

컴퓨터 하드 디스크 드라이브용 스피들 모터의 기전 연성계 해석

論 文

49B - 11 - 5

Analysis of Electromechanical - Coupled Field of the Spindle Motor in Computer Hard Disk Drives

張正煥* · 張健熙**

(Jung-Hwan Chang · Gun-Hee Jang)

Abstract - This paper presents a numerical method to analyze the electromechanical-coupled field in the spindle motor of a computer hard disk drive and investigates dynamic response due to the electromechanical excitation, i.e. unbalanced magnetic force and centrifugal force for the rotational symmetric and rotational asymmetric motor. Magnetic field is calculated from Maxwells equation and voltage equation by introducing nonlinear time-dependent finite element analysis. Mechanical motion of rotor is calculated by solving Newton-Euler equation. Electromechanical excitation and dynamic response are characterized by analyzing the free response of a rotating rotor and Fourier analysis of the excitation force and resulting vibration of a rotor. It shows that centrifugal force produces the unbalanced magnetic force even in the rotational symmetric motor. It also shows that resonance produces quite considerable vibration even when the high excitation frequency with small amplitude matches with the natural frequency of the spindle motor

Key Words : 고유 진동, 기전 연성계, 스피들 모터, 유한 요소법, 전압 방정식

1. 서 론

고용량 소형화 되어가는 하드 디스크 드라이브를 안정적으로 구현하기 위해서는 스피들 모터의 전기 기계적 동특성 해석과 그 결과를 스피들 모터의 설계에 반영하는 것이 필요하다. 그러나 기존의 스피들 모터의 해석은 주로 기계적인 부분과 전기적인 부분으로 이원화되어 진행되어 왔으며 이들 연성관계의 정확한 특성 해석에는 어려움이 있었다. 하드 디스크에 사용되는 스피들 모터의 경우 회전자는 모터의 기하학적 중심에 대해 회전을 하고 있는 것이 아니라 불평형 자력, 토크 리플 등의 전기적 요인과 질량 불평형에 의한 원심력, 베어링이나 베이스 플레이트, 축 강성 등의 기계적 요인의 상호 작용에 의해 편심 운동을 하고 있다. 이것은 트랙 비정렬의 원인이 되어 헤드가 디스크상의 데이터를 잘못 읽을 수 있으며 트랙 밀도를 높이는 것을 제한하는 원인이 된다. 그림 1은 회전자가 병진 변위 및 각 변위에 의해 모터의 축에서 벗어나 편심되어 회전하고 있는 것을 나타낸 것이다. 그림에서처럼 회전자가 불평형 질량이나 불평형 자력에 의해 기하학적 중심에서 벗어나 운동하면 회전자와 고정자 사이의 공극이 불균일하게 된다. 이것은 공극에서의 자계 분포를 비대칭으로 변화 시켜 불평형 자력을 발생시키며 또한 발생한 불평형 자력은 회전자의 운동에 영향

을 미치게 된다. 즉 가진력인 불평형 자력과 기계적 응답인 변위가 서로 원인과 결과가 되는 일련의 과정을 반복함으로써 모터는 전기 기계적인 정상 상태에 도달하게 되는 것이다.

불평형 자력이나 회전자의 편심 등과 같은 전기 기계적인 변수들에 대한 모터의 특성 해석은 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔다. Bi Chao [1] 와 C. Bi [2]는 고정자 치와 영구 자석의 구조 및 권선 형태에 따른 불평형 자력의 변화를 해석하였으며 G.H. Jang [3] 은 회전 대칭형과 회전 비대칭형 BLDC 모터에 대해 토크와 불평형 자력을 비교 분석하였다. 또한 G. Henneberger [4] 와 Javadi H [5] 등은 유한 요소법에 의해 전자기력을 구하고 모드 해석에 의한 고유 진동수와와의 관계를 밝혀 모터의 전자기적인 진동을 분석하였다. 하지만 이들의 대부분은 회전자의 병진 변위 및 각 변위에 의해 공극에서의 자속 분포가 비대칭으로 되는 현상을 포함하지 않고 있으므로 자계의 변화와 회전자의 운동에 의한 상호 작용을 고려하지 못하고 있다.

본 논문에서는 하드 디스크에 사용되는 대표적인 회전 대칭형(rotational symmetric) 스피들 모터인 12극 9슬롯 모터와 회전 비대칭형(rotational asymmetric) 스피들 모터인 8극 9슬롯 모터를 대상으로 시간 차분법을 사용하여 기전 연성해석을 수행하였다. 일반적으로 기전 연성 해석에서 배제되었던 불평형 질량과 베어링 강성을 포함하는 5자유도 강제 운동 방정식을 유도하여 전기 기계적인 가진력이 회전자의 병진 및 회전 운동에 미치는 영향을 해석하고 회전하고 있는 회전자의 자유 응답에 의해 고유 진동수를 계산하여 가진력 및 변위의 주파수 분석과 비교함으로써 전기 기계적인 가진력과 응답과의 상호 관계를 파악하였다.

