

회전자 철심이 없는 내전형 BLDC 모터의 유한요소 해석

論 文

49B-10-3

Finite Element Analysis of a Inner-Rotor Type BLDC Motor without Rotor Core

張 洪 淳* · 鄭 因 城** · 白 壽 鉉***

(Hong-Soon Chang · In-Soung Jung · Soo-Hyeon Baek)

Abstract - In many cases, ferrite magnets or ferrite bonded magnets used in inner-rotor type small brushless DC(BLDC) motors do not have rotor core. The magnetization directions of permanent magnets do not have only parallel or radial direction. In this case, the characteristics of magnets are different from cored type ones which have uniform magnetization direction. In this paper, the magnetization directions and intensities of a ferrite magnet and a ferrite bonded magnet are analyzed by finite element analysis for magnetization procedure. The characteristics of inner-rotor type BLDC motor are analyzed by using the analyzed results. The validity of the analysis method is verified by comparing the analyzed results with measured ones.

Key Words : BLDC motor, ferrite magnet, bonded magnet, magnetization distribution, finite element method.

1. 서 론

BLDC 모터는 일반 DC 모터에 비하여 소음이 적고 경박 단소화가 가능하며 효율이 높아 가전용 기기, OA, 컴퓨터 주변기기 등의 많은 구동분야에 적용되고 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 회토류 자석 분말을 섞어 사출하는 본드(bonded) 영구자석도 다양한 형상의 제작이 용이하고 그 특성이 우수하여 사용이 증가하고 있다. 또한 소형으로 고효율, 고풍력을 얻기 위하여 에너지밀도가 매우 큰 Nd-Fe-B 등의 회토류 재질의 영구자석도 채용되고 있다.

BLDC 모터는 그 구성방식에 따라 원판형(axial type) 및 원통형(radial type)으로 나눌 수 있으며, 원통형은 외전형(outer-rotor type)과 내전형(inner-rotor type)으로 나눌 수 있다. 보통의 경우 회전자축은 계자자속을 만들어주기 위한 영구자석과 자속의 경로를 구성해주기 위한 회전자 철심부로 구성된다. 그러나 페라이트 또는 본드 자석을 사용하는 내전형 모터중에는 제조단가를 낮추고 회전자 관성을 줄이기 위하여 계자철심을 사용하지 않는 경우가 많이 있다. 이러한 경우 영구자석은 평행 또는 방사방향의 일정한 자화분포를 가지지 않게 된다. 따라서, 이러한 모터에 대한 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],[2]. 그러나 이는 실제 영구자석의 표면자속밀도 측정치와 해석치와의 비교를 통하여 자화분포를 결정하는 방법으로, 초기 설계 단계와 같이 해석대상 영구자석이 실제 존재하지 않는 경우에는 적용하기가 곤란하다.

본 논문에서는 페라이트 영구자석과 본드 영구자석을 가지는 내전형 BLDC 모터의 특성을 해석하고자 한다. 본 영구자석은 회전자 철심이 없는 구조로, 평행 또는 방사방향의 일정한 자화분포를 가지지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 영구자석의 착자(이방화)과정에 대한 해석을 통하여 영구자석의 자화방향 및 자화의 세기를 결정하고, 이 정보를 BLDC 모터의 해석에 사용하고자 한다.

2. BLDC 모터의 유한요소해석

2.1 해석모델

그림 1은 해석모델의 개략도를 나타낸다. 8극 12슬롯 구조를 가지고 있으며, 영구자석은 회전자 철심을 가지고 있지 않은 구조이다. 구동방식은 120도 구형과 전압구동방식으로, 위치검출을 위하여 3개의 홀 센서가 부착되어 있다. 해석모델상의 회전자는 동일한 고정자에 대하여 페라이트 영구자석과 본드 영구자석의 두가지로 선정하였다.

