

압전 션트 댐핑을 이용한 HDD 스피들 시스템의 진동 저감

Vibration Suppression of HDD Spindle System Using Piezoelectric Shunt Damping

임수철^{0*}·박종성^{*}·최승복^{**}·박영필^{***}

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

Key Words : HDD Disk-Spindle System(하드디스크 스피들 시스템), Piezoelectric Shunt Damping(압전션트댐핑), Vibration Reduction(진동 감쇠), Modal Analysis(모달 해석).

ABSTRACT

A main vibration source in HDD is arisen from high rotating disk/spindle, and vibration suppression of the disk-spindle system becomes a critical issue and a major concern for high performance of the drive. In this paper, we study the feasibility of suppressing unwanted vibration of disk-spindle system of the HDD by external shock and excitation utilizing piezoelectric shunt damping methodology. By considering dynamic characteristics of the disk-spindle system through modal analysis, a target vibration mode is determined and then the piezoelectric material is carefully integrated to the modified drive. In order to maximize improvement of vibration characteristics of the proposed system, shunt circuit is optimally designed via tuning processes. Finally, the vibration characteristics of the high rotating disk-spindle system of the proposed drive is experimentally evaluated in frequency domain.

1. 서론

HDD(hard disk drive)는 고도로 정보화가 진행되고 있는 21 세기 산업사회에서 고품질의 대용량 정보저장 기능을 제공하는 주요 정보저장매체로서 급속히 고밀도화가 진행되어 왔으며, 현재 80 GB/platter 의 정보저장이 가능한 100kTPI 의 트랙 밀도가 달성된 상태이다. 이처럼 HDD 의 트랙 밀도가 높아짐에 따라 HDD 에서 발생하는 기계적 진동이 TMR(track misregistration)에 미치는 영향은 기록밀도의 한계를 결정할 만큼 그 중요성이 강조되고 있다. HDD 에서 디스크-스핀들 시스템은 외부 가진 및 고속 회전하는 유연 디스크와 볼 베어링 등의 기계적 결합으로 인하여 쉽게 가진 되어 큰 진동을 발생시키며 이로 인한 디스크의 축 방향, 반경 방향 진동은 디스크의 TMR 의 악화를 가져오게 된다. 특히, 디스크-스핀들 시스템의 회전 수가 증가함에 따라 주요 진동원으로 작용하고 있으며, 또한 회전체 특성인 공진모드 분리 현상에 의해 비교적 낮은 주파수 대역에서 많은 공진점을 가지고 있어 외부 충격에 쉽게 가진 되어 결국, 드라이브의 성능을 악화시키게 된다. HDD 스피들 시스템의 진동 중 트랙밀도를 제한하는 비주

기적인 진동(NRRO;Non-Repeatable Runout)을 발생시키는 주요 내부 가진 요소는 볼 베어링의 결합과 고속 회전 시 발생하는 공기 유동에 의한 가진 등이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 볼 베어링에 댐핑물질을 삽입하거나 혹은 볼 베어링을 유체 베어링으로 대체함으로써 베어링에 의한 가진 요소를 줄이는 방법에 대한 연구와, 디스크 댐핑을 설치하고 공기 유동에 의한 squeeze air bearing 에 의해 디스크에 댐핑을 가함으로써 디스크 및 스피들의 NRRO 를 줄이는 연구가 진행되어 왔다[1-4]. 한편, 외부 충격에 대한 드라이브의 진동억제 방법에 대한 연구는 드라이브의 베이스 플레이트나 커버 등에 대한 구조 해석을 통한 설계변경과 드라이브의 구조물의 진동모드가 디스크-스핀들 시스템에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되어 왔을 뿐[5-6], 이의 진동저감을 위한 감쇠장치 등에 대한 연구는 미진한 상태이다. 특히, IT 산업의 발달로 인해 휴대용의 대용량 정보저장매체로서 HDD 의 이동성이 강조되면서 외부 충격에 대한 드라이브의 강건성을 확보하는 것은 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