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 精密機械工學科 博士課程

** 非 會 員 : 漢陽大 工大 精密機械工學科 副教授

接受日字 : 2000年 7月 10日

最終完了 : 2000年 11月 1日

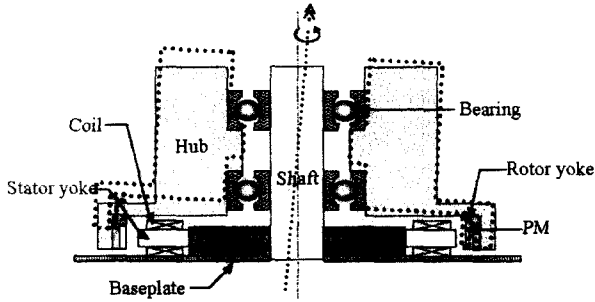


그림 1 회전자의 편심 운동
Fig. 1 Eccentric motion of a rotor

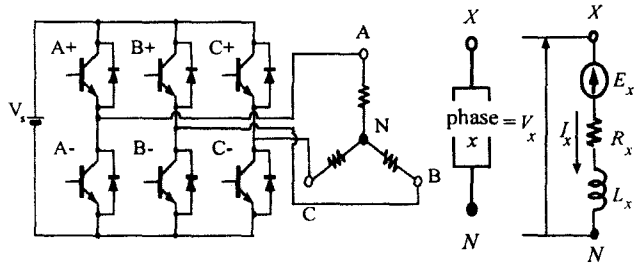


그림 2 전압형 인버터로 구동되는 스피indle 모터
Fig. 2 Spindle motor driven by voltage source inverter

2. 기전 연성계 해석

기전 연성계 해석은 크게 고정자의 회로 방정식을 포함하는 자계해석 부분과 Newton-Euler 방정식에 의해 회전자의 운동을 해석하는 부분으로 구성된다.

2.1 자계 해석

하드 디스크 드라이브에 사용되는 스피indle 모터를 영구 자석을 포함하는 2차원 정자계 문제로 보면 맥스웰 방정식으로부터 자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 를 미지수로 하는 식 (1)과 같은 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_{ext} + (\nu \nabla \times \mathbf{M}) = \mathbf{J}_{ext} + \mathbf{J}_m \quad (1)$$

여기서 ν 는 자기 저항의 역수인 자기 저항율, \mathbf{J}_{ext} 는 외부 회로 즉 전압형 인버터에 의한 고정자 권선의 전류 밀도, \mathbf{J}_m 은 영구 자석에 의한 등가 자화 전류 밀도이다.

2.2 전압 방정식

일반적으로 하드 디스크 드라이브에 사용되는 스피indle 모터는 그림 2와 같이 전압형 인버터로 구동되고 고정자 회로에 Kirchhoff의 전압 방정식을 적용하면 식 (2)와 같은 회로 방정식이 얻어진다. 본 논문에서는 구형과 구동으로 가정하였다.

$$V_x - V_N = R_x I_x + L_x \frac{dI_x}{dt} + E_x \quad (x = a, b, c) \quad (2)$$

여기서 R_x 는 각상의 저항, L_x 는 코일 단부에서의 누설 인덕턴스 그리고 E_x 는 권선에 유기된 역기전력 항이다. 실제의 유한 요소 해석에서는 Y결선된 권선의 중성점에서는 전류의 합이 0이어야 한다는 조건을 만족시키기 위해 식 (2)는 식 (3)과 같이 변환된다

$$\begin{aligned} V_a - V_b &= R(I_a - I_b) + L\left(\frac{dI_a}{dt} - \frac{dI_b}{dt}\right) + E_a - E_b \\ V_b - V_c &= R(I_b - I_c) + L\left(\frac{dI_b}{dt} - \frac{dI_c}{dt}\right) + E_b - E_c \\ 0 &= I_a + I_b + I_c \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 시간 의존성

본 논문에서는 후퇴 차분법을 이용하여 자기 벡터 포텐셜과 전류의 미분을 다음과 같이 근사화 한다.

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{A}}{dt} &= \frac{\mathbf{A}^{t+\Delta t} - \mathbf{A}^t}{\Delta t} \\ \frac{d\mathbf{I}}{dt} &= \frac{\mathbf{I}^{t+\Delta t} - \mathbf{I}^t}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 자계 방정식과 회로 방정식에 대입하여 유한 요소법을 적용하면 다음과 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다 [6].

