한다.



그림 1 중국 희토류 가격지수 추이

2. Dy-Free Nd 자석 활용 전동기 설계

전기자동차를 비롯한 많은 분야에서 영구자석의 내열특성은 매우 중요한 성능 지표이다. Nd계 자석에서 이런 온도 특성 및 불가역 감자를 막는 보자력 특성 향상을 위하여 Dy를 첨가하고 있다. 하지만 Dy는 중희토류로 자원 조달이 매우 어려우며 가격 변동폭이 매우 심하여 이를 배제한 Dy-Free Nd 자석 개발이 많이 진행되고 있다[2]~[6]. 하지만 성능을 많이 향상 시켰음에도 그림 2와 같이 150°C 기준 보자력이 기존 자석 대비 20% 이상 떨어지

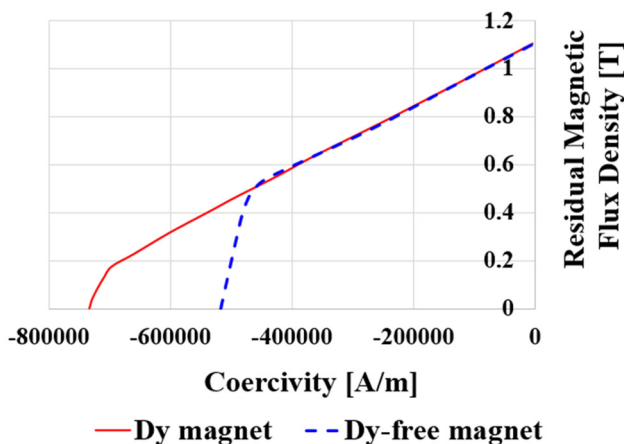


그림 2 Nd 자석과 Dy-Free Nd 자석의 150°C 기준 B-H 특성 곡선

며, 불가역 감자의 시작점인 Knee Point 역시 2사분면에 많이 노출되어 있는 것을 확인할 수 있다[7]. 그림 3은 35kW급 하이브리드 자동차용 구동 전동기 회전자에 기존 Nd 자석과 Dy-Free Nd 자석을 삽입하였을 때 극악 조건에서 기존 자석은 불가역 감자를 검토한 결과이다. 그림에서 파란색 영역이 불가역 감자가 발생하는 부분으로 기존 자석의 감자율은 1% 미만인 반면 Dy-Free Nd 자석은 20%의 감자율이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 Dy-Free Nd 자석을 활용하기 위해서는 불가역 감자에 강건한 회전자 설계가 필수임을 알 수 있다.

영구자석의 불가역 감자를 줄일 수 있는 방법은 2가지로 요약할 수 있다. 첫 번째는 불가역 감자의 원인인 반자계를 큰 자기 저항으로 막는 방법이다. 예를 들면 영구자석 앞의 전기 강판에 홀을 뚫는다거나 영구자석을 회전자 안쪽으로 내리는 방법이 이에 해당한다. 두 번째는 반자계를 흘려 보내는 방법이다. 이는 영구자석으로 직접 침투할 수 있는 반자계 자속을 투자율이 큰 전기 강판을 돌기 구조 등으로 덧대는 방식으로 구현이 가능하다. 하지만 위 두가지 방법은 불가역 감자를 줄이는 것에는 효과적이지만 대부분 전동기의 성능(토크, 효율 등)에는 악영향을 미친다.

참고문헌 [7]에서는 기존 Bar 타입 회전자를 V 타입으로 변경하여 불가역 감자를 1차적으로 줄이며 성능을 향상시켰다. 다음으로 그림 4와 같이 영구자석을 45개의 영역으로 나누고 각 영역의 기여도 분석을 통하여 영구자석의 어느 부분이 전동기의 성능에 크게 기여하는지를 확인하고 불가역 감자 영역을 기여도가 작은 영역으로 옮기는 설계를 수행하였다. 특히 영구자석의 모서리

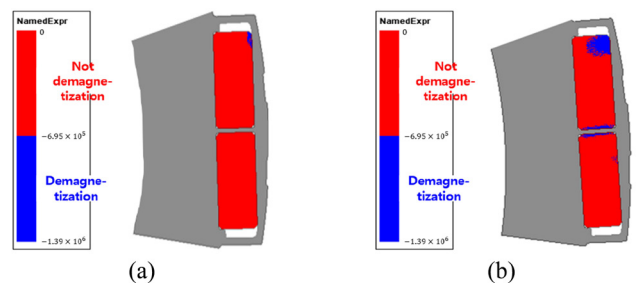
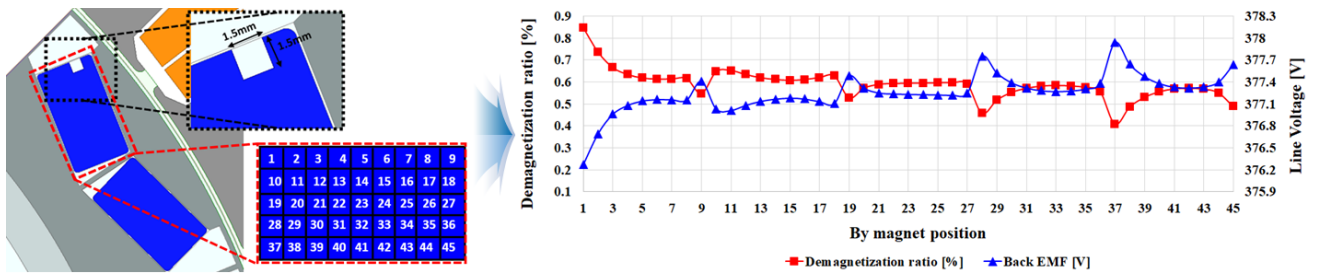


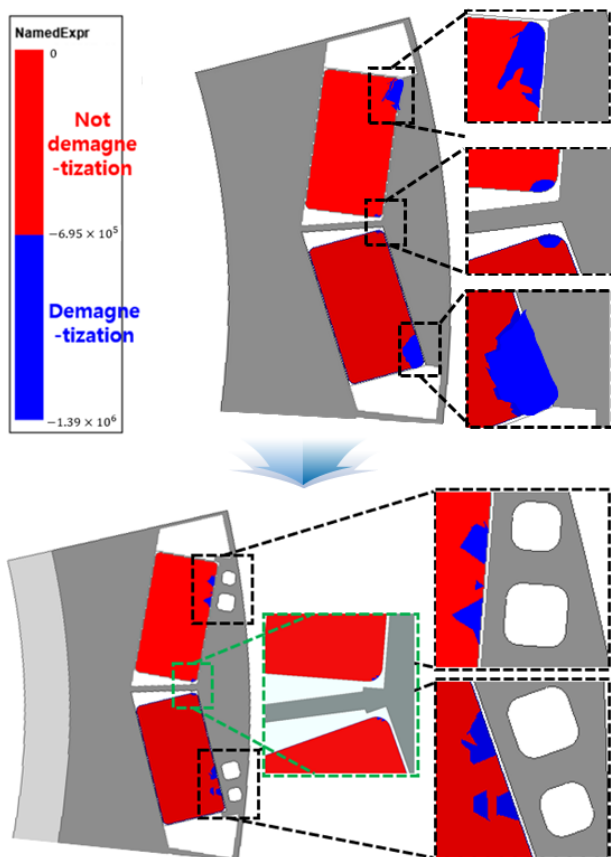
그림 3 개선 전 회전자 기준 불가역 감자 영역
(a) Nd 자석 (b) Dy-Free Nd 자석



출처 참고문헌 7

그림 4 자석 영역별 성능 기여도 및 감자율 분석

부분에서 발생하는 불가역 감자는 역기전력 저하에 큰 영향이 있음을 확인하고, 이 영역에 영향을 주는 반자계를 그림 5와 같이 사각 홀 2개와 영구자석 옆 돌기구조를 통하여 영역을 줄이며 안쪽으로 밀어내는 설계가 진행되었다. 최종적으로 Dy-Free 자석을 활용하여 감자율을 1% 이하로 낮추며 기존 전동기와 동등 성능을 유지하는 확인 할 수 있었다.



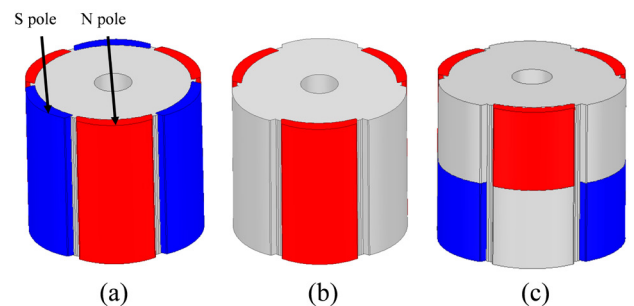
출처 참고문헌 7

그림 5 홀 및 돌기 구조를 활용한 불가역 감자 영역 저감 및 이동

3. 축방향 자속 활용 컨시퀀트 폴 전동기 설계

컨시퀀트 폴 전동기는 N극-S극 자석으로 이루어진 회전자 구조를 N극-연자성체 돌극 구조로 바꾸어 회로류 자석 사용량을 극단적으로 줄이는 구조이다[8]-[11]. 그림 6 (b)과 같이 영구자석 사용량을 50% 저감하면 성능은 23% 감소하는 것을 확인할 수 있어 적응을 줄이는 것보다 자석 사용량을 절감할 수 있어 가전 등 가격 경쟁력이 중요한 전동기에 적용 검토되고 있다. 하지만 컨시퀀트 폴 전동기는 기존 영구자석을 100% 사용하는 전동기에 비해 성능이 떨어지는 문제와 함께 자석을 한쪽 극만 사용하는 회전자 형태로 인하여 자속이 비대칭으로 흐른다는 것이 많은 문제를 야기한다. 이는 그림 7과 같이 역기전력의 비대칭을 야기하여 추가적인 고조파를 발생시키며 코깅 토크 및 토크 리플을 증가시키며 소음 진동의 원인을 야기시킨다.

이런 컨시퀀트 폴 전동기의 비대칭 자속을 보완하기 위하여 그림 6 (c)와 같이 동일 형태의 회전자를 적층 방향으로 2분할하여 한 층은 N극-돌극 구조를, 다른 한 층은 돌극-S극 구조를 적용하



출처 참고문헌 12

그림 6 회전자 형상 (a) 표면부착형 영구자석 전동기 (b) 컨시퀀트 폴 전동기 (c) 2단 컨시퀀트 폴 전동기

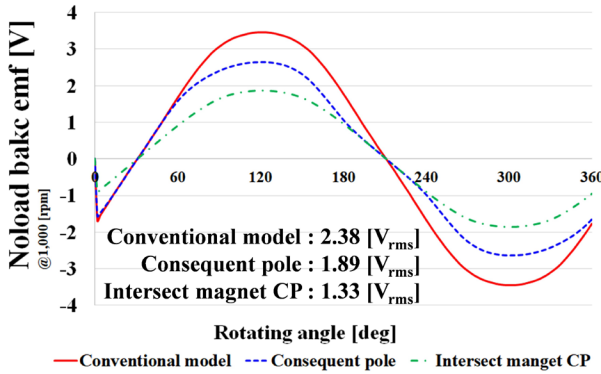
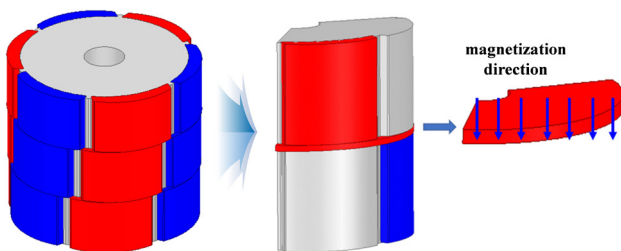


그림 7 일반 회전자, 컨시퀀트 폴 회전자, 2단 교차 컨시퀀트 폴 회전자 무부하 역기전력 및 코깅토크 파형

여 자속의 대칭성을 구현할 수 있다. 하지만 이런 구조는 자석과 위아래 돌극 구조 사이에 축방향 누설을 크게 발생시켜 그림 7과 같이 성능은 기존 컨시퀀트 폴 전동기보다 떨어지게 된다.

