

## 하드디스크 서스펜션의 초음파 진동측정 기술

### AN ULTRASONIC METHOD FOR VIBRATION MEASUREMENT OF THE SUSPENSION IN HARD DISK DRIVES

\*하 완\* · 김노유\*\*

Wan Ha, Nohyu Kim

#### Abstract

A new ultrasonic pulse-echo technique was developed and described for vibration measurement of the suspension assembly in hard disk drives. The method is based upon the difference in magnitude of two consecutive reflection waves from a moving object (suspension), while the traditional ultrasonic vibrometer uses the phase shift of the reference wave and the reflection wave. A cone-shape delay line is designed to access the small structure. A simple mathematical model is presented and analyzed with experimental results to show the feasibility of the method. The advantages of this ultrasonic vibration measurement method are relatively high resolution, low cost, and ease of implementation comparing with the Laser Doppler vibrometer.

#### 1. 서 론

소형 컴퓨터와 대용량의 하드디스크에 대한 요구가 증가함에 따라 지난 10년 동안 서스펜션의 크기와 슬라이더의 간극은 지속적으로 감소되어 왔다. 하드디스크의 트랙밀도가 증가하고 간극이 작아질수록 서스펜션의 진동은 더욱 중요한 문제가 되어 왔으며 특히 외부의 충격이나 loading/unloading시나 발생하는 드라이브의 진동 특성은 하드디스크 드라이브 산업에서 많은 연구가 진행되어 오고 있다<sup>(1-3)</sup>. 충격이나 진동에 의해 헤드가 표면과 충돌한다면 헤드나 디스크 표면에 손상을 가져올 수 있어 데이터의 손실이나 최악의 경우에는 하드디스크를 사용하지 못할 수도 있다.

서스펜션의 심한 진동은 HDD가 동작되어 켜지거나 꺼질 때 일어나기 쉽다<sup>(2)</sup>. 서스펜션이 로딩 (loading)되는 과정은 서스펜션이 ramp를 따라 움직이는 것에 의해 이루어지므로 ramp와 서스펜션 간의 상호작용은 로딩 (loading)되는 과정동안에 슬라이더의 모션에 큰 영향을 준다. 로딩 시스템의 성능을 개선하기 위해서는 외력이나 진동으로 인한 서스펜션의 동적 응답특성을 파악하는 것이 중요하다. 그렇지만 외팔보 형태의 기울어진 서스펜션은 작기 때문에 일반적인 기계시스템에 적용하는 모우드 실험기술을 이용해서는 실험적으로 서스펜션의 동적인 특성을 구하기가 불가능하다.

서스펜션과 같은 작은 구조의 모우드 측정을 위해서는 특수한 가진기와 응답 측정센서가 필요한데 서스펜션의 운동을 측정하기 위한 응답 센서는 광역 주파수 스펙트럼 특성을 가지면서도 측정면적이 작아야 하고 선형적 응답 특성을 가지고 있어야 한다. 또한 진동 측정장치는 작은 구조의 미세한 진동에 대해서도 민감해야 한다<sup>(2,3)</sup>. 이러한 대

\* 한국기술교육대학교 대학원

\*\* 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

표적 기술로서 Capacitance 타입의 센서나 가속도계를 포함한 많은 진동 측정기술들이 서스펜션의 응답을 얻기 위하여 사용되어져 왔으나 현재 기술 수준에서 가장 효과적인 측정기술로는 광학과 Laser Doppler 효과를 이용한 진동 측정계라고 할 수 있다<sup>(5)</sup>. LDV(laser doppler vibrometer)는 넓은 동적 측정범위 우수한 분해능을 가지면서도 측정면적이 작은 장점이 있다. 하지만 LDV는 미세한 속도를 정밀 측정하는 데에는 매우 좋은 결과를 나타내지만 장비가 고가이며, 충격이나 자기헤드 슬라이더의 loading/ unloading과 같은 경우에 발생하는 큰 진동을 측정/분석하는데는 AC성분뿐만 아니라 DC성분의 변위 신호도 요구되기 때문에 이를 위한 보조적 측정수단이 필요하다. 이러한 목적으로 적합한 기술 중에서 초음파를 이용한 진동 측정기술은 특수한 환경에서의 진동측정이 필요한 응용분야에서 가속도계와 LDV를 대신하거나 보조적인 수단으로서 사용되어 왔다. 그러나 하드 디스크의 서스펜션과 같은 작은 구조의 미세한 진동을 측정하는 경우에는 초음파 파장의 상대적 크기로 인한 나쁜 분해능과 센서의 크기 때문에 활용하는 데 제약이 있어 왔다.

