

회전자의 정적 편심을 고려한 BLDC 전동기의 유한요소해석

박승찬^a, 이진우^b, 양병렬^c, 권병일^c
^a동양대학교 시스템 제어공학부, ^b한양대 대학원 전자전기제어계측공학과, ^c한양대 대학원 전기공학과

Finite Element Analysis of a BLDC Motor with Static Rotor Eccentricity

Seung-Chan Park^a, Jin-Woo Lee^b, Byoung-Yull Yang^c, Byung-Il Kwon^c
^aSchool of System Control Engineering, Donyang Univ., ^{b,c}Graduate School of Hanyang Univ.

Abstract - Rotor eccentricity exists extensively in BLDC motors because of manufacturing imprecision or bearing defects. In this paper, magnetic fields of a BLDC motor with static rotor eccentricity are analyzed by the time-stepping finite element method. Torque ripple, cogging torque, winding current, counter-emf and unbalanced magnetic force characteristics are obtained. These results are compared with those of a non-eccentric BLDC motor.

변위량 ϵ 이 일정하게 존재한다고 가정한다. 공극 길이에 대한 상대적 편심을 정의하면 식 (1)과 같다.

$$e = \frac{\epsilon}{R_s - R_r} \times 100[\%] \quad (1)$$

그림 1의 모델에 대하여, 식 (1)에서의 R_s 및 R_r 은 각각 16.3 [mm], 16 [mm]이다. 또한, 본 논문에서는 회전자의 편심된 변위량을 $\epsilon = 0.05$ [mm] 로 설정하여 해석하며, 이것은 $e = 17\%$ 에 해당한다.

유한요소해석을 위하여 회전자의 운동에 따라서 공극 요소를 재분할 경우에는 그림 2와 같은 정적 편심 상태를 그대로 유지하게 된다.

본 논문에서는 회전자와 고정자의 표면에 1개의 공극층을 포함한 상태로 각각 요소분할한 후에 유한요소 해석시에 이를 결합하고 나머지 공극영역의 요소를 분할하는 기법을 사용한다. 편심을 고려하기 위하여 그림 1의 전체 영역을 해석 대상으로 한다.

1. 서 론

모든 종류의 회전기에는 일반적으로 회전자의 편심이 존재한다. 이것은 조립 오차와 베어링의 결함등에 의한 것이다. 편심에 의하여 회전자 표면에 작용하는 불평형 자기력(unbalanced magnetic force)은 전동기의 진동을 유발하여 소음 발생의 원인이 될 수 있다.

최근에는 영구자석형 BLDC 모터의 회전자 편심을 고려한 자기회로의 해석 방법이 제시되어, 편심에 의한 불평형 자기력과 코깅 토크 특성이 해석된다가 있다 [1]-[3]. 이 방법은 집중정수를 갖는 자기회로 모델을 이용하는 것으로서 비교적 간단하다. 그러나, 권선에 전류가 흐를때의 토크 특성과 철심재료의 자기적 비선형성을 정확히 고려할 수 없는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 유한 요소 해석법을 이용하여, 회전자의 편심이 BLDC 전동기의 특성에 미치는 영향을 고찰한다. 회전자의 편심으로서는 정적 편심과 동적 편심이 있을 수 있으나, 여기서는 정적 편심이 2차원적으로 발생하였을 경우에 대해서만 고려한다. 해석 결과로서는 8극 8슬롯을 갖는 단상 BLDC 전동기가 정적 편심된 회전자를 가질때의 토크 리플, 코깅토크, 전류, 역기전력, 불평형 자기력 특성을 제시하고 편심이 존재하지 않는 이상적인 경우와 비교한다.

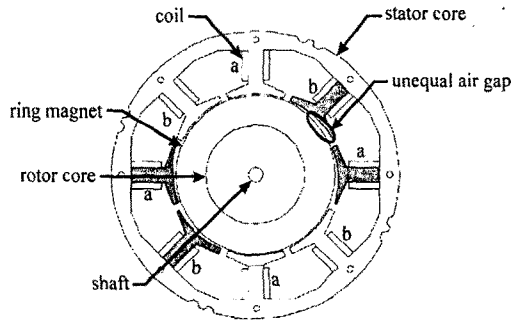


그림 1 해석 모델(8극 8슬롯의 BLDC 전동기)
 Fig. 1 Analysis model

2. 유한 요소 해석

2.1 편심의 모델링 방법

해석모델로서는 8극 8슬롯을 갖는 단상 BLDC 전동기를 채택하였으며, 이를 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 모델은 기존의 단상 BLDC 전동기의 코깅 토크를 감소시키기 위하여 불평형 및 평형 공극을 조합하여 설계한 모델이다[4].

