

# 헤어핀 권선을 적용한 영구자석 동기전동기의 메타모델 기반 최적 설계

박정윤<sup>1)</sup> · 정기환<sup>1)</sup> · 이승현<sup>2)</sup> · 유용민<sup>1)\*</sup>

전남대학교 미래모빌리티융합학과<sup>1)</sup> · 광주과학기술원 기계로봇공학과<sup>2)</sup>

## Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Hairpin Windings Based on Metamodels

Jeong-Yoon Park<sup>1)</sup> · Gi-Hwan Jeong<sup>1)</sup> · Seung-Hyeon Lee<sup>2)</sup> · Yong-Min You<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Future Mobility Convergence, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical and Robotics Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, Korea

(Received 27 March 2025 / Revised 28 April 2025 / Accepted 29 April 2025)

**Abstract :** This paper optimizes a permanent magnet synchronous motor(PMSM) with hairpin winding technology to enhance efficiency and reduce torque ripple, thereby improving driving range and reducing Noise, Vibration and Harshness(NVH) in electric vehicle traction motors. Target specifications were defined, and multiphysics analysis was conducted to identify key design variables through sensitivity factors. Using the optimal Latin hypercube design method, 30 experimental points were selected, and finite element analysis(FEA) was performed for each. Eleven metamodeling techniques were employed to approximate the objective function and corresponding constraints. A hybrid metaheuristic algorithm was then used to derive optimal solutions, which were validated via FEA. The optimization method achieved a 0.87 % improvement in efficiency, and a 2.39 % reduction in torque ripple while satisfying all constraints, thus demonstrating the effectiveness of the proposed metamodel-based optimization approach for eco-friendly vehicle traction motors.

**Key words :** Permanent magnet synchronous motor(영구자석 동기전동기), Hairpin windings(헤어핀 권선), Finite element analysis(유한요소해석), Metamodeling(메타모델링), Optimization(최적화)

### Nomenclature

|          |                                      |
|----------|--------------------------------------|
| $J$      | : current density, A/mm <sup>2</sup> |
| $I$      | : current, A                         |
| $A$      | : area, mm <sup>2</sup>              |
| $V$      | : voltage, V                         |
| $T$      | : torque, N · m                      |
| $\omega$ | : rotational speed, rad/s            |
| $\beta$  | : phase angle, °                     |
| $t$      | : time, s                            |
| $B$      | : magnetic flux density, T           |

### 1. 서론

최근 환경 오염 등의 이유로 전기자동차 시장이 급격히 성장하고 있으며, 이에 따라 여러 글로벌 자동차 제조사 또한 경쟁력 높은 전기자동차를 개발하기 위해 노력하고 있다. 특히, 소비자들이 전기차 구매를 고려할 때 1회 충전 후 주행 가능 거리를 가장 중요하게 생각하기 때문에, 이는 전기차의 설계 과정에서 핵심적인 요소로 자리잡았다.<sup>1)</sup> 전기차의 주행 가능 거리는 전동기와 같은 동력 전달 장치의 효율성에 큰 영향을 받기 때문에, 고효율 특성을 만족하는 전동기를 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>2-4)</sup>

최근 연구에서는 구동용 전동기의 고효율 특성을 만

\*Corresponding author, E-mail: ym.you@jnu.ac.kr

<sup>1)</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

족하기 위해 기존의 환형 동선이 아닌 사각 동선을 사용하여 점적률을 극대화하는 방법이 연구되고 있다.<sup>5)</sup> 특히, 전기자동차용 구동용 전동기에는 코일 엔드턴 부분이 헤어핀(Hairpin) 형상을 닮은 헤어핀 권선 기술이 주로 사용되고 있다. 헤어핀 권선 기술이 적용될 경우, 기존의 환형 동선 방식에 비해 슬롯 내 불필요한 공간이 줄어들어 코일의 점적률이 증가하게 되고 이로 인해 전동기의 효율성과 출력 밀도가 크게 향상된다.<sup>6)</sup> 이러한 이유로 헤어핀 권선 기술은 전기자동차 구동용 전동기의 성능 개선 기술로 주목받고 있다.

전기자동차 구동용 전동기는 고출력 및 고효율 특성을 만족하기 위해 주로 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)를 사용한다. 이때 영구자석 동기전동기는 고정자의 슬롯과 회전자 영구자석 사이 자속 상호 작용에 의해 토크 리플이 발생한다.<sup>7)</sup> 토크 리플은 전기자동차 구동용 전동기의 소음과 진동을 유발하여 차량 NVH에 악영향을 끼친다. 따라서 전기자동차의 NVH 개선을 위해 전동기의 형상 변경, Skew 적용, Notch 적용, 태퍼링 형상 적용 등을 통해 토크 리플을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>8-11)</sup> 하지만 다양한 설계 변수에 대해 설계 변수 간의 상호 작용을 고려한 최적 설계에 관한 연구는 부족한 실정이다.

최적 설계는 주어진 제약 조건 내에서 목적 함수에 대한 최고의 성능을 발휘하기 위한 설계 변수의 최적해를 도출하는 과정이다. 최적 설계 방법에는 해석 모델에 최적화 알고리즘을 직접 결합하는 방식과 예측 모델인 메타모델을 사용하는 방법이 있다. 이때 메타모델을 사용하여 최적 설계를 진행할 경우, 실제 해석 모델과 변수의 관계를 근사화 함수로 만들기 때문에 소요되는 시간과 비용을 단축시킬 수 있다는 장점이 있다.<sup>12)</sup> 하지만 예측 성능이 좋지 않은 메타모델이 사용된다면 예측한 결과와 실제 해석 결과가 크게 달라질 수 있다.

본 연구에서는 헤어핀 권선을 사용한 영구자석 동기 전동기의 효율 개선 및 토크 리플 저감을 위한 최적 설계를 진행하였다. 먼저 실제 구동 환경에서 발생하는 복합적인 물리 현상을 최대한 정확하게 반영하고, 잠재적 위험 요소를 사전에 방지하기 위해 전자기장 해석, 강성 해석, 열 해석, 감자 해석 등의 다중 물리 특성 해석을 통해 전동기 설계의 타당성을 검증하였다. 이후 최적 설계를 진행하기 앞서 본 연구에서 개선하고자 하는 전동기의 효율과 토크 리플을 목적 함수로 설정하였다. 또한 전동기의 고정자 치수 중 몇 가지의 변수를 설계 변수로 지정하였으며, 전동기가 안정적으로 구동하기 위한 최소한의 요구 사양을 제약 조건으로 설정하였다. 마지막으로 RMSE Test(Root Mean Squared Error Test)를 통해 출력 변

수별 정확도가 가장 높은 메타모델을 선정하여 예측한 결과의 정확도를 확보해주었고, 이후 최적화 알고리즘을 결합하여 최적 설계를 진행하였다.

## 2. 해석 모델 사양 및 다중 물리 특성 해석

### 2.1 헤어핀 모델 기본 설계

#### 2.1.1 해석 모델 사양

해석에 사용된 모델은 초소형 전기차 인휠모터용 5 kW급 외전형 동기전동기로 32 극 36 슬롯의 구조를 가지고 있으며, 모델의 형상은 Fig. 1과 같고 제원은 Table 1과 같다. 사각 동선을 사용하는 헤어핀 권선법은 환형 동선에 비해 코일의 점적률을 높이고 DC 동손을 저감하여 출력 및 효율을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고효율 특성을 위해 사각 동선인 헤어핀 권선법을 사용하여 초소형 전기차 인휠모터용 외전형 동기전동기를 설계해 해석을 진행하였다.