이를 보완하기 위하여 참고문헌 12에서는 2단 회전자 사이를 띄워 축방향 누설 자속을 줄일 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 그림 8과 같이 띄운 공간에 축방향으로 착자된 보조 자석을 삽입하면 이 자석이 위쪽과 아래쪽 돌극쪽으로 자속을 집중시키며 성



출처 참고문헌 12

그림 8 2단 컨시퀀트 폴 + 축방향 보조자석 회전자 구조

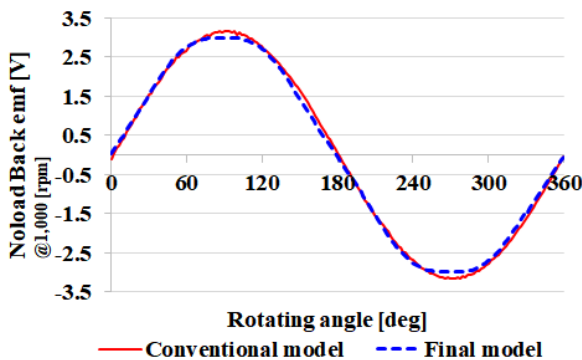
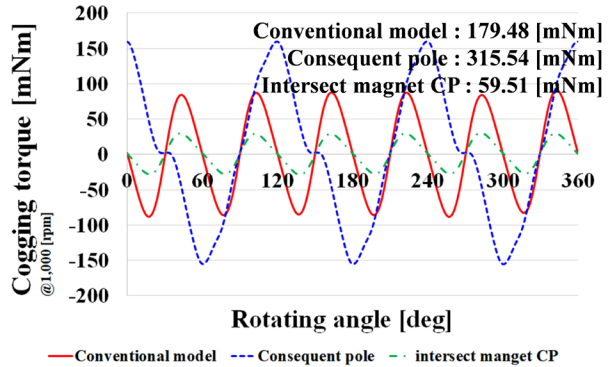


그림 9 3단 스큐 회전자, 2단 교차 컨시퀀트 폴 + 축방향 보조자석 회전자 무부하 역기전력 및 코깅토크 파형

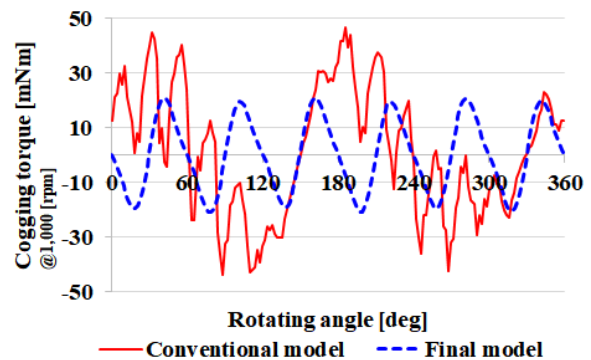


출처 참고문헌 12

능 향상에 기여할 수 있음을 알 수 있다. 이 최종 모델은 코깅 토크를 줄이기 위해 3단 스큐를 적용한 기존 모델과 비교해 보면 자석 사용량은 30% 가량 저감되었고, 그림 9와 같이 무부하 역기전력 및 토크는 기존 모델과 동등 수준이나 코깅 토크 및 토크 리플은 저감됨을 확인하였다. 특히 회전자 스큐를 적용한 모델은 코깅 토크에 기본과 성분은 줄이지만 고조파 성분이 많이 끼는 단점이 있는 반면 제안 모델은 기본파와 고조파 성분을 동시에 줄일 수 있어 진동, 소음 측면에서 유리한 면이 있다. 제안된 구조 및 설계 프로세스는 기존 양산 모델에서 간단한 금형 수정 및 설계 변경 최소화를 통해 자석 사용량을 줄이며 성능을 맞출 수 있는 방법 중 하나로 판단된다.

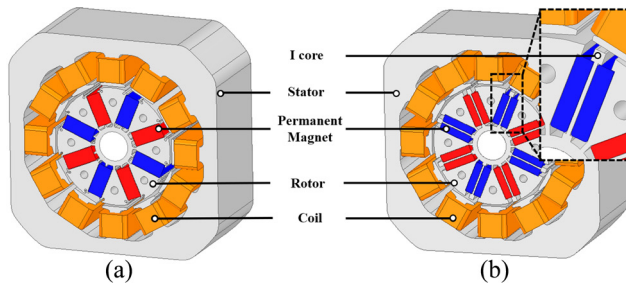
4. 분할형 자속집중형 페라이트 전동기 설계

회로류 자석을 대체하기 위하여 잔류자속밀도와 보자력이



출처 참고문헌 12

낮은 페라이트 자석을 사용하여 자속을 집중시킬 수 있는 구조인 자속집중형 스포크 타입에 대한 연구 개발이 가전을 중심으로 많이 진행되었다[13-14]. 하지만 그림 10 (a)와 같은 양산 가능한 스포크 타입 회전자에는 많은 설계 및 성능 제한이 존재해 다양한 곳에 사용되지는 못하고 있다. 이유는 3가지 정도로 요약할 수 있다. 첫 번째는 페라이트 자석의 특징인 저온 불가역 감자로 보자력이 회토티 대비 낮다는 점이다. 두 번째는 자석을 회전자 방사방향으로 깊숙이 삽입하는 구조로 대량 생산을 위해 반드시 필요한 자석 조립 후 착자 공정에 큰 어려움이 있다. 세 번째는 고속화에 어려움인데 이는 기구적인 원인과 전자기적인 원인으로 나뉜다. 기구적으로는 회전자의 폴피스와 자석이 회전자 백요크에 붙어 있는 브릿지에만 의존해 비산을 방지해야 하는 구조에 문제가 있다. 전자기적인 원인으로서는 자속 집중으로 인하여 전압 제한치의 중심이 전류제한원에서 멀게 설계되어 고속 운전 특성이 급격히 떨어지게 된다.



출처 참고문헌 15

그림 10 페라이트 자석 활용 전동기
(a) 기존 자속집중형 회전자 (b) 분할 자속집중형 회전자

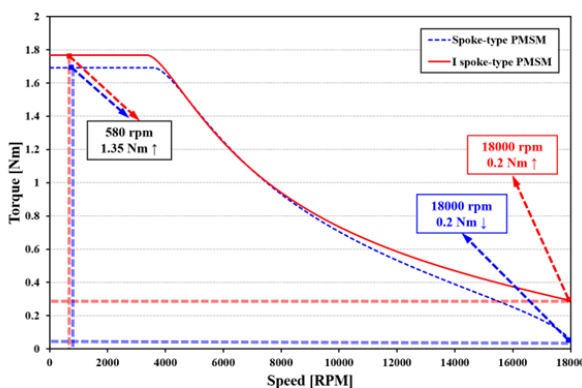
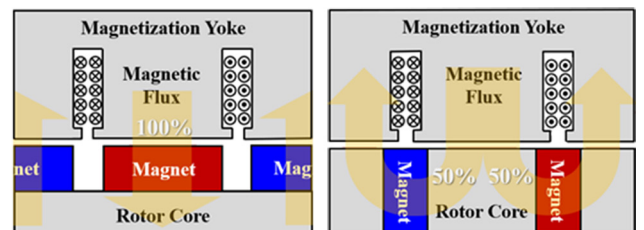


그림 11 기존 자속집중형과 분할 자속집중형 전동기의 속도-토크 곡선과 전압-전류 제한원 비교

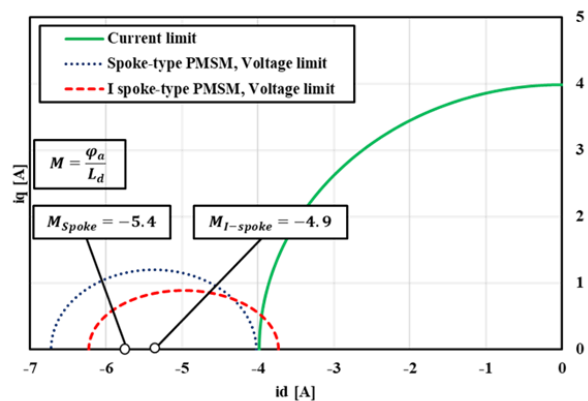
위와 같이 자속집중형 스포크 페라이트 전동기의 문제를 보완하기 위해 그림 10 (b)과 같이 자석을 분할하고 그 사이에 회전자 백요크에서부터 이어진 I자 형태의 코어를 추가한 구조를 주목할 필요가 있다[15]. I자 형태의 코어는 q축 자로의 자기 저항을 줄여 d축, q축 인덕턴스 차이를 키워 릴럭턴스 토크 성분을 추가적으로 사용할 수 있다. 이는 자석 분할로 인해 줄어든 마그네틱 토크를 보완해 줄 수 있으며 고속 운전에도 도움을 줄 수 있다. 이런 특성은 그림 11과 같이 정토크 영역 토크를 유지하면서 고속 운전 영역 특성을 향상시킬 수 있으며, 전압제한원의 중심을 전류제한원에 가깝게 설계가 가능함을 알 수 있다.