* 準 會 員 : 東 國 大 工 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 正 會 員 : 電 子 部 品 研 究 院 傳 任 研 究 員 · 工 博

*** 正 會 員 : 東 國 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2000年 7月 25日

最 終 完 了 : 2000年 9月 5日

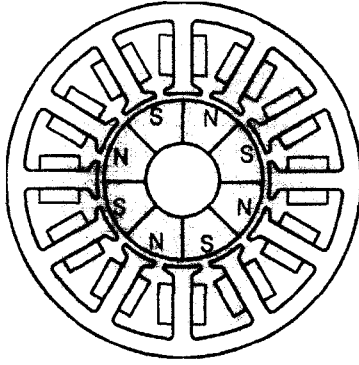
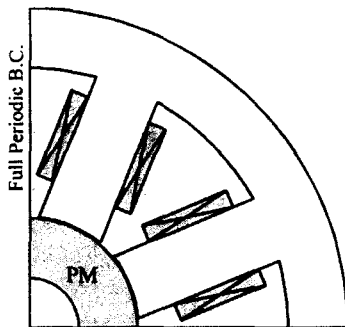


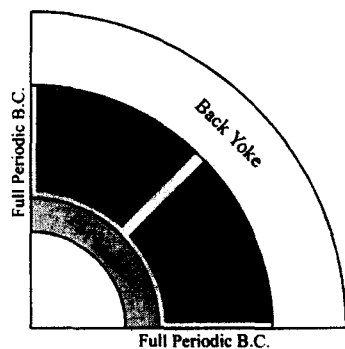
그림 1 해석모델
Fig. 1 Analysis model.

2.2 자화분포 산정을 위한 해석모델의 설정

그림 1에 나타난 바와 같이 해석모델의 영구자석은 자로 구성을 위한 회전자 철심을 가지고 있지 않으며, 착자과정에서도 별도의 철심이 내부에 삽입되지 않는다. 따라서 영구자석 내부의 자화는 이상적인 방사방향으로 분포하지 않게 된다.



(a) 페라이트 영구자석



(b) 본드 영구자석

그림 2 자화분포 산정을 위한 해석모델
Fig. 2 Analysis model for determination of magnetization distribution.

본 논문에서는 영구자석 내부의 자화분포(자화의 세기 및 방향)를 결정하기 위하여 그림 2와 같이 해석모델을 결정, 착자과정을 해석하였다. 그림 2(a)는 페라이트 영구자석의 착자과정 모델로서 착자요크와 여자코일로 구성되어 있다. 그림 2(b)는 본드 영구자석의 착자 모델로서 본드 영구자석의 사출 제작과정시 그림과 같이 Sm-Co(사마리움 코발트) 영구자석으로 자장을 걸어주어 본드 자석을 이방화, 자화시킨다. 영구자석의 자화의 방향은 이와 같은 해석모델에 대한 해석으로부터 결정된 자속의 방향으로 결정한다. 또한, 자화의 세기는 자속밀도가 재료의 최대 잔류자속밀도(B_r) 보다 큰 곳에서는 B_r 로, 작은 곳에서는 그때의 자속밀도값을 잔류자속밀도값으로 결정한다.

2.3 전압방정식을 포함한 유한요소법의 정식화

유한요소 정식화를 위한 2차원 지배방정식은 식 (1)과 같다[3].

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

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[4].

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

여기서, $[S]$ 는 투자율 및 좌표치로 구성되는 계수행렬, $[Q]$ 는 권선영역의 면적과 도체수에 의해 결정되는 행렬,

[*F*]는 권선에 채교되는 자속량과 관계되는 행렬, [*R*]과 [*L*]은 각각 저항과 누설인덕턴스 성분으로 구성된 행렬, [*A*]와 [*I*]는 미지수인 자기벡터포텐셜과 각 상 전류를 나타내는 행렬이다. 또한 [*M*]과 [*V*]는 영구자석의 자화의 세기와 인가전압으로 표현되는 구동행렬을 나타낸다.

그림 3은 영구자석의 자화분포 모델링 과정을 포함한 해석의 순서도를 나타내고 있다. 회전자측의 회전에 따른 해석영역의 요소분할을 위해서는 고정자와 회전자의 요소수는 그대로 유지한 채, 공극상에 이동라인을 두어 이동라인상의 요소만을 재분할하는 방법을 사용하였다[4]. 또한, 발생 토크는 맥스웰 응력법으로 구하였다.