본 논문은 기존의 초음파를 이용한 진동측정 기술에 비해 상대적으로 높은 분해능과 빠른 측정속도를 가진 새로운 초음파 측정기술에 대해서 소개하고 이를 실험적으로 검증하고자 한다.

## 2. 진동측정을 위한 초음파 기술

일차원 진동(out-of-plane)을 하는 물체가 Fig.1과 같이 어떤 시간  $t$ 에서  $x$ 의 위치에 놓여있다고 하자.

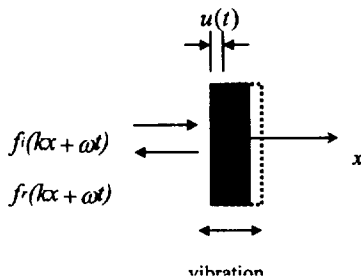


Fig.1 Reflection wave from a vibrating object

센서로부터 발생되어 물체에 입사되는 입사파를  $f_i$ 라고 할 때 이에 의해 만들어지는 물체로부터의 반사파를  $f_r$ 라고 하면 물체 표면에서의 반사계수가  $R$ 일 때 반사파  $f_r$ 는 다음처럼 표현된다<sup>(6)</sup>.

$$f_r(kx + \omega t) = R \cdot f_i(kx + \omega t) \quad (1)$$

만약 특정한 시간  $t = t_0$ 에서의 물체의 위치를 기준위치라고 하고 이때를  $x = 0$ 라고 하면 식(1)은 간단히 다음 식으로 표현된다.

$$f_r(\omega t_0) = R \cdot f_i(\omega t_0) \quad (2)$$

이제 물체가  $t$ 초 후에  $x = 0$ 로부터 새로운 위치  $x = u(t)$ 로 이동한다면 그때 물체의 표면에서의 반사파는 식(2)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f_r(ku(t) + \omega(t + t_0)) \\ = R \cdot f_i(ku(t) + \omega(t + t_0)) \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서 식(2)를 빼고 그 결과를 변형된 반사파  $g(t)$ 라고 정의하면  $g(t)$ 는 간단히 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} g(u, t) = f_r[(ku(t) + \omega(t + t_0)) \\ - f_r(\omega(t + t_0))] \end{aligned}$$

$$= R \cdot [f_i(ku(t) + \omega(t + t_0)) - f_i(\omega(t + t_0))] \quad (4)$$

식(4)의 형태로부터  $g(u, t)$ 는  $ku(t)$ 만큼 변위 delay를 가지고  $x$ 방향으로 진행하는 두 개의 입사파  $f_i$ 의 차이를 나타내게 된다. 물체의 운동  $u(t)$ 가 초음파의 파장과 비교해서 작다고 가정하고 물체의 운동속도가 초음파의 속도보다 매우 느리다고 가정하면 (즉,  $u(t) \ll ct$ ) 식(4)는  $u(t_0) = u_0 = 0$ 에서 Taylor 급수전개에 의하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$g(u, t) = R \cdot [f_i(ku(t) + \omega t_0) - f_i(\omega t_0)]$$

$$\begin{aligned}
&= R \cdot \left[ (ku) \cdot \frac{\partial f_i}{\partial (ku)} \Big|_{u_0} \right. \\
&\quad \left. + (ku)^2 \cdot \frac{\partial^2 f_i}{\partial (ku)^2} \Big|_{u_0} + \dots \right] \\
&= R \cdot u \cdot \frac{\partial f_i}{\partial u} \Big|_{u_0} \quad (5)
\end{aligned}$$

식(5)에서  $t_0=0$ 라고 가정하고, 변수  $u$ 와  $t$ 에 대해 다음과 같이 새로운 변수  $r$ 을 도입하면

$$r = ku + \omega t \quad (6)$$

다음 식(7)과 같은 변수치환이 가능하다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_i}{\partial u} &= \frac{\partial r}{\partial u} \frac{\partial f_i}{\partial r} = k \frac{\partial f_i}{\partial r}, \\
\frac{\partial f_i}{\partial t} &= \frac{\partial r}{\partial t} \frac{\partial f_i}{\partial r} = (k \frac{\partial u}{\partial t} + \omega) \cdot \frac{\partial f_i}{\partial r} \quad (7)
\end{aligned}$$