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{SA}] & [\mathbf{SJ}] \\ [\mathbf{TA}] & [\mathbf{TI}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{A}\}_{t+\Delta t} \\ \{\mathbf{I}\}_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}] & [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{TA}] & [\mathbf{TI}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{A}\}_t \\ \{\mathbf{I}\}_t \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{\mathbf{F}_m\}_{t+\Delta t} \\ \{\mathbf{F}_e\}_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$[\mathbf{SA}]$: 절점의 기하학적 위치와 요소의 투자율로 표현되는 비선형 강성 행렬

$[\mathbf{SJ}]$: 슬롯 면적과 각 슬롯의 턴수로 결정되는 행렬

$[\mathbf{TA}]$: 회로 방정식에서 평균 자기 벡터 포텐셜로 표현되는 역기전력과 관계되는 행렬

$[\mathbf{TI}]$: 각 상의 저항과 인덕턴스로 구성되는 행렬

$\{\mathbf{F}_m\}$: 등가 자화 전류 밀도와 관련된 구동 벡터

$\{\mathbf{F}_e\}$: 각 상의 전압

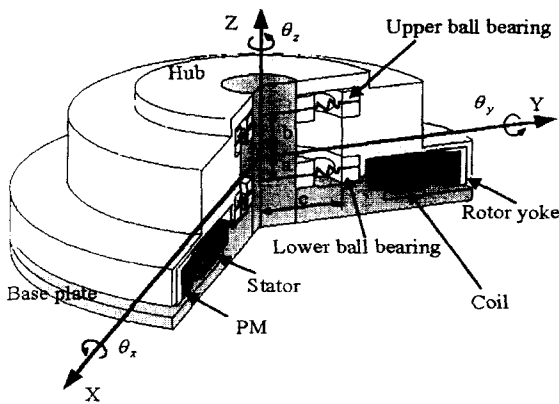


그림 3 스피들 모터의 개략도
Fig. 3 Schematic diagram of a spindle motor

2.4 운동 방정식

그림 3은 하드 디스크 드라이브에 사용되는 스피들 모터의 운동 방정식을 유도하기 위한 개략도로 베어링을 제외한 축, 허브, 베이스 플레이트등은 모두 강체로 가정하였다. 외력의 합력과 계의 질량 중심의 가속도와와의 관계를 나타내는 Newton 방정식과 외력에 의한 합 모멘트와 질량 중심에 관한 계의 각운동량과의 관계를 나타내는 Euler 방정식을 이용하여 x, y 의 병진 변위와 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 의 각 변위를 자유도로 하는 Newton-Euler 방정식을 아래와 같이 유도하였다 [7]. 본 논문에서는 2차원 전자장 수치해석에 의해 z 축 방향의 전자기적인 가진력은 구할 수 없으며 따라서 z 축 방향의 병진 변위는 구할 수 없다. 그러나 z 축 방향의 병진 운동을 나타내는 방정식은 다른 수식과 분리되어 있으므로 아래와 같은 5자유도에 대한 운동 방정식을 통해 기전 연성 해석을 수행할 수 있다.

$$m \ddot{x} + k_{1x}(x - a\theta_y) + k_{2x}(x + b\theta_y) = F_{magx} + me \dot{\theta}_z^2 \cos(\theta_z) \tag{6}$$

$$m \ddot{y} + k_{1y}(y + a\theta_x) + k_{2y}(y - b\theta_x) = F_{magy} + me \dot{\theta}_z^2 \sin(\theta_z) \tag{7}$$

$$I_t \ddot{\theta}_x - 2I_p \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y \theta_y + I_t \dot{\theta}_y (\dot{\theta}_z + \dot{\theta}_x \theta_y) - k_{1y}(cy + ac \theta_x) \theta_x + k_{1y}(ay + a^2 \theta_x) - k_{2y}(cy - bc \theta_x) \theta_x - k_{2y}(by - b^2 \theta_x) = M_{magx} \tag{8}$$

$$I_t (\ddot{\theta}_y + \dot{\theta}_x^2 \theta_y) - I_t \dot{\theta}_x (\dot{\theta}_z + \dot{\theta}_x \theta_y) - k_{1x}(cx - ac \theta_y) \theta_y + k_{1x}(ax - a^2 \theta_y) - k_{2x}(cx + bc \theta_y) \theta_y + k_{2x}(bx + b^2 \theta_y) = M_{magy} \tag{9}$$

$$I_p (\ddot{\theta}_z + \ddot{\theta}_x \theta_y + \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y) = M_{magz} \tag{10}$$

여기서 m 은 회전체의 질량, I_p 는 극 관성 모멘트, I_t 는 횡방향 관성 모멘트를 나타낸다. 첨자 1,2는 각각 위쪽 베어링과 아래쪽 베어링을 나타내며 해석 대상 스피들 모터의 경우 질량 중심에서 각 베어링까지의 거리가 다른 경우에 해당한다. $me \dot{\theta}_z^2$ 은 질량 불평형에 의한 원심력이며 F_{magx}, F_{magy} 그리고 M_{magz} 는 맥스웰 응력법에 의해 계산된 x, y 방향의 불평형 자력과 z 축 방향의 모멘트를 나타낸다. M_{magx}, M_{magy} 는 회전자의 질량 중심에 관한 불평형 자력에 의한 모멘트 성분으로 전자기력이 작용하는 위치가 회전자의 질량 중심과 일치하지 않기 때문에 발생한다. 본 논문에서는 비선형 운동 방정식을 풀기 위해 Runge-Kutta 법을 사용하였다.

