

단상 BLDC 전동기의 토오크 리플 저감을 위한 공극 설계

論 文
51B-2-1

Design of Air Gap for Reducing Torque Ripple in a Single-Phase BLDC Motor

梁炳烈* · 權丙一** · 朴勝燦***

(Byoung-yull Yang · Byung-Il Kwon · Seung-Chan Park)

Abstract - Most single-phase brushless DC (BLDC) motors have unequal air gap to eliminate the dead-point where the developed torque value is zero. However this partial increase of the air gap deteriorates the motor characteristics in cogging torque. Thus in this paper a new topology of unequal air gap is proposed to solve this problem. The topology is to use some pairs of equal or unequal air gaps. As a result, it is proved by the finite element analysis and experimental results that the single-phase BLDC motor with the proposed air gap topology is very effective in reducing the cogging torque.

Key Words : cogging torque, dead point, finite element analysis, Single-phase brushless DC motor, unequal air gap.

1. 서 론

BLDC 전동기는 영구자석에 의한 자기적 에너지 밀도가 높아 효율이 좋으며 속도제어 또한 용이하다. 따라서, 최근에는 냉장고 및 에어컨 등의 팬 구동용 단상 유도전동기가 단상 BLDC 전동기로 대체되는 추세에 있다. 그러나, 단상 BLDC 전동기는 단상의 전원공급에 의하여 발생 토오크가 영이 되는 회전자의 위치, 즉 dead-point가 생기는 단점을 가지고 있다. 이러한 dead-point는 공극을 불평형하게 설계함으로써 제거할 수 있지만, 공극 길이를 불평형하게 설계하면 코깅 토오크가 커지고 평균 토오크가 줄어드는 현상이 부수적으로 발생하게 된다[1]-[6].

본 논문에서는 기존의 단상 BLDC 전동기에서와 같이 공극을 일률적으로 불평형하게 하는 대신, 평형 및 불평형 공극의 조합을 갖는 새로운 공극 길이를 설계하여 코깅 토오크를 감소시키며, 한 주기내의 최소 발생 토오크 값을 증가시키는 방법을 제안한다. 설계 예로서는, 링 형태의 영구자석 회전자를 가지는 inner-rotor 방식의 단상 8극 8슬롯 BLDC 전동기의 공극을 설계한다. 또한, 제안한 방법에 의하여 공극 길이를 새롭게 설계한 전동기는 코깅 토오크, dead-point 등의 특성에 있어서 일률적인 불평형 공극을 갖는 기존의 전동기보다 우수한 특성을 가짐을 유한요소해석 및 실험결과로부터 입증한다.

2. 불평형 공극 길이의 설계

단상 BLDC 전동기는 발생 토오크가 영이 되는 회전자 위치점인 dead point가 발생하게 되는데, 이를 제거하기 위한 방법으로서 불평형 공극을 두는 경우가 가장 일반적이다. 그림 1은 8극 8 슬롯의 경우에 대하여 불평형 공극을 두는 기존의 방법을 보여준다. 그림 1에서와 같이 8개의 고정자 치와 회전자간의 공극 길이를 일률적으로 불평형하게 하는 경우에는 부분적 공극 길이 증가에 의하여 자기저항 편차가 상승하게 되어 코깅 토오크가 커지게 되고 효율이 감소하는 단점이 있다.

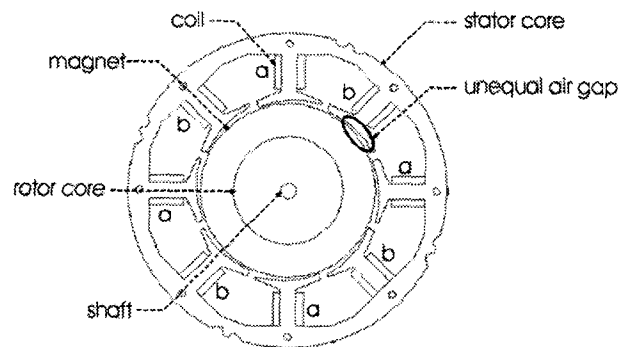


그림 1 8극 8슬롯을 갖는 단상 BLDC 전동기의 구조
Fig. 1 The structure of a BLDC motor with 8 poles and 8 slots

* 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 東洋大 컴퓨터制御工學科 專任講師 · 工博

接受日字 : 2001年 02月 01日

最終完了 : 2001年 12月 18日

따라서, 본 논문에서는 단상 BLDC 전동기의 고정자 치와 회전자간의 공극길이를 일률적으로 불평형하게 하는 기존의 방법과는 달리, 그림 2에서 보이는 바와 같이 평형 및 불평형 공극의 조합을 갖는 공극 설계를 제안하고, 기존의 전동기와 특성을 비교한다. 한편, 표 1에 전동기의 사양을 나타내었다.

