

하드디스크 구동용 BLDC 전동기의 전자력 해석에 관한 연구

論 文
48B-9-3

Electromagnetic Force Analysis of BLDC Motor for Hard Disk Drive

朴勝燦* · 尹泰浩** · 權丙一*** · 尹熙洙[§] · 元聖弘^{§§}
(Seung-Chan Park · Tae-Ho Yoon · Byung-Il Kwon · Hee-Soo Yoon · Sung-Hong Won)

Abstract - In this paper, electromagnetic forces acting on the rotor surface of a BLDC motor for hard disk drive are calculated by the finite element field analysis. The frequency characteristics of torque ripple, local force and unbalanced magnetic force as a source of mechanical vibration are analyzed. Ring-type permanent magnets for the brushless DC motor are apt to have different magnetization levels at each pole because of the unbalanced air gap between the magnet surface and the magnetizer fixture during the multi-poles magnetizing process. This paper discusses the effect of the unsymmetric magnetization distribution in the permanent magnet on the brushless DC motor performances. As a result, the unbalanced magnetic force acting on the rotor surface and the torque ripple are examined for the motor with an unsymmetric magnetization distribution, and compared with those of an ideally symmetric motor.

Key Words : Electromagnetic forces, BLDC motor, finite element, magnetization

1. 서 론

BLDC 전동기의 저소음 운전을 위하여 인버터 출력 전압과 전류 파형을 개선시키거나[1]-[3], 코깅 토크를 감소시키는 영구자석과 슬롯의 형상을 설계하는등의 여러방법이 제시된 바가 있으며[4]-[6], 전동기의 소음, 진동을 다룬 논문 또한 여러편 발표되었다[6]-[13].

또한, 스핀들 모터의 경우에는 불평형력(unbalanced magnetic force)을 구하고 이의 영향이 고찰된 바가 있으나, 단지 영구자석만에 의하여 여자가 된다든지 또는 정전류 입력을 가정하는 해석을 함으로써, 인버터의 출력 전압에 의하여 결정되는 권선 전류가 발생시키는 자계를 정확히 고려하지 못하였다[14]-[17].

BLDC 전동기의 운전은 인버터에 의하여 이루어지므로, 고정자 권선에 부하 전류가 흐를때에는 전류의 파형에 따라서 발생하는 전자력의 크기 및 고조파 성분이 많이 변화하게 된다. 그러므로, 전동기의 진동, 소음의 원인으로 작용하는 가진력의 해석을 위해서는 인버터의 출력 전압특성을 고려한 전자력의 해석이 필요하다. 본 논문에서는 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 인버터의 출력 전압을 고려하는

시간 차분 유한 요소 해석[18]-[20]을 통하여, 진동 및 소음원으로 작용하는 전자력을 계산하고 이의 주파수 분석을 행한다.

한편, 하드디스크 구동용 BLDC 전동기에 사용되는 링형태의 영구자석을 다극착자하는 경우에는, 착자요크와 마그네트 표면사이의 공극 불균형이나 요크 및 권선의 비대칭성등의 원인으로 인하여, 착자후 각극에서의 자화의 분포가 비대칭으로 되는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 영구자석의 대칭적인 자화 분포뿐만아니라 비대칭적인 자화 분포에 대해서도 회전자에 작용하는 전자력을 해석함으로써, 비대칭 자화 분포의 영향을 고찰한다.

2. 유한요소해석

해석 모델은 그림 1과 같이 회전자에 성층되지 않은 철심(steel shell)을 가진 하드디스크 구동용 BLDC 전동기이며, 이 해석모델의 지배방정식은 자기 벡터 포텐셜을 계변수로 하여 표현하면, 식 (1)과 같다[21]-[23].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\frac{N}{S} I_u - \frac{N}{S} I_v - \frac{N}{S} I_w - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (1)$$

여기서, A 는 자기벡터 포텐셜의 Z 축방향 성분값이다. 또한, I_u, I_v, I_w 는 각 상권선의 전류, M_x, M_y 는 각각 x, y 축 방향으로의 자화의 세기를 나타내며, σ 는 회전자 철심의 등가도전율, ϕ 는 회전자 철심에서의 전기 스칼라 포텐

* 正 會 員 : 漢陽大 工學技術研究所 先任研究員, 工博

** 準 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 碩士課程

*** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 副教授, 工博

§ 正 會 員 : 三星電機(株) 綜合研究所 先任研究員

§§ 正 會 員 : 三星電機(株) 綜合研究所 專任研究員

接受日字 : 1999年 4月 27日

最終完了 : 1999年 8月 5日

설이다. Galerkin 법을 이용하여 식 (1)을 유한요소 정식화하고, 전압방정식과 결합하면 식(2)와 같이 해석영역내의 각 절점 포텐셜, 각 상권선의 전류, 회전자 철심에서의 $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ 를 미지값으로 하는 시스템 행렬 방정식을 얻게 된다. 구체적인 수식의 유도과정은 문헌 [22]를 참고하면 된다.

$$\begin{bmatrix} K+C/\Delta t & M & G \\ Q/\Delta t & Z & 0 \\ S/\Delta t & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} C/\Delta t & 0 & 0 \\ Q/\Delta t & L/\Delta t & 0 \\ S/\Delta t & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} P \\ V \\ 0 \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

본 논문에서는 해석의 편의상, 영구자석 회전자가 운동하는 대신에, 고정자가 반시계 방향으로 상대적 운동을 하는 것으로 하였다. 이것은 유한요소해석의 remesh 과정에서 영구자석 영역 요소의 자화의 세기에 대한 정보를 쉽게 얻고, 영구자석 표면에 작용하는 반경 방향 힘(radial force)의 크기 및 방향을 쉽게 계산하기 위한 것이다.

