

스핀들 회전축계의 기전 연성 해석을 이용한 모바일 HDD의 자유 낙하 특성 및 감지에 관한 연구

Characterization and Detection of a Free-Falling State of a mobile HDD Using Electromechanical Analysis in Rotating Spindle System

박상진† · 장건희* · 김철순*** · 한재혁**

Sang-Jin Park, Gun-Hee Jang, Cheol-Soon Kim and Jae-Hyuk Han

Key Words : Brushless DC Motor(브러시리스 직류 전동기), Fluid Dynamic Bearing(유체 동압 베어링), Free-Fall(자유낙하), Hard Disk Drive(하드 디스크 드라이브), Rotor Dynamics(회전체 동역학), Time-Stepping Finite Element Method(시간 차분 유한 요소법)

ABSTRACT

This research investigates the electromechanical characteristics of a spindle motor in a free-falling mobile hard disk drive before unexpected shock. Electromechanical simulation includes a time-stepping finite element analysis of the magnetic field in a speed controlled brushless DC motor and dynamic analysis of the stationary and rotating part linked by fluid dynamic bearing under the free-falling condition. Analysis results show that the dynamic characteristics of the rotating spindle system during free-falling state have an effect on the relative motion between the stationary and rotating part of HDD. It results from the variation of reaction force in the bearing area due to the gravity force exerted on the rotating part of HDD, and the free-falling condition can be detected by observing the signal of the spindle motor and disk-head interface without using the accelerometer.

1. 서론

HDD(하드 디스크 드라이브, Hard Disk Drive)는 플래시 메모리(flash memory)에 비하여 내충격에 취약하기 때문에 모바일(mobile) 기기로의 적용에 제약 받고 있다. 특히 Read/write 동작 중인 HDD의 경우 헤드가 임의의 충격으로 디스크의 표면과 접촉하게 되면 데이터의 손실 및 헤드 크래쉬(head crash)가 발생하게 되고, 이는 HDD를 모바일 기기에 적용하는데 있어 가장 큰 장애 요소 중 하나이다. 그러나, HDD의 우수한 가격 대비 저장 용량 때문에 1인치 이하의 마이크로 드라이브 등의 개발이 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 MEMS 기반의 가속도계를 이용하여 HDD의 낙하 상태를 충격 이전에 감지하여 헤드를 언로드(unload)시키는 방법이 모바일 기기에 적용되고 있다.

관련 연구자들은 기계적으로 충격에 강인한 헤드-디스크 인터페이스(Head-Disk interface)의 설계에 대한 연구를 주로 진행해 왔다.^(1,2) 또한

센서를 이용하지 않고 실험을 통해 스핀들 모터의 전류 신호를 관찰 함으로서 자유 낙하를 충격 이전에 감지하고 헤드를 언로드시키는 방법에 대한 연구가 진행되었다.^(3,4) 그러나 낙하 시 전류 신호의 변화에 대한 이론적인 배경이 제시되지 않았고 유체 동압 베어링을 사용하는 모바일 HDD에는 적용되지 않았다.

본 연구에서는 모바일 HDD에서 스핀들 회전축계의 기전 연성 해석을 통하여 자유 낙하 시 스핀들 모터로부터 발생하는 기계 및 전기적 변수들의 변화를 고찰하고, 자유 낙하를 충격 이전에 감지할 수 있는 배경 이론을 제시하였다. 모바일 HDD의 기전 연성 해석은 디스크의 속도 제어를 포함하는 브러시리스(brushless) DC 모터의 전자장 유한 요소법, 유체 동압 베어링의 유한 요소 해석, 자유 낙하하는 스핀들 회전축계의 동역학적 거동 해석을 동시에 고려함으로써 자유 낙하하는 HDD 스핀들 모터의 특성 변화를 효과적으로 고찰하였다.

