

브러시리스 DC 모터의 영구자석 형상에 따른 특성 연구

박 찬, 김용현, 이종찬, 전연도, 이 주
한양대학교 전자전기공학부

The Research on the Characteristics of Brushless DC Motor according to the Shape of the Permanent Magnet

C. Park, Y. H. Kim, J. C. Lee, Y. D. Chun, J. Lee.
Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hanyang University.

Abstract - The cogging torque and torque ripple in motor which cause noise and vibration are an inevitable phenomenon and they give a bad effect to motor performance. So we are required to reduce the cogging torque and torque ripple not by electrical controlling but by changing the inner mechanical structure and we focused on the permanent magnet. In this research, we calculated current, torque, Back-EMF(electromotive force) and cogging torque according to the change of the magnet shape using two dimensional FEM(Finite Element Method), Maxwell stress tensor and time-stepping method. From the results, we present an appropriate model that can satisfy both low cogging torque, low torque ripple and high efficiency.

위의 표1은 해석에 사용한 BLDC 모터의 제원을 나타낸 것이고, 모델의 단면은 아래 그림 1에 나타났었다.

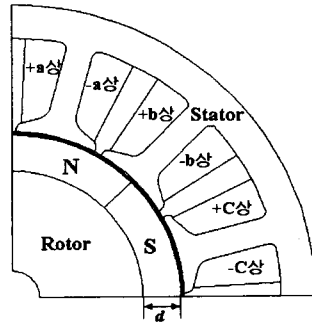


그림 1. 해석에 사용한 BLDC 모터의 단면도

1. 서 론

최근에는 소비전력을 줄이기 위해 영구자석을 포함하는 Brushless DC 모터(BLDC)의 사용이 증가하고 있다. Brushless DC 모터는 영구자석의 신소재 개발과 기술의 발달로 고성능, 소형, 경량화 하는 추세에 있고 기계적, 전기적 노이즈가 거의 없어 에너지 및 자원절약의 문제뿐만 아니라 새로운 응용제품의 출현에도 영향을 주고 있다. 본 논문에서는 다양한 형태의 영구자석을 해석모델로 제시하고, 각각의 곡률을 변화시키면서, 전류, 역기전력, 토크, 코깅토크를 구하고 이를 정량적으로 비교, 분석하였다. 해석방법으로는 2차원 유한 요소법을 기본으로 Maxwell 응력법, 120° 구형파 통전방식으로 구동되는 모터의 전압 스위칭 특성을 고려한 시간차분법 등을 사용했고, 결과를 그래프로 표시하여 효율 및 토크상수를 계산하였다. 그리고 이를 통해 각 특성간의 상관관계를 알아보고, 코깅토크 및 토크리플을 줄이면서 효율을 높일 수 있는 적절한 영구자석의 형태를 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

표1. BLDC 해석 모델의 제원

극수	8	회전자 외경	49 (mm)
슬롯수	12	고정자 내경	50 (mm)
상수	3	고정자 외경	88 (mm)
잔류자속 밀도	0.4 (T)	자극 높이	5.5 (mm)

