

Performance Variation with Switching Position of 2-Phase BLDC Motor

張 洪 淳* · 白 壽 鉉** · 鄭 重 基*** · 柳 世 鉉§
 (Hong-Soon Chang · Soo-Hyeon Baek · Jung-Ki Chung · Se-Hyun Rhyu)

Abstract - Recently, the 2-phase brushless DC motor has been used in electric home appliance for low price and low energy consumption. In this paper, we analyzed a 2-phase BLDC motor using time-step finite element method. And the validity of analysis is confirmed by measuring the flux distribution on the surface of permanent magnet and back-EMF. As well, we have calculated the dynamic characteristics of target motor considering the Hall sensor position. So, we have found the optimum switching position, and improved performance of 2-phase BLDC motor.

Key Words : 2-phase, brushless DC motor, back-EMF, time-step finite element method, Hall sensor

1. 서 론

최근에 가전기기 분야의 구동원으로 사용되어지는 소형모터는 소비 전력의 저감화를 요구하기 때문에 영구자석을 갖는 BLDC 모터의 사용을 증가시키고 있다. 일반적으로 BLDC 모터는 고 에너지 밀도의 영구자석을 사용할 수 있기 때문에 효율을 증대시킬 수 있고, 소형화와 장수명의 특성을 기대할 수 있다. 특히, 2상 BLDC 모터는 구조가 간단하여 생산성이 유리하고 제조단가가 저렴하기 때문에 관심이 집중되고 있으며, 많은 부분에서 연구가 진행되어 지고 있다.[1]

일반적으로 2상 BLDC 모터는 구조적 제약으로 인하여 효율이 다소 떨어지는 특성을 갖는다. 따라서, 본 논문에서는 2상 BLDC 모터에 대한 성능향상 연구의 일환으로써 냉각고 냉각 팬 구동용으로 사용되어지는 임의의 철심 형상을 갖는 모터를 대상으로 2차원 시간차분 유한요소법을 이용하여 홀 센서의 위치이동으로 인한 스위칭 시점의 변화에 따른 토크 및 상전류 등의 특성 해석을 하였으며, 또한 회전자 위치에 따른 코깅 토크 특성파형을 분석함으로써 구동시의 동특성 변화를 예측하고자 하였다. 이로부터 주어진 연구대상 모터의 구조로부터 효율향상을 위한 적정의 스위칭 포인트를 찾을 수 있었으며, 실제로 제작한 모델을 대상으로 실험을 통하여 연구의 타당성을 검증하였다.

2. 2상 BLDC 모터의 유한요소 해석

2.1 해석모델

그림 1은 본 논문의 해석대상 모델인 2상 BLDC모터의 구조도를 나타낸다. 그림을 보아 알 수 있듯이 모터의 고정자(Stator)는 조립형 철심 구조로 이루어져 있으며, 회전자는 내부에 철심을 갖지 않는 영구자석 일체형으로 되어있다. 회전자와 접한 고정자 내경면에는 기동시 영구자석의 극 분할점이 홀 센서와 나란한 위치에 닿지 않도록 하여 정지시 영구자석의 초기 위치를 설정하고, 기동력을 얻을 수 있도록 하는 디텐트(Detent) 구를 가지고 있다. 또한, 각상의 여자를 변환하기 위하여 회전자의 위치를 검출할 수 있는 위치센서(Hall sensor)를 가지고 있음을 보이고 있다.

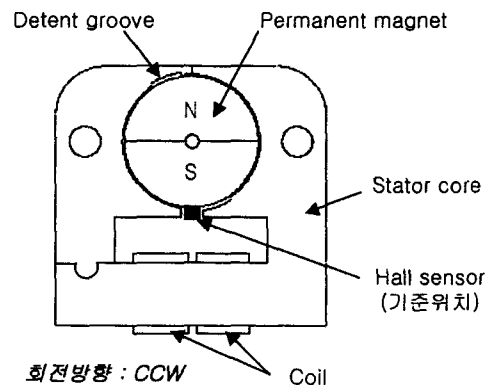


그림 1 해석모델 구조도
 Fig. 1 Configuration of analysis model

* 準 會 員 : 東國大 工大 電氣工學科 博士課程
 ** 正 會 員 : 東國大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 電子部品研究院 首席研究員
 § 正 會 員 : 電子部品研究院 傳任研究員
 接受日字 : 2000年 7月 25日
 最終完了 : 2000年 8月 25日

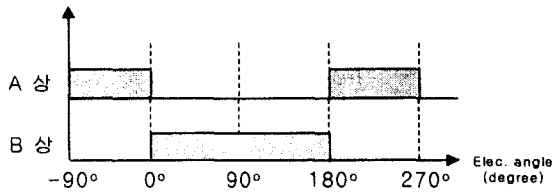


그림 2 여자 순서도
Fig. 2 Excitation sequence

그림 2는 구동을 위한 두 상에 대한 여자 순서도를 나타내며, 이로부터 두 상이 전기각으로 180° 마다 순차적으로 여자가 됨을 알 수 있다.

