

압전 바이모프를 이용한 HDD 스피들-디스크 시스템의 진동저감

Vibration Suppression of the HDD Spindle-Disk System Using Piezoelectric Bimorph

임수철*·박종성*·최승복*·박영필***

S. C. Lim, J. S. Park, S. B. Choi and Y. P. Park

Key Words: HDD Spindle-Disk System(하드디스크 스피들-디스크 시스템), Piezoelectric Bimorph(압전 바이모프), Piezoelectric Shunt Damping(압전섀트댐핑), Vibration Suppression(진동 저감), Modal Analysis(모달 해석)

ABSTRACT

This paper presents the feasibility of the piezoelectric shunt damping for vibration suppression of the highly rotating HDD disk-spindle system. A target vibration mode which restricts the recording density increment of the drive is determined by modal analysis of the drive, and a piezoelectric bimorph is designed to suppress the vibration level of the target mode. After deriving the generalized two-dimensional electromechanical coupling coefficient of the shunted spindle-disk system, the damping performance of the system is predicted by simulating the displacement transmissibility on the target mode. After manufacturing the proposed drive, the vibration suppression performance of the proposed methodology is experimentally evaluated in frequency domain.

1. 서 론

HDD(hard disk drive)는 고도로 정보화가 진행되고 있는 21 세기 산업사회에서 고품질의 대용량 정보저장 기능을 제공하는 주요 정보저장매체로서 급속히 고밀도화가 진행되어 왔다. HDD 의 저장 밀도가 높아짐에 따라 HDD 에서 발생하는 기계적 진동이 TMR(track misregistration)에 미치는 영향은 기록밀도의 한계를 결정할 만큼 그 중요성이 강조되고 있다. 특히, 스피들-디스크 시스템은 회전체 특성인 공진모드 분리 현상에 의해 비교적 낮은 주파수 대역에서 많은 공진점을 가지고 있으며 외부 충격에 쉽게 가진 되어 결국, 드라이브의 성능을 악화시키게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 볼 베어링에 댐핑물질을 삽입하거나 혹은 볼 베어링을 유체 베어링으로 대체함으로써 베어링에 의한 가진 요소를 줄이는 방법이 연구되어 왔으며[1,2], 디스크 댐퍼를 설치하고 공기 유동에 의한 squeeze air bearing 에 의해 디스크에 댐핑을 가함으로써 디스크 및 스피들의 진동을 저감시키고자 하는 연구가 진행되어 왔다[3,4]. 한편, 외부 충격에 대한 드라이브의 진동억제 방법에 대한 연구로서는 베이스 플레이트나 커버 등에 대한 구조 해석을 통한 설계 변경과 드라이브의 구조물의 진동모드가 스피들-디스크 시스템에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되어 왔을 뿐[5-6] 이의 진동저감을 위한 감쇠장치 등에 대한 연구는 미진한 상태

이다. 이에 따라 최근 들어 외부충격에 대한 디스크의 진동감쇠장치로서 압전섀트댐핑(piezoelectric shunt damping) 방법이 제안되었다[7]. 그러나 스피들-디스크 시스템과 구조물과의 연성작용에 대한 정확한 이해 없이 주로 실험적인 방법을 통하여 압전섀트댐핑의 적용 가능성을 입증하였다.

따라서 본 연구에서는 기존의 스피들-디스크 시스템과 드라이브 커버 및 베이스 플레이트를 포함하는 전체 드라이브에 대한 동특성 해석을 바탕으로 구조물과 연성되어 나타나는 디스크의 진동을 파악하였다. 이를 통하여 타겟 진동모드를 선정 한 후 타겟 모드의 모드형태를 고려하여 압전 바이모프를 설계하였다. 제안된 압전 바이모프에 대한 기계적 임피던스와 어드미턴스 해석을 바탕으로 압전 바이모프를 장착한 전체 드라이브에 대한 변위전달률 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통하여 섀트성능을 예측한 후 실제 제작된 압전 바이모프를 실제 드라이브에 장착 후 외부 가진에 대한 회전 디스크의 진동 저감 성능을 주파수 영역에서 고찰하였다.

