

회전 디스크-스핀들, 액츄에이터와 지지구조의 유연성을 고려한 하드 디스크 드라이브의 고유 및 강제 진동 해석

Free and Forced Vibration Analysis of a Hard Disk Drive Considering the Flexibility of Spinning Disk-Spindle, Actuator and Supporting Structure

서 찬 희*·장 건 희**·이 호 성***

Chanhee Seo, Gunhee Jang, Hoseong Lee

Key Words : Dynamics(동역학), HDD(Hard Disk Drive, 하드 디스크 드라이브), FEM (Finite Element Method, 유한 요소법), Rotor Dynamics(회전체 동역학), FDB(Fluid Dynamic Bearing, 유체 동압 베어링), Actuator(액츄에이터), Suspension(서스펜션), Air bearing(공기 베어링), HDI(Head-disk interface, 헤드-디스크 영역), Head crash(헤드 충돌)

ABSTRACT

This paper presents a finite element method to analyze the free and forced vibration of a hard disk drive (HDD) considering the flexibility of a spinning disk-spindle with fluid dynamic bearings (FDBs), an actuator with pivot bearings, an air bearing between head-disk interface and the base with complicated geometry. Finite element equation of each component is consistently derived with the satisfaction of the geometric compatibility of the internal boundary between each component. The spinning disk, hub and FDBs are modeled by annular sector elements, beam elements and stiffness and damping elements, respectively. The actuator arm, E-block, suspension and base plate are modeled by tetrahedral elements. The pivot bearing in the actuator and the air bearing between head-disk interfaces are modeled by the stiffness element with five degrees of freedom and the axial stiffness, respectively. A global matrix equation obtained by assembling the finite element equations of each substructure is transformed to a state-space matrix-vector equation, and both damped natural frequencies and modal damping ratios are calculated by solving the associated eigenvalue problem with the restarted Arnoldi iteration method. Modal and shock testing are performed to show that the proposed method well predicts the vibration characteristics of a HDD.

1. 서 론

데이터를 기록 및 재생하는 헤드와 회전 디스크 사이의 진동 성분 중 NRRO(Nonrepeatable runout)는 디스크와 헤드 사이에서 트랙 비정렬(Track misregistration)을 야기함으로써 정보기억장치의 오작동을 유발시켜 디스크 자기기록의 고밀도화를 저해하는 가장 큰 요인으로 작용하고 있다. 또한 충격에 의한 과도한 진동은 헤드와 디스크 표면의 접촉 및 이로 인한 자기필름(magnetic film)의 마모를 발생시킬 수 있는 Head crash라는 오작동을 유발한다. 그러나 디스크 회전 시에 헤드-디스크 인터페이스의 고유 및 강제 진동을 해석할 수 있는 전체 HDD의 시뮬레이션 모델은 아직 개발되지 않았다. 이는 유연 지지구조와 회전 디스크-스핀들 시스템의 연결이 어렵고 여러 베어링의 강성 및 감쇠 계수를

예측하기 어렵기 때문이다. Fig. 1 과 같이 전체 HDD 시스템은 스팬들 모터의 유체 동압 베어링, 액츄에이터의 볼베어링, 헤드와 디스크 사이의 공기 베어링과 지지구조로 구성되어 있다.

많은 연구자들이 회전하는 유연 디스크와 스팬들을 포함한 HDD 고유 진동 해석에 관한 연구를 수행하여 왔으며, Jintanawan⁽¹⁾등은 부분 구조 합성법과 모드 가정법을 이용하여 유연 디스크와 지지축의 탄성 변형을 고려한 고유 진동 특성을 해석하였다. Jang⁽²⁾ 등은 유한 요소법과 부분 구조 합성법을 이용하여 지지축의 탄성 변형을 고려한 3.5" HDD 스팬들 시스템의 고유 진동을 해석하였다. 그러나 HDD의 동특성은 복잡한 구조를 가지는 베이스 플레이트의 유연성에 의해 크게 영향을 받으며 이들이 제안한 해석 방법은 복잡한 유연 지지구조인 베이스 플레이트를 포함하지 못했다. Tseng⁽³⁾등은 부분 구조 합성법과 모드 가정법을 이용하여 유연 디스크와 지지구조의 일부인 하우징(Housing)의 유연성을 고려한 고유 진동 특성을 해석하였다. Jang⁽⁴⁾등은 복잡한 형상의 지지 구조를 가지는 베이스 플레이트와 하우징의 유연성을 고려한 HDD 유연 회전 디스크-스핀들