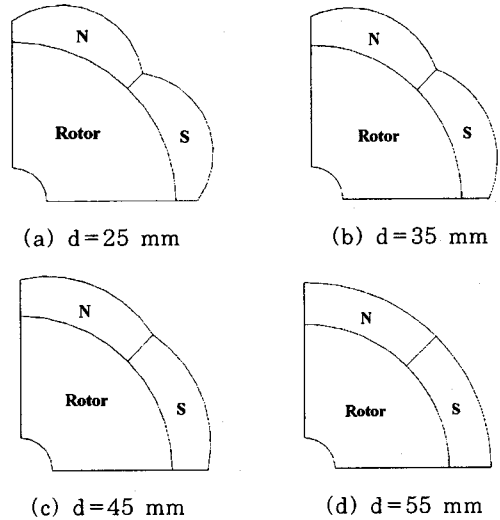


그림 2. 실제 해석 모델 회전자의 모습

2.2 해석 방법

본 논문의 해석방법은 해석영역을 매질의 종류에 따라 구분한 후 삼각형 요소로 세분하고, 경계조건과 함께 각 요소의 중점을 서로 연결하여 적분 경로를 택했다. 2차원 유한 요소법과 시간차분법, Maxwell 응력법을 이용하여, 각 모델별로 전류, 토크, 역기전력, 코깅토크를 구하고 그래프로 표시하여 영구자석의 형상에 따른 전동기의 특성을 살펴보고자 한다.

2.2.1 지배방정식 및 유한 요소법의 정식화

2차원 유한 요소법을 이용한 해석을 위해 다음과 같

이 가정하였다.

- 1) 전류와 벡터포텐셜은 z축 방향 성분만 존재한다.
- 2) 철심은 등방성이다.
- 3) 히스테리시스 손실을 무시한다.
- 4) 변위전류는 무시한다.

위의 가정을 만족하는 준 정상상태에서, 맥스웰 방정식으로부터 지배방정식을 유도하면 식(1)과 같다

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_0 + J_m + J_e \quad (1)$$

A : 자기벡터 포텐셜

여기서, J_m 은 영구자석의 등가 자화 전류밀도항으로 식(2)와 같이 정의된다.

$$J_m = \nabla \times \frac{1}{\mu_r} M_r \quad (2)$$

M_r : 영구자석의 잔류자화량

여기서, J_e 는 와전류 항으로 식(3)과 같이 정의된다.

$$J_e = \sigma(E + v \times B) = -\sigma \left[\frac{\partial A}{\partial t} - v \times (\nabla \times A) - \nabla \Phi \right] \quad (3)$$

위의 가정을 바탕으로 식(1)로부터 유한 요소 해석을 위한 지배방정식을 유도하면 식(4)가 된다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = -J_0 + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + v_x \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial M_{rx}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

그리고 권선 한 상에 대한 회로방정식은 식(5)와 같다.

$$V = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + E_m \quad (5)$$

R_m : 해석영역의 내부저항과 외부저항의 합성저항

L_m : 권선 코일단부의 누설인덕턴스

E_m : 권선에 유기된 역기전력

한편, 역기전력 E는 다음 식(6)처럼 표현할 수 있다.

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \oint_s B \cdot dS = \frac{d}{dt} \oint_l A \cdot dl = \frac{d}{dt} [K(A_{ie} - A_{ie})] \quad (6)$$

B : 자속밀도

2.2.2 Maxwell 응력법 및 토크 계산

회전자 표면에서 작용하는 영구자석의 힘은 Maxwell 응력법으로부터 식(7)과 같이 계산된다.

$$F = \frac{1}{\mu_0} \oint_s P \cdot ds = \frac{1}{\mu_0} \oint_l (P \cdot n) dl \quad (7)$$

여기서, n 과 l 은 그림 3에 나타낸 것과 같으며, n 은 적분 경로상의 단위 법선 벡터를, l 은 삼각형 요소 내의 적분 경로를 의미한다. 그리고 P 는 Maxwell Stress tensor로 식(8)의 행렬식과 같이 나타낼 수 있고, 행렬식의 B_x 는 X방향의 자속밀도, B_y 는 Y방향의 자속밀도를, B 는 식(9)과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} (B_x^2 - \frac{1}{2} |B|^2) & B_x B_y \\ B_y B_x & (B_y^2 - \frac{1}{2} |B|^2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \sqrt{(B_x^2 + B_y^2)} \quad (9)$$

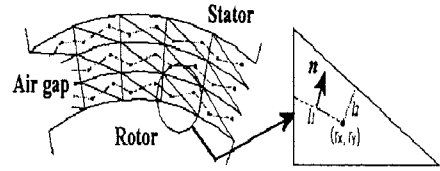


그림 3. 공극에서의 적분 경로

요소의 무게중심을 연결하여 미소경로를 구성하고 이를 통과하는 자속밀도 B 의 법선성분과 접선성분의 평균치를 각각 B_n 과 B_s 라 할 때, 회전자 표면에 작용하는 토크는 식(10)로 표현된다.