2. 드라이브의 동특성 해석

스피들-디스크 시스템 자체의 진동모드는 관심 주파수 영역에서 대부분 회전 디스크의 공진모드이다[7]. 그러나 드라이브에 장착되었을 때는 외부 구조물과 연성되어 결국, 많은 공진모드가 발생하게 된다. 먼저 스피들-디스크 시스템의 진동이 드라이브의 외부 구조물과 어떻게 연성되어 있는가를 파악하기 위하여 FEM 해석을 수행하였다. Fig.

* 인하대학교 기계공학과
E-mail: sclim21c@korea.com
Tel: (032) 872-7925, Fax: (032) 868-1716

*** 연세대학교 기계공학과

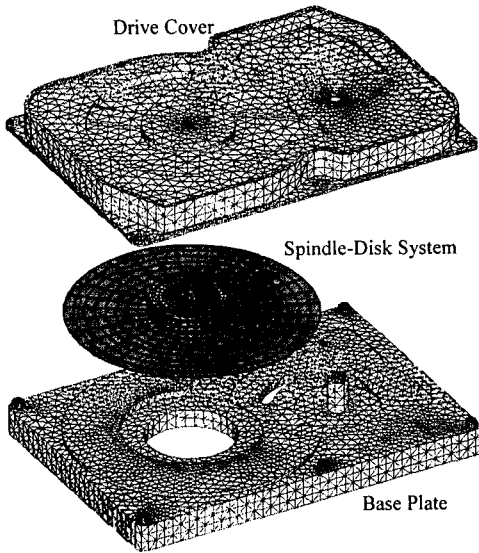


Fig. 1 FE model of the HDD

1은 구축된 FE 모델을 나타낸 것으로서, 30,446 개의 solid 요소, 448 개의 plate 요소, 20 개의 spring 요소, 486 개의 rigid 요소로 구성하였다. Table 1은 구축된 FE 모델에 이용한 모달 해석 결과를 나타낸 것으로서, 관심 주파수 영역에서 매우 많은 진동 모드가 존재함을 알 수 있다. 여기서 구조물의 진동에 대한 디스크의 OD에서의 진동의 상대적 크기를 'deformation ratio'로 정의하였으며, 이 값이

Table 1 Modal analysis results of the HDD using FEM

Index	Frequency (Hz)	Major Vibration Mode	Deformation Ratio (Disk/Structure)
1.	764.65	Disk (0,1) Mode (Rocking Mode)	7.95 (0.473/0.0595)
2.	906.72	Disk (0,0) Mode (Axial Mode)	7.99 (0.35/0.0438)
3.	1,057.03	Disk (0,2) Mode	15.99 (0.502/0.0314)
4.	1,750.27	Base & Cover Torsion	0.33 (0.0599/0.184)
5.	1,775.61	Disk(0,3) Mode	16.04 (0.526/0.0328)
6.	1,815.69	Base & Cover Torsion + Spindle (0,0) Rocking Mode	0.44 (0.0724/0.163)
7.	2,023.12	Base & Cover Bending Mode	0.17 (0.0371/0.223)
8.	2,210.68	Cover Bending Mode	0.32 (0.0621/0.1921)
9.	2,484.36	Cover 1st Bending + Spindle (0,0) Mode	0.47 (0.122/0.26)
10.	2,615.80	Cover 2nd Bending + Spindle (0,0) Mode	0.55 (0.0968/0.176)
11.	2,791.74	Cover + Spindle(0,1) Rocking Mode	0.39 (0.0932/0.239)
12.	2,952.39	Disk (0,4) Mode	16.02 (0.556/0.0347)