* 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : 4hee2@paran.com

Tel : (02) 2299-5685, Fax : (02) 2292-3406

** 한양대학교 기계공학과

*** 삼성전자, Storage 사업부

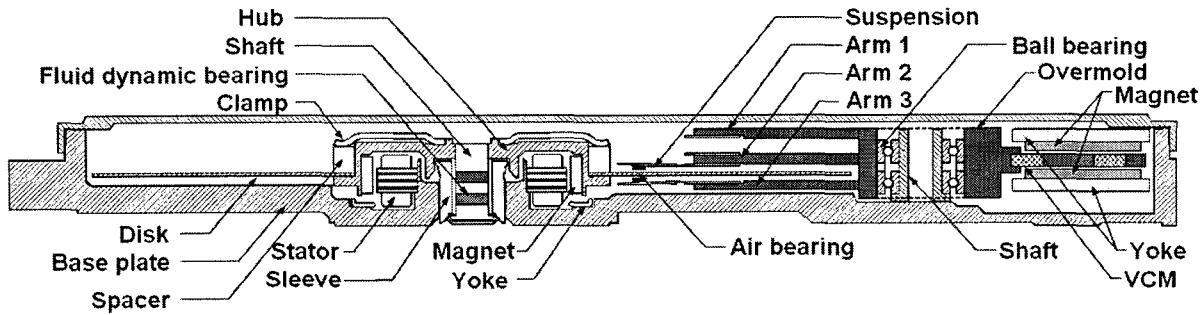


Fig. 1 Mechanical structure of a HDD

시스템을 유한 요소법과 부분 구조 합성법을 이용하여 고유 진동 해석을 하였다. Jintanawan⁽⁵⁾ 등은 ANSYS 를 사용하여 해석된 고유 진동수와 모드를 HDD 스픬들 시스템에 적용한 가정모드법으로 HDD 스픬들 시스템을 수학적으로 모델링하고 주파수응답함수와 시간응답을 해석하였다. 그러나 이들의 연구는 액츄에이터를 포함하지 않았기 때문에 회전 디스크와 헤드 사이의 상대 운동에 대한 연구를 수행하지 못했다. 또한 많은 연구자들이 회전 디스크-스핀들 시스템을 제외한 액츄에이터의 고유 진동 해석을 수행하였다. Park⁽⁶⁾, Xu⁽⁷⁾, Gao⁽⁸⁾ 등은 유한 요소법을 사용하여 헤드/액츄에이터만의 고유 및 강제 진동 해석을 수행하였다. 그러나 복잡한 유연 베이스 플레이트 위에 회전하는 디스크-스핀들 시스템과 액츄에이터를 포함한 전체 HDD 시스템에 대한 고유 및 강제 진동 해석은 이루어 지지 않았다.

본 연구에서는 유한 요소법과 모드 중첩법을 이용하여 복잡한 형상을 가진 베이스 플레이트, 액츄에이터를 포함하고 유체 동압 베어링으로 지지되는 유연 회전 디스크-스핀들 시스템에 대한 고유 및 강제 진동 해석을 수행하고 실험을 통해 해석 방법 및 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 해석 방법

2.1 유한 요소 해석

본 연구에서는 Jang(4)등이 제안한 방법을 적용하여 복잡한 형상의 지지 구조인 베이스 플레이트와 액츄에이터의 유연성을 고려하고 유체 동압 베어링으로 지지되는 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 유한 요소 모델을 개발하였다. 베이스 플레이트, 스테이터와 유체 동압 베어링의 슬리브를 포함하는 HDD 정지부는 각 절점에서 회전 자유도를 포함한 6 자유도 4 절점 사면체 유한 요소로 분할하고, 회전하는 스픬들 시스템의