2.5 기전 연성계 해석 흐름도

그림 4는 스피들 모터의 기전 연성계 해석을 위한 전체적인 해석 흐름도이다. 초기 요소 분할 데이터로 비선형 자체 해석을 수행하여 맥스웰 응력법에 의해 토크와 불평형 자력을 구한다. 운동 방정식에 의해 회전자의 병진 변위와 각변위를 구해서 이동 매쉬기법을 사용하여 회전자를 이동하며 질량 불평형에 의한 원심력을 계산한다. 이와 같은 일련의 과정들을 모터의 기동시에서부터 정상 상태에 이르기까지 반복함으로써 모터의 전기 기계적 특성변화를 파악할 수 있다.

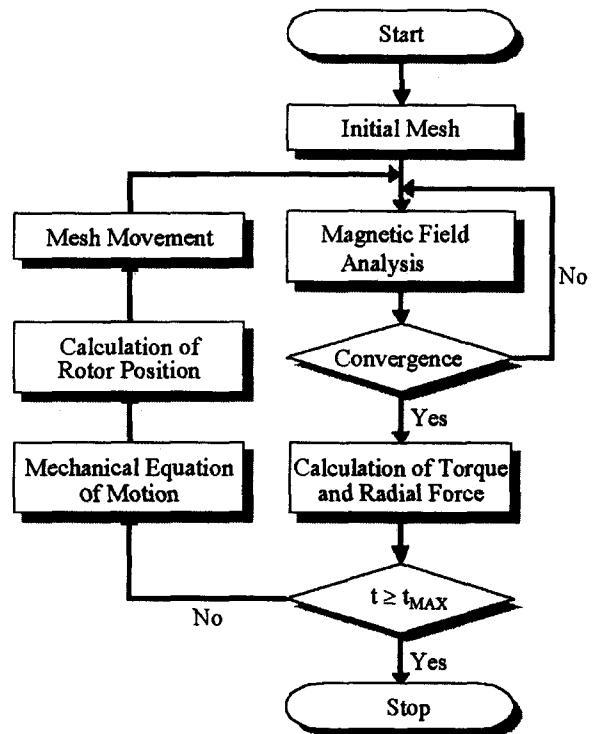
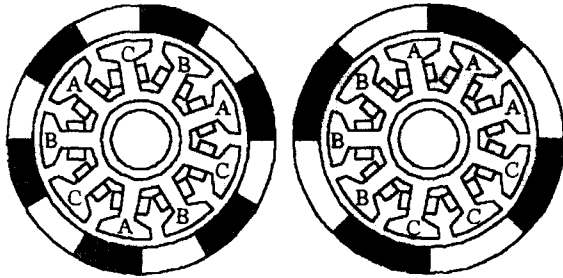


그림 4 기전 연성계 해석을 위한 흐름도
Fig. 4 Flowchart of electromechanically coupled field analysis

3. 해석 대상

제안된 수치해석 기법을 그림 5와 같은 회전 대칭형 12극 9슬롯 모터와 회전 비대칭형 8극 9슬롯 모터에 적용하였다. 표1은 해석 대상의 전기 기계적 설계 사양들을 나타낸 것이다.



(a) 12P9S motor

(b) 8P9S motor

그림 5 해석 대상 모델

Fig. 5 Analysis model

표 1 해석 대상 모터의 설계 사양

Table. 1 Design specifications of analysis models

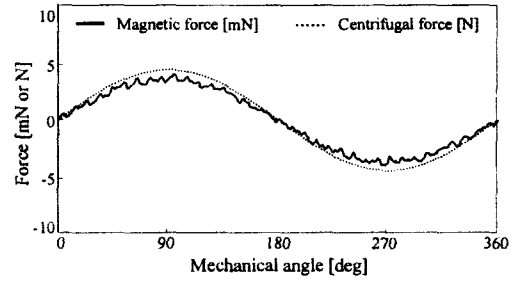
Quantity	Value
Mass of rotor	$15.719 \times 10^{-3} \text{ kg}$
Bearing stiffness coefficient	$2.021 \times 10^7 \text{ N/m}$
Polar moment of inertia	$2.306 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Transverse moment of inertia	$1.366 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Mass unbalance	$1.1 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}$
Residual flux density of PM	1.25 T
Air gap thickness	0.25 mm
Outer diameter of stator	19.45 mm
Outer diameter of rotor	23.35 mm

