

브레이크용 모터의 축 방향 하중에 따른 기계적 손실을 고려한 특성 분석

원 태 준 · 정 재 식 · 박 현 진 · 홍 정 표*

한양대학교 미래자동차공학과

Characteristic Analysis of Brake Motor Considering Mechanical Loss according to Rotor Axial Load

Tae-Juu Weon · Jae-Sik Jung · Hyun-Jin Park · Jung-Pyo Hong*

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

Abstract : This paper presents characteristic analysis of surface permanent magnet synchronous motor(SPMSM) considering mechanical loss according to rotor axial load by oil pressure in brake system. If rotor is forced in axial direction, mechanical loss increases. Mechanical loss is one of major components which affect on efficiency. To consider mechanical loss, no load loss is measured at axial load condition. Mechanical loss is calculated by subtracting core loss from no load loss. Mechanical loss is increased as rotor axis is forced and rotates more quickly. Motor characteristic comparison between model with axial load and model without axial load is done. In case of model with axial load, motor performance decreases compared to model without axial load. In conclusion, Mechanical loss by axial load reduces torque and efficiency in high speed region.

Key words : Axial load(축 방향 하중), Loss measurement(손실 측정), Mechanical loss(기계적 손실), Motor characteristic(모터 특성), No load loss(무부하 손실)

Nomenclature

W : loss, W
 f : frequency, Hz
 B : magnetic flux density, T
 M : bearing friction moment
 ω : angular speed, rad/sec
 μ : friction constant

Subscripts

b : hysteresis loss
 e : eddy current loss
 o : abnormal loss
L, S : load, speed

1. 서론

자동차의 주요한 부품들이 전장화되면서 자동차 내부에 장착되는 모터의 수가 증가 하였다. 자동차 내부의 어플리케이션에 따라 구동 환경과 요구 사양이 다르기 때문에 설계 과정에서 다양한 환경과 구동 조건을 반영해야 한다.

자동차 내부 어플리케이션 중에서 전장화된 브레이크 시스템의 액추에이터로 설계된 모터는 회전자가 회전하면서 피스톤을 밀어내는 구조를 가지고

* 원태준, E-mail: genius8550@hanyang.ac.kr

있다. 브레이크 모터가 구동함에 따라 피스톤 내의 유압이 증가하면 반대로 모터의 축에 전달하는 하중이 증가하게 된다. 축 방향 하중의 증가에 따라서 모터에서 발생하는 기계적 손실이 변하게 된다. 모터는 기계적 손실이 커질수록 성능이 떨어지기 때문에, 모터 구동 시 축 방향 하중에 따른 기계적 손실을 예측해야 한다.

본 논문에서는 모터에 축 방향 하중이 인가될 때, 무부하 상태에서의 기계적 손실 변화를 측정하고 그 경향을 확인하였다. 또한 실제 모터 구동 시 내부에서 증가하는 축 방향 하중의 변화에 따른 기계적 손실을 반영하여 모터 특성을 분석하였다.

2. 기계적 손실

외부 구동 시 측정된 무부하 기계적 손실과 부하 상태의 기계적 손실은 동일하다고 가정하였다. 특성 분석 시에는 무부하 기계손을 반영하였다.

먼저 무부하 손실을 시험을 통해 측정하였다. 무부하 손실은 식 (1) 과 같이 무부하 철손과 무부하 기계손으로 구성된다. 무부하 철손은 외부 구동 시 영구자석의 회전으로 인해 발생하는 쇄교 자속의 시변에 의한 철심에서의 철손을 의미한다. 무부하 기계손은 외부 구동 시 베어링에서 발생하는 손실, 풍손 등을 포함하는 손실이다.

$$W_{no\ load} = W_{no\ load\ core} + W_{no\ load\ mechanical} \quad (1)$$

2.1 무부하 손실 측정

무부하 손실을 측정하기 위해서 Fig. 1과 같은 시험세트를 구성하였다.¹⁾

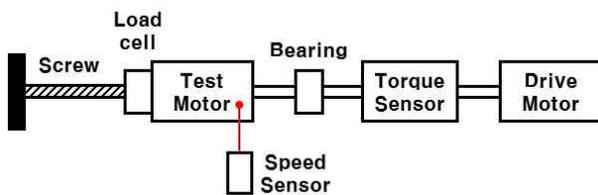


Fig. 1 No load loss test setting

시험 세트는 무부하 시험 세트와 축 방향 하중 인가부로 구분된다. 무부하 시험 세트는 테스트 모터

와 외부 구동 모터, 센서로 구성된다. 무부하 손실은 외부 구동 모터로 구동 시, 토크 센서와 스피드 센서에서 측정된 토크와 속도를 곱한 값으로 계산된다. 축 방향 하중 인가부(좌측)의 스크류를 회전시켜 회전자에 축 방향 하중을 인가하고 로드셀은 인가되는 하중의 크기를 측정한다. 따라서 회전자에 인가되는 하중에 따른 무부하 손실을 측정할 수 있다. 이때 축 방향 하중이 토크 센서가 연결된 축으로 전달되면 장비 파손의 우려가 있다. 따라서 테스트 모터 축을 토크 센서와 커플링을 통해 연결하기에 앞서 베어링을 통해 축 방향 하중의 전달을 차단하였다.