$$T = r \sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu} [B_n^{(i)} B_s^{(i)}] (l_i D) \quad (10)$$

r : 회전자의 반지름

u : 미소 적분 경로의 수

i : 미소 적분 경로 길이

D : 철심의 적층 폭

2.3 해석 결과

2.3.1 전류, 토크, 역기전력 분포 곡선

위의 방법을 이용해 데이터를 산출해 내고, 그 결과를 바탕으로 4개 모델에 대한 해석 결과를 아래 그림 4, 5, 6, 7에서 처럼 그래프로 표시하였다. 가로축은 모두 회전자의 회전각도를 나타내고, 세로축은 각각 전류, 토크, 역기전력, 코깅토크를 의미한다.

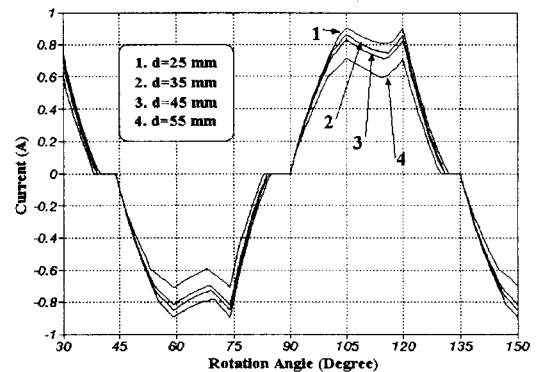


그림 4. 각 해석 모델의 전류 분포 곡선

2.3.2 효율 및 토크 상수 K_T

그림 4, 5, 6, 7의 그래프 데이터를 이용 각 모델의 토크상수 K_T 와 효율을 계산해서 표2로 나타내었다. 토크상수 K_T 와 효율의 계산식은 다음의 식(11)과 (12)에 나타난 바와 같다.

$$\text{토크상수 } K_T = \frac{\text{평균토크}}{\text{전류실효치}} \quad (11)$$

$$\text{효율} = \frac{\text{Torque} \times \omega}{\text{전압} \times \text{전류}} \quad (12)$$

여기서 ω 는 다음 식(13)과 같다.

