

# 회전자 강성을 고려한 자동차 브레이크용 자속집중형 동기전동기의 효율 개선

이 재 응 · 정 영 훈 · 홍 정 표

한양대학교 미래자동차공학과

## Efficiency Improvement Design of Concentrated Flux Type Synchronous Motor for Brake Considering Stiffness

Jae-Ung Lee · Young-Hoon Jung · Jung-Pyo Hong

*Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea*

**Abstract** : Recently, as electrification of vehicle components is done by vehicle companies, motors of automotive have become more important. Currently, electric motors used in automotive parts use rare earth magnets because of their limited power density and size. Non-rare earth magnet motors should be studied since the price of rare earth magnets can change rapidly in accordance with international circumstances. This paper presents the process of efficiency improvement considering stiffness stability of the rotor structure for Concentrated Flux type Synchronous Motor(CFSM).

**Key words** : Concentrated flux type synchronous motor(자속집중형 동기전동기), Efficiency(효율), Leakage bypass(누설 자속 통로), Stiffness(강성)

### Nomenclature

*LB* : Leakage bypass

### 1. 서 론

최근 환경규제가 심화됨에 따라 국제 자동차 시장은 구동 시스템 뿐만 아니라 EPS(Electric Power Steering), ABS(Anti-lock Brake System), ESC(Electronic Stability Control) 등 자동차 샤시 보조 시스템 또한 전기-기계 시스템으로 전장화 되어 가고 있다. 더불어 자동차 부품에서 중요한 부품인 전동기의 수요가 크게 증가하고 있다.

현재 희토류 영구자석의 가격은 감소하고 있는 추세이지만 유한한 광물의 특성상 과거의 희토류 과잉 때처럼 수급이 어려워지는 상황이 발생할 가능성이 있다. 그렇기 때문에 희토류 영구자석을 페라이트 자석으로 대체하기 위한 연구가 많이 진행

---

\* 이 재 응, E-mail: leejea54@hanyang.ac.kr

되고 있다. 페라이트 자석은 희토류 자석에 비해 잔류자속밀도의 크기가 1/3밖에 되지 않기 때문에 희토류 영구자석을 사용한 전동기와 비슷한 성능을 갖기 위해서는 자석 사용량을 늘려야 하고 그림 1과 같은 자속집중형 동기전동기 구조를 적용한다. 이때 그림 1과 같이 자속집중형 동기전동기를 설계하게 되면 필수적으로 Leakage bypass와 자석을 지지하는 회전자 tip이 필요하게 되는데 이 구조들로 인해 누설 자속이 발생해 출력 저하를 유발한다. 누설 자속량을 감소시키기 위해 두께를 최대한 얇게 가져가야 하지만 전동기 회전 시 Leakage bypass와 회전자 tip의 기계적 특성이 문제가 될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 기존에 사용되는 자속집중형 브레이크용 비희토류 전동기를 대상으로 실험 계획법과 분산 분석을 통해 회전 시 회전자의 강성에 큰 영향을 미치는 인자와 효율에 큰 영향을 미치는 인자를 선별하여 기계적 안정성을 만족하면서 효율을 개선한다.

## 2. 초기 모델

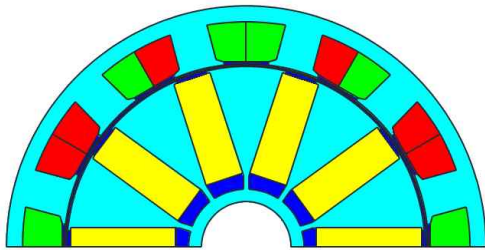


Fig. 1 자속집중형 전동기 기본 모델 형상

Table 1 자속집중형 전동기 기본 모델 사양

| Parameter               | Unit | Value    |
|-------------------------|------|----------|
| Pole/Slot               |      | 10/12    |
| Airgap                  | mm   | Over 0.5 |
| Base Speed              | rpm  | 3,300    |
| Target Torque @3,300rpm | Nm   | 1.5      |
| Maximum Speed           | rpm  | 7,000    |
| Efficiency @3,300rpm    | %    | 92.8     |

## 3. 개선 방안

강성 해석을 통해 회전 시 기계적으로 큰 응력이 작용하는 회전자 부분의 형상 치수를 변수로 설정한 실험계획법과 분산 분석을 통해 회전자 강성과

효율에 주요한 영향을 미치는 변수를 확인하고 경향성을 파악하여 기계적 강성에 대해 안정성을 가지면서 효율이 개선되는 방향을 제시한다.

Table 2 철심 물성치

| 철심 재질   | Density(kg/m <sup>3</sup> ) | Yield Strength(MPa) |
|---------|-----------------------------|---------------------|
| 50PN470 | 7,600                       | 275                 |

본 논문에서 기계적인 안정성은 안전계수를 1.5로 했을 때 항복강도를 넘지 않는 것, 즉 작용하는 응력의 크기가 183MPa를 넘지 않는 것을 기준으로 한다.