다음의 표 1은 연구대상 모델의 전기적 및 기계적 제원을 나타낸다.

표 1 해석모델 사양
Table. 1 Specification of the motor

구분	사양	단위
구동전압	12	V
정격속도	2400	rpm
고정자 내경	31.2	mm
고정자 적층폭	10	mm
권선수/상	434	turns/phase
영구자석 종류	Ferrite	-
회전방향	CCW	-
부하	38(fan-4blade)	g · cm

2.2 전압원을 고려한 유한요소 정식화

해석대상 모델을 2차원 유한요소 해석하기 위한 지배방정식은 다음의 식(1)과 같다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = -J - \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial M_{rx}}{\partial y} \right) \tag{1}$$

여기서, A 는 자기벡터포텐셜을 나타내며, J 는 권선의 전류밀도를 나타낸다. 해석대상 모델이 z축 방향으로 무한하다고 가정하면, A 와 J 는 z축 방향으로만 존재하게 된다. 또한, M_r 은 잔류자화량을 나타내며, x, y성분만 존재한다고 본다.

식(1)을 Galerkin법을 사용하여 해석영역 각각의 요소에 정식화하고 이로부터 얻어낸 각각의 요소방정식을 전 요소에 대하여 조립하면, 식(2)와 같은 각 절점에 대한 자기벡터 포텐셜과 각 상전류에 대한 선형 연립방정식을 얻을 수 있다.

$$[[S] \ [C]] \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix} = [G] \tag{2}$$

여기서, $[S]$ 는 절점의 위치와 투자율에 관계된 계수행렬, $[C]$ 는 각 상권선에 흐르는 강제전류밀도의 계수행렬, $[G]$ 는 등가 자화전류 밀도에 해당되는 구동 행렬을 나타낸다. 식(2)에서 미지수로 나타나는 각 상전류 값을 구하기 위하여 다음과 같은 각 상의 전압방정식을 이용하였다.

$$\frac{d}{dt}[\psi] + [L_o] \frac{d}{dt}[I] + [R][I] = [V] \tag{3}$$

여기서, $[V]$ 는 각상의 전압을 나타내며, $[I]$ 는 각상의 권선 전류, $[R]$ 은 각상의 권선저항, $[\psi]$ 는 각상 권선의 쇄교 자속량을 나타낸다. 또한, $[L_o]$ 는 각상 코일단부의 누설인덕턴스를 나타내며 다음과 같이 구할 수 있다.[2]

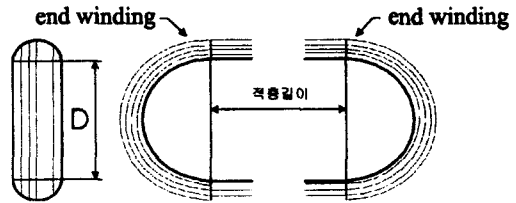


그림 3 코일단부의 권선도
Fig. 3 Configuration of end-winding

$$L_o = \frac{\mu_o N_c^2 D}{2} \ln \left(\frac{4D}{GMD} - 2 \right) \tag{4}$$

여기서, D : end-winding의 직경
 N_c : 상당 권선수
 $GMD = 0.447\sqrt{\text{코일단면적}}$ 를 나타낸다.

