

# 압전 바이모프를 이용한 HDD 디스크-스핀들 시스템의 션트 댐핑

## Shunt Damping of HDD Disk-Spindle System Using Piezoelectric Bimorph

임수철<sup>†</sup>, 최승복<sup>\*</sup>, 박영필<sup>\*\*</sup>, 박노철<sup>\*\*\*</sup>

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

### ABSTRACT

This work presents the feasibility of shunt damping for vibration suppression of the rotating HDD disk-spindle system using piezoelectric bimorph. A target vibration mode which significantly restricts the recording density increment of the drive is determined through modal analysis and a piezoelectric bimorph is designed to suppress unwanted vibration. After deriving the two-dimensional generalized electromechanical coupling coefficient of the shunted drive, the shunt damping of the system is predicted by simulating the displacement transmissibility using the coefficient. In addition, optimal design process using sensitivity analysis is undertaken in order to improve the shunt damping of the system. The effectiveness of the proposed methodology is verified through experimental implementation by observing the vibration characteristics of the rotating disk-spindle system in frequency domain.

**Key Words :** Disk-Spindle System, Modal Analysis, Piezoelectric Shunt Damping, Vibration Suppression, Sensitivity Analysis

### 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. 또한 노트북 컴퓨터나 디지털 캠코더, 디지털 카메라나 MP3P 등과 같은 모바일 멀티미디어 용 저장장치로서의 HDD 수요가 크게 증가하고 있으며, 이에 따라 2.5 인치/1 인치/0.85 인치 용과 같은 소형 및 박형의 HDD 에 대한 연구 개발도 활발히 진행되고 있다. 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, 스펙들-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 베어링을 유체 베어링으로 대체하거나[1], 디스크 댐퍼를 설치하고 공기 유동에 의한 Squeeze Air Bearing 에 의해 디스크에 댐핑을 가함으로써 디스크 및 스펙들의 진동을 저감시키고자 하는 연구가 진행되어 왔다[2][3]. 한편, 외부 충격에 대한 드라이브의 진동억제 방법에 대한 연구로서는 베이스 플레이트나 커버 등에 대한 구조 해석을 통한 설계 변경과 드라이브의 구조물의 진동모드가 스펙들-디스크 시스템에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되어 왔을 뿐[4][5] 이의 진동저감을 위한 감쇠장치 등에 대한 연구는 미진한 상태이다.

한편, 기계적 구조물의 진동절연을 위한

<sup>†</sup> 연세대학교 정보저장기기 연구센터  
E-mail: soocheol@cisd.yonsei.ac.kr  
<sup>\*</sup> 인하대학교 기계공학과  
<sup>\*\*</sup> 연세대학교 기계공학과  
<sup>\*\*\*</sup> 연세대학교 대학원 정보저장협동과정  
(논문접수일 : 2005 년 3 월 31 일)

여러 방법 중 압전재료와 션트회로(shunt circuit)를 연계한 션트댐핑은 작은 제어 입력과 진동절연 기구가 간단하다는 점에서 기계적 구조물의 효과적인 진동절연 메커니즘으로서 인식되어 꾸준한 연구가 진행되어 왔다[6-12]. Hagood 등[6]은 구조물, 압전재료, 션트회로에 대하여 기계진동흡진기 모델과 상사시켜 단일 타겟 진동모드에 대한 션트회로의 최적 설계값을 구하는 알고리즘을 연구하였다. Kim 등[7-8]은 수학적 모델링이 어려운 임의의 구조물과 이에 대한 다중모드 션트댐핑의 효과적 적용을 위하여 전기적 임피던스 튜닝법을 제안하였으며, 이를 실험적으로 검증하였다. 또한, Hollkamp[9]는 blocking circuit 을 이용하여 하나의 압전재료를 이용한 다중모드 션트 댐핑에 대하여 연구를 진행하였으며, Behrens 등[10]은 부 캐패시턴스 컨버터를 이용하여 압전 션트의 다중모드를 이용한 전동소음 저감의 성능을 입증하였다. 최근에 와서는 션트댐핑과 능동제어를 결합한 형태의 APPN(active-passive hybrid piezoelectric network) 시스템에 대한 연가 진행되어 왔다.[11-12]

따라서 본 연구에서는 전체 드라이브의 구조물과 연계하여 회전 디스크-스핀들 시스템의 효과적인 진동절연을 위한 업전 션트댐핑을 제안하였다. 이를 위하여 먼저, 기존의 디스크-스핀들 시스템과 드라이브 커버 및 베이스 플레이트를 포함하는 전체 드라이브에 대한 동특성 해석을 바탕으로 구조물과 연성되어 나타나는 디스크의 진동을 파악하였다. 이를 통하여 타겟 진동모드를 선정 후 타겟 모드의 모드형태를 고려하여 압전 바이모프를 설계하였으며, 제안된 압전 바이모프에 대한 기계적 임피던스 해석과, 공진션트회로와 압전 바이모프에 의해 션트된 드라이브에 대한 변위 전달률 해석을 통하여 2 차원 문제의 일반화된 전기-기계 결합계수를 도출하였다. 이를 이용한 드라이브의 변위 전달률시뮬레이션을 통하여 션트성능을 예측한 후 션트댐핑의 성능 향상을 위하여 민감도 해석을 통한 최적 설계를 수행하였다. 이후 최적설계 값을 이용하여 실제 제작된 압전 바이모프를 드라이브에 장착 후 외부 가진에 대한 회전 디스크의 진동 저감 성능을 실험적으로 고찰하였다.