헤브와 디스크는 6 자유도를 갖는 beam 과 annular sector 요소로 각각 분할하여, 회전부와 정지부의 기하학적 적합성(Geometric compatibility)을 유지하였다. 그리고 유체 동압 베어링은 5 자유도의 강성 및 감쇠계수로 모델링하였고 회전부와 정지부사이에 기하학적 구속조건(9)을 적용하였다. 액츄에이터는 6 자유도 4 절점 사면체 유한 요소로 분할하고 액츄에이터의 볼베어링인 피봇 베어링은 5 자유도의 강성 계수로 모델링하였으며 헤드와 회전 디스크 사이의 공기 베어링의 축방향 강성을 포함하였다. 액츄에이터를 포함하는 HDD 의 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 운동방정식은 자유도가 매우 크고 회전에 따른 자이로스코픽(Gyroscopic) 항과 유체 동압 베어링의 비대칭 동특성 계수로 인해 다음과 같이 비대칭 형태를 가지게 된다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{C} + \mathbf{G})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{M} 은 전체 유한 요소 시스템의 질량 행렬 \mathbf{G} 는 자이로스코픽 행렬, \mathbf{C} 는 감쇠 행렬, \mathbf{K} 는 강성 행렬이다. 고유치의 수치해석을 위해 식(1)을 state-space 형태로 바꾸면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\lambda \begin{bmatrix} -(\mathbf{G} + \mathbf{C}) & -\mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

식(2)의 고유치 문제를 Arnoldi 반복법을 사용하여 풀면 고유치와 고유벡터를 구할 수 있다.⁽¹⁰⁾

2.2 액츄에이터와 지지구조를 포함한 HDD 회전 디스크-스핀들 시스템의 모드중첩법

가진력을 포함한 HDD 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{Q}(t) \quad (3)$$

여기서 \mathbf{Q} 는 외부 가진력 벡터이다. 위 식을 state-space 형으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{M} \\ -\mathbf{M} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \ddot{\mathbf{x}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

또는

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}^* \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{Y} \quad (4)$$

식(2)의 고유치 문제를 풀면 고유벡터 Φ 는 공액 복소짝이 되고 모드 중첩법에 의해 응답 \mathbf{r} 은 저차 $2n$ 개의 고유벡터를 사용하여 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\mathbf{r}(t) \approx \tilde{\mathbf{r}}(t) = \sum_{i=1}^{2n} z_i(t) \Phi_i = \tilde{\Phi} \tilde{\mathbf{z}} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하고 양변에 $\tilde{\Phi}^T$ 을 곱하면 식(6)과 같은 $2n$ 개의 비연성된 운동방정식을 구할 수 있다.

$$m_i \dot{z}_i + k_i z_i = f_i \quad (i=1, 2, \dots, 2n) \quad (6)$$

2.3 실험시 가진력 적용

Fig.2 와 같이 실험에서 측정된 가진력은 Δt_i 구간에서 일차방정식으로 나타낼 수 있다. 이를 식(6)에 적용하면 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$m_i \dot{z}_i(\tau) + k_i z_i(\tau) = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (7)$$

이 때 초기조건은 $\tau = 0$ 일 때 $z(t_i) = z(0)$ 이고 $\tau = \Delta t_i$ 일 때 $z(t_{i+1}) = z(\Delta t_i)$ 이다. 이 조건을 적용하면 1 계 선형 미분방정식인 식(7)의 해는 $z(t_i)$ 와 $z(t_{i+1})$ 의 관계식으로 표현된다. 응답 $z(t)$ 는 식(8)를 시간에 대해 반복적으로 해석하

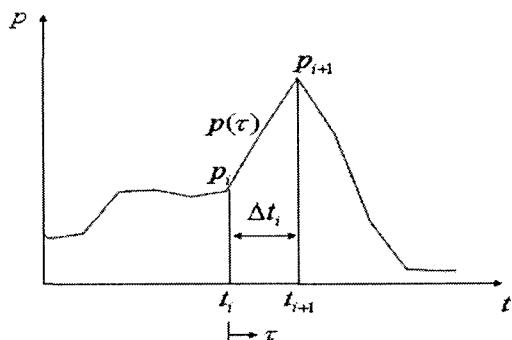


Fig. 2 Linear interpolation of excitation force

여 구할 수 있다.