영구자석의 자화분포는 역기전력 파형을 결정하게 되며, 역기전력 파형은 BLDC 전동기의 토크 리플 특성에 영향을 많이 미친다. 따라서, 영구자석 내부의 자화의 세기분포를 정확히 예측할 필요가 있다. 최근, 착자과정의 해석을 통하여 영구자석의 자화 분포를 구하는 방법을 사용하는 예가 있으나, 착자할 때의 조건 변화등에 의하여 정확한 자화의 분포를 예측하기는 힘들다. 그러므로, 본 논문에서는 시그모이드 함수를 이용한 시행착오법을 적용하여 예측한 자화의 분포에 의한 역기전력을 유한요소법을 이용하여 계산하고, 실험 파형과 비교하므로써 자화의 분포를 결정하였으며, 이의 결과는 문헌 [22]에 있다.

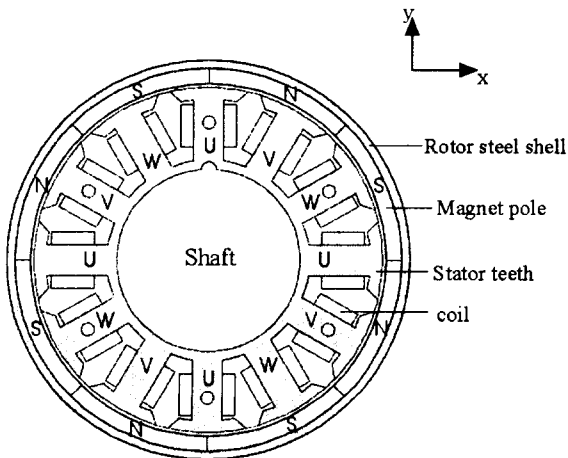
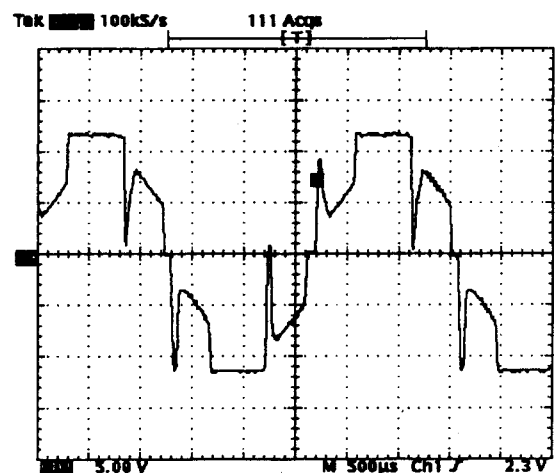


그림 1 해석 모델(8극 12슬롯)
Fig. 1 Analysis model with 8 poles and 12 slots

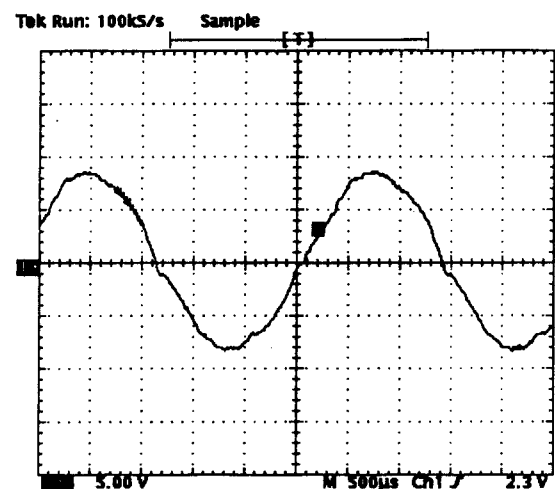
3. 구동 전압의 특성

일반적으로 하드디스크 구동용 BLDC 전동기는 120도 구형파 전압에 의하여 구동되지만, 실제로 본 해석 모델은 그림 2에 나타낸바와 같이 기동시에는 구형파 전압에 의하여, 정격속도에서는 정현파에 가까운 전압에 의하여 구동된다. 따라서, 본 논문에서는 해석의 편의상 인버터의 출력전압을 정현파로 가정하여 해석하였다.

그림 3은 정현파 전압 구동에 의한 권선 전류의 해석결과와 실험결과이며, 서로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 해석결과와 실험결과간의 오차는 영구자석의 자화의 세기분포의 추정에 오차가 있고, 인버터 출력전압을 근사화시킨 것에 의한 결과라고 사료된다.



