



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

전기자동차 구동용 축방향 자속형  
영구자석 동기전동기 최적 설계

Optimal Design of Axial Flux Permanent  
Magnet Synchronous Motor for Electric  
Vehicle Drive

울산대학교 대학원  
전기전자컴퓨터공학과  
박종운

전기자동차 구동용 축방향 자속형  
영구자석 동기전동기 최적 설계

지도교수 임 동 국

이 논문을 공학석사  
학위논문으로 제출함

2024년 02월

울산대학교 대학원  
전기전자컴퓨터공학과  
박 종 운

박종운의 공학석사  
학위 논문을 인준함

심사위원장 전태원 인  
심사위원 임동국 인  
심사위원 김상원 인

울산대학교 대학원  
2024년 02월

## 국문초록

본 논문에서는 고휘출력밀도 AFPM 전동기의 최적 설계를 위한 멀티모달 알고리즘의 연구가 수행되고, 이를 이용한 전기자동차(electric vehicle: EV) 구동용 전동기 설계를 개념 설계, 최적 설계로 나누어 수행하는 단계별 설계 전략을 제안한다. 그리고 제안하는 알고리즘을 축 방향 자속 영구자석(axial-flux permanent magnet: AFPM) 전동기의 최적 설계에 적용하여 목표 성능을 달성한 최적 설계안을 도출하였다.

최근 자동차 산업에서는 세계적인 환경 규제와 자원 고갈 등의 문제로 인해 연비의 향상이 가장 큰 목표 중 하나이며, 이를 위해서는 전기자동차의 핵심 장치인 전동기의 경량화, 고효율화가 요구된다. 이러한 추세에서 최근 반경 방향 자속 영구자석(radial-flux permanent magnet: RFPM) 전동기와 비교하였을 때 공간이 제한적인 경우에도 더 높은 토크 밀도를 얻을 수 있는 AFPM 전동기에 관한 관심이 커지고 있으며, 여러 완성차 업체와 연구 집단에서 연구를 수행하며, 성능을 검토하고 있다.

본 논문에서도 EV 구동용 AFPM 전동기를 설계하기 위해 개념 설계 단계와 최적 설계 단계가 수행된다. AFPM 전동기의 경우 축 방향으로의 일정하지 않은 전자계적인 특성을 가지기 때문에 3차원 유한요소법이 필수적으로 요구되며, 이는 많은 해석 시간을 요구한다. 따라서 본 논문의 개념 설계 단계에서는 정확한 해석보다는 빠르게 여러 가지 설계변수 조합을 고려하기 위해 Quasi-3D 해석기법을 활용한다. 다수의 2차원 유한요소 해석 결과를 조합하여 3차원 유한요소 해석 결과를 근사 계산하는 Quasi-3D 해석기법을 통해 각 설계변수에 따른 경향을 분석하고, 최적 설계 단계에 반영한다.

최적 설계 단계에서는 Quasi-3D 해석기법으로 해석하기 어려운 비선형 자기포화, 토크 맥동, 철손 특성 등을 분석하기 위해 3차원 유한요소법을 사용한다. 하지만 3차원 유한요소법을 최적 설계에 적용하면 계산시간이 오래 걸리는 문제점이 있다. 본 논문에서는 개념 설계 단계에서 얻은 해석 데이터를 통한 설계변수에 따른 민감도와 크리깅 대리모델(kriging surrogate model)을 결합함으로써 최적화에 필요한 함수 호출 횟수를 효과적으로 감소시키면서 우수한 최적해를 탐색하는 멀티모달 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘을 EV 구동용 AFPM 전동기 최적 설계에 적용하여 최적 후보 모델을 확보하고, 여러 가지 성능 비교를 통해 최적 설계안을 도출한다.

본 논문의 연구 성과는 다양한 목적함수를 동시에 고려해야 하는 전동기 최적 설계에 폭넓게 적용될 것으로 기대된다.

주요어 : 멀티모달 최적화 알고리즘(multi-modal optimization algorithm), 반경 방향 자속 영구자석 전동기(radial-flux permanent magnet motor), 축 방향 자속 영구자석 전동기(axial-flux permanent-magnet motor), 유한요소법(finite element method), Quasi-3D 해석기법(Quasi-3D analysis method), 전기자동차(electric vehicle), 최적 설계 (optimal design)

학 번 : 20225272

# 목 차

국문초록.....	i
목 차.....	iii
그림 목차.....	iv
표 목차.....	vi
기호 및 약어 설명.....	vii
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구 배경 및 목표.....	1
1.2 논문 구성.....	6
제 2 장 AFPM 전동기 개념 설계를 위한 Quasi-3D 해석기법.....	7
2.1 AFPM 전동기의 구조 및 특성.....	7
2.1.1 AFPM 전동기의 개요.....	7
2.1.2 AFPM 전동기의 토폴로지 분석.....	12
2.2 Quasi-3D 해석기법.....	12
2.2.1 Quasi-3D 해석기법 개요.....	12
2.2.2 Quasi-3D 해석기법을 활용한 AFPM 전동기 특성 분석.....	13
제 3 장 멀티모달 최적화 알고리즘.....	18
3.1 제안하는 최적화 알고리즘 1 : HAS.....	19
3.1.1 제안하는 알고리즘 1 소개.....	19
3.1.2 시험 함수를 이용한 제안하는 알고리즘 1의 성능 검증.....	26
3.2 제안하는 최적화 알고리즘 2 : HM.....	28
3.2.1 제안하는 알고리즘 2 소개.....	28
3.2.2 시험 함수를 이용한 제안하는 알고리즘 2의 성능 검증.....	30
제 4 장 EV 구동용 AFPM 전동기 최적 설계.....	33
4.1 EV 구동용 AFPM 전동기 설계 제원 및 요구 조건.....	33
4.2 Quasi-3D 해석기법을 이용한 AFPM 전동기 개념 설계.....	34
4.3 HM을 이용한 AFPM 전동기 최적 설계.....	36
4.3.1 목적함수 및 설계변수 결정.....	36
4.3.2 최적화 알고리즘 연동 설계.....	38
제 5 장 결론 .....	43

## 그림 목차

그림 1.1. 세계 전기차 시장 규모.....	2
그림 1.2. YASA社의 AFPM 전동기 연구 사례.....	2
그림 1.3. Saietta社의 AFPM 전동기 연구 사례 (a)AFPM 전동기 구조 (b)특허 자료.....	3
그림 1.4. EMRAX社의 용량 별 AFPM 전동기.....	3
그림 1.5. Whylot社의 AFPM 전동기 연구사례 (a)AFPM 전동기 구조 (b)특허 자료.....	4
그림 2.1. AFPM 전동기의 3차원 구조.....	8
그림 2.2. AFPM 전동기의 토폴로지.....	9
그림 2.3. AFPM 전동기의 토폴로지별 구조 (a)SSSR 타입 (b)DSSR 타입 (c)SSDR-NN 타입 (d)SSDR-NS 타입 (e)SSDR-YASA 타입 (f)MSML 타입.....	11
그림 2.4. Quasi-3D 해석기법의 개념도.....	12
그림 2.5. Quasi-3D 해석기법 검증을 위한 AFPM 전동기 해석 모델.....	13
그림 2.6. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 무부하 해석 결과 파형의 비교 (a)역기 전력 @ 2,000RPM (b)코깅 토크.....	15
그림 2.7. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 부하 해석 결과 파형의 비교 (전류 밀도 = 10Arms/mm <sup>2</sup> ) (a)단자전압 @ 2,000RPM (b)발생 토크.....	16
그림 2.8. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 부하 해석 결과 파형의 비교 (전류 밀도 = 20Arms/mm <sup>2</sup> ) (a)단자전압 @ 2,000RPM (b)발생 토크.....	16
그림 3.1. 랜덤 샘플링과 라틴하이퍼 큐브 샘플링.....	19
그림 3.2. SVM의 개념도.....	21
그림 3.3. 샘플 데이터 기반 KSVM의 영역 (a)알고리즘 초기 단계 (b)알고리즘 수렴단계.....	21
그림 3.4. HAS의 영역 분할 개념.....	22
그림 3.5. Nelder-Mead 기법의 개념도 (a)반사 (b)수축 (c)확장 (d)축소.....	24
그림 3.6. HAS의 순서도.....	25
그림 3.7. 3차원 시험 함수 (a)피크가 9개인 시험 함수 1 (b)피크가 16개인 시험 함수 2.....	27
그림 3.8. HM의 순서도.....	28
그림 3.9. 격자 비교 (a)기존 대리모델의 격자 구성 (b)제안하는 방법의 대리모델의 격자 구성.....	30
그림 3.10. 고차원 시험 함수에 대한 알고리즘 성능 분석 (a)Sphere 함수 (b)Schwefel 함수.....	32
그림 4.1. EV 구동용 AFPM 전동기 초기 모델 형상.....	34



그림 4.2. EV 구동용 AFPM 전동기 초기 모델의 속도-토크 특성 곡선.....	35
그림 4.3. AFPM 전동기 최적 설계의 구조적 설계 변수.....	37
그림 4.4. AFPM 전동기 최적 설계의 구조적 설계 변수의 민감도 분석 결과.....	38
그림 4.5. 최적 모델의 자속밀도 분포.....	40
그림 4.6. 초기 모델과 최적 모델의 토크 파형 비교.....	40
그림 4.7. 초기 모델과 최적 모델의 속도-토크 특성 곡선 비교.....	41
그림 4.8. 최적 모델 영구자석 불가역 감자 해석 결과 (a)인가 전류 파형 (b)역기전 력 파형.....	42

## 표 목차

표 2.1. Quasi-3D 해석기법 검증을 위한 AFPM 해석 모델의 설계 사양.....	14
표 2.2. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 무부하 해석 오차율 분석 결과.....	15
표 2.3. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 부하 해석 오차율 분석 결과.....	17
표 3.1. 영역별 난수 범위.....	22
표 3.2. HAS와 기존 알고리즘의 성능 비교.....	27
표 3.3. HM와 기존 대리모델의 성능 비교.....	31
표 4.1. EV 구동용 AFPM 전동기 설계의 요구 조건 및 제한 조건.....	33
표 4.2. EV 구동용 AFPM 전동기 초기 모델 부하 해석 결과.....	34
표 4.3. 설계변수의 범위.....	36
표 4.4. 초기 모델과 각 설계안의 설계변수 값.....	39
표 4.5. 각 모델의 성능 비교.....	39
표 4.6. 영구자석 불가역 감자 해석 조건.....	41

## 약어 설명

IEA	국제 에너지 기구 (international energy agency)
BEV	배터리 전기자동차(battery electric vehicle)
HEV	하이브리드 전기자동차(hybrid electric vehicle)
PHEV	플러그인 하이브리드 전기자동차(plug-in hybrid electric vehicle)
FCEV	수소 전기자동차(fuel cell electric vehicle)
RFPM 전동기	radial-flux permanent-magnet 전동기
AFPM 전동기	axial-flux permanent-magnet 전동기
FEM	유한요소법(finite element method)
HAS	hybrid artificial bee colony algorithm - support vector machine
ABC	인공 벌 군집 알고리즘(artificial bee colony algorithm)
NGA	niching 유전 알고리즘(niching genetic alogrithm)
KSVM	kernel support vector machine
NM	nelder - mead method
HM	high-dimensional surrogate model considering variable sensitivity
UAM	urban air mobility
SSSR	single-stator single-rotor
DSSR	dual-stator single-rotor
SSDR	single-stator dual-rotor
YASA	yokeless and segmented armature
MSML	multi-stator multi-rotor
LHS	latin hypercube sampling

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목표

최근 자동차 산업은 다양한 환경 규제에 대응하기 위해 노력하고 있으며, 이러한 문제의 해결 방안 중 한 가지인 전기자동차에 관한 관심이 급증하고 있다. 국제에너지기구(international energy agency : IEA)에 따르면, 2022년 말 전 세계 누적 전기자동차 등록 대수는 2,600만 대를 돌파하였으며, 2018년 대비 5배 상승하는 등 가파른 성장추세를 보인다[1]. 또한, 우리나라도 정부의 구매보조금 지원 및 세금 감면 등의 혜택으로 2023년 5월 기준 전기자동차 등록 대수는 누적 45만 대를 돌파하고, 전체 차량에서 1.8%를 차지하는 등 빠르게 성장하고 있다.

전기자동차는 구동 방식에 따라 배터리 전기자동차(battery electric vehicle : BEV 또는 EV), 하이브리드 전기자동차(hybrid electric vehicle : HEV), 플러그인 하이브리드 전기자동차(plug-in hybrid electric vehicle : PHEV), 수소 전기자동차(fuel cell electric vehicle : FCEV)로 나뉜다[2]. EV는 내연기관 없이 배터리를 통한 전기에너지만을 동력원으로 사용하는 차량이다. 그리고, HEV는 내연기관과 전기 모터를 함께 사용하는 차량이며, 정상 주행할 때는 엔진을 주로 사용하고, 시동을 걸 때나 고속 주행 등 더 큰 출력이 필요할 경우 전기 모터를 보조로 사용한다. PHEV의 운전 방식은 HEV와 같은 방식이지만, 자체 배터리 충전 기능을 가진 HEV와 달리 외부로부터 전력 충전이 요구된다. 마지막으로, FCEV는 산소와 수소가 연료전지에서 화학 반응을 통해 전력을 만들어 전기 모터에 동력을 공급한다.

그림 1.1은 BEV, PHEV, HEV의 글로벌 시장 규모의 동향을 나타낸다. 최근 전기자동차의 동력원인 리튬이온배터리 기술의 발달로 인한 배터리 셀의 용량 증가와 여러 충전 인프라 구축 지원 사업으로 인해 EV의 선호도가 계속해서 증가하고 있다[3]. EV는 엔진을 사용하지 않고 모터만으로 차량을 구동하기 때문에, 구동 모터의 성능에 따라 차량의 성능이 좌우된다[4]. 일반적으로 EV는 높은 출력 및 효율뿐만 아니라 넓은 운전 범위를 요구하고, 이러한 조건을 충족할 수 있는 영구자석 전동기가 EV에 주로 활용되고 있다[5]-[7].

영구자석 전동기는 회전자 영구자석의 자속의 경로에 따라 반경 방향 자속 영구자석(radial-flux permanent magnet : RFPM)전동기와 축 방향 자속 영구자석(axial-flux permanent magnet : AFPM)전동기로 구분된다. 그 중 AFPM 전동기는 RFPM 전동기와 비교하였을 때 구조적으로 짧은 축 방향 길이를 가지는 디스크형 구조로 되어있다. 따라서 RFPM 전동기와 비교하였을 때 소형, 경량화가 가능함과 동시에 고평토크밀도 성능을 확보할 수 있어 최근 여러 기업 및 연구 그룹이 관심을 두고 있다[8].

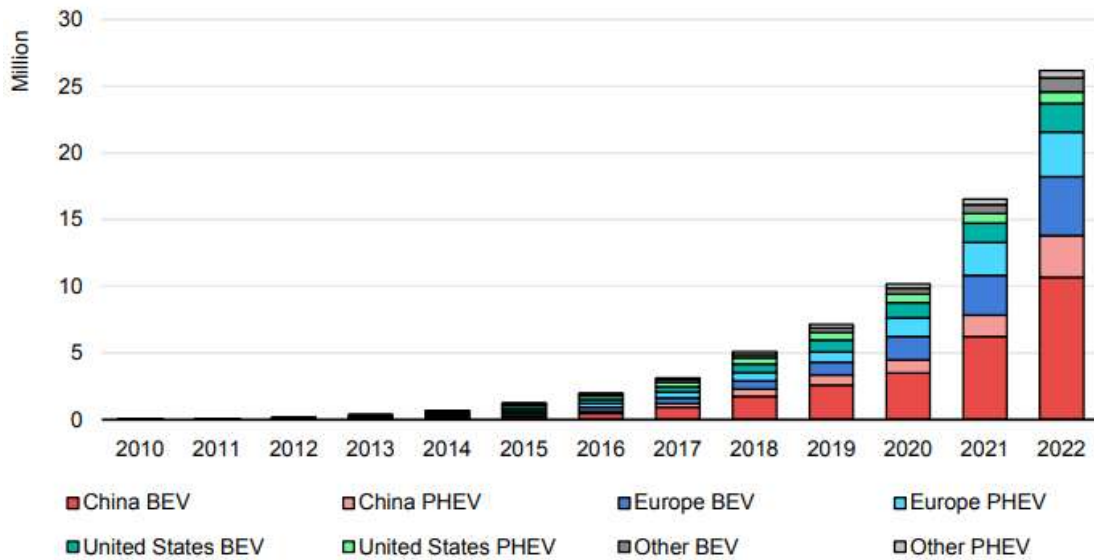


그림 1.1. 세계 전기차 시장 규모[3]

Fig. 1.1. Global electric vehicle market size[3].

- 먼저 국내 자동차 부품 기업인 현대모비스社는 2023년 하반기부터 AFPM 전동기 개발에 나섰다. 고성능 EV에 탑재하기에 적합한 고출력밀도 AFPM 전동기 개발이 목표이며, 국내 연구 그룹과 함께 연구를 수행하고 있다[9].
- 영국의 AFPM 전동기 개발 기업인 YASA社는 고성능 차량뿐만 아니라 다양한 어플리케이션에 적용할 수 있는 전동기 개발을 수행하고 있다. 현재 그림 1.2와 같이 160kW, 245kW급 수준의 고용량 전동기를 양산 중이며, 2021년 7월에는 완성차 업체인 독일의 메르세데스-벤츠社(Mercedes-benz)에 인수되었다[10].

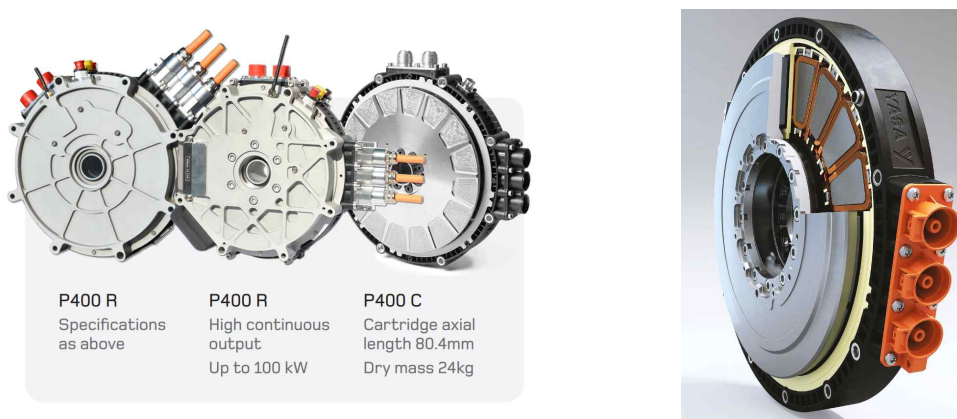


그림 1.2. YASA社의 AFPM 전동기 연구 사례[10]

Fig 1.2. Study case of AFPM motor in YASA company.[10]

- 스쿠터, 버스, 해양 응용 분야를 포함한 여러 어플리케이션의 파워트레인을 개발 중인 영국의 Saietta社는 그림 1.3과 같이 집중권 권선 방식의 AFPM 전동기를 주로 개발하는 다른 기업과 달리 분포권 권선 방식의 AFPM 전동기를 개발하고 있다. 얇은 회전자 코어를 고정자 코일에 삽입하여 제작하는 방식이 특징이며, 권선 단부를 고정자 하우징과 결합하여 강건성을 확보하였다[11], [12].