4. 해석 결과 및 검토

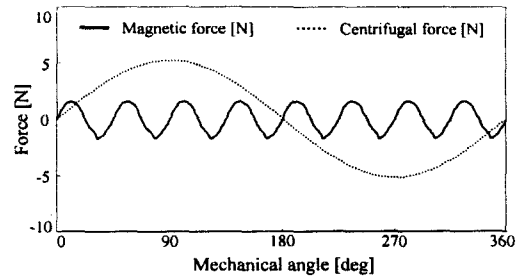
4.1 전기 기계의 가진력 해석

4.1.1 가진력의 시간 응답

그림 6은 정상 상태에서 불평형 자력과 질량 불평형에 의한 원심력을 나타낸 것이다. 일반적으로 회전 대칭형 모터의 경우는 공극 자속이 대칭으로 분포하여 자기력이 서로 상쇄되므로 불평형 자력을 가질 수 없다. 그러나 회전자가 회전하면서 질량 불평형에 의한 원심력이 발생하고 이 기계적인 힘에 의해 회전자는 반경 방향으로 변위를 가지고 회전한다. 그러므로 비록 전기적인 대칭 구조를 가지고 있는 모터의 경우도 기계적인 가진력에 의해 공극의 자속 분포가 불균일하게 되어 그림 6 (a)와 같은 불평형 자력을 가진다.



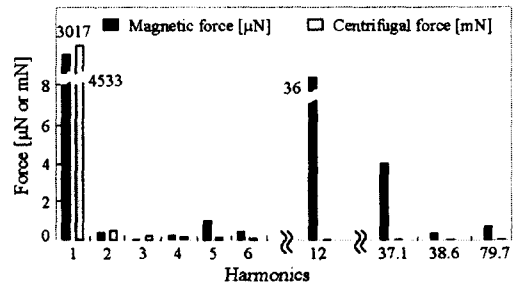
(a) 12P9S motor



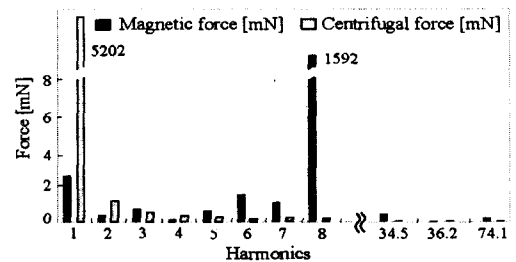
(b) 8P9S motor

그림 6 정상 상태에서 불평형 자력과 원심력

Fig. 6 Unbalanced magnetic force and centrifugal force in steady state



(a) 12P9S motor



(b) 8P9S motor

그림 7 불평형 자력과 원심력의 주파수 분석

Fig. 7 Frequency analysis of unbalanced magnetic force and centrifugal force

이 같은 불평형 자력은 회전자의 회전 방향으로 공극을 따라 회전하며 그 크기는 그림에서 처럼 원심력에 비해 상당히 작은 값을 가지고 있다. 반면 회전 비대칭형 모터의 경우는 영구 자석과 권선의 비대칭 구조로 인한 공극 자속 밀도의 비대칭 분포로 기계적인 가진력이 존재하지 않더라도 기동시부터 큰 불평형 자력을 가지고 있다. 또한 회전 비대칭형 모터의 불평형 자력은 그림 6 (b)와 같이 회전 대칭형과는 달리 회전자가 1회전하는 동안 회전자의 회전 방향과 반대 방향으로 8번 회전한다.

4.1.2 가진력의 주파수 분석

그림 7은 불평형 자력과 원심력을 푸리에 변환하여 그 주파수를 분석한 것이다. 12 V의 전압이 인가되었을 경우 정상 상태에서 회전 대칭형 모터의 경우는 102 Hz, 회전 비대칭형 모터의 경우는 110 Hz로 각각 회전하였다. 원심력은 기본과 성분이 지배적이는데 반해 불평형 자력은 극수의 배수에 해당하는 주파수 성분이 지배적이다. 불평형 자력의 경우 회전 비대칭형 모터의 경우는 기본과 성분보다 8고조파가 더 크게 나타나지만 회전 대칭형 모터의 경우는 기본과 성분이 극수에 해당하는 12고조파보다 훨씬 큰 값을 가지고 있다. 이는 회전 대칭형 모터의 경우 불평형 자력이 전기적 요인에 의해 발생하는 것이 아니라 질량 불평형에 의한 원심력에 의해 발생하기 때문이다. 또한 기전연성해석이 아닌 일반적인 전자장 수치해석의 경우에는 불평형 자력은 극수의 정수배에 해당하는 주파수 성분만을 가지지만[3] 실제 모터의 경우 본 해석과 같이 회전자는 축 중심의 회전 운동 뿐 아니라 병진 운동에 의해 그림에서와 같이 극수의 정수배에 해당하지 않는 주파수 성분도 가지게 된다.