$$z(t_{i+1}) = z(t_i) e^{-\frac{k_i \Delta t_i}{m_i}} + Ap_i + Bp_{i+1} \quad (8)$$

여기서 A, B는 다음과 같다.

$$A = \frac{1}{\Delta t_i} \left(\frac{m_i}{k_i} \right)^2 - \frac{m_i}{k_i} e^{-\frac{k_i \Delta t_i}{m_i}} - \frac{1}{\Delta t_i} \left(\frac{m_i}{k_i} \right)^2 e^{-\frac{k_i \Delta t_i}{m_i}} \quad (9)$$

$$B = \frac{m_i}{k_i} - \frac{1}{\Delta t_i} \left(\frac{m_i}{k_i} \right)^2 + \frac{1}{\Delta t_i} \left(\frac{m_i}{k_i} \right)^2 e^{-\frac{k_i \Delta t_i}{m_i}}$$

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 고유 진동 해석 및 실험

2.1 절의 유한 요소 해석 방법을 사용하여 Fig. 3 에서와 같이 1 장의 2.5" 디스크를 장착하고 5,400rpm 으로 회전하며 액츄에이터와 지지구조를 포함한 HDD 스핀들 시스템을 모델링하고 동 특성을 해석하였다. 액츄에이터, 지지구조를 포함하는 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 전체 요소수는 71,062 개이다.

본 해석의 타당성을 검증하기 위해 충격 헤머 (Impact hammer)를 이용한 모달 실험을 수행하였으며 실험 결과를 수치 해석 결과와 비교하였다. Fig. 4 는 실험 장치도를 나타내고 베이스 플레이트 옆면의 네 점은 나사로 자그에 고정하였다.

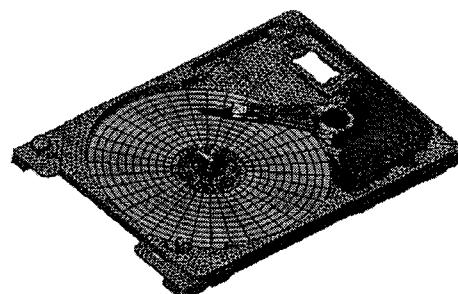


Fig. 3 Finite element model of a HDD

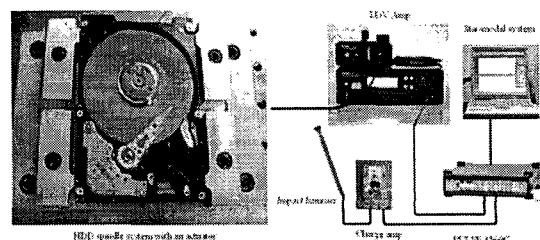


Fig. 4 Experimental setup for modal testing

Table 1 은 정격 회전 속도 5,400rpm 에서 액츄에이터와 지지구조를 포함한 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 고유 진동수 해석 결과와 실험 결과를 0~3000Hz 의 영역에서 비교한 것으로 제안된 해석 방법이 고유 진동수와 모드를 잘 예측함을 알 수 있다.

액츄에이터와 지지구조를 포함한 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 고유 진동 모드는 강체 모드와 디스크-스핀들의 탄성 변형 모드로 나눌 수 있다. 디스크-스핀들의 강체 모드는 Half-speed whirl 모드로서 디스크-스핀들의 탄성변형이 없다. 그러나 회전 디스크의 강체 운동이 공기 베어링을 통해 서스펜션에 전달되어 이 모드에서 서스펜션은 탄성 변형을 한다. 디스크-스핀들의 탄성 변형 모드는 순수 디스크 모드, 디스크 (0,0) 모드와 디스크 (0,1) 모드로 분류할 수 있다. 진동 모드 4 와 11 은 각각 절직경이 2 개와 3 개인 순수 디스크 모드이다. 이 모드에서 액츄에이터의 서스펜션과 암은 굽힘 운동을 하고 스핀들이 회전함에 따라 전진(4f, 11f), 후진(4b, 11b) 모드로 분리된다. 모드 4b, 4f, 11f 에서 팬테일(Fantail)은 굽힘 운동을 하고 모드 11b 에서 팬테일은 비틀림 운동을 한다. Fig. 5 는 진동 모

