

# 기계학습 기반 대리모델을 활용한 휴머노이드 관절용 전동기의 최적 설계

## Optimal Design of a Humanoid Joint Motor Using a Machine Learning-based Surrogate Model

이 주 창<sup>1</sup>, 임 동 국<sup>1,\*</sup>(Joo-Chang Lee<sup>1</sup> and Dong-Kuk Lim<sup>1,\*</sup>)<sup>1</sup>Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Ulsan

**Abstract:** This paper presents the optimal design of a joint motor customized for humanoid robots. An initial design satisfying the required torque was first established, and a machine learning-based surrogate model was constructed for efficient optimization. The resulting motor design achieved five times the continuous torque of a commercial motor with identical dimensions. Furthermore, demagnetization analysis at high temperatures and currents confirmed stable performance of the optimized motor even under severe environments. Compared to the initial model, the optimal model achieved a 12.22% improvement in maximum torque and a 68.02% reduction in torque ripple at the continuous operating point.

**Keywords:** humanoid robots, motor design, surface-mounted permanent magnet synchronous motor, machine learning, finite element analysis (FEA)

### I. 서론

최근 로봇 기술에 대한 관심이 높아지면서 다양한 형태의 로봇 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 특히, 휴머노이드 로봇은 제조, 서비스, 재난 대응 등 다양한 응용 분야에서 실사용이 논의되고 있으며, 이에 따라 실제 인간과 유사한 동작을 수행할 수 있는 관절 구동기의 필요성이 더욱 커지고 있다. 이러한 휴머노이드 로봇은 인간과 유사한 다양한 동작을 수행해야 하며, 이를 위해 각 관절에는 서로 다른 동작 특성에 특화된 구동 성능이 요구된다. 특히, 최근 Boston Dynamics의 Atlas나 Unitree의 H1과 같이 고부하 동작을 수행하는 사례들이 등장하면서 연속 저토크 동작뿐만 아니라 순간적으로 높은 토크를 발생할 수 있는 구동 능력의 중요성이 부각되고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 관절별 요구 특성에 적합한 구동기 설계가 필요하다.

휴머노이드를 비롯한 로봇에 사용되는 모터는 제한된 사이즈와 중량 내에서 높은 토크를 요구한다[3]. 따라서 이를 만족시키기 위해 일반적으로 고출력 밀도와 높은 효율을 동시에 확보할 수 있는 영구자석 동기전동기(PMSM, Permanent Magnet Synchronous Motor)가 주로 활용된다[4,5]. PMSM은 자석의 배치에 따라 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM, Interior PMSM)와 표면 부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM, Surface-mounted PMSM)로 구분된다[6,7]. SPMSM은 구조가 단순하고 제어가 용이하며, 높은 출력밀도를 제공하므로 로봇 관절용 전동기로 주로 활용된다[8].

한편, 휴머노이드 로봇 관절은 정밀한 위치 제어와 다양한 동작의 안정적인 수행이 요구되므로, 전동기의 토크 리플은 핵심적인 설계 요소 중 하나로 간주된다. 토크 리플은 전동기의 진동, 소음, 제어 오차를 유발할 수 있으며, 관절 동작의 불안정성을 초래할 수 있다[9]. 따라서 본 연구에서는 휴머노이드용 전동기의 토크 밀도와 토크 리플 등 복수의 성능 지표를 동시에 만족하기 위해 다중목적 함수 기반의 최적화를 적용하였다. 최적화 알고리즘의 적용을 위해서는 전동기 성능을 정확히 평가할 수 있어야 하며, 이를 위해 높은 해석 정확도를 갖는 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)을 활용하였다. 그러나 FEA는 단일 해석에 많은 시간이 소요되므로, 최적 설계 과정에서의 계산 비용을 줄이기 위해 적은 함수호출로 최적해를 도출할 수 있는 기법이 요구된다[10,11]. 이에 본 연구에서는 기계 학습 기반의 대리모델을 구축하고, 유전알고리즘(GA, Genetic Algorithm)을 적용하여 적은 함수호출로 최적 설계안을 도출 하였다.

휴머노이드 관절용 전동기의 최적 설계를 위해 본 논문에서는 최적 설계를 위한 두 단계의 설계 절차를 적용하였다. 먼저, 요구 토크를 만족하는 초기 설계안을 도출하고, 이를 바탕으로 설계 변수 범위 내에서 샘플링을 수행하였다. 이후 샘플링 데이터를 바탕으로 기계학습 기반의 대리모델을 구축한 뒤, 이를 활용하여 성능이 향상된 최적 설계안을 도출하였다. 마지막으로, 영구자석 불가역 감자해석을 통해 해당 설계안의 구동 안정성을 검증하였다.

