

# 차량용 HDD 의 수동형 진동저감 시스템 설계

## Design of Passive Vibration Attenuation System for a Vehicle HDD

김진남<sup>1</sup>, 김영추<sup>1</sup>, 권원태<sup>2,✉</sup>  
Jin Nam Kim<sup>1</sup>, Young Chu Kim<sup>1</sup> and Won Tae Kwon<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원 (Dept. Mech. Info. Eng., Univ. of Seoul)

<sup>2</sup> 서울시립대학교 기계정보공학과 (Dept. Mech. Info. Eng., Univ. of Seoul)

✉ Corresponding author: kwon@uos.ac.kr, Tel: 02-2210-2403

Manuscript received: 2009.10.8 / Accepted: 2010.1.14

*The shock performance of hard disk drives has been a serious issue for Car PC. Since the vibration and disturbances from a car gives an adverse effect on a HDD of Car PC, it is necessary to protect a HDD from them. In this study, passive vibration attenuation system for a vehicle HDD was developed. Acceleration from the ground through the tire and suspension system was measured to figure out the frequency translated to Car PC. Critical frequency to Car PC was determined by exciting it with a shaker and measuring a data transmitting speed from HDD. A newly designed vibration attenuation system was fabricated to protect HDD from the acceleration. It was shown that the developed system had an excellent vibration attenuation ability.*

Key Words: Car PC (차량 장착형 컴퓨터), Vibration Attenuation System (진동 저감 장치), Data Throughput (데이터 전송속도), Rubber Damper (고무댐퍼)

### 1. 서론

차량용 컴퓨터(Car PC)는 자동차에 장착되어 차 내에서 컴퓨터를 활용한 업무처리 및 운전자 중심의 다양한 어플리케이션이 가능한 소형 컴퓨터를 말한다. 이와 같은 이동 가능한 소형 컴퓨터는 차량 및 장비에 탑재되어 혹독한 환경에서의 구동성 및 신뢰성이 무엇보다 중요하다. 그 구성 중 물리적 장치인 HDD 는 외부의 진동이나 충격에 민감한 구조를 지니며, 현재 HDD 는 크기가 작아짐에 따라 데이터 저장 밀도를 높여려는 노력이 이어지고 있다.<sup>1</sup> 또한 외부의 진동 및 충격에 대한 헤더암과 디스크의 구조적 동특성에 대한 연구도 이루어져 왔다. Edwards<sup>2</sup> 는 HDD 의 충격입력에 대한 헤더암과 디스크의 거동을 FEM 을 이용하여 분석하였다. Jayson, Murphy, Smith and Talke<sup>3</sup> 는 HDD 의

구동 및 비구동 상태에 대한 충격입력에 대한 응답을 비교하였으며, Jang, Seo and Lee<sup>4</sup> 는 회전디스크-스핀들, 헤드-서스펜션-액츄에이터와 지지구조의 유연성을 고려한 유한요소 모달 해석을 수행하고 실험과 비교 분석하였다. 또한, 구조적 동특성 뿐만 아니라 스핀들 회전의 진동 주파수에 대한 연구도 이루어 졌다. Jintanawan<sup>5</sup> 은 저널베어링의 분포힘에 대한 HDD 스핀들 시스템의 진동 주파수를 연구하였으며, Heo and Shen<sup>6</sup> 은 FDB(fluid-dynamic bearing)를 이용한 HDD 스핀들 모터의 진동에 대해 연구하였다.

내부의 특성을 고려한 여러 가지의 성능을 평가하는 방법도 연구되었다. Feliss, Murthy and Talke<sup>7</sup> 는 구동상태의 디스크에 대한 충격실험을 통해 충격력에 따른 물리적 손상을 측정하였다. Heo, Lee and Kim<sup>8</sup> 은 3.5inch HDD 의 스핀들 모터를 연구하

기 위해 OP-vibration 을 통한 데이터 전송속도 하락을 분석하였다. Chua, Yudhanto, Ong and Mou<sup>9</sup>는 강제진동에 대한 SFF(small form factor) HDD 의 Soft Failure 를 측정하여 내부 동특성과의 상관관계를 분석하였다.