## 2. 스마트 드라이브의 구성

### 2.1 드라이브의 동특성 해석

디스크-스핀들 시스템 자체의 진동모드는 관심주파수 영역에서 대부분 회전 디스크의 공진모드이며[2], 드라이브에 장착되었을 때는 외부 구조물과 연성되어 많은 공진모드가 발생하게 된다. 따라서 디스크-스핀들 시스템 자체뿐만 아니라 이를 포함하는 전체 드라이브에 대한 동특성 해석이 FEM 과 모달 시험을 통하여 수행되어 왔다 [13,14]. 일반적으로 드라이브의 진동모드들은 디스크 자체만의 진동모드, 드라이브의 외부 구조물만의 진동모드, 그리고 디스크-스핀들과 외부 구조물과 연성되어 나타나는 모드로 분류될 수 있다[13]. 디스크 자체만의 진동모드들은 외부 구조물과 분리된 모드들로서 노달지름(Nodal Diameter)이 2 개 이상인 질량 관성 균형모드들이다. 또한 외부 구조물만의 진동모드들은 외부 가진에

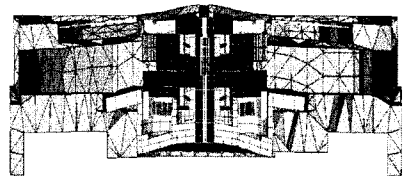


Fig. 1 Coupled vibration mode of disk (0,0) mode

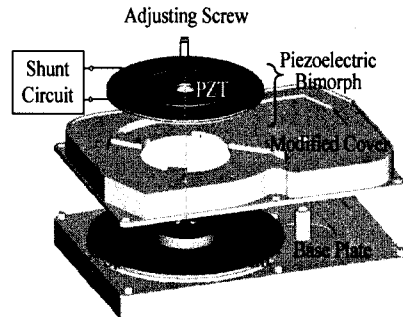


Fig. 2 Proposed piezoelectric shunt damping of HDD

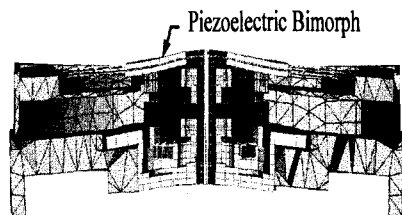


Fig. 3 Target vibration mode of the proposed HDD

의한 구조물의 공진이 회전 디스크의 진동 특성을 악화시키지 않는다. 반면 디스크(0,0) 모드와 (0,1)라킹모드 들은 구조물과 강하게 연성되는 모드들이다. 특히, 이들 모드는 디스크의 저장밀도의 한계를 결정짓는 중요한 모드로서, 외부 충격 시 다른 진동모드에 비하여 매우 큰 진동레벨을 나타낸다[2]. 특히, 디스크 (0,0)모드는 Fig.1의 FEM 해석 결과로부터 알 수 있듯이 디스크의 축 방향 진동이 구조물의 커버 및 베이스 플레이트에 큰 변형을 일으키는 것을 알 수 있는데, 이는 압전선티댐핑에 의한 디스크의 진동저감이 효과적으로 적용될 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 압전선티댐핑의 타겟 모드를 축 방향의 디스크 (0,0)모드로 선정하였다. Fig.2는 타겟 공진모드를 고려하여 제안된 압전 바이모프를 이용한 드라이브를 셉트댐핑 구성도이다. 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.3은 제안된 드라이브에 대한 FEM 해석 결과로서 타겟 공진모드에서의 디스크 진동에 의해 압전 바이모프에 큰 변형이 생김을 알 수 있으며, 이는 디스크의 진동 에너지를 압전 바이모프로 원활하게 전달할 수 있음을 의미한다.

2.2 압전 바이모프의 설계

Fig.4는 제안된 압전 바이모프의 단면을 나타낸 것이다. 안쪽 내경은 샤프트 축과 연결되며 외경은 드라이브 커버에 고정된다.