그리고 식(5) 우변의  $u$ 에 대한  $f_i$ 의 미분을 식(7)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_i}{\partial u} &= \frac{k}{k(\frac{\partial u}{\partial t}) + \omega} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial t} \\
&= \frac{1}{v(t) + c} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial t} \quad (8)
\end{aligned}$$

여기서,  $v(t)$ 는 시간  $t$  일 때의 운동 물체의  $x$ 방향 속도이고  $c$ 는 사용된 초음파의 속도이다. 이러한 관계식 (8)을 식(5)에 대입하고 함수  $g$ 를 시간의 함수로만 표현하면 다음과 같다.

$$g(t) \approx \frac{R}{v(t) + c} \cdot u(t) \cdot \frac{\partial f_i(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} \quad (9)$$

본 연구에서 관심있는 서스펜션의 속도는 대략 10-100 mm/sec의 범위이므로 식(9)에서 서스펜션의 속도  $v(t)$ 는 초음파의 속도와 비교해서 무시할 수 있다. 이러한 가정 하에서 식(9)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$g(t) \approx Rs \cdot u(t) \cdot \frac{\partial f_i(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} \quad (10)$$

여기서,  $s$ 는 초음파의 slowness(속도의 역수= $1/c$ )를 나타낸다. 식(10)은  $g(t)$ 가 진동에 의한 변위  $u(t)$ 에 대하여 직접적으로 비례한다는 것을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 관계를 직접 나타내기 위해 식(10)을 조금 더 간단히 하면

$$g(t) \approx Rs\eta \cdot u(t) \quad (11)$$

이 되며 여기서 상수  $\eta = \frac{\partial f_i(t)}{\partial t} \Big|_{t=t_0}$ 이다.

상수  $\eta$ 식에서  $f_i$ 는  $x=0$ 에서 측정된 센서로부터의 입사신호이기 때문에 이론적으로 결정되는 것은 아니지만 초음파 센서가 선정되면 결정되는 값으로서 비록 그 값을 모르더라도 실험을 통해 결정할 수 있는 값이므로 상수라고 가정할 수 있다. 그러므로 식(11)에서 우변은 상수항  $Rs\eta$ 과 변위  $u(t)$ 의 곱으로 이루어지므로 좌변의 신호  $g(t)$ 는 변위  $u(t)$ 와 선형적 관계가 있음을 보여주고 있다. 즉,  $g(t)$ 와 변위  $u(t)$ 의 선형 비례상수는  $Rs\eta$ 이며 반사계수  $R$ 과 초음파의 slowness  $s$ , 그리고 상수  $\eta$ 의 곱으로 이루어진 상수이다. 결국  $g(t)$ 를 실험적으로 측정하면 그 때 변위  $u(t)$ 는 식 (11)에서 쉽게 얻어질 수 있음을 알 수 있다.

### 3. HDD 서스펜션 구조

본 연구에서의 사용한 서스펜션은 그림 2에서 보는 바와 같은 Hutchinson 모델850 서스펜션이다. 서스펜션은 로드빔(load beam), flexure, 그리고 헤드의 3개의 작은 요소들로 구성 되어있다. 서스펜션과 flexure의 기본기능은 슬라이더에 preload를 주어서 에어베어링(Air Bearing)에 의해 발생하는 면압과 균형을 이루어 슬라이드가 원하는 부상위치를 안정한 상태로 비행할 수 있게 하는데 있다. 그러므로 서스펜션의 강성은 평면에서 슬라이더의 운동을 구속하는 반면 flexure의 강성은 슬라이더의 진동이나 회전 운동을 조절하게 된다<sup>(7,8)</sup>. 로드 빔(load beam)은 두께 약 0.12 mm의 스테인레스 스틸로 만들어졌으며 로드 빔의 리브(rib)의 경사는 베이스에서 0.76 mm이고 팁에서는 0.51 mm이다. 로드빔은 0.48 mm의 두꺼운 밀판에 스폿 용접 되어있는데 로드 빔의 다른 끝단에는 4개의 포인트로 스폿 용접되어있는 두께 0.051 mm

의 작은 스테인레스 스틸로 만들어진 gimbal이 위치하고 있다. 헤드에 가해지는 load는 반구 모양의 딤플(dimple)과 로드빔 사이에서 접촉을 통하여 전달된다. 실제 작동 시에서 gimbal 중앙에 붙어있는 헤드가 헤드와 디스크의 사이의 상대적 운동으로 발생하는 에어베어링(Air Bearing)에 의해 디스크의 표면 위를 부상하여 운동한다.