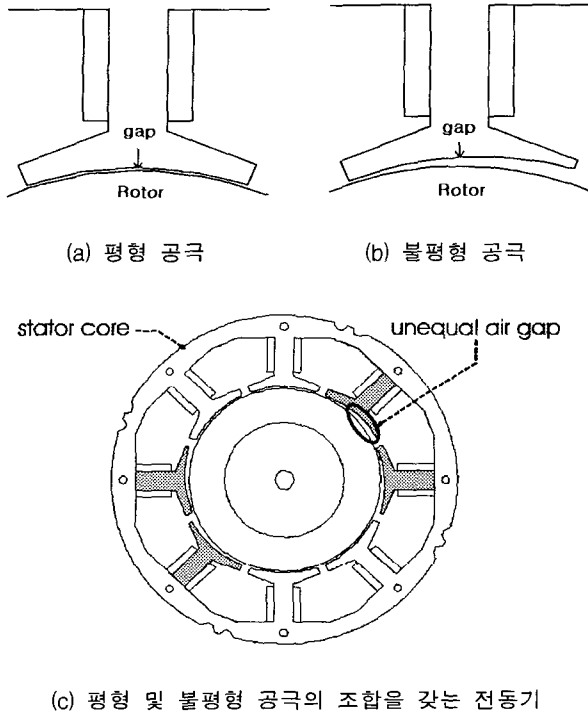


그림 2 제안한 고정자 치와 회전자 간의 공극 형상
 Fig. 2 The proposed shape of the air gap between the stator teeth and the rotor surface

표 1 전동기 사양
 Table 1 Specifications of the motor.

구분	세 원
고정자	권선저항 : 67.37 [Ω] 상당권선수 : 550 [turn] 슬롯수 : 8 [개] 적층폭 : 4 [mm] 고정자 외경 : 58 [mm] 고정자 내경 : 35 [mm]
공극	공극 길이 : 0.3~1.0 [mm]
회전자 및 영구자석	극 수 : 8 영구자석두께 : 6 [mm]
고정자 철심재료	S60
최대 입력	5.4 [W]
정격 속도	1900±100 [rpm]

3. 유한요소법을 이용한 특성해석

3.1 유한요소 정식화

단상 BLDC 전동기의 해석 영역에 대한 자기벡터 포텐셜 A 를 계변수로 한 2차원 지배방정식은 다음과 같다[7,8].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\frac{N}{S} I_a - \frac{N}{S} I_b - \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서, I_a , I_b 는 전류, N 은 권수, S 는 전류가 흐르는 권선 면적, μ 는 투자율, M_x , M_y 는 x 및 y 축 방향으로의 자화의 세기이다. Galerkin법을 이용하여 요소내에서 각 절점에 대한 가중잔차를 구하면 식 (2)와 같다.

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

($i=1,2,3$)

각 요소에 대하여 식 (2)를 적용한 후 모든 요소에 대하여 조합하면 다음 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$KA_{t+\Delta t} + MI_{t+\Delta t} = P_{t+\Delta t} \quad (3)$$

3.2 회로 방정식

식 (3)과 같이 자기벡터포텐셜과 권선 전류를 미지수로 해를 구하는 경우 전압 방정식과 연립하여 식을 풀어야 한다. 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.