2.2 무부하 손실 측정 결과

Fig. 2는 무부하 손실 측정 결과를 per unit으로 축 방향 하중과 회전 속도에 따라서 나타낸 손실 맵이다.

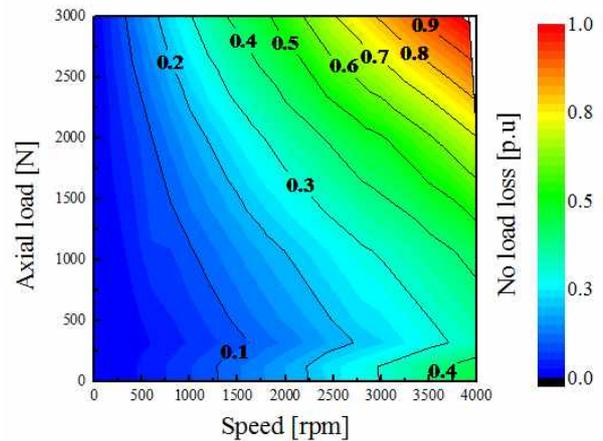


Fig. 2 No load loss test result (per unit)

2.3 무부하 기계손 계산

2.3.1 무부하 철손 해석

무부하 손실에서 무부하 기계손을 계산하기 위해서 무부하 철손을 측정값에서 빼야 한다.

무부하 철손은 2D-FEA(Finite Element Analysis)를 통해 산출한다. 무부하 철손을 산출하기 위해서 테스트 모터의 철심 재질과 해당 재질의 주파수와 자속밀도에 따른 철손 데이터가 필요하다.

$$W_i = k_b f B^2 + k_e f^2 B^2 + k_o f^{1.5} B^2 \quad (2)$$

철손은 식 (2)의 Steinmetz's equation에 따라서 축 방향 하중과 무관하고 회전 속도와 관련이 있다.²⁾ Fig. 3은 회전 속도에 따른 무부하 철손이다.

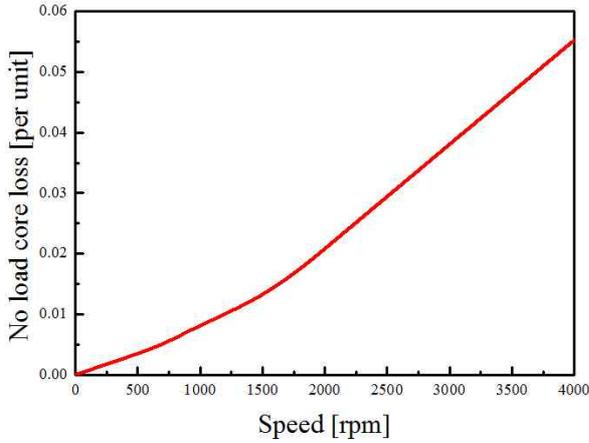


Fig. 3 No load core loss 2D-FEA result (per unit)

2.3.2 무부하 기계손 계산

Fig. 2의 무부하 손실 맵에서 Fig. 3의 무부하 철손 값을 빼면 무부하 기계손 맵을 산출할 수 있다. Fig. 4는 산출된 무부하 기계손 맵이다.

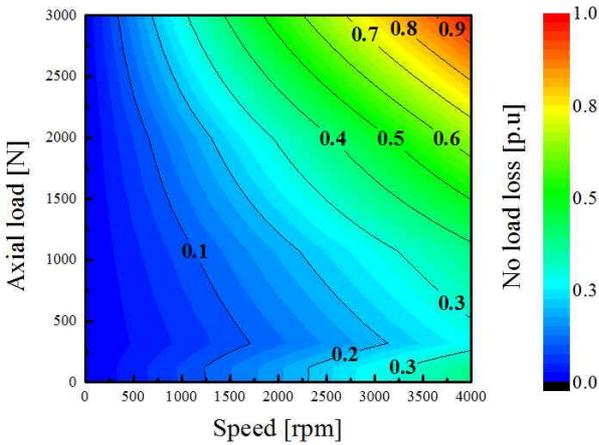


Fig. 4 No load mechanical loss map (per unit)