2. 기전 연성 해석

2.1 스핀들 모터에서 발생하는 전자장 해석
하드 디스크 드라이브 스핀들 모터의 2차원 유한 요소 해석을 위한 전자장의 지배방정식은 Maxwell 방정식으로부터 자기 벡터 포텐셜을 계

† 책임저자; 한양대학교 정밀기계공학과
E-mail : sjpark@ihanyang.ac.kr
Tel : (02) 2299-5685, Fax : (02) 2292-3406

* 정희원, 한양대학교 기계공학과

** 정희원, 삼성종합기술원 Storage Lab.

변수로 하여 다음의 식으로 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = J - v \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서, v , J , A_z , M 는 각각 투자율의 역수인 저항률, 모터에 유입되는 전류 밀도, 자기 벡터 포텐셜, 영구자석의 자화를 나타낸다.

식 (1)은 스펀들 모터의 구동회로에 대한 전압 방정식과 결합되어 전체 계 행렬 방정식을 구성하게 된다. 구동회로에서는 상 전환 및 PWM 온/오프 동작 시 순간적으로 축적된 에너지에 의한 전류가 환류 경로를 통해 흐르게 되며, 이를 고려하기 위해 각 상의 전압 방정식 및 환류 경로에 대한 전압 방정식의 구성이 필요하다.⁽⁵⁾ 식 (2), (3), (4)는 PWM 온/오프 스위칭 동작 시에 적용되는 전압 방정식을 나타낸다.

$$R_i I_i + L_i \frac{dI_i}{dt} + \frac{d\phi_i}{dt} \quad (\text{Duty On}) \quad (2)$$

$$-R_j I_j - L_j \frac{dI_j}{dt} - \frac{d\phi_j}{dt} = V_s$$

$$R_i I_i + L_i \frac{dI_i}{dt} + \frac{d\phi_i}{dt} \quad (\text{Duty Off}) \quad (3)$$

$$-R_j I_j - L_j \frac{dI_j}{dt} - \frac{d\phi_j}{dt} = -V_D$$

$$I_i + I_j + I_k = 0 \quad (i, j, k : \text{phase index}) \quad (4)$$

여기서, R , L , ϕ , I , V_s , V_D 는 각각 코일의 저항, 코일단의 누설 인덕턴스, 쇄교 자속, 입력 전류, 입력 전압, 다이오드의 전압 강하분을 나타낸다.

전체 계 행렬 방정식은 Galerkin 유한 요소 전개에 의한 지배 방정식의 이산화와 유도한 전압 방정식으로 구성되며 시간 의존항의 처리를 위해 후진 차분법을 적용하여 전자장의 과도 특성을 해석을 가능하게 하였다.

2.2 유체 동압 베어링 해석

하드 디스크 드라이브의 디스크-스핀들 회전축을 지지하는 유체 동압 베어링의 지배 방정식은 Reynolds 방정식으로부터 유도되어진다. 식 (5)와 식 (6)은 원통 좌표계 (r , θ , z)에 대한 저널 및 스템스트 베어링에 대한 지배 방정식을 각각 나타낸다.

$$\frac{\partial}{R\partial\theta} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{R\partial\theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{\dot{\theta}_z}{2} \frac{\partial h}{\partial\theta} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{r\partial\theta} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{r\partial\theta} \right) = \frac{r\dot{\theta}_z}{2} \frac{\partial h}{r\partial\theta} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

여기서 h , p , μ , R 은 각각 유막의 두께, 유막에서 발생하는 압력, 윤활 유체의 점성, 저널 베어링의 반경을 나타낸다.

Reynolds 방정식의 유한 요소 전개를 통해 각 베어링 영역의 압력 분포를 계산하고, 베어링에서 발생하는 반력 및 마찰 토크는 각각 영역의 압력 및 전단 응력을 적분하여 계산되어 진다.⁽⁶⁾

