

## EPS용 BLDC 전동기의 최적 설계 및 성능 특성 해석

김병국, 황동원, 조원영, 정군석\*, 조윤현  
동아대학교, \*한라이비텍

### Optimum Design and Performance Characteristics Analysis of BLDC Motors for EPS

Byong Kuk Kim, Dong Won Hwang, Won Yung Jo, Gun Seok Jung\*, Yun Hyun Cho  
Dong-A University, \*Halla E. B. Tech.

**Abstract** – This paper describes the optimal design and performance characteristics of the BLDC Motor for Electrical Power Steering System. To develop the optimal dimension within a given volume, BLDC Motor with the low cogging torque is designed and analyzed by FEM analysis. The prototype BLDC Motor has 4 poles rotor and 24 slots stator. To estimate the prototype machine, this paper gives the comparison between the FEM results and the experiment ones.

끼지 않도록 정밀한 제어 및 토크 리플을 최소화 하는 기술이 필요하다. 차량의 경우 입력 전압이 DC12V로 상용하는 출력에서 대 전류로 구동되므로 설계시 냉각리 용량을 충분히 감안하여야 한다.

그림 1은 설계 제원을 바탕으로 본 연구의 유한요소해석 결과에 따른 BLDC 전동기의 실제 제품의 외형을 나타낸 것이다.

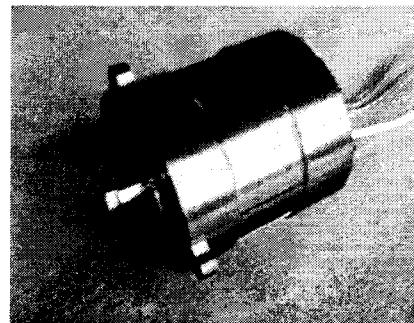


그림 1. BLDC 전동기 제작품

차량 운전시 운전자에게 가장 적합한 조향력은 주행 조건에 따라 변화하여 정지 상태(공회전)나 저속주행 중에는 가벼운 조향력이 요구되고 고속영역에서는 안정성을 얻을 수 있는 적당히 무거운 조향력이 요구된다. 기존의 PS(Power-Steering) 시스템은 엔진에 직접 결합된 유압 펌프의 구동으로 조향력에 대한 유압 특성을 차량 속도에 따라 변화시켜 모든 차량 속도 및 조향 상태에 따르는 적절한 조향 특성을 구현하였다. 그러나 유압 시스템으로 인한 복잡성과 비효율성, 엔진의 과도한 부담에 따른 문제점 인식, 차량의 전자 시스템화 추세에 따라 EPS(Electric Power Steering System)의 적용이 소형차를 중심으로 활발히 이루어지고 있다.

EPS 시스템은 형태에 따라 컬럼, 피니언, 랙마운트 타입으로 나뉜다. 컬럼 형태의 경우 경차나 소형차에 적용되고 있으며 DC모터가 주로 이용된다. 피니언 형태는 중소형차에 사용되며 대형차에는 랙마운트 형태가 사용되고 있다.

본 논문은 랙마운트 타입에 적용 가능한 EPS용 동력 장치용으로 BLDC 전동기(Brushless DC Motor)를 개발하였다. 주어진 체적 내에 최대 효율의 토크를 발생하는 BLDC를 설계하고, 상세설계 및 특성을 고찰하기 위하여 FEM 해석을 수행하였으며, 설계의 타당성을 검증하기 위하여 기본 성능 특성을 실험 치와 해석 결과를 비교하였다.

### 2. 특성 해석

#### 2.1 전동기 설계 제원

조향 장치의 구동원으로서 전동기가 갖추어야 할 특성은 차량의 구조적 특성상 고출력, 고효율, 소형이어야 하며, 속도 조절이 자유롭고, 까다로운 구동 조건에서도 신뢰성이 있는 동작을 구현하여야 한다. 또한 헤들 축에 직접 결합된 모터에 의해 구동되므로 운전자가 불편을 느끼지 않도록 정밀한 제어 및 토크 리플을 최소화 하는 기술이 필요하다. 차량의 경우 입력 전압이 DC12V로 상용하는 출력에서 대 전류로 구동되므로 설계시 냉각리 용량을 충분히 감안하여야 한다.