여러 가지 성능 평가 방법이 연구되면서 그 성능 지표를 여러 메커니즘에 적용하여 HDD 의 성능향상을 목표로 하는 연구도 이루어 졌다. Yap, Vahdati and Harmoko<sup>10</sup>는 1 자유도의 HDD 진동 고립 시스템에 대한 연구를 하였다. Lee and Kim<sup>11</sup>은 콤팩트 디스크 플레이어의 고무댐퍼 형상과 재질에 따른 진동전달율을 정의하고 진동 특성을 연구하였으며, Lim, Chang and Park<sup>12</sup>은 고무 마운트의 비선형 해석을 통한 HDD 의 충격 및 진동격리 시스템을 연구하였다.

많은 연구들이 내부의 동특성을 파악하여 성능을 평가하고 성능을 향상시키기 위해 많은 노력을 하고 있다. 하지만 HDD 내부 시스템은 특성상 동적이며 에어베어링과 같은 내부의 유체흐름이 있으며 복잡한 구조를 지님에 따라 정확하게 파악하기 어렵기 때문에, 저장장치의 최종 목표인 데이터를 읽고 쓰는 능력을 측정하여 시스템을 분석하였다. 데이터의 전송속도를 이용한 평가 방법을 통해 HDD 의 성능에 영향을 끼치는 주파수 대역을 확인하고 내부의 부분별로 알려진 동특성과 비교 분석하여 시스템을 연구하였다.

이에 이 연구에서는 수동형 댐퍼를 이용하여 외부 진동의 영향을 최소화 하는 시스템을 설계, 제작하였다. 이를 위해 자동차 PC 에 입력되는 가속도를 분석하고 이 가속도를 최소화하는 진동저감 시스템을 제작한 후, HDD 의 평균데이터 전송속도변화를 이용하여 성능을 평가하였다. 제작된 시스템은 매우 우수한 진동저감 성능을 보였다.

**2. 연구 내용 및 결과**

**2.1 차량에서의 가속도 측정 및 분석**

외부의 가진력에 의한 Car PC 의 진동을 최소화하는 댐핑시스템을 구축하기 위하여 우선 차량에서 전달되는 진동을 측정하였다. 진동은 가속도 센서를 Car PC 에 장착하여 측정하였으며, 실험에 사용된 Car PC 는 CT-U3 G(NC92-300)이며 가속도 센서는 PCB electronics 333B 30 을 사용하였다. 가속도 신호는 FFT Analyzer(HP 35670A Dynamic signal analyzer)로 입력되어 차량으로부터 들어오는 가속

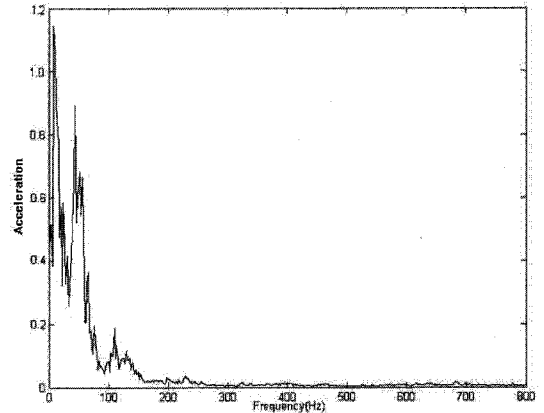


Fig. 1 Power spectrum of acceleration signal measured in a vehicle

도 신호의 주파수 대역과 세기를 측정하였다. 실험차량은 Hyundai new click 1.4 DOHC 이며 주행코스는 일반도로, 과속방지턱, 비포장도로 등의 여러 가지의 노면을 선택하였다. 속력은 60~80Km/h 로 주행하였으며, 주행 중에 입력되는 가속도 신호를 측정 및 분석하였다. 차량으로부터 Car PC 로 입력되는 가속도 신호를 분석함에 따라 관심 주파수 대역을 알아냈다.

차량으로부터 Car PC 로 입력되는 가속도 신호는 노면상태 및 주행상태에 따라 여러 가지 형태로 나타났다. 특히 여러 가지 노면 중에 비포장 노면에서의 가속도 신호가 진동에 민감한 HDD 에 가장 큰 악영향을 미친다. 비포장 노면에서의 입력되는 진동은 Fig. 1 에서 보듯이 매우 불규칙적인 특징을 가지고 있고 평균적으로 0~200Hz 의 주파수 대역에서 최대 1.0G 의 가속도를 나타내었다. 노면에서 입력되는 바닥가진 형태의 진동은 차량의 프레임, 바퀴와 서스펜션 등의 영향으로 고주파대역에서의 크기가 작았다.