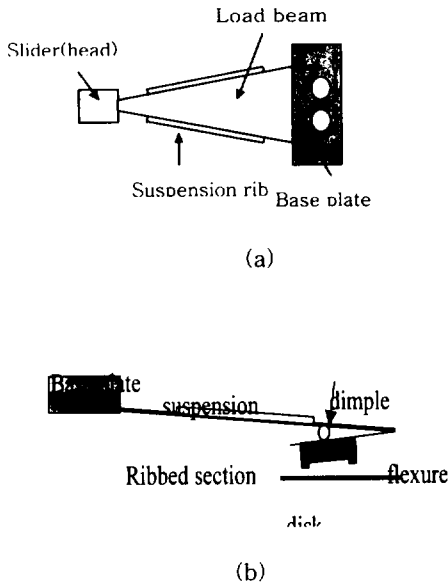


Fig. 2 The schematic of the suspension assembly (a) the front view, (b) the side view

서스펜션의 설계에 있어서 최적의 강성을 결정하는 것은 매우 중요한데 이는 헤드의 동적인 특성과 시스템의 안정성에 중요한 역할을 하는 서스펜션의 고유진동수에 직접적으로 영향을 주기 때문이다. 만일 고유진동수가 너무 낮으면 서스펜션은 너무 부드러워져서 공진이 동작 중에 일어나게 되고 디스크 표면의 슬라이더가 외부충격 때문에 파손될 수 있으며 데이터의 손실과 MR 헤드에 손상을 가져온다. 만일 고유진동수가 너무 높으면 충격이나 슬라이더의 진동을 흡수할 수 없으므로 서스펜션의 고유주파수와 강성을 추정하기 위하여 모우드 실험이나 FEM과 같은 수치해석방법이 수행되고 있다.<sup>(8)</sup>

#### 4. 변위 측정실험

Fig.2에 보여진 서스펜션에 대한 진동을 측정하기 전에 본 논문에서 제시한 측정이론의 유용성을 증명하기 위해서 예비 변위측정 실험을 수행하였다. 일반적인 초음파 센서는 서스펜션을 측정하기 위해서는 너무 크므로(지름 10-30mm) 특별히 설계된 cone모양의 웨지(wedge)가 초음파의 측정면적을 줄이기 위하여 개발되었다. Fig.3에서 이 웨지를 보여주고 있는데 재질은 아크릴이고 하단부의 직경은 서스펜션에 근접시키기 위해 1.2 mm로 설계되었으며 상용 초음파 센서를 장착하기 위한 상단부의 직경은 15 mm로 만들어 졌다. 이 웨지(wedge)를 사용함으로써 비록 투과 에너지가 작아 지더라도 서스펜션에 입사되는 초음파 빔(beam)의 크기를 서스펜션의 로드 빔(load beam)의 폭보다 충분히 작게 줄일 수 있다. 이 웨지(wedge)위에 플라스틱 홀더를 사용하여 10MHZ 초음파 센서를 부착하였으며 이 센서를 Fig.3과 같이 전체 측정장치를 마이크로미터 위에 설치하였다. 실험방법은 마이크로미터를 일정한 양만큼 조금씩 돌려서 진진시키면서 Fig.3에 나타난 것과 같이 초음파 센서를 사용하여 그 이동 변위를 동시에 측정하였다.