2.3 HDD 운동 방정식 해석

HDD의 운동 방정식은 스펀들 모터의 고정부, 베이스 플레이트를 포함하는 고정부와 스펀들, 디스크, 영구 자석을 포함하는 회전부의 두 강체에 대한 Newton-Euler 방정식으로부터 유도할 수 있다. Fig. 1은 두 강체로 가정되는 HDD의 자유물체도를 나타내며, 각각의 강체는 3개의 병진 변위 및 3개의 각 변위를 가진다. 작용력에 의한 두 강체의 상대 변위는 유체 동압 베어링의 간극에 영향을 미치게 되어 베어링 반력 및 반력 모멘트를 변화시킨다. 식 (7)은 유체 동압 베어링에 의해 연결된 HDD의 고정부 및 회전부 강체에 대한 힘과 모멘트의 평형식을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \sum \mathbf{F}_i^S &= \mathbf{F}_G^S - \mathbf{F}_{HDB} - \mathbf{F}_{EM} \\ \sum \mathbf{M}_{\theta_i}^S &= \mathbf{M}_{HDB}^S - \mathbf{M}_{EM} \\ \sum \mathbf{F}_i^R &= \mathbf{F}_G^R + \mathbf{F}_U^R + \mathbf{F}_{HDB} + \mathbf{F}_{EM} \\ \sum \mathbf{M}_{\theta_i}^R &= \mathbf{M}_{HDB}^R + \mathbf{M}_U^R + \mathbf{M}_{EM} \end{aligned} \quad (7)$$

($i = x, y, z$)

여기서, \mathbf{F}_G , \mathbf{F}_{HDB} , \mathbf{F}_{EM} , \mathbf{F}_U , \mathbf{M}_{EM} , \mathbf{M}_{HDB} 는 각각 중력, 유체 동압 베어링의 반력, 불평형 전자기력, 회전 강체의 불평형 질량에 의해 발생하는 원심력 전자기 토크 및 베어링의 마찰 토크를 나타낸다. 첨자 S 와 R 은 고정부와 회전부의 두 강체를 각각 나타낸다.