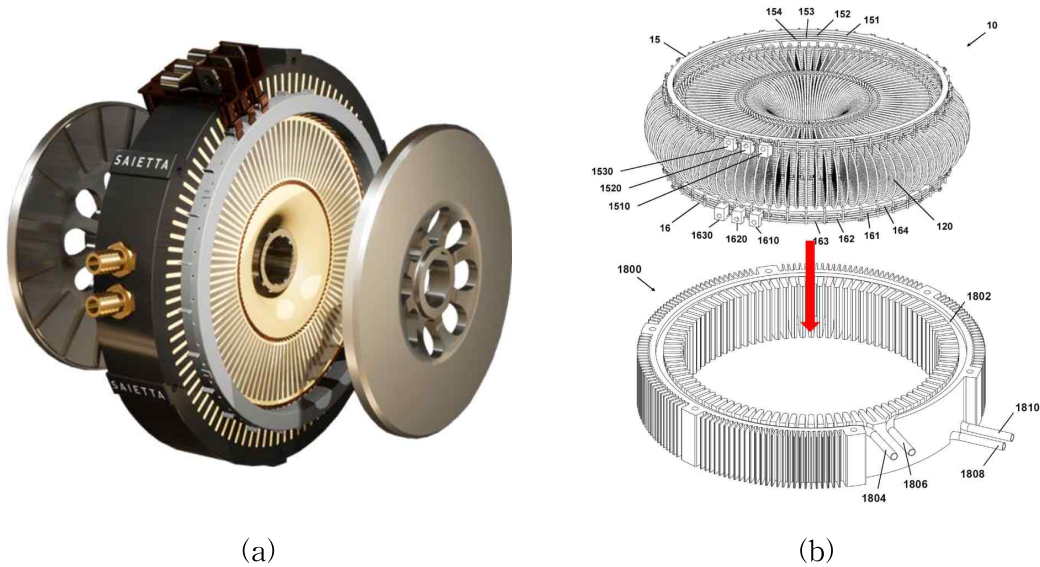


그림 1.3. Saietta社의 AFPM 전동기 연구 사례 (a)AFPM 전동기 구조 (b)특허 자료[11], [12]

Fig 1.3. Study case of AFPM motor in Saietta company. (a)AFPM Motor Structure. (b)Patent information.[11], [12]

- 슬로베니아의 EMRAX社는 경비행기 추진용 AFPM 전동기를 개발하고 있으며, 그림 1.4와 같이 60kW부터 400kW급까지 다양한 용량의 AFPM 전동기를 보유하고 있다. 냉각 방식으로는 공랭 방식과 간접 수냉 방식을 사용한다고 알려져 있다[13].



그림 1.4. EMRAX社의 용량 별 AFPM 전동기[13]  
Fig 1.4. EMRAX company's AFPM motors by capacity.[13]

- 프랑스의 Whylot社는 산업, 구동 등 다양한 분야에서 활용할 수 있는 AFPM 전동기를 개발 중인 기업이다. 그림 1.5은 Whylot社의 연구사례를 나타내고 있으며, 회전자와 고정자 두 개로 구성된 AFPM 전동기를 주로 연구 중이다. 2021년 11월에는 프랑스의 완성차 업체인 르노社(Renault)에 인수되었다[14], [15].

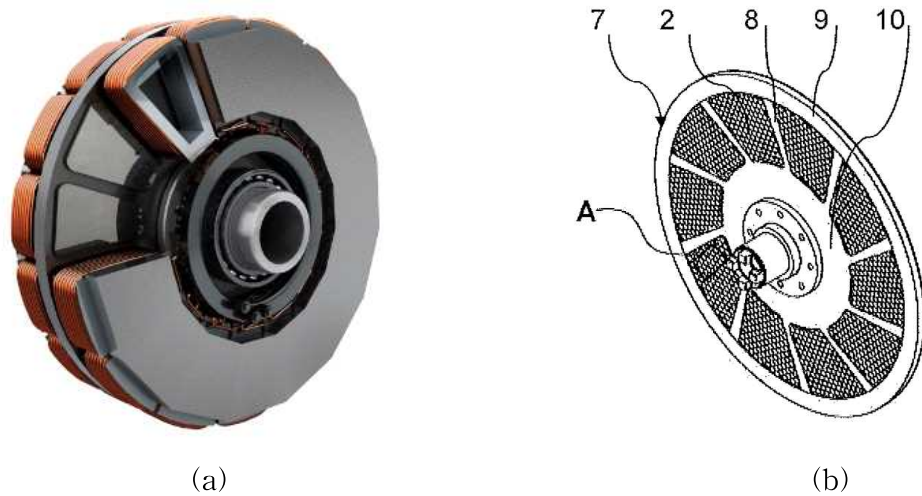


그림 1.5. Whylot社의 AFPM 전동기 연구사례 (a)AFPM 전동기 구조 (b)특허 자료[14], [15]

Fig 1.5. Study case of AFPM motor in Whylot company. (a)AFPM Motor Structure. (b)Patent information.[14], [15]

AFPM 전동기는 회전자와 고정자 사이의 자속 경로가 축 방향으로 구성되기 때문에 3차원 유한요소법(finite element method : FEM)이 필수적으로 요구된다[8]. FEM은 해석 대상을 작은 요소로 분할하여 각 요소와 절점을 전체 계에 대한 연립 대수 방정식을 정립하여 해석 대상의 특성값들을 구하는 방법이다. 하지만, 3D FEM은 정확한 해석이 가능한 대신 해석 시간이 오래 걸리기 때문에, 초기 개념 설계 단계부터 사용하게 되면 과도한 해석 소요가 발생하게 된다[16], [17]. 이러한 문제를 해결하고자 AFPM 전동기의 해석 및 설계 시간을 줄이기 위한 다양한 해석기법들이 연구되고 있다.

먼저 AFPM 전동기의 3차원 모델을 다수의 2차원 모델로 나누어 해석하고, 3차원 해석 결과를 근사 계산하는 Quasi-3D 해석기법이 자주 활용되고 있다[18], [19]. 해당 기법은 수식적인 분석을 요구하지 않아 활용성이 높지만, 2차원 유한요소해석이 여러 번 요구되고, 반경 방향의 전자계 특성을 정확히 분석할 수 없다는 단점이 있다. 다음으로 유한요소해석을 활용하여 공극 자속 분포의 형상 정보를 얻은 후

회전자와 고정자의 전체 위치에 대한 공극 자속 분포를 재구성하는 자계 재구성법(Field reconstruction method, FRM)에 대해서도 연구되고 있다[20], [21]. 해당 기법은 해석 시간이 긴 3차원 유한요소법에 적용하면 해석 시간을 저감할 수 있어 AFPM 전동기 설계에 활용할 수 있다. 하지만, FRM은 전동기의 자기포화(magnetic saturation)로 인한 특성을 정확하게 분석할 수 없는 한계가 있다.

본 논문에서도 해석 시간의 문제를 해결하는 방법에 관해 연구하였다. 먼저 AFPM 전동기의 전자계 특성을 빠르게 분석할 수 있는 Quasi-3D 해석기법을 활용하여 설계변수의 변화에 따른 특성을 분석한다[22]. 다음으로 3D FEM의 해석 횟수를 저감하기 위한 최적화 알고리즘에 관해 연구하였고, 기존 알고리즘과의 성능 비교를 통해 우수성을 검증하였다. 본 논문에서 제안하는 HAS(hybrid artificial bee colony algorithm - support vector machine) 알고리즘은 확률론적 최적화 알고리즘인 인공 벌 군집 알고리즘(artificial bee colony algorithm : ABC)과 머신러닝 분류 기법 중 하나인 커널 서포트 벡터 머신(kernel support vector machine : KSVM)을 결합하여 탐색 능력을 향상시켰고, 결정론적 알고리즘인 nelder - mead 방법(nelder - mead method : NM)과의 결합을 통해 탐색된 샘플을 정확하고 빠르게 수렴할 수 있도록 하였다. 다음으로 HM(High-dimensional surrogate model considering variable sensitivity)은 각 설계변수의 민감도에 따라 대리모델의 격자 간격을 다르게 설정하여 불필요한 해석 시간을 저감하였다. 제안하는 두 가지 알고리즘 모두 성능을 입증하기 위해 수학적 시험 함수에서 기존 알고리즘인 ABC와 기존 대리모델과의 성능 비교를 통해 우수한 성능을 검증하였다. 검증된 알고리즘을 활용하여 Quasi-3D 해석기법을 통해 얻은 EV 구동용 AFPM 전동기 초기 설계안의 다중 목적함수 최적 설계를 수행하였다.



## 1.2 논문 구성

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있으며, 각 장의 연구 내용은 아래와 같다.

제 1장에서는 연구 배경 및 논문 구성에 대하여 요약하였다.

제 2장에서는 AFPM 전동기의 구조적인 특징을 설명하고, 고정자와 회전자 구성에 따른 AFPM 전동기 구조에 대해 분석한다. 그리고, AFPM 전동기의 초기 설계에 활용하기 위한 Quasi-3D 해석기법의 개념 소개와 검증을 수행한다. Quasi-3D 해석기법의 검증은 기존 3D FEM과의 무부하, 부하 해석 결과를 비교하여 성능을 입증한다.

제 3장에서는 본 논문에서 제안하는 두 가지 멀티모달 최적화 알고리즘을 소개한다. 제안한 알고리즘의 성능을 수학적 시험 함수에서 기존 알고리즘과의 비교를 통해 검증한다.

제 4장에서는 EV 구동용 AFPM 전동기의 다중목적함수 최적 설계를 수행한다. 먼저 전동기 설계를 위한 요구 조건 및 제한 조건을 정의하고 2장에서 소개한 Quasi-3D 해석기법을 이용하여 목표 토크 성능을 달성하는 초기 설계안을 도출한다. 이후에 제안하는 최적화 알고리즘을 통해 선정된 설계변수의 최적 설계를 수행하고, 목표 성능을 달성하는 최적 설계안을 도출한다. 마지막으로 설계된 전동기의 영구자석 불가역 감자 해석을 통해 전동기의 안정성을 입증한다.

제 5장에서는 본 논문의 결과에 대한 고찰 및 향후 연구 방향에 대해 정리한다.

## 제 2 장 AFPM 전동기 개념 설계를 위한 Quasi-3D 해석기법

### 2.1 AFPM 전동기의 구조 및 특성

#### 2.1.1 AFPM 전동기의 개요

AFPM 전동기는 그림 2.1과 같이 동일한 고정자, 회전자의 외경과 공극 면이 회전축과 직교하는 형태로 구성되어 자속의 경로가 축 방향으로 형성되는 전동기를 뜻한다. 연구 초기에는 제작 기술, 영구자석과 같은 구성 재료의 한계와 높은 제작 비용 등과 같은 이유로 인해 RPFM 전동기보다 낮은 인지도를 가지고 있었다. 하지만 최근 여러 연구 기업의 AFPM 전동기에 관한 제작 기술 연구, 고성능 희토류 영구자석의 개발, 전동기 제어 기술의 발달이 이뤄지고 있고, 고성능 EV, 도심 항공 모빌리티(urban air mobility : UAM), 친환경 선박 등에 활용하기 위한 고출력밀도 전기기기의 수요가 증가하면서 AFPM 전동기의 관심도가 급증하고 있다[8].

AFPM 전동기는 구조적인 특징으로 인해 RPFM 전동기와 비교하였을 때 유리한 점이 있다. 먼저 AFPM 전동기는 회전자와 고정자의 배치로 인해 자속이 축 방향으로 구성되기 때문에 상대적으로 더 효율적인 경로가 구성되고, 이로 인해 더 높은 토크 밀도를 확보할 수 있다. 따라서 공간적인 제한이 발생하는 하드 디스크 드라이브(hard disk drive), 인 휠 시스템(in-wheel system) 등의 분야에서 AFPM 전동기의 활용성이 극대화된다[23]. 하지만, AFPM 전동기는 고정자와 회전자의 배치에 따라 여러 토폴로지(topology)로 구성할 수 있고, 토폴로지마다 장단점이 존재하기 때문에 요구 사양과 조건에 따라 적절히 선정할 필요가 있다.

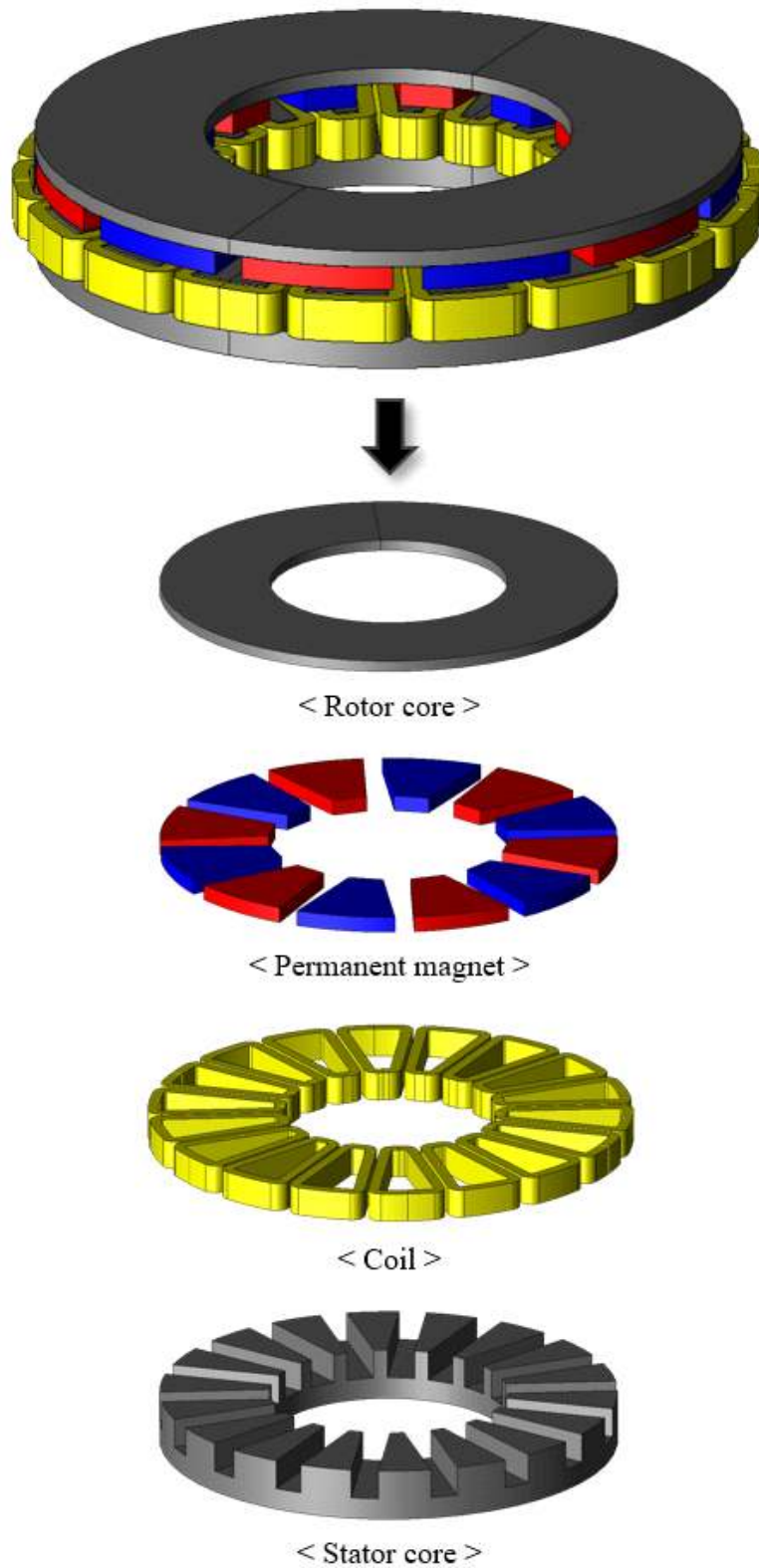


그림 2.1. AFPM 전동기의 3차원 구조  
 Fig. 2.1. 3-D configuration of an AFPM motor.

## 2.1.2 AFPM 전동기의 토폴로지 분석

전기에너지를 동력원으로 활용하는 EV의 경우에는 목표 주행 능력을 달성하기 위해 고효율 전동기가 요구된다. 또한, 주행거리를 개선하기 위해서는 구동 시스템의 제한된 공간을 효과적으로 활용하여야 한다. 본 장에서는 이러한 EV 구동용 전동기의 요구조건을 달성하고자 AFPM 전동기의 토폴로지에 관해 분석하였다. AFPM 전동기의 토폴로지는 그림 2.2와 같이 회전자와 고정자의 개수와 영구자석의 배치에 따라 분류할 수 있다[23], [24].

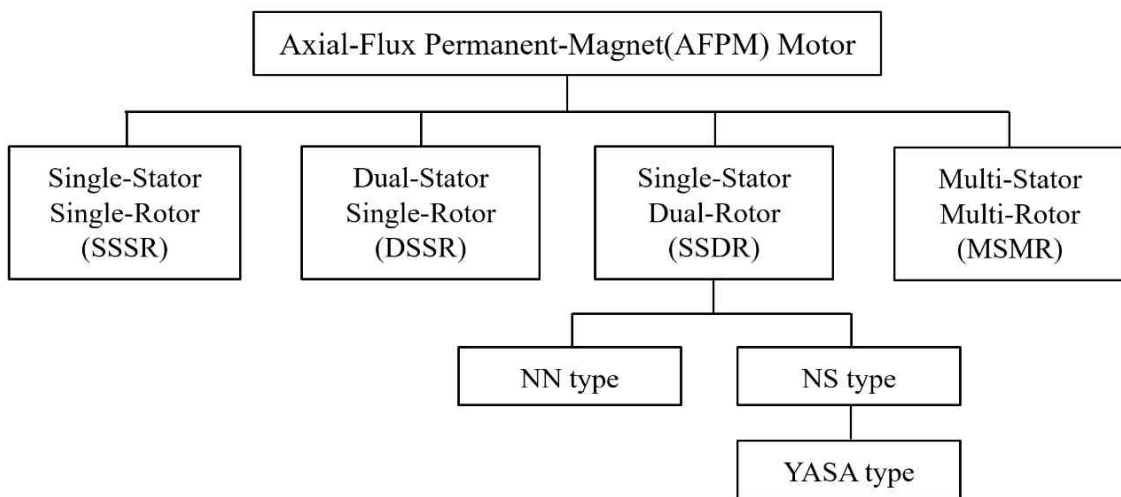


그림 2.2. AFPM 전동기의 토폴로지

Fig. 2.2. Topology for an AFPM motor.