그러므로 0~200Hz 대역의 주파수를 관심 주파수 대역으로 분류하여 이러한 외부 진동입력이 얼마나 HDD 에 영향을 주는지 파악하며 이 관심 주파수 대역의 진동저감을 목표로 하였다.

**2.2 하드디스크의 위험 주파수 대역**

본 연구에서는 가진기를 이용하여 관심주파수인 0~200Hz 의 진동을 HDD 에 가하면서 성능을 평가하였다. 성능평가는 HDD 의 평균데이터 전송속도를 측정하여 이루어졌다. 본 실험에서 HDD 는 Seagate 사의 ST9160310AS(160G)를 사용하였으며,

이 HDD 는 2.5 인치의 폼팩터를 가진다. 가진기는 MB Dynamics Modal 50A 이며, 신호분석기(HP 35670A Dynamic signal analyzer)에서 소스를 받아서 구동된다. 가진기의 진동은 연결봉을 통한 1 축 방향의 종진동으로 HDD 가 마운팅된 구조물을 가진 하였다. 연결봉 끝단에는 힘 센서(PCB electronics 208C02)를 설치하여 가진력을 측정하며, 구조물에는 가속도 센서(PCB electronics 333B30)를 장착하여 가속도를 측정하였다. HDD 의 데이터 전송 속도는 벤치마킹 프로그램(HD Tune v2.55)를 이용하여 측정하였다. 실험장치가 Fig. 2 에 보여졌다. 보통 일반적인 경우 차량이나 장비로부터 입력될 수 있는 주파수대역은 0~500Hz 의 범위를 갖는 것으로 알려져 있다. 입력 진동의 주파수에 따른 성능을 알아보기 위하여 50Hz 부터 500Hz 까지 10Hz 단위로 0.5, 1.0G 의 가속도로 정현파 가진을 하여 데이터 전송속도를 측정하였다.

HDD 내부의 구조적인 동특성을 나타내는 공진 주파수들은 크게 세 부분의 고유 진동수이다. 첫 번째, 원형 디스크의 진동 모드 형상에 따른 고유진동수와 회전애 따른 고유진동수는 712Hz 다. 두 번째, HSA(Head-Suspension Assembly)의 1 차 굽힘 고유진동수는 433Hz 다. 마지막으로 스피들 모터 회전부의 진동 주파수는 285Hz 다.

본 연구에서 가진 주파수별 데이터 전송속도를 측정한 결과는 Fig. 3 에 보여졌다. 마운트된 구조물이 최대 1.0G 의 가속도로 진동할 때 290Hz 근방에서 데이터 전송속도가 하락되었다. 가진 주파수가 440Hz 부터 490Hz 까지의 대역에서도 HDD 의 성능이 저하되었다.

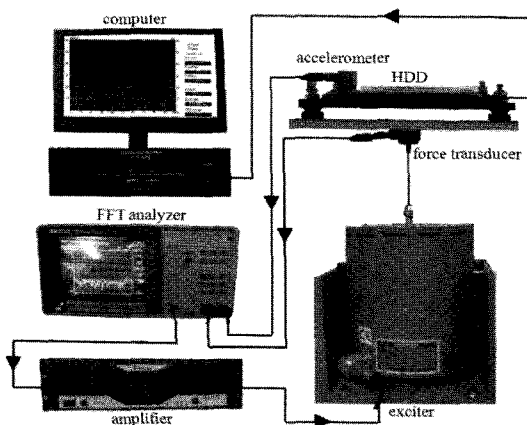


Fig. 2 Experimental Set up

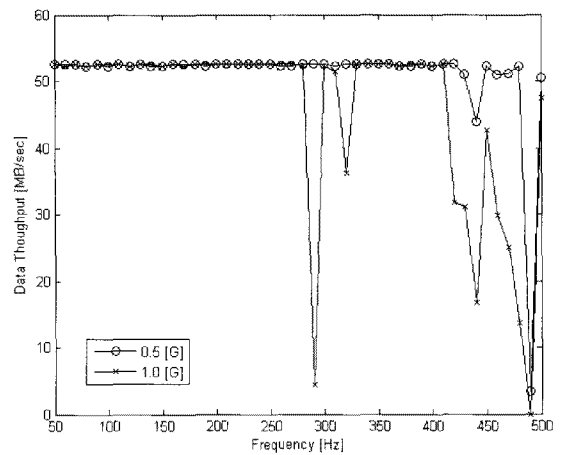


Fig. 3 Data throughput of HDD with sine-wave vibration (50-500Hz)