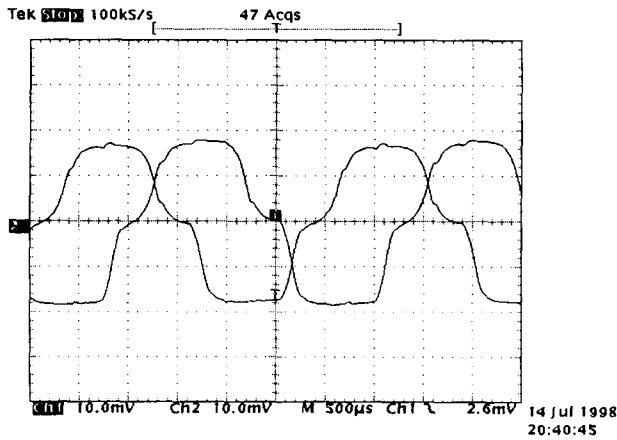
(a) 기동시



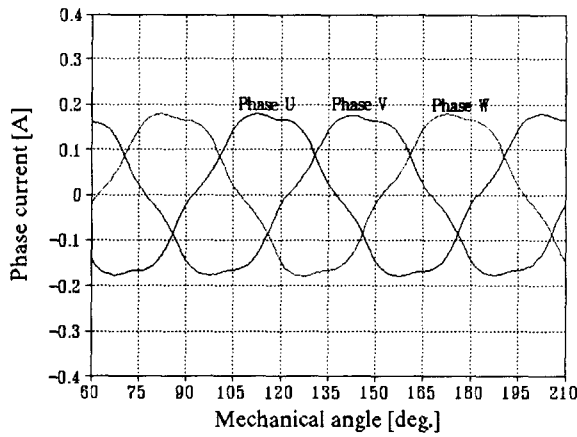
(b) 정격운전시

그림 2 실제 하드디스크 구동시의 인버터 출력전압 파형 (선간전압) (5V/div.)

Fig. 2 Inverter output voltage waveforms (a) at start (b) at rated speed



(a) 실험 결과(0.1A/div.)



(b) 시뮬레이션 결과

그림 3 정현파 전압 구동에 의한 전류 해석 결과 (5,400 rpm)

Fig. 3 Current simulation results obtained from sinusoidal voltage supply

4. 회전자 표면에 작용하는 전자기력 해석

4-1 Maxwell 응력

그림 4에서 면적 A 의 평면을 통과하는 자속밀도 B 의 법선성분과 접선성분을 각각 B_n 및 B_s 라 할 때, 이 평면에 작용하는 응력의 법선성분 t_n 과 접선성분 t_s 는 각각 식 (3)과 식 (4)로 표현된다[24].

$$t_n = \frac{1}{2\mu}(B_n^2 - B_s^2) \quad [N/m^2] \quad (3)$$

$$t_s = \frac{B_n B_s}{\mu} \quad [N/m^2] \quad (4)$$

여기서, B_n , B_s 는 각각 식 (5) 및 식 (6)에 의하여 구해진다.

$$B_n = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \cos \theta \quad (5)$$

$$B_s = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \sin \theta \quad (6)$$

단, B_x, B_y 는 x 축 및 y 축방향 자속밀도를 나타내며, 영구자석 표면상 임의 점의 위치 좌표 벡터를 $r = r_x a_x + r_y a_y$ 로 두면, 이점에서 r 과 자속밀도 B 가 이루는 각도인 θ 는 식 (7)에 의하여 구해진다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r_x B_y - r_y B_x}{r_x B_x + r_y B_y} \right) \quad (7)$$

따라서, 회전자 표면에 작용하는 불평형력(축에 수직으로 작용하는 힘)은 영구자석의 표면에 작용하는 radial force를 합하면 되므로, 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$f_b = \sum_{i=1}^N t_n^{(i)}(l_i D) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2\mu} [(\overline{B_n^{(i)}})^2 - (\overline{B_s^{(i)}})^2](l_i D) \quad [N] \quad (8)$$

여기서, u : 영구자석 표면의 적분 경로수, l : 적분 경로의 길이, D : 고정자 철심의 적층 폭, $\overline{B_n}$: 미소 적분 경로상의 자속밀도 평균값의 수직성분, $\overline{B_s}$: 미소 적분 경로상의 자속밀도 평균값의 접선성분이다.

식 (8)에서 회전자 표면의 미소 적분 경로상의 자속밀도 값은 경로를 구성하는 두 절점을 둘러싼 요소에서의 자속밀도를 평균한 값으로부터 결정하였다[25].