헤어핀 권선법은 일반적인 환형 동선의 권선법과 달

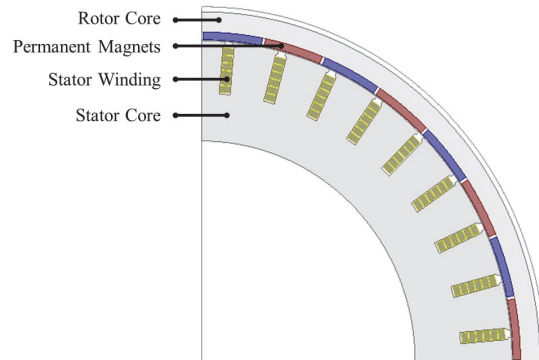


Fig. 1 Shape of initial model (1/4 model)

Table 1 Specifications of the initial model

| Items          | Unit                     | Value                 |         |
|----------------|--------------------------|-----------------------|---------|
| Motor Type     |                          | Outer rotor type PMSM |         |
| Required spec. | Continuous output power  | kW                    | 5       |
|                | Continuous torque        | N · m                 | 54.2    |
|                | Rated speed              | rpm                   | 880     |
| Material       | Electrical steel         | -                     | 35PN440 |
|                | Permanent magnet         | -                     | N45SH   |
| Electrical     | Continuous current       | A                     | 140     |
|                | Current phase angle      | °                     | 0       |
| Mechanical     | Outer diameter of stator | mm                    | 253     |
|                | Outer diameter of rotor  | mm                    | 276     |
|                | Air-gap                  | mm                    | 1       |
|                | Lamination               | mm                    | 47      |

Table 2 Comparative analysis of efficiency improvements

| Items             | Unit  | Initial model | Hairpin model |
|-------------------|-------|---------------|---------------|
| Copper loss       | W     | 352.9         | 161.2         |
| Core loss         | W     | 199.9         | 166.0         |
| Eddy current loss | W     | 98.1          | 79.3          |
| End turn loss     | W     | 127.4         | 12.7          |
| Total loss        | W     | 650.9         | 419.2         |
| Torque            | N · m | 54.2          | 56.9          |
| Speed             | rpm   | 880           | 880           |
| Output power      | W     | 4993.9        | 5250.1        |
| Input power       | W     | 5772.3        | 5669.3        |
| Efficiency        | %     | 86.5          | 92.6          |

리 사각 단면의 두꺼운 구리 도체를 슬롯에 직선 형태로 삽입한 후 양 끝을 레이저 용접 등의 방식으로 연결하는 구조를 갖는다. 헤어핀 권선법에 사용되는 사각 동선은 도체의 단면적이 크기 때문에 동일 전류가 흐를 때 전류 밀도가 낮아져 DC동손이 감소하고 권선 경로가 직선화 되어 전체 도체 길이가 짧아지며, 특히 권선 엔드턴의 길이가 대폭 줄어든다.

본 연구에서는 기존의 환형 동선을 사용한 전동기를 사각 동선을 사용하여 헤어핀 권선법을 적용한 전동기로 변경하여 설계를 진행하였다. 기존의 환형 동선과 사각 동선을 적용한 두 전동기 모델을 대상으로 성능 차이를 비교 분석한 결과는 Table 2와 같다. 환형 동선 적용 시 전동기 효율은 86.5%였으며, 사각 동선 적용 시에는 92.6%로 6.1% 향상되었다. 이러한 효율 개선은 주로 동손의 감소에서 기인한 것으로, 동손은 352.9 W에서 161.2 W로 54.32% 감소하여 총 손실은 650.9 W에서 419.2 W로 35.6% 감소하였다. 토크 역시 54.2 N · m에서 56.9 N · m로 개선되어 출력은 4,993.9 W에서 5,250.1 W로 출력 성능이 향상되었다. 이처럼 헤어핀 구조는 전류의 경로를 단순화하고 유효 단면적을 증가시켜 전기적 손실을 줄이는 데 매우 효과적임을 확인하였다.

### 2.1.2 헤어핀 권선 사이즈 선정

헤어핀 권선의 사이즈를 선정하기 위해 식 (1)과 (2)에 값을 대입하여 점적률(Fill Factor)과 전류 밀도를 만족하는 설계 변수를 구하였다. 식 (1)은 전류 밀도를 구하는 식으로 여기서  $I_{rms}$ 는 전류의 실효치를 의미하고,  $A_{coil}$ 은 전동기에 사용되는 코일의 단면적을 의미한다. 일반적으로 공랭식 전동기의 전류 밀도는 5 ~ 10 A/mm<sup>2</sup>을 만족해야 한다.<sup>13)</sup> 식 (2)는 점적률을 구하는 식으로 여기서  $A_{slot}$ 은 슬롯의 면적을 의미한다. 점적률은 높아질수록 전동기의 성능이 개선된다는 장점이 존재하지만, 점적률

이 높아질수록 제조의 용이성이 떨어진다는 단점이 있기에 점적률은 40 ~ 60%를 유지하는 것이 적절하다.<sup>14)</sup> 본 연구에서는 전동기의 점적률 개선을 위해 기존 환형 동선을 적용한 모델을 기반으로 헤어핀 권선 구조를 적용하였다. 일반적으로 사각 동선을 활용한 헤어핀 권선의 경우 점적률은 약 70 ~ 80% 수준까지 확보할 수 있으나, 본 연구에서는 기존 환형 동선 기반의 모델과의 정합성을 유지하기 위해 점적률을 50% 수준으로 설정하였다. 이러한 점적률 설정은 기존 환형 동선 구조에서의 점적률과 유사한 수준을 반영한 것으로, 구조 변경에 따른 상대적인 성능 개선 효과를 정량적으로 분석하기 위함이다. 따라서 식 (1)과 (2)를 통해 목표치인 점적률 50%, 전류 밀도 5 A/mm<sup>2</sup>를 만족하는 코일의 면적을 구하고, 이를 통해 헤어핀 권선의 사이즈를 선정하였다.

$$J = \frac{I_{rms}}{A_{coil}} \tag{1}$$

$$FF = \frac{A_{coil}}{A_{slot}} \tag{2}$$

where  $I_{rms}$  : rms of current

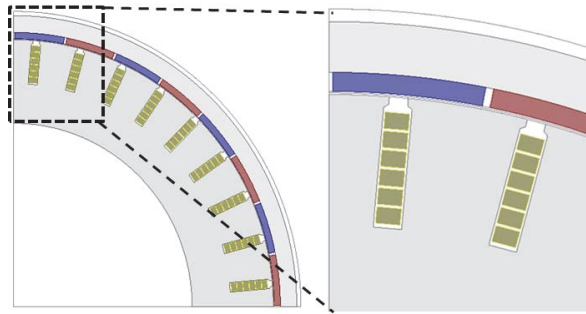
$A_{coil}$  : area of coil

$A_{slot}$  : area of slot

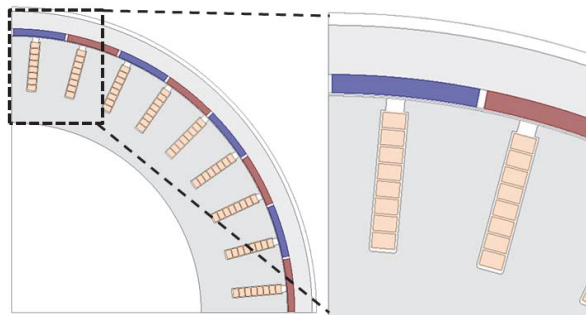
### 2.1.3 Layer 개수 선정

헤어핀 권선 모델의 설계에서 가장 중요한 요소는 Layer라고 할 수 있다. 슬롯 내부에 규칙성을 갖지 않고 무작위로 배치되는 환형 동선에 비해 사각 동선(헤어핀 권선)은 권선을 슬롯 내부에 층층이 쌓아 제작하곤 한다. 이때 슬롯 내부에 쌓인 사각 동선의 수를 Layer라고 부르며 Layer의 배치가 많을수록 출력은 향상되지만, 제작의 복잡성이 증가할 수 있고 비용적 문제와 열 관리 문제가 발생하는 단점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 6 layers와 8 layers 두 가지 형상을 Fig. 2와 같이 설계한 후 전자기장 해석을 통해 두 형상의 해석 결과를 비교하여 적합한 layer를 선정하였다.