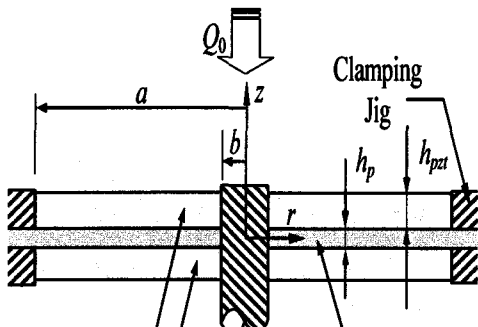


Fig. 4 Configuration of the piezoelectric bimorph

$Q_0$ 는 샤프트 축을 통하여 압전재료로 전달되는 디스크의 기계적 진동을 의미한다. 이때 타겟 진동모드의 모드형태로부터 축대칭 굽힘(Axisymmetric Bending)만을 고려하고 Kirchhoff 판 이론과 Von Karman 변형률 이론을 적용한 후[15], 압전 구성방정식[16]을 이용하면 압전 바이모프에 대한 면 방향과 축 방향에 대한 지배 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_0}{\partial r} - \frac{u_0}{r^2} = 0 \tag{1a}$$

$$\frac{\partial^3 w_0}{\partial r^3} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w_0}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w_0}{\partial r} = \frac{Q_0}{D_{11}} \tag{1b}$$

여기서,

$$D_{11} = \frac{E_p h_p^3}{12(1-\nu_p^2)} + \frac{2[(h_p/2 + h_{pz})^3 - (h_p/2)^3]}{3s_{11}^E(1-\nu_{pz}^E)}$$

위 식에서  $D_{11}$ 은 압전 바이모프에 의한 면강성 (flexural stiffness)을 나타낸다. 또한  $u_0, w_0$ 는 중간 평면( $z=0$ )에서의 변위 성분들이다. 식 (1a)는 ‘Euler-Cauchy’ 방정식으로서 Fig.4로부터 기계적 경계조건 ( $u_0(a) = u_0(b) = 0$ )을 고려하면 trivial 해를 가지는데 이는 면 방향으로의 변형은 존재하지 않음을 의미한다. 또한 경계조건을 고려하여 식 (1b)의 일반해를 구한 후 외부 가진력  $Q_0$ 에 의한 압전 바이모프의 기계적 임피던스를 Laplace 연산자 틀이 이용하여 구하면 다음과 같다

$$Z_M(s) = \frac{16D_{11}(a^2 - b^2)\pi}{s[(a^2 - b^2)^2 + 4a^2b^2 \ln(b/a)\ln(a/b)]} \tag{2}$$

한편, 압전재료가 외부 셉트 회로에 의해 셉트 되었을 때 압전재료의 컴플라이언스 (compliance)는 다음과 같이 얻어진다[6].

$$s^{SU} = \begin{bmatrix} s_{11}^{SU} & s_{12}^{SU} \\ s_{12}^{SU} & s_{11}^{SU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E \frac{d_{31}^T}{\epsilon_{33}^T} \bar{z}_E & s_{12}^E \frac{d_{31}^T}{\epsilon_{33}^T} \bar{z}_E \\ s_{12}^E \frac{d_{31}^T}{\epsilon_{33}^T} \bar{z}_E & s_{11}^E \frac{d_{31}^T}{\epsilon_{33}^T} \bar{z}_E \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서  $s_{ij}^E$ 는 short 상태에서의 압전원판의 컴플라이언스이며,  $\epsilon_{33}^T$ 와  $d_{31}^T$ 는 각각 압전재료의 유전율과 압전상수를 나타낸다. 또

한  $\bar{Z}_E$ 는 선트된 압전재료의 무 차원화 전기적 임피던스를 나타낸다. 따라서 압전 바이모프가 선트 되었을 때 식 (1)의 면강성  $D_{11}$ 은 다음과 같이 정리된다.

$$D_{11}^{SU} = D_p + \frac{2[(h_p/2 + h_{pst})^3 - (h_p/2)^3]}{3s_{11}^{SU}[1 - (s_{12}^{SU}/s_{11}^{SU})^2]}$$

$$= D_p + D_{pst}^{E*} \left[ 2 + \frac{(1 + \nu_{pst}^E)k_p^2 \bar{Z}_E}{1 - k_p^2 \bar{Z}_E} \right], \quad (4)$$

여기서,

$$D_p = \frac{E_p h_p^2}{12(1 - \nu_p^2)},$$

$$D_{pst}^{E*} = \frac{h_{pst}^3}{12s_{11}^E(1 - \nu_{pst}^{E*})} \left[ 3 \left( \frac{h_p}{h_{pst}} \right)^2 + 6 \left( \frac{h_p}{h_{pst}} \right) + 4 \right]$$

식 (2)와 (4)로부터 결국 선트된 압전 바이모프의 기계적 임피던스는 다음과 같이 얻어진다.

$$Z_M^{SU}(s) = \frac{16D_{11}^{SU}(a^2 - b^2)\pi}{s[(a^2 - b^2)^2 + 4a^2b^2 \ln(b/a)\ln(a/b)]}$$

$$= \frac{K_p}{s} + 2 \frac{K_{pst}^E}{s} \left[ 2 + \frac{(1 + \nu_{pst}^E)k_p^2 \bar{Z}_E}{1 - k_p^2 \bar{Z}_E} \right], \quad (5)$$