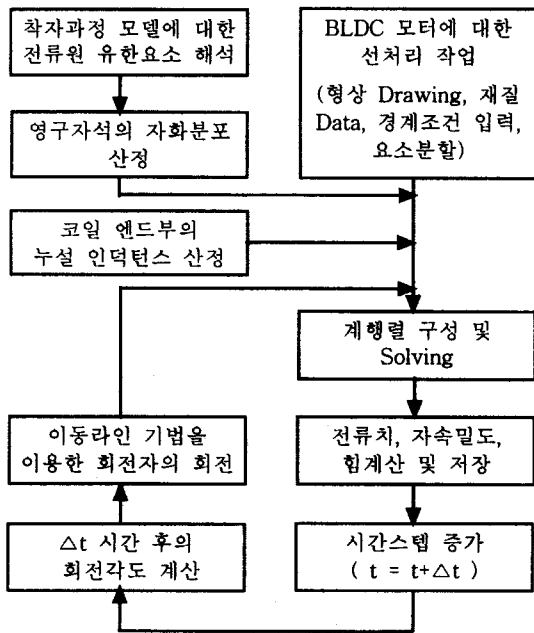
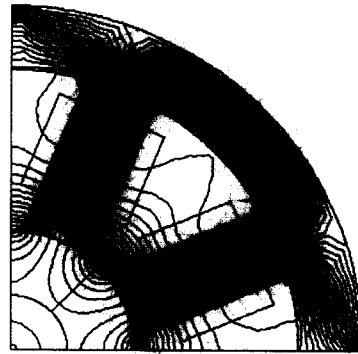


그림 3 BLDC 모터 특성해석의 순서도
Fig. 3 Flowchart for characteristic analysis of BLDC motor.

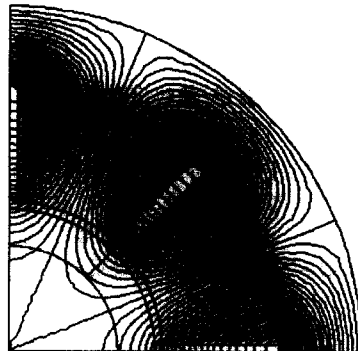
3. 해석결과 및 분석

3.1 영구자석의 자화분포

그림 4는 자화과정 해석시의 자속선도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 자속은 영구자석을 완전히 관통하지 못하고 이웃하는 자극과 경로를 이루게 된다. 본 해석으로부터 영구자석의 자화분포 및 자화의 세기를 결정하였다. 본 해석상의 영구자석 재질은 등방성 페라이트 재질과 페라이트 본드 재질로서, 사양서상의 페라이트와 본드 재질의 잔류자속밀도값은 각각 0.23, 0.298 [T]이다. 이 값들은 각 자성재질이 완전히 착자되었을 때 가질 수 있는 최대의 잔류자속밀도값을 의미한다. 따라서 자화과정 해석 결과 자속밀도가 사양서상의 잔류자속밀도값보다 큰 지점에서는 사양서상의 잔류자속밀도값을, 이보다 작은 지점에서는 해석된 자속밀도값을 그대로 잔류자속밀도값으로 결정하였다.



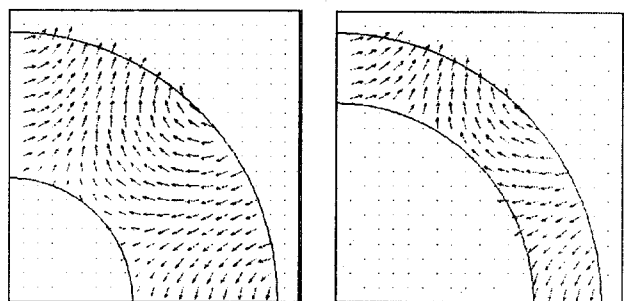
(a) 페라이트 영구자석



(b) 본드 영구자석

그림 4 영구자석 착자과정 해석시의 자속선도
Fig. 4 Flux lines in analysis of magnetization procedure of PM.

그림 5는 자화과정 해석을 통하여 결정된 자화분포를 도시하고 있다. 본드 재질의 경우에는 완전히 자화되었으나 페라이트 영구자석의 안쪽에서는 자화가 완전히 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

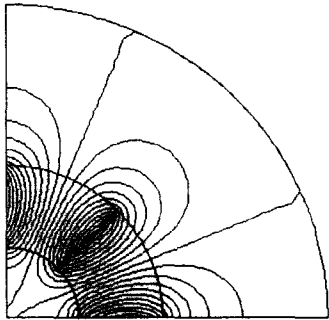


(a) 페라이트 영구자석

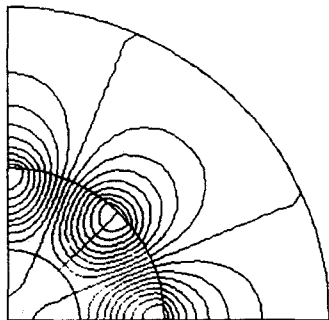
(b) 본드 영구자석

그림 5 착자과정 해석으로부터 결정된 자화분포
Fig. 5 Magnetization distribution determined from magnetization analysis.