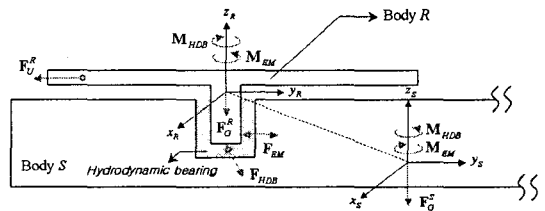


Fig. 1 Free body diagram of a free-falling mobile HDD

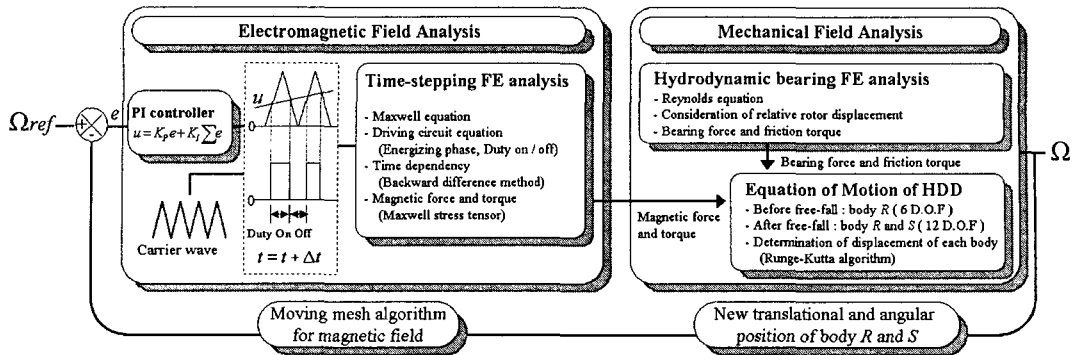


Fig. 2 Numerical procedure of electromechanical field of spindle motor

2.4 자유 낙하하는 HDD의 기전 연성 해석

Fig. 2는 HDD의 자유 낙하 해석을 위한 기전 연성 해석 절차를 나타낸다. 고정부 강체와 회전부 강체의 초기 자세가 정해지면 스핀들 모터의 PI 속도 제어기를 통해 모터의 입력이 결정되어지며, 모터의 여자상 및 PWM 온/오프 구간에 따르는 전압 방정식이 결정된다. 전압 방정식과 결합을 통하여 얻어진 전자장의 계 행렬 방정식에 의해 전자기적 변수들이 결정되면 모터의 공극 영역에서 Maxwell Stress Tensor 법에 의해 전자기 토크 및 불평형력을 계산할 수 있다. 또한 유체 동압 베어링의 영역에서는 고정부와 회전부 두 강체의 병진 변위 및 각 변위에 의해 슬리브와 축 사이의 간극이 결정되고 이에 대한 압력 분포 및 전단 응력 계산을 통해 반력 및 마찰토크를 계산한다. 이런 과정으로부터 얻어진 전기 및 기계적인 강체 작용력 및 토크는 식 (7)의 두 강체에 대한 운동 방정식에 적용되어지고 이를 Runge-Kutta 알고리즘에 의해 수치 적분하여 각 강체에

대한 속도 및 변위를 결정한다. 시간 스텝 Δt 이후의 전자장 및 유체 동압 베어링의 요소들은 계산된 두 강체의 상대 변위를 고려하여 재배치되어지며, 이런 일련의 과정들은 HDD가 자유 낙하하기 시작하여 충격이 발생하기 이전까지 반복하여 계산되어진다.

3. 해석 결과

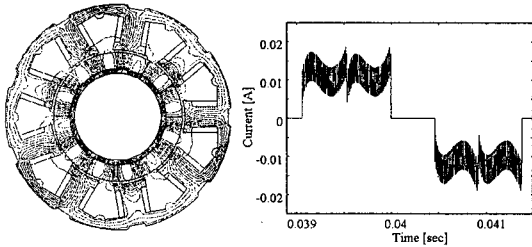
제안한 알고리즘을 이용하여 해석 프로그램을 개발하였고, 자유 낙하하는 모바일 HDD의 기전 연성 특성을 고찰하기 위해 마이크로 드라이브 스핀들 시스템에 대한 모델링을 수행하였다. Table 1은 해석 모델의 전기 및 기계적인 사양을 나타낸다. HDD는 임의의 모바일 기기에 장착된 상태로 가정하였으며 이 경우 HDD의 고정부는 회전부 강체를 제외한 모바일 기기의 전체의 질량과 관성을 가진다.

전자장 및 유체 동압 베어링 유한 요소 모델은 각각 8,125개의 삼각형 요소 및 3,624의 사각형 요소로 분할되었다. Fig. 3은 정상 상태에서 전자장 해석 영역의 자속 밀도 분포와 입력 전류 파형을 나타내며, Fig. 4는 유체 동압 베어링 해석 영역의 압력 분포를 나타낸다. Fig. 5는 HDD의 고정부 강체가 절대 좌표에 고정되어 있는 경우의 회전자의 운동 궤적을 나타낸다.

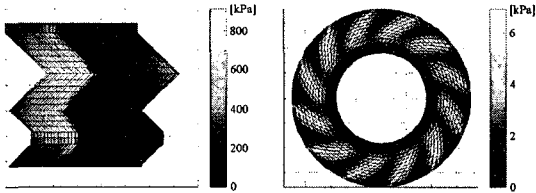
자유 낙하하는 HDD의 운동은 자중에 의한 중력 방향으로의 운동 및 외력의 작용에 의해 발생하는 각 운동의 두 가지 성분에 의한 중첩 효과로서 나타나게 된다. 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 HDD가 자유 낙하 초기에 외력이 작용하지 않는 경우에 대하여 해석을 수행하였고, 고정부 강체의 θ_x 에 대한 초기 조건이 각각 0° , 45° , 90° 인 세 가지 경우에 대해 자유 낙하 해석을 수행하고