여기서,  $K_p = \alpha D_p$ ,  $K_{pst}^E = \alpha D_{pst}^{E*}$ ,

$$\alpha = \frac{16(a^2 - b^2)\pi}{(a^2 - b^2)^2 + 4a^2b^2 \ln(b/a)\ln(a/b)}$$

### 2.3 공진 선트댐핑

본 연구에서는 선트댐핑을 위한 외부 선트회로로서 공진선트회로를 적용하였다. 이때  $\bar{Z}_E$ 은 다음과 같다.

$$\bar{Z}_E(s) = \frac{L_s C_p^S s^2 + R_s C_p^S s}{1 - k_p^2 + L_s C_p^S s^2 + R_s C_p^S s}, \quad (6)$$

여기서  $L_s$ 와  $R_s$ 는 각각 공진선트회로의 인덕터와 저항을 나타낸다. 또한  $C_p^S$ 는 일정변형 조건에서의 압전 바이모프의 정전용량을 의미한다. 식 (6)을 식 (5)에 대입 후 제안된 드라이브의 모달질량  $M$ 과 모달강성  $K$ 를 도입하면 결국 공진선트회로에 의해 선트된

드라이브의 변위 전달률의 전달함수를 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\frac{X(s)}{X^{ST}(s)} = \frac{K + K_p + 2K_{pst}^E}{Ms^2 + K + K_p + 2K_{pst}^E + \frac{K_{pst}^E(1 + \nu_{pst}^E)k_p^2}{1 - k_p^2} \cdot \frac{\beta}{1 + \beta}}$$

$$= \frac{\delta^2 + \gamma^2 + \lambda\gamma\delta^2}{(1 + \gamma^2)(\delta^2 + \gamma^2 + \lambda\delta^2\gamma) + K_T^2(\gamma^2 + \lambda\delta^2\gamma)} \quad (7)$$

여기서  $\gamma(=s/\omega_n^E)$ 와  $\lambda(=R_s C_p^S \omega_n^E)$ 는 공진선트회로의 최적튜닝 및 최적댐핑과 관련된 계수이며[6],  $K_T$ 는 본 연구에서 제안된 압전 바이모프를 장착한 드라이브의 '2 차원 문제에 대한 일반화된 전기-기계결합계수 (Two-dimensional Generalized Electro-mechanical Coefficient)'를 의미한다.

$$K_T^2 = \left( \frac{K_{pst}^E(1 + \nu_{pst}^E)}{K + K_p + 2K_{pst}^E} \right) \left( \frac{k_p^2}{1 - k_p^2} \right) \quad (8)$$

식 (7)로부터,  $K_T$ 가 원하는 값을 갖도록 설계함으로써 제안된 드라이브의 변위 전달률을 조절할 수 있음을 알 수 있다.

### 2.4 어드미턴스 해석

일반적으로 압전 구조물의 최적 선트댐핑을 얻은 방법 중 하나는 선트회로를 최적으로 튜닝하는 것이다. 그러나, 외부 응력에 의해서 발생된 전하가 외부 선트회로로 흐르지 못하면 선트회로에 의한 선트댐핑의 최적화는 불가능해지는데, 외부 응력으로 인해 압전재료로부터 발생된 전하가 내부적으로 흐르는 경우 이와 같은 현상이 발생된다. 이러한 설계문제를 고려하기 위하여 어드미턴스 해석을 통한 압전 바이모프의 전극을 형성하고자 한다. 압전 구성방정식과 응력-변형을 관계로부터 압전 바이모프의 'Dielectric Displacement'를 구한 후 이를 면적에 대하여 적분하고 바이모프 양단에 인가되는 전압으로 나누어주면 다음과 같이 압전 바이모프의 어드미턴스를 구할 수 있다.

$$Y_{31} = j\omega \left[ C_p^r (1 - k_p^2) - \frac{2\pi}{s_{11}^E (1 - \nu_{pm})} \frac{d_{31}}{V_{31}} (h_{pm} + h_p) \int_0^{r_{opt}} \left( \frac{\partial^2 w_0}{\partial^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_0}{\partial r} \right) r dr \right] \quad (9)$$