드 4b 를 나타낸다. 액츄에이터가 없는 디스크-스핀들 시스템에서 진동 모드 4, 11 은 순수 디스크 모드로서 베이스 플레이트의 운동이 없다. 하지만 액츄에이터를 포함한 디스크-스핀들 시스템에서 디스크의 운동은 공기 베어링을 통해 액츄에이터와 베이스 플레이트로 전달되어진다. 진동 모드 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 에서 디스크 (0,0) 모드는 액츄에이터와 베이스 플레이트의 운동과 연성되고 Fig. 6 은 디스크 (0,0) 모드, 암과 팬테일의 굽힘 모드가 연성된 진동 모드 8 을 나타낸다. 진동 모드 1, 10, 12, 13, 14, 15, 16 에서 디스크 (0,1) 모드는 액츄에이터, 베이스 플레이트의 운동과 연성되고 Fig. 7 은 디스크 (0,1) 모드, 암의 굽힘 모드와 팬테일의 비틀림 모드가 연성된 진동 모드 15 를 나타낸다.

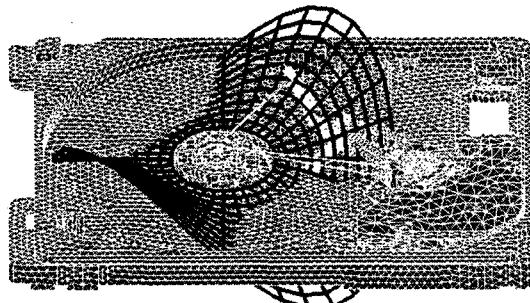


Fig. 5 Pure disk mode with 2 nodal diameters

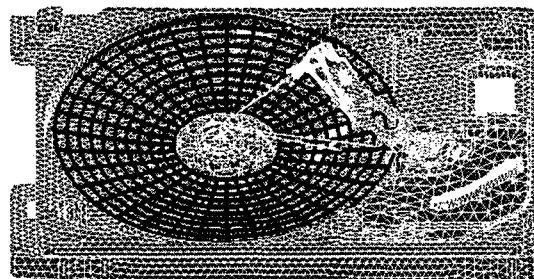


Fig. 6 Mode 8 coupled with disk (0,0) mode

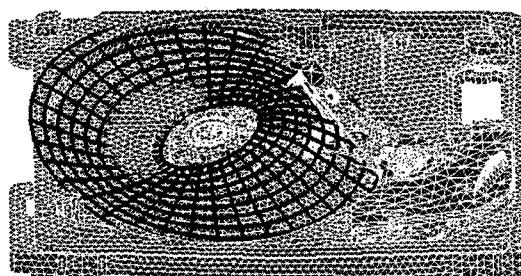


Fig. 7 Mode 15 coupled with disk (0,1) mode

3.2 강제 진동 해석 및 실험

3.1 절에서 해석된 고유진동수와 고유진동벡터 중 공액 복소짝인 저차 30 개의 고유진동수와 고유진동벡터를 2 장에서 전개한 모드중첩법에 적용하여 가진응답을 해석하였다. 이 해석의 타당성을 검증하기 위해 충격 헤머를 이용한 가진응답 실험을 수행하여 실험 결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 실험방법은 충격 헤머를 사용하여 가진하였고 레이저 변위 센서(LDV)를 사용하여 충격 응답을 구하였다. Fig. 8 은 충격 헤머로 가진할 경우 측정된 가진력이다. Fig. 9 는 베이스플레이트를 가진하고 디스크 외경에서 축방향으로 측정한 변위이고, 이 변위 성분이 감쇠하다가 일정한 크기의 주기적인 변위로 나타나는데, 디스크 회전시에는 충격 헤머로 가진하지 않더라도 축방향 진동성분(Run-out)이 항상 존재하고, 이번 실험에