\*Corresponding Author

Manuscript received May 9, 2025; revised July 9, 2025; accepted July 18, 2025

이주창: 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과 박사과정(dlwnckd153@naver.com, ORCID<sup>®</sup> 0009-0000-0302-3951)

임동국: 울산대학교 전기공학부 교수(ldk8745@ulsan.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-9612-263X)

표 1. 운전점 및 전기적 사양.

Table 1. Operating points and electrical specifications.

연속 출력	351.86 W
연속 토크	0.8 Nm
연속 회전속도	4,200 RPM
최대 출력	879.65 W
최대 토크	4.0 Nm
최대 회전속도	2,100 RPM
입력 전압	72 V <sub>DC</sub>
전류 제한	50 A <sub>pk</sub>

표 2. 기존 상용 전동기 제원.

Table 2. Specifications of the conventional motor.

	A Motor	B Motor
연속 출력	351.86 W	490.09 W
연속 토크	0.8 Nm	1.3 Nm
연속 회전속도	4,200 RPM	3,600 RPM
최대 출력	527.79 W	1361.36 W
최대 토크	2.4 Nm	4.0 Nm
최대 회전속도	2,100 RPM	3,250 RPM
입력 전압	48 V <sub>DC</sub>	48 V <sub>DC</sub>
적층 길이	10 mm	12 mm
전동기 외경 / 내경	73.8 / 32 mm	92.6 / 59 mm

II. 휴머노이드용 SPMSM 초기 설계

본 논문에서는 휴머노이드 관절 중 무릎 관절을 대상으로 설계를 수행하였으며, 본 논문에서 목표로 하는 SPMSM의 요구조건 및 주요 운전점은 표 1과 같다.

표 2는 일반적으로 휴머노이드 관절에 사용되는 T-Motor의 상용 전동기 RO60, RO80 모델의 주요 사양을 나타낸 것이다. 두 전동기 모두 연속 토크 대비 약 3배 수준의 최대 토크를 제공하며, 이는 보행과 같은 일상적인 동작에는 적절한 성능을 보인다. 그러나 백플립과 같이 순간적으로 고토크가 요구되는 동작의 경우, 3배 이상의 최대 토크가 필요할 것으로 판단된다. 이러한 과부하 조건을 고려해 최대 토크가 큰 상용 전동기를 적용할 경우, 간헐적 동작을 위해 전동기의 크기와 중량이 불필요하게 증가하는 문제가 발생한다. 특히, 휴머노이드 로봇은

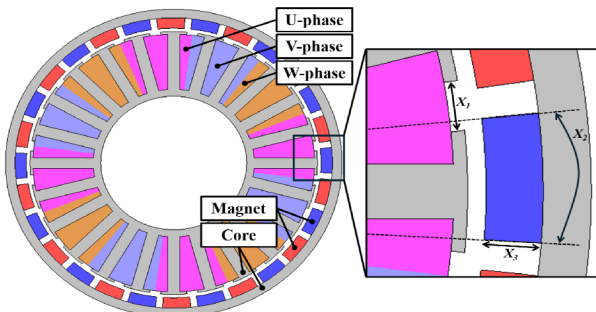


그림 1. 초기 설계안의 구성 및 설계 변수.

Fig. 1. Configuration of the initial model and design variables.

표 3. 초기 설계안 제원.

Table 3. Specifications of the initial design motor.

극 수 / 슬롯 수	28 / 24
고정자 외경 / 내경	63 / 32 mm
회전자 외경 / 내경	73.8 / 64.6 mm
적층 길이	10 mm
공극 길이	0.8 mm
코어 재질	35JN230
영구자석 재질	N42SH

각 관절에 적용되는 전동기의 크기와 중량이 전체 시스템에 큰 영향을 미치므로, 일시적인 고토크를 충족하기 위해 크기가 큰 전동기를 적용하는 것은 제한된다. 따라서 본 연구에서는 연속 토크의 5배 수준의 최대 토크를 제공하는 SPMSM의 설계를 목표로 한다. 이를 위해 제한 조건 내에서 전자계 해석을 통한 초기 설계안을 도출하고, 기계학습을 기반으로 한 최적 설계를 통해 순간적으로 높은 최대 토크를 발생하는 설계안의 도출을 목표로 하였다.