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

$$\frac{d\Phi_b}{dt} + L_o \frac{dI_b}{dt} + R_b I_b = V_b$$

여기서, Φ 는 각 권선을 쇄교하는 자속이고, L_0 는 코일 단부의 누설 인덕턴스이며, I 는 권선 전류 그리고, V 는 인가전압이다. 각 상의 Φ 는 $\Phi = N\phi$ 의 관계를 가지며, 1 turn의 쇄교 자속량 ϕ 를 구하기 위하여 다음 식 (5)를 사용한다.

$$\phi = \int_S B \cdot ds = \oint_l A \cdot dl \quad (5)$$

따라서, 해석모델의 적층폭이 D 이고 전류가 흐르는 권선 면적을 S , 권선의 turn수가 N 일 때, 각 권선을 쇠교하는 자속량은 식 (6)과 같이 자기 벡터 포텐셜로부터 구할 수 있다.

$$\phi = \pm D \frac{N}{S} \sum_{e=1}^{w_m} \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta_i^e}{3} A_{ie} \quad (6)$$

여기서, Δ^e 는 권선면적 S 내의 각 요소 면적이고, w_m 은 요소수이며, \pm 는 상전류의 방향을 나타낸다. 식 (4)~식 (6)에서 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} \mathbf{Q} \mathbf{A}_{t+\Delta t} + \mathbf{Z} \mathbf{I}_{t+\Delta t} \\ = \mathbf{V}_{t+\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{L} \mathbf{I}_t + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{Q} \mathbf{A}_t \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, \mathbf{Q} 는 식 (6)을 이용한 역기전력에 관계된 계수 행렬이고 \mathbf{Z} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} L + \Delta t R_a & L + \Delta t R_b \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

식 (3)과 식 (7)을 결합한 후, 전체 계방정식을 구성하면 식 (8)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{M} \\ \mathbf{Q}/\Delta t & \mathbf{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}/\Delta t & \mathbf{L}/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (8)$$

3.3 토오크 계산

회전자 표면에서 작용하는 영구자석의 힘은 Maxwell 응력을 이용하여 구할 수 있다. 회전자 표면의 미소 경로상을 통과하는 자속밀도 B 의 법선성분과 접선성분의 평균치를 각각 $\overline{B_n}$ 와 $\overline{B_s}$ 라 할 때, 회전자 표면에 작용하는 토오크는 식 (9)로 표현된다.

$$T = r \sum_{i=1}^u \frac{1}{\mu} [\overline{B_n^{(i)}} \overline{B_s^{(i)}}] (D) [Nm] \quad (9)$$

여기서, r 은 회전자의 반지름, u 는 미소 적분 경로의 수, D 는 철심의 적층폭이다.

4. 특성해석 결과 및 고찰

4.1 자화 분포

BLDC 전동기의 특성을 정확히 해석하기 위하여 영구자석

의 자화분포를 구하는 것이 필요하다. 그러나 영구자석의 자화분포를 정확히 측정하는 것은 어렵기 때문에, 해석시 입력한 자화분포에 의한 영구자석 표면 자속밀도 분포와 가우스 미터로 측정된 분포 값을 비교하여 시행착오적으로 자화분포 값을 구하였다. 식 (10)은 본 논문에서 해석시 사용한 자화분포를 표현하는 수식이다.

$$M_\theta = M_r \sin \theta \quad (10)$$

여기서, M_r 은 0.4 [T], θ 는 영구자석 내부의 위치 점을 나타내는 각도이다.

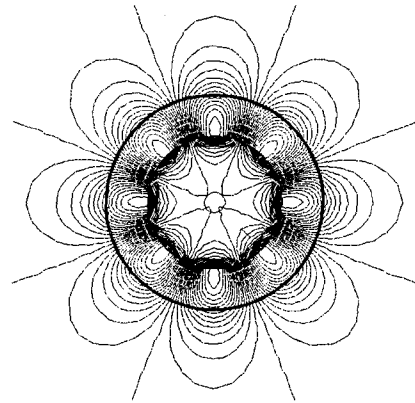


그림 3 회전자의 자속 분포
Fig. 3 The magnetic flux distribution of the rotor

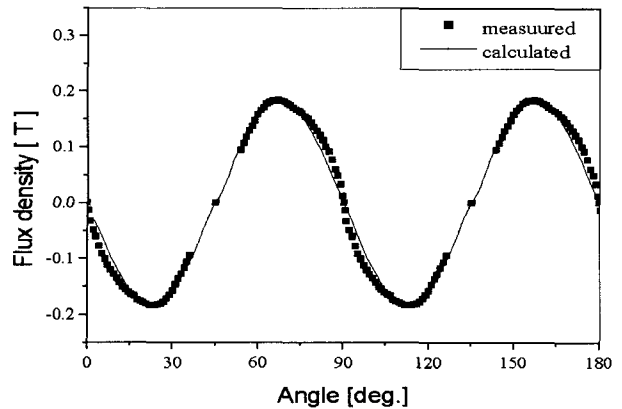


그림 4. 영구자석의 표면 자속밀도
Fig. 4 The magnetic flux density at the permanent magnet surface