본 논문에서는 외부로부터 인가되는 충격 등과 같은 외란에 대한 HDD 디스크-스핀들 시스템의 진동저감 장치로서 압전재료를 이용한 션트댐핑(piezoelectric shunt damping)을 제안하였으며, 2.5 인치 및 1 인치 HDD 에 대한 연구에 앞서 같은 기계적 구조를 가지면서도 구조변경이 용이한 3.5 인치 HDD 에 대하여 연구를 수행하였다. 먼저 대상 HDD 의 디스크-스핀들 시스템의 동특성 해석을 통하여 디스크-스핀들 시스템의 진동양상을 파악

* 인하대학교 대학원 기계공학과
E-mail : g1983654@inhavision.inha.ac.kr
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

** 인하대학교 기계공학과

*** 연세대학교 기계공학과

하였다. 이로부터 드라이브의 TMR 에 큰 영향을 미치는 진동모드를 효과적으로 감쇠시키기 위해서 압전재료를 장착한 드라이브를 설계 및 제작하였으며, 션트회로(shunt circuit)와 연계하여 제안된 디스크-스핀들 시스템의 진동저감 성능을 고찰하였다.

2. HDD 디스크-스핀들 시스템의 동특성

디스크의 공진모드 중 TMR 에 큰 영향을 주는 공진모드는 일반적으로 500~1500Hz 의 낮은 주파수 대역에 존재하는 모드로서 스핀들의 유연한 샤프트 축과 베어링, 그리고 드라이브의 베이스 플레이트와 커버 등의 구조물과 강한 연성 작용을 일으킨다. 따라서 실제 드라이브 구동 시 외부로부터 전달되는 가진이나 충격 입력에 의한 디스크의 진동 감쇠 장치를 설계할 경우 정확한 타겟 공진모드를 선정하기 위해서는 이러한 연성작용에 의한 디스크-스핀들 시스템의 동적 특성 변화를 충분히 고려하여야 한다. 본 연구에서는 압전 션트 댐핑을 이용한 HDD 디스크-스핀들 시스템의 진동저감을 위해 디스크 1 장을 장착한 3.5 인치 드라이브를 사용하였다. 디스크가 여러 장 적층되어 있는 HDD 의 경우 공진모드들이 균형(balanced)모드와 불균형(unbalanced) 모드로 나누어질 뿐 진동저감 타겟 공진모드에 대한 압전션트댐핑의 적용은 디스크 1 장인 HDD 와 같다. 먼저 대상 드라이브에 대한 동적 특성을 파악하기 위해서 모달 해석을 수행하였다. 이를 위하여 외부 가진 으로서는 소형 임팩 햄머(impact hammer)를 이용하여 Fig. 1 과 같이 A~E 지점에 충격을 인가하였다. A~D 지점은 드라이브의 외부 가진점이며, E 지점은 디스크 가진점으로서 드라이브 커버에 일정한 크기의 구멍을 형성한 후 디스크를 직접 가진 하였다. 이때 디스크-스핀들의 동적 응답은 디스크의 OD, ID 인 1~16 지점과, 드라이브 커버와 스핀

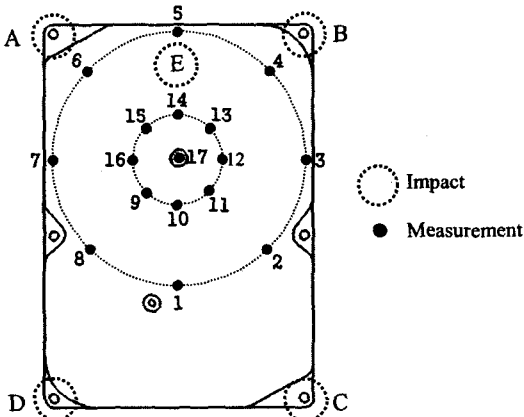


Fig. 1 Impact and measurement points for modal testing

들의 샤프트 축이 연결되는 17 지점에서 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 이용하여 측정하였다.