6 layers와 8 layers 두 가지 모델의 전자기장 해석 결과를 Table 3에 정리하였다. 해석 결과 6 layers 모델의 토크는 57.25 N · m, 토크 리플은 8.89%, 효율은 92.6%로 계산된 반면, 8 layers 모델의 토크는 75.98 N · m, 토크 리플은 8.34%, 효율은 93.5%로 8 layers 모델이 6 layers 모델에 비해 성능이 우수함을 확인하였다. 하지만 본 모델의 선간 전압 제한치는 54 V로 6 layers 모델은 48.12 V로 선간 전압제한치보다 7.88 V 낮은 반면, 8 Layers 모델은



(a) 6 layers winding hairpin model



(b) 8 layers winding hairpin model

Fig. 2 6 layers winding and 8 layers winding (1/4 model)

Table 3 Performance of the initial model

| Items                | Unit  | 6 layers | 8 layers |
|----------------------|-------|----------|----------|
| Average torque       | N · m | 57.25    | 75.98    |
| Torque ripple        | %     | 8.89     | 8.34     |
| Line-to-line voltage | V     | 48.12    | 64.13    |
| Efficiency           | %     | 92.6     | 93.5     |

64.13 V로 선간 전압제한치보다 10.13 V 초과하는 것을 확인하였다. 따라서 선간 전압 제한치를 초과하지 않는 6 Layers 모델을 기본 모델로 선정하였다.

## 2.2 다중 물리 특성 해석

다중 물리 특성 해석은 전자기장 해석, 열 해석, 강성 해석 등을 수행하여 각 물리적 현상이 전동기 성능에 미치는 영향을 분석하는 해석이다. 다중 물리 특성 해석을 통해 전동기의 출력, 토크, 효율을 예측하고 그에 따른 열 분포를 분석하여 과열 문제를 확인할 수 있으며, 강성 해석을 통해 기계적 진동과 변형을 분석하여 구조적 안정성을 확인할 수 있다. 특히, 전기자동차와 같은 안전이 중요한 시스템에서는 다중 물리 특성 해석을 통해 신뢰성을 높이고 고장 가능성을 줄이는 것이 필수적이다. 따라서 다중 물리 특성 해석은 전동기의 설계와 최적화 과정에서 성능 검증 및 신뢰성 확보를 위한 핵심 요소로 작용한다.

### 2.2.1 전자기장 해석

전자기장 해석 결과를 통해 설계한 전동기의 출력, 토크, 효율 등을 통해 목표하는 성능을 만족하는지 여부를 확인할 수 있다. 또한, 역기전력의 THD 수치와 토크 리플의 분석을 통해 전기자동차용 전동기의 소음과 진동에 대한 분석이 가능하다. 따라서 전자기장 해석은 차량용 전동기의 소음 및 진동 확인 및 전기자동차의 전반적인 성능과 효율성 확인을 위해 중요한 역할을 한다.

#### 2.2.1.1 무부하 해석

무부하 해석은 전동기가 외부 부하 없이 동작하는 상태에서 전동기의 성능을 평가하는 데 필요한 핵심 해석으로 무부하 역기전력과 THD(Total Harmonic Distortion) 등을 확인하는 해석이다. 무부하 역기전력은 전동기가 외부 부하 없이 회전할 때 발생하는 역기전력을 측정하여 전동기 설계의 안정성을 확인하고 전자기적 성능을 평가하는 데 중요한 지표로 작용하며 THD는 역기전력 파형의 고조파 성분을 분석하여 파형의 왜형률을 평가하는 지표이다.

기본 모델의 해석결과 무부하 역기전력은 Fig. 3과 같이 정현적인 파형을 보이는 것을 확인하였으며 무부하 역기전력의 rms값은 최대 18.7 V로 나타났다. 무부하 FFT 분석을 진행한 결과 기본파 성분과 그에 따른 고조파의 비율은 Fig. 4와 같이 나타났다. THD값은 식 (3)을 통해 계산되었으며 아래 식에서  $V_{1,rms}$ 은 기본파의 rms값을 의미하고,  $V_{h,rms}$ 은 고조파의 rms값을 의미한다. 계산 결과 THD값은 1.52 %로 전동기가 안정적으로 설계되었음을 확인하였다.

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{\infty} V_{h,rms}^2(n)}{V_{1,rms}^2}} \times 100[\%] \quad (3)$$

where  $V_{1,rms}$  : rms of the fundamental wave

$V_{h,rms}$  : rms of the harmonic wave

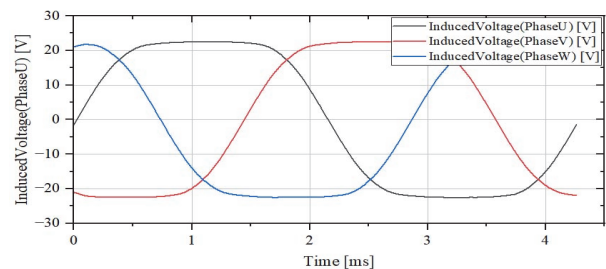


Fig. 3 Induced voltage

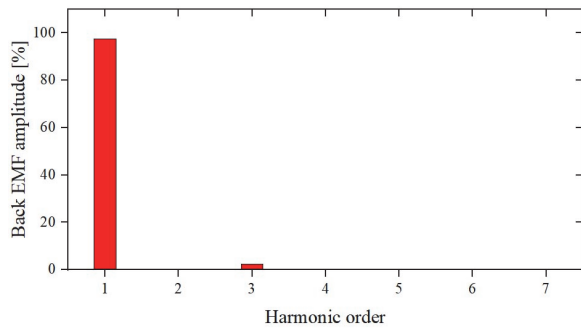


Fig. 4 FFT induced voltage

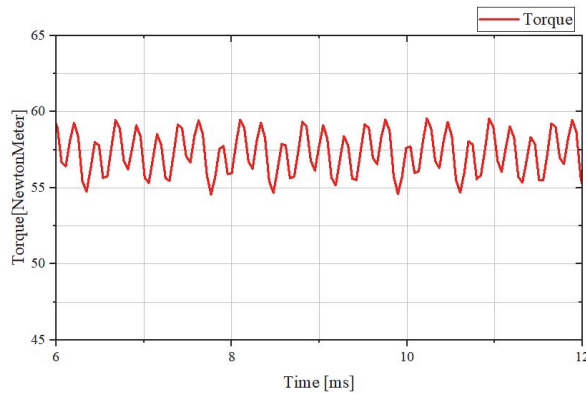


Fig. 5 Average torque waveform

2.1.1.2 부하 해석

부하 해석은 전동기의 정격 속도 880 rpm에서 정격 전류 140 A를 인가하여 평균 토크와 토크 리플, 효율, 선간 전압을 확인하였다. 평균 토크의 경우 목표 평균 토크는 54.1 N·m인 반면, 본 모델의 해석 결과 평균 토크는 57.25 N·m로 목표 평균 토크보다 약 3.1 N·m 높은 값을 가지는 것을 확인하였다. 토크 리플은 식 (4)를 통해 계산하였으며 여기서  $T_{max}$ 는 최대 토크를 의미하고,  $T_{min}$ 은 최소 토크,  $T_{avg}$ 는 평균 토크를 의미한다. 해석 결과 8.9%로 전기자동차용 건인 전동기의 허용 가능한 수치인 10%를 넘지 않는 것을 확인하였다.<sup>15)</sup>

$$T_r = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100 \quad (4)$$

where  $T_{max}$  : maximum torque  
 $T_{min}$  : minimum torque  
 $T_{avg}$  : average torque

Table 4 Property of materials (35PN440)

| Items                  | Unit              | Value   |
|------------------------|-------------------|---------|
| Density                | kg/m <sup>3</sup> | 7,700   |
| Young's modulus        | MPa               | 195,000 |
| Poisson's ratio        | -                 | 0.25    |
| Bulk modulus           | MPa               | 130,000 |
| Shear modulus          | MPa               | 78,000  |
| Tensile yield strength | MPa               | 273     |