- SSSR(single-stator single-rotor) 타입은 회전자와 고정자가 한 개로 구성된 AFPM 전동기이다. 구조가 상대적으로 단순하며 크기가 작아 산업용, 견인용, 기어박스(gearbox)가 존재하지 않는 엘리베이터용 전동기로 주로 설계된다[25], [26].
- DSSR(dual-stator single-rotor) 타입은 두 개의 고정자와 한 개의 회전자로 구성되었고, 회전자의 코어가 존재하지 않고, 강화 플라스틱과 같은 고강성의 비자성체 재질을 활용하여 손실 저감 및 효율 개선 설계가 가능하다[27].
- SSDR(single-stator dual-rotor) 타입은 두 개의 회전자와 한 개의 고정자로 구성되어 있고, 자석의 배치에 따라 NN구조와 NS구조로 나뉘게 된다. NN 구조의 경

우에는 마주 보고 있는 자석의 극이 같으므로, 자속 경로가 회전자마다 다르게 형성되어 고정자 요크에 자속 포화가 발생하게 된다. 포화로 인한 손실을 예방하기 위해선 고정자 요크는 축방향 길이를 증가시켜야 하는데, 이는 AFPM 전동기의 고폭밀도 성능에 악영향을 미치게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 NS 구조는 마주 보는 자석의 극을 반대로 구성하여, 자속 경로를 효율적으로 구성시킨 구조이다. 해당 구조는 고정자의 요크가 지지장치로만 활용되기 때문에, 구조 해석을 통해 최소 두께를 선정하게 된다면 전동기의 크기를 저감할 수 있다[23].

- YASA(yokeless and segmented armature) 타입은 NS 구조의 고정자 요크를 완전히 제거하고 분할 고정자 코어로 구성하여 점적률과 효율 및 토크 성능을 극대화한 구조이다. 또한, 고정자 코어가 나누어져 있어 제작이 용이하기 때문에, 최근 여러 연구 그룹에서 관심을 두고 있다[9], [10], [28].
- MSMR(multi-stator multi-rotor) 타입은 여러 개의 회전자와 고정자로 구성되어 토크 성능을 향상시킨 모델이다. 하지만, 제한된 공간에서 활용성을 극대화할 수 있는 AFPM 전동기의 특성으로 인해, 현재는 연구 단계에만 그치고 있다.

그림 2.3은 각 AFPM 전동기 토폴로지의 구조 및 자속 경로를 나타낸다. 본 논문에서는 다른 토폴로지와 비교하였을 때, 고효율, 고폭밀도, 제작성 등에서 장점을 가지는 YASA 타입 AFPM 전동기를 EV 구동용 전동기의 모델로 채택하였다.

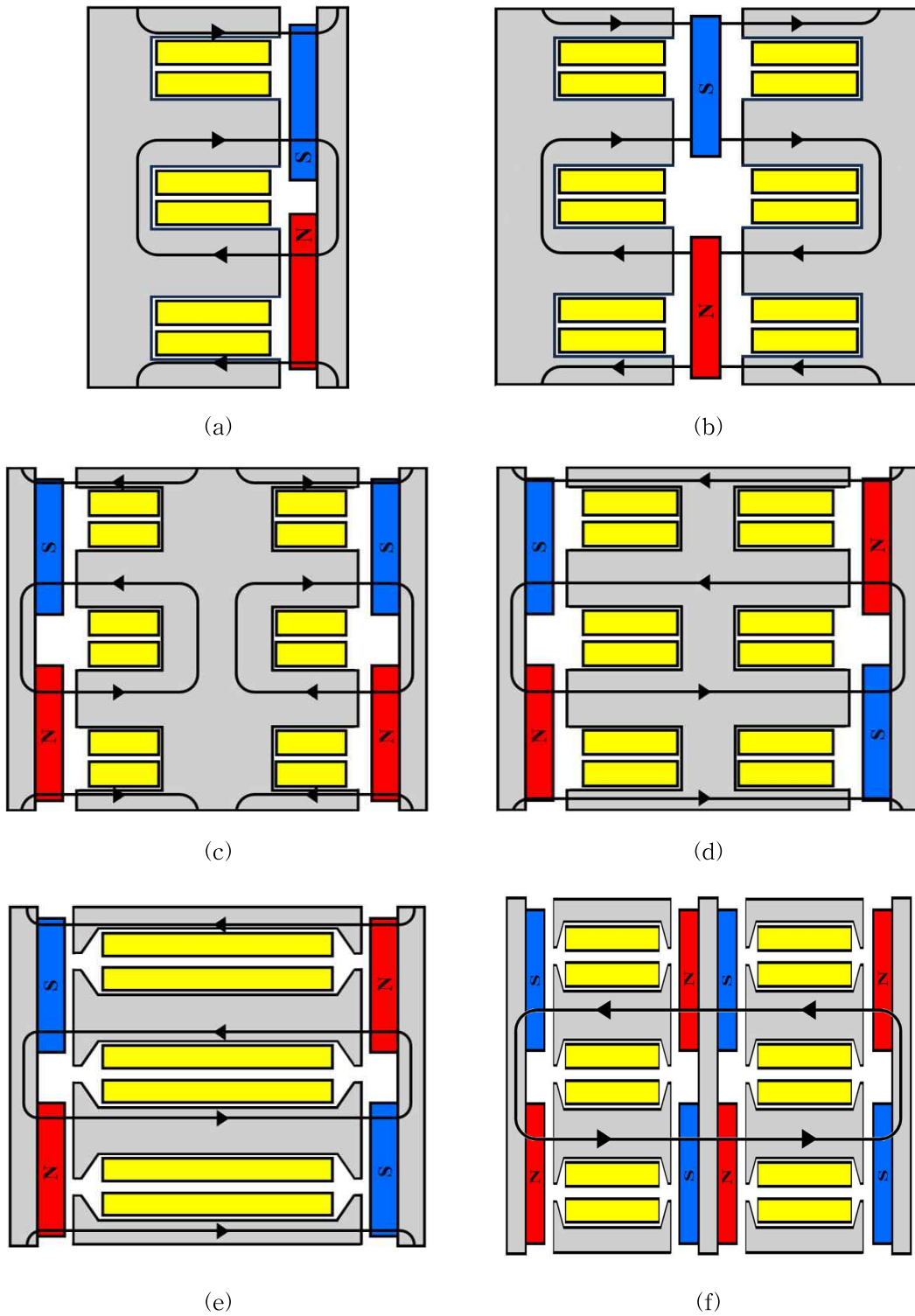


그림 2.3. AFPM 전동기의 토폴로지별 구조 (a)SSSR 타입 (b)DSSR 타입  
(c)SSDR-NN 타입 (d)SSDR-NS 타입 (e)SSDR-YASA 타입 (f)MSML 타입  
Fig. 2.3. Typologies for each AFPM motor. (a)SSSR type. (b)DSSR type.  
(c)SSDR-NN type. (d)SSDR-NS type. (e)SSDR-YASA type. (f)MSML type.

## 2.2 Quasi-3D 해석기법

### 2.2.1 Quasi-3D 해석기법 개요

일반적으로 RFPM 전동기의 경우에는 방사 방향으로 자속이 형성되어 2차원 FEM을 통해 전자계 특성을 파악할 수 있다. 반면, AFPM 전동기는 축 방향으로 자속이 구성되어 RFPM 전동기보다 복잡한 자속이 형성되고, 축 방향 자속을 고려하기 위해 3D FEM이 필수적으로 요구된다. 하지만, 3D FEM은 정확한 결과를 얻을 수 있는 장점도 있지만, 긴 해석 시간을 요구하게 되어 한정된 시간 내에 최적 설계 수행 시 어려움이 발생하게 된다.

AFPM 전동기의 전자계 해석 시간을 감소하기 위해 여러 가지 방법들이 연구되고 있다. 그중에서도 Quasi-3D 해석기법은 다수의 2차원 FEM 해석 결과를 종합하여 3D FEM 해석 결과를 근사 계산하는 방법이다[8], [29]. 본 논문에서는 Quasi-3D 해석기법을 이용하여 초기 모델의 설계를 수행하였고, 각 설계변수의 특성을 분석하여 최적화 알고리즘에 활용하였다.

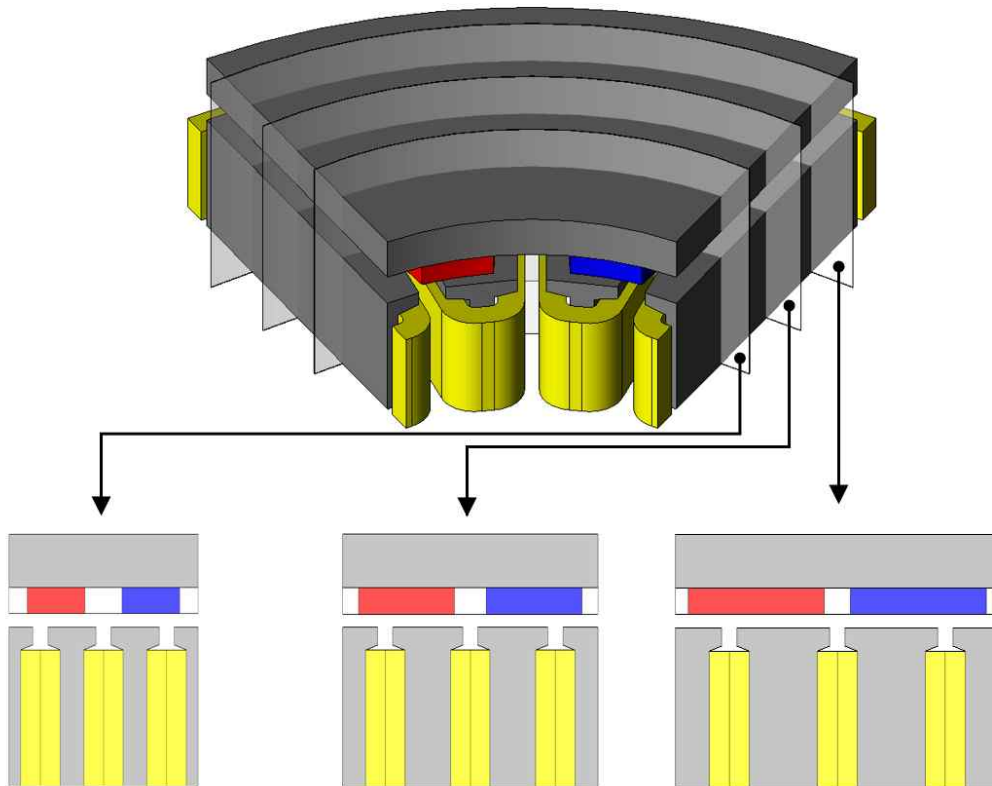


그림 2.4. Quasi-3D 해석기법의 개념도

Fig. 2.4. Conceptual diagram of Quasi-3D analysis method.

그림 2.4는 Quasi-3D 해석기법을 통해 3차원 AFPM 전동기 모델을 2차원 AFPM 전동기로 변환하는 방법을 나타낸다. 먼저 AFPM 전동기를 반경 방향으로 사용자가 원하는 개수로 분할 한 뒤, 각 부분에서의 반경 길이를 기준으로  $\theta - z$  평면에서의 전동기 형상을 구현하면 여러 개의 2차원 해석 모델을 얻을 수 있다. 각 모델의 적층 길이는 AFPM 전동기의 내부 반지름에서 외부 반지름의 거리와 사용자가 지정한 개수를 이용하여 선정한다.

## 2.2.2 Quasi-3D 해석기법을 활용한 AFPM 전동기 특성 분석

본 논문에서는 Quasi-3D 해석기법의 정확성을 검증하기 위해 AFPM 전동기의 무부하, 부하 해석을 수행하여 비교하였다. 그림 2.5는 Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 성능을 비교하기 위해 사용한 YASA 타입 AFPM 전동기의 형상이다. 표 2.1은 해석 모델의 설계 사양을 정리하였다. 본 해석 모델을 활용하여 무부하 해석의 역기전력, 코깅 토크와 부하 해석의 토크, 단자 전압 파형을 전류 밀도를 변화시키며 비교하였다.

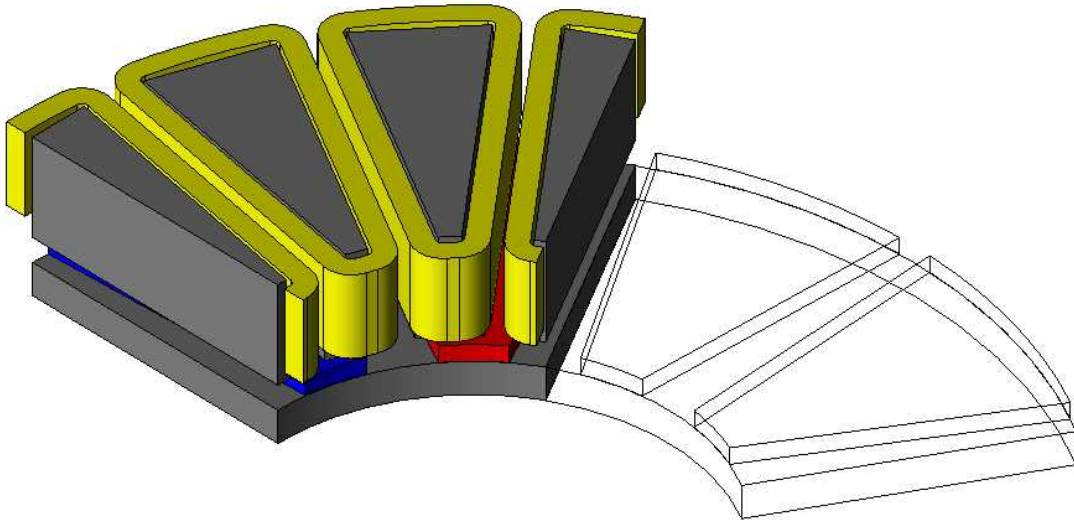


그림 2.5. Quasi-3D 해석기법 검증을 위한 AFPM 전동기 해석 모델  
 Fig. 2.5. An AFPM motor analysis model for the verification of Quasi-3D analysis method.



그림 2.6은 3D FEM과 Quasi-3D 해석기법의 무부하 역기전력과 코깅 토크의 해석 결과 그래프이다. 표 2.2와 같이 무부하 역기전력의 경우에는 3D FEM과 Quasi-3D 해석기법의 오차율이 약 2.2%로 해석 결과가 거의 일치하였지만, 코깅 토크의 경우에는 39.38%로 상대적으로 높은 오차율이 발생하였다. 이는 Quasi-3D 해석기법이 코깅 토크의 3차원 반경 방향 특성을 정확히 고려하지 못하였기 때문으로 판단할 수 있다. 역기전력은 축 방향 자속으로만 계산되는 반면에, 코깅 토크는  $r$ ,  $\theta$ ,  $z$  방향을 동시에 고려해야 한다[8]. 하지만 코깅 토크 파형의 경향은 정확히 일치하기 때문에 설계변수에 따른 특성은 분석할 수 있어 초기 설계 단계에 활용할 수 있다고 판단된다.

표 2.1. Quasi-3D 해석기법 검증을 위한 AFPM 전동기 해석 모델의 설계 사양  
 Table 2.1. Design Specification of AFPM analysis model for Quasi-3D analysis method verification

항목	해석 모델
극 / 슬롯 수	12 / 18
고정자 & 회전자 내경 / 외경	80 / 180 [mm]
공극 길이	1.5 [mm]
축방향 길이	47.18 [mm]
고정자 / 회전자 철심 재질	35JN230
자석 두께	3 [mm]
자석 사용량	0.71 [kg]
영구자석 재질	N42SH ( $Br_{min}=1.28$ [T])

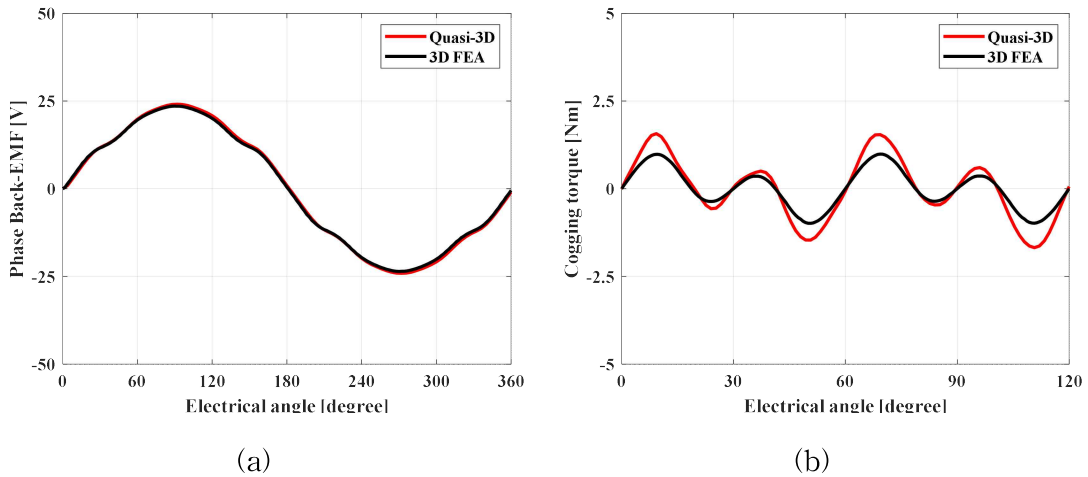


그림 2.6. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 무부하 해석 결과 파형의 비교

(a)역기전력 @ 2,000RPM (b)코깅 토크

Fig 2.6. Comparison of Quasi-3D analysis method and 3D FEM no load analysis result waveforms. (a)Back-electromotive force @ 2,000RPM. (b)Cogging torque.

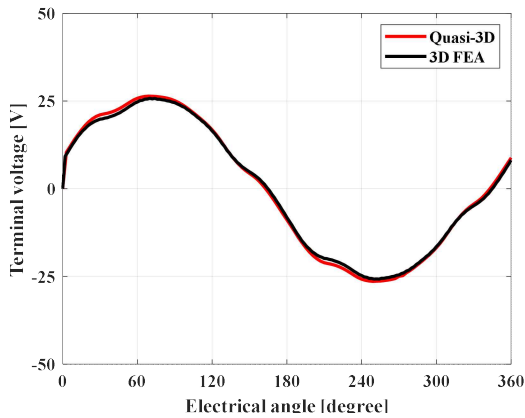
표 2.2. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 무부하 해석 오차율 분석 결과

Table 2.2. Results of no-load analysis error rate of Quasi-3D analysis method and 3D FEM.