표 1. 설계 제원

구 분	항 목	치 수
사 양	정격 출력 [W]	400
	정격 전압 [V]	12
	정격 속도 [rpm]	2600
	정격 토크 [Nm]	1.5
고정자	출꽃 수	24
	외 경 [mm]	95
	내 경 [mm]	52
	극 수	4
회전자	공 극 [mm]	1
	외 경 [mm]	50
	적층깊이 [mm]	40
	영구자석	NdFeB

## 2.2 특성 방정식

BLDC 전동기의 특성 방정식은 다음과 같다.[1]

$$V_a = E_a + R_a \times i_a \quad (1)$$

$$E_a = \frac{P}{a} Z \Phi \frac{N}{60} = k_e \Phi \omega_r, \quad k_e = \frac{PZ}{2\pi a} \quad (2)$$

$$T = \frac{Z}{2\pi} \frac{P}{a} \Phi I_a = k_t \Phi I_a, \quad k_t = -\frac{PZ}{2\pi a} \quad (3)$$

여기서  $P$ 는 극수,  $a$ 는 별렬도체수,  $\Phi$ 는 유효자속,  $I_a$ 는 코일전류,  $Z$ 는 1코일당 도체수,  $V_a$ 는 인가전압,  $E_a$ 는 코일의 유기전압,  $R_a$ 는 코일저항,  $N$ 은 회전수이다.

## 2.3 해석 이론

영구자석을 포함하는 해석 대상의 자기벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 를 매개 변수로 하는 지배 방정식은 Maxwell 방정식으로부터 식 (4)과 같이 유도된다.[2]

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (4)$$

여기서  $\mu$ 는 투자율,  $\mu_r$ 은 영구자석 비투자율,  $\vec{J}_0$ 는 외부 인가 전류,  $\vec{J}_m$ 은 영구자석의 등가 자화전류이다.

회전자 표면에서 작용하는 전자력은 Maxwell 응력법을 이용하여 구할 수 있다. 회전자 표면의 미소 경로상을 통과하는 자속밀도  $B$ 의 법선성분과 접선성분의 평균치를 각각  $B_n$ 과  $B_t$ 라 할 때, 회전자 표면에 작용하는 토크는 식 (5)로 표현된다.

$$T = r \sum_{i=1}^u \frac{1}{\mu} [ \overline{B}_n^{(i)} \overline{B}_t^{(i)} ] \cdot L \quad (5)$$

여기서  $r$ 은 회전자의 반지름,  $\mu$ 는 미소 적분의 경로의 수,  $L$ 은 철심의 적층 폭이다.

## 2.4 코킹 토크

코킹 토크는 영구자석에 의해 공극 중에 비교적 저차 고조파 자속밀도와 고정자 철심 슬롯의 상호작용에 의하여 발생하는 것으로 식 (6)과 같이 정의 된다.

$$T(\alpha) = - \frac{\partial W(\alpha)}{\partial \alpha} \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ 는 회전자의 회전각도이며  $W$ 는 에너지이다. 공극 부분을 제외하면 에너지 변화량은 거의 발생하지 않으므로 공극에서의 에너지를 구하면 코킹 토크를 알 수 있다. 자계의 에너지는 식 (7)과 같다

$$W_f = \int (H_c l_c + H_g l_g) A dV \quad (7)$$

여기서  $H_c$ 는 철심에서의 자계의 세기,  $H_g$ 는 공극에서 자계의 세기,  $l_c$ 는 철심의 길이,  $l_g$ 는 공극의 길이를 나타내며  $A$ 는 자속 경로의 단면적,  $B$ 는 일정치의 평균 자속밀도이다. 식(7)을 전체 자기저장 에너지로 정리하면 식(9)과 같다.

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (9)$$

그림 2는 영구자석의 극호비에 따른 코킹 토크 특성을 유한요소 해석을 수행하여 얻은 결과이다. 영구자석 전동기의 경우 고정자나 회전자의 스케일을 주거나 극수를 늘림으로써 코킹 토크를 쉽게 줄일 수 있으나[4] 본 연구에서는 제작상의 편의를 위하여 영구자석의 형상 변경과 고정자 치의 변화에 따른 최적화를 수행하였다. 코킹 토크의 저감을 위한 영구자석의 형상 변경이 과도할 경우 출력 감소와 효율 저하가 발생하므로 설계 시 적정한 값에서 절충 할 필요가 있다.