### 3.1 실험 계획법

#### 3.1.1 변수 선정

자속집중형 전동기 기본 모델에 대해 Maximum Speed인 7,000rpm에서 회전자의 각 요소에 작용하는 응력을 살펴보면 Fig. 4에서 알 수 있듯이 회전자 철심의 tip 부분과 Leakage bypass 부분에 큰 응력이 작용하는 것을 알 수 있다.

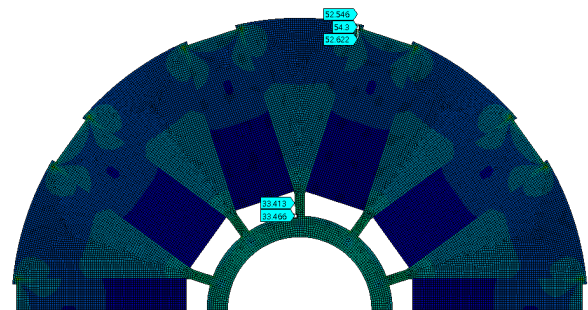


Fig. 2 자속집중형 전동기 기본 모델 회전자 응력 분포

따라서 회전자의 강성을 고려하면서 전동기의 효율을 개선하기 위해 설계 변수로 Leakage bypass 두께, 회전자 tip 길이, PM 두께, 요크 두께를 선정하였다.

#### 3.1.2 직교배열표

직교배열표를 통해 각 변수의 변화에 따른 모든

경우가 아닌 적은 횟수의 해석을 통해 각 설계 변수의 영향력을 파악할 수 있다. 본 논문에서는 회전자의 Leakage bypass 두께, 회전자 tip 길이, PM 두께, 요크 두께의 4개 변수에 따른 기계적 강성과 효율을 확인하기 위해 4변수, 3수준의 직교배열표 Table 4를 이용하였다. 실제로 4개 변수에 의한 3수준의 변화에 따른 경우들을 살펴보려면 최소  $3^4=81$  가지 경우의 해석을 해야 하지만 Table 4에서 볼 수 있듯이 18가지 경우의 해석을 통해 기계적 강성과 효율에 영향을 미치는 주요 설계 변수를 확인할 수 있다. 그렇기 때문에 해석 시간도 단축시킬 수 있다.

Table 4는 4변수 3수준의 직교배열 표를 나타낸 것이다. 앞서 언급한 4가지의 설계 변수의 범위는 Table 4에 나타났다. 표에서 볼 수 있듯이 각 변수들은 0, 1, 2 세 개의 수준으로 설계 범위가 나누었다.

Table 3 Orthogonal array table-4 variables, 3 levels

|        | X1 | X2 | X3 | X4 |
|--------|----|----|----|----|
| CASE1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| CASE2  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| CASE3  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| CASE4  | 0  | 0  | 1  | 2  |
| CASE5  | 1  | 1  | 2  | 0  |
| CASE6  | 2  | 2  | 0  | 1  |
| CASE7  | 0  | 1  | 0  | 2  |
| CASE8  | 1  | 2  | 1  | 0  |
| CASE9  | 2  | 0  | 2  | 1  |
| CASE10 | 0  | 2  | 2  | 0  |
| CASE11 | 1  | 0  | 0  | 1  |
| CASE12 | 2  | 1  | 1  | 2  |
| CASE13 | 0  | 1  | 2  | 1  |
| CASE14 | 1  | 2  | 0  | 2  |
| CASE15 | 2  | 0  | 1  | 0  |
| CASE16 | 0  | 2  | 1  | 1  |
| CASE17 | 1  | 0  | 2  | 2  |
| CASE18 | 2  | 1  | 0  | 0  |

Table 4 Design range for DOE

| 설계 변수           | 0   | 1   | 2   |
|-----------------|-----|-----|-----|
| LB 두께(X1)[mm]   | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| tip 길이 (X2)[mm] | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| PM 두께 (X3)[mm]  | 5.5 | 6   | 6.5 |
| 요크 두께 (X4)[mm]  | 1   | 2   | 3   |

### 3.2 분산 분석 결과

앞서 말했던 직교배열표를 이용한 실험계획법을 통해 기계적으로 작용하는 최대 응력, 효율에 미치는 4가지 변수(LB 두께, 회전자 tip의 길이, 자석 두께, 요크 두께)의 영향 정도를 Table 5의 유의수준(p-value)을 통해 확인하였다. 유의수준(p-value)은 0.1보다 작을 때 설계 변수의 영향이 유효하다고 보겠다. Fig 3는 각 변수에 대해 효율과 기계적으로 작용하는 응력이 얼마나 영향을 받는지를 나타낸다.