Fig. 5는 Fig. 4의 무부하 기계손 맵에서 회전 속도가 1000rpm인 경우의 무부하 기계손 그래프이다. 무부하 하중이 작용하기 시작할 때는 무부하 기계손이 감소하다가 축 방향 하중이 400N인 지점부터 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned}
 W_{bearing} &= (M_L + M_S)\omega \\
 &= (\mu k_L F_a + k_S)\omega
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

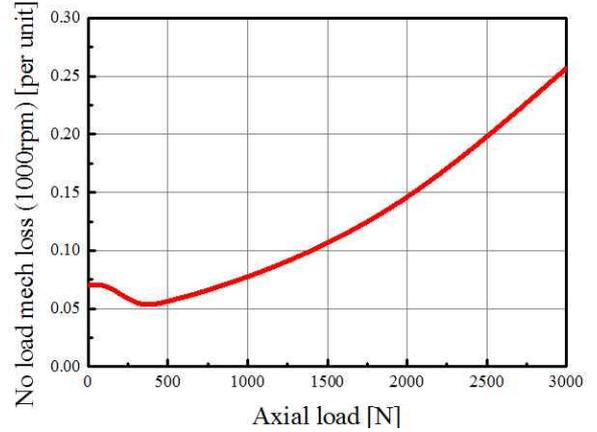


Fig. 5 No load mechanical loss at 1000rpm (per unit)

식 (3)은 베어링에서 발생하는 손실이다.³⁾ 베어링 손실은 축 방향 하중과 회전 속도에 따라 증가하고 있기 때문에, Fig. 5와 같은 경향을 내고 있음을 식 (3)을 통해 알 수 있다. 400N 지점 이전에서 기계적 손실이 감소하는 것은 비교적 작은 크기의 축 방향 하중이 인가될 때, 시험 세트의 커플링 등에서 발생하는 기계적 손실이 반대로 줄어들기 때문이다.

3. 기계적 손실을 반영한 특성 분석

Fig. 4의 기계손 맵에 따라서 3200rpm에서 구동되는 경우, 축 방향 하중이 증가함에 따라서 약 2.5배 만큼 기계적 손실이 증가하게 된다. 따라서 기계손의 증가분을 무시하고 특성을 해석하는 경우에 실제 구동 시험과 큰 차이가 발생할 것으로 예상된다.

3.1 특성 해석 결과 비교

먼저 기계적 손실의 증가를 반영하지 않은 경우의 특성 해석을 진행하였다.

Fig. 6은 축 방향 하중에 따른 추가적인 기계손 증가분을 반영하지 않은 모터의 특성 해석 결과이다. Fig. 7은 축 방향 하중에 따른 추가적인 기계손 증가분을 반영한 모터의 특성 해석 결과이다. 기계적 손실을 반영할 때, 회전자 축의 위치에 따른 축 방향 하중은 같다고 가정하였다.

두 가지 특성 해석 결과는 출력과 효율에서 차이가 발생하였다. 출력의 경우, 속도가 증가함에 따라

서 큰 폭으로 감소하였다. 효율의 경우, 속도가 증가함에 따라서 감소하였다.

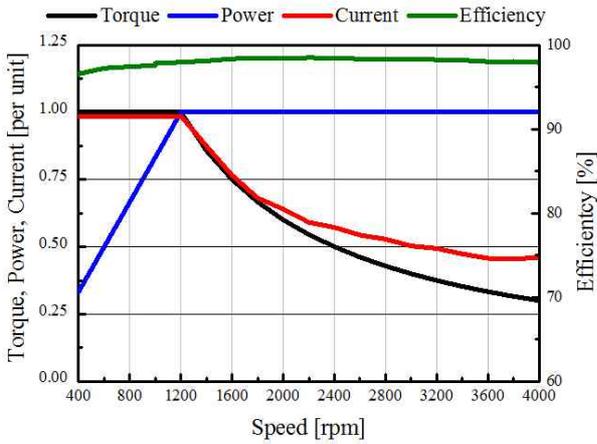


Fig. 6 Characteristic analysis result without axial load

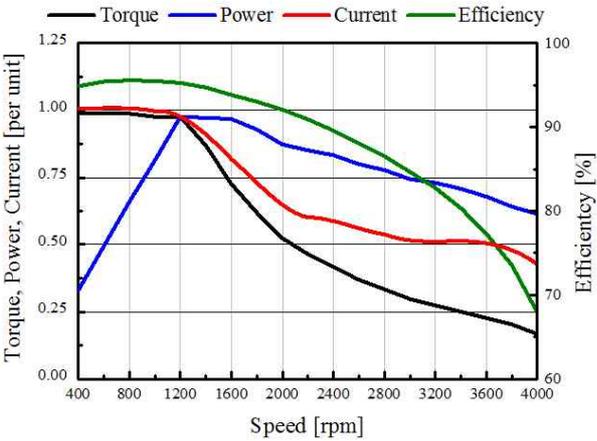


Fig. 7 Characteristic analysis result with axial load

3.2 효율맵 비교

Fig. 8은 축 방향 하중에 따른 추가적인 기계손 증가분을 반영하지 않은 모터의 효율맵이다. Fig. 9는 축 방향 하중에 따른 추가적인 기계손 증가분을 반영한 모터의 효율맵이다.⁴⁾