그림 6과 그림 7은 영구자석의 자화량이 일정하고 방사방향으로 자화된 경우와 착자과정 해석을 통하여 자화방향 및 자화량을 결정한 경우의 공기중에서의 자속선도를 페라이트와 본드 영구자석에 대하여 나타내고 있다.

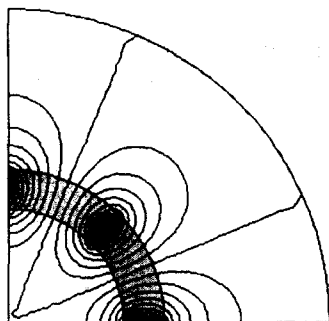


(a) 영구자석의 자화방향이 방사방향이고 자화량이 일정하다고 가정한 경우

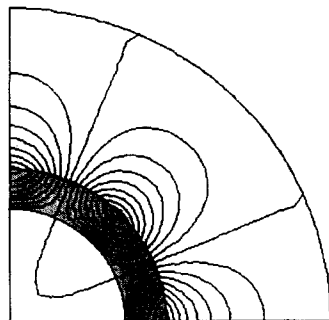


(b) 착자과정 해석을 통하여 자화분포를 결정한 경우

그림 6 공기중에서의 페라이트 영구자석의 자속선도
Fig. 6 Flux lines of ferrite PM in air.



(a) 영구자석의 자화방향이 방사방향이고 자화량이 일정하다고 가정한 경우

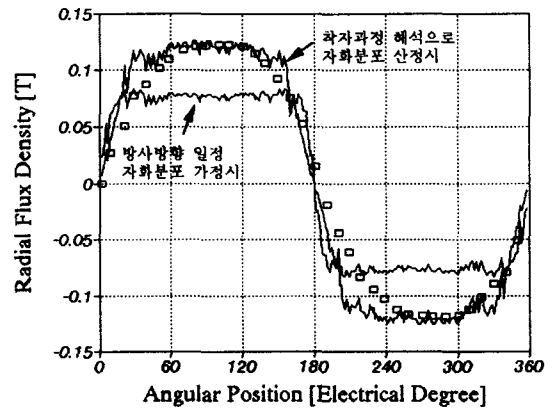


(b) 착자과정 해석을 통하여 자화분포를 결정한 경우

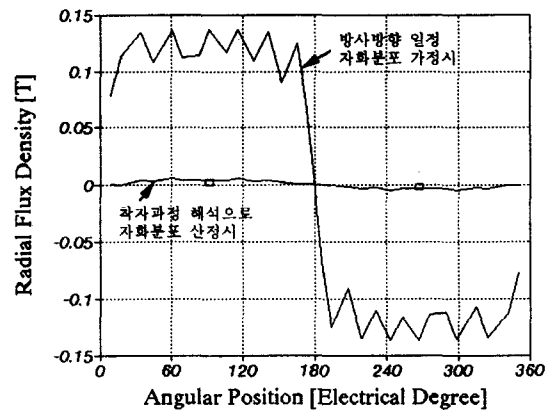
그림 7 공기중에서의 본드 영구자석의 자속선도
Fig. 7 Flux lines of bonded PM in air.

각각의 경우 영구자석 내부의 자속의 양상이 많이 다름을 알 수 있으며, (a)의 경우에는 영구자석 안쪽에도 자속이 많이 나오고 있으나 (b)의 경우에는 영구자석 안쪽에서의 자속의 유출이 거의 없음을 확인할 수 있다. 또한, 전체적인 자화의 세기 면에서는 (b)의 경우가 다소 작음에도 불구하고 자로의 길이가 짧아짐으로 인하여 영구자석 바깥쪽 표면으로 나오는 전체 자속량이 많음을 알 수 있다.