스포츠 타입의 전동기는 조립 후 착자가 매우 까다롭다. 이는 그림 12와 같이 착자 자속을 다 쓸 수 없다는 점과 착자 자속이 회전자 안쪽까지 침투하지 못해 부분 미착자 영역이 발생한다는 점이다. 그림 13을 보면 같은 사양에 착자요크를 사용해도 두꺼운 자석을 사용한 기존 모터는 4회 분할 착자를 해야 하나 분할 자속집중형은 2회 분할 착자로 착자시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

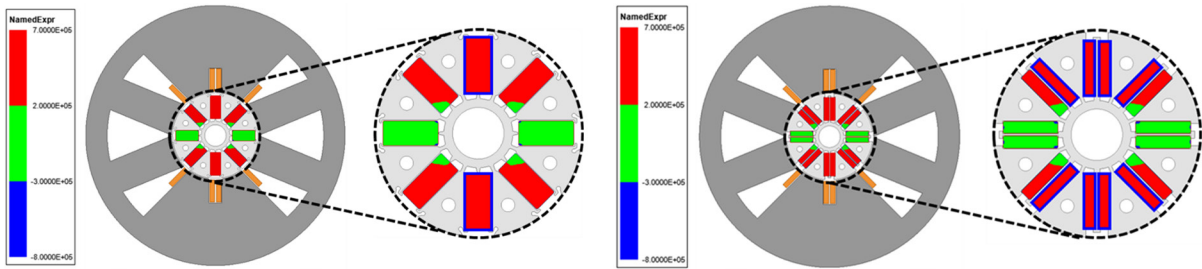


출처 참고문헌 15

그림 12 일반적인 표면부착형 회전자와 스포크형 회전자의 착자 자속 차이

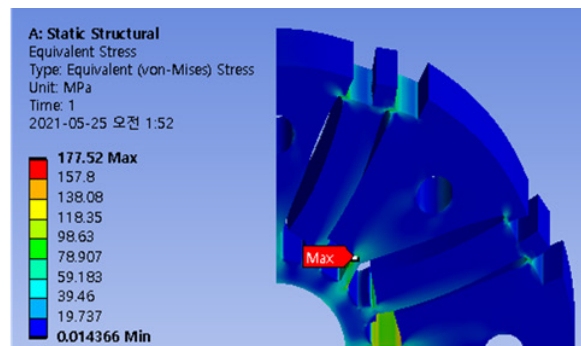
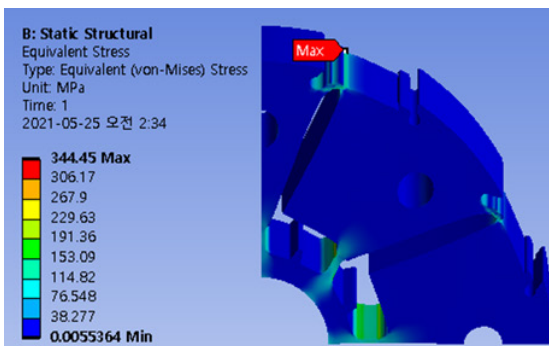


출처 참고문헌 15



출처 참고문헌 15

그림 13 기존 자속집중형과 분할 자속집중형 전동기의 조립 후 착자 성능 비교



출처 참고문헌 15

그림 14 기존 자속집중형과 분할 자속집중형 전동기의 고속 운전 응력 비교

또한 영구자석 사이 I자 형태의 코어는 그림 14과 같이 고속 회전 시 비산을 막아주며 2장에서 이야기한 영구자석 불가역 감자 방지 대책 중 하나인 감자 자속을 by-pass 시켜 페라이트 자석의 부분 불가역 감자를 줄여준다.

마지막으로 그림 15와 같이 분할 자속집중형 구조의 폴피스와 I 형태 코어의 비대칭 구조를 통해 코깅 토크의 위상을 이동시키고 교차 적층함으로 그 크기를 줄일 수 있는 구조도 1개의 금형과 카운터 펀치만으로 구현 가능하며 페라이트 자석을 적층방향

으로 분할 및 스큐 없이 스큐 효과를 줄 수 있어 소음 진동 저감 설계에 참고할 만하다[16].

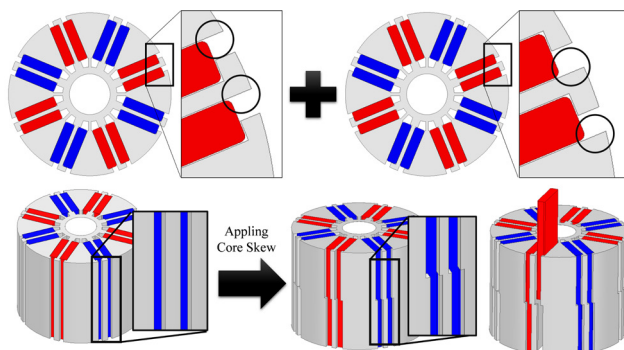
5. 결론

본 고에서는 희토류 영구자석 동기 전동기를 대체할 수 있는 중 희토류 배제 영구자석 활용 전동기, 희토류 영구자석 사용량 저감 전동기, 페라이트 영구자석 활용 전동기에 대한 구조 및 설계시 고려할 점에 대하여 고찰하였다.

향후 희귀 자원 수급에 대한 문제는 시간이 지난다고 해결될 문제는 아니며 오히려 더욱 어려운 과제로 우리에게 다가올 것이다. 따라서 희귀 자원을 대체하고 사용량을 줄일 수 있는 연구 개발은 앞으로 계속 되어야 하며, 이를 위해 소재, 부품, 시스템 단위의 모든 연구자들이 같이 고민해서 다양한 해결 방법이 도출되길 기대해 본다.

[참고문헌]

- [1] T. H. Kim, H. W. Lee, and S. S. Kwak, "The internal fault analysis



출처 참고문헌 16

그림 15 분할 자속집중형 전동기의 비대칭 코어 교차 적층

- of brushless DC motors based on the winding function theory," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 5, pp. 2090-2096, May 2009
- [2] D. Y. Feng, Z. W. Liu, Z. G. Zheng, X. C. Zhong and G. Q. Zhang, "Hard Magnetic Properties and Thermal Stability for TbCu7-Type SmCo6.4Si0.3Zr0.3 Alloys With Sm Substituted by Various Rare-Earth Elements," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 10, pp. 1-4, Oct. 2015
- [3] S. V. Taskaev et al., "Magnetic Properties of Nd and Sm Rare-Earth Metals After Severe Plastic Deformation," in IEEE Magnetics Letters, vol. 7, pp. 1-4, 2016
- [4] F. Saito, D. Miura and A. Sakuma, "Theoretical Study of Gilbert Damping in Rare-Earth Permanent Magnets," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 7, pp. 1-4, July 2019
- [5] B. Poudel, E. Amiri, P. Rastgoufard and B. Mirafzal, "Toward Less Rare-Earth Permanent Magnet in Electric Machines: A Review," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 9, pp. 1-19, Sept. 2021
- [6] L. Chen et al., "Coercivity Enhancement of Dy-Free Sintered Nd-Fe-B Magnets by Grain Refinement and Induction Heat Treatment," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-3, Nov. 2015
- [7] S.W. Song, P.J. Pyo, D.W. Nam, J. Lee and W.H. Kim, "Irreversible demagnetization improvement process of hybrid traction motors with Dy-free magnets," Machines, vol. 11, Jan. 2023, <https://doi.org/10.3390/machines11010004>
- [8] Kwon, J.-W.; Kwon, B.-I. Torque Enhancement Principle of Stator PM Vernier Machine by Consequent Pole Structure. Energies 2022, 15, 2993. <https://doi.org/10.3390/en15092993>
- [9] S. -W. Song, I. -J. Yang, S. -H. Lee, D. -H. Kim, K. S. Kim and W. -H. Kim, "A Study on New High-Speed Motor That Has Stator Decreased in Weight and Coreloss," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 2, pp. 1-5, Feb. 2021, Art no. 8201105, doi: 10.1109/TMAG.2020.3012482
- [10] Y. Ueda, H. Takahashi, T. Akiba and M. Yoshida, "Fundamental Design of a Consequent-Pole Transverse-Flux Motor for Direct-Drive Systems," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 7, pp. 4096-4099, July 2013, doi: 10.1109/TMAG.2013.2240277
- [11] Hattori, A.; Noguchi, T.; Murakami, K. Mathematical Model Derivation and Experimental Verification of Novel Consequent-Pole Adjustable Speed PM Motor. Energies 2022, 15, 6147. <https://doi.org/10.3390/en15176147>
- [12] Song, S.-W.; Hong, M.-K.; Lee, J.; Kim, W.-H. A Study on Reduction of Cogging Torque and Magnet Usage through Intersect Magnet Consequent Pole Structure. Energies 2022, 15, 9255. <https://doi.org/10.3390/en15239255>
- [13] Dorrell, D.G.; Hsieh, M.-F.; Knight, A.M. Alternative rotor designs for high performance brushless permanent magnet machines for hybrid electric vehicles. IEEE Trans. Magn. 2012, 48, 835-838
- [14] 2. Rahman, M.M.; Kim, K.-T.; Hur, J. Design and optimization of neodymium-free SPOKE-type motor with segmented wing-shaped PM. IEEE Trans. Magn. 2014, 50, Art. ID 7021404
- [15] Jeong, M.-J.; Lee, K.-B.; Pyo, H.-J.; Nam, D.-W.; Kim, W.-H. A Study on the Shape of the Rotor to Improve the Performance of the Spoke-Type Permanent Magnet Synchronous Motor. Energies 2021, 14, 3758. <https://doi.org/10.3390/en14133758>
- [16] Nam, D.-W.; et al. A Study on Core Skew Considering Manufacturability of Double-Layer Spoke-Type PMSM. Energies 2021, 14, 610. <https://doi.org/10.3390/en14030610>

저자소개

김원호(Kim, Won-Ho)

2005년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업
 2011년 동 대학교 대학원 졸업(공학박사)
 2011년~2017년 삼성전자 종합기술원 전문연구원
 2017년~현재 가천대학교 전기공학과 부교수
 주 연구분야: 전기기기 설계



금오공과대학교 전력반도체 연구실 소개

석오균, 박영은

연구실 개요

금오공과대학교 전자공학부 석오균 교수의 전력반도체 연구실은 2020년 신설되어 차세대 전력반도체 분야의 다양한 연구를 수행해왔다. 특히 전기차 전력변환 시스템의 핵심 반도체인 SiC를 중심으로 GaN, Diamond, Ga_2O_3 물질에 대한 공정, 설계, 분석 및 평가 등의 다양한 연구가 진행되고 있다. 또한, 우주환경에서 방사선이 전력반도체 소자에 미치는 영향성을 분석한 내방사선 전력반도체 소자 설계 및 1.2 kV 급 SiC MOSFET, 10 kV 급 SiC Diode 설계를 추진 중이다. 연구실 구성원은 석사와 정생 5명, 학부연구생 6명으로 국책과제와 다양한 기업체와의 프로젝트를 통해 차세대 전력반도체 및 친환경 어플리케이션 분야의 발전에 기여하고 있다.



1. 전력반도체란?

전력반도체란 전기 에너지를 활용하기 위해 직류 및 교류 변환, 전압, 주파수 변화 등의 제어처리를 수행하는 반도체로, 전력을 생산하는 단계부터 사용하는 단계까지 수행하게 되는데 스마트폰, 자동차, 가전제품 등 전기로 작동하는 제품의 작동 여부 및 성능을 결정짓는 핵심부품으로 작용한다. 최근 들어 전력반도체는 전기자동차, 태양광발전 등 다양한 분야에 적용이 확대되고 있으며, 스마트폰과 태블릿PC 등 모바일 디바이스의 급성장으로 수요가 증가하고 있다. 특히, 4차 산업혁명 시대의 도래로 인해 스마트카, 자율주행차, 로봇, 태양전지, 사물인터넷(IoT), 스마트그리드, 항공우주, 5G 이동통신 등 관련 산업이 성장함에 따라 수요가 급격히 늘어날 것으로 예상된다.