Table 1 Specification of an analysis model

	Quantity	Value
Motor	Input voltage	3.3 V
	Rated speed	3600 rpm
	Phase resistance	6.95 Ω
FDB	Journal bearing clearance	3.5 μm
	Thrust bearing clearance	25 μm
	Viscosity of lubricant	0.016 Pa-s
Body S	Mass	178g
	Moment of inertia	$I_x : 1.322\text{e-}4 \text{ kg-m}^2$ $I_y : 5.660\text{e-}5 \text{ kg-m}^2$ $I_z : 1.621\text{e-}4 \text{ kg-m}^2$
Body R	Mass	24.97g
	Moment of inertia	$I_x : 1.468\text{e-}8 \text{ kg-m}^2$ $I_y : 1.468\text{e-}8 \text{ kg-m}^2$ $I_z : 2.752\text{e-}8 \text{ kg-m}^2$
	Mass unbalance (1 disk)	3.862e-2 g-mm



(a) Magnetic flux distribution (b) Phase current
Fig. 3 Electromagnetic field at the steady state



(a) Journal bearing (b) Thrust bearing
Fig. 4 Fluid dynamic bearing field at the steady state

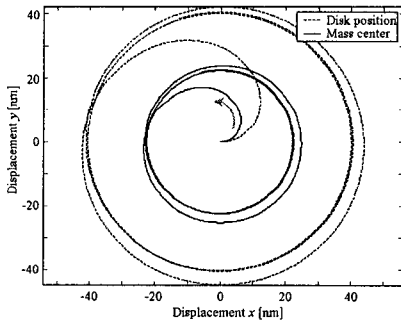
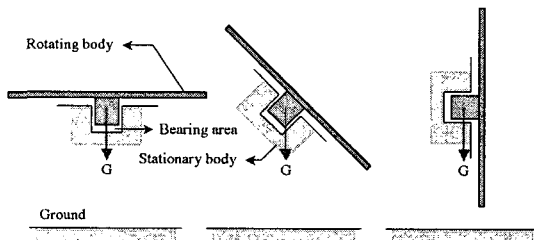


Fig. 5 Orbit of rotating body

이를 고찰하였다.

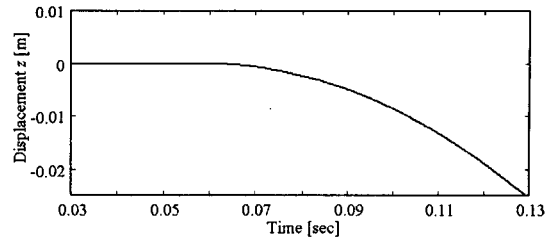
3.1 수평 자세에서의 자유 낙하 특성

Fig. 7 은 HDD 가 초기에 외력이 없이 자중에 의해서 수평으로 낙하하는 경우 스피indle 모터의 기전 연성 변수들의 변화를 나타내고 있다. Fig. 7 의 (a), (b), (c), (d), (e)는 자유 낙하하는 HDD

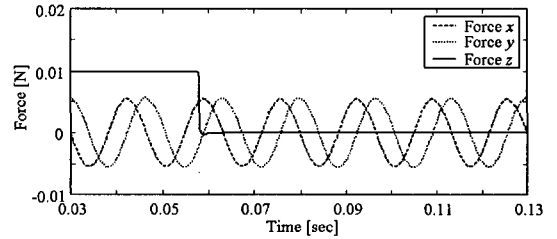


(a) $\theta_{x0}^s = 0^\circ$ (b) $\theta_{x0}^s = 45^\circ$ (c) $\theta_{x0}^s = 90^\circ$

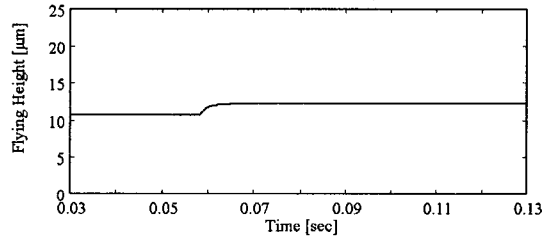
Fig. 6 Simulated conditions of a free-falling HDD



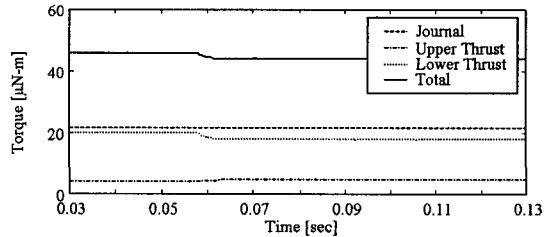
(a) Falling displacement of stationary body