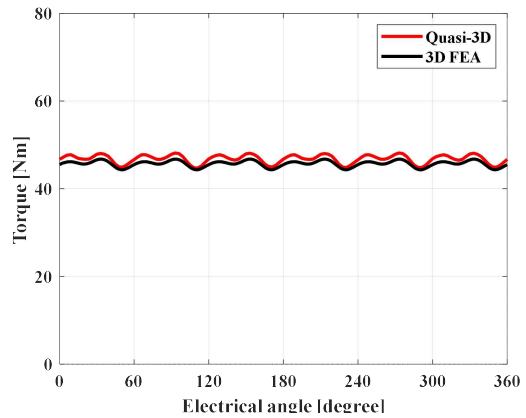
	3D FEM	Quasi-3D	오차율
역기전력	24.08 [Vpk]	23.55 [Vpk]	2.2 [%]
코깅 토크	3.25 [Nm]	1.97 [Nm]	39.38 [%]

$$\text{오차율 [\%]} = (3D\ FEM - \text{Quasi-3D}) / 3D\ FEM * 100.$$

AFPM 전동기의 부하 해석 비교는 포화도에 따른 특성을 분석하기 위해 전류 밀도를 10, 20A<sub>rms</sub>/mm<sup>2</sup>으로 나눠 해석하였다. 그림 2.7과 그림 2.8은 전류 밀도에 따른 토크와 단자 전압의 파형을 나타낸다. 그리고 표 2.3에서 확인할 수 있듯이 전류 밀도 10A<sub>rms</sub>/mm<sup>2</sup> 기준에서 평균 토크와 토크 리플은 약 2.33%, 2.01%의 오차율이 발생하였다. 그리고, 단자 전압은 약 2.39%의 오차율로 낮은 오차율이 발생하였다. 반면 전류 밀도가 20A<sub>rms</sub>/mm<sup>2</sup>의 경우에는 평균 토크, 토크 리플, 단자 전압의 오차율이 각각 2.46%, 0.54%, 3.38%로 10A<sub>rms</sub>/mm<sup>2</sup>보다 상대적으로 높은 오차율이 발생하였다. 이를 통해 Quasi-3D 해석기법은 포화 특성의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.



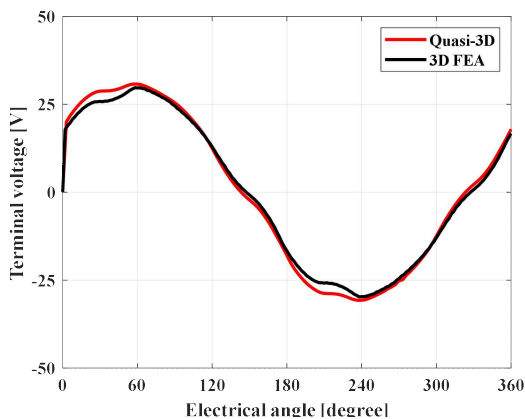
(a)



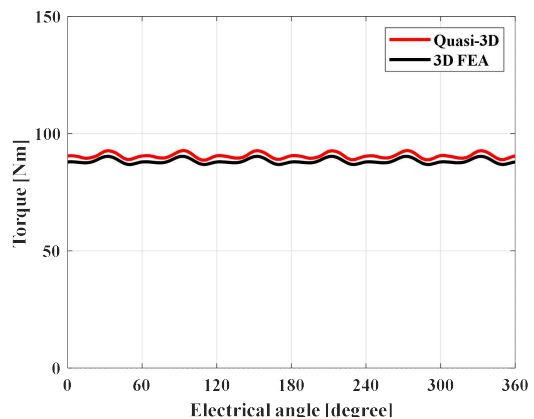
(b)

그림 2.7. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 부하 해석 결과 파형의 비교 (전류 밀도 =  $10A_{rms}/mm^2$ ) (a)단자전압 @ 2,000RPM (b)발생 토크

Fig 2.7. Comparison of Quasi-3D analysis method 3D FEM load analysis result waveforms. (current density =  $10A_{rms}/mm^2$ ) (a)Terminal voltage. @ 2,000RPM (b)Output torque.



(a)



(b)

그림 2.8. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 부하 해석 결과 파형의 비교 (전류 밀도 =  $20A_{rms}/mm^2$ ) (a)단자전압 @ 2,000RPM (b)발생 토크

Fig 2.8 Comparison of Quasi-3D analysis method and 3D FEM load analysis result waveforms. (current density =  $20A_{rms}/mm^2$ ) (a)Terminal voltage. @ 2,000RPM (b)Output torque.

표 2.3. Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 부하 해석 오차율 분석 결과  
 Table 2.3. Results of load analysis error rate of Quasi-3D analysis method and 3D FEM.

	3D FEM	Quasi-3D	오차율 [%]
평균 토크 (전류 밀도 : $10A_{rms}/mm^2$ )	46.79 [Nm]	45.7 [Nm]	2.33 [%]
토크 리플 (전류 밀도 : $10A_{rms}/mm^2$ )	7.36 [%]	5.35 [%]	2.01 [%]
단자 전압 (전류 밀도 : $10A_{rms}/mm^2$ )	26.40 [Vpk]	25.77 [Vpk]	2.39 [%]
평균 토크 (전류 밀도 : $20A_{rms}/mm^2$ )	90.49 [Nm]	88.26 [Nm]	2.46 [%]
토크 리플 (전류 밀도 : $20A_{rms}/mm^2$ )	4.5 [%]	3.96 [%]	0.54 [%]
단자 전압 (전류 밀도 : $20A_{rms}/mm^2$ )	30.76 [Vpk]	29.72 [Vpk]	3.38 [%]

평균 토크 오차율 [%] = (3D FEM - Quasi-3D) / 3D FEM \* 100.

단자 전압 오차율 [%] = (3D FEM - Quasi-3D) / 3D FEM \* 100.

토크 리플 오차율 [%] = 3D FEM - Quasi-3D

### 제 3 장 멀티모달 최적화 알고리즘

EV 구동용 전동기와 같은 전기기기들은 설계변수에 따른 출력 특성이 비선형적인 형태를 나타낸다. 특히 AFPM 전동기 같은 경우에는 3D FEM이 필수적으로 요구되기 때문에 최적 설계를 진행할 때 함수 호출 횟수를 저감하는 것이 중요하다 [30].

문제영역에서 하나의 최적점을 찾는 것이 아니라 여러 지역의 최적해들을 동시에 찾는 방법을 멀티모달 최적화 알고리즘이라고 한다. 최적화 알고리즘은 확률론적 알고리즘과 결정론적 알고리즘으로 나뉜다. 유전 알고리즘, 인공 벌 군집 알고리즘과 같은 확률론적 최적화 알고리즘은 넓은 문제영역 범위를 탐색하여 전역 최적해 뿐만 아니라 다양한 지역 최적해도 탐색할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 최적해로 수렴하는 과정에서 불필요한 해석을 반복하기 때문에 FEM을 통해 목적함수를 계산하였을 때 해석 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다[31]. 다음으로 패턴탐색 기법, 경사하강법, 심플렉스과 같은 결정론적 알고리즘은 하나의 최적해를 정확하게 탐색할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 다수의 최적해로 구성되는 멀티모달 문제영역에서는 지역 최적점으로 수렴할 위험이 존재한다.

본 논문에서는 불필요한 해석 시간을 저감 하면서, 최적해를 정확하게 탐색하기 위해 두 가지의 멀티모달 최적화 알고리즘인 HAS, HM을 제안한다. 먼저 HAS는 기존 확률론적 알고리즘, 머신러닝 기법과 결정론적 알고리즘의 결합을 통해 기존 알고리즘의 성능을 개선하였다. 다음으로 HM은 기존 kriging 방법에서 활용하는 격자 간격을 각 설계변수의 민감도에 따라 다르게 설정하여 효율적으로 대리모델을 생성할 수 있게 하였다. 두 가지 알고리즘의 성능은 기존 알고리즘과의 비교를 통하여 검증하였다.

### 3.1 제안하는 최적화 알고리즘 1 : HAS

#### 3.1.1 제안하는 알고리즘 1 소개

기존의 ABC는 다른 확률론적 알고리즘보다 멀티모달 최적화 문제에서 다양한 최적점을 탐색할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 정확한 최적점으로 수렴하기 위해 많은 함수 호출이 필요한 문제가 있다. 따라서, 본 논문에서는 함수 호출에 대한 문제를 해결하기 위해 머신러닝의 분류 기법 중 한 가지인 KSVM과 결정론적 방법인 NM 활용하여 기존 ABC의 성능을 향상하였다.

##### (1) Latin hypercube sampling

Latin hypercube sampling(LHS)는 다변량 분포로부터 표본을 생성하기 위한 통계적 방법이다[32]. 그림 3.1은 무작위의 샘플링과 LHS의 샘플링을 비교하였다. 그림을 통해 알 수 있듯이 LHS의 경우, 문제영역은 N개의 등간격으로 분할되고, 각각에서 무작위로 표본이 선택되어 도메인 전체에 균일한 분포가 생성되게 한다. N은 문제의 복잡성, 계산 자원 및 원하는 정확도에 기초하여 조정할 수 있다.

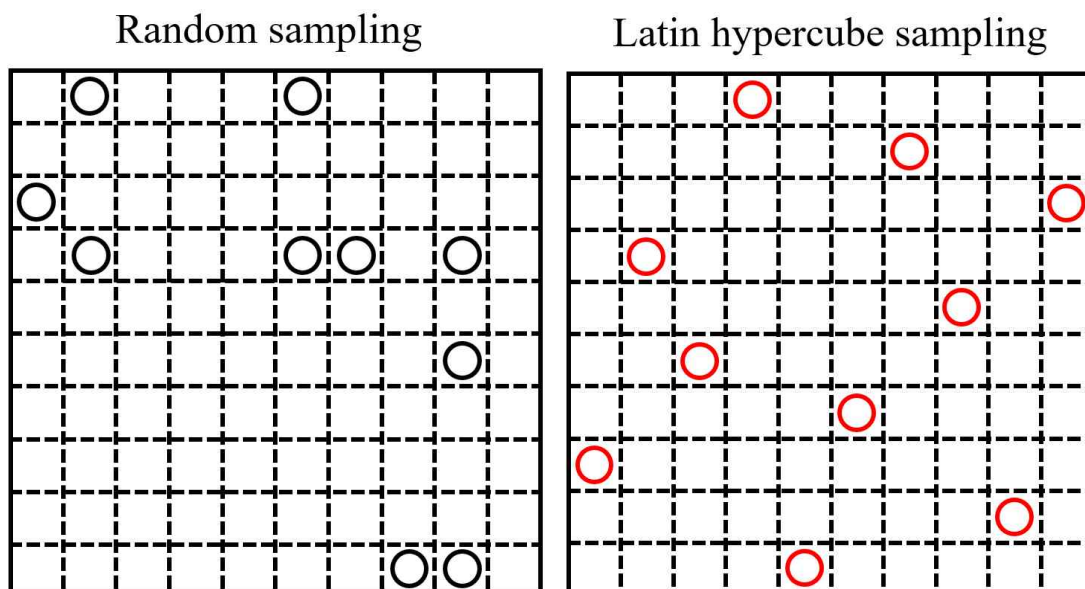


그림 3.1. 랜덤 샘플링과 라틴하이퍼 큐브 샘플링  
Fig. 3.1. Random sampling and latin hypercube sampling.

## (2) 기존 인공 벌 군집 알고리즘 (ABC)

ABC의 원리는 최적화 문제에 대한 적합한 해결책을 찾기 위한 꿀벌의 영리한 먹이 탐색 행동에서 유래되었다. ABC는 다음과 같은 세 가지 유형의 객체로 구성된다 [33], [34].

- Employed bee : 알고리즘 내에서 첫 번째로 탐색을 수행하는 객체로서, 주변 객체와 아래와 같은 수식을 통해 이동 좌표를 선정한다.

$$v_{ik} = x_{ik} + Acc \times r \times (x_{ik} - x_{jk}) \quad (3.1)$$

이때,  $v_{ik}$ 는 할당된 새로운 샘플을 의미하고,  $x_{ik}$ 는 기존에 가지고 있는 샘플을 의미한다. 그리고,  $x_{jk}$ 는 전체 샘플 중 무작위로 선정된 샘플이며,  $r$ 은  $[-1, 1]$  사이의 난수이다.  $Acc$ 는 가속도 계수로 상수 값으로 고정되는데, 이로 인해 최적점 근처에서 불필요한 탐색이 발생하게 된다.

- Onlooker bee : 해당 객체는 무작위로 샘플을 선정하는 것이 아닌 Employed bee의 데이터를 기반으로 탐색하려는 샘플을 선정한다. 이때, 샘플을 선정하는 기준은 일반적으로 roulette wheel method를 활용한다.
- Scout bee : 해당 객체는 특정 위치에서 반복해서 움직이는 샘플의 위치를 무작위로 이동시켜서 새로운 문제영역을 탐색한다. 하지만, 무작위의 기준이 별도로 지정되어 있지 않아 같은 위치를 탐색할 수 있는 비효율성이 존재한다.

## (3) 커널 서포트 벡터 머신

서포트 벡터 머신(Support vector machine : SVM)은 패턴 식별, 데이터 분석 등의 분류 문제영역에서 활용되는 지도 학습 모델이다[35], [36]. SVM의 기본 개념은 그림 3.2와 같이 데이터를 구분하기 위해 서로 다른 범주의 차이가 가장 많이 발생하는 마진(margin)을 가지는 경계선을 탐색하는 것이다. 그러나 해당 기술은 선형 분류 모델 기술이기 때문에 비선형적인 문제영역에서 활용하기에는 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 SVM에 커널 트릭(kernel trick)을 적용한 KSVM이 고안되었다 [37].

KSVM은 커널 트릭을 활용하여 고차원으로 맵핑(mapping)한 이후에 SVM을 활용하여 선형 분리를 수행하고 기존 차원의 비선형적인 문제영역을 분류할 수 있다. KSVM의 하이퍼파라미터는 cost parameter와 gaussian kernel function parameter가

있으며, 해당 값을 조정하여 기술의 성능을 결정할 수 있다.

본 논문에서는 KSVM을 이용하여 상위 n% 샘플 데이터에 대한 두 개의 영역을 그림 3.3과 같이 생성하였다. 알고리즘이 반복됨에 따라 학습 데이터의 개수가 증가하여 최적점 주변의 영역이 명확하게 생성되었다. 이러한 KSVM을 통한 영역을 활용하여 ABC의 탐색 성능을 개선하였다.

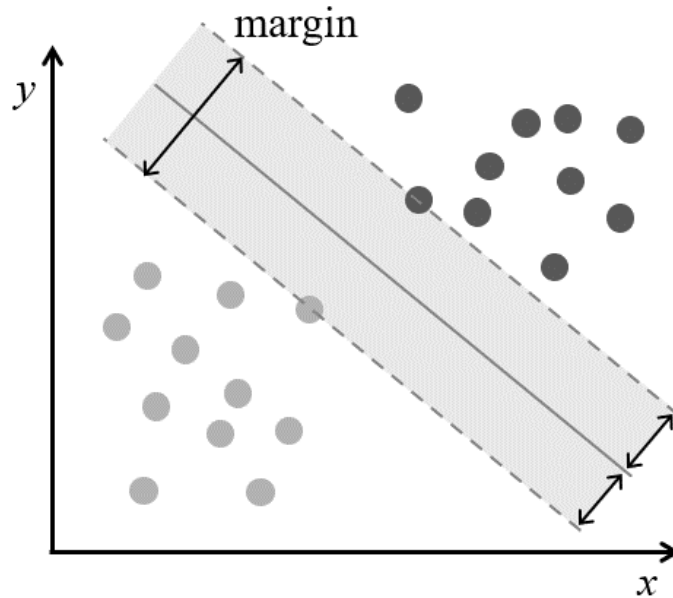
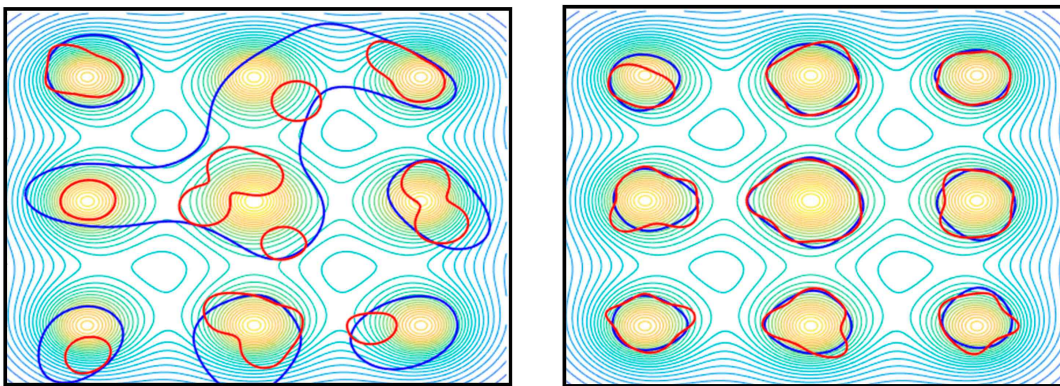


그림 3.2. SVM의 개념도

Fig. 3.2. Conceptual diagram of SVM.



(a)

(b)

그림 3.3. 샘플 데이터 기반 KSVM의 영역 (a)알고리즘 초기 단계 (b)알고리즘 수렴단계

Fig. 3.3. Regions created by the KSVM using sample data. (a)Algorithm initial stage. (b)Algorithm convergence stage.



(4) 강화 인공 벌 군집 알고리즘

본 논문에서 제안하는 HAS는 그림 3.4와 같이 KSVM을 통해 생성된 각 영역에서 샘플의 탐색능력을 강화하였다.

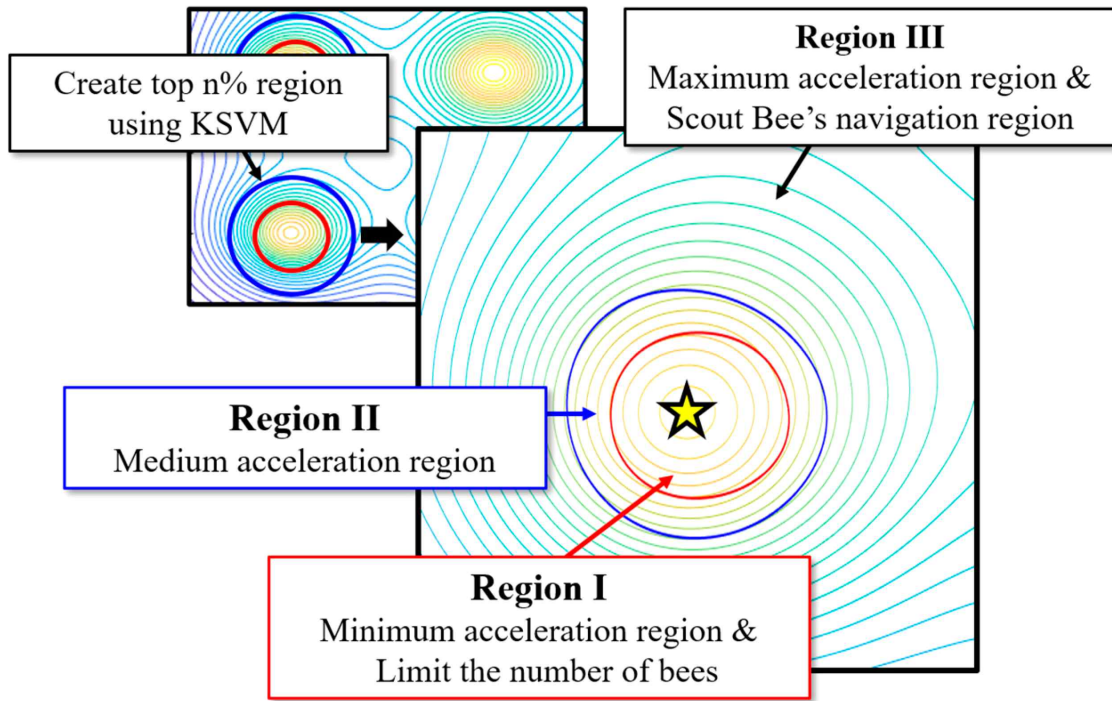


그림 3.4. HAS의 영역 분할 개념

Fig. 3.4. Region division concept of the HAS.