$$\omega = \text{RPM} \times 2\pi \div 60 \quad (13)$$

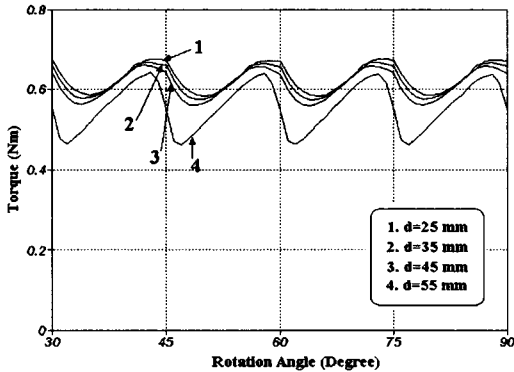


그림 5. 각 해석 모델의 토크 분포 곡선

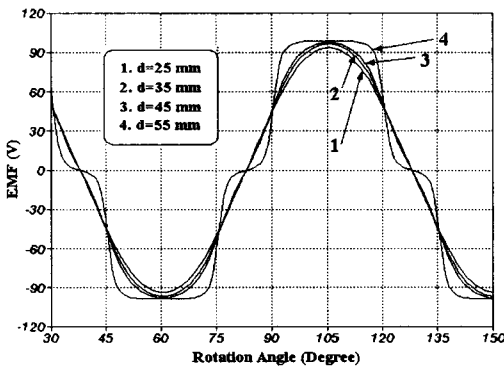


그림 6. 각 해석 모델의 역기전력 분포 곡선

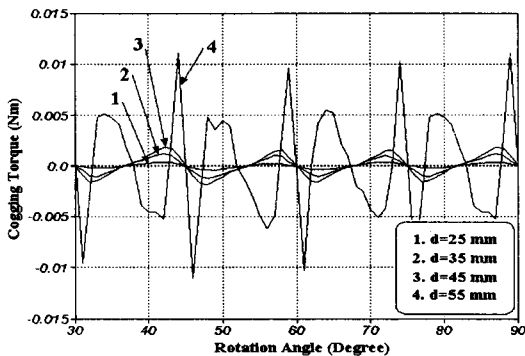


그림 7. 각 해석 모델의 코깅 토크 분포 곡선

각 해석 모델별 데이터는 표2에 나타내었고, 전류값과 토크값은 상위 값들의 평균치를 이용하였다. 또 모든 모델에서 RPM(분당 회전수)은 1700, 전압 280V로 동일하게 적용하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 Brushless DC 모터의 영구자석 형상에 따른 특성을 알아보기 위해 영구자석 형태를 변화시키면서 유한 요소법을 이용하여 각각의 특성을 분석하였다.

표2. 각 해석 모델의 효율

모델	측정값	전류(A)	토크(Nm)	효율 (%)	토크상수 K_T
d=25 mm		0.821	0.629	48.68	0.766
d=35 mm		0.784	0.623	50.53	0.794
d=45 mm		0.755	0.613	51.59	0.812
d=55 mm		0.657	0.560	54.10	0.852

극률이 증가함에 따라 역기전력은 정현파의 형태로 바뀌지만 크기는 감소하였고(그림 6), 따라서 전류는 증가함을 알 수 있다(그림 4). 한편 토크는 극률 증가에 따라 크기가 증가했고, 토크리플은 감소하고 있음이 확인되었다(그림 5). 그리고 코깅토크는 극률이 증가함에 따라 감소했음을 알 수 있는데(그림 7), 특히 d=55 mm의 경우 다른 모델과 달리 그 변화가 심한것은 자석의 극이 갑자기 변하기 때문인 것으로 사료된다.

위의 수치데이터를 이용해 각 해석 모델의 효율과 토크상수를 계산해 본 결과를 위의 표2에 나타내었다. 극률이 클 경우(d=25 mm), 코깅토크는 상당히 작았으며, 전류와 토크는 모두 크게 나타났지만 둘의 상대적인 비율의 작아서 토크 리플이 적음에도 불구하고 효율에 큰 향상을 보이진 못했다. 한편, 극률이 적은 경우(d=55 mm), 코깅토크 변화가 크면서 전류와 토크는 감소했다. 비록 토크리플은 가장 컸지만, d=25 mm의 경우보다 토크 대 전류의 비가 커서 효율은 가장 큰 것으로 나타났다. 즉, 전류나 토크의 크기가 효율의 좋고 나쁨을 좌우하는 것이 아니라, 전류 대 토크의 비 혹은 토크 대 전류의 비에 따라 효율값이 정해진다.

결과적으로, 영구자석의 형상 변화만으로는 최대의 효율을 내면서 토크리플과 코깅토크를 최소화할 수 있는 모델을 찾을 순 없었지만, 다른 기계적 요소의 변화를 함께 고려한다면 이들 조건을 동시에 만족시키는 것도 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] T.J.E Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", Clarendon Press, Oxford, 1989
- [2] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1987
- [3] 한문규 외, "BLDC 모터의 회전자 형상변화에 의한 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp861-863, 2000
- [4] 장홍순 외, "스위칭 위치에 따른 2상 BLDC 모터의 특성 변화", 전기학회 논문지, Vol49B, No10, pp646-651, 2000
- [5] 장홍순 외, "회전자 철심이 없는 내전형 BLDC 모터의 유한요소 해석", 대한전기학회 논문집, Vol49B, No10, pp652-658, 2000