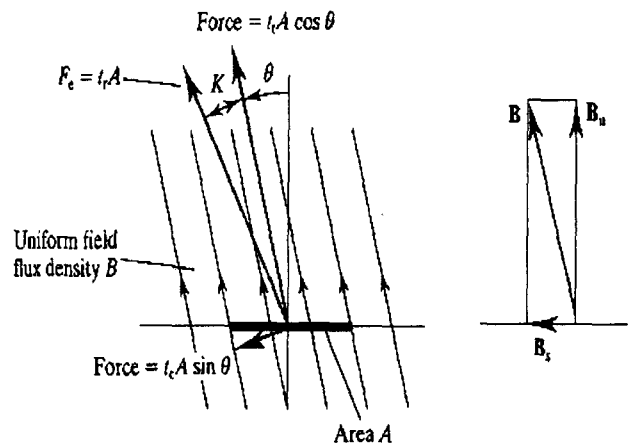


그림 4 균일 자계내의 평면에 작용하는 힘
Fig. 4 Forces acting on the surface in an uniform field

4-2 전자력 해석 결과

3상 권선을 시행한 BLDC 전동기의 발생 토오크에 대한 이론식은 식 (9)과 같이 주어진다[2].

$$T_{ia}(t) = T_{iao} + \sum_{n=1}^{\infty} T_{ia6n} \sin(6n\omega_e t + \gamma_{6n}) \quad (9)$$

여기서, ω_e : 전기각주파수, γ_{6n} : 위상차, $n : 1$ 이상의 정수이다. 식 (9)에 의하면, 토오크 리플은 $6n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 차 성분이 존재한다.

그림 5는 유한요소해석으로부터 얻은 토오크 특성이며, 그림 6에는 이의 주파수 분석결과를 나타내었다. 유한요소해석 결과는 식 (9)에서와 마찬가지로 6차(2,160 Hz) 및 12차(4,320 Hz) 고조파 성분이 우세하지만, 6의 배수차 성분뿐만 아니라 3차(1,080 Hz)와 9차(3,240 Hz)의 홀수차 성분도 미약하게 나타나게 됨을 알 수 있다.

그림 7은 회전자 표면에서의 식 (5) 및 식 (6)을 이용하여 구한 자속밀도 분포를 나타낸다. 이때의 자속밀도의 분포는 거의 대칭적이어서, 회전자 표면에 수직으로 작용하는 힘의 분포는 그림 8에서와 같이 서로 마주보는 극에 대하여 거의 대칭적으로 된다. 식 (5)에 의하여 회전자 표면에 작용하는 불평형력(unbalanced magnetic force), 즉, 베어링에 작용하는 합성력을 회전자의 운동에 따라서 구하면 그림 9와 같다.

그림 10은 불평형력 벡터의 방향이며, 180도 회전시마다, 주기적으로 나타난다. 또한, 그림 10으로부터 불평형력의 회전속도는 회전자의 속도보다 24배 빠른 것을 알 수 있다 ($\omega_{umf} = 24\omega_m$). 그림 11은 베어링에 작용하는 합성력의 주파수 분석을 한 것으로서, 6의 배수 차수의 고조파 성분이 크게 나타나며, 이 중 6차 고조파 성분인 2,160 [Hz] 성분이 가장 우세하다(5400 [rpm] 일때의 전원 주파수는 360 [Hz] 이다).

그림 12는 회전자 영구자석 표면의 한 가운데 지점에 작용하는 전자력을 회전자의 운동에 따라서 해석한 것이다. 그림 13은 회전자 표면의 영구자석 중앙의 1지점에서 작용하는 전자력의 주파수 분석을 한 것으로서, 3의 배수 차수의 고조파 성분이 우세하게 나타남을 알 수 있다. 6의 배수 차수가 우세한 토오크 리플과는 달리 3의 배수 차수가 나타나는 이유는 슬롯 퍼미언스에 의한 공극 자속밀도의 리플 성분에 의한 것으로 볼 수 있다[10][26]. 이러한 주파수 성분을 수식으로 표현하면 식 (10) 과 같다.

$$f_r = 2k\left(\frac{Z}{P}\right)f_1, \quad (k=1, 2, 3, \dots) \quad [Hz] \quad (10)$$

여기서, f_r 은 영구자석 표면 1 지점에서의 radial force의 주파수 성분이며, $\left(\frac{Z}{P}\right)$ 는 극당 슬롯수(=12/8), f_1 은 전원 주파수이다.