식(2)와 식(3)을 결합한 후 시간미분항을 후퇴차분법으로 근사시키면 각 절점의 자기벡터 포텐셜 $[A]$ 와 각 상의 권선에 흐르는 전류 $[I]$ 를 미지수로 하는 식(5)와 같은 시스템 matrix를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [C] \\ [Q] & \frac{[L_o] + \Delta t [R]}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^{t+\Delta t} \\ [I]^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [Q] & \frac{[L_o]}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^t \\ [I]^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [G]^{t+\Delta t} \\ [V]^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \tag{5}$$

3. 2상 BLDC 모터의 특성 분석

3.1 역기전력 특성분석

일반적으로 영구자석을 갖는 모터의 경우 영구자석의 착자요오크 및 방법에 따라 자화분포의 많은 차이를 보이며, 실제로 모터의 특성을 변화하는 큰 요인으로 작용하게 된다. 최근에는 정확한 해석을 위한 영구자석의 자화분포를 알아내고자 많은 연구가 진행되어지고 있다.[1][3]

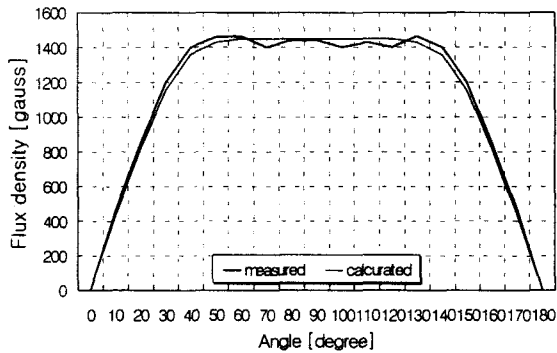


그림 4 표면 자속밀도 분포도
Fig. 4 Surface flux density distribution

그림 4는 연구대상 모델 전동기의 회전자로 사용되어지는 영구자석을 공기중에 놓아둔 상태의 표면자속밀도에 대한 해석 및 실측분포도를 나타낸 것이며, 해석결과 파형이 실측한 특성파형과 잘 일치함을 알 수 있다.

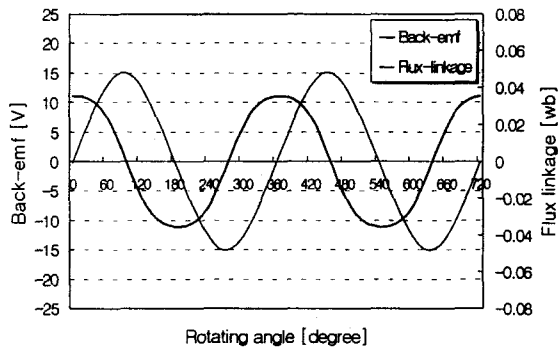


그림 5 역기전력 특성에 대한 해석결과(2400rpm)
Fig. 5 Simulation results for back-EMF(2400rpm)

그림 5는 표 1의 제원을 갖는 해석대상 전동기에 대하여 속도 2400[rpm]으로 회전시킬 경우 회전자 위치에 따라 나타나는 역기전력 특성해석 결과치를 나타내고 있다. 크기는 약 11.5[V]를 보임을 알 수 있다. 또한, 그림 6은 역기전력 특성파형을 실측하기 위한 장치도를 나타낸다. 그림에서 보여주듯이 측정모터의 각 상을 오픈시킨 상태에서 정속 구동용 모터를 측정모터에 직결로 연결시킨 후 일정속도로 회전시켜 측정모터의 코일 양단에 유기되는 전압파형을 오실로스코프를 이용하여 계측하였다.

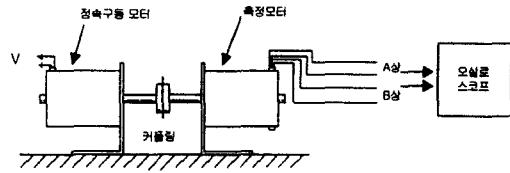


그림 6 역기전력 측정
Fig. 6 Measurement of back-EMF

이로부터 얻어낸 결과는 그림 7과 같다. 최고치는 약 11.4[V]를 나타내는 것을 확인 할 수 있으며, 그림 5의 해석치 파형과 그림 7의 실측치 파형을 비교하여 볼 때 역기전력의 크기와 파형의 양상이 비슷하게 일치함을 알 수 있다.

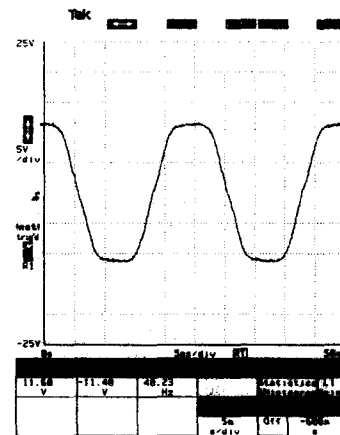


그림 7 역기전력 특성에 대한 실측결과(2400rpm)
Fig. 7 Test results for back-EMF(2400rpm)

3.2 스위칭 위치변화에 따른 동특성 분석

그림 8은 인가전압 12[V], 속도 2400[rpm]에서 홀 센서가 그림 1과 같은 기준위치에 있고, 회전자가 30도 회전하였을 경우 실제의 스위칭 순서를 고려하여 여자될 시켰을 경우의 해석을 통하여 얻어낸 자속선도를 나타낸다. 또한, 그림 9는 동일한 조건에서의 자속밀도 분포도를 나타낸다.