초기 설계안의 도면과 제원을 그림 1과 표 3에 각각 나타내었다. 일반적으로 휴머노이드 관절용 전동기는 제한된 체적 내에서 높은 토크를 확보하기 위해 기어를 사용하며, 기어를 전동기 내부에 배치해 모듈화를 실현하기 위해 중공형 구조로 설계된다. 본 연구에서도 이를 고려하여 표 2에 제시하는 T사의 A Motor의 크기 제약 조건을 동일하게 적용하였다. 극 수 및 슬롯 수는 28극 24슬롯으로 코일 엔드부가 짧아 권선 저항이 작고 동손이 작은 장점이 있는 집중권으로 설계하였다. 고정자와 회전자의 비율을 변경하고 고정자의 치와 요크의 포화도를 조절하여 요구 토크를 충족하는 초기 설계안을 도출하였다.

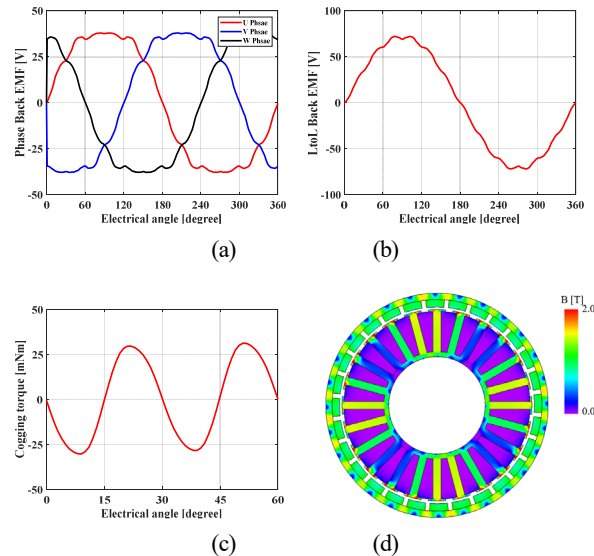


그림 2. 초기 설계안 무부하 해석 결과. (a) 상역기전력. (b) 선간 역기전력. (c) 코깅 토크. (d) 자속밀도.

Fig. 2. No-load condition analysis result of the Initial design motor.

(a) Phase BEMF. (b) Line-to-line BEMF. (c) Cogging torque. (d) Magnetic flux density.

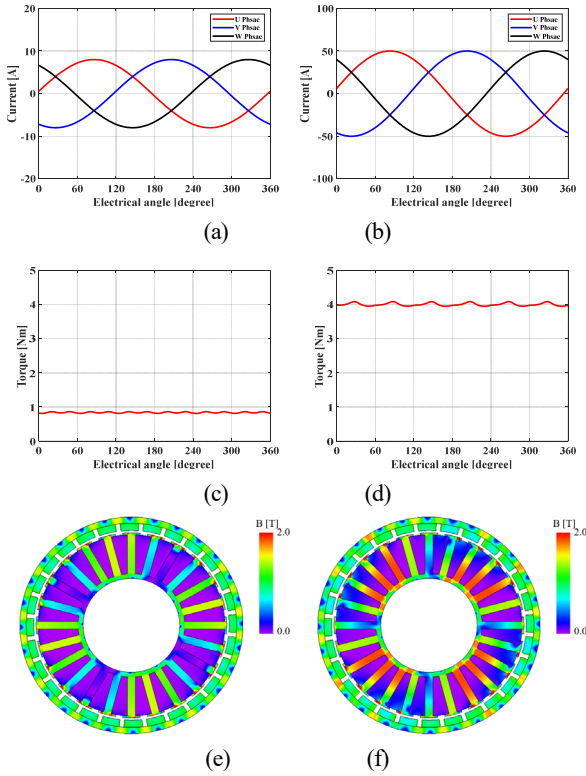


그림 3. 초기 설계안 부하 해석 결과. (a) 연속 운전점 입력 전류. (b) 최대 운전점 입력 전류. (c) 연속 운전점 출력 토크. (d) 최대 운전점 출력 토크. (e) 연속 운전점 자속밀도. (f) 최대 운전점 자속밀도.

Fig. 3. Load condition analysis result of the Initial model. (a) Input current at constant operating point. (b) Input current at maximum operating point. (c) Output torque at constant operating point. (d) Output torque at maximum operating point. (e) Magnetic flux density at constant operating point. (f) Magnetic flux density at maximum operating point.