위 식에서  $C_p^r$ 는 압전 바이모프가 일정응력 하에서의 정전용량을,  $k_p$ 는 일반적인 압전 원판의 기계-결합계수를 나타낸다. 식 (9)로부터 알 수 있듯이 어드미턴스는 압전 바이모프의 물성과 형상으로부터 얻어지는 고유의 어드미턴스와 전기기계적 상호작용에 의한 어드미턴스로 구성되어 있음을 알 수 있다. 여기서 전기기계적 상호작용에 의한 어드미턴스는 압전 바이모프의 변형에 의존하므로 이를 최대화하면 전체 어드미턴스를 최대화 할 수 있다. 식 (9)의 적분항은 압전 바이모프의 반지름 및 원주 방향의 곡률의 합이며 이를 반지름에 대해 도시하면 Fig. 5와 같다. 결과부터 알 수 있듯이 임의의 지점에서 곡률의 합의 부호가 바뀌는데 이는 압전 바이모프의 안쪽과 바깥쪽에 가해지는 응력의 방향이 반대임을 의미한다. 따라서 어드미턴스 최대화 문제는 다음과 같이 정식화 될 수 있다.

$$\max \left[ \int_0^{r_{opt}} \left( \frac{\partial^2 w_0}{\partial^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_0}{\partial r} \right) r dr \right] \Rightarrow \left| \int_0^{r_{opt}} \left( \frac{\partial^2 w_0}{\partial^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_0}{\partial r} \right) r dr \right| \quad (10)$$

위 설계 조건을 만족시키기 위하여 Fig. 6과 같이 압전원판 한 면에 두 개의 전극을 구성하여 외부 섀트회로와 연결하였으며, 이때  $r_{opt}$ 는 식 (10)으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

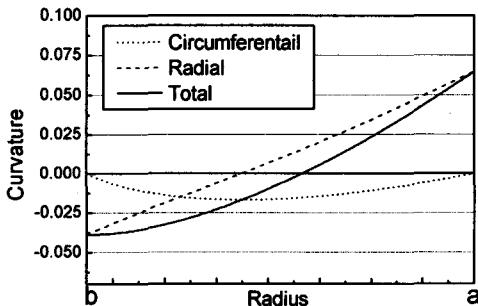


Fig. 5 Curvatures of the deformed piezoelectric plate with respect to radial position

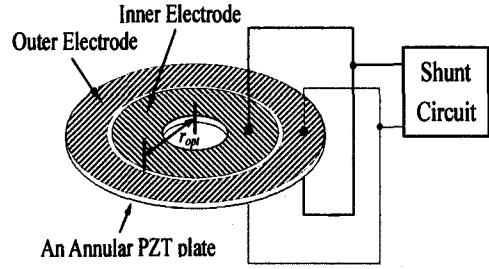


Fig. 6 Configuration of the proposed bimorph connected with external shunt circuit

$$r_{opt} = \frac{a^2 k(a^2 - b^2) b^{-b^2} k(a^2 - b^2)}{\sqrt{e}} \quad (11)$$

### 3. 압전 바이모프의 최적설계

본 연구에서는 압전 섀트댐핑을 향상시키기 위하여 민감도 해석을 통한 압전 바이모프의 최적 설계를 수행하였다. 특히, 구조가 복잡한 구조물의 경우, 설계변수 변동에 대해 각각의 FE 모델을 구축한 후 모달 해석을 통하여 감도행렬을 도출하는 기존 방법과는 달리[17], 초기모델에 대한 모달 해석 결과와  $K_r$  계수를 이용하여 설계변수 변화에 대한 감도행렬을 도출하였다. 먼저 모달 변수를 결정한다. 본 연구에서 제안된 시스템의 경우, 바람직한 설계방향은 섀트 댐핑에 의한 기존 드라이브의 동특성 변화를 최소화하면서 섀트댐핑을 극대화하는 것이므로 다음과 같이 모달변수를 설정하였다.

$$\psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n]_t = [K_r, \omega_n^E]_t \quad (12)$$

또한 모달변수에 대한 설계 변수는 Fig.4를 고려하여 다음과 같이 설정하였다.

$$\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m]_t = [a, h_{pm}, h_p]_t \quad (13)$$

설계변수 변동  $\Delta\xi$ 에 대한 모달변수의 변동  $\Delta\psi$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\psi = Z \cdot \Delta\xi \quad (14)$$

여기서  $Z$ 는 설계변수에 대한 모달변수의 1계 감도행렬을 나타낸다. 그러므로 타겟 모

달변수를 얻기 위한 설계변수 변동은 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta \xi = Z^{-1} \Delta \psi \quad (15)$$

계산된 설계변수의 변화는 기존의 설계변수에 추가되며 타겟 모달변수의 변동이 설정된 수렴조건 내에 도달할 때까지 위 과정을 반복한다. 그러면 최종 원하는 설계변수는 다음과 같이 구해진다.