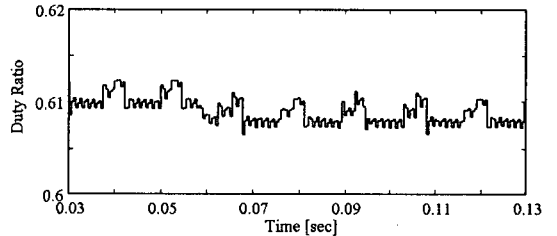
(b) Reaction force of fluid dynamic bearing



(c) Flying height of rotating body



(d) Friction torque of fluid dynamic bearing



(e) PWM duty ratio

Fig. 7 Electromechanical variables in case of parallel drop

의 중력 방향 변위, 유체 동압 베어링의 압력에 의해 발생하는 힘, 회전부 강체의 부상 높이, 베어링에서 발생하는 마찰 토크, 디스크의 속도 제

어를 수행하기 위한 PWM duty ratio 의 변화를 각각 나타낸다. 디스크를 포함하는 회전부 강체는 고정부 강체로부터 상부 및 하부 스러스트 (thrust) 베어링으로 지지되어 있으며, HDD 의 고정부가 절대 좌표에 고정되어 있는 경우, 회전부 강체의 자중에 의한 힘은 스러스트 베어링에서 발생하는 압력에 의해 발생하는 축 방향 힘과 평형을 이루고 있다. 그러나 HDD 가 낙하를 시작하게 되면 고정부 및 회전부의 두 강체가 중력 방향으로 같은 속도로 운동을 하게 되며, 유체 동압 베어링의 영역에서 회전부 강체의 자중에 의한 작용력이 두 강체의 상대적인 운동에 의해 제거된다. Fig. 7 (b)는 HDD 가 자유 낙하를 시작하면서 회전체 자중에 의한 힘이 제거되고, 유체 동압 베어링의 축 방향 지지력이 발생하지 않는 현상을 보여준다. Fig. 7 (c)는 회전부 강체의 고정부 강체에 대한 상대적인 부상 높이가 HDD 낙하와 동시에 약 $1.6 \mu\text{m}$ 증가하는 것을 보여주고 있다. 급격한 부상 높이의 변화는 Fig. 7 (d)에서와 같이 스러스트 베어링에서 발생하는 마찰 토크의 변화를 발생시키게 되는데, 이는 스러스트 베어링의 마찰 토크가 상부 및 하부의 간극 변화로 인해 변화하기 때문이다. 이 경우 부상 높이의 변화에 의한 전체 베어링 영역의 마찰 토크는 약 4.4% 감소하게 된다. 유체 동압 베어링의 마찰 토크는 전기적 관점에서 볼 때 스피들 모터의 부하 토크에 포함된다. 베어링 마찰 토크의 감소는 스피들 모터의 디스크 속도 제어 루프에서 감지되어 모터의 입력 PWM duty ratio 를 변화시키게 된다. 그림 7 (e)와 같이 HDD 의 낙하 이후 PWM duty ratio 는 약 0.2% 감소하게 된다. 감소된 PWM duty ratio 는 스피들 모터의 전기적 변수들인 입력 전류, 전자기 토크를 동시에 변화시킨다.

3.2 초기 자세별 자유 낙하 특성

HDD 낙하의 초기 자세가 중력 방향에 수평 또는 수직이 아닌 경우에는 회전부 강체의 자중을 지지하기 위한 베어링의 축 방향 반력이 스러스트 및 저널(journal) 베어링에서 동시에 발생하게 되며, 그 비율은 HDD 의 자세 각에 따라서 결정된다. Fig. 6 의 (b)는 회전부 강체의 하중을 저널 및 스러스트 베어링이 동일한 반력으로 지지하는 경우이며, (c)는 저널 베어링이 축 방향 지지력을 모두 발생시키는 경우이다. Fig. 6 (c)의 경우에는 자유 낙하가 시작되면서 스러스트 베어링의 부상 높이가 변화하지 않으며, 상대적으로 저널 베어링에서 중력 방향으로 작용하고 있던 정적 편심 (static eccentricity)이 제거된다. Table 2 는 자