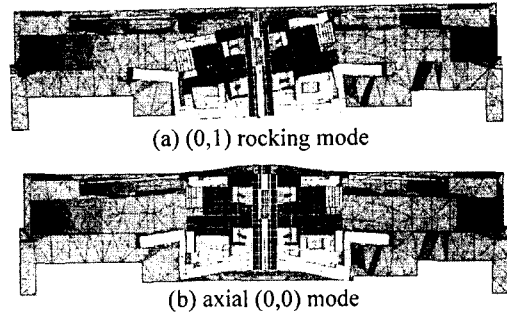


Fig. 2 Vibration modes of the HDD system

매우 작은 경우(4,7,8 번 모드)는 구조물의 진동이 디스크의 진동에 영향을 미치지 않으며, 반대로 이 값이 매우 큰 경우(3,5,12 번 모드)는 디스크의 진동이 구조물과 분리되어 나타남을 의미한다. 반면, 1,2 번 진동 모드는 디스크의 진동이 큼에도 불구하고 이 값이 중간값을 가지는 것은 디스크의 진동과 구조물의 진동이 연성되어 나타남을 의미한다. 특히, 이들 모드는 디스크의 저장밀도의 한계를 결정짓는 중요한 모드로서[3], 외부 충격 시 다른 진동모드에 비하여 매우 큰 진동레벨을 나타낸다[7]. Fig. 2는 1,2 번 모드에 대한 모드형태를 나타낸 것이다. 여기서 2 번째 모드는 디스크의 축방향 (0,0)모드가 지배적인 모드로서 구조물의 커버 및 베이스 플레이트와 강하게 연성되어 있음을 알 수 있으며, 결국 압전센트램핑이 디스크의 진동 저감에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 압전센트램핑의 타겟 모드를 축 방향의 (0,0)모드로 선정하였다.

3. 스마트 드라이브의 구성

전체 드라이브에 대한 동특성 해석결과로부터 타겟 진동모드의 모드형태를 고려하여 Fig. 3과 같이 압전 바이모프를 이용한 드라이브를 구성하였다. 일부 구조가 변경된 드라이브 커버에 압전 바이모프가 장착되어 있으며, 이때 디스크의 진동 에너지는 샤프트 축을 통하여 압전 바이모프로 전달되고 셉트회로를 통하여 열 에너지로 소산되게 되어, 결국 디스크의 진동을 감소시키게 된다.

Fig. 4는 제안된 압전 바이모프의 단면을 나타낸 것이다. 안쪽 내경은 샤프트 축과 연결되며 외경은 드라이브 커버에 고정된다. Q_0 는 샤프트 축을 통하여 압전재료로 전달되는 디스크의 기계적 진동을 의미한다. 이때 타겟 진동모드의 모드형태로부터 축 대칭 굽힘(axisymmetric bending)만을 고려하고 Kirchhoff 판 이론과 von Karman 변형을 이론

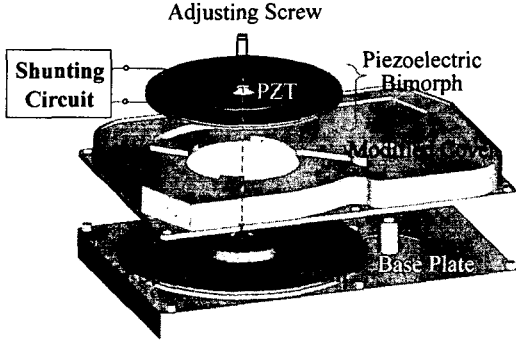


Fig. 3 Proposed PZT shunt damping of HDD

을 적용한 후[8], 압전 구성방정식[9]을 이용하여 압전 바이모프에 대한 어드미턴스 Y_{31} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Y_{31} = j\omega \left[2 \cdot C_p^r (1 - k_p^2) - \frac{2\pi}{s_{11}^E (1 - \nu_{pm})} \cdot \frac{d_{31}}{V_{31}} \cdot (h_{pm} + h_p) \int_0^a \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_0}{\partial r} \right) r dr \right] \quad (1)$$

위 식에서 C_p^r 는 압전원판의 정전용량, k_p 는 압전 원판의 기계-결합계수를 나타낸다. 또한 w_0 는 압전 바이모프의 처짐량을 의미한다. 이때 선트댐핑에 의한 성능은 해당 시스템의 어드미턴스를 크게 함으로써 큰 진동 저감성능을 얻을 수 있다. 즉, 타겟 진동모드의 모드형태를 고려하여 Fig. 5 와 같이 압전원판 한 면에 두 개의 전극을 구성하여 외부 임피던스(선트회로)와 연결하였으며, 이때 r_{opt} 는 식(1)의 어드미턴스를 최대화 하는 문제로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$r_{opt} = \frac{a^2 \sqrt{(a^2 - b^2)} b - b^2 \sqrt{(a^2 - b^2)}}{\sqrt{e}} \quad (2)$$

