

# HDD 용 압전형 마이크로엑츄에이터의 동특성 규명

°김철순\*, 김규용\*\*

## Dynamic Characterizations of a Piezoelectric Microactuator in Hard Disk Drive

Cheol-Soon Kim and Kyu-Yong Kim

### ABSTRACT

To provide model parameters for servo control system design, dynamic characteristics of a piezoelectric microactuator for hard disk drive(HDD) were investigated. At first frequency response characteristics was measured and a second order model was proposed. Here the amplitude dependent dynamic characteristics such as low frequency gain and damping ratio were studied. In addition, the load current and equivalent impedance of the piezoelectric actuator were measured by varying excitation voltage and frequency. At last, the super-harmonic resonance of the piezoelectric actuator was discussed.

### 1. 서론

1990년 이후 하드디스크드라이브(HDD)의 용량은 면 기록밀도(areal density)에 있어서 매년 60%의 신장률을 보이며 비약적인 발달을 거듭해오다가 1998년 이후에는 년 100%의 폭발적인 기록밀도 증가율을 보이고 있다[1]. 이러한 기록밀도 증가 추세는 데이터의 선밀도(bit density)의 증가와 아울러 트랙밀도(track density)의 증가가 중추적인 역할을 하고 있다. 현재 3.5"크기의 HDD의 경우 트랙밀도가 35,000 TPI(track per inch)를 넘어서고 있으며 2001년에는 50,000 TPI에 이를 것으로 업계에서는 전망하고 있다. 이 경우 트랙폭은 0.5 $\mu$ m가 되며 이에 따른 헤드의 위치제어 정밀도는 0.05 $\mu$ m까지 요구될 것으로 예측된다. 이에 따라 기존의 VCM(voice coil motor)을 이용한 HDD 메커니즘으로는 앞으로 요구되는 제어 정밀도의 달성에 어려움이 클 것으로 예측하고 디스크드라이브 업계에서는 압전형(piezoelectric) 엑츄에이터 또는 미소구조 엑츄에이터(microactuator)를 이용한 2단 엑츄에이터의 개발[2-4] 및 이를 제어하기 위한 제어알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[5-7].

2단 엑츄에이터의 사용은 기존의 VCM 구동기가 가지고 있는 제어 주파수 대역폭의 제한을

극복하기 위한 방법으로서 동작시 가동부의 관성을 줄임으로서 높은 제어 대역폭(bandwidth)을 구현하여 나노미터 수준의 제어 정밀도를 구현하는데 있다. 그림 1은 VCM 및 압전형 엑츄에이터로 구성된 2단 제어기를 가진 HDD의 개략적인 구조이다. 2단 엑츄에이터의 동작은 VCM이 비교적 저주파수 대역의 대변위(coarse position) 제어를 담당하고 압전형 엑츄에이터는 고주파대역의 정밀 위치제어(nano precision control)를 한다. 이러한 2단 제어기의 구조는 VCM 엑츄에이터를 사용하여서는 얻을 수 없는 높은 제어 정밀도 및 대역폭을 확보하기 위해 필수적인 요소로서 인식되고 있다.

$$\text{Dual Stage Servo System} = \text{Coarse Motion by VCM} + \text{Fine Motion by Microactuator}$$

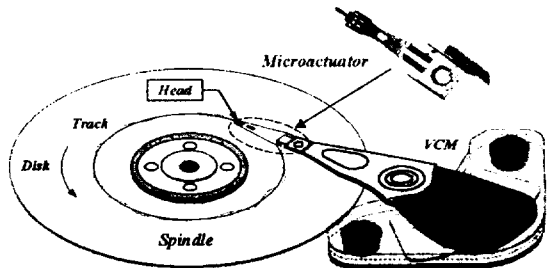


Fig.1 Schematics of a disk drive with dual stage servo

\* 정회원 삼성종합기술원 나노시스템랩

\*\* 삼성종합기술원 나노시스템랩

압전형 액추에이터에 대한 동특성 규명과 이를 이용한 제어 알고리즘의 개발에 관한 연구가 진행되고 있지만 주로 간단한 주파수특성의 측정이나 계단입력 응답을 측정하는 것에 그치고 있다[2-4]. 특히 압전형 액추에이터를 HDD에 적용하기 위한 체계적인 특성 규명 즉, 입력전압에 따른 주파수 특성, 비선형성, 그리고 부하용량 등은 제품에 적용하기 위해서 반드시 필요한 것임에도 불구하고 이들에 대한 연구는 아직 미비하다.