Table 5.1 p-value of Efficiency thorough design parameters

| 설계 변수       | p-value |
|-------------|---------|
| LB 두께(X1)   | 0.0928  |
| tip 길이 (X2) | 0.1718  |
| PM 두께 (X3)  | 0.0019  |
| 요크 두께 (X4)  | 0.9196  |

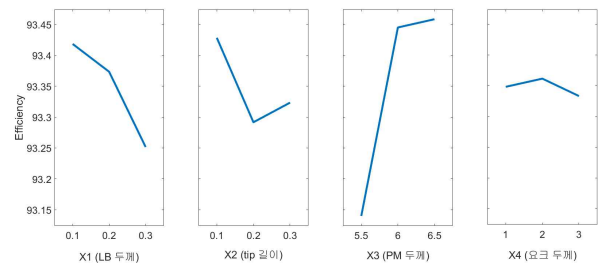


Fig. 3.1 각 변수에 따른 자속집중형 전동기 효율

Table 5.2 p-value of Maximum stress on rotor of CFMS thorough design parameters

| 설계 변수       | p-value |
|-------------|---------|
| LB 두께(X1)   | 0.0001  |
| tip 길이 (X2) | 0.0430  |
| PM 두께 (X3)  | 0.4520  |
| 요크 두께 (X4)  | 0.9530  |

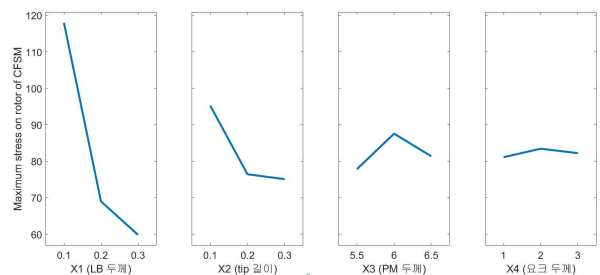


Fig. 3.2 각 변수에 따른 CFMS 회전자 최대 응력

Table 5.1과 Figure 3.1을 통해 자속집중형 전동기의 효율에 영향을 미치는 주요 변수로는 LB 두께와 PM 두께 임을 알 수 있고, Table 5.2와 Figure 3.2를 통해 회전자에 작용하는 최대 응력 크기에 영향을 미치는 주요 변수로는 LB 두께와 tip 길이임을 알 수 있다. 4번째 변수인 요크의 두께는 자속집중형 전동기의 효율과 최대 응력에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있고 결과적으로 LB 두께가 효율과 기계적 응력에 모두 영향을 미치게 되며 LB 두께가 감소함에 따라 효율은 증가하지만 기계적으로 작용하는 응력의 크기는 증가함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

3.2의 분산분석 결과를 통해 제시된 브레이크용 자속집중형 동기전동기 모델의 기계적 안정성을 가지면서 효율을 개선하기 위해서는 앞서 말했듯이 안전계수를 고려한 회전자의 최대 응력이 철심의 항복강도를 넘지 않는 범위에서 LB 두께를 감소시키는 방향임을 알 수 있다.

따라서 본 논문의 결론으로 기본 모델의 LB 두께 0.9mm를 0.1mm까지 감소시켜 Base speed 3,300rpm에서의 효율과 최대 속도 7,000rpm에서의 회전자 tip과 LB에 작용하는 기계적 응력을 비교하였다.

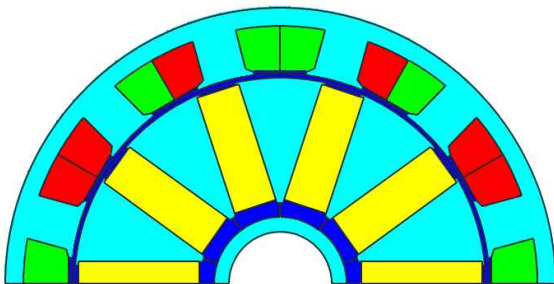


Fig. 4 개선 모델 형상

Table 6 기본 모델 및 개선 모델 효율 및 최대 응력 비교

| 모델    | Efficiency(%)<br>@3,300rpm | tip 응력(MPa)<br>@7,000rpm | Leakage bypass<br>응력(MPa)<br>@7,000rpm |
|-------|----------------------------|--------------------------|--|
| 기본 모델 | 92.8                       | 54.546                   | 32.962                                 |
| 개선 모델 | 93.45                      | 82.265                   | 132.75                                 |

Table 6에서 알 수 있듯이 LB 두께를 감소시켰을 때

안전 계수 1.5를 적용하였음에도 철심의 항복강도를 넘지 않으므로 강성 측면에서 안정하다는 것을 확인할 수 있으며, 자속집중형 전동기의 효율이 개선된 것을 확인할 수 있다.

#### References

- 1) 이종석, 정경태, 정재식, 임명섭, 홍정표, “전동식 브레이크용 자속집중형 전동기의 원가 절감 설계” 2016년 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 1240-1244 (5 pages), 2016.11,
- 2) Tae-Yun Kim, Myung-Hwan Yoon, Jung-Pyo Hong, “Shape Design of Concentrated-Flux-Type BLDC motor for Reducing Torque Ripple”, The Korean Society of Automotive Engineers, 1002-1006, 2015
- 3) Myung-hwan Yoon, Kyu-seob Kim, Jung-Pyo Hong, “Structural Stability Analysis of Non-Magnetic Material Region of Concentrated Flux Type Motor for Electric Vehicle”, The Korean Society of Automotive Engineers, 1294-1295, 2013
- 4) Kyu-Seob Kim, Jae-Woo Jung, Jung-Pyo Hong, Ki-Nam Kim, “Characteristic Analysis of Concentrated Flux type Motor using Ferrite Magnet”, Korea Institute of Electrical Engineers, 516-517, 2012