

유한요소법을 이용한 회전자 철심을 가지지 않는 BLDC 모터의 특성해석

정인성, 임태빈, 장홍순, 백수현
전자부품연구원, 동국대학교 전기공학과

Characteristic Analysis of a BLDC Motor which do not Have Rotor Core Using Finite Element Method

I. S. Jung, T. B. Im, H. S. Chang, S. H. Baek
Korea Electronics Technology Institute, DongGuk University

Abstract - A ferrite bonded magnet type brushless DC (BLDC) motor which do not have rotor core is analyzed by using finite element method (FEM). The magnetization distribution of the magnet does not have only parallel or radial direction. So, the direction and intensity are taken into account by the analysis of the magnetization procedure. The validity of the analysis method is verified by comparing the analyzed results with measured ones.

고, 이 정보를 BLDC 모터의 해석에 사용하고자 한다.
2. BLDC 모터의 유한요소해석

1. 서 론

BLDC 모터는 일반 DC 모터에 비하여 소음이 적고 경박단소화가 가능하며 효율이 높아 가전용 기기, OA 컴퓨터 주변기기 등의 많은 구동분야에 적용이 이루어지고 있다. BLDC 모터는 전기자 권선이 시행되어 있는 고정자와 영구자석을 가지는 회전자로 구성되어 있다. 영구자석 재료로는 가격이 저렴한 페라이트(ferrite) 재질이 많이 쓰이고 있으며, 페라이트 또는 희토류 자석 분말을 섞어 사출하는 본드(bonded) 영구자석도 다양한 형상의 제작이 용이하고 그 특성이 우수하여 사용이 증가하고 있다. 또한 고효율, 소형 고효출력을 얻기 위하여 에너지밀도가 매우 큰 Nd-Fe-B 등의 희토류 재질의 영구자석도 채용되고 있다.

BLDC 모터는 그 구성방식에 따라 axial type radial type으로 나눌 수 있으며, radial type은 외전(outer-rotor type)과 내전형(inner-rotor type)으로 수 있다. 보통의 경우 회전자속은 계자자속을 만들어주기 위한 영구자석과 자속의 경로를 구성해주기 위한 회전자 철심으로 구성된다. 그러나 페라이트 또는 본드 자석을 사용하는 내전형 모터중에는 제조단가를 낮추고 회전자 관성을 줄이기 위하여 계자철심을 사용하지 않는 경우가 많이 있다. 이러한 경우 영구자석은 등방향 또는 방사방향의 일정한 자화분포를 가지지 않게 된다. 따라서, 이러한 모터를 설계, 해석시에는 영구자석의 자화분포에 대한 적절한 고려가 필요하다.

최근에는 BLDC 모터의 특성을 해석하기 위하여 유한요소법이 많이 사용되고 있다. 또한 소형 BLDC 모터의 링(ring)형 영구자석이 가지는 자화분포를 보다 정확히 모델링하기 위하여 영구자석의 자화의 세기 분포를 다르게 하여 해석하는 방법이 제시된 바 있다[1]. 그러나 이는 실제 영구자석의 표면자속밀도 측정치와 해석치와의 비교를 통하여 자화분포를 결정하는 방법으로, 초기 설계 단계와 같이 해석대상이 실제 존재하지 않는 경우에는 적용하기가 곤란하다.

본 논문에서는 페라이트 본드 영구자석을 가지는 내전형 BLDC 모터의 특성을 해석하고자 한다. 본 영구자석은 회전자 철심을 가지지 않는 구조로, 평행 또는 방사방향의 일정한 자화분포를 가지지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 영구자석의 착자(이방화)과정에 대한 해석을 통하여 영구자석의 자화방향 및 자화의 세기를 결정하

2.1 해석모델

그림 1은 해석모델의 개략도를 나타낸다. 8극 12슬롯 구조를 가지고 있으며, 영구자석은 페라이트 본드 재질로서 회전자 철심을 가지고 있지 않는 구조이다. 구동방식은 120도 구형과 전압구동방식으로, 위치검출을 위하여 3개의 홀 센서가 부착되어 있다.