4.2 회전자의 고유진동 해석

그림 8은 식 (6), (7), (8), (9)의 제차 방정식을 풀어서 회전 속도에 따라 회전자의 고유 진동수를 해석한 것이다. 회전 대칭형과 회전 비대칭형 모두 회전자의 기계적 구조와 물성치가 같기 때문에 같은 고유 진동수를 가진다.

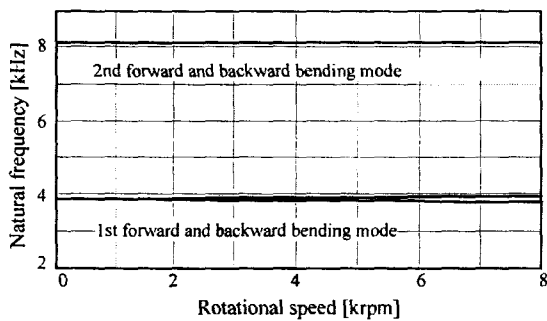


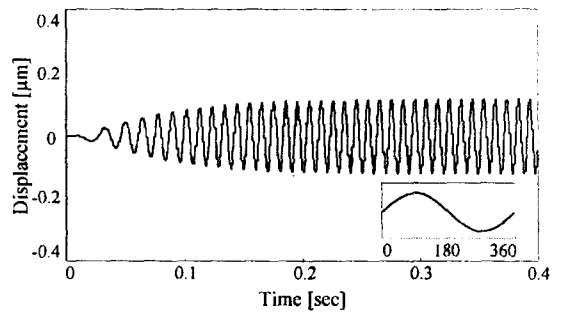
그림 8 회전자 회전 속도에 따른 고유 진동수의 변화
Fig. 8 Variation of natural frequency due to the change in rotational speed

스핀들 모터와 같은 회전체의 경우 자이로스코픽 효과 (gyroscopic effect)가 커지면 고유 진동수중 일부는 회전 속도의 증가에 따라 전, 후진 모드로 분리된다. 해석 대상 모터의 경우 정지 상태에서 3800 Hz와 8000 Hz 부근에서 고유 진동수를 가지고 있다가 속도가 증가함에 따라 전 후진 모드로 분리된다.

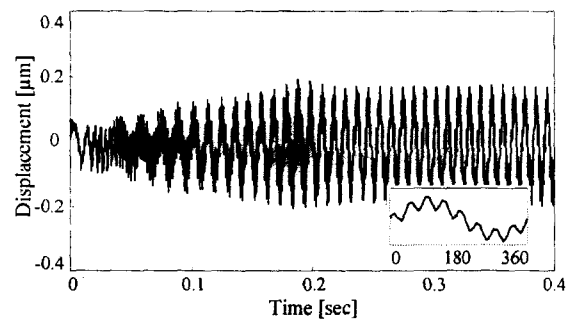
4.3 회전자의 강제진동 해석

4.3.1 변위의 시간 응답

그림 9와 10은 기동 시에서부터 정상 상태에 이르기까지 회전자의 병진 변위와 각변위를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 회전자의 한 회전 동안 병진 변위와 각 변위 모두 한 주기를 가지지만 회전 비대칭형 모터의 경우 회전 대칭형 모터에 비해 상대적으로 큰 불평형 자력으로 인해 모터의 1회전에 8번의 주기를 갖는 진동 성분을 가지고 있다. 그런데 그림 9와 10의 (b)와 같이 회전 비대칭형 모터의 경우 0.19초 근방에서 병진 변위와 각 변위 모두 크게 증가하다가 시간이 경과하면서 정상 상태로 수렴해가는데 이는 이 속도 근방에서 모터의 불평형 자력의 40번째 부근의 고조파 성분이 첫번째 후진 모드 및 전진 모드와 연속적으로 공진 현상을 일으킨 결과이다.