본 연구의 진동 저감 목적은 외부로부터 전달되는 충격에 의한 디스크-스핀들 시스템의 진동저감이므로 스핀들 회전 시의 동특성을 파악한 후 진동 저감 타겟 공진모드를 결정하였으며, 이를 바탕으로 타겟 공진모드의 압전 션트 댐핑을 위한 스마트 시스템을 설계하였다. 스핀들 회전 시 노달지름(nodal diameter)를 가지고 있는 디스크 모드들은 스핀들 회전 수에 따라 전진모드와 후진모드로 분리되며, 회전 수에 비례하는 성분(RRO)의 피크도 발생하기 때문에 낮은 주파수 영역에서 모드를 구분하는 것은 매우 힘들다. 따라서 디스크 정시의 모달해석을 통하여 모드형태를 확인한 후 회전수의 변화에 따른 고유진동수 변화를 파악하였다. Fig. 2 는 디스크(가진점 E)를 가진한 후 측정점 1~17 에서 측정된 동적 응답 특성 결과를 나타낸 것이다. Axial 방향의 (0,0)(nodal circle, nodal diameter) 모드의 경우 클램프로 고정되어 있는 디스크의 내경도 디스크와 같은 위상으로 진동함을 알 수 있는데 이것은 디스크와 스핀들이 연성되어 나타나는 진동모드임을 의미한다. 그러나, (0,2), (0,3), (0,4)의 공진모드는 디스크 자체의 관성균형 모드로서 스핀들과 분리된(uncoupled) 공진모드이며 따라서 디스크의 ID 부분의 진동이 거의 측정되지 않았다. (0,1)모드의 경우 디스크의 관성불균

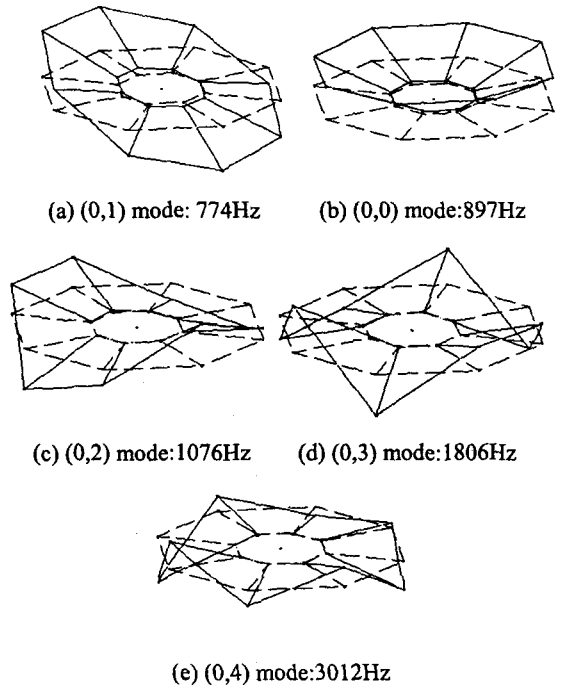


Fig. 2 Mode shapes and natural frequencies of the disk-spindle system

형모드로서 디스크/스핀들을 반경방향으로 진동시키므로 스핀들의 축 방향 진동은 매우 작은 값을 가진다. Fig. 3은 회전 수에 따른 디스크의 동적 응답을 나타낸 것으로서 정지 시와 2,700rpm 부터 8,200rpm 까지 500rpm 단위로 회전 수를 증가시키며 측정된 결과이다. Fig. 3(a)는 가진점 E에서 디스크에 직접 충격을 가하고 측정점 1에서의 주파수 응답 결과로서, 노달지름이 존재하는 (0,n) ($n=1,2,3,4$)에서 전진공진모드와 후진공진모드가 나타났다. 상당히 큰 진동특성이 발생되었다. 반면 Fig. 3(b)에서와 같이 드라이브의 외부 가진점 A에서 충격을 가하였을 경우 (0,0), (0,1)모드를 제외하고 나머지 모드들은 디스크를 직접 가진하였을 경우보다 매우 작은 진동특성을 나타내어 거의 측정되지 않았다. 이러한 현상은 다른 가진점 B~D의 경우에서 같은 결과를 나타내었는데 이것은 외부 가진이 드라이브 커버 및 베이스 플레이트 등의 감쇠로 인한 것으로 사료된다. Axial 방향의 (0,0) 모드와 (0,1)모드는 디스크 가진과 드라이브 외부 가진의 모든 경우에서 다른 공진모드보다 큰 진동특성을 나타내었다. 특히, axial 방향의 (0,0)모드는