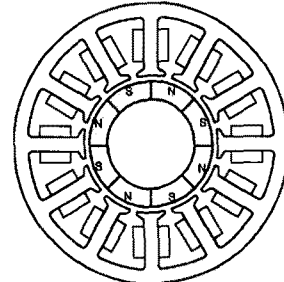


그림 1. 해석모델
Fig. 1 Analysis model.

2.2 영구자석의 자화분포 계산

그림 1에 나타낸 바와 같이 해석모델의 영구자석은 자로 구성을 위한 회전자 철심을 가지고 있지 않으며, 사출시 SmCo 영구자석에 의해 이방화, 자화된다. 따라서 영구자석 내부의 자화는 이상적인 방사방향으로 분포하지 않게 된다.

본 논문에서는 영구자석 내부의 자화분포(자화의 세기 및 방향)를 결정하기 위하여 그림 2와 같이 영구자석의 이방화 과정을 해석하여 자화분포를 결정하였다.

해석모델이 페라이트 bonded 재질이므로 이방화과정에 대한 해석으로부터 결정된 자속의 방향을 영구자석 자화의 방향으로 결정하였다. 자화의 세기는 자속밀도가 재질의 최대 잔류자속밀도(B_r)보다 큰 곳에서는 B_r 로, 작은 곳에서는 그때의 자속밀도값을 잔류자속밀도값으로 결정하였다.

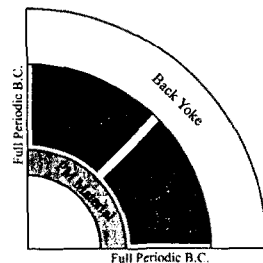


그림 2. 영구자석의 자화과정 모델

Fig. 2 Magnetization procedure of permanent magnet.

2.3 전압방정식을 포함한 유한요소법의 정식화

유한요소 정식화를 위한 2차원 지배방정식은 식 (1)과 같다(2).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0 - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_x}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서, J_0 는 권선의 전류밀도, M_x, M_y 는 각각 x, y 방향으로의 영구자석의 자화량을 나타낸다.

전압 구동의 경우 J_0 항은 미지수가 되며, BLDC모터 각 상의 전류를 결정하기 위한 전압방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_m = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2)$$

여기서, 첨자 m 은 권선의 각 상을 나타내며, L_m 은 2차원 유한요소 해석영역상에서 고려할 수 없는 코일 단부에서의 누설인덕턴스값을, Φ 는 각 상의 쇄교자속량을 나타낸다.

식 (1)에 대하여 유한요소 정식화를 수행하고 식 (2)와 결합한 후, 시간미분항을 후퇴차분법으로 근사시키면 자기벡터 포텐셜과 전류를 미지수로 하는 식 (3)과 같은 시스템 행렬을 구성할 수 있다(3).

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q] \\ \frac{1}{dt} [F] & [R] + \frac{[L]}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\}^{t+dt} \\ \{I\}^{t+dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ \frac{1}{dt} [F] & \frac{[L]}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\}^t \\ \{I\}^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [M]^{t+dt} \\ [V]^{t+dt} \end{bmatrix} \quad (3)$$

회전자석의 회전에 따른 해석영역의 요소분할을 위해서는 고정자와 회전자의 요소수는 그대로 유지한 채, 공간상에 이동라인을 두어 이동라인상의 요소만을 재분할하는 방법을 사용하였다(3). 또한, 발생 토크는 맥스웰 응력법으로 구하였다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 영구자석의 자화분포

그림 3은 영구자석 사출시의 착자(이방화)과정을 해석한 경우의 자속선도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 자속은 방사방향으로 영구자석을 완전히 관통하지 못하고 이웃하는 자극과 경로를 이루게 된다. 본 해석으로부터 영구자석의 자화방향 및 자화의 세기를 결정하였다. 본 모델의 최대 잔류자속밀도값은 0.298 [T]이다. 따라서 해석결과 자속밀도가 0.298 [T]보다 큰 지점에서는 잔류자속밀도값을 0.298 [T]로, 이보다 작은 지점에서는 그 자속밀도값을 그대로 잔류자속밀도값으로 결정하였다.