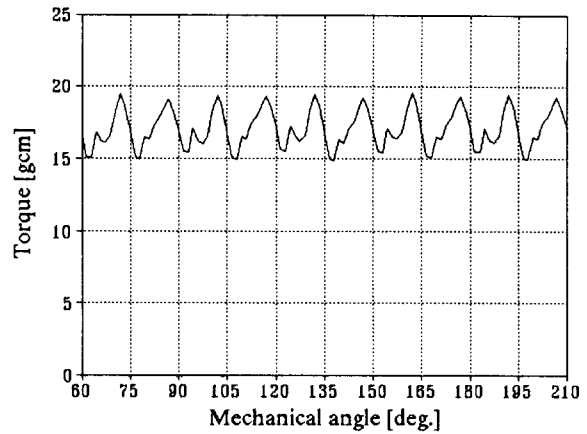


그림 5 토오크 리플 특성(5,400 rpm)
Fig. 5 Torque ripples at 5400 rpm

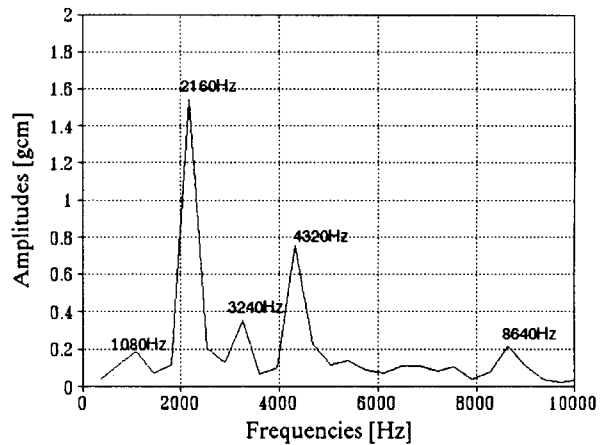


그림 6 토오크 리플의 주파수 분석(5,400rpm)
Fig. 6 Spectra of torque harmonics

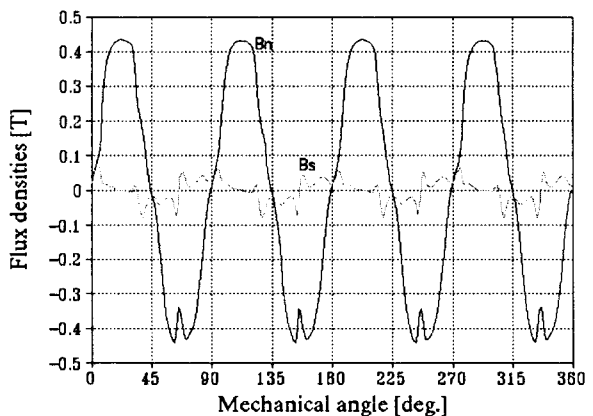


그림 7 회전자 표면에서의 자속밀도 분포
Fig. 7 Flux densities on the rotor surface

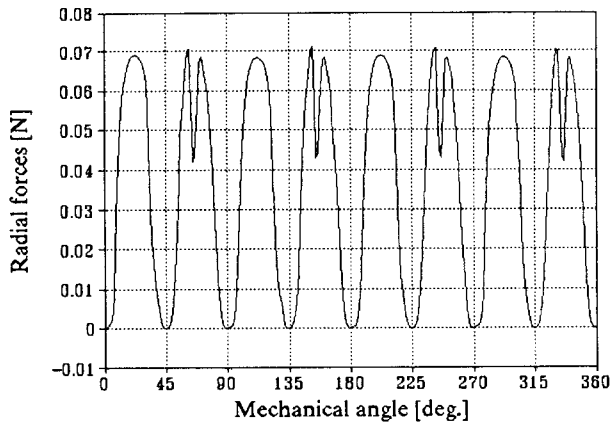


그림 8 회전자 표면에 수직으로 작용하는 힘의 분포
Fig. 8 Radial force distribution on the rotor surface

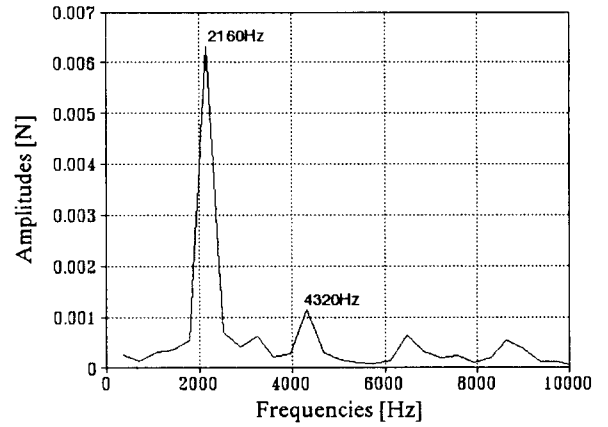


그림 11 불평형력의 주파수 분석
Fig. 11 Spectra of unbalanced magnetic force harmonics

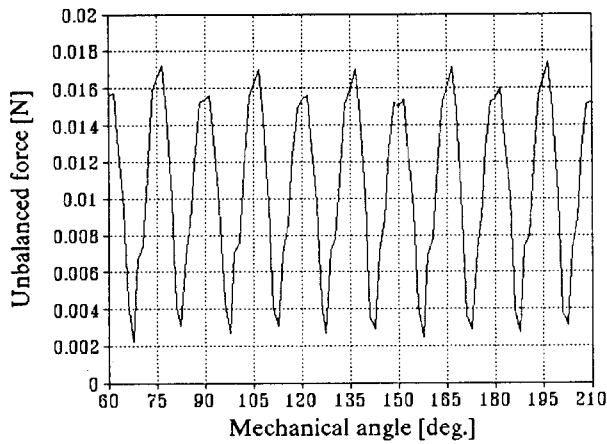


그림 9 회전자 운동에 따른 불평형력
Fig. 9 Unbalanced magnetic force versus rotation angle

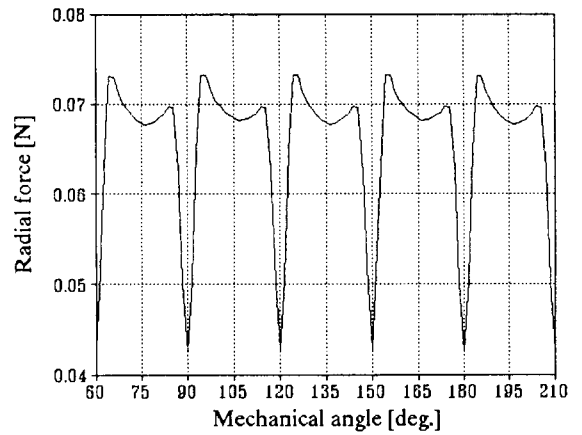


그림 12 회전자의 운동에 따른 회전자 표면 1지점(극의 중심)에서의 radial force
Fig. 12 Radial force acting on a mid-point of the permanent magnet versus rotation angle