디스크와 스핀들의 강한 연성뿐만 아니라 드라이브의 베이스 플레이트와 커버와 연성되어 있다. 또한, Fig. 3(b)로부터 실제 드라이브 구동 시 외부 충격에 대한 진동 특성에서는 (0,2)이상의 모드는 다른 모드보다 상당히 작은 진동특성을 보이므로, 본 연구에서 제안된 압전 셉트댐핑의 타겟 공진모드를 axial 방향의 (0,0)모드로 설정하였다.

3. 스마트 드라이브의 구성

(0,0)모드의 경우 베이스 플레이트와 커버에 의해 영향을 받으며, 특히 디스크-스핀들의 연성 모드로써 샤프트 축을 통하여 베이스 플레이트와 커버로 전달된다. 따라서 압전재료를 베이스 플레이트나 커버에 설치하여 샤프트 축을 통하여 전달되는 디스크-스핀들의 진동 에너지를 압전재료와 셉트회로를 통하여 소산시킴으로써 궁극적으로 디스크의 진동을 저감시키게 된다. 압전재료는 스핀들과 베이스 플레이트 사이에 장착될 수 있으나 일반적인 베이스 플레이트는 형상이 복잡하여 설치가 용이치 않다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 드라이브 커버의 구조를 변경하여 설치하였으며, 이를 드라이브 조립 시 스핀들의 샤프트 축과 연결하였다.

셉트댐핑 실험에 앞서 제안된 스마트 드라이브와 기존 시스템과의 동특성을 비교하였다. Fig. 5는 기존 드라이브와 제안된 드라이브에 대하여 디스크 진동의 주파수 응답을 디스크 정지 시에 비교한 것이다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 각각 디스크 가진점(E)과 외부 가진점(A)에 대한 1번 측정점의 동적 응답 특성을 나타낸 것이다. 측정 결과 압전재료의 장착에 의한 동특성에 큰 변화가 없었으며 다른 가진점에서도 유사한 진동특성 결과를 나타내었다. 따라서 압전 셉트댐핑에 의한 디스크-스핀들 시스템에 의한 진동저감 성능을 용이하게 평가할 수 있다. Fig. 6은 제안된 드라이브에 대한 압전재료의 컨덕턴스(conductance)를 측정한 그림이다. 약 901Hz 부근에서 다른 주파수 대역에 비해 매우 큰 컨덕턴스 값을 보이고 있으며, 이는