기존 Si 반도체 대비 넓은 밴드갭과 높은 파괴전계를 가져 낮은 온-저항 및 높은 온도 안정성, 빠른 동작속도, 높은 전력변환 효율을 가지는 화합물 반도체 그중에서도 특히 SiC 및 GaN에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 기존 Si 전력반도체 대비

기술의 성숙도가 낮고 wafer 의존도가 높으나 제한된 업체에서 wafer를 생산하고 있고 파운드리 사업마저 활성화되어있지 않기 때문에 반도체 제작에 어려움을 겪고 있다.

SiC는 Si 대비 약 3배 큰 밴드갭을 바탕으로 낮은 온-저항 및 높은 전력변환 효율을 가져 주변 회로 및 냉각시스템을 간소화할 수 있다. 또한, 에피 성장이 가능하여 수직형 전력반도체 제작

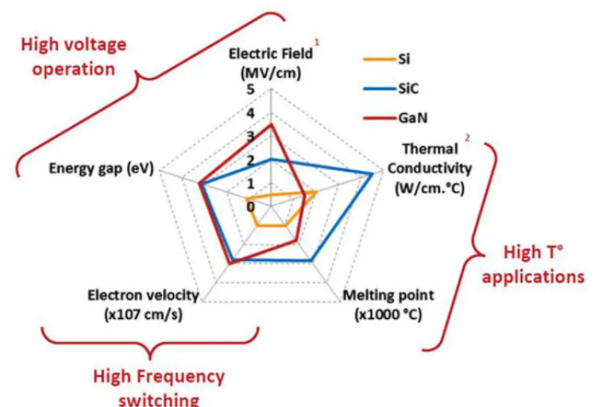


그림 1 재료별 특성 그래프

에 사용되고, 이온주입을 통한 n형과 p형 반도체 제작, SiO_2 게이트절연막 성장이 가능하므로 기존 Si 공정과 유사한 구조 및 공정을 가진다.

GaN은 SiC보다 더 큰 밴드갭을 가지며 채널 전자이동도가 더 높아 온-보드 충전기로의 연구가 진행되었지만, 최근엔 차량 배터리의 고전압화에 따라 높은 전압의 환경에서도 안정적인 SiC로 대체되었다.

2. 우주환경용 고신뢰성 SiC 전력반도체 연구

방사선은 우주환경에서 영향을 미칠 뿐만 아니라 우리가 먹는 음식, 매일 쬔 태양에도 존재한다. 방사선 환경에서의 반도체 소자 특성 저하 문제는 종종 야기되고 있으며, 지금까지 우주로 간 전장품의 오작동 원인 중 약 30%가 우주방사선의 영향으로 알려져 있다. 우주방사선의 에너지 입자들은 랜덤하게 전장품과 충돌하여 오작동에 영향을 끼치며 고준위 우주방사선 노출 영향에 대한 우려도 커지고 있다. 고신뢰성을 요구하는 우주, 항공 등의 분야에서 내방사화 기술의 부재는 우주탐사의 임무 실패뿐만 아니라 사회 기반 시설의 오작동으로 이어져 막대한 물적·인적 손실을 초래할 수 있다. 때문에 내방사선 전자 부품을 구성할 차세대 반도체 개발이 필요한 실정이다.

금오공과대학교 전력반도체 연구실에서는 방사선이 SiC 전력반도체 소자에 미치는 영향을 분석하기 위해 한국원자력연구원의 양성자, 감마선 조사 장치를 활용하여 연구를 진행 중이다. 방

사선 조사는 경주 원자력연구원에서 1년에 약 6회 정도 진행하고 있다. 상용소자 뿐만 아니라 자체 설계 및 공정을 수행한 소자에 방사선을 조사함으로써 내방사선 전력반도체의 원활한 개발이 가능하다.

또한 양성자와 감마선 조사 후 소자에 영향을 끼치는 파라미터 변화에 대한 수식을 모델링함으로써 시뮬레이션 상에서도 방사선 조사 특성을 확인할 수 있도록 연구 중이다.

3. 1.2 kV 급 SiC MOSFET 소자 설계

SiC는 타 전력반도체 소재(Si , Ga_2O_3) 대비 높은 열전도도 특성을 가져 시스템의 경량화와 전기자동차 및 하이브리드 자동차 등의 친환경 자동차의 주행거리 개선이 가능하다. 또한 최근 고전압 직류 송배전 분야에서 1.2 kV급 SiC MOSFET 직병렬 구성을 기반으로 전력변환 시스템을 구성하고 있으며, 기존의 Si 기반의 사이리스터를 대체함으로써 시스템의 간소화 및 송배전 효율의 개선이 이루어지고 있다. 금오공과대학교 전력반도체 연구실에서는 1.2 kV급 SiC MOSFET을 주로 연구하고 있으며 시뮬레이션 검증은 진행한 후 실제 공정에 투입하고, 반출된 소자의 특성을 평가하여 다시 시뮬레이션을 조정하는 방식으로 이루어지고 있다.

(1) Sentaurus TCAD를 활용한 MOSFET 설계 및 특성 분석

TCAD는 반도체 소자의 공정 및 구조 설계, 특성 분석에 활용되며, 생산되는 모든 반도체는 TCAD 시뮬레이션을 통해 설계된



그림 2 양성자 조사 샘플

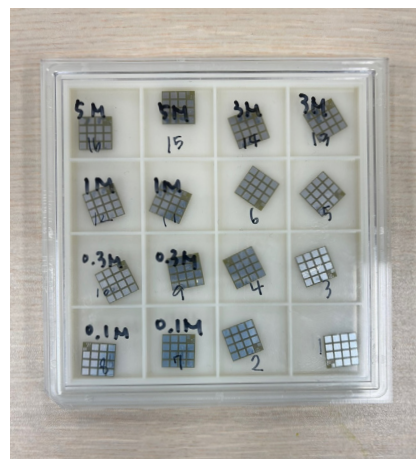


그림 3 감마선 조사 샘플

다. 주로 가상의 공간에서 반도체 소자 제작 및 구조 분석, 최적의 공정조건 또는 구조 도출, 실제로 제작된 반도체 소자의 특성 분석 및 모델링을 위해 사용되며, 현재 연구실에서는 Sentaurus TCAD를 활용하여 다양한 기업체와 공동 연구를 수행 중이다. 특히 실제상황보다 더 열악하고 보수적인 환경에서 시뮬레이션을 진행함으로써 실제 제작된 소자의 특성이 안정적으로 출력되도록 설계하고 있다.

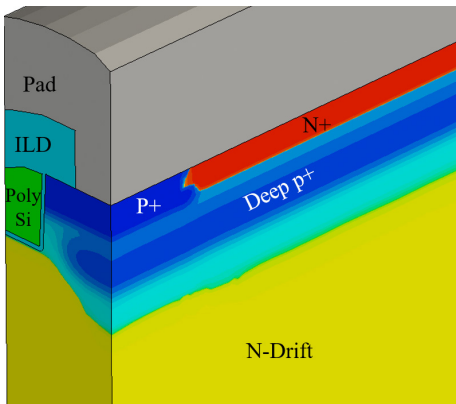


그림 4 시뮬레이션구조예시

(2) 레이아웃 설계 및 포토마스크 제작

TCAD 시뮬레이션 검증을 마치면 레이아웃 설계를 통해 포토마스크를 제작한다. 웨이퍼는 여러개의 샷으로 구성되며, 하나의 샷은 많은 칩들로 이루어져 있다. 제작된 소자가 최적의 특성을 뽑아낼 수 있도록 각각의 칩은 셀의 너비, 개수, 종단영역 패턴 등을 다르게 하여 설계한다. 보통 레이아웃은 직접 그리는 형식으로 제작되지만, 금오공과대학교 전력반도체 연구실에서는 파이썬

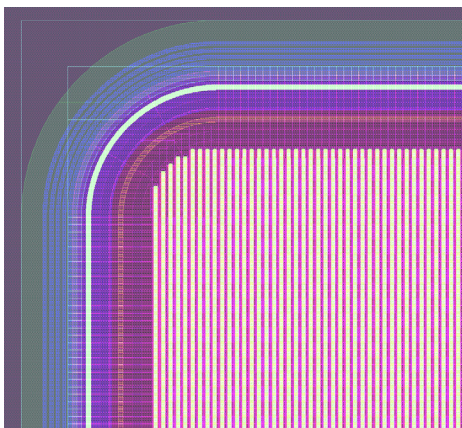


그림 5 1.2 kV SiC MOSFET 레이아웃

코드로 프로그래밍하는 기술을 보유함으로써 단시간에 레이아웃 파일을 생성시킬 뿐만 아니라 정확하고 공간 효율적인 배치가 가능하다. 최종 레이아웃이 완성되면 수많은 검토회 과정을 거친 후 마스크 제작사에 파일을 넘긴다.

(3) 소자 전기적 특성 측정

공정이 완료되면 반출된 웨이퍼의 전기적 특성을 분석한다. 금오공과대학교 전력반도체 연구실에는 상용소자 뿐만 아니라 웨이퍼 상태로도 측정 가능한 프로브 스테이션과 전력 디바이스 분석기가 구비되어 있다. 측정 장비들은 연구실 내 장비 담당자가 메뉴얼을 만들어 원활한 측정이 진행될 수 있도록 하며, 일정한 조건에서 측정하기 위해 실험실은 항온항습이 유지되도록 관리 중이다. 기본적인 온저항, 문턱전압 및 항복전압 측정뿐만 아니라 열 특성 해석, 신뢰성 테스트를 거쳐 보다 다양한 시각에서 데이터를 해석할 수 있도록 진행하고 있다.

측정이 완료되면 추출한 데이터를 분석하며, 다시 시뮬레이션을 거치는 작업을 반복한다.

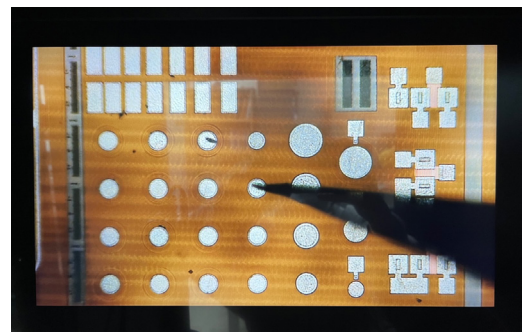


그림 6 측정 진행 중인 모습

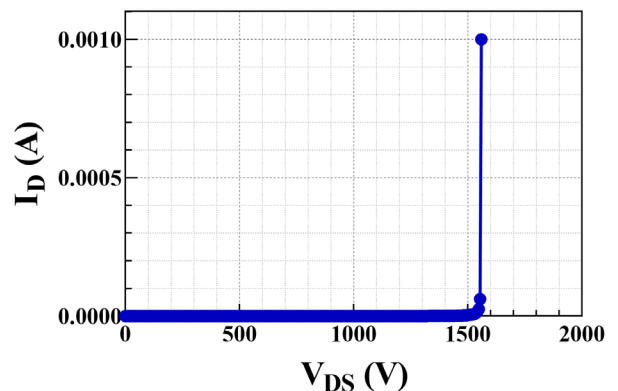


그림 7 제작한 소자의 항복전압 그래프

4. 연구실 장비 보유 현황

현재 연구실에는 원활한 소자 설계 시뮬레이션을 위한 총 3대의 서버 컴퓨터를 보유하고 있으며 추가 구축 예정이다. 주로 Sentaurus TCAD 시뮬레이션을 위한 용도로 활용하며, 서버는 서버 담당자가 주기적으로 백업을 진행하거나 사용 규칙을 정하는 등 체계적으로 관리 중이다.