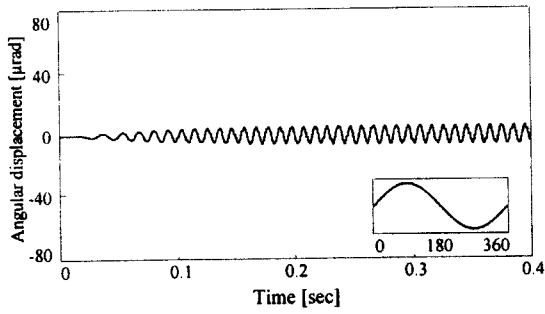


(a) 12P9S motor

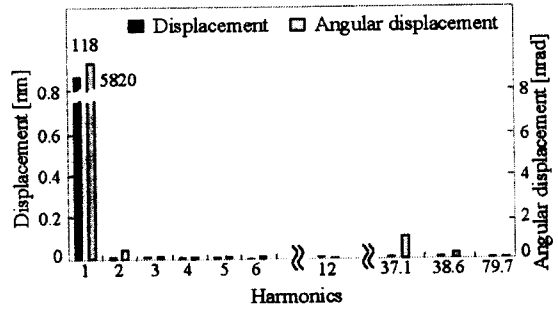


(b) 8P9S motor

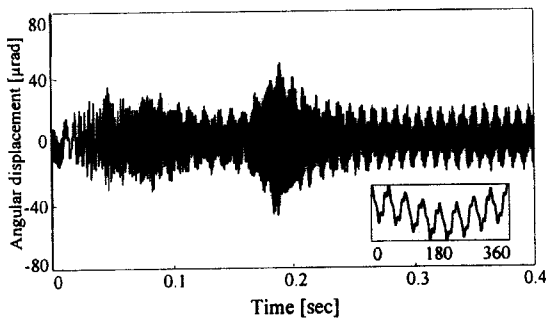
그림 9 병진 변위의 시간 응답
Fig. 9 Time response of translational displacement



(a) 12P9S motor



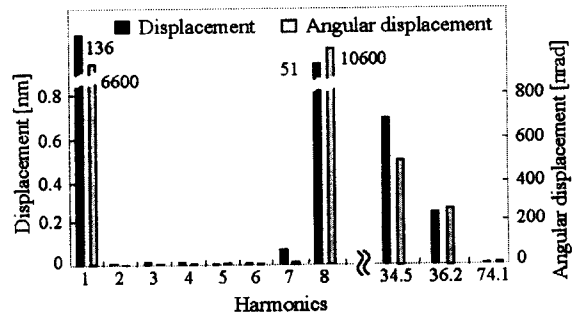
(a) 12P9S motor



(b) 8P9S motor

그림 10 각변위의 시간 응답

Fig. 10 Time response of angular displacement



(b) 8P9S motor

그림 12 병진 변위와 각변위의 주파수 분석

Fig. 12 Frequency analysis of translational and rotational displacements

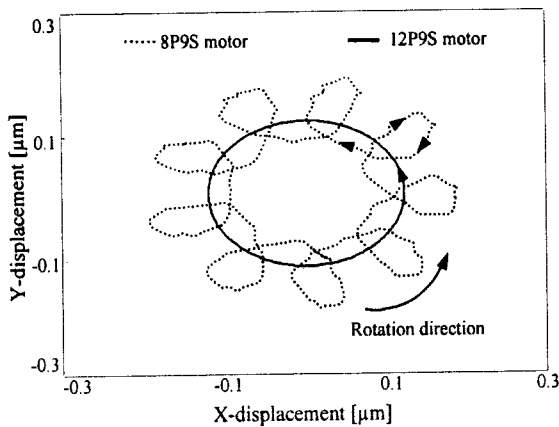


그림 11 회전자의 회전궤적

Fig. 11 Orbit of a rotor

회전 대칭형 모터의 경우 이 같은 공진 현상에 의한 변위의 증가가 관찰되지 않는 이유는 불평형 자력의 고조파 성분이 회전 비대칭형에 비해 상대적으로 매우 작기 때문이다. 공진을 일으킨 시점에서 병진 변위와 각 변위는 정상 상태값에 비해 각각 1.14배 2.5배씩 증가하였다

4.3.2 회전자의 회전궤적

그림 11은 정상 상태에서 질량 중심에 위치한 회전자의 회전 궤적을 그린 것으로 회전자는 반시계 방향으로 회전하고 있다. 회전 대칭형 모터의 경우 운동 궤적은 회전자의 회전 방향과 같은 방향으로 진행하면서 나선형으로 크기가 증가하다가 정상 상태에서는 원형에 가까운 모양을 갖는다. 물론 불평형 자력과 토크 리플에 의한 고주파 성분을 포함하고 있지만 전체적으로 질량 불평형에 의한 원심력에 의해 궤적의 형태가 결정된다. 회전 비대칭형 모터의 경우 전체적으로는 회전자의 회전 방향과 같은 방향으로 궤적을 그리지만 불평형 자력에 의해 회전방향과 반대 방향의 운동(backward whirling motion)을 한다. 궤적에 나타나는 9개의 봉우리는 영구 자석의 중심이 슬롯의 중심과 일치하는 지점에서 나타난다.