4. 공진선트 댐핑의 구성

본 연구에서는 압전선트 댐핑을 위한 선트회로로서 공진선트회로를 사용하였다. 또한 제안된 드라이브에 대한 기계적 임피던스 해석을 통하여 변위 전달률을 유도하였으며, 이로부터 공진선트회

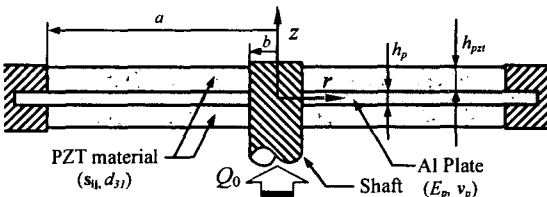


Fig. 4 Configuration of the piezoelectric Bimorph

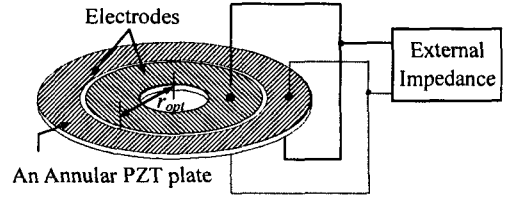


Fig. 5 Proposed annular PZT plate

로가 적용된 드라이브에 대하여 2 차원의 일반화된 전기-기계 결합계수를 다음과 같이 도출하였다.

$$K_r^2 = \left(\frac{K_{pm}^E}{K + K_p + 2K_{pm}^E} \right) \left(\frac{k_p^2}{1 - k_p^2} \right) \quad (3)$$

위 식에서 K 와 K_p 는 각각 구조물의 모드강성과 Al 판에 의한 강성을 나타낸다. 또한 K_{pm}^E 는 압전 원판에 의한 강성을 나타낸다. Fig. 6 은 도출된 K_r 의 값에 따른 디스크의 진동 변위에 대한 전달률 시뮬레이션 결과이다. 제안된 드라이브의 K_r 를 얻기 위한 설계변수들은 압전 바이모프에 대한 어드미턴스 해석과 전체 드라이브에 대한 FEM 해석을 통하여 얻었으며, 최종적으로 얻어진 압전 바이모프에 대한 K_r 은 값은 0.0412 로서 Fig. 6 에서 알 수 있듯이 약 70%정도의 진동저감 성능을 예측할 수 있다. Fig. 7 은 제안된 드라이브에 대한 FEM 해석 결과로서 타겟 공진모드에서의 디스크 진동에 의해 압전 바이모프에 큰 변형이 생김을 알 수 있다. 이는 디스크의 진동 에너지를 압전 바이모프로 원활하게 전달할 수 있음을 의미한다.