측정 장비로는 프로브 스테이션, B1505a 등이 있다. MSTECH사의 MST8000C 프로브 스테이션은 5 kV/1.5 kA까지 측정 가능하며 현미경, CCD 카메라가 내장되어 있다. 또한 250도까지 인가할 수 있는 Hot chuck을 통해 소자의 열특성 해석이 가능하다.

KEYSIGHT사의 B1505A는 전력디바이스 분석기로 pA 미만부터 3 kV/500 A의 범위에서 디바이스 평가가 가능하다. 또한 고전압 CV 및 Gate charge 측정 기능이 내장되어 있다.

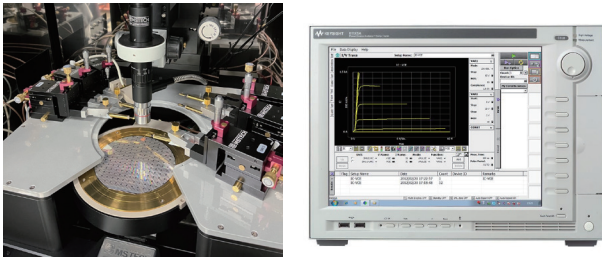


그림 8 MSTECH社의 MST8000C 및 KEYSIGHT社의 B1505A

2023년 상반기에 입고 예정인 KEYSIGHT사의 PD1500A는 동적 전력 디바이스 분석기/이중 펄스 테스터로 학교에서는 국내에서는 금오공과대학교 전력반도체 연구실이 유일하다. SiC, GaN 등



그림 9 KEYSIGHT社의 PD1500A

의 전력반도체 동적 특성 측정 및 평가가 가능하며, 높은 주파수 테스트 (GHz 범위), 낮은 누출 (fA 범위), 펄스 전력 (1.5 kA 전류, 3 kV 전압, 10 μ s 분해능) 등의 우수한 성능을 자랑한다. PD1500A를 이용한 초고속 스위칭 특성 해석 또한 진행될 예정이다.

저자소개

석오균(Seok, O-Gyun)

2008년 국민대학교 전자공학부 졸업

2013년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업
(공학박사)

2013년~2014년 일리노이 삼페인-어바나
주립대학교 박사후연구원

2014년~2020년 한국전기연구원

전력반도체연구센터 선임연구원

2020년~현재 금오공과대학교 전자공학부 조교수

2021년~현재 대한전기학회 전기물성·응용부문회 편집이사
연구분야: 회합물 기반 차세대 전력반도체 설계 및 공정 연구

e-mail : ogseok@kumoh.ac.kr



박영은(Park, Yeong-Eun)

2019년~2023년 금오공과대학교 전자공학부 졸업
(공학사)

2023년~현재 금오공과대학교 반도체시스템공학과
석사 과정

주 연구분야: 1.2 kV 급 SiC DMOSFET,
TMOSFET 설계,
레이아웃 및 공정 연구

e-mail : yepark@kumoh.ac.kr



e-파워트레인 핵심부품 개발플랫폼 체계화 기술 개발사례 소개

Development of the systematization technology of e-powertrain core parts development platform

설현수 | 한국자동차연구원

Seol, Hyun-Soo | Korea Automotive Technology Institute(KATECH)



요 약

전기자동차 보급 확대에 따라 xEV용 부품산업 저변 확대와 시장경쟁력 제고를 위하여 국내 중소/중견 부품업체는 고객사 요구에 의존적으로 대응하는 기존 개발절차를 탈피하고, 차종/차급 확대와 실제 주행조건 등 다양한 성능 요구조건을 고려한 선제적/독자적 개발이 가능하도록 지원하는 체계화된 개발플랫폼의 필요성이 대두되고 있다. xEV의 다양한 전력부하들과 e-파워트레인 핵심부품에 대한 성능 평가/검증을 단품에서 차량수준까지 지원할 수 있는 개발플랫폼을 이용하면 부품업체의 다양한 수요처에 대응이 가능하다. 따라서 본 기고에서는 개발지원 환경의 재사용, 부품간 호환성, 업그레이드 및 공유를 통해 국내 부품업체 기술개발 맞춤형 지원이 가능한 개발플랫폼 체계화 기술을 소개한다.

Abstract

In order to expand the base of the xEV parts industry and enhance market competitiveness in accordance with the expansion of electric vehicle supply, domestic small and medium-sized parts makers must break away from the existing development process of dependently responding to the needs of customers. The need for a systemized development platform that supports preemptive/independent development in consideration of various performance requirements such as vehicle model/class expansion and actual driving conditions is emerging. By using a development platform that can support performance evaluation/verification of various power loads of xEV and e-powertrain components from single unit to vehicle level, it is possible to respond to various demand sources of parts manufacturers. Therefore, this article introduces development platform systematization technology that enables customized support for technology development of domestic parts manufacturers.

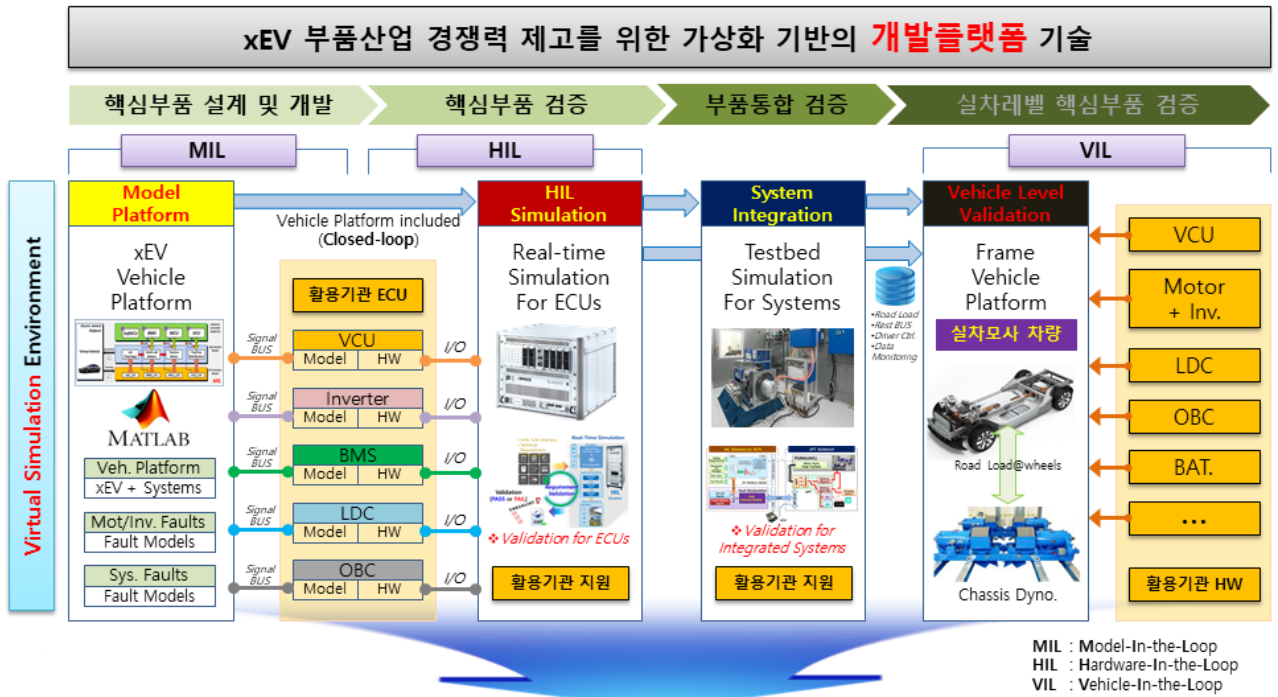
1. 개발플랫폼 체계화 기술 개요

개발플랫폼 체계화 기술은 xEV e-파워트레인 핵심부품들을 통합한 가상화 시뮬레이션 기법*(MIL/HIL/VIL)을 제품개발 단계에서 개발 플랫폼을 적용하여, e-파워트레인 핵심부품에 대한 성능 평가/검증을 단품에서 차량수준까지 지원함으로써 부품업체의 시장자립을 유도하고 다양한 수요처에 대응할 수 있도록 지원

하는 기술이다.

*MIL : Model-In-the-Loop, HIL : Hardware-In-the-Loop,
VIL : Vehicle-In-the-Loop

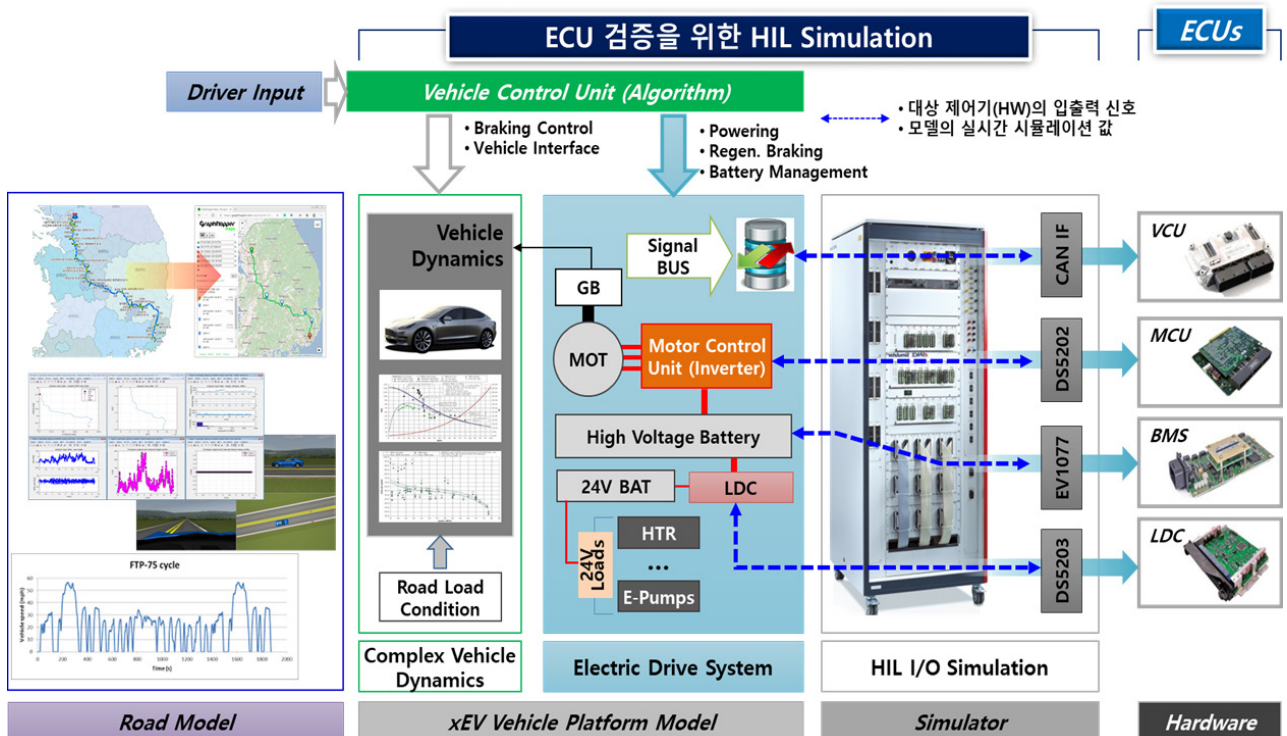
- (개발플랫폼) : 가상화 기술을 접목한 핵심부품 개발 프로세스
- (가상화 기술) : 실험치(혹은 설계치)가 반영된 핵심부품들로 구성된 e-파워트레인 기반의 차량플랫폼 모델을 활용한 가상화 시뮬레이션 기술



xEV 개발플랫폼 체계화 기술 확산을 위한 활용기업 발굴 및 상용화 기술지원

출처 : 한국자동차연구원

그림 1 가상화 시뮬레이션을 활용한 개발플랫폼 체계화 기술 개요



출처 : 한국자동차연구원

그림 2 차량플랫폼 모델과 연동한 ECU의 HIL 검증 환경(예)