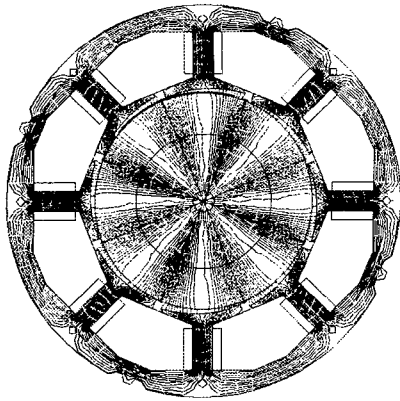
그림 3은 식 (10)으로 표현되는 자화 분포를 입력으로 한 유한요소해석 결과로부터 얻은 영구자석만에 의한 자속 분포도이고, 그림 4는 영구자석의 표면 자속밀도 분포에 대하여 해석치와 실험치를 나타낸 그래프이다. 그림으로부터 실제의 자속밀도 분포는 왜형이 일어나서 해석치에는 오차가 발생하고 있으나, 근소함을 알 수 있다. 그러나, 영구자석의 자화분포를 정확히 구하기는 대단히 어려우므로, 본 논문에서는 영구자석 내부의 자화분포가 식 (10)에 의하여 결정된다고 가

정한다.

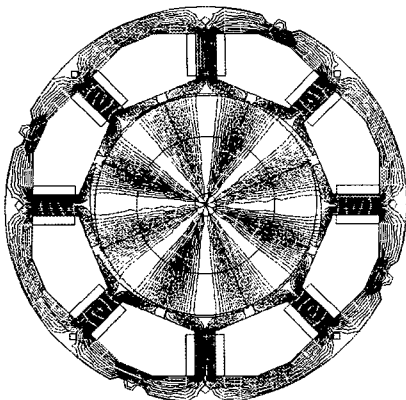
4.2 토오크 해석 특성

그림 5는 기존 전동기와 제안한 전동기에 대한 유한 요소 해석 결과로서 자속 분포를 보여준다. 그림 6과 그림 7은 제안한 평형 및 불평형 공극을 조합한 경우와 불평형 공극을 일률적으로 한 경우에 대하여 코깅 토오크와 토오크 리플을 해석한 결과이다. 그림 6 및 그림 7로부터 제안한 평형 및 불평형 공극을 갖는 전동기는 기존의 전동기보다 코깅 토오크는 약 48% 감소되고, 전원을 공급하였을 때의 토오크 리플은 약 40% 감소되어 최소 토오크 발생값이 약 6 [g·cm] 증가함을 알 수 있다. 따라서, 부하 조건 변동에 따라 회전자가 정지될 수 있는 가능성이 감소된다.

그림 8은 코깅 토오크의 파형을 실측한 결과이며, 이로부터 그림 6에서 보인 해석 결과가 정확하였음을 입증할 수 있다.