본 논문에서는 HDD용 2단 구동기로 개발된 압전형 액추에이터의 입력전압에 따른 주파수응답 특성을 측정, 분석하고 제어기 설계를 위한 동적 모델을 제안하고자 한다. 그리고 액추에이터의 구동 회로를 위한 부하(load) 특성을 고찰해보고 특정 주파수에서 발생하는 고조파 공진현상(superharmonic resonance)을 고찰하고자 한다. 먼저 압전형 액추에이터의 주파수 특성을 구하기 위해서 가진 입력신호의 크기를 바꿔가며 주파수 응답 함수(FRF)를 측정하였다. 그리고 이로부터 입력전압과 상관성을 갖는 압전형 액추에이터의 변위이득(gain)과 선회(sway) 모드의 감쇠(damping)의 변화를 분석하였다. 그리고 압전형 액추에이터-HGA(head gimbal assembly)의 수학적 모델을 구하기 위해 헤드가 트랙을 추종시 최대 변위에 상응하는 전압을 가진 입력으로 하여 FRF를 측정하고 이로부터 제어기 설계를 위한 2차 차수를 갖는 모델을 구하였다. 또한 압전 액추에이터의 전기적 부하용량을 구하기 위하여 사용 주파수 대역에서 가진 전압을 변화시키면서 압전형 구동기에 흐르는 전류를 측정하였다. 그리고 압전형 액추에이터가 장착된 드라이브를 대상으로 입력전압과 구동변위 사이의 궤적(orbit)을 측정함으로써 액추에이터의 히스테리시스(hysteresis)와 연동된 압전형 액추에이터-HGA의 고조파 공진현상을 분석하였다. 끝으로 압전형 액추에이터가 매우 낮은 감쇠계수를 가지므로 제어기 설계시 고유진동수 부근의 민감도를 낮추기 위한 필터가 필요함을 검토하였다.

## 2. 마이크로액추에이터의 동특성 규명

본 연구에 사용된 마이크로 액추에이터는 HTI사에서 개발한 Magnum5™[2]로서 2개의 압전체가 서스펜션(suspension)의 시작부에 부착된 그림 2와 같은 구조이다. 여기서 2개의 압전체는 서로 반대의 극성으로 대전되어(polarized) 있어 바이어스(bias) 전압을 인가하지 않고  $\pm 30V$  범위에서 양전원으로 구동하도록 되어있다. 그리고 동작은 한쪽



Fig. 2 Photography of a piezoelectric actuator

의 압전체가 이완하면 반대편은 수축하는 차동 모드(differential mode)로 HGA를 구동하도록 되어 있다. 또한 압전체의 변형이 30V 입력에 대해서 헤드의 제어에 필요한 만큼 크지 않으므로 두 압전체의 간격에 비해 압전체에서 헤드(head)까지의 거리가 멀리 떨어져 있도록 함으로써 기구적으로 변위를 크게 증폭하도록 되어있다. HTI에서 제공하는 압전형 구동기의 헤드에서의 변위 데이터는  $1.0\mu m@30V$ 으로 되어[2] 있으나 실제 측정결과 변위이득이 이보다 상당히 낮음을 알 수 있었다.

### 2.1 실험장치 구성

압전형 마이크로액추에이터의 특성 규명을 위한 실험장치의 구성은 그림 3과 같다. 그림 2의 압전형 액추에이터-서스펜션을 장착한 드라이브를 방진 테이블에 고정하고, 드라이브가 5400rpm으로 회전하는 상태에서 LDV(laser Doppler vibrometer, Polytec OFV3001)를 사용하여 슬라이더 끝의 헤드 위치에서 변위를 측정하였다. 실험중 사용한 LDV의 변위 출력은  $2\mu m/V$ 이며 압전 액추에이터의 구동을 위해서 증폭비가 20V/V인 전력증폭기[EPA-102, 80mA]를 이용하였다. 그리고 정현파(sine) 가진 신호 발생 및 측정 신호를 분석하기 위하여 신호 발생기(function generator, HP33120A)와 파형측정기(oscilloscope, LeCroy 9374AM) 그리고 동적신호분석기(dynamic signal analyzer, HP35670A)를 이용하였으며 주파수 응답함수와 스펙트럼을 관찰하였다.