표 3.1. 영역별 난수 범위

Table 3.1. Random number range for each region

항목	난수 범위
수렴 영역	0.1 ~ 0.9
상세 탐색 영역	1.0 ~ 1.5
전체 탐색 영역	1.6 ~ 2.0

### ① 수렴 영역 (영역 1)

수렴 영역은 그림 3.4과 같이 하이퍼파라미터를 조정하여 최적점 근처에 위치한 영역이다. 따라서, 해당 영역에서는 기존 ABC 내  $Acc$ 를 감소시켜 벌의 이동 범위를 최소화하였고, 이를 통해 탐색 능력을 향상시켰다. 수렴 영역 내에서의  $Acc$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$Acc_i = [R \times (Acc \times f_{obj,i} \times N) / \sum_{n=1}^N f_{obj,n}] \quad (3.2)$$

이때,  $R$ 은  $[0.1, 0.9]$  범위의 난수이며,  $f_{obj,i}$ 는  $i$ 번째 샘플의 목적함수이고,  $N$ 는 전체 샘플 개수를 의미한다. 각 샘플의 가속계수는 (3.2) 식을 통해 계산되어 영역 1 내의 샘플에 활용된다. 또한, 특정 최적해 영역의 샘플 포화를 예방하기 위해 샘플이 일정 수를 초과하게 되면, scout bee로 변환하여 새로운 영역을 탐색하게 한다.

### ② 상세 탐색 영역 (영역 2)

상세 탐색 영역에서는 그림 3.4과 같이 영역 1과 비교하였을 때 최적점 근처에 보다 넓은 영역을 의미한다. 해당 영역의 샘플은 최적점으로 수렴할 가능성이 높기 때문에 적절한 가속 계수를 가져야 한다. 따라서 영역의 가속 계수  $Acc$ 를 계산하는 방법은 식(3.1)과 동일하지만, 난수  $R$ 의 범위를  $[1.0, 1.5]$ 로 설정하여 탐색 객체의 이동 속도를 향상하였다.

### ③ 전체 탐색 영역 (영역 3)

전체 탐색 영역은 KSVM에 의해 형성된 영역을 제외한 나머지 영역을 의미한다. 이 영역의 샘플은 탐색 영역을 확장하고, 새로운 최적점을 찾기 위해 가장 높은 가속 계수  $Acc$ 를 가지게 한다. 따라서 난수  $R$ 의 범위를  $[1.6, 2.0]$ 로 설정하여, 전체 영역을 빠르게 탐색할 수 있게 하였다. 또한, 기존 무작위로 선정되는 scout bee의 위치를 해당 영역에만 생성될 수 있게 하여 새로운 최적점을 효과적으로 탐색하였다.

(5) KVSM 영역을 활용한 NM

NM은 다차원 공간에서 목적함수의 최솟값 또는 최댓값을 구할 때 활용되는 결정론적 알고리즘이며, 함수 값을 기반한 결정론적 방법이기 때문에 목적함수를 구체적으로 알 수 없는 비선형 최적화 문제에 많이 활용된다[38]. 하지만, 여러 최적점이 존재하는 문제영역에서는 지역 최적점으로 수렴할 수 있다는 단점이 존재한다[39], [40]. 그림 3.5는 본 논문에서 KSVM 영역을 활용한 NM의 개념도를 나타낸다. 문제영역에서 NM이 최적해를 탐색하기 위해 반사, 확장, 수축, 축소 동작을 반복적으로 수행하게 된다. NM은 탐색 시작 위치에 따라 알고리즘의 성능에 영향을 미치기 때문에, 탐색을 위한 초기 샘플 선정이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 KSVM을 통해 생성한 수렴 영역을 고려하여 NM의 반사와 확장의 탐색 공간을 제한하였다. 만일 샘플의 좌표가 해당 영역 밖에 형성될 경우 영역 내에 동일한 방향의 가장 먼 거리에 샘플이 생성된다. 나아가 ABC를 통해 수렴 영역 내 샘플을 활용하여 함수 호출 횟수를 절감하며, 동시에 최적점으로의 수렴 속도를 증가시킨다.

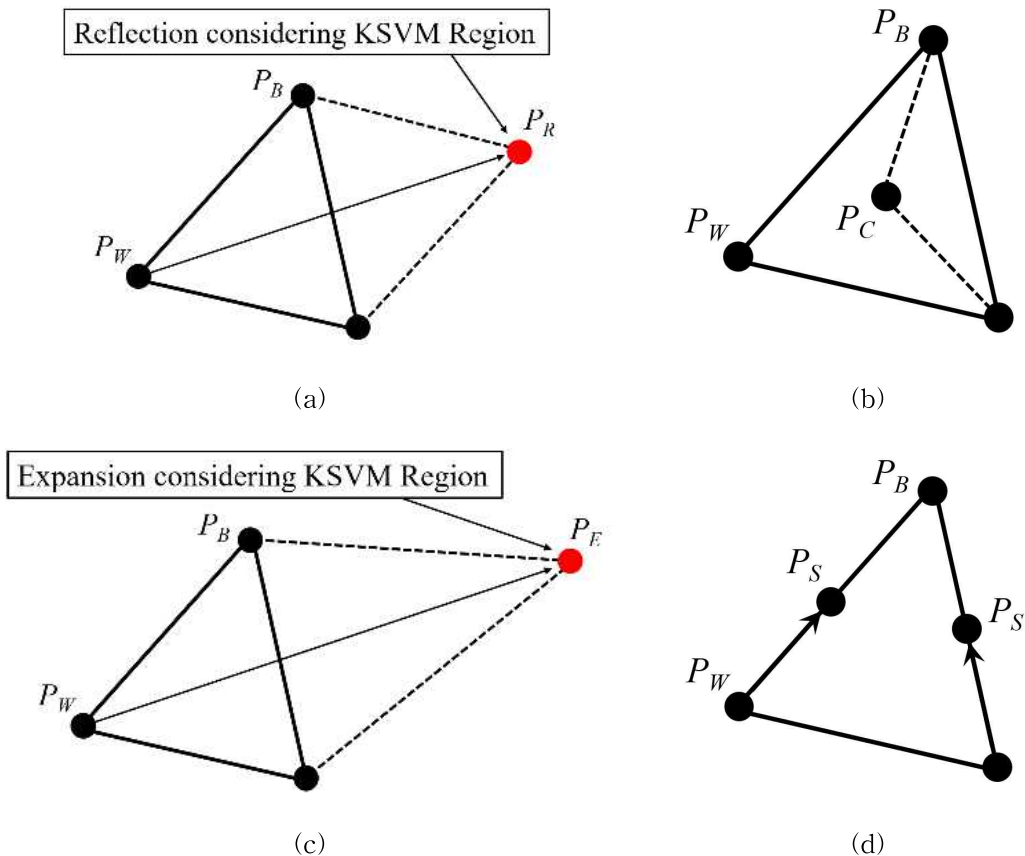


그림 3.5. Nelder-Mead 기법의 개념도 (a)반사 (b)수축 (c)확장 (d)축소  
 Fig. 3.5. Concept of Nelder-Mead method. (a)Reflection. (b)Contraction.  
 (c)Expansion. (d)Shrinking.

(6) HAS의 순서도

그림 3,6는 본 논문에서 제안하는 HAS의 순서도를 나타낸다. 제안하는 알고리즘의 구체적인 과정은 다음과 같다.

**Step 1. 문제 정의**

목적 함수를 설정하고, 설계변수의 최대 및 최소 범위, 초기 샘플 개수, 종료 조건 등과 같은 제한 사항을 정의한다.

**Step 2. LHS를 활용한 초기 샘플 생성**

초기 샘플들의 집합은 목적함수를 통해 생성된다. 이때 모든 샘플은 LHS를 기반으로 생성된다.

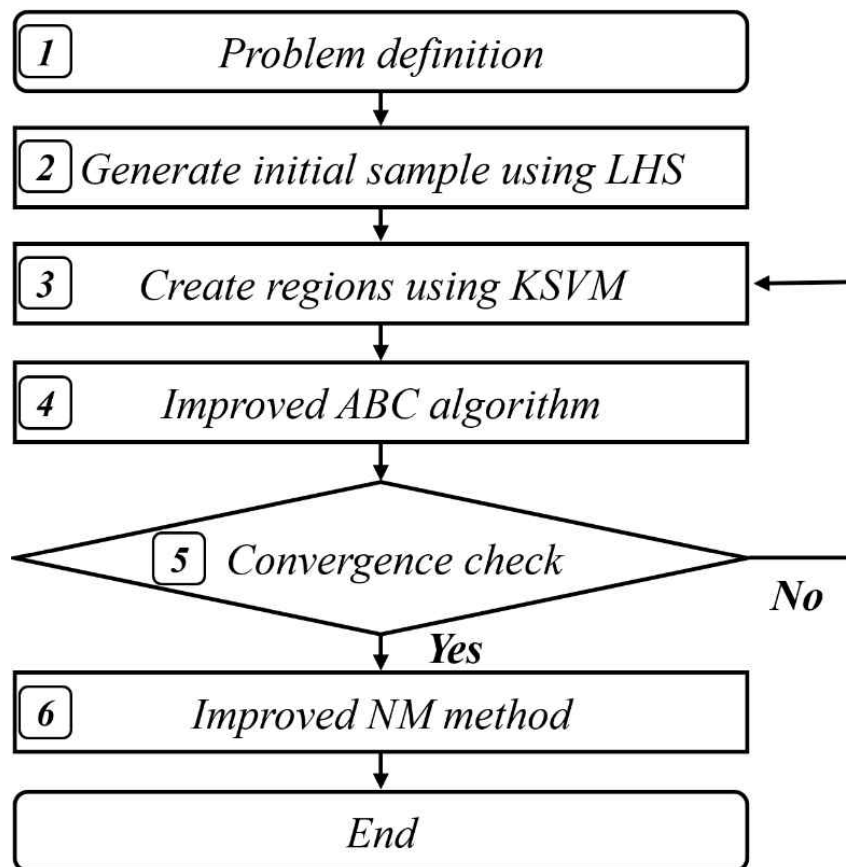


그림 3.6. HAS의 순서도

Fig. 3.6. Flow chart of the HAS.

### Step 3. KSVM을 활용한 영역 생성

문제영역에 존재하는 샘플들의 값을 통해 상위 N%에 대한 두 개의 KSVM 영역을 생성한다. 알고리즘이 반복될 때마다 데이터를 중첩시켜 KSVM 성능을 향상시킨다.

### Step 4. 강화 인공 벌 군집 알고리즘

각 영역에 존재하는 샘플은 각각 다른 가속 계수를 가지게 된다. 샘플은 문제영역을 탐색하면서 결과를 지속적으로 저장하고, 이후 문제영역을 탐색하는데 활용한다.

### Step 5. 수렴 확인

세 번의 반복동안 탐색된 최적점의 개수에 변화가 없으면 알고리즘을 종료한다. 만약 개수에 변화가 발생한다면 step 3로 돌아가며 탐색을 재진행한다.

### Step 6. KSVM을 활용한 NM

수렴 영역 내에 존재하는 샘플을 활용하여 NM을 수행한다. KSVM으로 생성된 영역을 고려하여 NM의 탐색 영역을 제한한다.

## 3.1.2 시험 함수를 이용한 제안하는 알고리즘 1의 성능 검증

제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 기존 ABC와 niching 유전 알고리즘(niching genetic algorithm : NGA)과의 비교를 최적점이 9개, 16개인 두 가지 시험 함수에서 수행하였다. 사용한 시험 함수의 수식은 다음과 같다.

$$f_1(x,y) = \sum_{i=1}^{np_1} \frac{b_i}{1 + [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]/a_i} \quad (3.3)$$

이때,  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_k, y_k)$ 는 시험 함수의 최적점의 좌표이고  $a_i$ ,  $b_i$ 는 피크의 크기와 관련된 값이다.  $np_1$ 는 피크의 수를 나타낸다. 두 시험 함수의 3차원 형상은 그림 3.12와 같다. 최적화 과정은 각 알고리즘에 대해 100번에 걸쳐 수행되었으며, 성공률은 전체 최적점 중에 발견된 최적점 수의 비율로 계산하였다. 각 알고리즘의 검증 결과는 표 3.2에 제시하였다. KSVM, NM과의 결합을 통해 성능을 개선시킨 HAS는

두 가지 시험 함수에서 기존의 ABC와 NGA보다 우수한 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

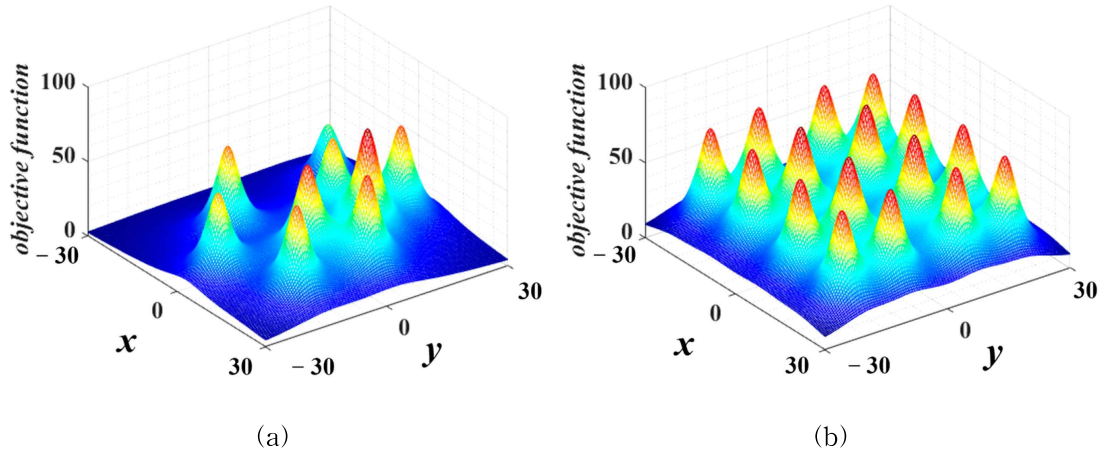


그림 3.7. 3차원 시험 함수 (a)피크가 9개인 시험 함수 1 (b)피크가 16개인 시험 함수 2

Fig. 3.7. Three-dimensional test function. (a)Test function 1 with 9 peaks. (b)Test function 2 with 16 peaks.

표 3.2. HAS와 기존 알고리즘의 성능 비교

Table 3.2. Performance comparison between HAS and existing algorithms

시험 함수 1 (9개)	ABC	NGA	HAS
함수 호출 횟수	1105	1295	1030
성공률	83.55 [%]	77.78 [%]	97.13 [%]
시험 함수 2 (16개)	ABC	NGA	HAS
함수 호출 횟수	2100	1850	1765
성공률	84.88 [%]	81.56 [%]	96.01 [%]

## 3.2 제안하는 최적화 알고리즘 2 : HM

### 3.2.1 제안하는 알고리즘 2 소개

전동기 최적화 문제영역에서 기존 kriging 방법을 활용하여 대리모델을 생성할 때는 각 설계변수의 격자 개수를 동일하게 한 연구사례가 다수 존재한다[41], [42]. 해당 방법은 설계변수가 두 개인 2차원 문제영역의 경우에는 상대적으로 적은 계산 시간이 요구되지만, 설계변수가 늘어날수록 계산시간이 기하급수적으로 증가하게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하고자, 각 설계변수의 민감도에 따른 격자 개수를 다르게 설정하여 불필요한 계산시간을 저감하고, 최적해를 효율적으로 탐색할 수 있는 HM을 제안하였다. 그림 3.8은 HM의 순서도를 나타내며, 총 네 가지의 단계로 나누어 최적 설계를 수행한다.

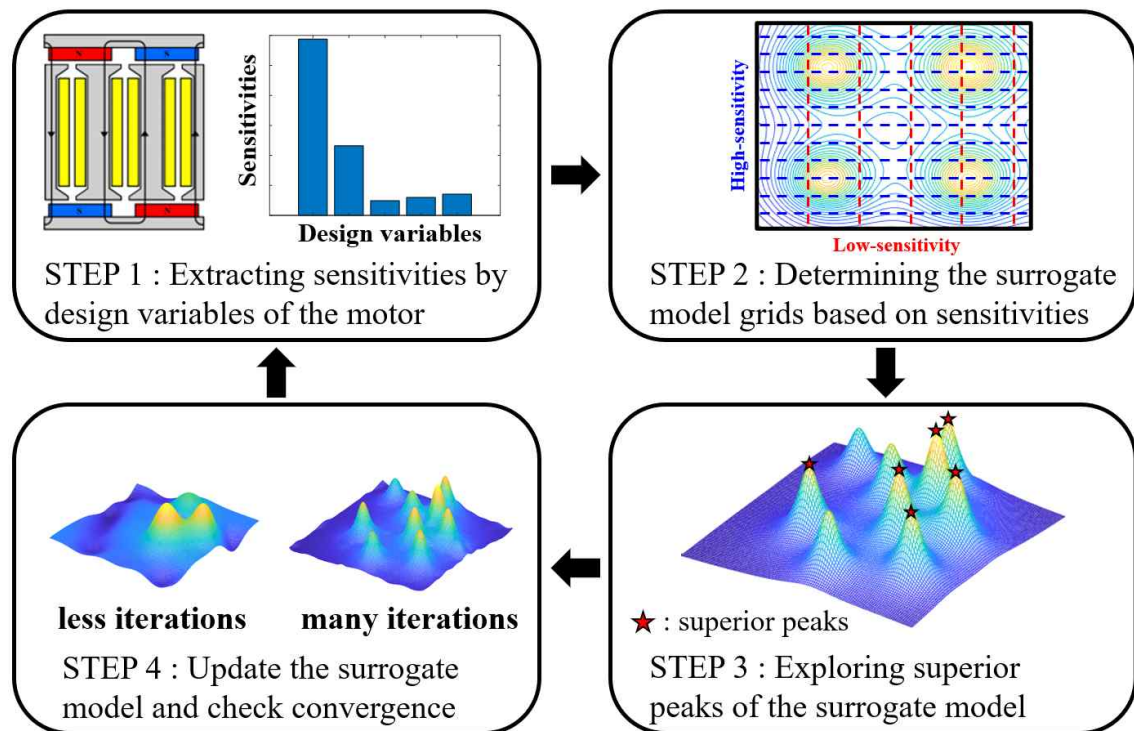


그림 3.8. HM의 순서도

Fig. 3.8. Flow chart of the HM.