두 가지 효율맵은 값의 큰 차이를 나타내고 있다. 기계손 증가를 반영한 경우, 저속도에서 10% 효율 차이가 발생하였다. 저토크 구간에서는 효율의 차이가 최대 50% 발생하였다. 따라서 축 방향 하중에 따른 기계적 손실을 반영하는 경우에 효율이 큰 폭으로 감소함을 알 수 있다.

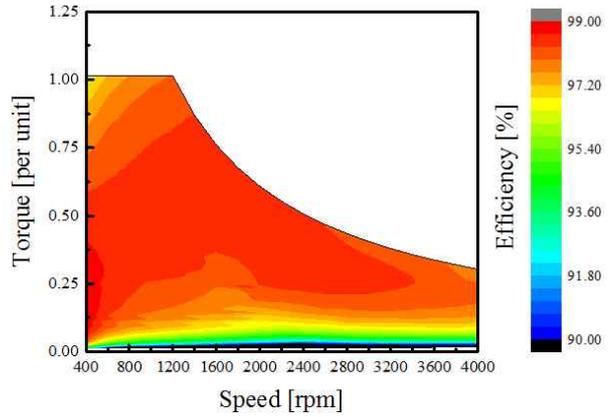


Fig. 8 Efficiency map without axial load

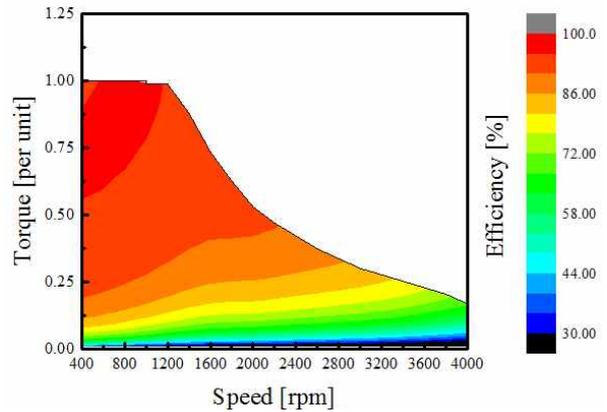


Fig. 9 Efficiency map with axial load

4. 결론

본 논문에서는 축 방향 하중이 인가되는 모터의 무부하 손실을 시험을 통하여 측정하고, 하중에 따른 기계적 손실 변화를 고려하여 모터의 특성을 비교하였다. 본 논문을 통해 세 가지 결론을 도출하였다.

- 1) 모터 구동환경에 따라, 축 방향으로 하중이 가해질 수 있으며, 이에 대한 영향을 예측하여 설계 및 해석에 반영해야 한다. 본 논문에서는 축 방향 하중에 대한 모터의 손실 변화를 측정하는 시험을 수행하였다. 따라서 하중과 회전 속도에 따라서 모터의 손실 변화를 예측할 수 있다.
- 2) 시험을 통하여 축 방향 하중이 가해지는 경우, 기계적 손실이 증가하는 현상을 확인하였다. 기계적 손실은 축 방향 하중이 클수록, 모터의 회전 속도가 클수록 증가하였다.
- 3) 모터에 축 방향 하중이 가해질 때 발생하는 기계적 손실 증가를 반영하여 특성 해석을 진행하였

다. 그 결과, 고속 구간에서 모터의 출력과 효율이 큰 폭으로 감소하였다.

References

- 1) Sung-Il Kim, Geun-Ho Lee, Chang-Ha Lee and Jung-Pyo Hong, "Design and Experimental Verification of an Interior Permanent Magnet Motor for High-speed Machines", The transactions of the KIEE, 59(2), 306-310, 2010
- 2) Su-Jin Lee, Sung-Il Kim, Soon-O Kwon, Jae-Woo Jung and Jung-Pyo Hong, "Reduction Design of Core Loss in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", KIEE Summer Conference, 760-761, 2008
- 3) Pyung Hwang and James Kuria, "Estimation of Bearing Frictional Losses of Electric Vehicle Motor System", KTS Fall Conference, 75-76, 2010
- 4) Jin-Cheol Park, Kyoung-Soo Cha, Seung-Hee Chai and Jung-Pyo Hong, "Efficiency Improvement through Maximum Efficiency Control in WFSM for EV", KSAE Fall Conference, 1197-1201, 2015