$$\xi_{i+1} = \xi_i + \Delta \xi \quad (16)$$

이제 식 (14)의 감도행렬을 구하여야 한다. 본 연구에서는 앞에서 유도된 2 차원 문제의 일반화된 전기기계 결합계수  $K_T$  를 이용하여 감도행렬을 직접 구한다. 단, FEM 을 이용한 모달해석 결과로부터  $K_T$  를 구하기 위하여 다음 식을 이용한다.[6]

$$K_T^2 = [(\omega_n^D)^2 - (\omega_n^E)^2] / (\omega_n^E)^2 \quad (17)$$

여기서  $\omega_n^E$  와  $\omega_n^D$  는 각각 압전 바이모프의 전기적 경계조건이 short 와 open 상태일 때의 드라이브의 공진주파수이며, Fig. 3 의 FE 초기모델에 각각의 전기적 경계조건에 해당하는 압전재료의 컴플라이언스 값을 입력한 후 모달해석을 통하여 구한다. 또한 식 (7)의 변위 전달률 식으로부터 다음과 같이 open 상태일 때의 공진주파수를 이론적으로 얻을 수 있다.

$$\omega_n^E = \left[ \frac{K + K_p + 2K_{pm}^E}{M} \right]^{1/2} \quad (18)$$

결국, 식 (16)의 감도행렬은 식 (8)과 (18)을 이용하여 다음과 같이 모달변수에 대한 설계변수의 1 차 편 미분 형태로 쉽게 얻을 수 있다.

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial \xi_1} & \frac{\partial \psi_1}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial \psi_1}{\partial \xi_m} \\ \frac{\partial \psi_2}{\partial \xi_1} & \frac{\partial \psi_2}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial \psi_2}{\partial \xi_m} \\ \frac{\partial \psi_s}{\partial \xi_1} & \frac{\partial \psi_s}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial \psi_s}{\partial \xi_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial K_T}{\partial a} & \frac{\partial K_T}{\partial h_{pm}} & \frac{\partial K_T}{\partial h_p} \\ \frac{\partial \omega_n^E}{\partial a} & \frac{\partial \omega_n^E}{\partial h_{pm}} & \frac{\partial \omega_n^E}{\partial h_p} \end{bmatrix} \quad (19)$$

단, 모달질량 및 모달강성 값은 초기 FEM

모델에 대한 모달해석 결과와 식 (8)과 (18)을 이용하여 구하였으며, 압전 바이모프의 미소 설계 변경량에 대한 모달질량 및 강성 변화는 무시하였다. Fig. 7 은 초기 모델에서 얻은 값을 이용한 변위 전달률 시뮬레이션 결과와 민감도 해석을 통하여 달성하고자 하는 셉트댐핑의 성능곡선을 나타낸 것이다. 모달 해석 결과 short 와 open 상태일 때의 공진주파수가 각각 911.3Hz 와 911.4Hz 의 값을 얻었으며, 식 (17)을 이용할 경우  $K_T$  는 0.014 의 값을 갖는다. 이는 제안된 초기 모델이 셉트댐핑에 의해 기존 드라이브보다 약 50%의 진동 저감 효과가 발생함을 알 수 있다.

타겟 셉트댐핑 성능의 향상치는 초기 모델보다 50% 즉, 기존 드라이브보다 약 70%의 진동절연이 달성되도록 하였으며, 이럴 경우  $K_T$  는 0.0412 의 값을 가져야 한다. 또한 설계변수 변동에 의한 동특성 변화를 최소화 하기 위하여 Table 1 에서 볼 수 있듯이

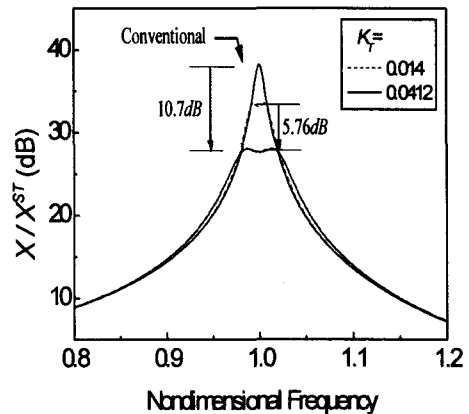


Fig. 7 Target shunt damping improvement of the drive using sensitivity analysis

Table 1 Sensitivity analysis results of the bimorph

| Parameter         |              | Initial Model | Target Model | Final Model | Error |
|-------------------|--------------|---------------|--------------|-------------|-------|
| Design Parameters | $a$          | 25 mm         |              | 21.5 mm     |       |
|                   | $h_{pm}$     | 0.5 mm        |              | 0.9 mm      |       |
|                   | $h_p$        | 0.3 mm        |              | 0.3 mm      |       |
| Modal Parameters  | $K_T$        | 0.014         | 0.0412       | 0.0405      | 1.7%  |
|                   | $\omega_n^E$ | 911.3 Hz      | 912 Hz       | 911.8 Hz    | 0.02% |