초기 설계안의 무부하 해석 결과를 그림 2에 나타내었다. 해석은 전기각 1주기를 360개의 스텝으로 분할하여 각 스텝에서 데이터를 추출하여 수행하였다. 무부하 해석 시 회전속도는 4,200RPM이며, 해석 온도는 상온(20°C)에서 해석을 수행하였다. 먼저 역기전력(BEMF, Back Electromotive Force)을 그림 2(a), (b)에 나타내었다. 상 역기전력은 28.91V<sub>pk</sub>, 선간 역기전력은 54.99V<sub>pk</sub>로 나타났으며 BEMF의 전고조파왜율(THD, Total Harmonic Distortion)은 180차 고조파까지 고려하여 계산하였으며, 상과 선간에서 각각 11.90%와 2.98%로 나타났다. 코딩 토크의 경우 그림 2(c)에 나타내었으며, 사이즈가 61.65mNm로 연속 토크의 7.34% 수준으로 다소 높게 나타났다. 무부하에서의 자속 밀도는 그림 2(d)에 나타나 있다. 다음으로 부하 해석 결과를 그림 3에 나타내었다. 전류는 정현파 전류를 인가하였으며, 그림 3(a), (b)는 연속 운전점과 최대 운전점의 전류를 나타낸다. 연속 운전점에서는 8A<sub>pk</sub>의 전류를 인가하였으며, 최대 운전점에서의 인가 전류는 50A<sub>pk</sub>로 약 6.3배의 전류를 인가하였으나, 전류 제한을 만족한다. 실제로 최대 토크로 전동기가 구동되는 시간은 1초 이내로 매우 짧으므로 열적으로도 문제가 없을 것으로 판단된다. 그림 3(c), (d)는 연속

운전점과 최대 운전점의 토크 파형을 나타낸다. 연속 운전점과 최대 운전점의 평균 토크는 0.84Nm, 4.01Nm로 표 1에 나타난 요구 토크를 모두 만족하였다. 그러나 토크 리플의 경우 각 운전점에서 6.16%, 3.43%로 나타났으며, 특히 연속 운전점에서 상대적으로 높은 값을 보여 저감에 필요한 지표로 판단하였다. 전압의 경우 각 운전점에서 도출된 상전압 최대치가 30.58V<sub>pk</sub>, 33.14V<sub>pk</sub>로 표 1에 나타난 입력 전압 72V에서 계산된 전압 제한 35.33V<sub>pk</sub> 이내임을 확인하였다. 그림 3(e), (f)에 각 운전점의 자속밀도를 나타내었다. 최대 운전점에서 상대적으로 높은 전류를 인가함에 따라 강판의 포화도가 높게 나타났으나, 2.0T 이내로 과포화되지 않음을 확인할 수 있다.

### III. 휴머노이드용 SPMSM 최적 설계

초기 설계안이 표 1에서 제시한 요구 토크를 달성하였으나, 휴머노이드에 최적화된 설계안이라고 보기에는 충분하지 않다. 또한, 연속 운전점의 토크 리플이 비교적 높게 나타났으므로 개선된 설계안이 필요하다. 따라서 최적 설계를 위한 목적함수로 연속 운전점의 토크 리플을 선정하였으며, 일반적으로 토크 리플과 평균 토크 간에는 trade-off 관계가 있으므로 최적 설계안이 요구 토크를 만족할 수 있도록 최대 운전점에서의 평균 토크를 목적함수로 추가하였다. 다중목적함수 최적화를 위해 가중 합을 적용하였으며, 계산식은 다음과 같다.

$$\min(f) = \lambda_1 \frac{T_{ripple}}{T_{ripple,0}} + \lambda_2 \frac{T_{avg,0}}{T_{avg}} \quad (1)$$

여기서  $T_{ripple}$ ,  $T_{avg}$ 는 대리모델의 함수호출을 통해 계산된 연속 운전점의 토크 리플, 최대 운전점의 평균 토크이며  $T_{ripple,0}$ ,  $T_{avg,0}$ 는 초기 설계안의 값이다. 또한,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 는 가중계수를 의미하며 초기 설계안에서 평균 토크는 이미 만족하였으나, 토크 리플이 상대적으로 높게 나타났으므로 가중계수를 0.6으로, 평균 토크는 0.4로 설정하였다. 또한, 최적 설계를 위해 선정된 변수는 슬롯 오픈닝 길이, 극호비, 자석 두께이며, 각각  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ 로 그림 1에 나타내었다. 각 변수의 범위는 제작성을 고려하여 설정하였으며, 이를 표 4에 정리하였다.