Heo 등<sup>8</sup> 이 3.5 인치의 폼팩터를 지니는 HDD 의 스피들 모터의 최적화를 연구한 연구에 따르면 280Hz 근처에서 전송률이 하락되었는데, 이는 스피들 회전애 따른 진동현상 때문이었다. 이 연구 결과와 유사하게 본 실험에 보여주는 성능 저하는 400Hz 이하의 주파수 대역에서 국부적으로 나타나며 이 또한 내부의 스피들 회전의 진동 주파수에서의 공진현상에 의한 것으로 추정된다.

Chua 등<sup>9</sup> 의 Soft Failure 에 관한 연구에 따르면 HSA 의 공진현상으로 인해 410Hz 근처에서 성능저하가 발생하였다. 이와 같이 이번 실험에서 일어난 440Hz 부터 490Hz 까지 대역에서의 두 번째 국부적인 성능저하는 액츄에이터 서스펜션의 공진현상이 원인인 것으로 추정된다.

따라서 우리는 290Hz 근처와 420~490Hz 의 주파수 대역에서의 성능저하는 내부 구성의 공진 현상으로 인해 발생하며 작은 가속도에 대해서 HDD 의 성능 저하가 발생할 수 있는 위험주파수 대역으로 분류하였다.

### 2.3 고무댐퍼를 이용한 진동저감 시스템 설계

Car PC 와 같이 소형 컴퓨터 장비에 탑재되는 HDD 는 설치공간이 좁다. 그러므로 진동저감 댐퍼 시스템은 적은 공간에 설치되도록 고안되어야 한다. 따라서 기존 HDD 에 쉽게 사용될 수 있는 각 모서리의 볼팅 부분에 브라켓을 설치하고 이와 구조물 사이에 고무 댐퍼를 이용하여 고정하는 구조를 사용하였다.

Table 1 Characteristics of dampers

Damper	Material	Hardness	Size
A	Commercial Silicone	28	Ø 13.0mm × 13.0mm
B	Commercial Silicone	38	Ø 13.0mm × 13.0mm
C	Commercial IIR (Isobutylene Isoprene Rubber)	30	Ø 13.7mm × 10.0mm
D	Commercial Silicone	35	Ø 10.3mm × 10.9mm
E	Commercial IIR (Isobutylene Isoprene Rubber)	20	Ø 10.4mm × 12.0mm

진동저감에 사용되는 고무댐퍼는 재질과 형상에 따라 강성과 감쇠계수가 달라지고, 결국 진동시스템의 특성에 영향을 미친다. 이에 다양한 모양의 상용댐퍼가 실험에 사용되었는데 상용댐퍼의 경우 정도만 주어졌으므로(Table 1) 강성을 구하기 위한 시험이 실시되었다. 댐퍼는 압축되어 작동하므로 압축력을 주고 그 때의 변위를 측정하여 스프링 상수를 Fig. 4 와 같이 구하였다.

댐퍼의 형상과 재질에 따라 다른 결과를 보이고 있는데, 초기에 각 댐퍼는 350~700N/m 의 스프링 상수를 보이다가 어느 정도 이상의 압축력이 주어지면 스프링 상수가 증가하기 시작하였다. 이는 댐퍼가 비례영역 이상으로 압축되어 발생하는 현상으로 이 현상까지 고려하여 설계된 진동저감시스템이 Fig. 5 에 주어졌다.