- (핵심부품 검증) : V-Cycle 개발단계에서 핵심부품 제어기에 대한 검증(HIL), 핵심부품이 연동된 시스템에 대한 검증 및 차량 레벨 검증(VIL)

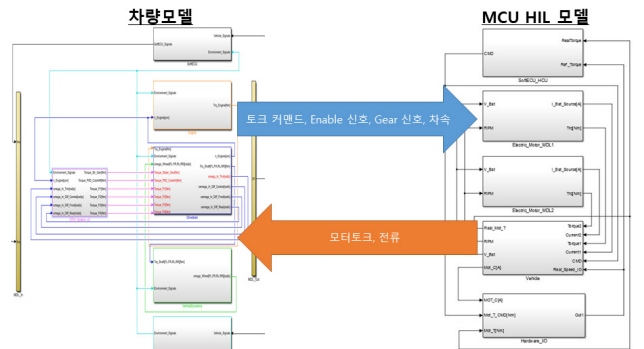
2. 차량 플랫폼 모델과 연동한 HIL (Hardware-In-the-Loop) Simulation 검증 기술

xEV e-파워트레인 핵심부품(MCU, VCU, LDC, OBC, BMS)의 제어기와 HIL Simulator간 작동조건을 모사하기 위해서, 제어기별 입력과 출력의 I/O를 기준으로 HIL 인터페이스를 구성하여 제어기의 기능요구사항을 만족하는지 평가할 수 있는 HIL 검증 환경을 구축하였다. 제어기의 기능요구사항 구현 여부는 제어기의 입출력측 신호생성 모델, 출력측 신호에 따른 플랜트 모델, 고장 신호 등을 모사하여 검증할 수 있다.

- (플랜트 모델) : 제어기의 입력과 출력 신호를 폐루프 실시간 시뮬레이션 후 정보를 제공하는 모델로 연동되는 제어기의 작동 환경을 실제와 유사하게 구현
- (고장모델) : 제어기의 고장 검출, 고장 대응 등의 기능 검증을 위한 고장모사
- (차량플랫폼 모델) : 차량 거동(가속, 제동 등), 전기적 혹은 기계적으로 연관된 부품들의 작동을 동시에 모사
- (테스트 케이스) : 핵심부품별 제어기의 기능요구사항을 기준으로 HIL 검증을 위한 Test cases 모델 개발 및 실시간 시뮬레이션 자동화 시퀀스 구성

차량 플랫폼 모델과 연동한 HIL(Hardware-In-the-Loop) Simulation 검증으로 MCU 평가를 수행하였다. 차량모델과 MCU HIL과의 연계를 위해서는 차량모델 내부에 있는 모터/인버터 모델이 MCU HIL 모델로 대체되어야 하며, MCU에서 필요한 명령 신호를 차량모델에서 구현되어야 한다. 차량모델과 MCU HIL 모델은 각각의 HIL 시뮬레이터에서 독립적으로 구동되며, 두 시뮬레이터 사이의 통신은 CAN 통신을 활용한다.

MCU HIL 테스트 환경으로 MCU HIL과 차량모델 HIL은 각 시



출처 한국자동차연구원

그림 3 차량모델과 MCU HIL 모델 연계

뮬레이터에서 구동하고, 제어 및 모니터링은 각 노트북에서 확인할 수 있다. 대상 부품인 MCU는 MCU HIL 시뮬레이터와 PWM 출력, 전류센서/Resolver 등의 센서 입력과 CAN 통신을 위한 Wiring 연결이 되어 있으며, MCU HIL과 차량모델 HIL은 CAN 통신으로 연결된다. MCU HIL에서는 PWM duty, 전류센서 출력, 모터 토크 등을 모니터링 하며, 차량모델 HIL에서는 도로연계 시뮬레이션을 위한 도로 및 주행패턴 파라미터 입력과 Key-On, 시뮬레이션 Reset 등의 제어 및 차량 위치 확인, 모터 토크, 차속 등의 모니터링을 수행한다.



출처 한국자동차연구원

그림 4 MCU HIL 테스트 환경 구축

차량모델과 실도로 주행 시나리오를 연계하여 시뮬레이션 하였으며, 강남도심로를 주행 시의 모터 rpm/토크 사용 영역으로 모사하였다. 강남도심로 원할시간대인 05h에서의 차량주행으로 Ref 속도에 추종하는 시뮬레이션 결과를 확인하였다. 차량속도 대비 모터의 토크/전압/전류 값을 모니터링 하였으며, 원할시간대의 강남 도심로에서 교차로의 신호등을 고려하여 정차구간이

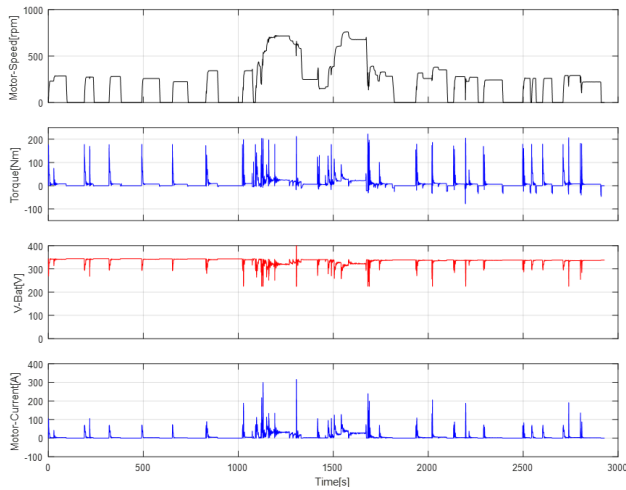
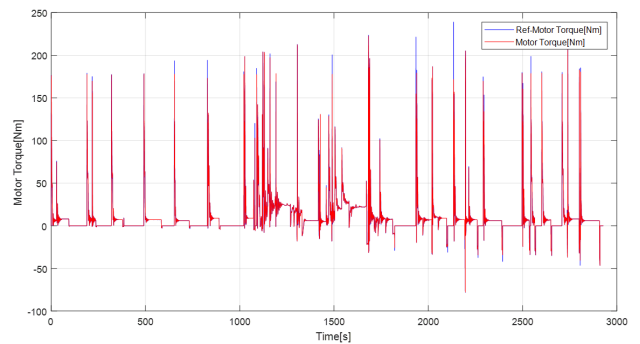


그림 5 강남도심로 원할시간(05h) 모터성능 그래프(좌), 모터토크 Ref 대비 MCU 모터토크 출력 비교(우)



출처 한국자동차연구원

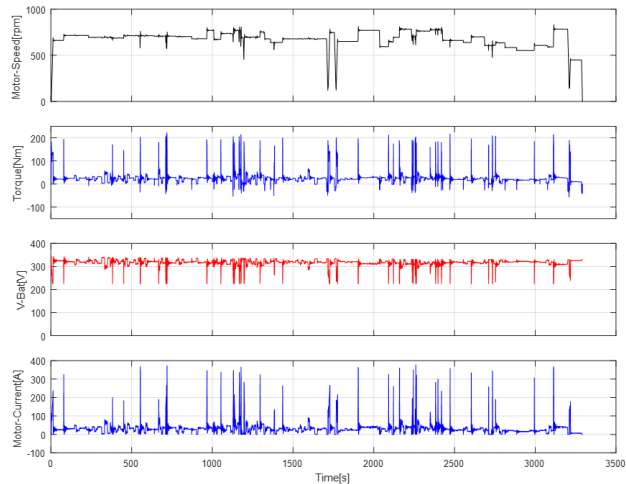
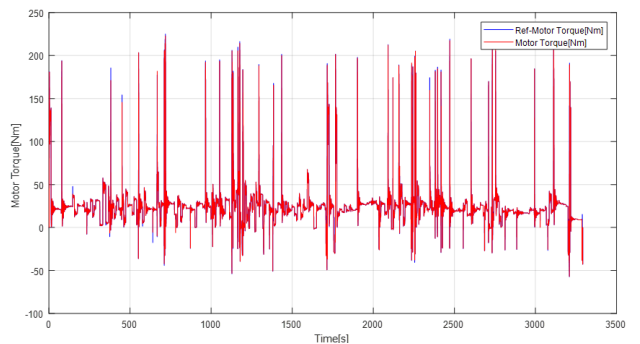


그림 6 강남도심로 정체시간(18h) 모터성능 그래프(좌), 모터토크 Ref 대비 MCU 모터토크 출력 비교(우)



출처 한국자동차연구원

표 1 강남도심에서의 시간별 모터 성능 비교

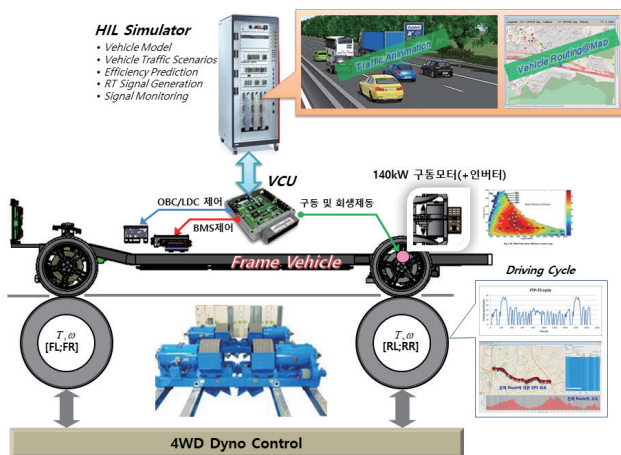
도로	시간대	총 거리 (km)	주행 시간(s)	최대토크 (Nm)	최대전류 (A)	최대rpm	배터리 SOC(%)	비고
강남 도심로	05h	22.8	2,928	222.7	316.1	760	90→85.0	
	18h	22.8	5,378	261.6	258.5	363	90→88.0	

설정되었다. 모터토크 Ref 값은 차량모델 내에서 계산되어지며, 이 값을 CAN 통신을 통해 MCU의 Torque Reference 입력 값으로 전송된다. 전송된 값을 기준으로 MCU 내부 제어로직을 구동하며, PWM의 duty 비로 출력된다. 그리고 MCU HIL 내부의 모터 모델의 출력 값으로 모터 토크와 전류 값이 CAN 통신을 통해 차량

모델 HIL 시뮬레이터로 전송되며, 이 값을 적용하여 차량 주행 시뮬레이션이 수행된다. 시뮬레이션 결과, 정체시간대에는 평균 차량 속도가 내려갔으며, 최고 속도역시 93.3 → 44.7km/h로 내려가 정차상태에서 가속 시 순간적인 모터의 토크/전류 사용량이 줄어든 것을 확인하였다.