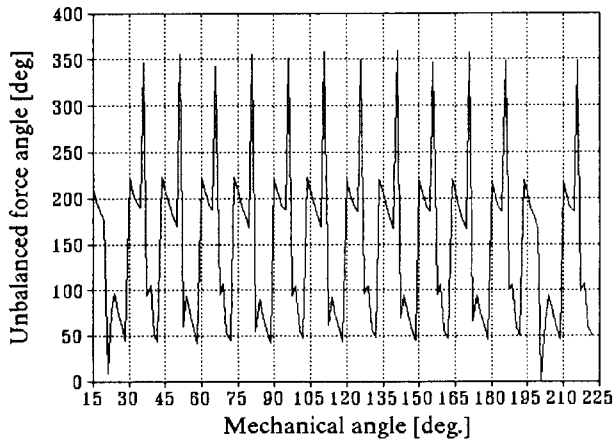


그림 10 회전자 운동에 따른 불평형력 벡터의 방향
Fig. 10 The direction of the unbalanced versus rotation angle

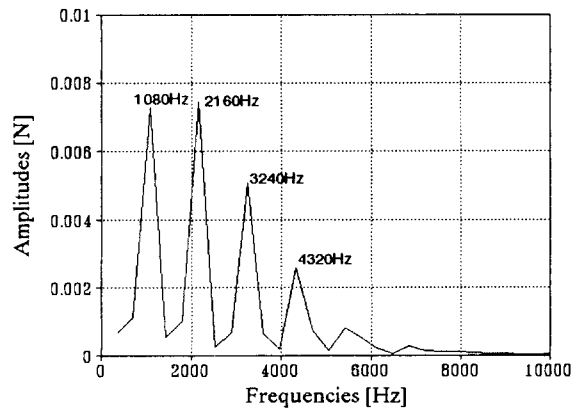


그림 13 회전자 표면의 1 지점에 작용하는 수직력의 주파수 분석
Fig. 13 Spectra of radial force harmonics acting on a mid-point of permanent magnet

4-3 비대칭 자화 분포의 영향

착자 과정에서 요오크와 마그네트간의 공극변화가 있을 경우에는, 착자기의 비대칭 조건들을 고려하여 착자 과정 해석을 하여야 하지만, 정확한 착자 과정 해석이 매우 어려우므로, 본 논문에서는 그림 14와 같이 매극마다 비대칭이 되는 자화의 분포를 가정하여 이것이 전자력에 미치는 영향을 고찰하였다.

실제로 양산되는 전동기에 대하여 고정자에 search coil을 감고 영구자석 회전자를 일정속도로 회전시켰을 경우, 극당 자속량에 해당될 수 있는 search coil의 출력전압이 최대 10% 가량되는 경우도 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 착자시에 영구자석이 한쪽으로 편심되었다고 가정하여 그림 14와 같이 매극의 자화의 세기가 최대 10%의 편차를 갖는 경우에 대하여 특성을 해석하였다.

그림 15는 토오크 리플 특성으로서, 비대칭 자화의 분포가 토오크 리플에는 큰 영향을 주지 않으나 회전자 철심의 포화에 의하여 평균 토오크가 약 8% 감소함을 알 수 있다.

그림 16은 회전자의 영구자석 표면에서의 radial force 분포로서, 비대칭 자화의 분포에 의하여 대칭이 되지 않게 된다. 이것은 결국 회전자에 작용하는 불평형력의 원인이 되며, 그림 17에서와 같이 대칭적 자화의 분포의 경우보다 약 38배 가량의 불평형력이 발생하여, 회전자의 진동을 유발한다.

또한, 그림 18은 불평형력 벡터의 방향을 보여준다. 본 논문에서는 고정자가 회전자에 대하여 반시계방향으로 상대운동하는 것으로 하여 해석을 하였으므로, 그림 18에서 불평형력 방향의 이동은 회전자의 이동과 거의 동일하다고 볼 수 있다. 따라서, 그림 10과 그림 18에서 불평형력 벡터의 방향을 서로 비교하면, 대칭적 자화 분포의 경우는 불평형력의 속도가 회전자의 속도보다 약 24배 정도 빨리 회전하고, 본 논문에서 가정한 비대칭 자화 분포의 경우에는 불평형력의 속도가 회전자의 속도와 거의 일치함을 알 수 있다.