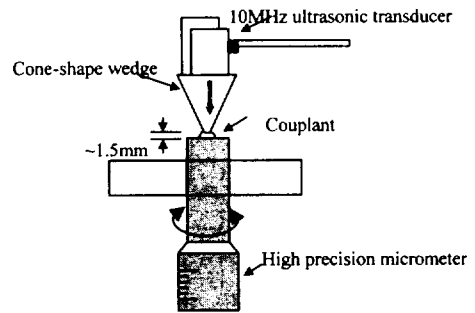


Fig. 3 Experimental apparatus for displacement measurement

마이크로미터 끝단이 임의의 기준위치  $u=0$ 에 놓여 있을 때, 식(11)의 반사파  $g(t)$ 는  $u(t)=0$ 이므로 식(4)에 의해 주어진  $g(t)$ 의 정의에 의해 제로가 된다. 다음으로 마이크로미터의 변위를  $u=0$  부터  $100 \mu\text{m}$ 까지  $10 \mu\text{m}$ 씩 증가시키면서  $g(t)$ 의 파형을 측정하여 컴퓨터에 저장하는데 이

때의  $g(t)$ 의 몇 가지 경우의 예가 Fig.4에 나타나 있다. Fig.4는 마이크로미터의 변위가  $u = 10, 20, 30$ 과  $40 \mu\text{m}$ 일 때  $g(t)$ 의 파형을 나타낸다. 그림4로부터 변위  $u$ 가 증가하여도 파형의 모양은 변하지 않고, 크기만이 선형적으로 늘어남을 알 수 있는데 이것은 식(10)과 ((11)의 이론으로부터 예상한 것과 일치하는 결과이다.

이러한  $g(t)$ 의 특성을 이용하면 변위 측정이나 실시간 운동의 측정이 가능하다. Fig.5는 마이크로미터의 변위에 대한  $g(t)$ 의 크기,  $|g(t)|$ 의 선형적 거동을 보여주고 있다.

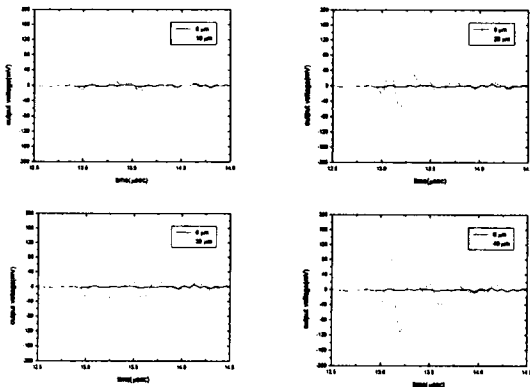


Fig.4 Correlation between  $g(t)$  and the displacement  $u$ .

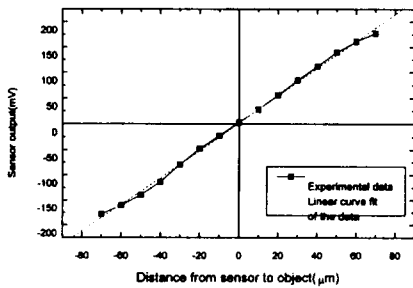


Fig.5 Linear property of  $|g(t)|$  with respect to displacement  $u$ .

## 5. 서스펜션 강성 및 진동 측정

이 실험에서는 Hutchinson 서스펜션의 수직방향으로의 강성과 동적인 응답을 본 논문에서 기술한 초음파 방법을 이용하여 측정하였다. 우선 본 논문에서 제시한 초음파 방법을 이용하여 서스펜션의 강성을 측정하기 위해 끝단에 정적인 미세한 하중을 점차적으로 가하면서 이때 발생하는 서스펜션 중앙부의 변위를 측정하였다. 정적인 하중은 한 개 당  $30 \text{ mg}$ 의 미세 질량을 로드 빔의 끝단에 부착시킴으로서 가하였으며 무게를  $600 \text{ mg}$ 까지 증가시키면서 각 단계에서의 변위를 초음파 센서로 측정하였으며 그 결과를 Fig.6에서 점(point)들로 나타내고 있다. 하중방향의 서스펜션 강성의 결정은 Fig.6의 데이터를 curve fitting하여 산출하였는데 그 결과도 Fig.6에서 실선으로 보여주고 있다. 상용 FEM코드인 NASTRAN을 이용하여 수행한 FEM해석으로부터의 수치적 결과를 비교를 통하여 본 실험에 의해서 측정된 강성 값과 좋은 일치가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

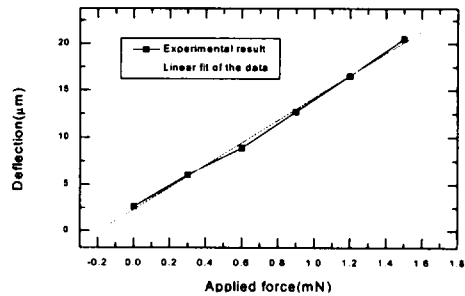


Fig.6 Stiffness measurement of the Hutchinson 850 suspension.