최적 설계를 위한 대리모델 구축을 위해 변수의 정의된 범위 내에서 샘플링을 수행하였다. 설계 공간 전반에 걸쳐 균일한 분포를 확보하기 위해 라틴하이퍼큐브샘플링(LHS, Latin Hypercube Sampling) 기법을 적용하였다. 샘플링은 총 500개의 샘플을 통해 이루어졌으며, 이후 기계학습 기법인 랜덤 포레스트(RF, Random Forest)를 기반으로 대리모델을 구축하였다. RF는 앙상블 학습 기법 중 하나로, 여러 개의 결정 트리를 병렬적으로 구성하고 그 평균을 통해 예측을 수행함으로써 비선형 문제에 강인하며, 대리모델 구성에 널리 활용된다. 대리모델을 통해서 최적해를 탐색하는 과정에서는 추가적인 FEA 없이 예측값을 도출할 수 있다.

표 4. 최적 설계 변수의 범위.

Table 4. Range of optimal design variables.

Variable	Range
$X_1$	0.6 mm ~ 1.8 mm
$X_2$	0.6 ~ 0.9
$X_3$	2.5 mm ~ 3.5 mm

표 5. 대리모델 예측 정확도(R<sup>2</sup> score).

Table 5. Prediction accuracy (R<sup>2</sup> score) of surrogate models.

토크 리플(연속)	0.93
평균 토크(최대)	0.96

표 6. 초기 설계안과 최적 설계안의 설계 변수 및 해석 결과.

Table 6. Design variables and analysis results of the initial and optimal models.

	초기 설계안	최적 설계안
X <sub>1</sub>	1.2 mm	1.72 mm
X <sub>2</sub>	0.8	0.87
X <sub>3</sub>	2.5 mm	3.39 mm
코깅 토크	61.56 mNm	12.15 mNm
상 BEMF THD	11.00 %	5.69 %
선간 BEMF THD	2.98 %	2.73 %
평균 토크(연속)	0.84 Nm	0.89 Nm
토크 리플(연속)	6.16 %	1.97 %
평균 토크(최대)	4.01 Nm	4.50 Nm
토크 리플(최대)	3.43 %	2.11 %

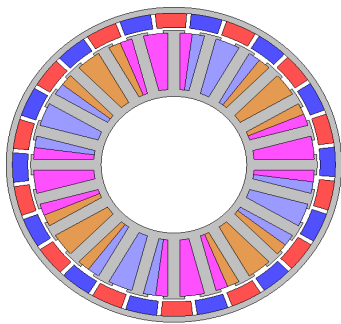


그림 4. 최적 설계안의 형상.

Fig. 4. Geometry of the optimal model.

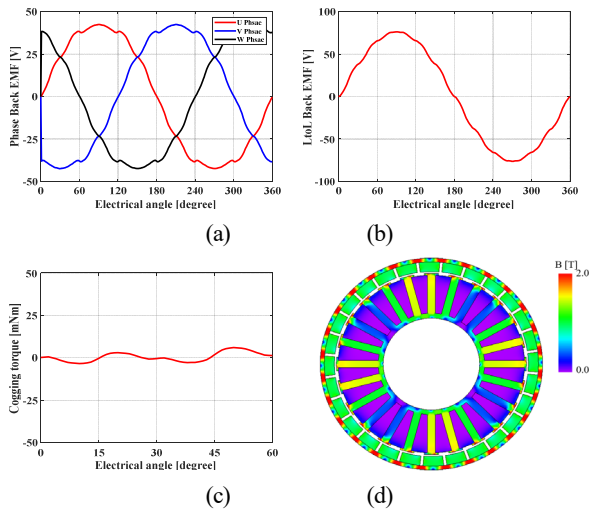


그림 5. 최적 설계안 무부하 해석 결과. (a) 상 역기전력. (b) 선간 역기전력. (c) 코깅 토크. (d) 자속밀도.

Fig. 5. No-load condition analysis result of the Optimal model. (a) Phase BEMF. (b) Line-to-line BEMF. (c) Cogging torque. (d) Magnetic flux density.

표 5는 연속 운전점의 토크 리플과 최대 운전점의 출력 토크에 대한 대리모델의 R<sup>2</sup> score를 계산한 결과를 나타낸다. 각 목적함수에 대한 R<sup>2</sup> score가 모두 0.9 이상으로 나타났으며, 이는 대리모델이 실제 FEA 결과를 높은 정확도로 모사하고 있음을 의미한다. R<sup>2</sup> score는 예측값이 실제값을 얼마나 잘 설명하는지를 나타내는 지표로, 1에 가까울수록 예측 정확도가 높음을 의미한다. 따라서 본 연구에서 대리모델을 통해 도출된 최적해는 충분한 신뢰성을 가진다고 판단할 수 있다.