그림 8은 페라이트 영구자석이 공기중에 놓여 있는 그림 6의 경우에 대하여 바깥쪽과 안쪽의 표면자속밀도 (표면에서 0.5 [mm] 떨어진 지점) 분포를 도시한 것이다. 바깥쪽 표면 자극 중앙부의 자속밀도는 제안한 방법, 즉 착자과정 해석으로부터 자화분포를 고려한 경우가 0.125 [T]로, 방사방향 해석시의 0.08 [T]보다 약 1.5배 크게 나타났다. 그림 6을 통하여 예측할 수 있듯이 영구자석 안쪽 표면의 자속밀도는 제안방법에서는 약 0.005 [T], 기존방법에서는 약 0.12 [T]로 많은 차이를 보였다. 그림에서 기호(□)는 가우스미터로 위치에 따라 표면자속밀도를 측정된 결과로 본 연구에서 제안한 방법에 의한 결과와 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다.



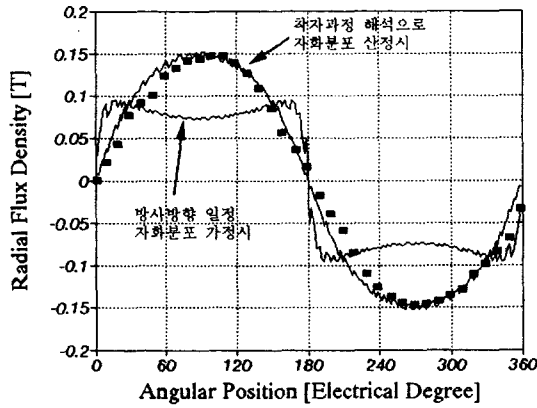
(a) 영구자석 바깥 표면



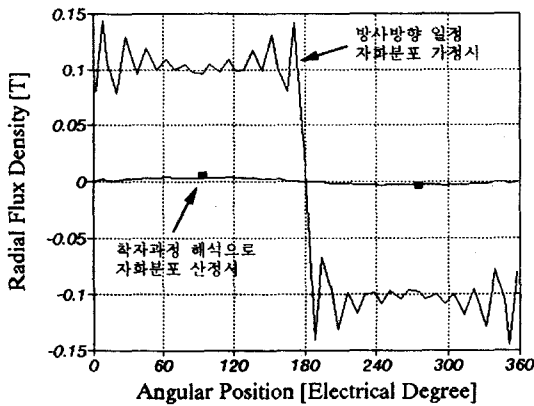
(b) 영구자석 안쪽 표면

그림 8 공기중에서의 페라이트 영구자석의 표면자속밀도분포
Fig. 8 Surface flux density distribution of ferrite PM in air.

그림 9는 본드 영구자석이 공기중에 놓여 있는 그림 7의 경우에 대하여 바깥쪽과 안쪽의 표면자속밀도(표면에서 0.5 [mm] 떨어진 지점) 분포를 도시한 것으로, 방사방향으로 일정한 자화분포를 가지고 있다고 가정하여 해석한 경우에는 실험치와 많은 차이를 보이고 있으며, 자화과정 해석으로부터 자화분포를 고려한 경우의 해석치는 자속밀도의 양상 및 크기면에서 실험치와 매우 유사함을 알 수 있다.



(a) 영구자석 바깥 표면



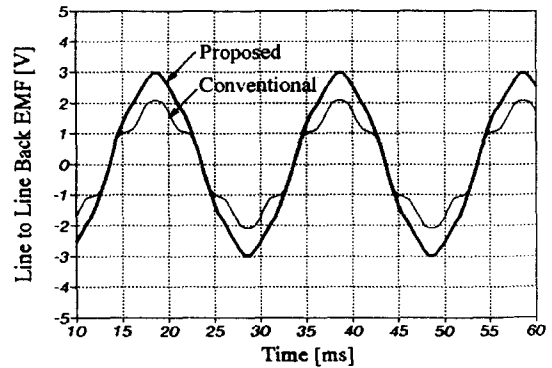
(b) 영구자석 안쪽 표면

그림 9 공기중에서의 본드 영구자석의 표면자속밀도분포
Fig. 9 Surface flux density distribution of bonded PM in air.