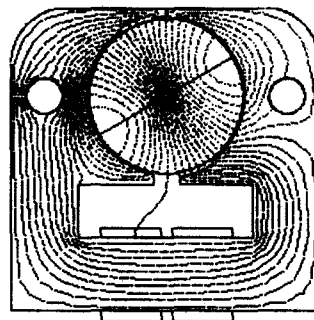


그림 8 자속선도 분포도(30 도)
Fig. 8 Flux line distribution(30 deg.)



그림 9 자속밀도 분포도(30도)
Fig. 9 Flux density distribution(30 deg.)

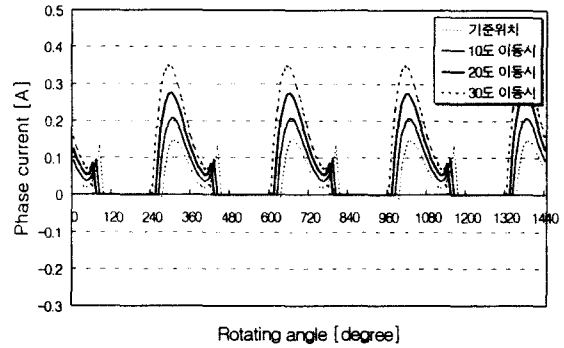


그림 11 상전류 특성곡선
Fig. 11 Phase current waveform(2400rpm)

그림 10과 11은 정격속도 2400[rpm]에서 홀 센서가 회전 방향의 반대방향으로 이동함에 따라 나타나는 토오크 및 상전류 특성에 대한 해석치 파형을 나타낸다. 그림 10에서 알 수 있듯이 홀 센서가 기준위치에 있을 때에는 토오크 리플도 크고 평균치가 다른 위치에서의 토오크 값보다 다소 떨어짐을 알 수 있다. 이것은 특성 파형의 양상을 비교하여 볼 때, 코깅 토오크로 인한 발생 토오크의 저감을 막을 수 있는 전류의 확보시기가 다른 경우에 비하여 다르기 때문이라 사료된다. 이에 비하여 홀 센서가 20도의 위치에 놓여졌을 때에 정격 토오크 값을 얻을 수 있고, 토오크 리플도 적게 나타남을 확인 할 수 있다. 또한, 30도의 위치에서는 20도의 토오크 값보다 최대치는 높지만, 평균치는 큰 폭의 증가율을 나타내지는 않음을 알 수 있다.

그림 11은 동일한 조건에서의 상전류 특성을 나타낸다. 홀 센서를 이동함에 따라 기준점에 위치하였을 경우에 비하여 여자 초기에 많은 전류를 확보하며, 여자 후반부에서의 전류파형이 완만하게 나타남을 보이고 있다. 이로부터, 회전자의 위치에 따른 발생 토오크의 특성이 바뀌게 됨을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 홀 센서가 회전방향의 반대방향으로 20도의 지점에 위치하였을 경우에 정격 토오크 및 리플이 저감된 양호한 특성의 토오크를 얻을 수 있음을 해석을 통하여 검토 할 수 있었다.