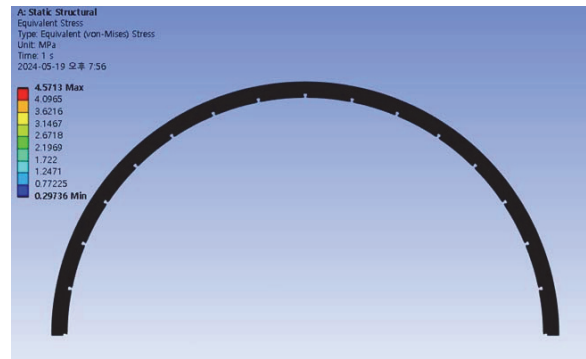


Fig. 6 Stiffness analysis result (1/2 model)

2.2.2 강성 해석

회전자의 강성 해석에 사용된 재질 물성치는 Table 4와 같다. 회전 속도는 전동기의 최대속도인 1,300 rpm으로 해석을 진행하였고, 도출된 응력값의 최대값은 4.57 MPa으로 안전계수가 17.5로 매우 높게 나타났다. 이는 외전형 전동기의 고유한 구조적 특성에서 비롯된 것으로, 영구자석 매입형 동기전동기와 달리 외전형 동기전동기는 회전자에 립 구조가 존재하지 않아 응력 집중 현상이 완화되며, 이는 전반적인 구조적 강성 향상으로 이어진다. 따라서 외전형 전동기의 강성 해석 결과는 영구자석 매입형 동기전동기에 비해 높은 안전계수를 가지기에 나온 결과로 보인다.

2.2.3 열 해석

전동기가 구동함에 따라 전동기의 내부 온도는 상승하게 되고, 이는 곧 열적 손실로 발생하여 전동기의 성능이 저하될 수 있다. 따라서, 전동기의 열 해석을 통해 최고 온도를 확인하고 성능 저하 정도를 파악해야 할 필요가 있다. 전동기에 사용된 재질의 열전도도 값은 Table 5와 같으며, Fig. 7과 같이 Workbench 프로그램 내에서 전자기장 해석 결과와 Steady-State thermal 항목을 연결하여 열 해석을 수행하였다. 이후 Fig. 8과 같이 전동기가 외부 공기와 접촉하는 부분을 자연 대류 영역으로 지정

Table 5 Thermal conductivity of materials

| Material |         | Thermal conductivity (W/m · °C) |
|----------|---------|---------------------------------|
| Material | 35PN440 | 50                              |
|          | Copper  | 400                             |
|          | N45SH   | 7.6                             |
| Region   | Air     | 0.026                           |

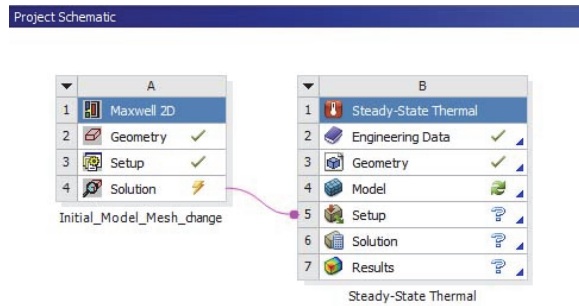


Fig. 7 Linking Maxwell 2D with steady-state thermal in Workbench

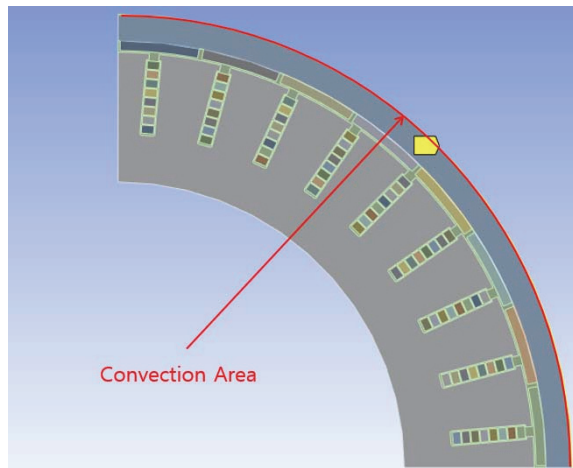
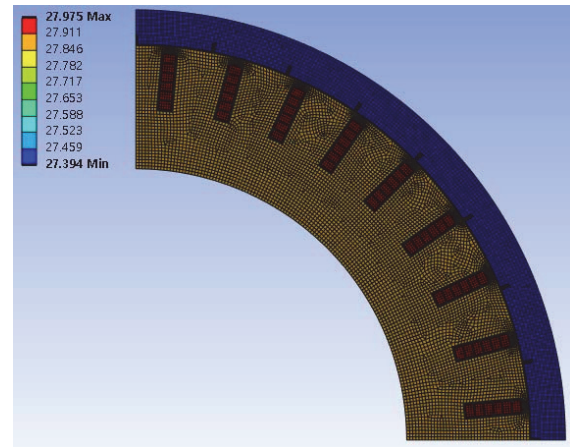


Fig. 8 Convection area (1/4 model)

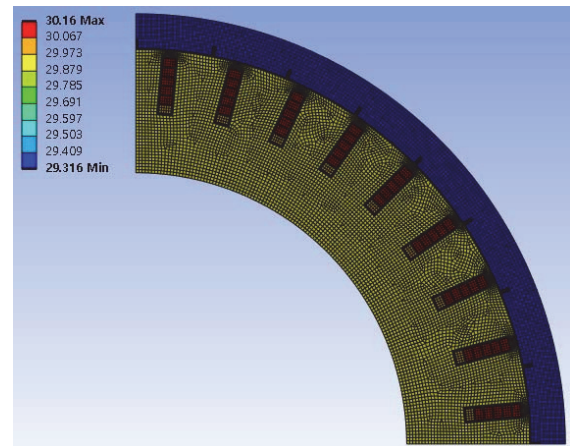
하여 열 해석을 진행하였으며, 해석 결과 전동기의 온도는 Fig. 9와 같이 정격 속도 조건 (a)에서 27.98 °C, 최대 토크 조건 (b)에서 30.16 °C, 최고 속도 조건 (c)에서 39.93 °C로 최고 속도 조건에서 전동기의 최고 온도가 가장 높게 나타났다.

### 2.2.4 감자 해석

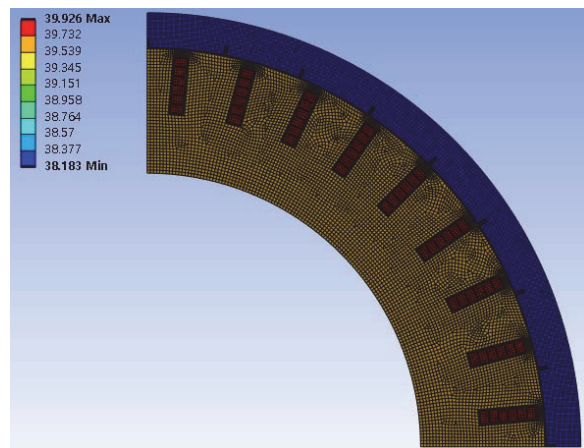
감자 해석은 전동기의 영구자석이 열이나 역자계로 인해 자화가 감소하거나 손실되어 자력을 잃는 현상인 감자 현상으로 인한 성능 감소를 확인하는 해석이다.<sup>16)</sup>



(a) Rated speed condition (140 A @ 880 rpm)



(b) Maximum torque condition (200 A @ 130 rpm)



(c) Maximum speed condition (140 A @ 1,200 rpm)

Fig. 9 Thermal analysis result (1/4 model)

영구자석의 감자 특성은 온도에 따라 달라진다. Fig. 10 은 Arnold社의 N45SH 자석의 B-H 곡선을 보이고 있다.