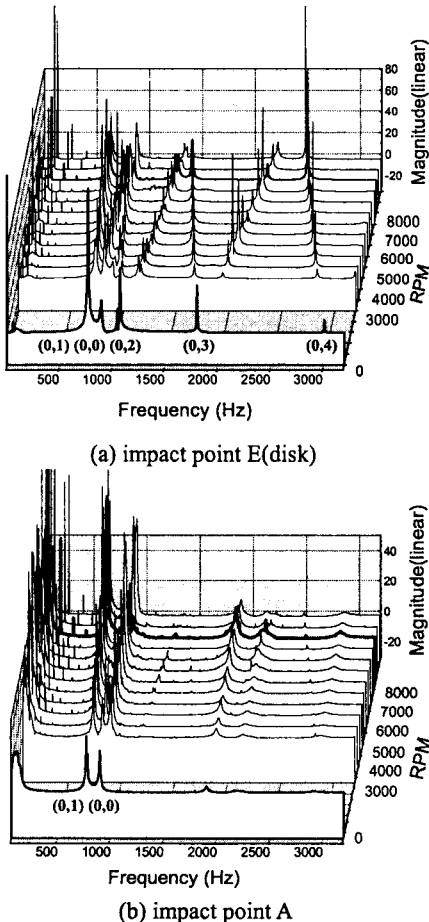


Fig. 3 Waterfall plots of the HDD

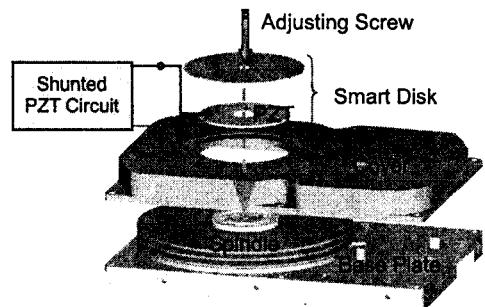
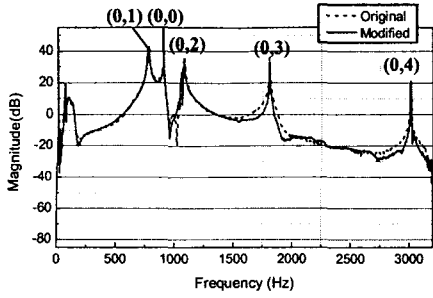
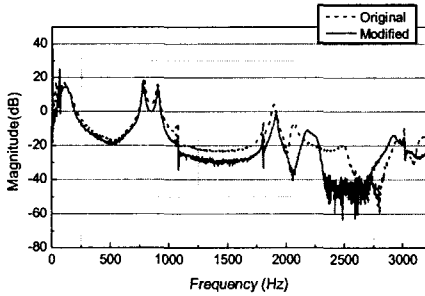


Fig. 4 Schematic diagram of the proposed PZT shunt damping of HDD



(a) impact point E(disk)



(b) impact point A

Fig. 5 Frequency responses of the disk-spindle system

axial 방향의 (0,0)모드의 공진주파수와 일치한다. 이는 해당 주파수에서 압전 구조물이 작은 임피던스(impedance) 값을 가지게 되어 해당 주파수에서 보다 많은 진동에너지를 선트회로로 전달할 수 있으므로 해당 주파수에서 디스크-스핀들 시스템의 진동에너지 소산이 보다 원활히 이루어질 수 있게 된다. 이것은 제안된 시스템이 (0,0)모드의 진동을 압전선트댐핑을 통해 효율적으로 저감시킬 수 있음을 의미한다.

4. 선트회로의 구성

본 연구에서는 압전재료를 포함하는 구조물의 진동감쇠를 위해 공진선트회로를 사용하였다. 또한 제안된 시스템이 효과적인 수동감쇠 성능을 발휘할 수 있도록 파라미터 튜닝을 통하여 최적의

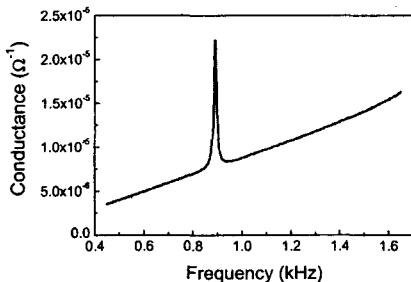


Fig. 6 Measured conductance of the proposed system

인덕턴스와 저항값을 구하게 된다. 본 연구에서는 Hagood[7]가 제안한 기계진동 흡진기법을 이용하였다. Hagood 는 압전재료의 구성방정식으로부터 압전재료와 선트회로의 전기적 임피던스를 유도하고 이로부터 선트 시스템의 기계적 임피던스를 유도 하여 이를 1 자유도의 질량-감쇠기-스프링 모델에 적용하였으며, 결국 구조물의 질량-감쇠기-스프링 모델과 연계되어 기계진동 흡진기로 모델링하게 된다. 기계진동 흡진기는 2 자유도 시스템의 1 차와 2 차 공진주파수를 거의 일치시켜 서로간의 상대운동을 통하여 진동을 억제한다. 1 차 시스템의 댐핑이 무시할 만큼 작을 경우, 2 차 시스템의 댐핑에 상관없이 전달함수의 크기가 변하지 않는 두 개의 고정점이 1 차 시스템의 공진 주파수 좌, 우측에 존재한다. 이 고정점에서의 크기를 같게 하여 최적의 인덕턴스 을 구하게 되며, 최적의 댐핑을 위한 저항값은 1 차 시스템의 공진 주파수에서의 전달함수의 크기를 고정점에서의 크기와 일치시켜서 얻는다.