### (1) 설계변수별 민감도 추출

첫 번째 단계는 표본 데이터로부터 각 설계변수의 민감도를 도출한다. 변수의 민감도 분석은 기계학습 분야에서 모델의 예측 성능을 분석할 때 각 설계변수의 상대적 중요도를 파악하기 위해 자주 활용되고 있다. 본 논문에서는 초기 학습 데이터를 샘플을 균일하게 분포시킬 수 있는 LHS를 통해 생성하고, MATLAB의 내장함수인 predictorImportance를 통해 민감도 분석을 수행한다. predictorImportance는 결정 트리 모델에서 각 예측 변수의 중요도를 평가하고, 각 예측 변수가 모델 예측에 미치는 영향을 계산한다. 각 예측 변수의 중요도는 해당 변수로 인한 노드 분할에 의한 위험 변화를 총 노드 분할 개수로 나누어 계산되고, 이를 통해 어떤 변수가 모델에서 더 중요한지를 추정할 수 있다[39]. 본 논문에서는 사용자가 제한한 문제영역 내에서 LHS과 알고리즘을 통해 얻은 샘플의 목적함수를 정규화(normalization)하고, 결정 트리 모델에 학습한다. 이후, predictorImportance를 통해 민감도를 분석하여 중점적으로 목적함수에 큰 영향을 미치는 설계변수를 선정한다. 정규화 과정을 통해 전동기의 토크, 토크 리플, 단자 전압 등과 같이 목적함수의 범위가 달라질 경우에도 적용할 수 있다.

### (2) 민감도에 따른 대리모델 격자 결정

두 번째 단계는 민감도 분석 결과를 기반으로 대리모델을 구성한다. 일반적으로 대리모델을 생성할 때는 균등한 간격의 격자를 활용하여 문제영역 전체에 대한 보간을 수행한다[42]. 하지만, 각 설계변수에 대한 동일한 격자는 고차원 문제영역일 경우에는 긴 계산시간을 요구하게 되고, 정확한 최적점을 탐색하는데 어려움이 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 그림 3.9와 같이 민감도 분석 결과를 통해 각 설계변수의 격자 크기를 다르게 설정한다. 목적함수에 대해 민감도가 높은 설계변수는 상세하게 탐색하기 위해 더 적은 격자가 할당하고, 민감도가 상대적으로 큰 변수에는 많은 격자를 할당한다. 알고리즘이 반복됨에 따라 변화하는 민감도를 고려하여 각 설계변수의 격자 개수를 선정한다.

### (3) 대리모델 내 우수 피크점 탐색

세 번째 단계에서는 대리모델 내에 존재하는 여러 피크점 중에 우수한 모델을 선정한다. 대리모델 내에 존재하는 모든 피크점의 목적함수를 계산하게 되면, 과적합에 의한 잘못된 피크점도 해석하게 되고, 이는 해석 시간이 늘어나는 문제를 발생시킨다. 따라서, 본 논문에서는 주변 격자와의 값을 비교하여 전체 피크점을 탐색하고, 상위 n%의 피크점에 대해서만 목적함수를 계산하여 우수한 최적점을 탐색한다.



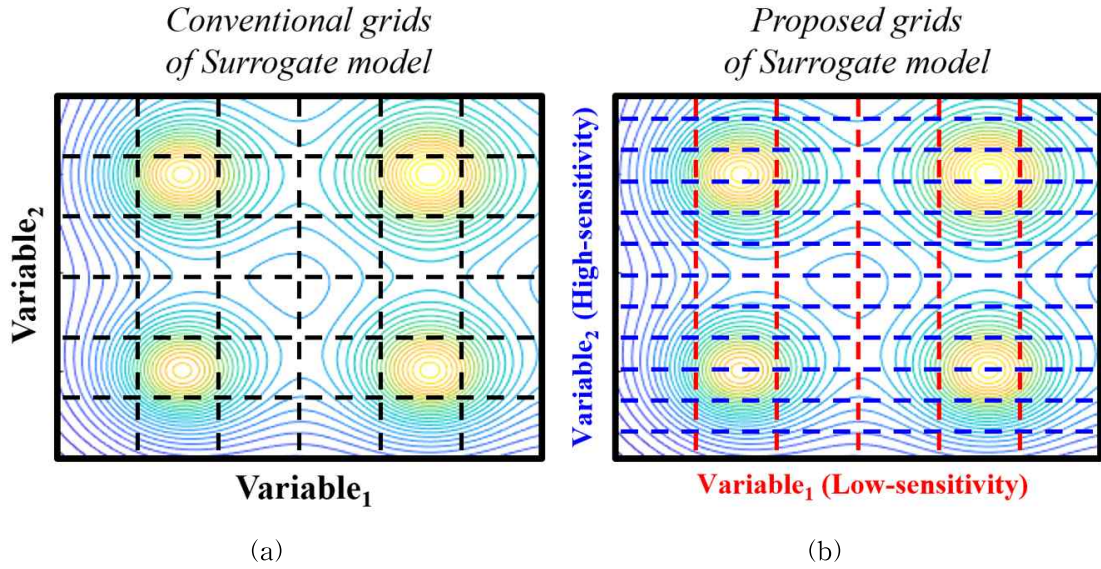


그림 3.9. 격자 비교 (a)기존 대리모델의 격자 구성 (b)제안하는 방법의 대리모델의 격자 구성

Fig. 3.9. The comparison of grids. (a)Conventional grids of the surrogate model. (b)Proposed grids of the surrogate model.

#### (4) 대리모델 업데이트 및 수렴 확인

네 번째 단계에서는 이전 단계에서 탐색한 샘플을 이용하여 대리모델을 업데이트 한다. 이러한 반복적인 절차는 문제영역의 정확성을 향상시키고, 나아가 최적해를 도출하게 된다. 대리모델의 업데이트 이후에는 수렴 조건을 통해 알고리즘 종료 여부를 판단한다.

### 3.2.2 시험 함수를 이용한 제안하는 알고리즘 2의 성능 검증

제안하는 알고리즘 HM의 타당성을 검증하기 위해 일반적으로 활용되는 고차원 시험 함수인 Sphere와 Schwefel 함수를 통해 기존의 대리모델과 비교를 진행하였다 [44]. 각 함수에 대한 수식은 다음과 같다.

$$f(x) = \sum_{i=1}^d w_i x_i^2 \quad (3.5)$$

$$f(x) = 418.9829d - \sum_{i=1}^d x_i w_i \sin(\sqrt{|x_i|}) \quad (3.6)$$

이때, 본 논문에서 제안한 민감도의 특성을 활용하기 위해 각 변수에 대한 가중치  $w_i$ 를 도입하였다. 각 변수에 대해 가중치를 부여하게 됨으로써 함수의 비선형성을

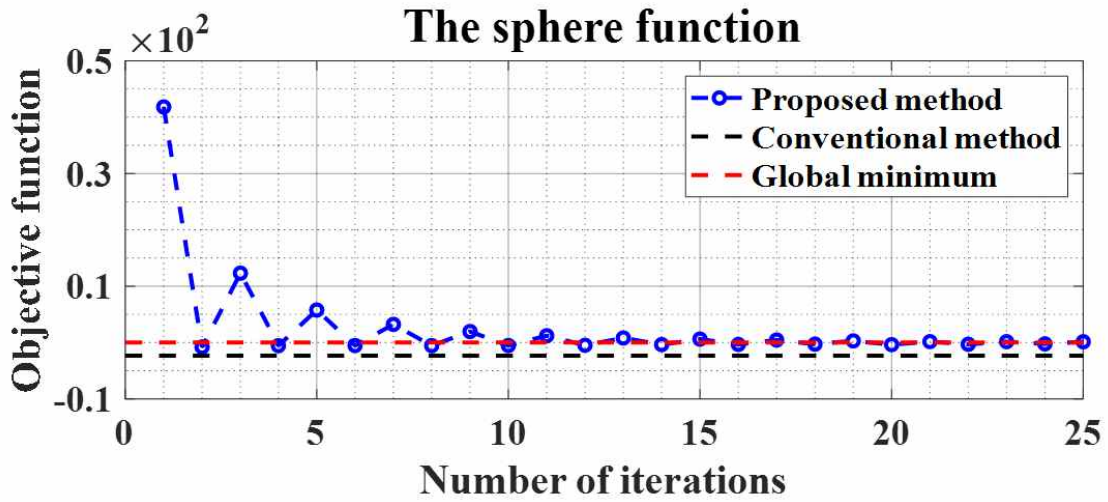
강화하였고, 이를 통해 알고리즘의 비교를 객관적으로 수행하였다.

두 가지 시험 함수에서 동일한 기준으로 비교하기 위해 제안하는 방법과 기존 방법 모두 같은 함수 호출 횟수를 이용하여 평가하였고, 표 3.3을 통해 알 수 있듯이 본 논문에서 제안하는 HM의 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 먼저 전역 최솟값이 0인 Sphere 함수에 적용하였을 때 HM은 약 0.04의 절대 오차가 발생하였고, 기존 방법은 약 7.63으로 상대적으로 높은 절대 오차가 발생하였다. 또한, 전역 최솟값이 -837.9658인 Schwefel 함수에서의 비교에서도 HM의 오차율은 0.11%이고, 기존 방법의 오차율은 1.07%로 제안하는 방법의 성능을 입증할 수 있다.

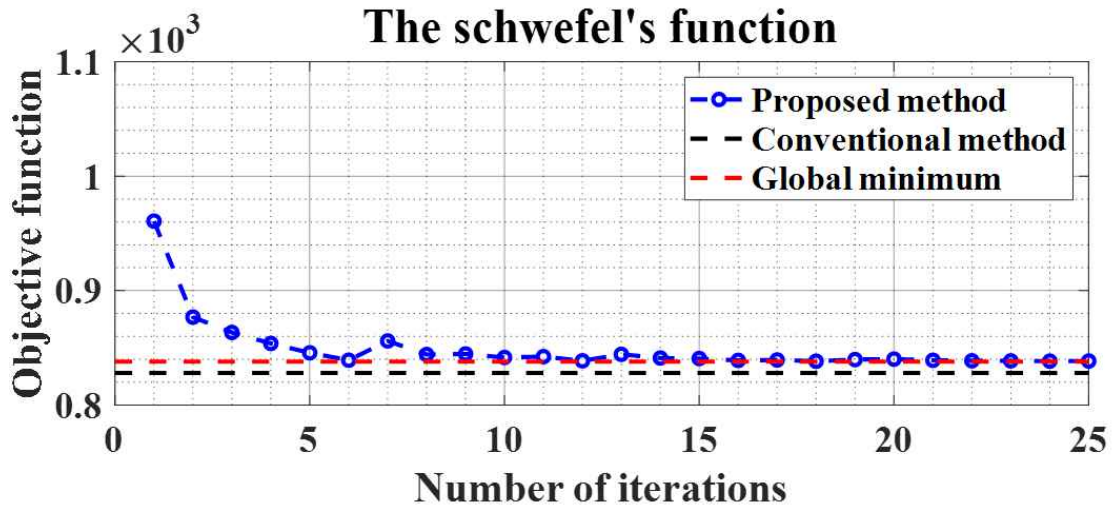
표 3.3. HM와 기존 대리모델의 성능 비교

Table 3.3. Performance comparison between HM and conventional surrogate model.

Sphere 함수	기존 대리모델	HM
함수 호출 횟수	325	325
절대 오차	7.63	0.04
Schwefel 함수	기존 대리모델	HM
함수 호출 횟수	1261	1261
오차율	1.07 [%]	0.11 [%]



(a)



(b)

그림 3.10. 고차원 시험 함수에 대한 알고리즘 성능 분석 (a)Sphere 함수 (b)Schwefel 함수

Fig. 3.10. The performance analysis on high-dimensional test functions. (a)The sphere function. (b)The schwefel's function.

## 제 4 장 EV 구동용 AFPM 전동기 최적 설계

### 4.1 EV 구동용 AFPM 전동기 설계 제원 및 요구 조건

AFPM 전동기를 설계할 때, 여러 가지 요구사항과 제약 조건을 고려해야 한다. 배터리와 전동기로 구동되는 EV의 특성상, 전동기의 성능은 자동차의 성능에 직접적으로 영향을 미치므로 고효율이 요구된다. 또한, 한정된 공간에 전동기를 배치해야 하므로 전동기의 소형 및 경량화가 되어야 하고, 배터리와 인버터 구성 요소에서 결정되는 전압 및 전류 제한 등을 고려하여 설계해야 한다[45]. 따라서, 본 연구에서는 EV 구동용 AFPM 전동기 설계에 적용되는 요구사항과 제약 조건을 표 4.1와 같이 선정하였다.

표 4.1. EV 구동용 AFPM 전동기 설계의 요구 조건 및 제한 조건  
Table 4.1. Requirement and constraint of AFPM motor for EV drive.

항 목		성 능
최대 부하	출력	125 [kW]
	요구 토크	518.98 [Nm]
	회전 속도	2,300 [RPM]
	효율	92 [%] 이상
극 / 슬롯 수		12 / 18
최대 속도		12,000 [RPM]
토크 리플		10 [%] 이하
배터리 단자전압		360 [ $V_{pk-dc}$ ]
상전압 제한		187.06 [ $V_{pk-ph}$ ]
인가 전류 제한		690 [ $A_{pk}$ ] 이하
공극 길이		1.5 [mm]
고정자 외/내경		260 / 110 [mm]
회전자 외/내경		260 / 110 [mm]
축 방향 길이		76.94 [mm]
전류 밀도		30 [ $A_{rms}/mm^2$ ]
고정자 / 회전자 철심 재질		35PN230
영구자석 재질		N42SH ( $Br_{min}=1.28$ [T])

## 4.2 Quasi-3D 해석기법을 이용한 AFPM 전동기 개념 설계

AFPM 전동기는 넓은 회전자 면적과 고정자 폴 슈 구조로 인해 다양한 설계변수를 가지므로 설계의 자유도가 크다. 하지만 AFPM 전동기의 전자계 특성을 분석하기 위해서는 3D FEM이 요구되고, 해석 시간이 오래 걸리는 문제점이 발생한다. 따라서, 개념 설계 단계에서는 해석 시간이 상대적으로 적게 소요되는 Quasi-3D 해석기법을 활용하여 초기 설계안을 도출하였다. 설계된 초기 모델의 형상은 그림 4.1과 같고, 표 4.2에 초기 설계안의 부하 해석 결과를 요약하였다. 그리고 그림 4.2는 초기 모델의 동일 전류밀도 기준에서의 속도-토크 특성 곡선을 나타낸다.

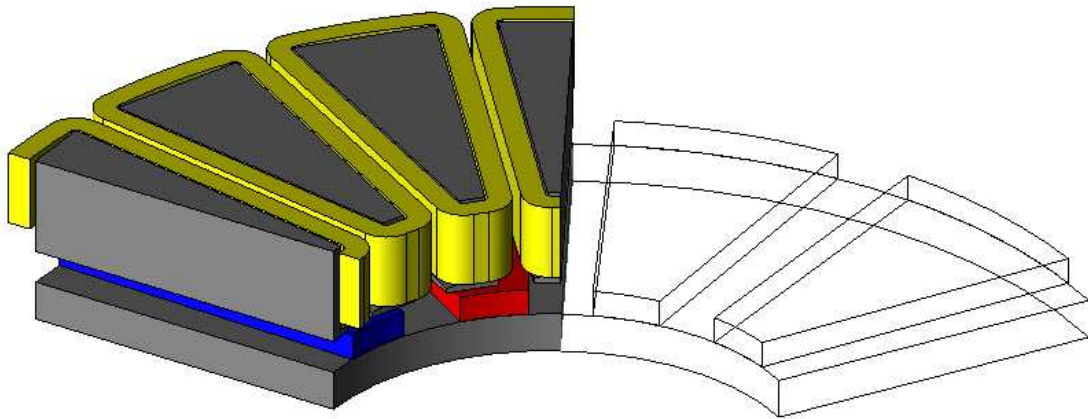


그림 4.1. EV 구동용 AFPM 전동기 초기 모델 형상  
Fig. 4.1. Initial shape of AFPM motor for EV drive.

표 4.2. EV 구동용 AFPM 전동기 초기 모델 부하 해석 결과  
Table 4.2. Load analysis result of initial model of AFPM motor for EV drive.

항목	결과
평균 토크	523.91 [Nm]
토크 리플	16.37 [%]
단자 전압	178.15 [V <sub>pk</sub> ]
효율	92.87 [%]

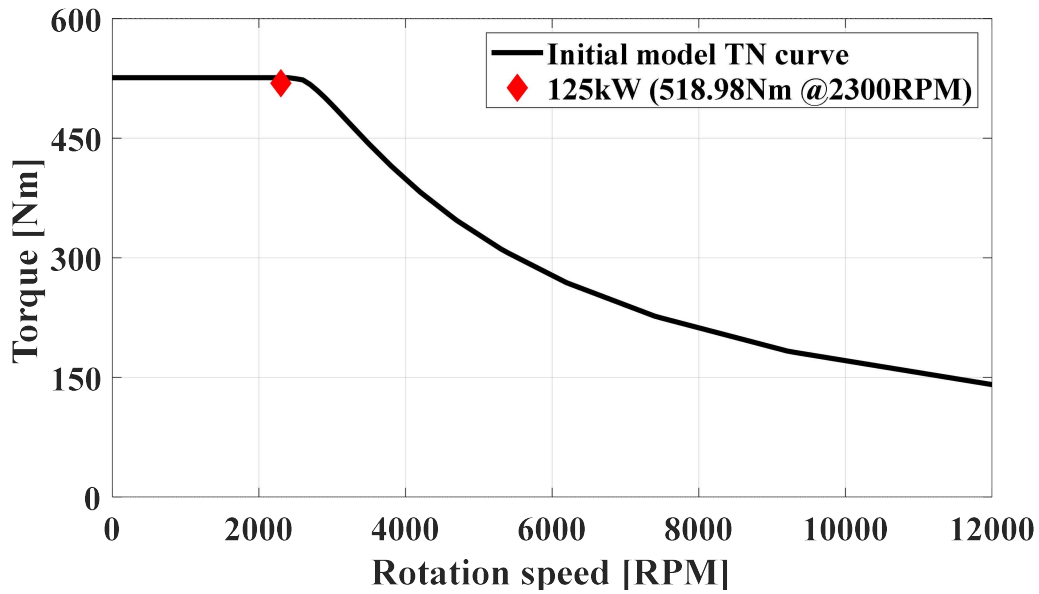


그림 4.2. EV 구동용 AFPM 전동기 초기 모델의 속도-토크 특성 곡선

Fig. 4.2. Speed-torque characteristic curve of initial model of AFPM motor for EV drive.

표 4.2를 통해 알 수 있듯이, Quasi-3D 해석기법을 통해 도출한 초기 설계안의 평균 토크는 목표 대비 약 0.95% 큰 값을 가지고 있다. 또한, 초기 설계안은 고속 영역에서도 일정 수준의 토크를 나타내고 있어, 고속 영역에서도 목표 출력을 달성할 수 있음을 예상할 수 있다. 하지만 토크 리플의 경우에는 Quasi-3D 해석기법과 3D FEM의 오차로 인해 약 6.37%가 초과하였다. 토크 리플은 차량의 소음과 진동을 유발하고 탑승자의 승차감을 저하시키는 요인이 된다. 나아가 전동기 제어 안정성 또한 위협하는 요소이기에 설계 시 반드시 고려해야 한다[46], [47]. 따라서 본 논문의 최적 설계 단계에서는 토크 리플 저감 설계를 중점적으로 수행하였다.

### 4.3 HM을 이용한 AFPM 전동기 최적 설계

본 절에서는 다수의 변수를 동시에 고려할 수 있는 HM을 통해 개념 설계 단계에서 달성하지 못한 토크 리플 개선 설계를 수행하고, 동시에 평균 토크를 향상할 수 있는 다중 목적 최적화를 수행한다. 그리고 영구자석 불가역 감자 해석을 통해 AFPM 전동기 최적 설계안의 안정성을 입증한다.