본 연구에서는 계산 효율성과 적용 용이성을 고려해 널리 사용되는 GA를 최적화 기법으로 활용하였다. GA의 세대별 샘플 수는 50개, 최대 세대 수는 100으로 설정하였고, 변이 확률은 0.1로 설정하였다. 수렴 조건은 표준편차가 0.001 이하면 종료하도록 설정하였으며, 20세대에서 수렴 조건을 만족하여 알고리즘이 종료되었다. 이때의 함수호출 횟수는 1100이며, 실제 함수에서의 최적화 시에도 유사한 수준의 함수호출이 필요했을 것으로 예상된다. 이때 대리모델 구축 시 사용된 샘플의 수가 500개이므로, 대리모델 도입으로 계산 비용이 절감되었음을 알 수 있다.

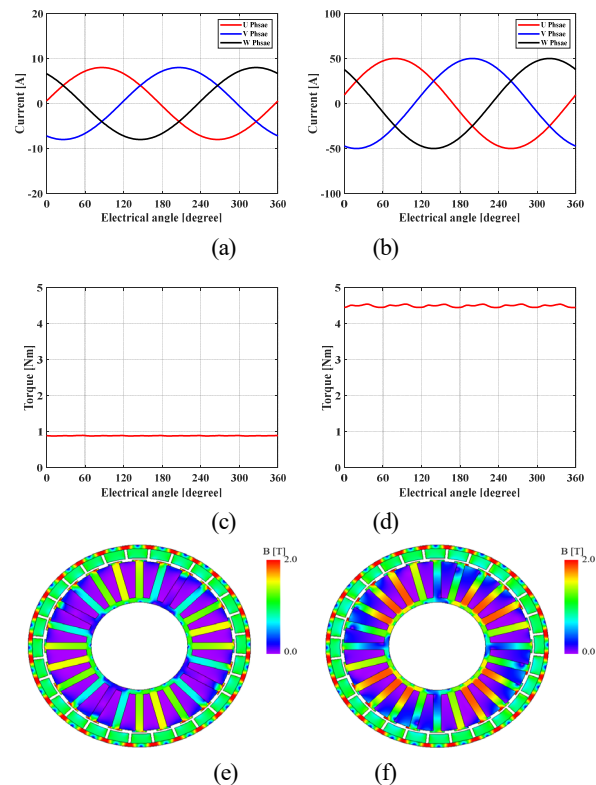


그림 6. 최적 설계안 부하 해석 결과. (a) 연속 운전점 입력 전류. (b) 최대 운전점 입력 전류. (c) 연속 운전점 출력 토크. (d) 최대 운전점 출력 토크. (e) 연속 운전점 자속밀도. (f) 최대 운전점 자속밀도.

Fig. 6. Load condition analysis result of the Optimal model. (a) Input current at constant operating point. (b) Input current at maximum operating point. (c) Output torque at constant operating point. (d) Output torque at maximum operating point. (e) Magnetic flux density at constant operating point. (f) Magnetic flux density at maximum operating point.

최적 설계안의 형상을 그림 4에 나타내었으며, 초기 설계안과 최적 설계안의 설계 변수와 해석 결과를 표 6에 정리하였다. 또한, 무부하 및 부하 해석 결과를 그림 5와 6에 나타내었다. 무부하 해석은 상온 조건에서 4,200RPM으로 수행하였으며, 해석 결과 상 BEMF는 32.36V<sub>pk</sub>, 선간 BEMF는 58.08V<sub>pk</sub>로 나타났으며 각 BEMF의 THD는 5.69%, 2.73%로 나타났다. 코깅 토크는 12.15mNm로 연속 토크 대비 1.37% 수준으로 초기 설계안 대비 19.71% 수준으로 대폭 감소하였다. 이는 연속 운전점에서의 토크 리플을 최소화하는 과정에서 저감된 것으로 판단된다. 무부하 조건에서의 자속 밀도를 그림 5(d)에 나타내었다. 회전자 요크부의 포화도가 높게 나타난 것은, 한정된 공간 내에서 자석 두께의 증가로 인해 요크 두께가 감소하고, 동시에 자석 사용량 증가에 따른 자속량 증가가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 그러나 회전자 요크부는 일반적으로 손실 발생 비중이 낮아, 해당 포화 현상이 전체 성능에 미치는 영향은 제한적일 것으로 판단된다.

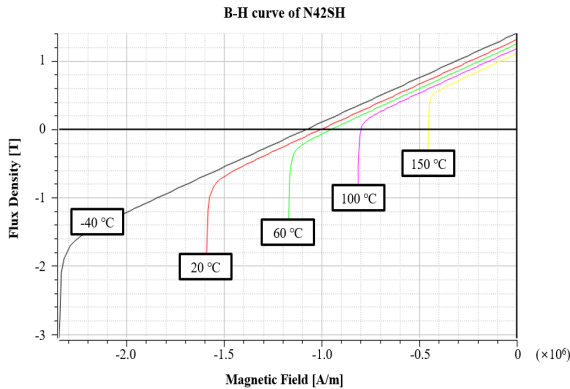


그림 7. N42SH 영구자석의 온도별 B-H 곡선.  
Fig. 7. B-H Curves of the N42SH magnet at different temperatures.