$$\delta^* = \sqrt{1 + K_y^2}, \quad r^* = \sqrt{2}K_y / (1 + K_y^2) \quad (1)$$

$$R^* = r^* / C_{pi}^s \omega_n, \quad L^* = 1 / C_{pi}^s \omega_n^2, \quad \omega_e = \frac{1}{\sqrt{L_i C_{pi}^s}} \quad (2)$$

위 식에서 C_{pi}^s 와 ω_e 는 각각 압전재료를 포함하는 구조물과 선트회로의 공진주파수이다. 또한, $\delta = \omega_e / \omega_n$ 은 무차원 튜닝 주파수비로서 선트회로와 1 차 시스템의 주파수비를 나타내며, K_y 는 일 반화된 전기-기계 결합계수로서 실험적으로 제안된 구조물의 공진주파수로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

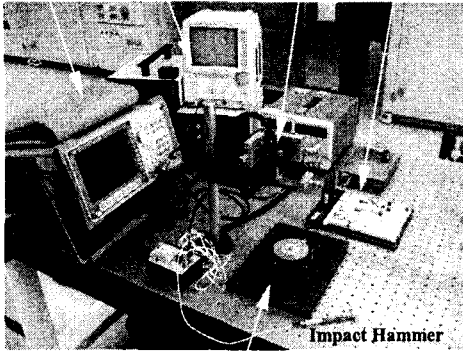
$$K_y^2 = \frac{(\omega_n^D)^2 - (\omega_n^E)^2}{(\omega_n^E)^2} \quad (3)$$

여기서 ω_n^E 는 압전재료가 폐회로 상태일 때의 구조물의 공진 주파수이고 ω_n^D 는 개회로 상태일 때의 공진 주파수 이다

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 7 은 제안된 시스템이 장착된 드라이브의 압전선트댐핑을 위한 구성된 실험장치이다. 제안된 드라이브는 스피들 전용 드라이브에 의해 작동 회전 수인 7,200rpm 으로 회전하며 이때 소형 임팩 햄머를 이용하여 드라이브 외부 구조물인 A-D 지점에 충격을 인가하였다. 또한, 압전선트의 유무에 따른 디스크의 진동 특성 변화는 LDV 를 이용하여 측정하였으며, 신호분석기를 통하여 동적 특성을 분석하였다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 각각 A 점과 C 점에 충격을 인가한 후 디스크의 1, 4, 6 번 측정점에서 디스크의 진동을 분석을 결과로서 선트회로가 개회로(open) 상태일 때와 선트 되었을 때의 진동 감쇠성능을 나타낸 것이다. 선트회로가

Signal Analyzer Oscilloscope LDV Shunt Circuit



Proposed HDD

Fig. 7 Experimental setup for vibration suppression of the disk-spindle system

개회로일 때 (0,1)모드의 전진모드 F(0,1)는 7,200rpm의 회전속도에서 axial 방향의 (0,0)모드와 거의 일치하여 구분되지 않았으나, 션트회로에 의해 진동 저감이 이루어졌을 때 (0,0)모드 왼쪽에 근접하여 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 타겟 공진모드가 (0,0)모드이므로 F(0,1)모드가 진동 저감 성능을 약간 떨어뜨리는 것을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 타겟 공진모드인 axial 방향의 (0,0)모드를 중심으로 가진 위치와 측정 위치에 따라 약간의 차이는 있으나 션트회로를 가동시켰을 때 대체적으로 약 50%의 진동 감쇠를 나타내었다.