#### 4.3.1 목적함수 및 설계변수 결정

평균 토크와 토크 리플을 동시에 최적 설계를 수행하기 위해 아래와 같이 가중치를 활용하여 목적함수를 선정하였다.

$$\min f(x_i) = \lambda_1 \frac{T_{avg,0}}{T_{avg}(x_i)} + \lambda_2 \frac{T_{rip}(x_i)}{T_{rip,0}} \quad (4.1)$$

이때,  $x_i$ ,  $T_{avg}(x_i)$ ,  $T_{rip}(x_i)$ 는  $i$ 번째 설계변수, 평균 토크, 토크 리플이며,  $T_{avg,0}$ ,  $T_{rip,0}$ 는 초기 설계안의 평균 토크, 토크 리플이다. 그리고,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 는 가중계수를 나타내는데, 초기 설계안의 경우에는 평균 토크는 이미 달성하였고, 토크 리플을 중점적으로 저감해야 하므로 각각 0.4, 0.6으로 선정하였다.

AFPM 전동기의 토크와 토크 리플은 회전자와 고정자의 형상에 따라 비선형적으로 변하기 때문에 최적 설계를 진행할 때 적절한 설계변수를 선정해야 한다. 본 논문에서는 동일 고정자 슬롯 면적을 유지할 수 있는 설계변수를 선정하여 같은 전류가 인가될 수 있게 설계변수를 채택하였다. 또한, SPMSM과 동일한 전자계 특성을 가진 AFPM 전동기의 특성을 고려하여, 전류 위상각을 0도로 고정하여 최적 설계를 수행하였다. 그림 4.3은 YASA 타입 AFPM 전동기 최적 설계를 위한 구조적 설계변수를 나타내고 있다. 선정된 설계변수는 총 5개로, 자석 내·외측 극호비, 슬롯 오프닝, 폴 슈 두께, 자석 두께이다. 각 설계변수의 범위는 표 4.3과 같다.

표 4.3. 설계변수의 범위

Table 4.3. Range of design variables

항목	범위
자석 내측 극호비	0.40 to 0.60
자석 외측 극호비	0.70 to 0.90
슬롯 오프닝	3.0 to 13.5 [mm]
폴 슈 두께	1.0 to 3.0 [mm]
자석 두께	5.0 to 6.0 [mm]

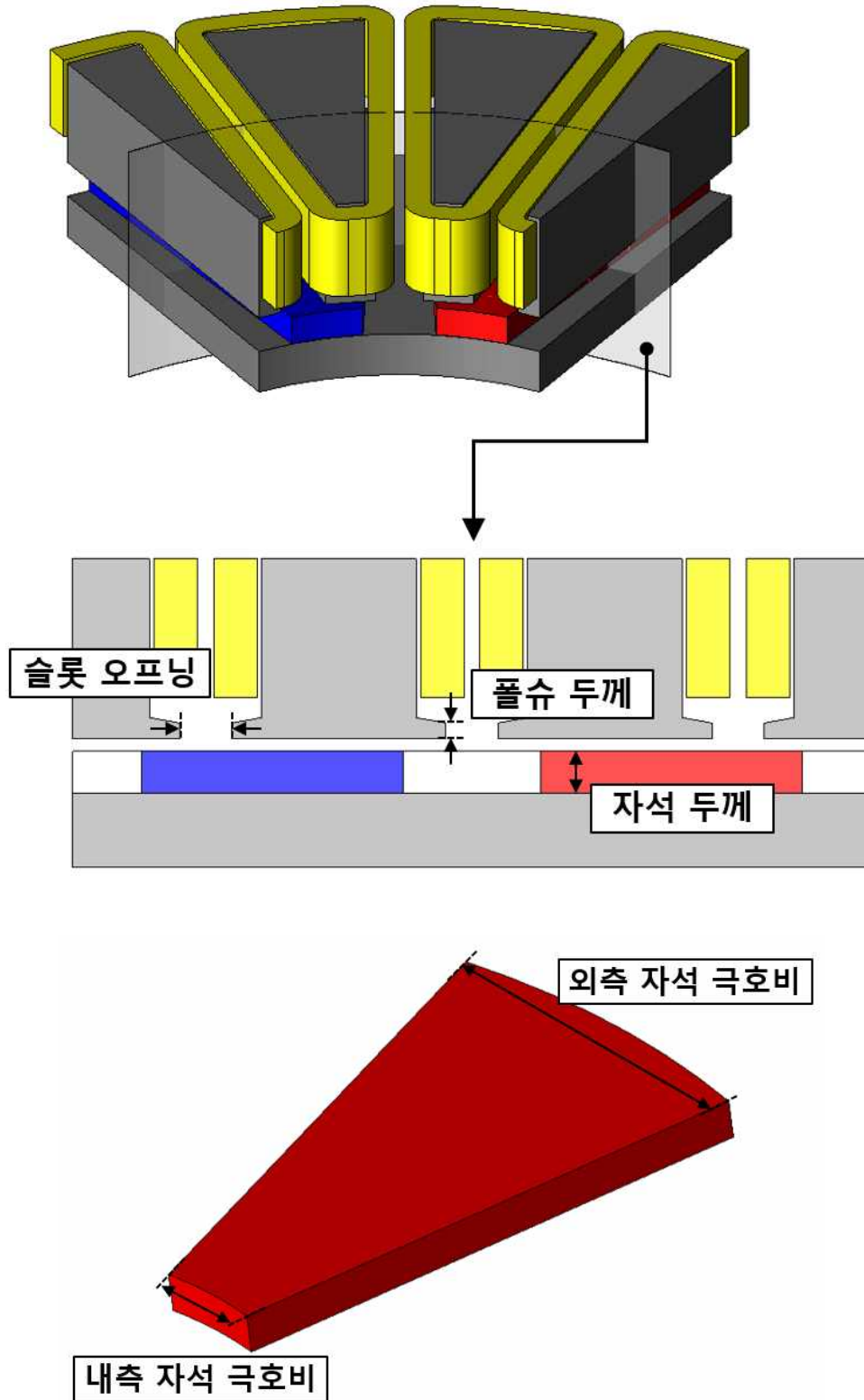


그림 4.3. AFPM 전동기 최적 설계의 구조적 설계 변수  
 Fig. 4.3. Structural design variables for optimal design of AFPM motor.



### 4.3.2 최적화 알고리즘 연동 설계

본 절에서는 제안하는 최적화 알고리즘 HM을 3D FEM과 결합하여 EV 구동용 YASA 타입 AFPM 전동기의 다중 목적 최적 설계에 활용하였다. FEM 해석은 하나의 형상을 결정하게 되는 다섯 가지의 설계변수에 따라 식(4.1)을 통해 목적함수를 결정하는 함수로 정의하였다. 그림 4.4는 HM를 통해 얻은 목적함수에 대한 각 설계변수의 민감도를 나타낸다. 이를 통해, 본 논문에서 설계하는 AFPM 전동기는 자석의 형상에 더 큰 영향을 받는다는 것을 파악할 수 있다.

최적화 결과로는 아래와 같이 기존 모델보다 개선된 세 가지 설계안이 도출되었다. 각 설계안에 대한 설계변수는 표 4.4에 나타나 있고, 부하 해석 결과는 표 4.5에 요약하였다. 해석 결과를 비교하면, 토크 리플의 경우에는 후보 모델 1이 다른 모델과 비교하였을 때 가장 낮은 토크 리플을 나타낸다. 하지만, 평균 토크는 정격 토크 요구 조건을 달성하지 못한다. 후보 모델 3은 평균 토크 기준에서는 가장 우수한 성능을 가지지만, 설계 가중치가 높은 토크 리플은 후보 모델 2과 비교하였을 때 상대적으로 높다. 따라서, 목표 토크 성능을 달성하면서 토크 리플 성능이 가장 우수한 후보 모델 2를 최적 모델로 선정하였다.

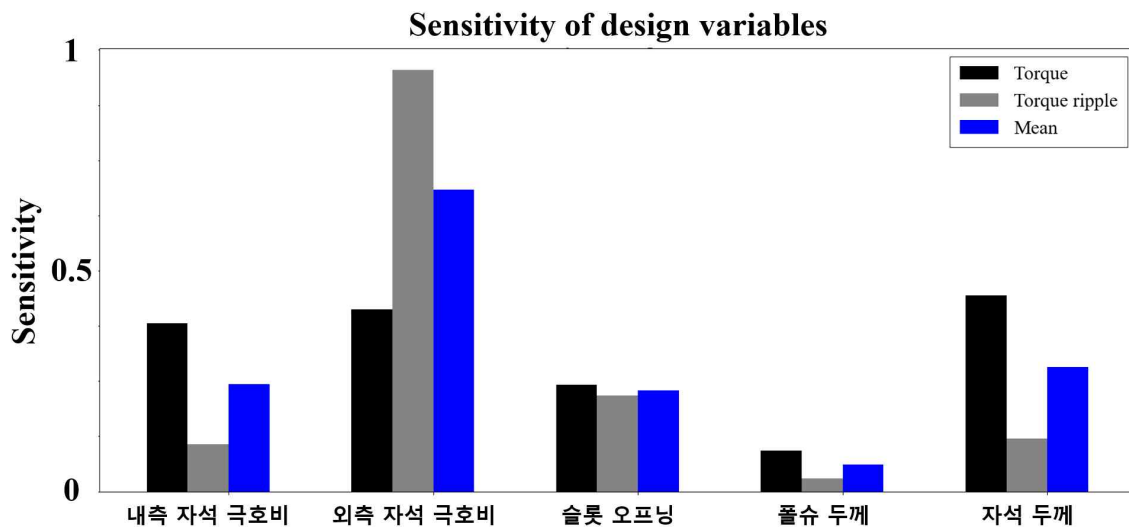


그림 4.4. AFPM 전동기 최적 설계의 구조적 설계 변수의 민감도 분석 결과

Fig. 4.4. Sensitivity analysis result of structural design variables for optimal design of AFPM motor.

표 4.4. 초기 모델과 후보 모델의 설계변수 값

Table 4.4. Design variables of initial model and candidate models

항목	초기 설계안	후보 모델 1	후보 모델 2	후보 모델 3
자석 내측 극호비	0.52	0.41	0.5	0.59
자석 외측 극호비	0.74	0.89	0.86	0.88
슬롯 오프닝	7.73 [mm]	9.43 [mm]	9.26 [mm]	10.65 [mm]
폴 슈 두께	1.17 [mm]	1.91 [mm]	1.91 [mm]	3 [mm]
자석 두께	5.97 [mm]	5.06 [mm]	5.94 [mm]	5.74 [mm]

표 4.5. 각 모델의 성능 비교

Table 4.5. Performance comparison of each models

항목	초기 설계안	후보 모델 1	후보 모델 2	후보 모델 3
평균 토크	523.71 [Nm]	514.02 [Nm]	540.71 [Nm]	542.46 [Nm]
토크 리플	16.37 [%]	4.82 [%]	5.15 [%]	10.00 [%]
단자 전압	178.15 [Vpk]	180.52 [Vpk]	181.27 [Vpk]	182.23 [Vpk]
효율	92.87 [%]	92.73 [%]	93.07 [%]	93.09 [%]

그림 4.5는 최적 설계안의 자속 밀도 분포를 나타내며, 그림 4.6은 초기 설계안과 최적 설계안의 토크 파형이 나타나 있다. 초기 설계안과 비교하였을 때 최적 설계안의 평균 토크는 약 3.25%, 토크 리플은 약 11.22% 개선되었고, 이는 HM을 활용하여 성공적으로 최적 설계를 수행하였음을 알 수 있다. 마지막으로, 그림 4.7은 초기 설계안과 최적 설계안의 속도-토크 특성 그래프를 비교한 결과를 나타냈다. 최적 모델은 정토크 영역에서 기존 모델보다 높은 토크 성능을 확보하였으며, 고속 영역에서도 유사한 토크 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

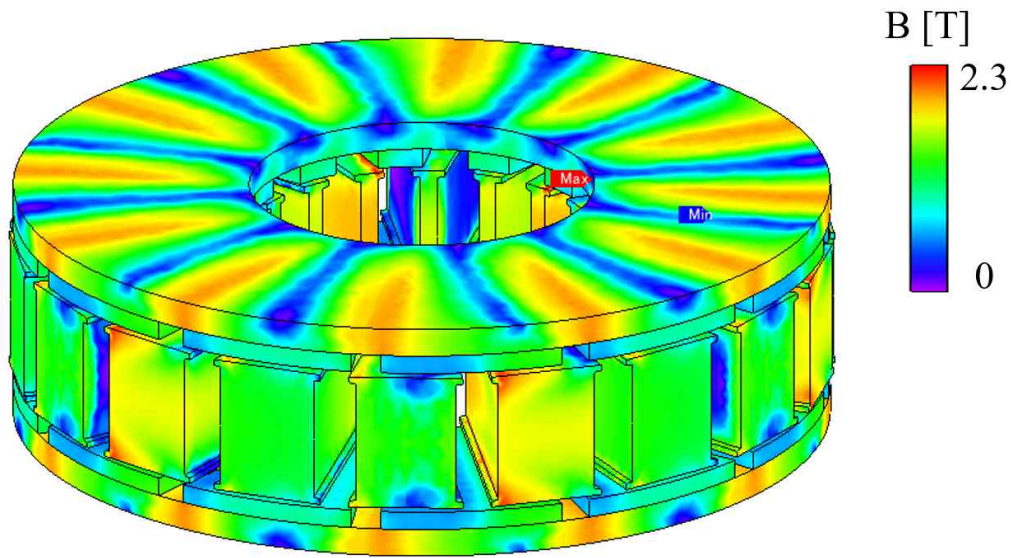


그림 4.5. 최적 모델의 자속밀도 분포  
 Fig. 4.5. Magnetic flux density of optimal model.

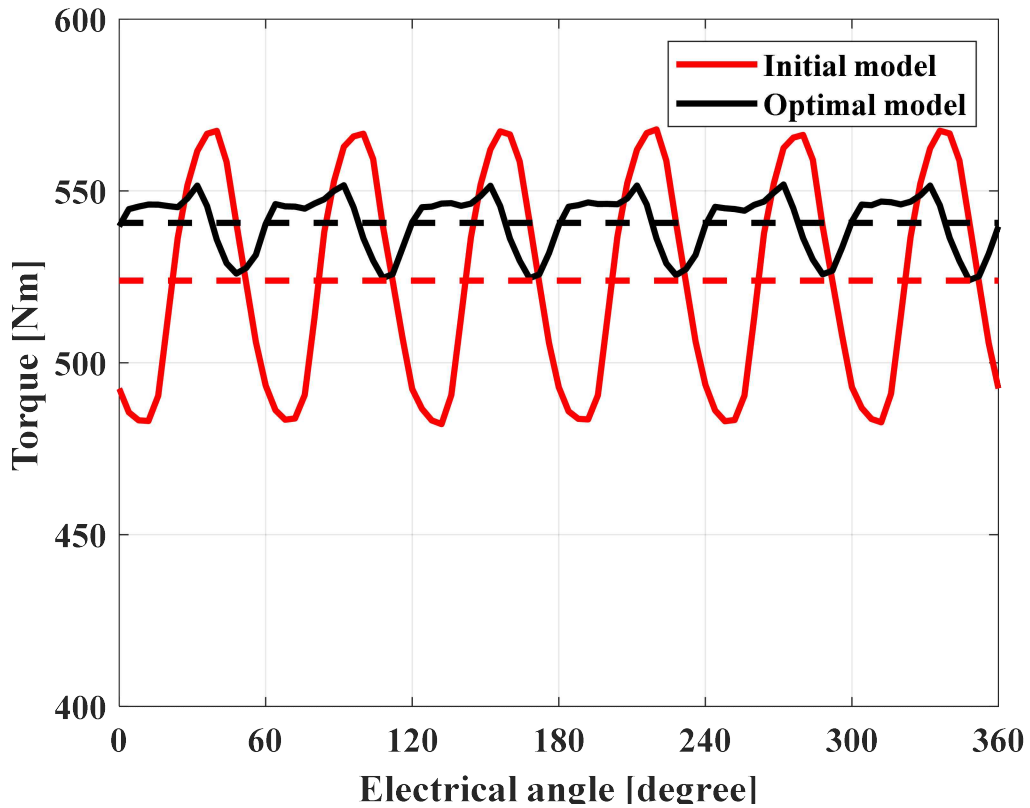


그림 4.6. 초기 모델과 최적 모델의 토크 파형 비교  
 Fig. 4.6. Torque waveform comparison between initial and optimal models.

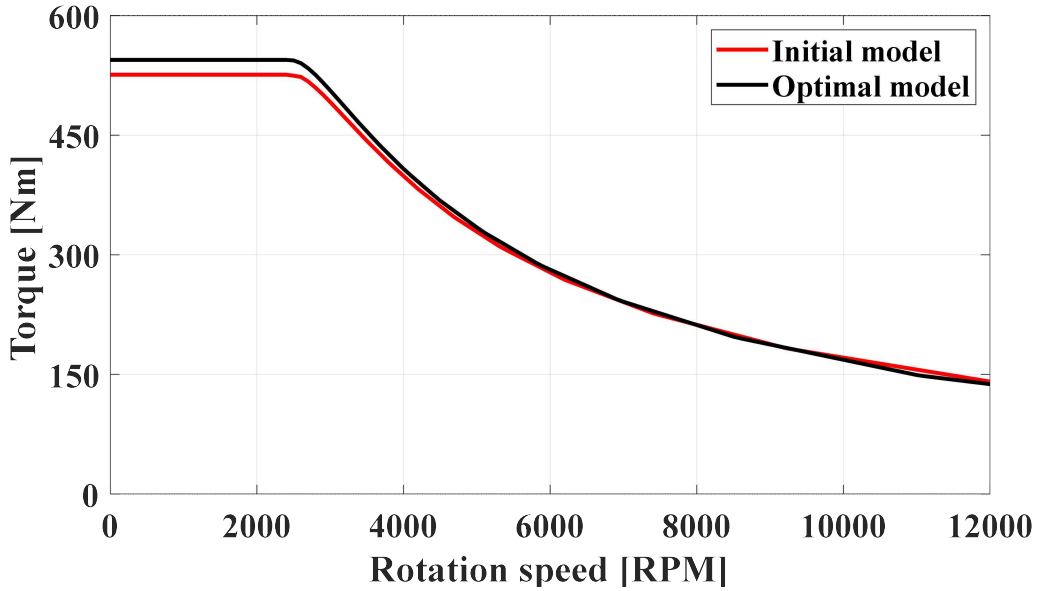


그림 4.7. 초기 모델과 최적 모델의 속도-토크 특성 곡선 비교

Fig. 4.7. Comparison of speed-torque characteristic curves for initial and optimal models.