B-H 곡선을 보면 영구자석은 온도가 높아질수록 영구자석의 잔류자속밀도가 변화하여 영구자석이 쉽게 자성을 잃는 특징을 확인할 수 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 자성 물질 내부의 열에너지가 증가하여 자성 도메인의 정렬이 흐트러지기 때문이다. 영구자석의 자성은 원자 수준에서 전자의 스핀과 궤도 운동에 의해 형성되는데, 높은 온도에서는 열적 진동이 강해지면서 이러한 정렬이 무너지고, 결국 잔류자속밀도가 감소하게 된다.<sup>17)</sup> 따라서 본 논문에서는 온도에 따른 영구자석의 특성을 고려하여 전동기의 성능 저하를 확인하였다. 감자 해석에는 Ansys Maxwell 전자기장 해석 소프트웨어가 활용되었으며 감자 전류는 식 (5)를 통해 계산하여 인가하였다.<sup>16)</sup>

이 식에서 rps는 초당 회전수를 의미하며  $I_{demag}$ 는 감자 전류,  $\omega$ 는 각속도,  $\beta$ 는 전류의 위상각을 의미한다. 감자전류는 Fig. 11과 같이 인가하였으며 감자 전류의 크기는 정격 전류의 1배, 2배, 3배, 4배에 해당하는 수치를 인가하였으며 영구자석의 온도는 전동기의 동작 조건을 최악의 조건으로 설정한 뒤 해석을 진행하기 위해 140 °C로 설정하였다.<sup>18)</sup>

감자율은 감자 전류가 인가된 후 자기장의 세기를 확인하여야 한다. 하지만 실제 해석 결과로써 자기장의 세기를 측정하기 어렵기에, 일반적으로 감자 전류가 인가된 후의 역기전력의 변화를 기준으로 감자율을 측정한다.<sup>18)</sup>

Fig. 12는 감자 해석 중의 역기전력 파형을 보인다. 감자율은 감자 후 역기전력의 변화율로 정의되며, 식 (6)으로 계산된다. 여기서  $BEMF_{ini}$ 는 감자 전류를 인가하기 전 무부하 상태의 역기전력을 의미하고,  $BEMF_{demag}$ 는 감자 전류를 인가 한 후 무부하 상태의 역기전력 값을 의미한다. 계산 결과 정격 전류의 최대 4배에 해당하는 전류를 인가하였을 때 역기전력 감소율(감자율)은 3.52 %가 나오는 것을 확인하였다.

$$if\left(t < \left(\frac{1}{\frac{rps}{4}}\right), 0, if\left(t > \left(\frac{2}{\frac{rps}{4}}\right), 0, I_{demag}\right)\right) * \sin(\omega t + \beta) \quad (5)$$

where  $I_{demag}$ : demagnetizing current

$$Demag\_ratio = \frac{BEMF_{ini} - BEMF_{demag}}{BEMF_{ini}} \times 100[\%] \quad (6)$$

where  $BEMF_{ini}$  : Back EMF before applying the demagnetizing current

$BEMF_{demag}$  : Back EMF after applying the demagnetizing current

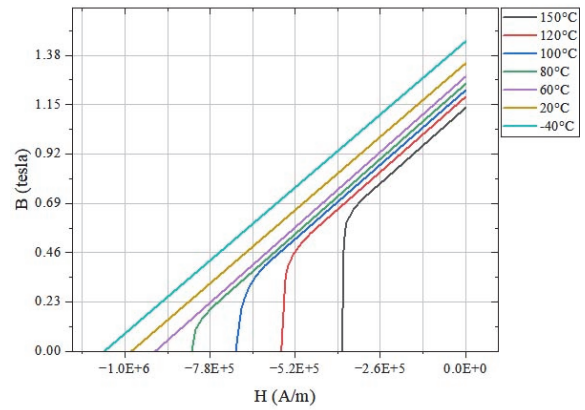


Fig. 10 B-H Curve of N45SH

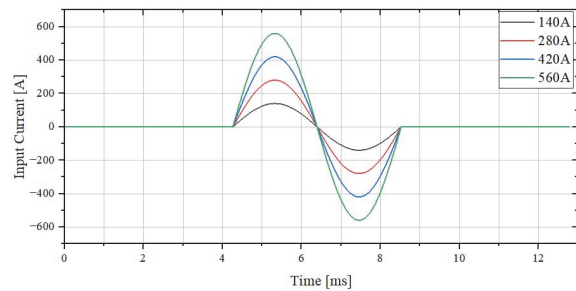


Fig. 11 Waveforms of demagnetization current

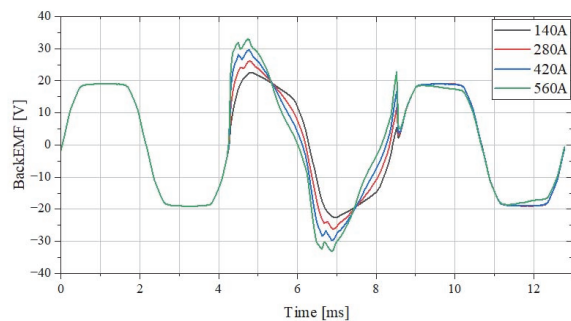


Fig. 12 BEMF waveforms after applying demagnetization current

### 3. 최적 설계

#### 3.1 설계 문제 정식화

본 논문에서는 실험계획법을 바탕으로 11가지의 메타 모델을 생성하여 목적 함수와 제약 조건에 대한 함수 근사화를 진행하였으며 전역 최적화 기법을 이용하여 전동기의 다목적 최적화를 진행하였다.<sup>19)</sup> 최적 설계 과정은 Fig. 13을 토대로 진행하였다. 다목적 함수는 효율 최대화 및 토크 리플 최소화이며 제약 조건은 전동기의 목

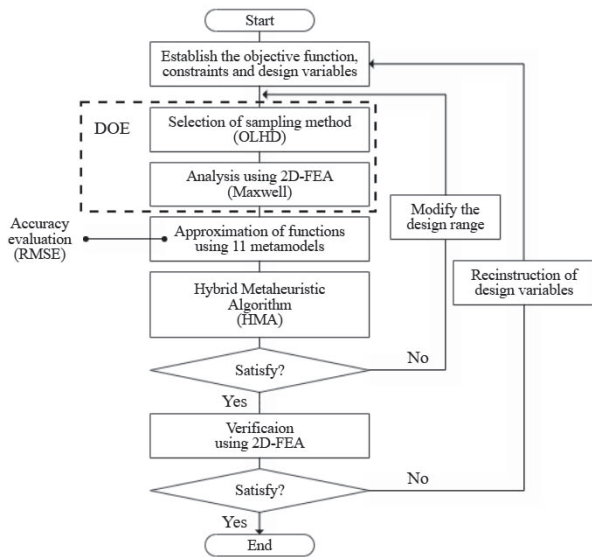


Fig. 13 Optimal design process

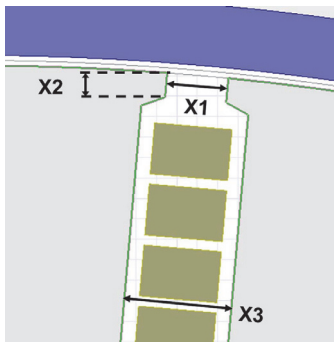


Fig. 14 Design variables

표 사양을 만족하는 조건인 평균 토크 54 N · m 이상, 선간 전압은 배터리 전압인 54 V 이하, 감자율은 5 % 이하로 선정하였다.<sup>18)</sup> 설계 변수는 Slot Open(X1), Shoe Width(X2), Slot Width(X3)으로 Fig. 14와 같으며 설계 변수 범위는 Table 6과 같이 선정되었다. 세 가지 설계 변수는 슬롯 형상과 슈 형상에 밀접한 연관성을 지닌다. 슬롯 형상은 공극 내 자기장, 특히 공극 자속 밀도 분포를 제어함으로써 슬롯으로 인한 리플을 억제하고, 이를 통해 토크 리플을 효과적으로 저감시킬 수 있다. 연구 사례로 배 모양 슬롯은 원형 슬롯에 비해 공극 내 자기장의 공간적 변동성을 완화하는 데 유리하며, 슬롯 리플 억제에 더욱 효과적인 것으로 보고되고 있다.<sup>20)</sup> 또한, 슬롯 형상의 최적화는 효율 개선에도 중요한 영향을 미친다. 권선 끝단의 길이를 최소화함으로써 동손을 저감할 수 있으며, 자기장 고조파 성분을 감소시킴으로써 와전류 손실을 포함한 철손을 효과적으로 줄일 수 있다.