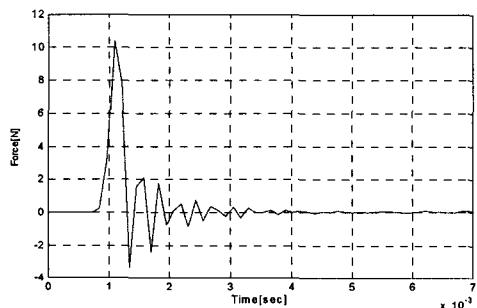


Fig. 8 Measured force excited at the base plate

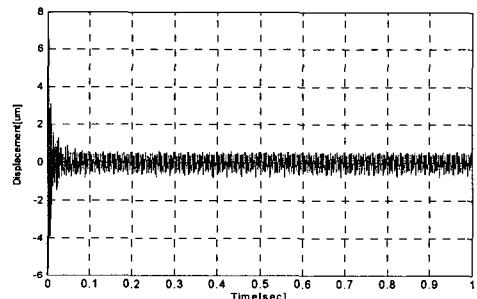


Fig. 9 Measured displacement at the outer rim of the disk

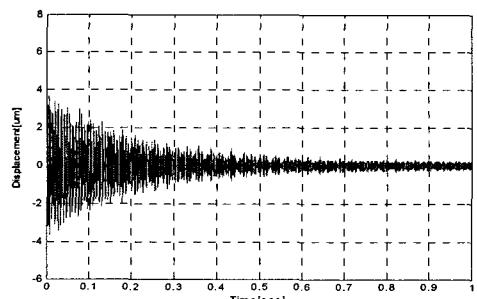


Fig. 10 Simulated displacement at the outer rim of the disk

사용된 모델의 경우 $\pm 0.6 \mu\text{m}$ 정도의 축방향 run-out이 존재한다. Fig. 10 은 측정된 가진력을 적용하여 해석한 디스크 외경에서의 변위이다. 해석의 경우 가진력에 의해 디스크 외경의 변위가 감쇠하여 0 으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

충격 응답 해석은 Fig. 11 에서처럼 2ms Half-sine 으로 베이스플레이트의 축면 고정점 4 점을 가진하고 충격력 250G, 300G, 350G 에 대해서 수행되었다. Fig. 12, 13, 14 는 각각 가진력 250G, 300G, 350G 에서 헤드와 디스크의 상대변위를 나타낸다. 헤드와 디스크의 간격을 약 10nm 로 가정하였을 때 250G 충격 시 디스크와 헤드의 충돌은 발생하지 않으며, 300G 충격 시에는 약 4.2ms 에서 디스크와 헤드의 충

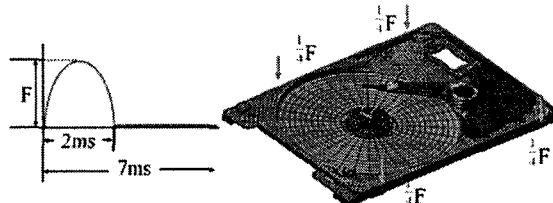


Fig. 11 Excitation forces and their application to a HDD

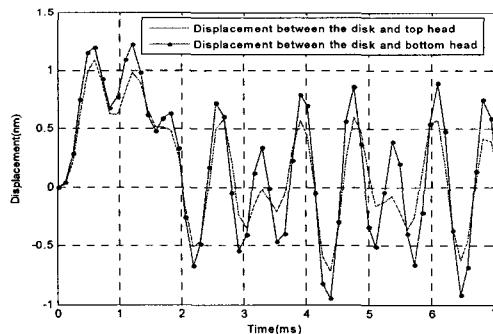


Fig. 12 Simulated displacement between the head-disk interface under the operating shock of 250G

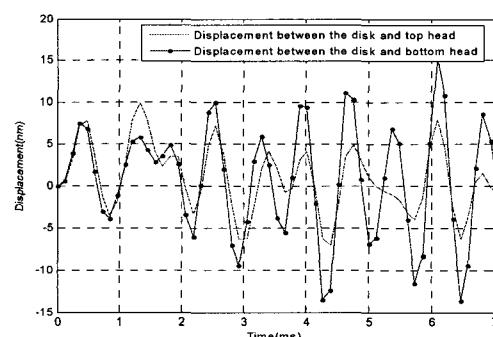


Fig. 13 Simulated displacement between the head-disk interface under the operating shock of 300G