이 시스템은 두 종류의 댐퍼를 조합하여 효과적인 진동저감이 가능하며, 기존의 HDD 마운트 방법과 비슷하여 생산비를 절감할 수 있다. 초기에 한 개의 댐퍼를 이용한 시스템을 설계하여 실험하였는데 고유진동수가 높아짐에 따라 시스템에 악영향을 주어서 두 개의 댐퍼를 조합하여 고유진동수를 낮추며 HDD 와 브라켓의 자중에 따른 예압을 고려한 상부와 하부의 댐퍼를 선정하여 설계하였다. 하부댐퍼는 차량으로부터 전달되어지는 힘뿐만 아니라 HDD 의 무게까지 지탱해야 하기 때문에 1N 이상까지의 압축력에도 강성의 변화가 적어야 한다. 따라서 1N 의 압축력까지 강성이 변하지 않는 댐퍼 A,B,C 를 선택하였다. 댐퍼 E 는 형상 자

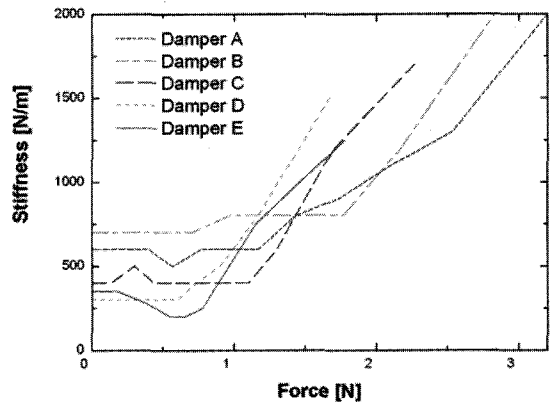


Fig. 4 Change of spring constant of dampers according to the variation of applied force

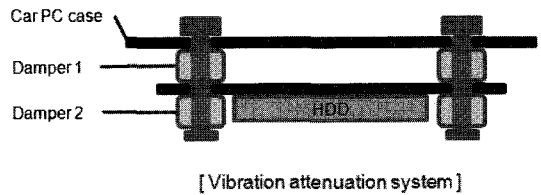


Fig. 5 Block diagram of vibration attenuation system

Table 2 Combination of dampers and its natural frequency

Combination of damper	Upper damper	Lower damper	Natural frequency
Combination 1	D	A	50Hz
Combination 2	C	A	70Hz
Combination 3	D	C	60Hz
Combination 4	C	C	80Hz

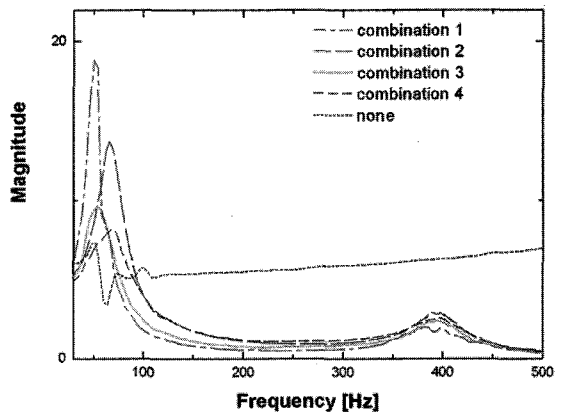


Fig. 6 FRF of vibration attenuation systems

체가 변형되며, 댐퍼 D 는 1N 의 압축력에 대하여 강성이 높아지는 경향을 보이므로 제외하였다. 댐퍼 A,B,C 중 고유진동수를 낮추기 위하여 강성이 비교적 작은 댐퍼 A,C 를 하부댐퍼로 선택하고, 상부댐퍼 또한 작은 강성을 가지는 댐퍼 C,D 를 선택하였다(Table 2).

상하부에 사용된 댐퍼의 종류에 따른 주파수 특성을 알아보기 위한 실험이 실시되어 Fig. 6 에 보여졌다. 실험결과 각각 4 개의 댐퍼조합은 모두 50~80Hz 의 고유진동수를 가진다. 실리콘 재질로만 이루어진 댐퍼조합 1 은 가장 높은 피크치를 가지고 부틸고무 재질로만 이루어진 댐퍼조합 4 는 가장 낮은 피크치를 가지는데 이는 부틸고무의 감쇠가 더 크기 때문이다. 그리고 100Hz 이상의 주파수에서는 진동저감장치를 장치하지 않았을 때와 비교하여 보았을 때 4 가지의 댐퍼조합 모두 진동저감 효과를 보였다.