공진 주파수의 변화는 매우 작은 값을 가지도록 설정되었다 이후 실제 반복 설계 과정을 통하여 최종적으로 설계변수를 얻었으며, Table 1 은 수행된 민감도 해석 결과를 나타낸 것이다. 결과로부터 알 수 있듯이 이때 달성된 모달변수는 타겟 모달변수와 매우 작은 오차 범위 내에 존재함을 확인할 수 있다. 또한 민감도 해석을 통해 얻은 설계변수를 FE 모델에 적용하였으며, 이때 얻은 모달해석 결과가 민감도 해석 결과로부터 얻은 최종 모달변수와 매우 유사함을 확인하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig.8(a)는 실제 제작된 압전 바이모프를 구성하는 하나의 압전원판으로서 한 면에 두 개의 전극이 형성되어 있으며,  $r_{opt}$  는 식 (11)를 통하여 얻었다. Fig. 8(b)는 제안된 압전 바이모프가 실제 드라이브에 장착된 것을 보여준다. 섀트 댄핑 실험에 앞서 먼저 어드미턴스 해석을 통해 얻은 압전 바이모프의 전극 형성에 대한 타당성을 검증하였다. 타겟 공진모드를 고려하여 압전 바이모프의 중앙 부위에 충격을 가하였으며, 이때 안쪽 전극과 바깥쪽 전극에서 발생한 전압의 주파수 응답을 측정하였다. Fig.9(a)에서 보는 바와 같이 타겟공진모드인 910Hz 부근에서  $\pi$ 의 위상 차를 가짐을 알 수 있다. 또한 Fig.9(b)는 충격에 대한 응답을 시간영역에서 나타낸 결과로서 주파수 응답 결과와 같은 결과를 보여주고 있어 결국, 어드미턴스 해석에 의한 전극형성이 타당함을 알 수 있다. 이후 전용 드라이브를 이용하여 디스크-스핀들을 7,200rpm 으로 회전시키면서 드라이브의 외부 구조물에 임팩햄머를 이용하여 충격을 가한 후 이때 발생하는 회전 디스크의 진동 레벨을 측정하였다.

Fig.10 은 회전 디스크의 OD 위치에서 압전섀트댄핑에 의한 디스크의 진동저감 성능 실험 결과를 나타낸 것이다. 섀트회로가동 시 축 방향의 (0,0)모드의 진동레벨이 약 64%의 진동 감쇠를 나타내었다. 또한 구조물의 가진 위치를 변경하면서 충격을 인가한 후 디스크의 진동 레벨을 측정한 결과 유사한 진동 저감 성능을 확인하였다.

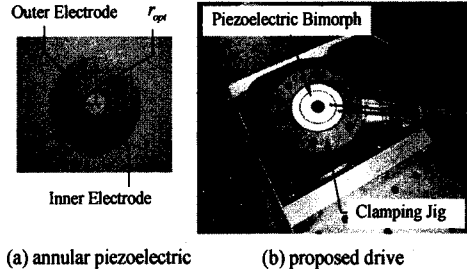


Fig. 8 Photographs of the proposed drive with piezoelectric bimorph

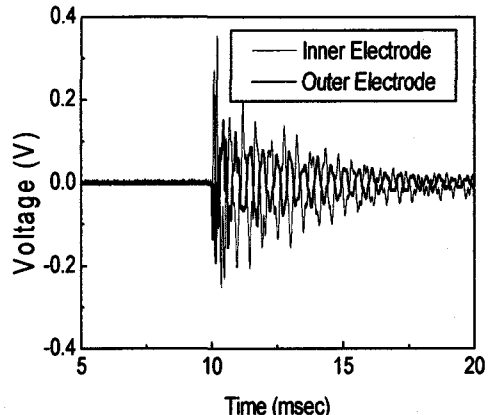
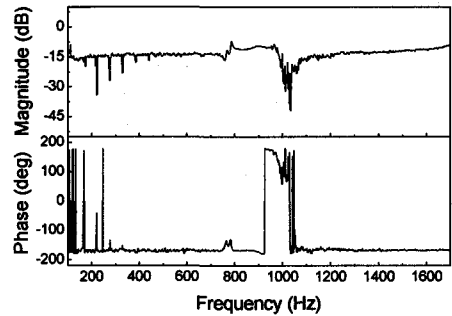


Fig. 9 Measured electric responses between inner and outer electrodes

따라서 본 연구에서 제안된 압전 섀트댄핑을 이용하여 외부 충격에 대한 회전 디스크의 진동을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 HDD 디스크-스핀들 시스템의 진동저감을 위하여 압전 섀트댄핑을 적용하였다. 기존 드라이브에 대한 동특성