3. 실차모사 환경에서의 VIL(Vehicle-In-the-Loop) 평가 기술

실차모사 환경에서 xEV 핵심부품을 시험하기 위해서는 VCU, 모터/인버터, LDC, OBC, HV Battery 등을 탑재할 수 있는 실차모사 차량이 필요하다. 실차모사 차량은 다양한 부품업체 혹은 제품군이 탑재 가능한 구조를 반영하기 위해서 Scalable 구조를 적용해야 한다. 실차모사 차량은 가상 주행환경(PG, 교통량)이 반영된 도심, 정형화된 속도 프로파일, 가혹 부하 도로 등)에서 동력분배 제어를 수행하고, 차대동력계상에서 실주행시 e-파워트레인 요구기능 평가 및 개선을 통해 핵심부품의 성능 개선 및 차량레벨의 검증이 가능하다.



출처 한국자동차연구원

그림 7 실차모사차량을 활용한 차량레벨 평가 환경(예)

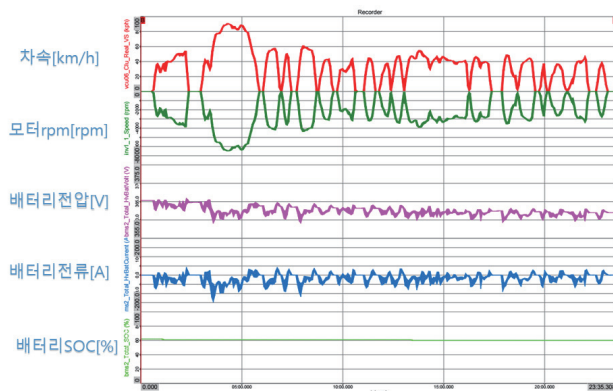
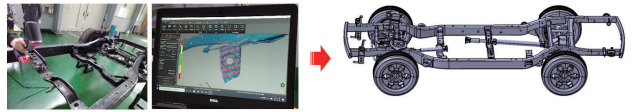
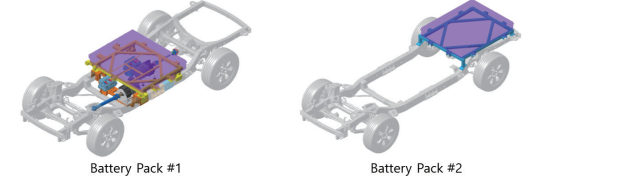


그림 10 UDDS 주행 데이터 및 최대 출력 데이터

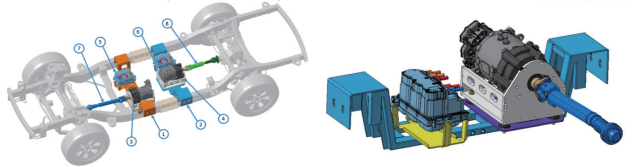
Frame Body - 3D Sacn & 3D Model



Platform Vehicle Layout Modeling - Battery Pack



Platform Vehicle Layout Modeling - Traction INV & Motor (Front, Rear)



출처 성산VCC

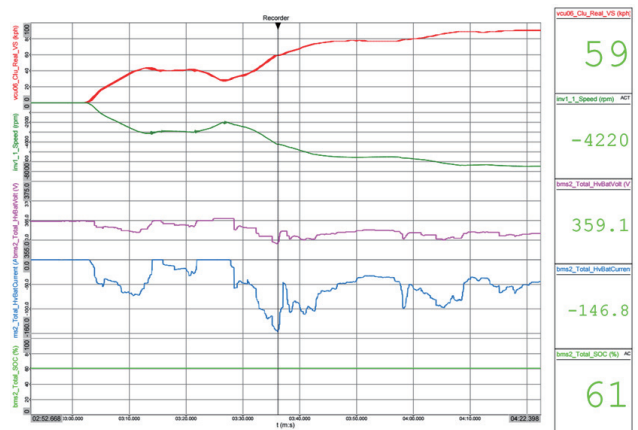
그림 8 플랫폼 차량용 핵심부품 Layout 설계

실차모사를 위한 플랫폼 차량은 기존 내연기관 차량에서 엔진, 트랜스미션 등 부품을 탈거하여 프레임 바디를 활용하였다.



출처 한국자동차연구원

그림 9 플랫폼 차량의 차대동력기 시험 및 모니터링 환경



출처 한국자동차연구원

배터리 팩은 2Pack 병렬형으로 연결하였으며, 구동 인버터/모터는 2Set로 전륜/후륜으로 구성하였다.

e-파워트레인 핵심부품이 장착된 실차모사 플랫폼 차량의 차대동력기 시험을 위해서 시험 환경을 그림 9와 같이 구성하였다. RCP 장비로 차량속도 제어를 위한 Ref. 속도 출력과 주행속도를 출력하여 두 속도 값을 모니터링 하면서 주행 할 수 있도록 하였고, 차량 주행 정보 모니터링 및 데이터를 저장할 수 있도록 DAQ 장비를 설치하였다. 또한, 주행 중 VCU를 모니터링하여 차량 내부 정보를 파악하고 이상 신호를 대처할 수 있게 하였다.

표 2 UDSS 모드에서의 핵심부품 성능

모드		차속 [km/h]	모터 rpm [rpm]	배터리 전압 [V]	배터리 전류 [A]	SOC [%]
UDSS	Min.	0	0	359.1	-42.5 (회생)	60
	Max.	91	6,492	365.9	146.8 (방전)	62

플랫폼 차량에 장착된 핵심부품의 성능을 확인하기 위해서 주행부하를 설정하고 UDSS 모드 주행데이터를 기반으로 성능 테스트를 수행하였다. 주요 전장품인 모터/인버터, 배터리의 성능을 확인하였으며, UDSS 모드 가속구간의 최대 출력이 52.7kW임을 확인하였다.

4. 결 론

본 고에서는 xEV 핵심부품의 설계, 제작, 평가 및 검증 등 단계별로 필요한 절차 및 규격 등을 포함하는 하드웨어와 소프트웨어 개발을 지원하는 e-파워트레인 개발플랫폼 기술과 적용에 대해서 서술하였다. 차량 플랫폼 모델과 HIL Simulation을 연동시켜 강남 도심의 주행패턴으로 xEV 핵심부품의 성능을 분석하였다. 또한, 실차모사 환경에서의 VIL 평가를 위해서 xEV 핵심부품이 장착된 플랫폼 차량을 제작하였고, UDSS 주행 패턴에서 각 핵심부품의 성능을 테스트하였다. 이러한 기술들은 e-파워트레인 핵심부품에 대한 독자적인 기술이 부족한 국내 중소/중견 기업이 모델 기반 시뮬레이션 환경에서 시스템 통합 및 차량레벨의 성능 평가 및 검증 기술을 확보하여, 다양한 제품군 요구에 맞춘 체계적 기술개발이 가능할 것으로 예상된다.

저자소개

설현수(Seol, Hyun-Soo)

2012년 2월 한양대학교 전자정보시스템공학 졸업

2018년 2월 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업
(공학박사)

2018년 3월~12월 한양대학교 Post-doc

2018년 12월~2021년 4월 LG전자 선임연구원

2021년 5월~현재 한국자동차연구원

전기동력기술부문 선임연구원

주 연구 분야: xEV용 구동/전장 모터 개발



학회 소식

☰ 2023년도 제3차 이사회

일 시 2023년 3월 10일(금) 16:30-18:00

장 소 전기학회 회의실

참석자 이건영, 이병준, 노대석, 이준호, 장용무, 박종배, 이우철, 김용상, 이정환, 최상열, 손진근, 신윤용, 안승원, 오호진, 원영진, 이천구, 이방욱, 한기선, 김규호, 김슬기, 장길수, 남순열, 허진, 정상용, 윤성욱, 주성관, 배성우, 이수연, 조현중, 지평식, 김석주, 배채윤, 손성용, 차한주, 최승연, 김경호, 김재호, 김종남, 남의석, 박훈양, 유홍국, 윤순일, 임철교, 정재룡, 최옥만, 강승택, 차준민, 문종필, 이상복, (감사) 김정태, (Observer) 손영욱, 이정호 (이상 52명)

주요 회의 내용

1. 신입회원 승인: 원안대로 승인 함
 - 총 22명 [정회원 11명, 준회원(석사) 6명, 준회원(학부) 2명, 다수년 2명, 종신 1명]
 - 이방욱 총무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
2. 위원회 위원 변경 및 추가 인준 승인
 - 학술위원회 위원 변경, EMTP 한국위원회 및 전기에너지위원회 위원 추가 인준
 - 이방욱 총무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 위원 변경 및 추가 인준을 승인함.
3. A부문회 산하 정책자문위원회와 신진연구자위원회 설립 승인
 - 박종배 A부문회장으로부터 제안 설명을 듣고 원안대로 설립 승인함.
4. 부문회 및 연구회 활동 실적 현황
 - 부문회 및 연구회별로 실적 데이터 수치를 재확인하고 차기 이사회에 안건 상정하기로 함.
5. ICEE 2023 대표단(5인) 구성
 - 이건영 회장, 강승택 ICEE 한국위원장, 이우철 B부문회장, 이정환 D부문회장, Keynote Speaker(KERI 김슬기 본부장) 등 이상 5인의 대표단 구성 완료



학회 소식

회원님의 원고를 기다립니다.

우리 학회 잡지인 「전기의 세계」는 회원 모두가 만들어가는 잡지입니다.

원칙적으로 회원 누구나 자유롭게 기고할 수 있는 열린 저자 체제로 운영하고 있습니다.

다만 원고 모집의 어려움으로 담당 편집위원을 연간 계획과 같이 지정하여 원고를 모으고 있을 뿐입니다.

특히, 다음 칼럼에 대한 원고를 널리 모집하며 채택된 원고는 소정의 원고료도 드리고 있습니다.

회원소리 : 전기계, 전기학회에 대한 제언이나 느낀 점을 포함한 임의 내용으로 분량은 A4기준 4면 내외입니다.

회원/회원사 동정 : 회원이나 회원사의 동정을 공지하는 난이므로 동정이나 새소식을 보내주세요.

건강/취미 이야기 : 건강이나 취미에 관련된 내용으로 분량은 A4기준 3면 내외입니다.