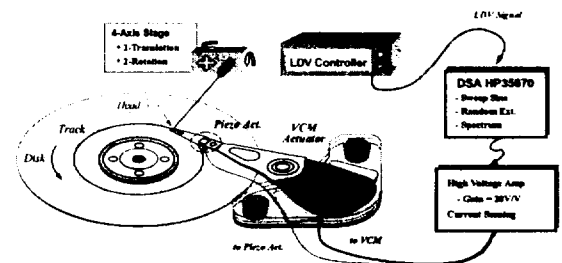


Fig. 3 Experimental setup for microactuator test

## 2.2 마이크로액츄에이터의 전달함수

압전형 마이크로액츄에이터를 장착한 HGA의 전달함수 측정은 주파수 스위핑(frequency sweeping) 기법과 랜덤(random)신호 가진법을 이용하여 측정하였다. 측정시 압전형 액츄에이터가 입력전압의 크기에 따라 출력변위가 달라지는 점을 고려하여 몇 가지 신호 크기(level)를 정하여 전달함수를 측정하였으며 측정된 FRF는 그림 4, 5와 같다. 가진 입력신호 크기의 선정은 실제 하드디스크드라이브에서 사용되는 전원[5V, 12V]과 HDD 전용 구동회로(drive chip)를 사용시 30V 까지 이용 가능함을 고려하여 그림 4에서와 같이 네 종류를 사용하였다. 여기서 측정된 주파수 응답함수 결과를 보면 입력신호의 크기를 증가시키면 변위 이득이 커지며 이와 함께 1차 모드의 감쇠도 증가함을 알 수 있다. 그림 4의 가진 전압에 따른 변위 이득과 개략적인 감쇠계수를 정리하면 Table 1과 같다. 한편 HTI에서 제시된 압전 구동기의 헤드에서의 변위 이득은  $\pm 1.0\mu\text{m}/\pm 30\text{V}$  또는  $35\text{nm}/\text{V}$  인 반면 본 연구에서 실제 측정된 이득은 최대  $30\text{nm}/\text{V}$ 로 명세보다 상당히 낮음을 알 수 있다. 실제 드라이브에서의 요구되는 제어정밀도를 보면, 마이크로액츄에이터가 담당하는 역할은 On-Track 동작 시 트랙을 추종하는 것이므로 트랙 폭의 10% 정도에 해당하는 범위에서 주로 동작된다[7]. 예를 들면 25kTPI 이상의 드라이브에서는 트랙 폭이  $1\mu\text{m}$  이므로 트랙 추종시 요구되는 마이크로액츄에이터의 구동범위는 대략  $\pm 0.1\mu\text{m}$ 이다. 이 경우 Table 1에서의 개략적인 이득  $25\text{nm}/\text{V}$ 를 고려할 때  $\pm 5\text{V}$  입력에 의한 측정결과가 액츄에이터의 사용조건에 부합한다. 따라서 이 액츄에이터의 모델은  $\pm 5\text{V}$ 로 가진하여 측정된 FRF가 유효한 것이며, 이를 기준으로 모델 변수(modal parameters)를 산정하였다. 그림 5는 10kHz 범위의 랜덤가진에 의한 주파수 응답함수를 측정된 결과와 이를 2차 진동계로 모형화하여 커브피팅(curve fitting)한 결과를 비교하였다.

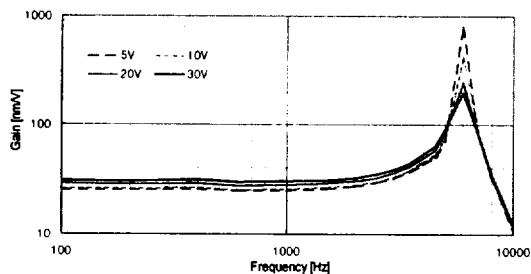


Fig. 4 FRF plot by frequency sweeping.

Table 1. Summary of gain and damping ratio.