Table 6 Range of design variables

| Design variables | Unit | Lower limit | Initial | Upper limit |
|------------------|------|-------------|---------|-------------|
| Slot open (X1)   | mm   | 0.6         | 3       | 3.8         |
| Shoe width (X2)  | mm   | 0.5         | 1.2     | 1.2         |
| Slot width (X3)  | mm   | 4.3         | 4.5     | 5.5         |

슈 형상 또한 토크 리플 저감 및 효율 향상에 중대한 영향을 미친다. 폴 슈 형상을 적절히 설계하면 인덕턴스 분포의 기울기를 완화하고 균일성을 향상시킬 수 있으며, 이를 통해 토크 리플의 고조파 성분을 효과적으로 저감할 수 있다. 이러한 경향은 단일면 폴 슈는 스위치드 릴럭턴스 전동기에서 특정 동작 구간의 공극 투과도를 증가시켜 토크 리플을 감소시키는 데 기여한다는 사례에서 확인할 수 있다.<sup>21)</sup> 또한 슈 형상의 최적화는 자속 경로를 효율적으로 유도하여 누설 자속을 감소시키고, 이에 따라 철손을 저감시킴으로써 효율을 향상시킬 수 있다. 실제로 폴 슈 형상이 개선되면 자기 회로 내 자속 분포가 보다 집중되어 손실이 최소화되고, 결과적으로 시스템 성능이 향상되는 것으로 보고되고 있다.<sup>21)</sup>

설계 변수의 범위에 대한 근거는 다음과 같다. X1은 슬롯 오픈으로 최솟값은 제작 공정 및 생산성을 고려한 0.6 mm로 선정하였고, 최댓값은 권선 너비인 3.8 mm보다 작게 설정하여 권선의 이탈을 방지하였다. X2는 고정자 Shoe 두께로 최솟값은 제작 공정 및 생산성을 고려하여 0.5 mm로 선정하였고, 최댓값은 슬롯 면적에 영향을 주지 않는 최대 길이인 1.2 mm로 선정하였다. X3는 슬롯의 너비이며 최솟값은 헤어핀 권선의 너비와 절연지의 두께를 고려하여 4.3 mm로 선정하였고, 최댓값은 고정자 치 부분의 자속 포화를 고려하여 최대 자속밀도인 1.85 T를 넘지 않는 5.5. mm로 선정하였다.

### 3.2 민감도 분석

각 설계 변수가 해당 전동기에 미치는 영향력을 분석하기 위해 직교 배열 기법 중 하나인 OA(Orthogonal Array) 기법을 통해 민감도 분석을 진행하였다. 민감도 분석은 설계 변수 변화가 성능 지표에 미치는 영향을 정량적으로 평가함으로써, 설계 변수의 중요도를 식별하고 최적화 과정에서 불필요한 변수나 불확실성을 최소화할 수 있게 한다. 3개의 실험 변수에 대해 3수준으로 총 30개의 실험점을 선정하였다. 이후 30개의 실험점에 대해 유한요소 해석을 수행하였으며, OA 기법의 실험계획 결과를 바탕으로 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 통해 각 설계 변수의 기여도를 파악했으며 결과

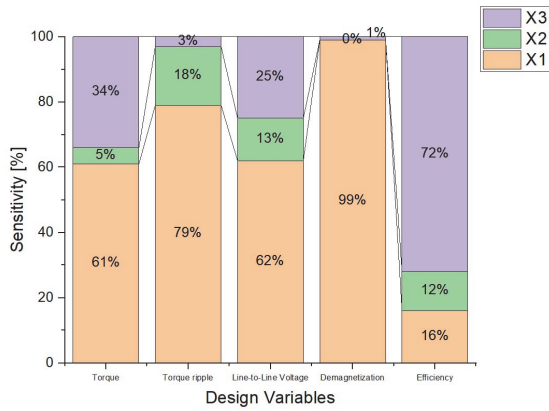


Fig. 15 Sensitivity analysis results

는 Fig. 15에 나타내었다. 민감도 분석을 통해, 설계 변수 Slot Open (X1), Shoe Width (X2), Slot Width (X3) 모두 유의한 설계 변수인 것을 확인하였다.

### 3.3 실험계획법 및 메타모델링

메타모델이란 복잡한 시스템이나 모델의 근사 모델을 생성하여, 실제 모델의 계산 비용을 절감하고 효율적인 최적화 및 예측을 가능하게 하는 근사 모델을 말한다. 본 연구에서는 정확도가 높은 메타모델을 선정하기 위해 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 실험계획의 수와 테스트 포인트의 수를 도출하였다. 식에서 nDV는 설계 변수의 개수를 의미하고, nEXP는 실험 횟수를 의미한다.<sup>22)</sup>

$$nEXP > \min \left[ \frac{(nDV+1) \times (nDV+2)}{2}, 10 \times nDV \right] + (5 \times nDV) \quad (7)$$

$$nEXP_{ts} \geq \min [nEXP \times 10\%, 10 \times nDV] \quad (8)$$

where nDV : number of design variables  
nEXP : number of experimental points

본 모델 설계 변수의 개수는 3개이기 때문에 식 (7)에 nDV에 3을 대입한 결과, 실험점의 수는 26개 이상이 되어야 하는 것으로 도출되었으며, 이를 토대로 실험점의 수를 설계 변수의 배수인 30개로 선정하였다. 식 (8)를 통해 테스트 포인트의 수를 실험점 개수의 10%인 3개로 선정하였다. OLHD 기법을 사용하여 30개의 실험점을 선정하고 각각의 실험점에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 메타모델링 기법은 시스템의 특성과 데이터 분포에 따라 예측 성능이 달라질 수 있으므로, 다양한 기법을 고려해 최적의 성능을 제공하는 모델을 선택하는 것이 중요하다.<sup>22)</sup> 따라서 실험계획의 결과를 바탕으로 11가지 메타모델링 기법을 사용하여 목적 함수와 제약 조건에 대한 함수 근사화를 진행하였다. 사용된 메타모델 기법들은 다음과 같다. 실험 데이터 포인트를 상관 함수를 통해 보간하여 예측하는 Kriging, 기저 함수를 선택해 신경망으로 근사 모델을 생성하는 RBF(Radial Basis Function), 다항식 형태를 설정한 후 최소자승법을 활용해 계수를 도출하는 PRG(Polynomial Regression), 여러 개의 결정 트리(Decision Tree)를 결합하여 예측 성능을 높이는 EDT(Ensemble of Decision Trees), 그리고 입력층과 출력층 사이에 최소 하나 이상의 은닉층을 가진 다층 퍼셉트론을 사용해 실험값과 예측값 간 오차를 줄이도록 학습하는 MLP(Multi-layer Perceptron) 기법이다.<sup>23-26)</sup> 이 기법들은 각각의 특성과 활용 방식이 달라 다양한 문제에 맞