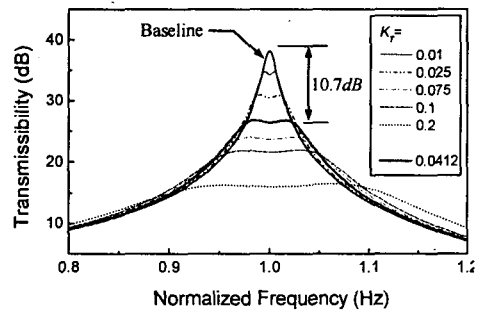


Fig. 6 Displacement transmissibility of the drive

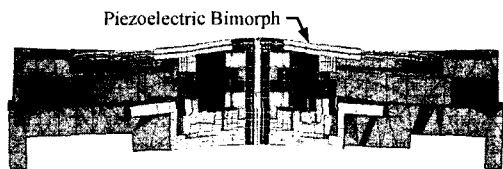


Fig. 7 Target vibration mode of the proposed HDD

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 8(a)는 실제 제작된 압전 바이모프로서 압전원판의 한 면에 두 개의 전극이 형성되어 있는 것을 볼 수 있으며, r_{opt} 는 식(2)를 통하여 얻었다. 또한 Fig. 8(b)는 제안된 압전 바이모프가 실제 드라이브에 장착된 것을 보여준다. 이를 이용하여 드라이브의 압전섀트댐핑을 위한 실험장치를 구성하였으며, 드라이브의 외부 구조물에 임팩해머를 이용하여 충격을 가한 후 이때 발생하는 회전 디스크의 진동 레벨을 측정하였다[7]. Fig. 9는 회전 디스크의 OD 위치에서 압전섀트댐핑에 의한 디스크의 진동저감 성능 실험 결과를 나타낸 것이다. 섀트회로 가동 시 축 방향의 (0,0)모드의 진동레벨이 약 60%의 진동 감소를 나타내었다. 또한 구조물의 가진 위치를 변경하면서 충격을 인가한 후 디스크의 진동 레벨을 측정한 결과 유사한 진동저감 성능을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안된 압전섀트댐핑을 이용하여 드라이브의 구조물과 연계하여 외부 충격에 대한 회전 디스크의 진동을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 HDD 스피들-디스크 시스템의 진동저감을 위하여 압전 섀트댐핑을 적용하였다. 전체 드라이브에 대한 동특성 해석을 바탕으로 진동저감 타겟 진동 모드를 선정하였으며, 이를 바탕으로 압전 바이모프를 이용한 압전섀트댐핑 시스템을 설계하였다. 또한, 압전 바이모프에 대한 임피던스 해석을 통하여 변위 전달률을 유도한 후 시뮬레이션을 통하여 설계된 압전섀트댐핑의 성능을 예측하였다. 실제 제작된 압전 바이모프를 이용한 스피들-디스크 시스템의 진동 실험 결과 디스크 회전 시 외부 충격에 대하여 해당 공진모드에서 60%의 진동 저감 성능을 발휘하는 것을 확인하였다. 앞으로 여러 장의 디스크를 가진 드라

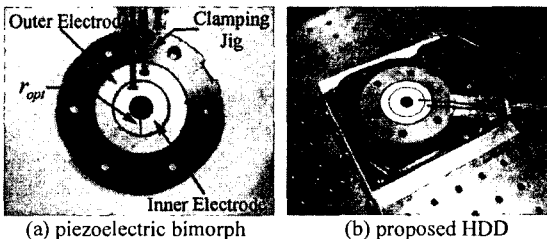


Fig. 8 Photograph of the proposed piezoelectric shunt damping of HDD

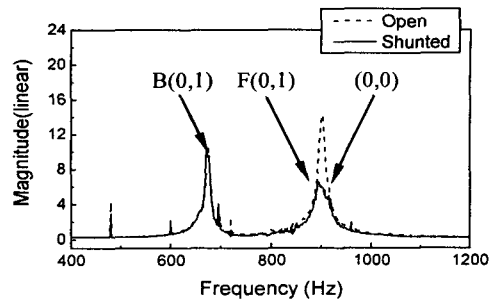


Fig. 9 Experimental results of the piezoelectric shunt damping of HDD

이브에 대한 다중모드 섀트 성능과 1 인치 및 2.5 인치 드라이브에 대한 섀트댐핑 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 연세대학교 정보저장기기 연구센터의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Jang, G. H., Kim, D. K. and Han, J. H., 2001, "Characterization of NRRO in a HDD Spindle System Due to Ball Bearing Excitation", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 37, No. 2, pp.815-819.
- (2) Jintanawan, T. and Shen, I. T., 1997, "Free Vibration of a Rotating Disk/Spindle System with Hydrodynamic Bearings", ASME Information Storage and Processing System, Vol.3, pp.49-60.
- (3) 한윤식 등, 2002, "100kTPI 급 HDD 구현을 위한 Disk Damper 에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 363-368.
- (4) Deeyiengyang, S. and Ono, K., 2001, "Suppression of Resonance Amplitude of Disk Vibration by Squeeze Air Bearing Plate", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 2, pp.820-825.
- (5) 장건희, 홍선주, 한재혁, 1998, "볼 베어링 가진에 의한 HDD 스피들계의 진동 특성 해석", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 300-306.
- (6) 한우섭 등, "1" HDD의 진동특성 분석에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.352-357.
- (7) 임수철, 박종성, 최승복, 박영필, 2003, "압전섀트댐핑을 이용한 HDD 스피들 시스템의 진동저감", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 1089~1094.
- (8) Reddy, J. N., 1997, Mechanics of Laminated Composite Plates-Theory and Analysis, CRC Press, Inc., New York.
- (9) ANS/IEE Std 176-1987 IEEE Standard on Piezoelectricity, 1987, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., pp. 9-14.