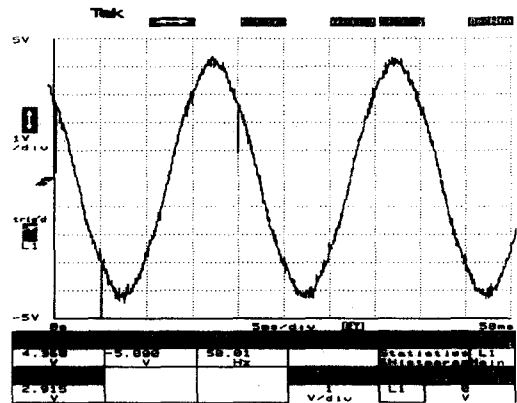
3.2 역기전력 파형비교

그림 10 및 그림 11은 BLDC 모터에 전원을 인가하지 않은 상태에서 750 [rpm]으로 회전시켰을 때의 선간 역기전력의 해석치와 실험치를 나타내고 있다. 기존의 해석방법에 의한 결과는 실험파형과 많이 다르며 그 크기도 상대적으로 작게 나타났다. 반면, 제안 방법에 의한 해석결과는 실험치와 파형이 유사함을 알 수 있다. 그러나 그 크기는 페라이트와 본드 영구자석 모두 실험치가 약 39 [%] 크게 나타났는데, 이는 실제 모터의 영구자석의 폭이 고정자 코어의 직

충폭보다 크기 때문에 나타난 오버행 효과로 사료되며, 본 BLDC 모터의 특성해석시에는 계산된 영구자석의 간류자속 밀도값을 39 [%] 증가시켜 해석하였다.

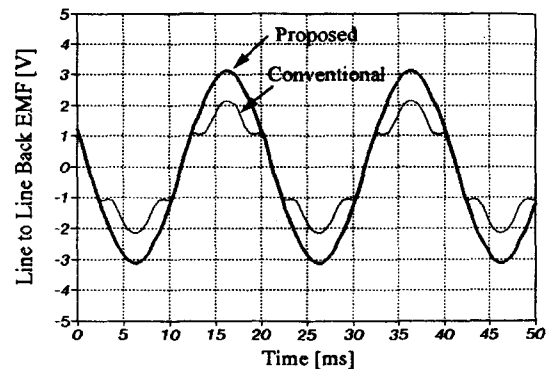


(a) 해석 파형

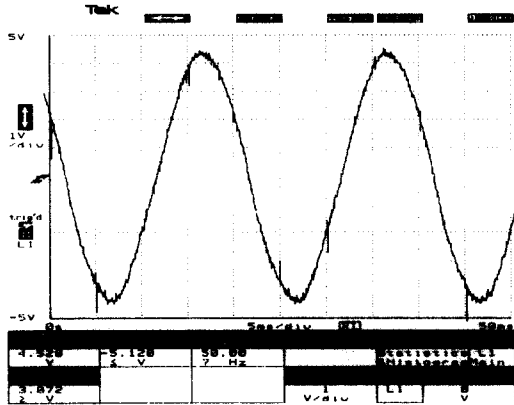


(b) 실험파형

그림 10 750 [rpm] 회전시의 선간 역기전력 파형 (페라이트 영구자석)
Fig. 10 Line to line back EMF waveforms in case of 750 [rpm] (ferrite PM)



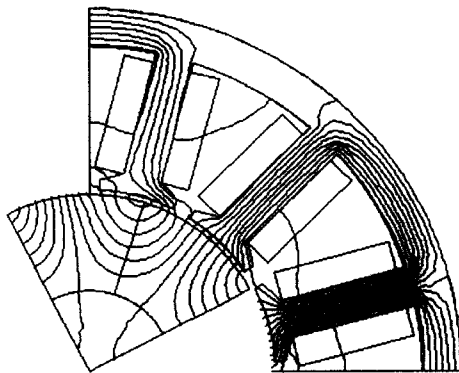
(a) 해석 파형



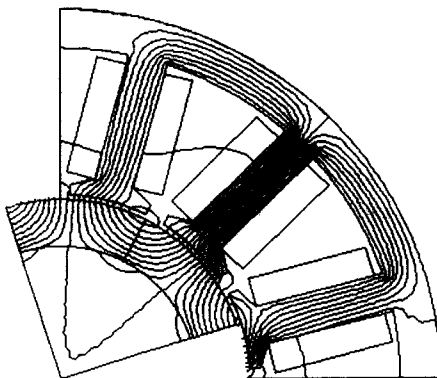
(b) 실험파형

그림 11 750 [rpm] 회전시의 선간 역기전력 파형 (본드 영구 자석)