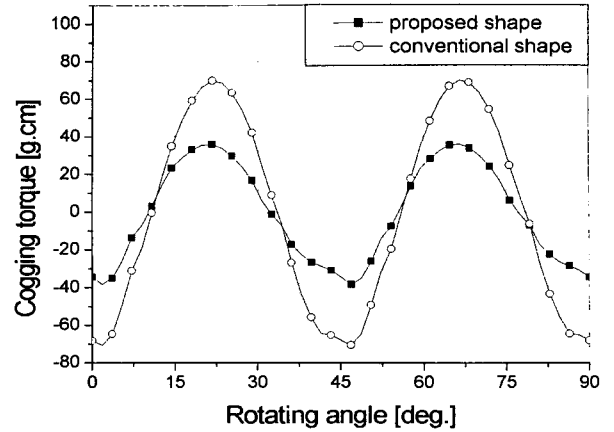


(a) 기존모델

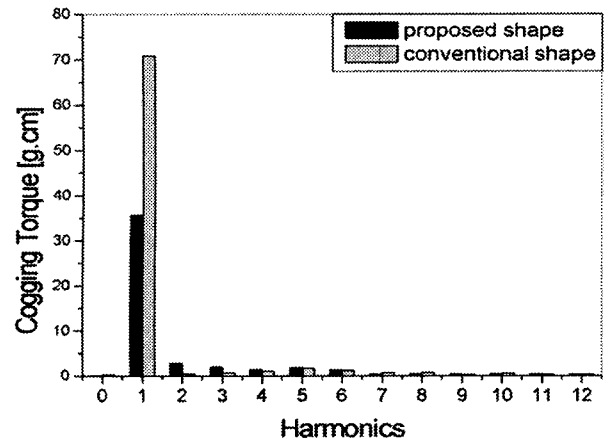


(b) 제안모델

그림 5 자속 분포
Fig. 5 Flux distributions

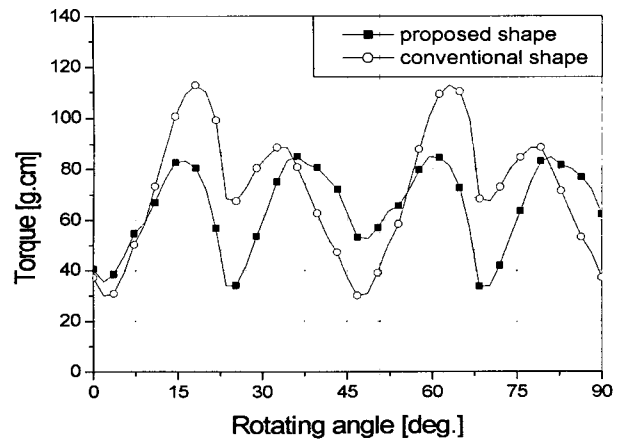


(a) 코깅 토오크



(b) 코깅 토오크 고조파 분석

그림 6 기존 전동기와 제안한 전동기의 코깅 토오크 비교
Fig. 6 The comparison of cogging torque between conventional and proposed motor

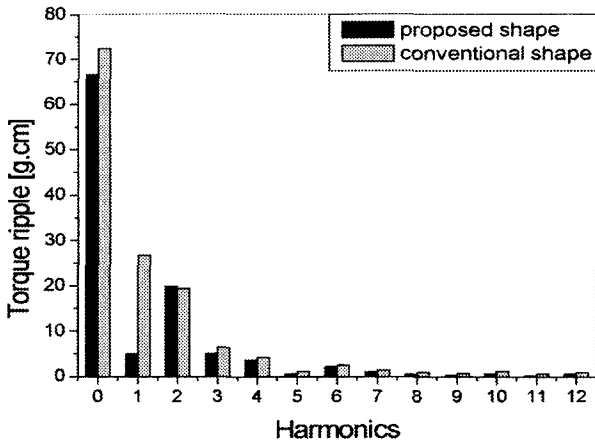


(a) 토오크 리플

5. 결 론

본 논문에서는 단상 BLDC 전동기의 고정자 치와 회전자 표면간의 공극 길이를 일률적으로 불평형하게 하는 기존의 공극 설계법과는 달리, 평형 공극과 불평형 공극의 조합을 이용하는 공극 설계법을 제안하였다. 제안한 공극 설계의 적용 예로서는 8극 8슬롯의 단상 전동기에서 평형 공극을 4부분, 불평형 공극을 4부분으로 하는 공극 배치를 구성한 것이다.

유한 요소 해석 결과로부터 제안한 공극 설계는 기존의 방법에 의하여 설계된 전동기보다 코깅 토크와 토크 리플이 각각 약 48% 및 40% 감소함을 알 수 있었으며, 최소 토크 오크값은 약 6 [g·cm] 증가하였다. 따라서, 단상 BLDC 전동기에서 평형 및 불평형 공극을 조합하여 공극 길이를 설계함으로써 코깅 토크와 토크 리플 특성을 향상시킬 수 있었다.