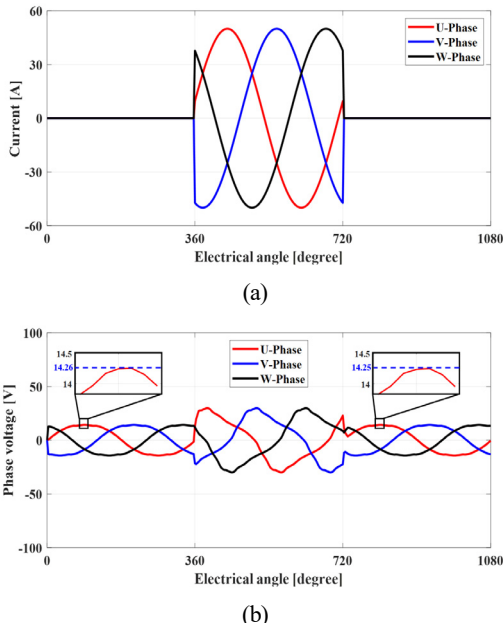


그림 8. 최적 설계안 감자해석 결과. (a) 입력 전류. (b) 상전압.  
Fig. 8. Demagnetization analysis result of the Optimal model. (a) Input current. (b) Phase voltage.

부하 해석 시 연속 운전점과 최대 운전점에서 인가한 전류를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a), (b)는 인가 전류를 나타낸다. 초기 설계안과 마찬가지로 연속 운전점에서 8A<sub>pk</sub>, 최대 운전점에서 50A<sub>pk</sub>를 인가하였다. 그림 6(c), (d)는 연속 운전점과 최대 운전점의 토크 파형을 나타낸다. 각 운전점에서의 출력 토크는 0.89Nm와 4.50Nm로 요구 토크를 만족시켰으며, 초기 설계안 대비 5.95%, 12.22% 개선되었다. 토크 리플의 경우 연속 운전점에서 1.97%, 최대 운전점에서 2.11%로 기존에 높은 수준이었던 연속 운전점에서의 토크 리플이 기존 대비 31.98% 수준으로 크게 저감됨을 확인하였다. 또한, 각 운전점에서 도출된 상전압의 최대치가 32.74V<sub>pk</sub>, 28.98V<sub>pk</sub>로 모두 전압 제한 이내임을 확인할 수 있다. 그림 6(e), (f)는 연속 운전점과 최대 운전점에서의 자속 밀도를 나타낸다. 최대 운전점에서의 자속 밀도를 보면, 제한에 가까운 전류를 인가했음에도 불구하고 고정자 철심이 전류에 의해 과포화되지 않음을 확인할 수 있다.

최적 설계안의 출력 안정성을 확인하기 위해 영구자석 불가역 감자해석을 수행하였다. 그림 7은 설계 시 사용된 N42SH 자석의 B-H 곡선이며 온도가 증가함에 따라 잔류자속밀도와 보자력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, SPMSM의 경우 회전자 표면에 위치한 자석이 고정자에서 발생한 역자계에 직접적으로 노출되어 감자에 취약하다. 따라서 영구자석의 온도를 150°C로 설정하고 최대 전류를 인가하여 강한 역자계 하에서 감자에 불리한 조건에서 해석을 수행하였다. 감자해석은 감자조건 인가 전후의 무부하 역기전력 크기를 비교하는 방식으로 수행되었으며, 해석 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 감자해석 시 인가 전류의 파형으로, 전기각 360°부터 720° 구간에서 감자조건에 해당하는 최대 전류 50A<sub>pk</sub>가 인가된 것을 확인할 수 있다. 그림 8(b)는 감자해석 시 상 전압 파형으로, 감자조건 인가 전인 0°~360° 구간과 인가 후인 720°~1080° 구간의 무부하 역기전력 최대치를 비교한 결과, 저감률이 1% 미만임을 확인할 수 있다. 이로써 최적 설계안에서 불가역 감자 현상이 발생하지 않음이 확인되었으며, 최적 설계안의 구동 안정성이 검증되었다.