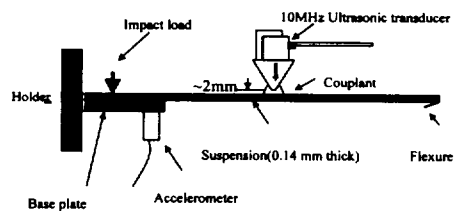


Fig.7 Experimental set-up for measurement of the stiffness of the suspension

다음으로 반사파  $g(t)$ 가 나타내는 변위와의 선형적인 특성을 기초로 하여 이 방법이 서스펜션의 진동의 측정에 이용될 수 있는지에 대한 가능성을 조사하기 위하여 서스펜션의 충격에 의해 발생된 응답(time response)을 측정하였다. Fig.7은 이러한 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 장치는 실험대상인 서스펜션과 초음파 측정장치로 이루어져 있는데 헤드, 서스펜션과 밀판이 일체로 고정되고 그 위에 측정 장치가 설치되어 있다. 초음파 측정장치는 초음파 데이터의 triggering과 서스펜션 로드빔의 진동을 모니터링하기 위하여 가속도계가 장착되어 있고 서스펜션의 동적 운동을 측정하기 위한 초음파 센서로 구성되어 있다. 서스펜션의 로드빔의 고정 단 측에 주의 깊게 매우 작은 스틸 망치로 충격을 가하여 이때 발생한 자유진동을 측정하였다. 실험에서 얻어진 서스펜션의 시간 응답이 Fig.8에 나타나 있는데 사용된 초음파 발생 및 수신장치(pulser/receiver)의 펄스 반복주파수가 10 kHz인 관계로 시간 축에서의 데이터 샘플링 주기도 이에 따라 0.1msec로 결정되었다.

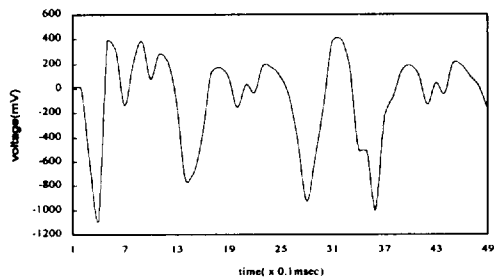


Fig. 8 Time response of the suspension due to the impact load

## 6. 결론

본 논문은 초음파를 이용한 하드디스크 드라이브 서스펜션의 새로운 진동측정 기술에 대해서 기술하였다. 이 방법에서는 초음파를 크기가 작은 서스펜션에 입사시키기 위해 cone모양의 웨지(wedge)를 특별히 설계/개발하였으며 이를 이용하여 정적하중에 의한 서스펜션의 변형을 측정하는 동시에 마이크로미터를 사용하여 측정한 변위와 비교함으로써 초음파 방법의 유용성을 입증하였다. 또한 강성계수를 실험적으로 측정하여 FEM에 의

한 수치결과와 비교하였으며 충격에 의해 생기는 서스펜션의 동적 응답을 초음파를 이용하여 측정하였다. 이론과 실험적 연구를 통하여 본 논문에서 제시한 초음파 기술이 적용하기 쉽고 비교적 빠른 진동의 실시간 측정이 가능하기 때문에 하드디스크 내에 있는 서스펜션과 같은 작은 구조물의 동적인 거동을 측정하는데 효과적임을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구(과제번호 1999-1-304-007-3)의 지원으로 이루어졌으며 재단의 지원에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

- (1) Jen, C.W., Ohwe, T, Gordon, A., *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No 5, 1997.
- (2) Jeans, A.H., *Journal of Vibration an Acoustics*, Vol. 114, 74-78, 1992.
- (3) Wilson, C.J., Bogy, D.B., *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 118, 1-9, 1996.
- (4) Wilson, C.J., Bogy, D.B., *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 116, 85-92, 1994.
- (5) Zeng, Q.H., Bogy, D.B., *ASME J. of Tribology*, Vol. 121, 102-107, 1999.
- (6) Kim, N., Kim, J., *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 17B, 1891-1898, 1997.
- (7) Aruga, K., Yoneoka, S., Ohwe, T., *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 30, No 6, 1994.
- (8) Wilson, C.J., Bogy, D.B., *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, 377-386, 1994.