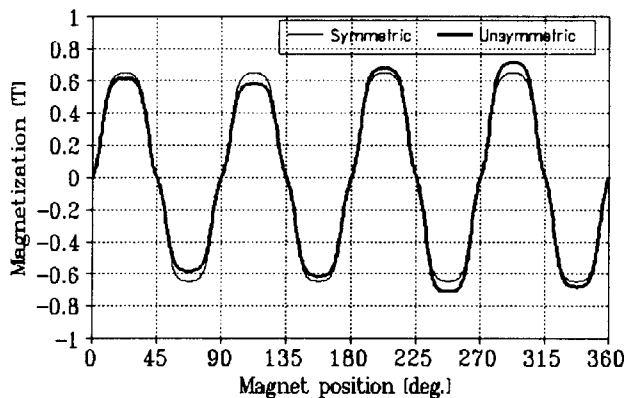


그림 14 가정된 비대칭 자화의 분포(최대 10%의 편차)
Fig. 14 An example of unsymmetric magnetization distribution

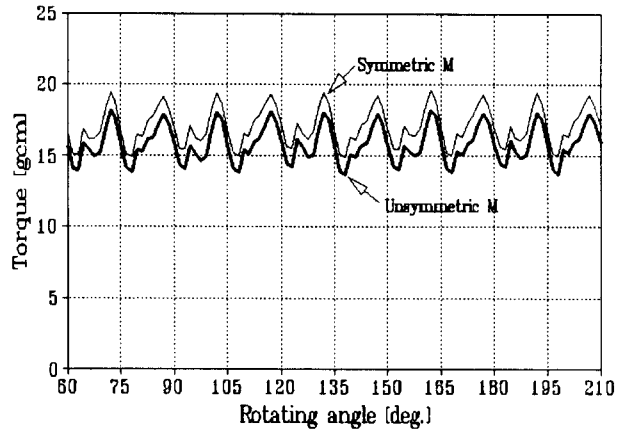


그림 15 비대칭 자화분포에 의한 토오크 리플 특성 (5400 rpm)
Fig. 15 Torque ripple due to unsymmetric magnetization

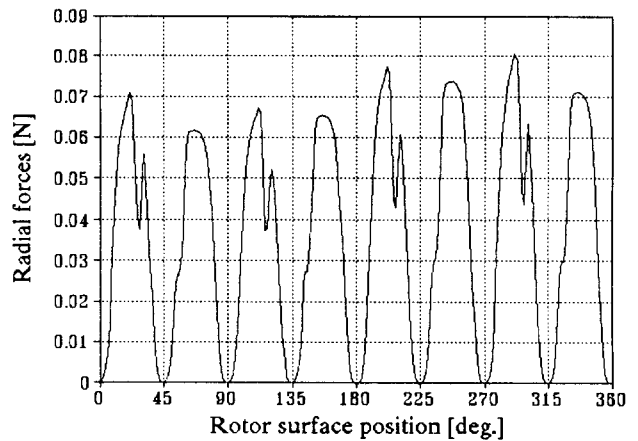


그림 16 비대칭 자화의 분포에 의한 회전자 표면상 수직력의 분포
Fig. 16 Unbalanced radial force distribution due to unsymmetric magnetization distribution

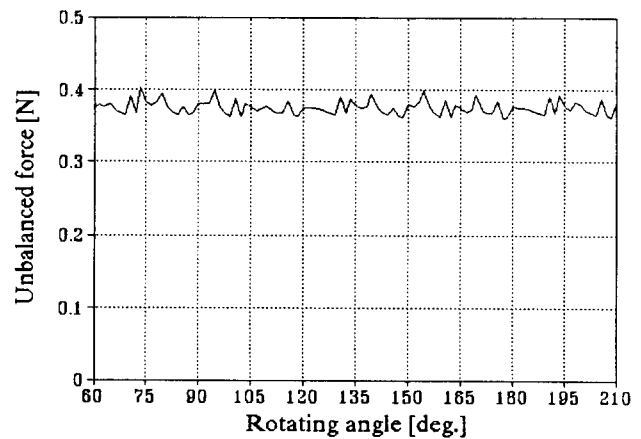


그림 17 비대칭 자화의 분포에 의한 불평형력 특성
Fig. 17 Unbalanced magnetic force due to unsymmetric magnetization distribution

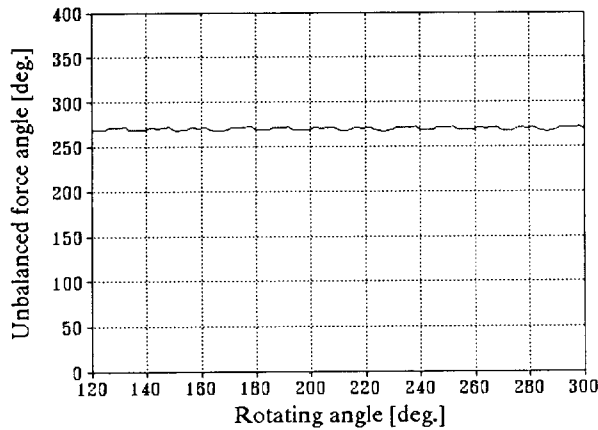


그림 18 비대칭 자화의 분포에 의한 불평형력의 방향
 Fig. 18 The direction of unbalanced magnetic force due to unsymmetric magnetization distribution