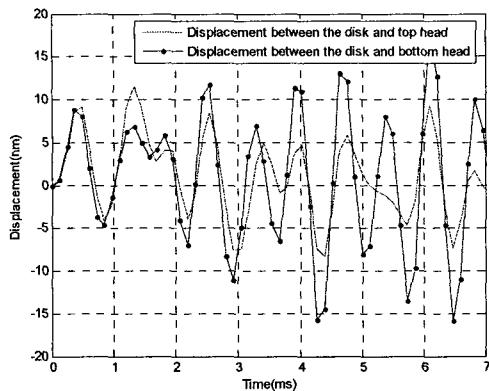


Fig. 14 Simulated displacement between the head-disk interface under the operating shock of 350G

돌(Head crash)이 발생한다. 또한 350G 충격 시에는 약 3ms에서 디스크와 디스크 아래 헤드의 충돌이 발생하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한 요소법과 모드중첩법을 사용하여 회전 디스크-스핀들, 액츄에이터, 임의 형상의 지지 구조의 유연성을 고려한 HDD 시스템의 충격응답을 해석할 수 있는 방법을 제시하였고, 실험을 통해 해석 방법의 타당성을 검증하였다. 헤드와 회전 디스크 사이의 공기 베어링이 디스크의 운동을 액츄에이터, 베이스 플레이트으로 전달 시킴을 보였다. 또한 Head crash 현상을 해석적으로 구현하였다.

본 연구에서 제안한 강제 진동 해석은 커버를 포함한 전체 HDD 시스템의 충격에 의한 응답을 해석할 수 있고, 이를 활용하여 충격에 강인한 HDD 를 설계하는데 활용될 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

- (1) Jintanawan, T., Shen, I. Y. and Ku, C.-P. R. *Free and Forced Vibrations of a Rotating Disk Pack and Spindle Motor System with Hydrodynamic Bearings?* 1999, *J. Info. Storage Proc. Syst.*, vol. 1, pp. 45-58.
- (2) G. H. Jang, M. S. Jung and S. H. Lee, 2002, *Vibration Analysis of a Spinning Flexible Disk-Spindle System Supported by Ball Bearing and Flexible Shaft Using Finite Element Method and Substructure Synthesis?* *J. Sound and Vibration*, vol.251(1), pp.59-78.
- (3) Tseng C. W., Shen J. Y. and Shen I.Y., 2003 *Vibration of rotating-shaft HDD spindle motors with flexible stationary parts?* *IEEE Trans Magn*, vol.39, pp. 794-799.
- (4) G. H. Jang, J. H. Han and C. H. Seo, 2005, *Finite Element Modal Analysis of a Spinning Flexible Disk-Spindle System in a HDD Considering the Flexibility of Complicated Supporting Structure?* *Microsystem Technologies*, vol.11, no.7, pp. 488-498.
- (5) T. Jintanawa, I. Y. Shen, and K. Tanaka, 2001, *Vibration analysis of fluid bearing spindles with rotating-shaft design?* *IEEE Trans. Magn.*, vol.37, pp. 799-805.
- (6) S. Y. Park and T. G. Jeong, 1999, *Dynamic Characteristics of the Actuator System of Magnetic Recording Hard Disk Drives?* *KSME(A)*, vol.23(12), pp.22677-2278.
- (7) L. M. Xu and N. Guo, 2003, *Modal Testing and Finite Element Modelling of Subsystem in Hard Disk Drive?* *Mechanical System and Signal Processing*, vol.17(4), pp.747-764.
- (8) F Feng Gao, Fook Fah Yap and Ying Yan, 2005, *Modeling of Hard Disk Drives for Vibration Analysis Using a Flexible Multibody Dynamics Formulation?* *IEEE Trans Magn*, vol.41(2), pp. 744-749.
- (9) Cook, R. D., Malkus, D. S., and Plesha, M. E., 1989, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 3rd edn. John Wiley & Sons
- (10) Lehoucq, R. B. and Sorensen, D. C., 1996, *Efficient Techniques for an Implicitly Restarted Arnoldi Iteration?* *J. Matrix anal. Appl.* SIAM, pp. 789-821.
- (11) Anil K. Chopra, 2001, *Dynamics of Structures?* 3rd Edition, Prentice-Hall, pp.165-171.