본 논문에서는 정적 회전자 편심을 고려하기 위하여 그림 2와 같이 회전자의 중심축이 고정자의 중심축에 대하여 ϵ 만큼 편심되어 있는 것으로 가정한다. 또한, 실제의 회전자 편심은 전동기의 축방향에 대하여 기울어진 상태로 발생할 수 있으나, 해석의 간략화를 위하여 전동기의 축방향 길이에 대하여 그림 2에 나타낸

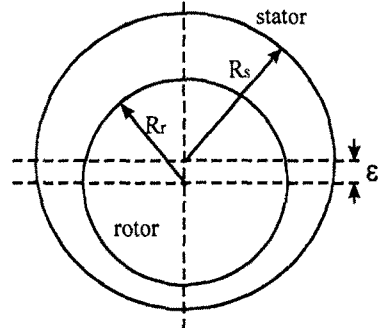


그림 2 정적 편심의 고려 방법
 Fig. 2 Static rotor eccentricity modeling

2.2 유효요소 정식화 [4]

단상 BLDC 전동기의 해석 영역에 대하여 자기 벡터 포텐셜 A 를 계변수로 한 2차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\frac{N}{S} I_a - \frac{N}{S} I_b - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_x}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} \right) \quad (2)$$

여기서, I_a, I_b 는 a 및 b 권선의 전류, μ 는 투자율, M_x, M_y 는 x 및 y축 방향으로의 자화의 세기이다. Galerkin 법을 이용하여 요소내에서 각 절점에 대한 가중잔차를 구하면 식(3)과 같다.

$$G_{ie} = \int_S \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) A_{je} dx dy - \frac{N}{S} (I_a + I_b) \int_S N_{ie} dx dy - \int_S \frac{1}{\mu} (M_x \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} - M_y \frac{\partial N_{ie}}{\partial x}) dx dy \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

단상 BLDC 전동기에 공급되는 전압은 전기각 180도 주기로 a 권선과 b 권선에 인가되며, a 권선과 b 권선에 대한 회로 방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\phi_a}{dt} + L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a = V_a \quad (4)$$

$$\frac{d\phi_b}{dt} + L_b \frac{dI_b}{dt} + R_b I_b = V_b$$

여기서, ϕ 는 각 권선을 채교하는 자속이고, L_0 는 코일 단부의 누설 인덕턴스이며, I 는 권선 전류, V 는 인가전압이다.

식 (3)과 식 (4)를 이용하여 전체 영역에 대한 계방정식을 구성하면 식 (5)와 같이 되며, 이를 풀면 자기 벡터 포텐셜과 권선전류를 구하게 된다.

$$\begin{bmatrix} K & M \\ Q/\Delta t & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Q/\Delta t & L/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (5)$$

2.3 토오크 및 자기적 불평형력 계산[5]

회전자 표면에서 작용하는 힘은 Maxwell 응력법을 이용하여 구할 수 있다. 회전자 표면의 미소 경로상을 통과하는 자속밀도 B 의 법선성분과 접선성분의 평균치를 각각 $\overline{B_n}$ 와 $\overline{B_t}$ 라 할 때, 회전자 표면에 작용하는 토오크는 식 (6)으로 표현된다.

$$T = r \sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu} [\overline{B_n^{(i)}} \overline{B_t^{(i)}}] (l_i D) \quad [Nm] \quad (6)$$

여기서, r 은 회전자의 반지름, u 는 미소 적분 경로의 수, l_i 는 미소 적분 경로 길이, D 는 철심의 적층폭이다. 회전자 표면에 작용하는 불평형 자기력은 영구자석의 표면에 작용하는 radial force를 합하면 되므로, 식 (7)을 이용하여 계산한다.

$$f_b = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\mu} [(\overline{B_n^{(i)}})^2 - (\overline{B_t^{(i)}})^2] (l_i D) \quad [N] \quad (7)$$

3. 해석 결과

그림 3은 코깅 토오크 특성으로서 편심에 의하여 파형이 변형됨을 알 수 있다. 이것은 정적 편심에 의하여 자기회로가 불평형하게 되기 때문이다.

그림 4는 회전자가 1800 rpm으로 회전할 때의 권선에 유기되는 역기전력 파형으로서 편심이 없을 경우보다 피크치 근방에서의 변화가 심하게 나타난다.

그림 5는 전압원 인버터에 의하여 구동될 때의 권선 전류 파형이다. 그림 4의 역기전력 파형으로부터 예상할 수 있듯이 편심이 없는 경우에 비하여 역기전력이 상대적으로 클 때에는 전류가 작게 흐르고 그렇지 않은 경우는 크게 흐른다.