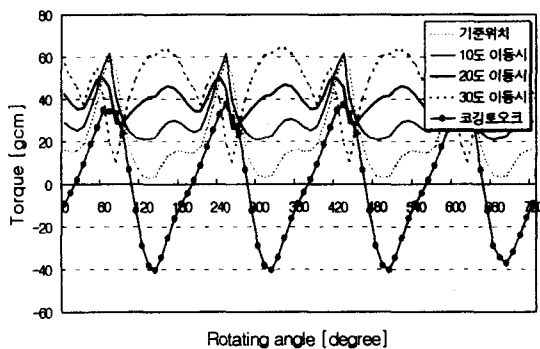
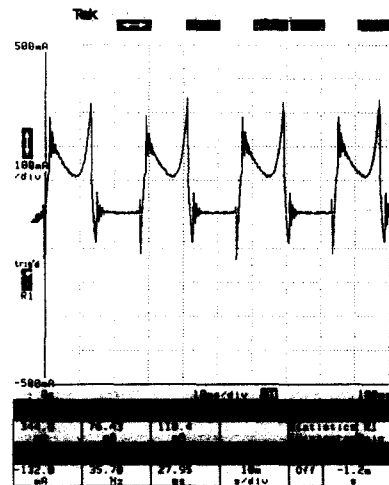
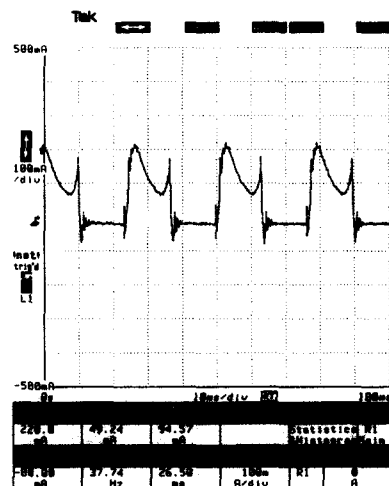


그림 10 토오크 특성곡선(2400rpm)
Fig. 10 Torque waveform(2400rpm)

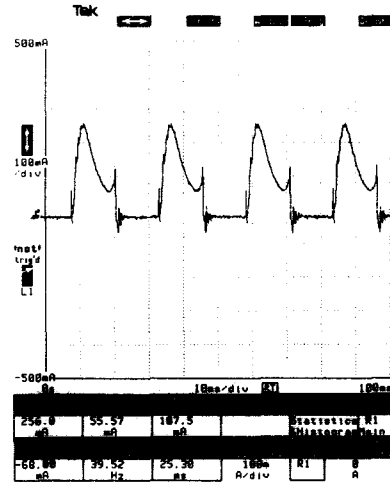
다음의 그림 12는 실제의 팬 부하를 가지고 홀 센서를 이동하였을 경우 갖게되는 상전류 파형에 대한 실측파형을 나타낸다.



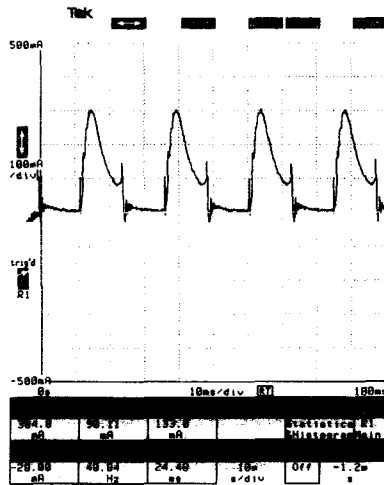
(a) 기준위치(2148rpm)



(b) 10도 이동시(2262rpm)



(c) 20도 이동시(2400rpm)



(d) 30도 이동시(2450rpm)

그림 12 홀 센서 이동에 따른 상전류 특성
Fig. 12 Characteristics of phase current with displacement of Hall sensor

시뮬레이션 결과와 같이 그림 12의 상전류 실측파형은 홀 센서를 이동함에 따라 기준점에 위치하였을 경우에 비하여 리플이 감소하며, 스위칭 초반부에 많은 양의 전류를 확보함을 알 수 있다. 실제로 홀 센서가 기준위치에 비하여 10도의 위치로 이동하였을 경우 전류치는 다른 위치보다 작은 값을 보이지만 정격속도에 미치지 못함을 알 수 있다. 이에 비하여 20도의 위치에서는 10도의 위치에서 보다 전류치는 약간 높게 나타나지만 다른 위치의 경우에 비해서는 작은 값의 크기를 갖으며, 정격속도 2400[rpm]을 갖게됨을 알 수 있다. 또한, 30도의 위치에서는 정격속도를 얻을 수 있지만, 전류치가 20도의 경우에 비하여 상대적으로 높게 나옴을 확인할 수 있다.

다음의 그림 13과 14는 실험을 통하여 얻어낸 속도에 따른 토크 및 입력전류 특성곡선을 나타낸다.