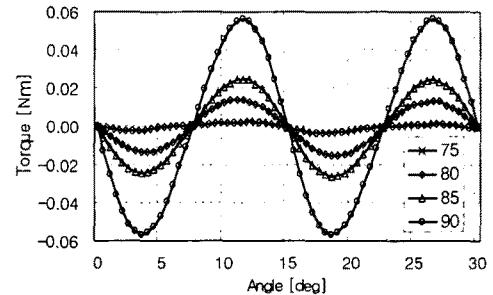
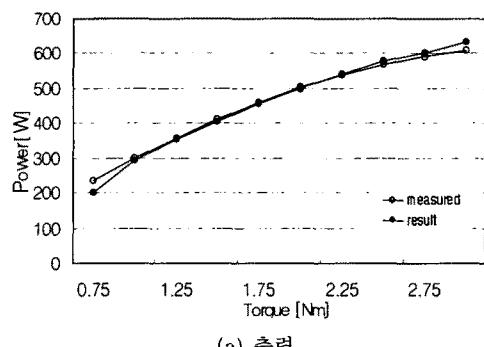


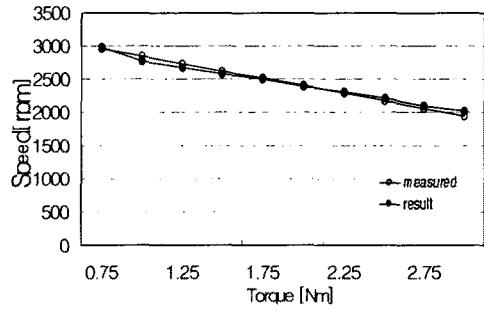
그림 2. 해석 모델의 코킹 토크

## 2.5 전동기 특성 실험 및 비교

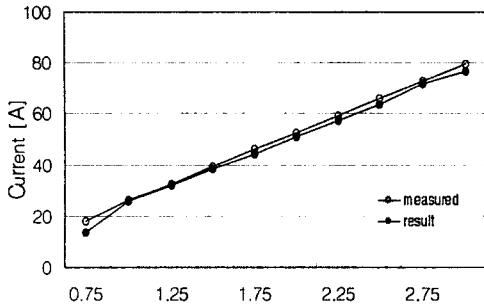
그림 3은 유한요소 해석을 통하여 최적화를 수행한 BLDC 전동기의 시뮬레이션 결과와 제작을 통한 실험치를 비교한 것이다. 실험은 그림 5와 같이 Eddy Current Type의 다이나모 베터를 사용하였다. 구동 드라이버는 BLDC 전용 소자를 사용하여 회로를 구성하였으며 입력 전압 파형은 구형파, 도통각은 120도로 하였다. 파워소자에 따른 전압강화 부분은 충분히 큰 용량의 소자를 사용함으로써 무시하였다. 실험 결과 해석 모델의 요구사항인 400W, 2600rpm에서 효율은 약 85%로 나타났다.



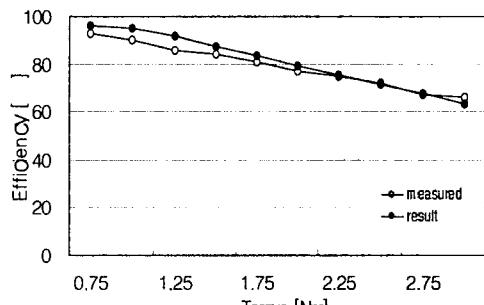
(a) 출력



(b) 속도



(c) 전류



(d) 효율

그림 3. 시뮬레이션 결과와 실험치 비교

그림 4는 부하에 따른 BLDC 전동기의 온도 특성을 시험한 결과이다. 측정 결과 부하를 2[Nm] 인가한 경우 초기 25도에서 상승하여 40분경과 후 55도에서 포화되었다. 부하를 3[Nm] 인가한 경우 구동 40분 후 86도까지 상승하였다. 이 경우 포화상태까지 가지 않았기 때문에 전동기 절연 등급이 일반적으로 E등급의 경우 120도이므로 내부 온도를 감안하면 이 영역에서의 연속 사용은 불가능 할 것이다. 그러나 EPS 시스템의 구동 특성은 최대 부하에서는 간헐적인 동작이 이루어지므로 적용에는 어려움이 없을 것으로 보인다.