Table 2 Variation of flying height of thrust bearing due to the free-fall

Initial condition	Before drop	After drop	Variation of flying height
$\theta_x=0^\circ$	10.61 [μm]	12.21 [μm]	6.4 [%]
$\theta_x=45^\circ$	11.07 [μm]	12.21 [μm]	4.6 [%]
$\theta_x=90^\circ$	12.21 [μm]	12.21 [μm]	0.0 [%]

Table 3 Variation of static eccentricity of journal bearing due to the free-fall

Initial condition	Before drop	After drop	Variation of static eccentricity
$\theta_x=0^\circ$	0 [nm]	0 [nm]	0.00 [%]
$\theta_x=45^\circ$	17 [nm]	0 [nm]	0.49 [%]
$\theta_x=90^\circ$	21 [nm]	0 [nm]	0.60 [%]

유 낙하하는 HDD 의 스러스트 베어링 영역에서 초기 자세에 따른 부상 높이의 변화를 나타내며, Table 3 은 저널 베어링 영역에서 초기 자세에 따른 정적 편심의 변화량을 나타낸다. Fig. 6 (c)와 같은 수직 초기 자세를 가지는 경우에는 저널 베어링이 스러스트 베어링에 비해 간극이 작고 높은 강성을 가지기 때문에 자유 낙하의 이전과 이후의 변위 변화가 스러스트 베어링의 경우보다 크지 않다. 그러나 저널 베어링의 순간적인 편심을 변화는 헤드-디스크 인터페이스에서 TMR(Track Mis-Registration)에 직접적인 영향을 주게 되므로, 이는 액추에이터(actuator)의 위치 제어 루프에서 감지가 가능하다. 즉, HDD 의 자유 낙하 여부를 판별하기 위해서는 스피들 모터의 기전 연성 변수의 변화 및 액추에이터의 TMR 신호를 동시에 활용하는 방안이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 자유 낙하하는 스피들 회전축계의 기전 연성 해석을 통하여 기전 연성 변수들의 변화를 이용하여 충격 이전에 HDD 의 헤드를 언로드시킬 수 있는 이론적인 배경을 제시하였다. 해석 결과는 작동 중인 HDD 가 자유 낙하할 때 발생하는 기전 연성 변수들의 변화를 이용하면 HDD 의 자유 낙하 상태를 감지할 수 있음을 보여준다. 또한, 제시한 해석 방법은 모바일 HDD 가 외부 강제력에 의해 복잡한 운동을 가지는 경우 HDD 스피들 회전축계의 특성 변화 고찰에 사용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Jayson E.M., Smith P.W., Talke, F.E., 2003, "Shock Modeling of the Head-media Interface in an Operational Hard Disk Drive," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 5, pp. 2429-2431
- (2) Edwards J.R., 1999, "Finite Element Analysis of the Shock Response and Head Slap Behavior of a Hard Disk Drive," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp. 863-867
- (3) David H. Jen, Mike Suk, 2000, "Method and Apparatus for Unloading Head from Disk before a Shock to a Disk Drive System," United States Patent, No. 6,101,062
- (4) G. H. Jang, S. J. Part, 2005, " Sensorless Detection of a Free-Falling HDD by Electromechanical Signal of a Spindle Motor," IEEE Transactions on Magnetics, will be published
- (5) G. H. Jang, J. H. Chang, D. P. Hong, K. S. Kim, 2002, "Finite-element Analysis of an Electromechanical Field of a BLDC Motor considering Speed Control and Mechanical Flexibility," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 945-948
- (6) G. H. Jang, Y. J. Kim, 1999, "Calculation of Dynamic Coefficients in a Hydrodynamic Bearing considering Five Degrees of Freedom for a General Rotor-bearing System," ASME Journal of Tribology, Vol.121, No.3, pp.499-505