Table 7 RMSE test results of metamodels

| Metamodel              | RMSE test value |               |                      |                 |              |
|------------------------|-----------------|---------------|----------------------|-----------------|--------------|
|                        | Torque          | Torque ripple | Line-to-Line voltage | Demagnetization | Efficiency   |
| PRG (Backward step)    | 0.2037097023    | 0.0072324294  | 0.2604679301         | 0.0868614791    | 0.1345678071 |
| PRG (Simple cubic)     | 0.2202951801    | 0.0063308537  | 0.2298976090         | 0.1077710944    | 0.0983955326 |
| PRG (Forward step)     | 0.09717034216   | 0.0065863944  | 0.2505100362         | 0.2005945959    | 0.0889887164 |
| PRG (Simple quadratic) | 0.3625845713    | 0.021177669   | 0.2165339107         | 0.1205580929    | 0.0925317512 |
| PRG (Full quadratic)   | 0.2634970880    | 0.0076064192  | 0.1536526489         | 0.07870122899   | 0.0970772298 |
| PRG (Linear)           | 0.3701261492    | 0.06481866    | 0.0411435188         | 0.2173080498    | 0.0286493367 |
| MLP                    | 0.3661020894    | 0.058100666   | 0.0699626326         | 0.0123734849    | 0.0286480590 |
| Kriging                | 0.09890677042   | 0.017991871   | 0.0526838538         | 0.1489927436    | 0.0449487775 |
| RBF (Regression)       | 0.197411244     | 0.012113086   | 0.2402461502         | 0.0598349272    | 0.6393507390 |
| RBF (Interpolation)    | 0.323414518     | 0.022671422   | 0.3032002130         | 0.1288042335    | 0.0449487775 |
| EDT (Hybrid)           | 0.09245805961   | 0.038349699   | 0.0813543619         | 0.1211756477    | 0.0552138522 |

Table 8 Optimization results

| Items            |                    | Unit                 | Initial model | Optimal model   |                | Relative error<br>[ % ] |       |
|------------------|--------------------|----------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------------|-------|
|                  |                    |                      |               | Predicted (HMA) | Verified (FEA) |                         |       |
| Design variables | X1 : Slot open     | mm                   | 3             | 0.6             |                | -                       |       |
|                  | X2 : Shoe width    | mm                   | 1.2           | 1.2             |                | -                       |       |
|                  | X3 : Slot width    | mm                   | 4.5           | 4.87            |                | -                       |       |
| Design results   | Objective function | Efficiency           | %             | 92.61           | 93.72          | 93.48                   | 0.26  |
|                  |                    | Torque ripple        | %             | 8.77            | 6.26           | 6.38                    | 1.92  |
|                  | Constraint         | Torque               | N · m         | 57.25           | 57.79          | 57.48                   | 0.54  |
|                  |                    | Line-to-Line voltage | V             | 48.12           | 48.91          | 46.92                   | 4.07  |
|                  |                    | Demag                | %             | 0.47            | 0.36           | 0.27                    | 23.40 |

게 적용되며 이러한 특징을 고려하여 RMSE test를 통하여 출력 변수별 정확도가 가장 높은 메타모델을 선정하였다. RMSE는 예측모델에서 예측한 값과 실제 값 사이의 평균차이를 측정하여 예측 모델의 정확도를 평가하는 방법으로 RMSE test 값이 0에 가까울수록 실제 모델과 메타모델 사이의 정확도가 높고 오차가 적다. Table 7에는 출력 변수별 RMSE test 값을 나타내었으며, 평균 토크는 EDT(Ensemble of Decision Trees), 토크 리플과 선간 전압은 PRG(Polynomial Regression), 역기전력 감소율과 효율은 MLP(Multi-layer Perceptron)로 선정되었다.

### 3.4 메타모델 기반의 최적 설계

HMA(Hybrid Metaheuristic Algorithm)는 전역 최적화 알고리즘으로 최적점을 도출하는 데 사용되었다. HMA 알고리즘은 다른 전역 최적화 알고리즘에 비해 rank-iMDDE(Improved constrained differential evolution)와 MCS(Modified Cuckoo Search)의 장점을 결합하여, 더 빠른 속도와 균형잡힌 탐색을 제공하고 탐색 공간을 보다 효과적으로 탐색하여 전역 최적해를 더 정확하게 도출할 수 있다.<sup>27)</sup> 최적 설계 프로그램인 PIAAnO(Process Integration, Automation and Optimization)를 통해 HMA기법으로 도출된 최적점을 도출하였다.

HMA 기법을 이용하여 최적 설계를 수행한 결과를 바탕으로 유한요소해석을 진행 한 결과 최적 설계 이전 모델에 비해 효율은 0.87 % 증가하였고 토크 리플은 2.39 % 감소하여 다목적 함수인 두 가지 함수의 최대화 및 최소화화를 이뤄냈으며 평균 토크는 0.23 N · m 증가하고, 선간 전압은 1.2 V, 감자율을 0.2 % 감소하여 모든 제약 조건을 만족함을 확인하였다.

최적 설계에서 도출된 최적점은 설계 변수 간의 수학적 모델을 기반으로 한 결과이므로, 실 주행환경에서의 작동 특성과 성능을 검증하기 위해 유한요소해석을 통해 설계의 신뢰성과 실효성을 확인해야 한다. 이를 위해

유한요소해석을 수행하였으며 감자율을 제외한 HMA 예상 결과값과 FEA 결과 간의 상대 오차율은 최대 4.07 %로 도출되었으며, 이를 통해 최적점에 대한 타당성을 검증하였다. 감자율의 경우 매우 작은 값을 가지고 있기에 이에 따라 오차율이 크게 나타남을 확인하였다.

### 3.5 고찰

Fig. 16은 초기 모델과 최적화 모델의 자속 선도를 나타낸다. 초기 모델에서는 Slot Open(X1)이 3 mm로 최적화 모델에 비해 넓어 고정자 치 주변에서 자속이 분산되

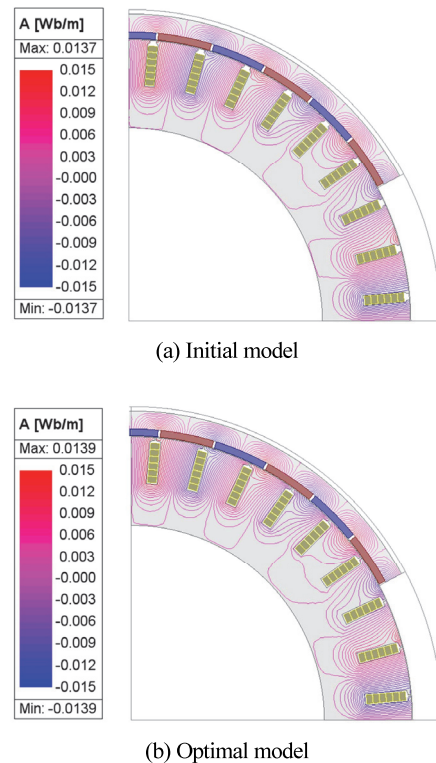


Fig. 16 Comparison of magnetic flux distribution (1/4 model)

며 누설 자속이 발생하는 경향을 보였다. 이에 따라 고정자 치 간의 자속 간섭이 증가하고, 자속 밀도의 불균형으로 인해 토크 리플이 유발될 가능성이 있었다.

반면, 최적화된 모델에서는 Slot Open(X1)이 0.6 mm로 감소함에 따라 자속이 고정자 치와 영구자석 사이를 보다 집중적으로 통과하게 되었고, 자속의 경로가 정돈되어 누설 자속이 현저히 줄어들었다. 또한, Slot Width(X3)가 4.5 mm에서 4.87 mm로 증가하면서 자속 분포가 더욱 균일해져 자속 밀도의 급격한 변동이 완화되었다. 이러한 변화는 고정자와 로터 간의 자기적 결합을 향상시키고, 평균 토크의 증가 및 토크 리플의 감소에 기여했을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 전기자동차 구동용 전동기의 효율 개선 및 토크 리플 저감을 위해 메타모델 기반 최적 설계를 통해 헤어핀 권선을 적용한 외전형 영구자석 동기전동기의 고정자 형상 최적화를 수행하였다.