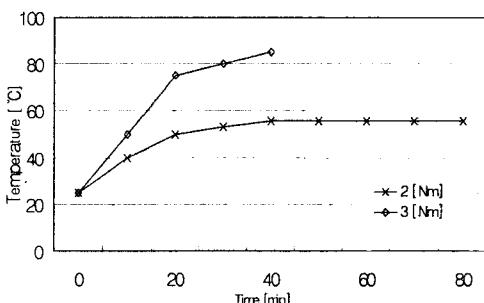


그림 4. 해석 모델의 부하에 따른 온도 특성

이상의 실험 결과로부터 유한요소법에 의한 전동기 설계의 경우 해석 시간이 다소 걸리는 단점은 있으나 해석을 통한 모델의 특성 해석의 정확성을 최대 3% 이내로 줄임으로써 전체적인 개발 기간의 단축과 제반 비용을 최소화 할 수 있을 것으로 보인다. 그리고 BLDC 전동기의 출력 특성은 구동 드라이버의 특성에 따라 큰 차이를

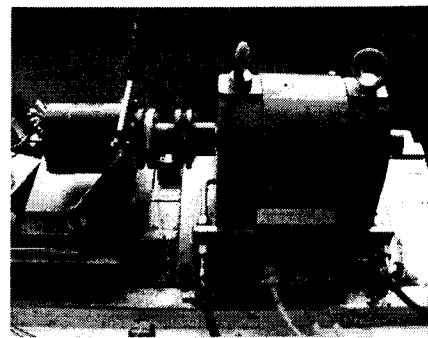


그림 5. BLDC 전동기 실험 장치 구성

보입으로 제어 회로에 대한 특성도 충분히 고려가 되어야 할 것이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 최근 차량의 조향 장치로 부각되고 있는 EPS 시스템에 적용하기 위한 400W 4극 3상 BLDC 전동기의 유한요소법을 통한 특성 해석을 수행하였다. 차량용이라는 특수성으로 인해 전동기 설계에 여러 가지 제약이 있으나 본 논문에서는 최적화를 통한 소형화와 코킹 토크 최소화에 중점을 두었다. 소형화에 맞추어 고자장 영구자석을 적용할 경우 상대적으로 코킹의 증가와 체적당 전류 밀도의 증가로 인한 발열 문제가 커짐을 알 수 있었다. 마지막으로 유한요소해석을 통하여 최적화된 모델과 시제품의 성능 비교를 통하여 해석 타당성을 검증한바 시뮬레이션을 통한 설계값과 실제 제작을 통한 실험값이 잘 일치함을 보였다.

향후 조향 장치의 구동 특성 최적화를 위한 BLDC 전동기의 상전환에 따른 토크 리플을 최소화하는 제어 방법에 대한 연구가 계속되어야 하겠다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J. R. llendershot, Jr. and T. J. E. Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors." New York: Oxford Sci., 1994.
- [2] D. Pavlik, V. K. Garg, J. R. Repp and J. Wdiss, "A FINITE ELEMENT TECHNIQUE FOR CALCULATING THE MAGNET SIZE AND INDUCTANCES OF PERMANENT MAGNET MACHINES", IEEE Trans. on Energy Conv., vol. 3, No.1, Ind. pp. 116~122, Mar. 1988
- [3] A. Keyhani, C. B. Studer, T. Sebastian and S. K. Morthy, "Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines". Eletric Machines and Power Systems. Vol. 27. No.7. pp.665-678. 1999. July
- [4] J. Chung and G. M. Hulbert, "A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized-method," J. Appl. Mechanics, vol. 60, no. 2, pp. 371~375, 1993.
- [5] A. A. Abdel-razek, J. L. Coulomb, M. Feliachi, and J. C. Sabonnadiere, "Conception of an air-gap element for the dynamic analysis of the electromagnetic field in electric machines," IEEE Trans. Magn., vol. 18, pp. 655~659, Feb. 1982.