IV. 결론

본 논문에서는 휴머노이드 로봇의 무릎 관절에 적합한 SPMSM의 최적 설계를 수행하였다. 전자계 해석을 통해 연속 토크 대비 5배의 최대 토크를 가진 초기 설계안을 도출하고, LHS와 RF를 활용해 대리모델을 구축하였다. GA를 대리모델에 적용한 결과, 최대 토크와 연속 토크는 각각 12.22%, 5.95% 향상되었고, 연속 운전 시 토크 리플은 68.02% 저감되었다. 또한, 고온 조건에서의 불가역 감자 해석을 통해 출력 안정성을 확보하고, 전압 제한 내에서 동작을 확인하였다. 본 연구는 고토크, 저토크 리플, 감자 안정성을 만족하는 고성능 전동기 설계안을 도출하였으며, 제한된 기법은 다양한 관절 구동기 설계에 활용될 수 있다.

REFERENCES

[1] J. W. Park, D. H. Oh, and H. J. Kim, "Trends in collision avoidance techniques for multi-robot systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol.

- 30, no. 4, pp. 402 - 411, Apr. 2024.  
doi: 10.5302/J.ICROS.2024.24.0033
- [2] M. J. Kim, D. G. Lim, D. H. Kim, J. H. Cha, J. Y. Shin, U. H. Cha, K. J. Park, K. W. Lee, and J. H. Park, "Research trends in humanoid robot walking technologies," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 4, pp. 412 - 422, Apr. 2024.  
doi: 10.5302/J.ICROS.2024.24.0042
- [3] S. -W. Hwang, J. -W. Chin, and M. -S. Lim, "Design process and verification of spmsm for a wearable robot considering thermal characteristics through LPTN," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 1033-1042, April 2021.  
doi: 10.1109/TMECH.2020.3015561
- [4] P. T. Luu, J. -Y. Lee, J. -H. Lee, and J. -W. Park, "Electromagnetic and thermal analysis of permanent-magnet synchronous motors for cooperative robot applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, no. 3, pp. 1-4, March 2020, Art no. 7512804.  
doi: 10.1109/TMAG.2019.2942939
- [5] M. S. Razaq, W. Midgley, and T. Steffen, "A review of the state of the art of torque ripple minimization techniques for permanent magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 20, no. 1, pp. 1019-1031, Jan. 2024.  
doi: 10.1109/TII.2023.3272689
- [6] V. Z. Faradonbeh, A. Rahideh, S. T. Boroujeni, and G. A. Markadeh, "2-D analytical no-load electromagnetic model for slotted interior permanent magnet synchronous machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 4, pp. 3118-3126, Dec. 2021.  
doi: 10.1109/TEC.2021.3064034
- [7] F. Liu, X. Wang, H. Wei, L. Xiong, and X. Zhang, "Prediction of electromagnetic performance for IPMSM based on improved analytical model considering saturation effects," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 1, pp. 1128-1144, March 2024.  
doi: 10.1109/TTE.2023.3260968
- [8] K. -W. Lee and S. -I. Kim, "Dynamic performance improvement of a current offset error compensator in current vector-controlled SPMSM drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 6727-6736, Sept. 2019.  
doi: 10.1109/TIE.2018.2877162
- [9] Y. B. Kim, U. Kim, D. -Y. Seok, J. So, Y. H. Lee, and H. R. Choi, "Torque sensor embedded actuator module for robotic applications," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 1662-1672, Aug. 2018.  
doi: 10.1109/TMECH.2018.2850962
- [10] J. H. Lee, J. -Y. Song, D. -W. Kim, J. -W. Kim, Y. -J. Kim, and S. -Y. Jung, "Particle swarm optimization algorithm with intelligent particle number control for optimal design of electric machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1791-1798, Feb. 2018.  
doi: 10.1109/TIE.2017.2760838
- [11] S. Giurgea, D. Fodorean, G. Cirrincione, A. Miraoui, and M. Cirrincione, "Multimodel optimization based on the response surface of the reduced FEM simulation model with application to a PMSM," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 9, pp. 2153-2157, Sept. 2008.  
doi: 10.1109/TMAG.2008.2000497



### 이 주 창

2023년 울산대학교 전기공학과 졸업.  
2025년 동대학원 석사과정 졸업. 2025년~현재 동대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 전동기 설계, 최적화 알고리즘.



### 임 동 국

2010년 동국대학교 전기공학과 졸업.  
2017년 서울대 전기공학과 석박통합과정 졸업(박사). 2017년 현대모비스 연구개발본부 친환경 설계실 책임연구원.  
2017년~2022년 울산대학교 전기공학부 조교수. 2022년~현재 울산대학교 전기공학부 부교수. 관심분야는 전기기기 해석 및 최적설계.