### 2.4 데이터 전송속도를 이용한 진동저감 시스템의 성능 평가

Table 2 의 댐퍼를 설치한 HDD 의 성능을 평가하기 위해 차량으로부터 입력되는 진동을 모사하여 1~200Hz 주파수 대역의 랜덤 신호로 가진하였다. 성능은 하드디스크의 데이터 전송속도를 측정하여 평가하였는데 랜덤 신호의 세기는 1N 에서 9N 까지 증가시키면서 실험하였다.

진동저감장치를 장치한 경우와 장치하지 않은 경우에 대하여 HDD 의 데이터 전송속도를 측정함으로써 성능을 비교하였다(Fig. 7). 4 가지의 댐퍼조합을 사용한 진동저감시스템 모두 진동저감장치를 장치하지 않은 경우보다 성능이 향상되었다. 특히 댐퍼조합 3 의 경우에는 거의 데이터 전송속도가 떨어지지 않았는데 이에 대한 자세한 그래프가 Fig. 8 에 주어졌다. Fig. 6 에서 4 가지 댐퍼조합 시스템의 경우 1~100Hz 에 고유진동수가 존재하고 댐퍼 시스템이 없는 경우와 비교하여 피크치가 큼에도 불구하고 Fig. 7 에서 데이터 전송속도는 댐퍼 시스템이 없는 경우보다 모두 우수하였다. 이는 댐퍼 시스템이 없는 경우에 100~200Hz 주파수영역에서 높은 진폭을 갖는 것으로 미루어 보아, 1~100Hz 의 가속도보다는 100~200Hz 의 가속도가 HDD 의 데이터 전송성능에 영향을 미친다고 추정할 수 있다.

결론적으로 댐퍼시스템 조합 3 을 사용하여 댐퍼가 없을 경우보다 4 배 이상 강건한 Car PC 시스템을 제작할 수 있었다.

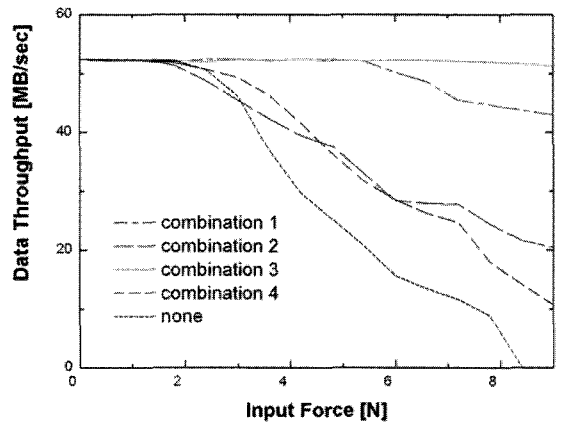


Fig. 7 Data throughput of vibration attenuation system attached HDD on 1-200Hz random signal exciting

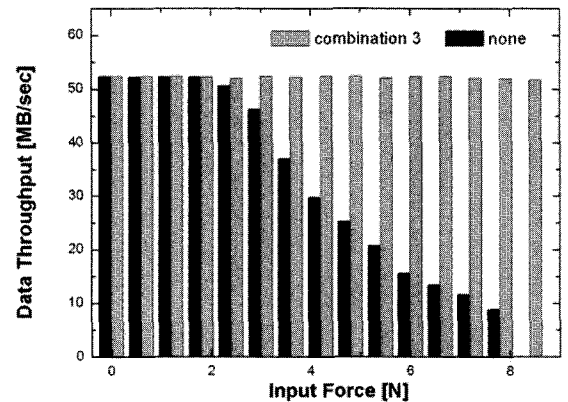


Fig. 8 Comparing between combination 3 and none attached HDD on 1-200Hz random signal exciting

### 3. 결론

본 연구에서는 외부로부터 Car PC 에 입력되는 진동을 측정하고, 이러한 외부 가진에 대하여 데이터 전송속도를 이용한 HDD 의 성능 평가방법을 도입해 HDD 의 위험 주파수 대역을 확인하였다. 또한 위험 주파수 대역의 진동저감을 위하여 고무 댐퍼를 이용한 마운팅 시스템을 구성하고 성능을 평가하였다. 연구 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 바닥으로부터 차량을 통해 Car PC 로 입력되는 진동의 특성은 1-200Hz 의 대역에서 최대 1.0G 정도의 크기를 가진다. 반면 엔진의 진동은 바닥 가진에 비하여 미약하기 때문에 Car PC 에 크게 영향을 미치지 않는다.