6. 결 론

본 논문에서는 정현파 전압으로 구동되는 하드디스크용 8극 12슬롯의 BLDC 전동기에서 진동 및 소음원으로 작용하는 전자력을 유한요소법과 Maxwell 응력을 이용하여 해석하였다. 그 결과, 8극 12슬롯을 갖는 BLDC 전동기의 회전자에 작용하는 불평형력의 속도는 회전자의 속도보다 24배 빠르고 크기는 0.018 [N]이하로서 비교적 작았으며, 토오크 리플과 불평형력 모두 6의 배수차에 해당되는 주파수 성분이 지배적이었다. 또한, 영구자석 표면의 1지점에서 발생하는 radial force는 슬롯 퍼미언스에 의한 공극 자속 밀도 리플의 영향에 의하여 3의 배수차 주파수 성분이 발생함을 알 수 있었다.

링 마그네트의 다극 착자시에는 착자 요오크의 실제 조건에 따라서 영구자석의 자화 분포가 비대칭적으로 될 수 있으므로, 본 논문에서는 매극에 대하여 최대 10%의 편차를 갖는 비대칭 자화의 분포를 갖는 경우를 가정하여 BLDC 전동기의 전자력 특성을 해석하였다. 해석 결과로부터, 토오크의 크기는 대칭적 자화 분포의 경우보다 약 8% 감소하게 되는 반면, 회전자에 작용하는 불평형력의 속도는 회전자 속도와 일치하게 되고 그 크기는 약 38배 증가하여 회전자 진동 발생의 주된 원인이 됨을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 전자력의 해석결과는 베어링 및 기계 구조의 진동해석에 기초 자료로 사용될 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

[1] R.Kawamoto, S.Yamamoto, H.Azuma, T.Mori, "Silent drive for brushless DC motor", National convention record of IEEJ, 1997.
 [2] T.Chigiri, T.Shimada, T.Watanabe, O.Ichinokura, T.Jinzenji, "Current Control Method for Zero Torque Ripple and Maximum Efficiency of Brushless DC Motor", T.IEE of Japan, Vol.116-D, No.12, pp.1276-1282, 1996.

[3] 여형기, 김태형, 박정배, 이광운, 유지윤, "BLDC 전동기용 센서리스 드라이브의 토크 리플 저감을 위한 전환 방법에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제 3권 3호, pp.199~204, 1998.
 [4] I.H.Park, B.T.Lee and S.Y. Hahn, "Pole Shape Optimization for Reduction of Cogging Torque by Sensitivity Analysis", COMPEL, Vol.9, No.5, pp. 111~114, 1990.
 [5] Chang-Seop Koh, Hee-Soo Yoon, Ki-Woong Nam, Hong-Soon Choi, "Magnetic Pole Shape Optimization of Permanent Magnetic Motor for Reduction of Cogging Torque", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.33, No.2, pp.1822~1827, 1997.
 [6] K.J. Joo, H.S. Choi and S. Y. Hahn, "Reduction of Mechanical Noise and Vibration for Permanent Magnet Electric Rotating Machines", Simulation and Design of Applied Electromagnetic Systems, Elsevier Science B.V., pp.65~68, 1994.
 [7] M.E.H. Benbouzid, G.Reyne, S.Derou and A.Foggia, "Finite Element Modeling of a Synchronous Machine:Electromagnetic Forces and Mode Shapes", IEEE Trans. on Magnetics, Vo.29, No.2, pp.2014~2017, 1993.
 [8] D.Verdyck, R.Belmans, W.Geysen, "An Approach to Modelling of Magnetically Excited Forces in Electrical Machines", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.29, No.2, pp.2032~2035, 1993.
 [9] G.Henneberger, Ph.K.Sattler, W.Hadrys, D.Shen, "Procedure for the Numerical Computation of Mechanical Vibrations in Electrical Machines", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.28, No.2, pp.1351~1354,1992.
 [10] Y.Lefevre, B.Davat and M.Lajoie-Mazenc, "Determination of Synchronous Motor Vibrations due to Electromagnetic Force Harmonics", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.25, No.4, 1989.
 [11] B.S.Rahman, D.K.Lieu, "Optimization of Magnetic Pole Geometry for Field Harmonic Control in Electric Motors", Journal of Vibration and Acoustics, Vol.116, pp.173-178, 1994.
 [12] Roy S.Colby, F.M.Mottier, T.J.E. Miller, "Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.32, No.6, 1996.
 [13] Duane Hanselman, "Fourier Decomposition of Radial and Tangential Forces in Brushless DC Motors", Proc. of Incremental Motion Control Systems & Devices, pp.233-241, 1996.
 [14] G.H.Jang, J.W.Yoon, N.Y.Park, S.M.Jang, "Torque and Unbalanced Magnetic Force in a Rotational Unsymmetric Brushless DC Motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.32, No.5, pp.5157-5159, 1996.
 [15] Z.J.Liu, S.X.Chen, Q.D. Zhang, "Design of Brushless DC Spindle Motors for High Speed HDD recording",