4.3.3 변위의 주파수 분석

그림 12는 병진 변위와 각변위에 대한 주파수 분석 결과이다. 전기 기계적 가진력인 불평형 자력과 원심력에 대한 주파수 분석 결과인 그림 7과 비교해보면 회전 대칭형 모터의 경우는 37.1번째, 38.6번째 그리고 79.7번째 고조파 성분이 그리고 회전 비대칭형 모터의 경우는 34.5번째, 36.2번째

그리고 74.1번째의 고주파 성분이 다른 고조파 성분에 비해 전기 기계적인 가진력이 작음에도 불구하고 상대적으로 큰 변위를 나타내고 있다.

이는 앞서 계산한 회전자의 자유 응답으로부터 설명할 수 있다. 정상 상태에서 회전 대칭형 모터의 경우 3781 Hz, 3950 Hz, 8131 Hz, 8135 Hz 근처에서 고유 진동수를 가지고 회전 비대칭형 모터의 경우 3775 Hz, 3957 Hz, 8131 Hz 그리고 8135 Hz 부근에서 고유 진동수를 가지고 있는데 이는 앞에서 언급한 고조파 성분에 매우 근접해 있으므로 각 주파수에서 공진이 일어나고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 맥스웰 방정식과 전압 방정식 그리고 Newton-Euler 방정식에 의해 하드 디스크 드라이브에 사용되는 스피들 모터의 기전 연성 해석을 수행하였다. 회전 대칭형 12P9S 모터와 회전 비대칭형 8P9S 모터에서 발생하는 불평형 자력과 원심력 그리고 병진 변위와 각변위에 대한 시간 응답과 주파수 분석을 수행하여 전기 기계적인 가진력과 응답과의 상호 관계를 파악하였다. 회전 대칭형 모터의 경우 공극 자속의 대칭 분포로 인해 불평형 자력을 가질 수 없지만 원심력에 의한 회전자의 병진 운동으로 인해 회전 비대칭형 모터와 같이 불평형 자력이 존재함을 확인하였다. 그리고 회전 비대칭형 모터에서 회전자의 회전 방향과 반대 방향으로 진행되는 불평형 자력은 회전자의 운동 궤적에서 회전 방향과 반대 방향의 운동(backward whirling motion)을 일으킴을 알 수 있었다. 또한 회전자의 자유 진동에 의한 고유 진동수를 계산하여 불평형 자력이 고유 진동수와 일치할 때 공진 현상에 의해 병진 변위 및 각변위가 크게 증가함을 확인하였다. 이상의 기전 연성계 해석은 속도 제어를 하지 않은 경우로 향후 연구에서는 펄스 폭 변조에 의한 제어를 포함하고 축 및 베이스 플레이트의 강성을 고려한 운동 방정식을 유도하여 전기계의 유한 요소법과 결합시키는 것이 필요하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Bi Chao, Z.J. Liu, T.S. Low, "Unbalanced Magnetic Pull In PM Synchronous Machines - Its relation With Stator Teeth And Armature Winding", Proc. of 25th annual symposium on Incremental Motion Control System and Devices, pp. 79-84, 1996
- [2] C. Bi, Z.J. Liu, T.S. Low, "Effects of Unbalanced Magnetic Pull in Spindle Motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 5, pp. 4080-4082, 1997
- [3] J. Monteiro, S. Devadas, and B. Lin, "A Methodology for Efficient Estimation of Switching Activity in Sequential Logic Circuits," ACM/IEEE Design Automation Conf., pp. 12-17, 1994.
- [4] G. Henneberger, et al., "Procedure for the Numerical Computation of Mechanical Vibrations in Electrical Machines", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 28, no. 2, pp. 1351-1354, 1992
- [5] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.
- [6] D.H. Im, et al., "Analysis of radial force as a source of vibration in an induction motor with skewed slots", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 2, pp. 1650-1653, 1997
- [7] Thomas R. Kane and David A. Levinson, Dynamics : Theory and Applications, McGraw-Hill Book Company, 15-124, 1976

저 자 소 개



장 정 환 (張 正 煥)
 1968년 5월 1일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업, 1997년 한양대 전기공학과 졸업(석사), 1997년~현재 한양대 정밀기계공학과 박사과정 재학중
 Tel : 02-2297-3786, Fax : 02-2292-3406
 E-mail : cjhwan@hanmail.net



장 건 희 (張 健 熙)
 1961년 2월 5일생. 1984년 한양대 기계공학과 졸업, 1986년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사), 1993년 University of California, Berkeley 기계공학과 졸업(공학박사), 1986년~1989년 한국통신 사업지원단 전임 연구원, 1993년~1994년 Quantum corporation, design engineer, 1994~현재 한양대학교 기계공학부 부교수
 Tel : 02-2290-0431, Fax : 02-2292-3406
 E-mail : ghjang@email.hanyang.ac.kr