그림 4는 영구자석의 자화량이 0.298 [T]로 일정하고 방사방향으로 자화된 경우와 착자과정 해석을 통하여 자화방향 및 자화량을 결정한 경우에 대하여 공기중에서의 자속선도를 나타내고 있다.

해석결과 (a)의 경우에는 영구자석 안쪽에도 자속이 많이 나오고 있으나 (b)의 경우에는 안쪽으로는 유출이 거의 없음을 확인할 수 있다. 또한, (b)의 경우에는 자로

의 길이가 짧아짐으로 인하여 바깥쪽 표면으로 나오는 자속량이 많음을 알 수 있다.

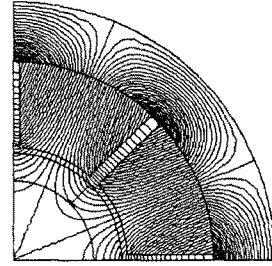
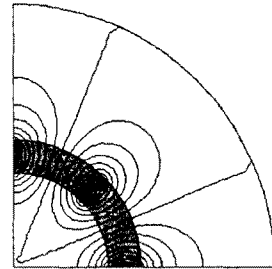
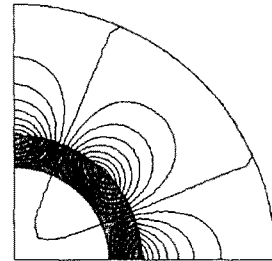


그림 3. 영구자석의 착자분포 해석
Fig. 3 Magnetization distribution analysis of PM



(a) 영구자석의 자화방향이 방사방향이고 자화량이 일정하다고 가정한 경우



(b) 착자과정 해석을 통하여 자화분포를 결정한 경우

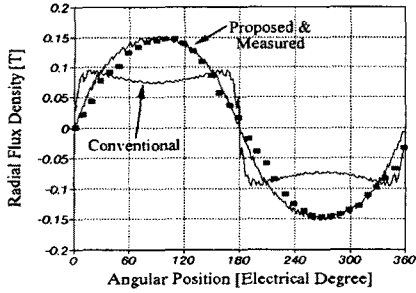
그림 4. 공기중에서의 영구자석의 자속선도 비교
Fig. 4 Comparison of flux lines of PM in air.

그림 5는 영구자석이 공기중에 놓여 있는 그림 4 (a), (b)의 경우에 대하여 바깥쪽과 안쪽의 표면자속밀도(표면에서 0.5 [mm] 떨어진 지점) 분포를 도시한 것이다. 바깥쪽 표면의 자속밀도는 제한한 방법, 즉 착자과정 해석으로부터 자화분포를 고려한 경우가 0.15 [T]로, 방사방향 해석시보다 약 2배 크게 나타났다. 영구자석 안쪽 표면의 자속밀도는 제한방법에서는 약 0.004 [T], 기존방법에서는 약 0.1 [T]로 많은 차이를 보였다. 그림에서 기호(·)로 나타낸 것은 가우스메터로 측정된 결과로서, 제한방법에 의한 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

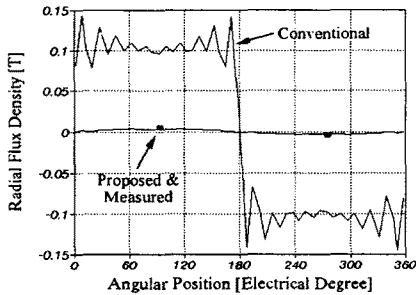
3.2 역기전력 파형비교

그림 6은 BLDC 모터에 전원을 인가하지 않고 75 [rpm]으로 회전시켰을 때의 선간 역기전력 파형을 나타내고 있다. 기존 방법의 결과는 실험파형과 많이 다르며 그 크기도 상대적으로 작게 나타났다. 반면, 제한방법에 의한 해석결과는 실험치와 파형이 유사함을 알 수 있다. 그러나 그 크기는 실험치가 약 39 [%] 크게 나타났는데 이는 실제 모터의 영구자석의 폭이 고정자 코어의 적층 폭보다 크기 때문에 나타난 오버행 효과로 사료되며, 본

BLDC 모터의 특성해석시에는 계산된 영구자석의 잔류 자속밀도값을 39 [%] 증가시켜 해석하였다.