그림 6은 전압원 인버터에 의하여 권선 전류가 흐를 때의 토오크 특성을 보여준다. 공극의 길이에 대하여 약 17%의 편심을 가지는 경우로서 회전자의 편심에 의하여 토오크 리플의 크기가 다소 증가하며, 평균 토오크가 감소하게 됨을 알 수 있다.

그림 7은 회전자 표면에서의 자속밀도 분포를 법선 성분과 접선 성분으로 구분하여 나타낸 것이다. 편심에 의하여 서로 마주보는 극에 대한 자속 밀도 분포가 비대칭적으로 존재하게 됨을 알 수 있다.

영구자석 표면의 radial force 분포를 구하면 그림 8과 같이 된다. 이와 같이 분포된 힘 벡터를 식 (7)에서와 같이 서로 합하면 불평형 자기력 f_b 가 구해진다. 회전자의 운동에 따른 불평형 자기력의 크기 변화를 그림 9에 나타내었다. 불평형 자기력은 회전자계의 진동을 유발시켜 소음원으로 작용할 수 있으므로 이에 대한 해석은 매우 중요하다. 그림 10은 불평형 자기력 벡터의 방향을 나타내며, 회전자의 운동에 따라서 편심된 방향인 90도 근방으로 작용하게됨을 알 수 있다.

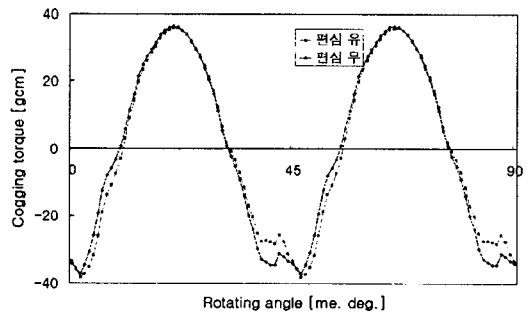


그림 3. 코깅 토오크(편심량 $e = 17\%$)
Fig. 3 Cogging torque (eccentricity, $e = 17\%$)

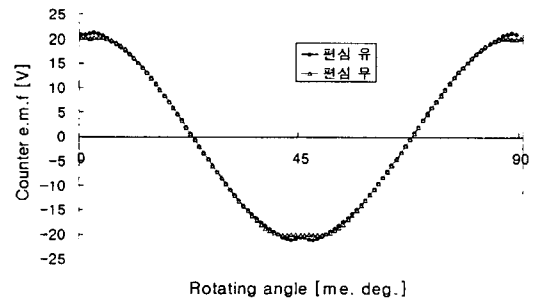


그림 4. 권선의 유기기전력(속도 : 1,800 rpm)
Fig. 4 Counter e.m.f. (Speed : 1,800 rpm)

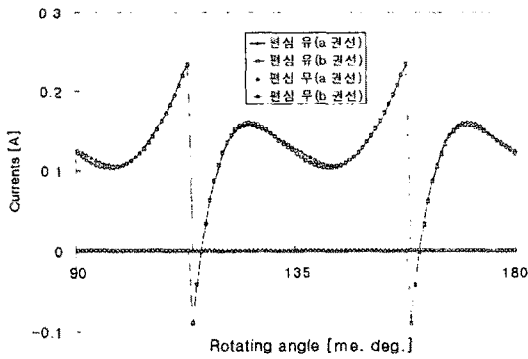


그림 5. 권선 전류(속도 : 1,800 rpm)
Fig. 5 Winding currents(speed : 1,800 rpm)

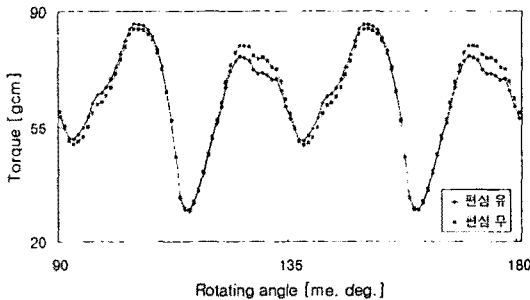


그림 6. 토오크 특성(속도 : 1800 rpm)
Fig. 6 Torque characteristics(speed : 1800 rpm)