2) 2.5-inch HDD 는 외부 가진 주파수대역에 따

라 성능저하를 보이며, 290Hz 근처에서의 성능저하는 스피들 회전부의 진동현상 때문이고, 420~490Hz에서의 성능저하는 액츄에이터 서스펜션의 공진현상 때문이다. 따라서 이러한 주파수 대역에 대하여 진동저감이 이루어져야 한다.

3) HDD 는 1~200Hz 의 주파수 영역에서 1~100Hz 의 가진보다 100~200Hz 의 가진에 더 민감하다. 따라서 1-100Hz 의 대역에서 고유진동수를 가지는 진동저감시스템을 HDD 에 장착하였을 때 진동저감시스템을 장착하지 않았을 때보다 성능이 향상된다.

4) 4 종류의 진동저감시스템에서 고유진동수가 낮을수록 그리고 주파수응답의 피크치가 낮을수록 1~200Hz 랜덤가진에 대하여 HDD 의 성능이 향상된다.

5) 1~200Hz 의 랜덤 신호가 입력되어도 8N 의 힘까지 HDD 의 성능이 유지되는 진동저감 시스템을 개발하였다.

## 후 기

본 논문은 중소기업청 2008 년도 산학공동기술 개발지원사업으로 지원된 연구결과입니다.

## 참고문헌

1. Park, Y.-P. and Yang, H.-S., "Technology Trends for High Recording Density in HDD," *Journal of the KSPE*, Vol. 18, No. 4, pp. 9-18, 2001.
2. Edwards, J. R., "Finite Element Analysis of the Shock Response and Head Slap Behavior of a Hard Disk Drive," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 863-867, 1999.
3. Jayson, E. M., Murphy, J. M., Smith, P. W. and Talk, F. E., "Shock and Head Slap Simulations of Operational and Nonoperational Hard Disk Drives," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 38, No. 5, pp. 2150-2152, 2002.
4. Jang, G. H., Seo, C. H. and Lee, H. S., "Finite element modal analysis of an HDD considering the flexibility of spinning disk-spindle, head-suspension-actuator and supporting structure," *Microsyst. Technol.*, Vol. 13, No. 8-10, pp. 837-847, 2007.
5. Jintanawan, T., "Vibration of hard disk drive spindle systems with distributed journal bearing forces," *Microsyst. Technol.*, Vol. 12, No. 3, pp. 208-218, 2006.
6. Heo, B. and Shen, I. Y., "A parametric study on rocking vibration of hard disk drive spindle motors with fluid-dynamic bearings and rotating-shaft design," *Microsyst. Technol.*, Vol. 11, No. 11, pp. 1204-1213, 2005.
7. Feliss, B., Murthy, A. N. and Talke, F. E., "Microdrive operational and non-operational shock and vibration testing," *Microsyst. Technol.*, Vol. 13, No. 8-10, pp. 1015-1021, 2007.
8. Heo, B., Lee, H. S. and Kim, W., "Optimization of 3.5-in. HDD spindle motors for OP-vibration performance: theoretical prediction and experimental and experimental verification," *Microsyst. Technol.*, Vol. 13, No. 8-10, pp. 759-766, 2007.
9. Chua, K. T., Yudhanto, A., Ong, E. H. and Mou, J. Q., "Investigation of Soft Failure of Small Form Factor HDD under Forced Vibration," *Asia-Pacific Magnetic Recording Conference*, 2006.
10. Yap, F. F., Vahdati, N. and Harmoto, H., "Design and analysis of vibration isolation systems for hard disk drives," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 303, No. 2, pp. e52-e56, 2006.
11. Lee, T.-K. and Kim, B.-S., "The Transmissibility of Rubber Damper in the Compact Disc Player," *Transaction of the KSMTE*, Vol. 17, No. 4, pp. 126-132, 2008.
12. Lim, S., Chang, Y.-B., Park, N.-C. and Park, Y.-P., "Optimal Design of Rubber Mounts Supporting Notebook HDD for Shock and Vibration Isolation," *Asia-Pacific Magnetic Recording Conference*, 2006.