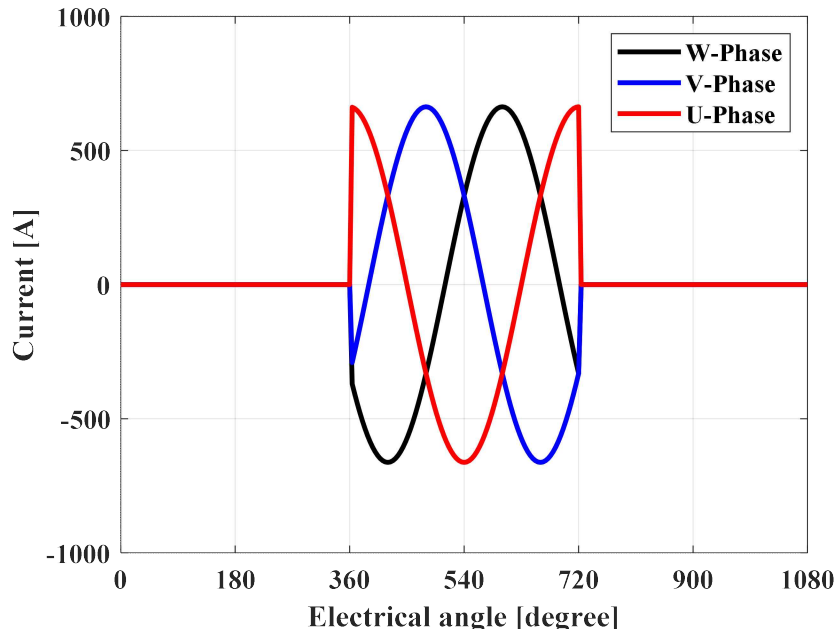
표 4.6. 영구자석 불가역 감자 해석 조건

Table 4.6. Analysis conditions for permanent magnet irreversible demagnetization.

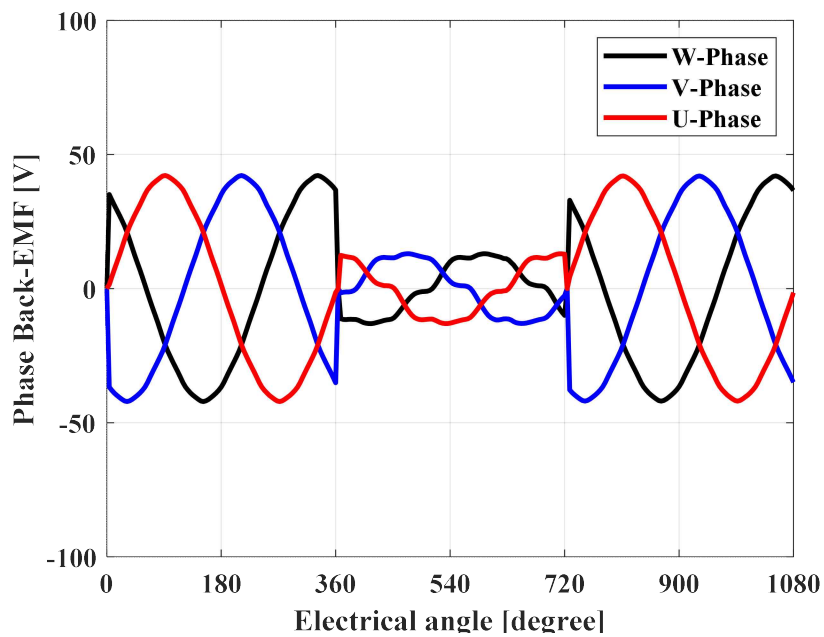
항목	범위
인가 전류 / 전류 위상각	662.65 [ $A_{pk}$ ] / 90 [degree]
운전 속도	2,300 [RPM]
해석 온도	150 [ $^{\circ}C$ ]

본 논문에서 제안하는 알고리즘 HM을 통해 얻은 최적 설계안의 열적 안정성을 검증하기 위해 표 4.6와 같은 조건에서 영구자석 불가역 감자 해석을 수행하였다. 온도가 높아질수록 잔류자속밀도와 보자력의 크기가 작아지는 희토류 자석의 특성으로 인해 전동기의 성능에 악영향을 주기 때문에, 불가역 감자 회피 설계를 통해 예방해야 한다[48]. 영구자석 주변이 공기로 이루어진 AFPM 전동기의 특성상 불가역 감자를 회피하기 위해서는 자석의 두께가 적정값 이상으로 설계되어야 하는데, 이를 확인하기 위해 본 논문에서는 고온 조건인 150 $^{\circ}C$ 에서 감자 해석을 수행하였다. 또한 불가역 감자 여부를 보수적으로 검증하기 위해 인가 전류의 위상각을 90도로 설정하여 영구자석에 큰 반자계가 인가되게 하였다. 그림 4.8(a)는 감자 해석을 수행하기 위한 인가 전류 그래프를 나타낸다. 무부하-부하-무부하 총 세 단계로 나눠 해석을 진행하고, 해당 조건에서의 역기전력 저감률을 분석하였다. 그림 4.8(b)

에 나타나 있듯이, 본 논문에서 제안하는 최적 설계안의 역기전력 저감률은 약 0.4%로 영구자석 불가역 감자로부터 안전함을 입증하였다.



(a)



(b)

그림 4.8. 최적 모델 영구자석 불가역 감자 해석 결과 (a)인가 전류 파형 (b)역기전력 파형

Fig 4.8. Permanent magnet irreversible demagnetization analysis results of the optimal model. (a)Applied current waveform. (b)Back-electromotive force waveform.

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 EV 구동용 AFPM 전동기 설계를 개념 설계, 최적 설계로 나누어 설계를 수행하는 설계 방법을 제안한다.

RFPM 전동기와 비교하였을 때 고출력밀도를 달성하기에 유리한 AFPM 전동기의 기업별 연구 동향 분석을 수행하였고, 토폴로지에 따른 특성을 분석하여 고효율, 제작성 등의 특성을 고려한 YASA 타입 AFPM 전동기를 선정하였다.

다음으로 개념 설계 단계에 활용하기 위해 Quasi-3D 해석기법의 원리와 무부하, 부하 해석 결과 분석을 수행하였고, 성능을 입증하였다. 나아가 Quasi-3D 해석기법을 활용하여 목표 토크를 달성하는 초기 설계안을 도출하였다.

최적 설계 단계에서는 Quasi-3D 해석기법으로 해석하기 어려운 코깅 토크, 토크 리플, 단자 전압 등을 정확하게 해석하기 위해 3D FEM을 사용하여 해석을 수행하였다. 하지만, 3D FEM은 한 번의 해석 결과를 얻기 위해서는 수십 시간의 해석 시간을 요구한다. 따라서, 본 논문에서는 두 가지의 멀티 모달 최적화 알고리즘인 HAS와 HM을 제안하였고, 수학적 시험 함수에서 기존 알고리즘과 비교를 통해 성능을 입증하였다. 제안하는 두 가지 알고리즘 중 여러 가지의 설계 변수를 동시에 고려할 수 있는 HM를 EV 구동용 AFPM 전동기 최적 설계에 적용하여 각 설계 변수의 민감도를 분석하였고, 목표 토크 리플 성능을 달성하는 최적 설계안을 성공적으로 도출하였다. 제안하는 알고리즘들은 AFPM 전동기뿐만 아니라 다양한 구조의 모터 설계에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구 계획은 본 연구에서 활용한 Quasi-3D 해석기법의 성능 개선을 통해 토크 특성뿐만 아니라, 토크 리플, 단자 전압 등과 같은 다양한 전자계 특성을 정확하고 빠르게 분석하는 방법에 관해 연구할 계획이다. 또한, 본 논문에서 도출한 최적 설계안의 모터를 제작하고, 해석 결과와의 비교를 통해 제안하는 방법의 유효성을 검증할 예정이다. 마지막으로, 제안하는 알고리즘의 성능을 개선하여 적은 샘플 데이터를 통해 더 우수한 최적 모델을 탐색하는 방안에 대해 연구할 계획이다.

## 참 고 문 헌

- [1] “전기차 및 충전기 보급·이용 현황 분석,” KPX (전력거래소), 2023.
- [2] 한택환, 임동순, 김진태, “전기 및 수소차 보급 확산의 환경적·경제적 영향분석 : 계산가능일반균형모형(CGE)의 적용,” 자원환경경제연구, vol. 28, no. 2, pp. 231-276, 2019.
- [3] “Global EV Outlook 2023,” IEA (국제에너지기구), 2023.
- [4] 한원석, “누적 데이터 기반 전역 Simplex 최적화 알고리즘을 적용한 EV 구동용 전동기의 최적설계,” 성균관대학교 박사학위논문, 2019.
- [5] Jung-Min Mun, Gyeong-Jae Park, SangHyeok Seo, Dae-Woo Kim, Yong-Jae Kim, Sang-Yong Jung, “Design Characteristics of IPMSM With Wide Constant Power Speed Range for EV Traction,” in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 6, June 2017.
- [6] JJingjuan Du, Xiaoyuan Wang, Haiying Lv, “Optimization of Magnet Shape Based on Efficiency Map of IPMSM for EVs,” in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 7, July 2016.
- [7] Won-Ho Kim, Mi-Jung Kim, Ki-Doek Lee, Jae-Jun Lee, Jung-Ho Han, Tae-Chul Jeong, Su-Yeon Cho, Ju Lee, “NE-Map-Based Design of an IPMSM for Traction in an EV,” in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 1, Jan. 2014.
- [8] 여한결, “오버행 구조의 고토크밀도 표면부착형 영구자석 전동기의 특성 해석 및 최적 설계,” 서울대학교 박사학위논문, 2018.
- [9] “현대모비스, 올 하반기 ‘AFPM’ 개발…현대차그룹 ‘슈퍼카 꿈’ 이뤄질까”, 전자신문, 2023.
- [10] YASA. (2023). Mercedes-Benz and YASA. 접속일: 10월 17일, 2023, 웹사이트 URL: <https://yasa.com/mercedes-benz-and-yasa/>
- [11] Saietta. (2023). 접속일: 10월 17일, 2023, 웹사이트 URL: <https://www.saietta.com/>
- [12] Saietta Group PLC. (2021). 축 방향 자속 전기 기계 및 보조 부품. WO202015700
- [13] EMRAX. (2023). 접속일: 10월 17일, 2023, 웹사이트 URL: <https://emrax.com/>
- [14] Group 1 Renault. (2021). Arial Flux EVs and Renault. 접속일: 10월 17일, 2023, 웹사이트 URL: <https://www.group1renault.co.za/blog/arial-flux-evs-and-renault/>
- [15] Whylot SAS. (2020). Rotor for an electromagnetic motor or generator with tapered branches. YS20210313853
- [16] 임동국, “전기자동차 주행거리 확장용 매입형 영구자석 발전기 최적 설계,” 서

- 울대학교 박사학위논문, 2017.
- [17] 손지창, “전기자동차 구동용 영구자석 보조 동기 릴럭턴스 전동기 최적 설계,” 울산대학교 석사학위논문, 2021.
- [18] L. Xiao, J. Li, R. Qu, Y. Lu, R. Zhang and D. Li, “Cogging Torque Analysis and Minimization of Axial Flux PM Machines With Combined Rectangle-Shaped Magnet,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 1018-1027, March-April 2017.
- [19] H. Tiegna, Y. Amara and G. Barakat, “A New Quasi-3-D Analytical Model of Axial Flux Permanent Magnet Machines,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, pp. 817-820, Feb. 2014.
- [20] H. -J. Park, H. -K. Jung, S. -Y. Jung, Y. -H. Chae and D. -K. Woo, “Field Reconstruction Method in Axial Flux Permanent Magnet Motor With Overhang Structure,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017.
- [21] E. Ajily, M. Ardebili and K. Abbaszadeh, “Magnet Defect and Rotor Eccentricity Modeling in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines via 3-D Field Reconstruction Method,” in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 486-495, June 2016.
- [22] H. Zhao, K. T. Chau, T. Yang, Z. Song, and C. Liu, “A Novel Quasi-3D Analytical Model for Axial Flux Motors Considering Magnetic Saturation,” in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 2, pp. 1358-1368, June 2022.
- [23] 박현정, “전기자동차 인휠 시스템용 축방향 자속 영구자석 전동기 최적 설계,” 서울대학교 박사학위논문, 2018.
- [24] F. Nishanth, J. Van Verdegheem and E. L. Severson, “A Review of Axial Flux Permanent Magnet Machine Technology,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 4, pp. 3920-3933, July-Aug. 2023.
- [25] F. Giulii Capponi, G. De Donato, and F. Caricchi, “Recent Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Technology,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 6, pp. 2190-2205, Nov.-Dec. 2012.
- [26] R. Di Stefano and F. Marignetti, “Electromagnetic Analysis of Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Machines With Fractional Windings With Experimental Validation,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 6, pp. 2573-2582, June 2012.
- [27] C. Hong, W. Huang, and Z. Hu, “Design and Analysis of a High-Speed Dual Stator Slotted Solid-Rotor Axial-Flux Induction Motor,” in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 71-79, March 2019.



- [28] W. Geng, J. Hou, and Q. Li, "Electromagnetic Analysis and Efficiency Improvement of Axial-Flux Permanent Magnet Motor With Yokeless Stator by Using Grain-Oriented Silicon Steel," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 2, pp. 1-5, Feb. 2022.
- [29] 탁병오, "수치적 기법을 결합한 새로운 해석적 기법을 적용한 전기자동차 인휠 시스템용 축 방향 자속형 영구자석 전동기의 해석 및 설계," 중앙대학교 석사학위논문, 2018.
- [30] Y.-R. Kang, J.-C. Son, and D.-K. Lim, "Optimal Design of IPMSM for Fuel Cell Electric Vehicles Using Autotuning Elliptical Niching Genetic Algorithm," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 117405-117412, 2020.
- [31] G. Venter, "Review of Optimization Techniques," John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, NJ, USA, 2010.
- [32] H. Yu, C. Y. Chung, K. P. Wong, H. W. Lee, and J. H. Zhang, "Probabilistic Load Flow Evaluation with Hybrid Latin Hypercube Sampling and Cholesky Decomposition," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 661 - 667, 2009.
- [33] K. Ullah, Q. Jiang, G. Geng, S. Rahim, and R. A. Khan, "Optimal Power Sharing in Microgrids Using the Artificial Bee Colony Algorithm," in *Energies*, vol. 15, no. 4, pp. 1067, 2022.
- [34] L. Wang, X. Zhang, and X. Zhang, "Antenna Array Design by Artificial Bee Colony Algorithm with Similarity Induced Search Method," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 1, pp. 1 - 4, 2019.
- [35] C. M. Bishop, "Pattern Recognition and Machine Learning," Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 2006.
- [36] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor, "An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods," Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- [37] H. Lu, W. Guo, C. Su, X. Li, Y. Lu, Z. Chen, and L. Zhu, "Optimization on Adhesive Stamp Mass-Transfer of Micro-LEDs With Support Vector Machine Model," in *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, vol. 8, pp. 554 - 558, 2020.
- [38] J. A. Nelder and R. Mead, "A Simplex Method for Function Minimization," *Comput. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 308 - 313, 1965.
- [39] M. A. Luersen and R. Le Riche, "Globalized Nelder - Mead method for engineering optimization", in *Computers & Structures*, vol. 82, no. 23, pp. 2251 - 2260, 2004.
- [40] C. Chen and L. Yu, "A Hybrid Ant Lion Optimizer with Improved Nelder -

- Mead Algorithm for Structural Damage Detection by Improving Weighted T race Lasso Regularization,” in *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 468 - 484, 2020.
- [41] C.-H. Wi and D.-K. Lim, “Surrogate Assisted Contour Algorithm for Optimal Design of IPMSM,” in *JEET*, 2021, pp. 1297-1300.
- [42] J.-C. Son, J.-M. Ahn, J. Lim, and D.-K. Lim, “Optimal Design of PMA-Syn RM for Electric Vehicles Exploiting Adaptive-Sampling Kriging Algorithm,” in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 41174-41183, 2021.
- [43] The Mathworks Inc., predictorImportance [Online], Available: [Online]. Available: [https://kr.mathworks.com/help/stats/compactclassificationtree.predictorimportance.html?s\\_tid=srchtitle\\_site\\_search\\_1\\_predictorImportance](https://kr.mathworks.com/help/stats/compactclassificationtree.predictorimportance.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_predictorImportance)
- [44] J. J. Liang, A. K. Qin, P. N. Suganthan, and S. Baskar, “Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer for Global Optimization of Multimodal Functions,” in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 10, no. 3, pp. 281-295, June 2006.
- [45] 위창현, “스태킹 앙상블을 활용한 대리모델 기반 전기자동차 구동용 영구자석 보조 동기 릴럭턴스 전동기 최적 설계,” 울산대학교 석사학위논문, 2023.
- [46] K. C. Kim, “A Novel Method for Minimization of Cogging Torque and Torque Ripple for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, pp. 793 - 796, 2014.
- [47] X. Wan, S. Yang, Y. Li, Y. Shi, and J. Lou, “Minimization of Cogging Torque for V-Type IPMSM by the Asymmetric Auxiliary Slots on the Rotor,” in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 89428 - 89436, 2022.
- [48] K. C. Kim, K. Kim, H. J. Kim, and J. Lee, “Demagnetization Analysis of Permanent Magnets According to Rotor Types of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, pp. 2799 - 2802, 2009.

## Abstract

# Optimal Design of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Drive

Jong-woon Park

School of Electrical and Computer Engineering

Graduate School

University of Ulsan

In this paper, a study on the multi modal algorithm for the optimal design of high-power density AFPM (Axial-Flux Permanent Magnet) motors is conducted. We propose a step-by-step design strategy that divides the electric vehicle (EV) drive motor design into conceptual and optimal design stages using this algorithm. Furthermore, by applying the proposed algorithm to the optimal design of the AFPM motor, we derived an optimal design that achieves the target performances.

Recently, in the automotive industry, improving fuel efficiency is one of the major objectives due to global environmental regulations and resource depletion. To achieve this, there is a demand for lightweight and high-efficiency motors, the core components of electric vehicles. In this context, interest in AFPM motors, which can achieve higher torque density even in limited space compared to radial-flux permanent magnet (RFPM) motors, is growing. Various automobile manufacturers and research groups are conducting studies and evaluating the performance of these motors.

In this paper, the design of the EV drive AFPM motor is carried out in both the conceptual and optimal design phases. Since the AFPM motor has non-linear electromagnetic characteristics in the axial direction, the use of 3D finite element method is essential, which requires a lot of analysis time. Therefore, in the conceptual design phase of this paper, the Quasi-3D analysis technique, which combines multiple 2D finite element analysis results to approximate 3D finite element analysis results, is utilized for quickly considering various design

variable combinations.

In the optimal design phase, the 3D finite element method is used to analyze non-linear magnetic saturation, torque ripple, and iron loss characteristics that are difficult to be analyzed with the Quasi-3D method. However, applying the 3D finite element method in optimal design results in long computation times. In this paper, we propose a multi modal algorithm that effectively reduces the number of function calls required for optimization by combining sensitivity according to design variables obtained in the conceptual design phase with the kriging surrogate model. By applying the proposed algorithm to the optimal design of the EV drive AFPM motor, we secure the optimal candidate model and derive the optimal design through various performance comparisons.

The research results of this paper are expected to be widely applied to the optimal design of motors that need to consider various objective functions simultaneously.

keywords : Axial-flux permanent magnet motor, electric vehicle, finite element method, multi-modal optimization algorithm, optimal design, Quasi-3D analysis method, radial-flux permanent magnet motor

Student Number : 20225272