- 1) 전기자동차 구동용 전동기로 사용하기 위한 선간 전압, 최고 온도, 감자율 등 제약 조건의 부합 여부를 확인하기 위해 전자기장 해석, 강성 해석, 열 해석, 감자 해석 등의 다중 물리 특성 해석을 진행하였다.
- 2) 소요 시간과 비용을 단축하기 위해 메타모델링 기법을 사용하였고, 메타모델의 신뢰성을 확보하기 위해 출력 변수별 11가지 메타모델을 생성하여 RMSE test를 통해 정확도가 가장 높은 메타모델을 생성하였다.
- 3) 선정된 메타모델에 전역 최적화 알고리즘을 적용하여 최적 설계를 진행하였고, 목적 함수를 만족하는 최적해를 도출하였다.

연구 결과, 본 연구에서 제안한 메타모델 기반 최적 설계 기법이 헤어핀 권선을 적용한 영구자석 동기전동기의 효율 향상 및 토크 리플 저감에 유용함을 알 수 있었다. 하지만 본 논문에 적용된 메타모델링 기반 최적화 기법은 초기 실험 설계(DOE)에 대한 의존성이 높아 샘플링 품질이 낮을 경우 최적해 탐색 실패 가능성이 있으며 고차원 설계 공간에서는 예측 정확도 저하와 학습 시간 증가 문제가 발생할 수 있다. 또한 설계 공간 외삽이 발생할 경우 일반화 성능이 떨어질 우려가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 향후 연구에서는 Expected improvement와 같은 Adaptive sampling과 Active learning 기반 실시간 데이터 리파인먼트를 통해 초기 데이터 품질을 향상시키고, Autoencoder와 같은 차원 축소 메타모델링 및 앙상블 불확실성 기반 최적화를 통해 예측 성능과 외삽 안정성을 강화할 계획이다.

#### 후 기

이 논문은 전남대학교 학술연구과제(2023-0485-01)와 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(RS-2021-NR066319)의 지원으로 수행된 연구임.

#### References

- 1) S. R. Jeon, B. Y. Jeong, D. H. Kim, Y. H. Park, G. H. Do, M. S. Kang, D. S. Kang, D. J. Kang and K. S. Kim, "Study on Simulation Methods for Evaluating Electric Vehicle Range," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers Conference, pp.545–545, 2023.
- 2) J. H. Kim, D. M. Kim, H. J. Park, J. P. Hong, K. S. Choi, H. S. Yang and K. S. Cho, "Optimum Design for Efficiency of Ultra-high-speed Permanent Magnet Synchronous Motor for Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle," KSAE Spring Conference, pp.1248–1251, 2019.
- 3) J. H. Park, J. H. Han, E. J. Choi and S. K. Hong, "Study on Improving Hysteresis Motor Efficiency by Over-Excitation Based on Finite Element Analysis," Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.74, No.1, pp.49–55, 2025.
- 4) J. W. Kang, J. S. Kim and R. E. Kim, "Load Characteristics Analysis and Efficiency Improvement Design of Motor for Twisted String Actuator," Korean Society of Mechanical Engineers Conference, pp.319–320, 2024.
- 5) K. O. Kim, D. K. Kim, J. C. Park, S. W. Hwang and M. S. Lim, "Efficiency Analysis according to the Shape of the Rectangular Wire of a Hybrid Vehicle Traction Motor Considering AC Resistance Effect," KSAE Conference, pp.880–883, 2020.
- 6) D. S. Jung, J. H. Song, Y. H. Kim and H. D. Lee, "Optimize Design of the Traction Motor Using the Hairpin Winding," KSAE Spring Conference, Gyeongju, 2012.
- 7) Y. T. Kim, G. W. Cho, J. Y. Ma and M. K. Song, "Design to Improve Driving Characteristics According to the Shape and Permanent Magnet Design Variables of SPMSM," Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp.80–82, 2022.
- 8) D. Y. Shin, S. W. Song, S. W. Lee, G. S. Kim and W. H. Kim, "Study on Rotor Optimal Design to Reduce Cogging Torque and Torque Ripple of IPMSM Spoke-Type BLDC Motor," Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp.226–227, 2021.

- 9) S. B. Bae, T. H. Ji, N. H. Kim and S. Y. Jung, "Study on Design of Stator Shape for Torque Ripple Reduction of Outer Rotor SPMSM," Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp.198–199, 2022.
- 10) K. Y. Hwang, S. B. Rhee and B. I. Kwon, "Hybrid Method for Design of IPM Type BLDC Motor to Reduce Cogging Torque," Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp.74–76, 2007.
- 11) S. Lim, N. S. Choi, N. K. Kim and D. H. Kim, "Optimization of BLDC Motor to Minimize Cogging Torque Using Response Surface Method and Evolutionary Algorithm," Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp.213–215, 2010.
- 12) S. E. Kim, D. H. Kim, G. H. Lee, Y. J. Yang and Y. M. You, "Optimization of a Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Metamodels," Journal of Next-generation Convergence Technology Association, Vol.7, No.10, pp.1614–1625, 2023.
- 13) K. Deepak, M. A. Frikha, Y. Benomar, M. El Baghdadi and O. Hegazy, "In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges and Future Trends," Energies, Vol.16, No.7, Paper No.3121, 2023.
- 14) J. N. Bae, W. H. Kim and S. G. Lee, Permanent Magnet Motor Design with Basic Theory, Bokdu Publishing Co., Seoul, South Korea, 2022.
- 15) K. T. Chau, Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application, 1st ed., Wiley-IEEE, Hoboken, NJ, USA, 2015.
- 16) K. W. Kim, J. C. Park, J. Y. Ryu and M. S. Lim, "Rotor Shape Optimum Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Efficiency and Demagnetization Characteristics," KIEE Fall Conference Proceedings, pp.183–185, 2021.
- 17) S. H. Lim, S. J. Min and J. P. Hong, "High Efficiency IPM Motor Design Considering the Losses and the Demagnetization Effect," Korean Society of Mechanical Engineers Conference, pp.1674–1676, 2013.
- 18) Y. M. You and K. Y. Yoon, "Multi-objective Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Considering Demagnetization," Applied Sciences, Vol.11, No.5, Paper No.2159, 2021.
- 19) Y. M. You, "Optimal Design of PMSM Based on Automated Finite Element Analysis and Metamodeling," Energies, Vol.12, No.24, Paper No.4673, 2019.
- 20) K. Zhang, X. Jiang, Y. Wu, L. Zhang and X. Wu, "Effect of Slot Shape in Rotor of Electrical Motor with High-speed Spindle on Slot Ripples," Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control, Okayama, Japan, pp.670–675, 2010.
- 21) M. Hwang, H. S. Lee and H. R. Cha, "Analysis of Torque Ripple and Cogging Torque Reduction in Electric Vehicle Traction Platform Applying Rotor Notched Design," Energies, Vol.11, No.11, Paper No.3053, 2018.
- 22) PIDOTECH Inc., PIA<sub>n</sub>O User's Manuals and Tutorials, PIDOTECH Inc., Seoul, South Korea, 2019.
- 23) L. Lebensztajn, C. A. R. Marretto, M. C. Costa and J. L. Coulomb, "Kriging: A Useful Tool for Electromagnetic Device Optimization," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.40, No.2, pp.1196–1199, 2004.
- 24) B. Mulgrew, "Applying Radial Basis Functions," IEEE Signal Processing Magazine, Vol.13, No.2, pp.50–65, 1996.
- 25) S. Bal and R. R., "Prediction of Heat Transfer Performance Using Polynomial Regression," 2022 Second International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy (ICAIS), pp.1735–1740, 2022.
- 26) D. H. Wang, J. H. Lee, S. J. Kim, M. C. Kim and I. S. Lee, "Fault Diagnosis of Induction Motor Using an Ensemble Method of Decision Tree and Multilayer Neural Network," The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol.20, No.3, pp.47–55, 2022.
- 27) K. B. Park, An Efficient Hybrid Metaheuristic Algorithm for Solving Constrained Global Optimization Problems, Ph. D. Dissertation, Hanyang University, Seoul, South Korea, 2016.