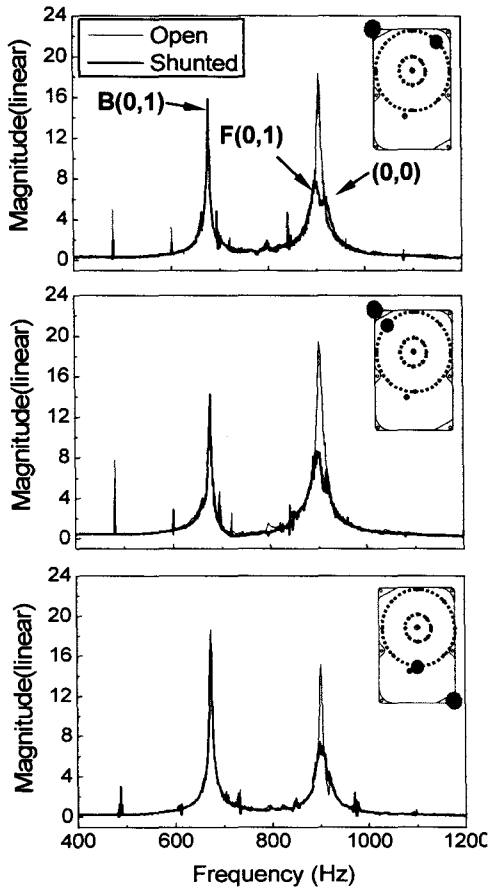


Fig. 10 Experimental results by piezoelectric shunt damping of the disk-spindle system  
 (○ impact points, ● measurement point)

해석을 바탕으로 진동저감 타겟 진동 모드를 선정하였으며, 이를 바탕으로 압전 바이모프를 이용한 압전 선트댐핑 시스템을 설계하였다. 또한, 압전 바이모프에 대한 임피던스 해석을 통하여 선트된 드라이브의 변위 전달률을 유도한 후 시뮬레이션을 통하여 설계된 압전 선트댐핑의 성능을 예측하였으며, 선트댐핑 성능 향상을 위하여 민감도 해석을 통한 최적 설계를 수행하였다. 이후 실제 제작된 압전 바이모프를 이용한 디스크-스핀들 시스템의 진동 실험을 수행하였으며, 실험 결과 디스크 회전 시 외부 충격에 대하여 해당 공진모드에서 약 64%의 진동 저감 성능을 발휘하는 것을 확인하였다. 앞으로 유체 베어링이 장착된 드라이브에 대한 선트댐핑 적용 연구와 소형 및

박형의 드라이브에 대한 적용 가능성에 대해서도 타진할 예정이다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- [1] 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.
- [2] Han, W. S. et al., 2002, "A Study on the Disk Vibration Control by Disk Damper for 100Ktpi Hard Disk Drive Design," Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, November, pp.363-368.
- [3] 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.
- [4] Jang, G. H., Hong, S. J., and Han, J. H., 1998, "Vibration Analysis of HDD Spindle System due to Excitation of Ball Bearing," Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, November, pp.300-306.
- [5] Han, W. S. et al., 2002, "Vibration Analysis of 1" HDD," Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, November, pp.352-357.
- [6] Hagood, N. W. and von Flotow, A., 1991, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks," Journal of Sound and Vibration, Vol.146, No.2, pp.243-268.
- [7] Kim, J., Ryu, Y. H., and Choi, S. B., 2000, "New Shunting Parameter Tuning Method for Piezoelectric Damping Based on Measured Electrical Impedance," Smart Materials and Structures, Vol.9, pp.868-877.
- [8] Kim, J., 2003, "Smart panel technology for broadband noise reduction," Noise & Vibration



Worldwide, Vol.34, No.7, pp.13-21.

- [9] Hollkamp, J. J., 1996, "Multimode Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunts," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, No.3, pp.49-57.
- [10] Behrens, S., Fleming, A. J., and Moheimani, S.O.R., "New method for multiple-mode shunt damping of structural vibration using a single piezoelectric transducer," *Proceedings of SPIE the international society for optical engineering*, No.4331, pp. 239-250.
- [11] Tang, J. and Wang, K. W., 2001, "Active-Passive Hybrid Piezoelectric Networks for Vibration Control: Comparisons and Improvement," *Smart Materials and Structures*, Vol.10, pp.794-806.
- [12] Tsai, M. S. and Wang, K. W., 1999, "On the Structural Damping Characteristics of Active Piezoelectric Actuators with Passive Shunt," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.221, No.1, pp.1-22.
- [13] Lim, S. C., Park, J. S., Choi, S. B., and Park, Y. P., 2003, "Vibration Suppression of HDD Spindle System Using Piezoelectric Shunt Damping," *Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, November, pp.1089-1094.
- [14] Jang, G. H., Kim, D. K., Han, J. H., and Kim, C. S., 2003, "Analysis of Dynamic Characteristics of a HDD Spindle System Supported by Ball Bearing Due to Temperature Variation," *Microsystem Technology*, Vol.9, pp.243-249.
- [15] Reddy, J. N., 1997, *Mechanics of Laminated Composite Plates-Theory and Analysis*, CRC Press, Inc., New York.
- [16] ANS/IEE Std 176-1987 IEEE Standard on Piezoelectricity, 1987, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., pp. 9-14.
- [17] Lee, D. J. et al., 2001, "Lens-Holder Design in Pick-up Actuator Using Sensitivity," *Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, May, pp.712-717.