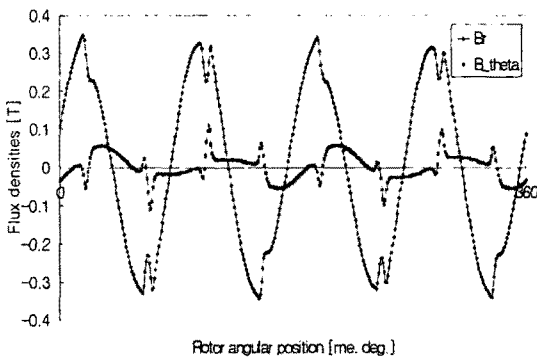


그림 7. 영구자석 표면 자속밀도 분포
Fig. 7 Flux densities on the magnet surface

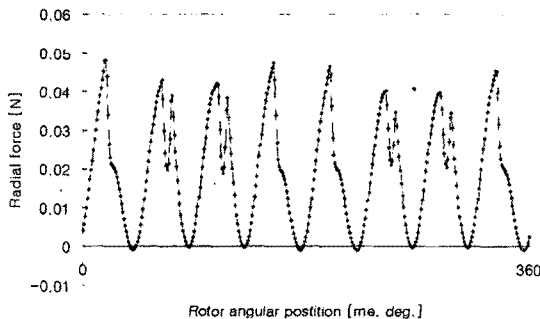


그림 8. 영구자석 표면에서의 radial force 분포
Fig. 8 Radial force distribution

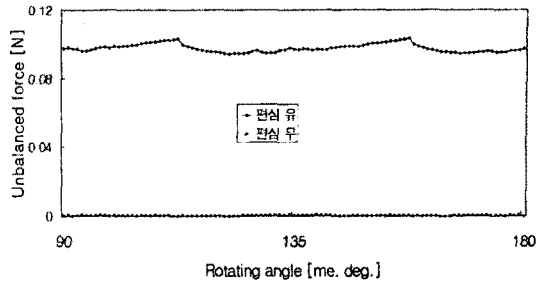


그림 9. 회전자에 작용하는 불평형 자기력
Fig. 9 Unbalanced magnetic forces

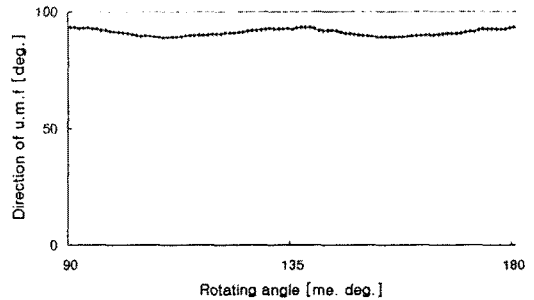


그림 10. 불평형 자기력 벡터의 방향
Fig. 10 The direction of unbalanced magnetic force

4. 결 론

본 논문에서는 8극 8슬롯의 대칭적 구조를 갖는 단상 BLDC에 있어서 회전자의 정적 편심량을 공극 길이의 17%로 가정하여 유한 요소 해석하였으며, 코깅 토오크, 역기전력, 권선 전류, 토오크 리플, 불평형 자기력 특성등을 정적 편심이 없는 이상적인 경우와 비교하였다. 해석결과로부터 회전자의 정적 편심 현상은 전동기의 자기적 공극이 크기 때문에 토오크, 전류, 기전력등의 일반 특성에 미치는 영향은 많지 않으나, 진동원으로 작용하는 불평형 자기력에 큰 영향을 주게 됨을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jim-Po Wang and Dennis K. Lieu, "Magnetic Lumped Parameter Modeling of Rotor Eccentricity in Brushless Permanent-Magnet Motors", IEEE Trans. on Magnetics, vol.35, no. 5, pp.4226-4231, 1999.
- [2] Ungtae Kim and Dennis K. Lieu, "Magnteic Field Calculation in Permanent Magnet Motors with Rotor Eccentricity: Without Slotting Effect", IEEE Trans. on Magnetics, vol.34, no.4, pp.2243-2252, 1998.
- [3] Ungtae Kim and Dennis K. Lieu, "Magnteic Field Calculation in Permanent Magnet Motors with Rotor Eccentricity: With Slotting Effect considered", IEEE Trans. on Magnetics, vol.34, no.4, pp.2243-2252, 1998.
- [4] 양병렬, 권병일, 박승찬, 진용선, "단상 BLDC 전동기의 코깅 토오크 저감을 위한 공극 설계", 대한전기학회 전기기기연구회 춘계학술대회 논문집, pp.218-221, 2000.
- [5] 박승찬, 윤태호, 권병일, 윤희수, 원성홍, "하드디스크 구동용 BLDC 전동기의 전자기력 해석에 관한 연구", 대한 전기학회 논문지, 제48권 9호, pp.476-483, 1999.