Fig. 11 Line to line back EMF waveforms in case of 750 [rpm] (bonded PM)



(a) 페라이트 영구자석 채용시



(b) 본드 영구자석 채용시

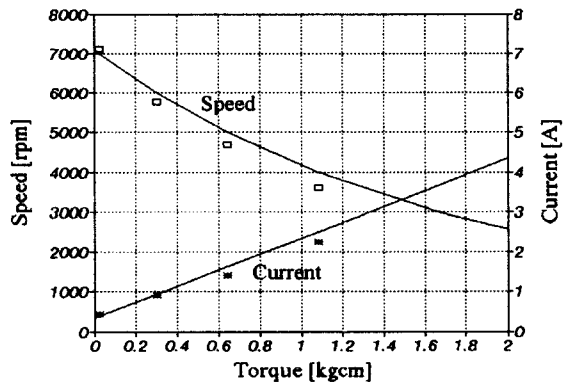
그림 12 해석모델의 자속분포도 (5,000 [rpm])

Fig. 12 Flux distribution of the analysis model.

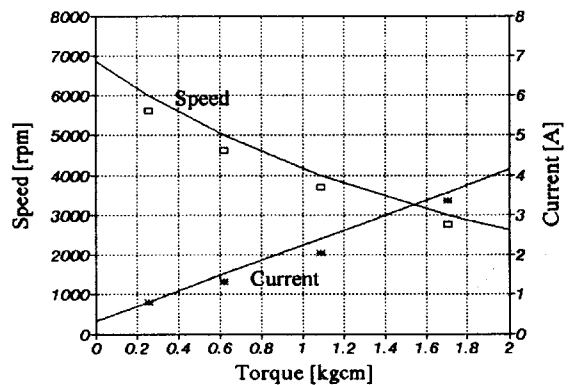
3.3 해석모델의 특성해석 결과

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 12는 5,000 [rpm] 회전시 임의의 회전각에서의 자속선도를 나타내고 있다.

그림 13은 회전속도에 따른 발생 토크 및 DC 입력단의 전류치에 대한 해석 결과 및 실험치를 나타내는 것으로, 해석치와 실험치가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) 페라이트 영구자석 채용시



(b) 본드 영구자석 채용시

그림 13 회전속도에 따른 토크 및 전류

Fig. 13 Torque and current according to speed.

4. 결 론

본 논문에서는 회전자 철심이 없는 영구자석을 채용한 BLDC 모터의 유한요소 해석을 수행하였다. 회전자 철심이 없는 영구자석의 경우에는 자화의 세기 뿐만 아니라 자화의 방향도 일정하지 않기 때문에 이를 고려하기 위하여 영구자석의 착자과정에 대한 해석을 수행하였으며, 이로부터 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 해석방법은 철심이 없는 링형 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] S. C. Park, B. I. Kwon, et al., "Analysis of an exterior-rotor type BLDC motor considering the eddy currents in the rotor steel shell", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 3, pp. 1302-1305, 1999.

[3] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992

[4] 정인성, "개선된 수치해석기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석", 한양대학교 박사학위논문, 2000.

저 자 소 개



장 홍 순 (張 洪 淳)

1978년 한양대 전기공학과 졸업. 1986년 한양대 산업 대학원 전자계산학과 졸업(석사). 1991년 미국 IOWA주립대 경영대학원 졸업(경영학 석사). 2000년 2월 동국대 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

1996년 2월~현재 중소기업청 인력지원과장(부이사관).

Tel : 042-481-4391, Fax : 042-472-3289

E-mail : hschang@digital.smba.go.kr



백 수 현 (白 壽 鉉)

1947년 5월 2일생. 1972년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기동학과 졸업(공학박). 1977년~현재 동국대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 학술위

원회 위원장.

Tel : 02-2260-3347

E-mail : baekuniv@mail.dgu.ac.kr



정 인 성 (鄭 因 城)

1971년 3월 10일생. 1993년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2000년 1월~현재 전자부품연구원 메카트로닉스연구센터 전임연구원.

Tel : 031-610-4363, Fax : 031-610-4366

E-mail : isjung@nuri.keti.re.kr