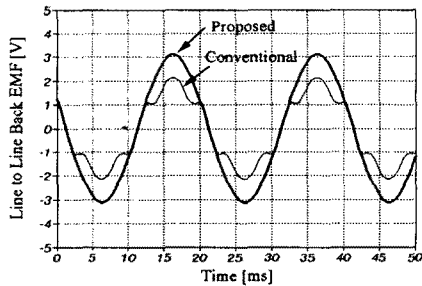


(a) 영구자석 바깥 표면에서의 자속밀도분포

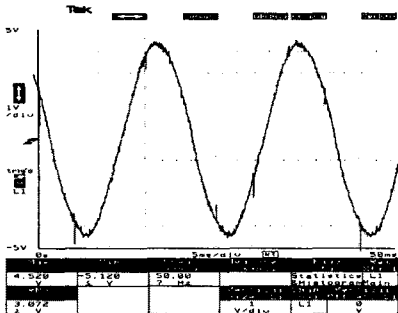


(b) 영구자석 안쪽 표면에서의 자속밀도분포

그림 5. 공기중에서의 표면자속밀도분포(해석치)
Fig. 5 Surface flux density distributions of PM in air (simulation).



(a) 해석 파형



(b) 실험파형

그림 6. 750 [rpm] 회전시의 순간 역기전력 파형

Fig. 6. Line to line back EMF waveforms in case of 750 [rpm]

3.3 해석모델의 특성해석 결과

BLDC 모터의 특성해석시 120도 구형과 전압구동을 구현하기 위하여 회전각에 따라 해당하는 상에 전압을 인가하였으며, 전압이 인가되지 않는 상은 회로저항을 매우 높은 값으로 설정하여 해를 구하였다.

그림 7은 회전속도에 따른 발생 토크 및 DC 입력단의 전류치에 대한 해석 결과 및 실험치를 나타내는 것으로, 해석치와 실험치가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

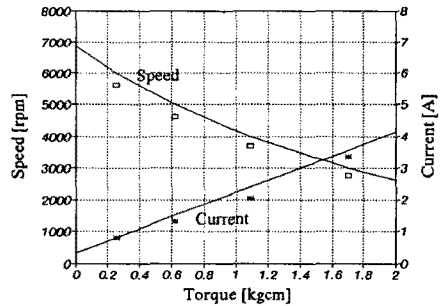


그림 7. 회전속도에 따른 토크 및 전류
Fig. 7 Torque and current according to speed

4. 결 론

본 논문에서는 회전자 철심을 가지지 않는 페라이트 본드 영구자석을 채용한 BLDC 모터의 유한요소 해석을 수행하였다. 회전자 철심을 가지지 않는 영구자석의 경우에는 자화의 세기 뿐만 아니라 자화의 방향도 일정하지 않기 때문에 이를 고려하기 위하여 영구자석의 착자 과정에 대한 해석을 수행, 영구자석의 자화의 세기 및 방향을 결정하였다.

제안방법에 의한 자속분포, 역기전력 해석결과를 자화가 일정하다고 본 경우의 해석결과와 비교하였으며, 역기전력 특성, 회전속도에 따른 모터의 발생 토크 및 전류치를 실험치와 비교함으로써 해석방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

본 방법은 페라이트 자석, 본드 자석 같이 철심을 가지지 않는 자석을 채용하는 모터의 해석 및 설계시 유용하게 이용될 수 있으리라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 박승찬 외, "BLDC 전동기의 회전자 철심의 와전류를 고려한 유한요소해석", 98년도 전기기기연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 74-78, 1998.
- [2] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992
- [3] 정인성, "개선된 수치해석기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석", 한양대학교 박사학위논문, 2000.