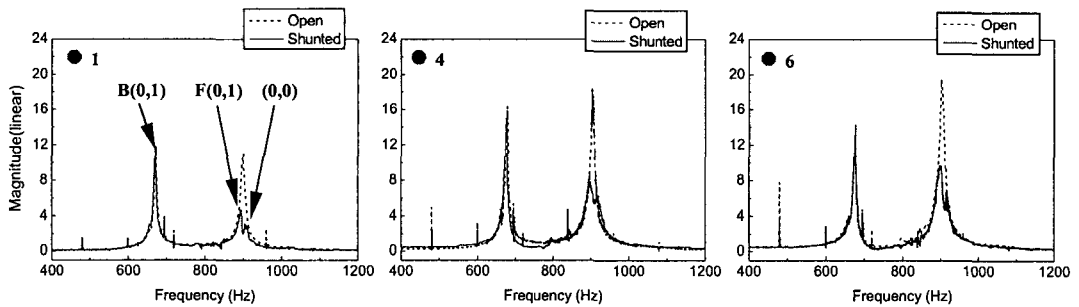
Table 1. Comparison of design parameters between analysis and experiment

Parameter	Analysis	Experiment
$L'(H)$	0.32	0.34
$R'(\Omega)$	84	105
K_{11}	0.033	
$C_{\mu}^s(F)$	98.0×10^{-9}	

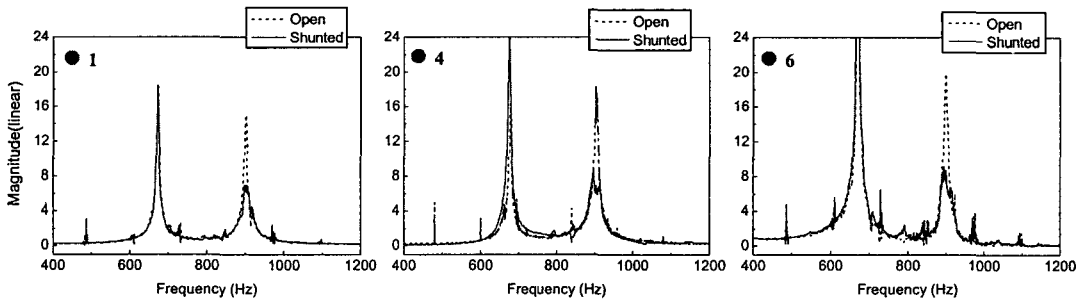
B와 D 점 가진은 드라이브의 구조 상 각각 A 점 및 C 점 가진과 매우 유사하며 진동 감쇠성능 결과 또한 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 제안된 시스템이 외부로부터 드라이브에 인가되는 충격에 대해 디스크-스핀들 시스템의 주요 진동 모드를 효과적으로 감쇠시킬 수 있음을 알 수 있다. Table 1은 실험에 사용된 압전체와 션트회로의 각종 파라미터 값으로써 식(1)~(3)으로부터 얻어진 시뮬레이션 값과 비교적 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 대표적 정보저장기기의 하나인 HDD에 대하여 외부 충격에 대한 디스크-스핀들



(a) impact point A



(b) impact point C

Fig. 8 Experimental results by piezoelectric shunt damping of the disk-spindle system

시스템의 진동저감을 위하여 압전 셉트댐핑을 적용하였다. 이를 위하여 기존 드라이브의 실제 동작 시 동특성을 파악하고 진동저감 타겟 진동 모드를 선정하였으며, 이를 바탕으로 압전셉트댐핑 시스템을 설계, 제작하였다. 또한, 이에 대한 컨덕턴스 측정을 통하여 시스템의 진동저감 성능을 예측하였으며, 파라미터 튜닝을 통하여 셉트회로를 설계하였다. 이후 드라이브의 실제 구동조건 하에서 제안된 시스템의 진동저감 성능을 평가하였으며, 평가 결과 외부 충격에 대한 해당 공진모드에서 약 50%의 진동저감성능을 발휘하는 것을 확인하였다. 앞으로 복수개의 디스크를 장착한 HDD의 다중 공진모드에 대한 진동저감 성능과 나아가 1 인치 및 2.5 인치 드라이브에 대한 압전셉트댐핑의 가능성을 타진할 예정이다.

후 기

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

참고문헌

- (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 스피indle계의 진동 특성 해석", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 300-306.
- (6) 한우섭 등, "1" HDD의 진동특성 분석에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.352-357.
- (7) 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.