- **문의처** 대한전기학회 사무국 전필준
- **전화** 02-553-0157
- **E-mail** jun@kiee.or.kr

학 회 일 지

2023.2.20.~2023.03.19

2.21(화)

제2차 전기공학교육위원회 (이메일 회의, 2.21~3.1)

2.23(목)

제1차 본부 편집위원회 (학회 회의실+화상회의)

2.24(금)

A부분회 23년 동계세미나 (한국과학기술회관 아나이스 홀+온라인)

2.27(월)

제1차 홍보위원회 (이메일 회의, 2.27~3.3)

제1차 정보화위원회 (이메일 회의, 2.27~3.3)

2.28(화)

제2차 본부 기획정책위원회 (학회 회의실)

제1차 본부 국문논문지 편집위원회 (화상회의)

3.1(수)

회지 「전기의 세계」 72권 3호(3월호) 발간

전기학회 국문논문지 72권 3호(3월호) 발간

전기학회 영문논문지 18권 2호(3월호) 발간

3.3(금)

A부분회 제2차 이사회 (학회 회의실+화상회의)

B부분회 제2차 이사회 (학회 회의실)

E부분회 제2차 이사회 (학회 회의실)

3.6(월)

제2차 영문편집위원회 (화상회의)

3.9(목)

제2차 KYACC 추진위원회 (화상회의)

3.10(금)

제2차 본부 이사회 (학회 회의실+화상회의)

제3차 전기에너지위원회 (학회 회의실)

3.14(화)

제1차 본부 산업체 차기회장 추대위원회 (학회 회의실)

3.15(수)

제2차 여성과학기술위원회 (화상회의)

3.17(금)

제3차 본부 학술위원회 (용평리조트)

C부분회 제2차 이사회 (학회 회의실+화상회의)

편집위원

허 진(편집위원장, 인천대학교)

박능수(건국대학교)

민세동(순천향대학교)

이승재(한국폴리텍대학)

강동원(중앙대학교)

박형준(한국전자통신연구원)

이귀준(한국교통대학교)

조수연(한국자동차연구원)

노종석(중앙대학교)

배인수(강원대학교)

이기덕(한국전자기술연구원)

조춘남(한국폴리텍대학)

문원식(송실대학교)

서훈철(연암공과대학교)

이성구(동아대학교)



구독 안내

회원 가입 안내

☞ 회원의 구분 및 자격

구분	자 격
정회원	① 4년제 대학교를 이수한 분 (박사과정 포함) ② 2~3년제 대학 졸업한 후 실무 경력 2년 이상인 분 ③ 고교 졸업 후 실무경력 4년 이상인 분 또는 전기공학 분야의 학술 및 그 응용에 관하여 상당한 경력이 있는 분
준회원(석사)	전기공학(학과 또는 관련 분야)을 전공하는 대학원 전일제 석사과정 재학 중인 분
준회원(학부)	전기공학(학과 또는 관련 분야)을 전공하는 대학교 학부생으로 재학 중인 분

☞ 입회비 및 연회비

입회비 및 연회비

구분	입 회 비	연 회 비	합 계
정회원	15,000원	70,000원	85,000원
준회원(석사)	10,000원	40,000원	50,000원
준회원(학부)	면제	10,000원	10,000원

다수년 회원 및 종신 회원 : 정회원으로써 다수년 회비 또는 종신회비 납부를 희망하는 분

구분	입회비	3년	5년	7년	합 계
다수년 회원	15,000원	140,000원	210,000원	350,000원	3년 : 155,000원 5년 : 225,000원 7년 : 365,000원
종신 회원		1,050,000원 [15년분 연회비]			1,065,000원

회원의 혜택

1. 학회지 "전기의 세계" PDF 파일 매달 이용 제공
2. 전자도서관 : 전기학회 국문논문지(통합권), 전기학회 논문지 P권, 영문논문지 2종 (JEET, IJCAS), 학술대회 논문 등 열람 권한 부여
3. 학회 및 유관기관의 각종 행사 및 주요 소식 등 정보 제공
4. 하계학술대회 및 부문회 춘·추계 학술발표대회와 각종 학술행사에 참가 및 발표 기회 부여
5. 학문 분야별 연구회(36개 연구회) 각종 행사 활동 기회 부여와 각종 학술행사에 참가 및 발표 기회 부여
6. 대한전기학회 교육원 교육강좌 수강시 회원 자격 부여
7. 전기공학 및 기술발전에 업적이 있는 회원에게 학회상 수여 : 공로상, 학술상, 논문상, 기술상, 표창 등
8. 회원의 학술활동(논문 및 원고)을 학회 발간물에 게재(심사완료 이후) 및 다른 회원에게 홍보할 기회 부여
9. 국내외 학술활동에 관한 정보 제공
10. 일정한 자격을 갖춘 회원의 경우 대한전기학회 시니어 회원, 대한전기학회 펠로우(석학)회원 신청자격 부여

회원 가입 절차 및 회비 납부

1. 회원 가입 절차
 - ① 대한전기학회 홈페이지에서 온라인 가입 (<https://www.kiee.or.kr>) → ② 입회비와 연회비 납부 → ③ 이사회에서 신규 회원 승인 → ④ 회원 활동
2. 회비 납부 방법 및 문의처

홈페이지 로그인 후 마이페이지에서 입회비 및 연회비 확인 후 결제방법 (카드 또는 무통장) 선택하여 결제 가능

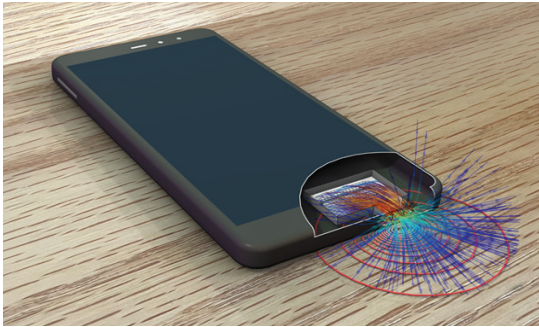
 - ① 카드선택 : 전자결제 등록된 모든 신용카드는 사용가능
 - ② 무통장(온라인 입금) 선택
계좌번호 : 수협은행 1010-2175-5210 / 국민은행 349401-04-009338
예금주 : 대한전기학회
 - ③ 담당 및 문의처 : 경영지원팀 서영은 팀원, 02-553-0155, account@kiee.or.kr



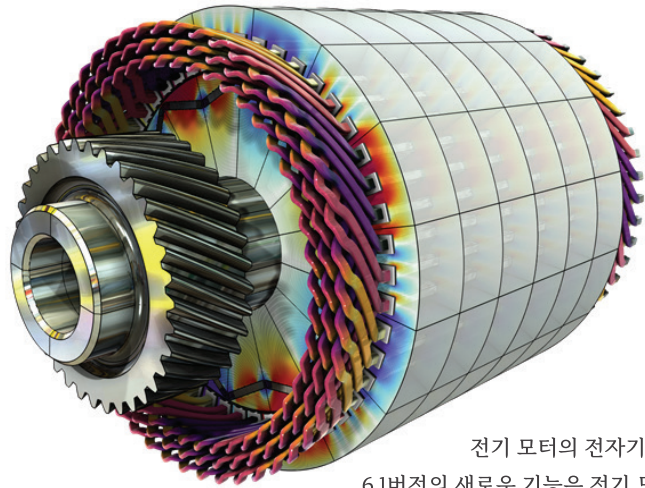
COMSOL Multiphysics 6.1 Now Available

COMSOL Multiphysics V6.1 버전에서 다중물리 분석 수행 기능에서 앱(App.) 생성 기능에 이르기까지 소프트웨어 시뮬레이션 환경의 모든 측면에서 기능이 추가되었고, 작업환경이 향상되었습니다.

이번 버전은 오디오 기술 분야나 차량 전동화 분야와 같이 경쟁이 치열한 R&D 영역에서 강력한 다중물리 시뮬레이션 도구를 사용자에게 제공합니다. 또한 난류유동과 구조 접촉에 대한 모델링 및 최적화를 위한 새로운 기능으로 소프트웨어의 기반을 강화했습니다.



- ⬆ 스마트폰 마이크로 스피커의 방사 강도 시각화.
이 시뮬레이션은 6.1 버전에서 사용할 수 있는 열점성 음향에 대한 새로운 기능을 사용합니다.



- 전기 모터의 전자기 시뮬레이션.
6.1버전의 새로운 기능은 전기 모터를 빠르고 정확하게 분석하기 위한 작업환경을 구현합니다.

Modeling and Simulation for Everyone

- 1 전자기, RF, Optics, 플라스마, 배터리, 연료전지, 열, 구조, 음향, MEMS, CFD, 화학반응, 지구물리해석 등을 위한 관련 모듈 제공
- 2 물리영역(해석모듈) 간 무제한 연성해석
- 3 손쉬운 수식 편집을 통한 유연성 있는 모델링 제공
- 4 Large Simulation을 위한 Cluster Computing 및 Cloud Computing 지원
- 5 해석 비전문가가 사용할 수 있는 어플리케이션(앱)생성 및 배포

Product Suite

COMSOL Multiphysics®

COMSOL Compiler™

COMSOL Server™

Electromagnetics

AC/DC Module
RF Module
Wave Optics Module
Ray Optics Module
Plasma Module
Semiconductor Module

Structural Mechanics & Acoustics

Structural Mechanics Module
Nonlinear Structural Materials Module
Composite Materials Module
Geomechanics Module
Fatigue Module
Rotordynamics Module
Multibody Dynamics Module
MEMS Module
Acoustics Module

Fluid Flow & Heat Transfer

CFD Module
Mixer Module
Polymer Flow Module
Microfluidics Module
Porous Media Flow Module
Subsurface Flow Module
Pipe Flow Module
Molecular Flow Module
Metal Processing Module
Heat Transfer Module

Chemical Engineering

Chemical Reaction Engineering Module
Battery Design Module
Fuel Cell & Electrolyzer Module
Electrodeposition Module
Corrosion Module
Electrochemistry Module

Multipurpose Products

Optimization Module
Uncertainty Quantification Module
Material Library
Particle Tracing Module
Liquid & Gas Properties Module

Interfacing Products

LiveLink™ for MATLAB®
LiveLink™ for Simulink®
LiveLink™ for Excel®
CAD Import Module
Design Module
ECAD Import Module
LiveLink™ for SOLIDWORKS®
LiveLink™ for Inventor®
LiveLink™ for AutoCAD®
LiveLink™ for Revit®
LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
LiveLink™ for Solid Edge®
File Import for CATIA® V5

정확한 설계 완벽한 감리

주식회사
JH 지화기술단
J E E H W A

전 기

전기설계(전문 1종)
전기종합감리
전기안전점검

정보통신

정보통신설계
정보통신종합감리

소 방

소방설계
소방시설물감리

친환경연구

전략기술연구개발
친환경관리방안연구



서울특별시 송파구 송이로36길 62-19 (대성빌딩 3F)
T. 02-408-5273 F. 02-408-5275

대표이사 / 건축전기설비기술사 신 윤 용
www.jeehwa.com