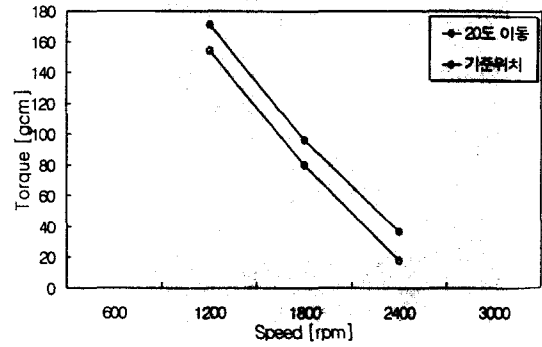


그림 13 속도-토크 특성곡선
Fig. 13 Characteristics of N-T curve

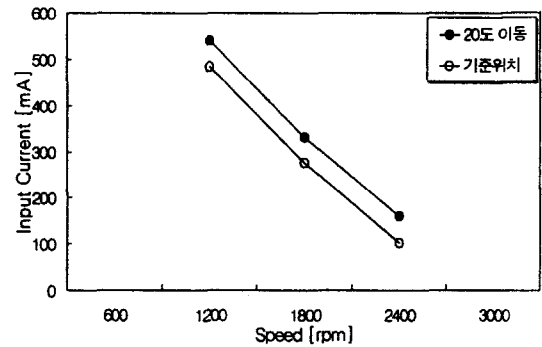


그림 14 속도-전류 특성곡선
Fig. 14 Characteristics of N-I curve

이상의 실험을 통하여 얻어낸 특성결과를 가지고 입력전압과 전류 및 출력을 가지고 효율을 산출하고 이를 정격속도를 기준으로 정리하면 다음의 표와 같다.

표 2 홀 센서 위치에 따른 특성비교

Table. 2 Characteristics with position of Hall sensor

구분	속도 (rpm)	토크 (g·cm)	전류 (mA)	효율 (%)
기준 위치	2400	18	102	36
20도 이동	2400	37	160	47

위의 표에서 나타내듯이 정격속도, 2400[rpm]에서 홀 센서가 기준위치에 있을 경우의 모델은 효율은 약 36% 이며, 이에 비하여 홀 센서가 20도 이동한 위치에서의 효율은 약 47%로 기준모터에 대하여 동일한 입력을 주었을 경우 약 11%의 증가된 효율특성을 가짐을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 영구자석을 회전자로 갖는 2상 BLDC 모터의 성능향상에 관한 연구의 일환으로써 스위칭 위치에 따른 특성변화를 고찰하였으며, 이를 위하여 2차원 시간차분 유한요소법을 이용하였다. 연구대상 모델이 갖는 철심 구조

에 대하여 홀 센서 위치이동에 따른 토오크 및 전류특성과 회전자 위치에 따른 코깅 토오크 특성파형을 분석함으로써 최대의 효율을 얻을 수 있는 최적의 스위칭 포인트를 얻어 낼 수 있었으며, 실제로 실험을 통하여 검증한 결과 기존의 모델에 비하여 홀 센서가 약 20도 이동하여 스위칭을 하였을 경우 효율이 11%정도 상승함을 확인 할 수 있었다. 이로부터 철심의 구조와 형상에 따른 코깅 토오크 및 발생 토오크의 상호관계를 정확히 분석하고, 스위칭 위치에 따른 특성 분석을 통하여 적절한 스위칭 위치를 선정하는 경우 모터의 성능개선이 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

[1] S.C.Park, T.H.Yoon, B.I.Kwon, Y.S.Jin, "Finite Element Analysis of a Two-Phase Brushless DC Motor", SMIC'99, 1999

[2] TJE Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, OXFORD, 1994
 [3] 정인성 외, "영구자석의 자화분포를 고려한 내전형 BLDC 모터의 유한요소 해석", 2000년도 전기기기연구회 춘계학술대회 논문집", pp. 208-211
 [4] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992
 [5] 한국전력공사 기술품질처, 전력산업 전기전자분야 용어사전, 1999.7

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



정 중 기 (鄭 重 基)

1982년 서울대 기계설계학과 졸업. 1982년~1994년 금성통신(주) 책임연구원. 1994년~1999년 전자부품연구원 정밀기기연구센터 선임연구원. 2000년~현재 전자부품연구원 메카트로닉스연구센터 수석연구원

Tel : 031-610-4367, Fax : 031-610-4366
 E-mail : chungjk@nuri.keti.re.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(공학). 1977년~현재 동국대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 학술

위원회 위원장.
 Tel : 02-2260-3347
 E-mail : baekuniv@mail.dgu.ac.kr



류 세 현 (柳 世 鉉)

1996년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~1999년 (주)삼흥사 위촉연구원. 2000년 1월~현재 전자부품연구원 메카트로닉스연구센터 정밀기기기술그룹 전임연구원

Tel : 031-610-4251, Fax : 031-610-4366
 E-mail : rhyush@nuri.keti.re.kr