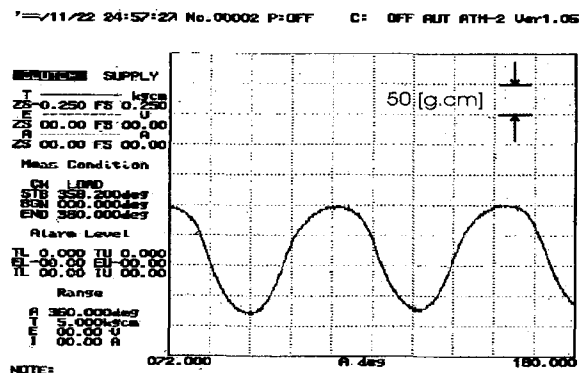
(b) 토크 리플 고조파 분석

그림 7 기존 전동기와 제안한 전동기의 토크 리플 비교 (1800rpm)

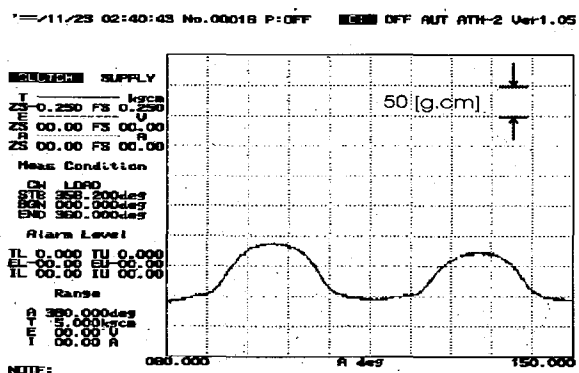
Fig. 7 The comparison of torque ripple between conventional and proposed motor

참 고 문 헌

- [1] 박승찬, 윤태호, 권병일, 윤희수, 원서홍, "회전자 철심의 와전류를 고려한 BLDC 전동기의 유한 요소 해석", 대한전기학회논문지, 제48권, 제3호, pp.110-117, 1999
- [2] 박승찬, 윤태호, 권병일, 윤희수, 원서홍, "하드디스크 구동용 BLDC 전동기의 전자력 해석에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 제48권, 제9호, pp.476-483, 1999
- [3] Der-ray Huang, Tai-fa Ying, Shyh-jier Wang, Chi-mou Zhou, Yin-kwang Lin, Kai-wen Su, and Chung-i G. Hsu, "Cogging Torque Reduction of a Single-Phase Brushless DC Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.34, No.4, pp.2075-2077, July, 1998.
- [4] Takashi Kenjo, Shigenobu Nagamori, Permanent Magnet and Brushless DC Motors, Sogo Electronics Publishing Company, Tokyo 1984.
- [5] Y.D.Yao, D.R.Huang, J.C.Wang, S.J.Wang, T.F.Ying, D.Y.Chiang, "Study of A high Efficiency and Low Cogging Torque Spindle Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.34 No.2, pp.465-467, March, 1998.
- [6] Touzhu Li, Gordon Slemon, "Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.24, No.6, pp.2901-2903, November, 1988.
- [7] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992.
- [8] S.C.Park, T.H.Yoon, B.Y.Yang, B.I.Kwon, Y.S.Jin, "Finite Element Analysis of a Two-Phase Brushless Motor" SMIC'99 TOKYO, pp.305-308, 1999.



(a) 기존의 전동기



(b) 제안한 전동기

그림 8. 코깅 토크 실측 파형

Fig. 8 The measured wave forms of the cogging torque

저 자 소 개



양 병 렬 (梁 炳 烈)

1973년 6월 21일생. 1999년 한양대 전기공학과 졸업. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2001년 ~ 현재 동 대학원 전자전기제어계측공학과 박사과정

Tel : 031-409-1277

E-mail : yangcom@hanmail.net



권 병 일 (權 丙 一)

1956년 2월 1일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 동경대 대학원 졸업(공학박사). 1990년 도시바(주) 시스템 소프트웨어 연구소 연구원. 1991년 한국 기계연구소 자기 부상 열차 사업단 선임연구원.

1991년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 부교수.

Tel : 031-400-5165 Fax : 031-406-5073

E-mail : bikwon@email.hanyang.ac.kr



박 승 찬 (朴 勝 燦)

1968년 3월 24일 생. 1990년 한양대 전기공학과 졸업. 1992년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년 3월~2000년 2월 한양대학교 공학기술연구소 선임연구원, 2000년 3월~현재 동양대학교 컴

퓨터제어공학과 전임강사

Tel : 054-630-1106 Fax : 054-630-1106

E-mail : scpark@phenix.dyu.ac.kr