Excitation voltage	5V	10V	20V	30V
Displ. gain [nm/V]	25.0	26.0	28.3	30.4
Approx. damping ratio	0.015	0.030	0.056	0.076

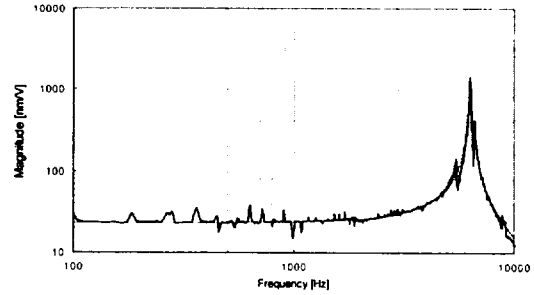


Fig. 5 FRF plot by random excitation.

그림 5에서 고유진동수 6.3kHz의 모드는 관심 영역인 헤드 위치제어 방향의 모드이고 5.56kHz와 6.64kHz는 압전 액츄에이터의 차동 구동에 의해 가진되는 비틀림(twisting) 모드로 위치제어에 영향을 미치지 않는 것이다. 측정된 FRF에서 부분적으로 작은 첨점(peak)이 발생하는 것은 디스크 회전에 의한 슬라이더의 진동에 의한 오차이다. 여기서 헤드 위치추종 방향의 모드만을 고려하면 압전형 구동기-HGA는 다음 (1)과 같이 2차 계로 단순화할 수 있고 그림 5에서 커브 피팅된 FRF는 측정된 것과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

$$\text{Transfer Function: } G(s) = \frac{A_0 \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

여기서, DC gain :  $A_0 = 25\text{nm}/\text{V}$ ,  
 Natural frequency:  $\omega_n = 6.3\text{kHz}$ ,  
 Damping ratio:  $\zeta = 0.009$ .

그림 5에서의 감쇠계수에 비해 그림 4에서 얻어진 감쇠계수가 매우 크게 되는 것은 그림 4에서 주파수를 증가시킬 때 6.3kHz에 근접하지 않아서이고 또한 공진 주파수에서 응답변위가 너무 커서 측정이 어렵기 때문이다.

## 2.3 전기적 부하특성 측정

작동 주파수대역에 따라 압전형 액츄에이터가 소모하는 전류를 측정된 결과를 그림 6에 나타내었다. 그리고 측정된 전류와 가진 전압 사이의 관계로부터 계산된 등가 임피던스를 그림 7에 나타내었다. 그림 6에서 입력신호가 30V, 7kHz인 조건

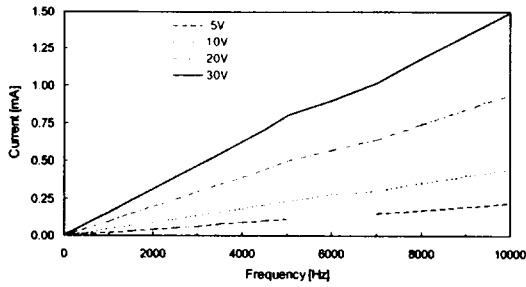


Fig. 6 Measured current depending on input voltage.

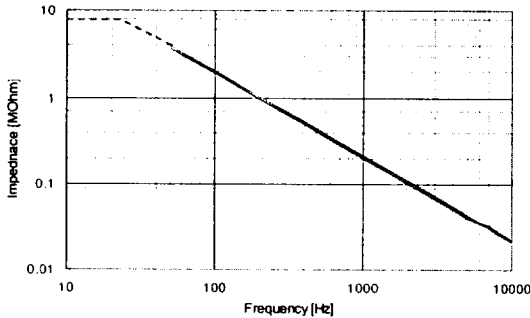


Fig. 7 Equivalent impedance of the piezo actuator.

에서도 압전형 액추에이터가 사용하는 전류는 최대 1.0mA로서 범용 디지털-아날로그 변환기(DAC)를 사용하여도 이와 같은 마이크로 액추에이터 4개를 동시에 구동할 수 있다. 이는 다수의 헤드를 장착한 드라이브에서도 압전형 마이크로액추에이터를 구동하기 위한 증폭기의 부하전류는 크게 문제되지 않음을 의미한다. 그림 7의 결과로부터 압전형 액추에이터를 전기적인 저항(resistance)과 축전기(capacitance)가 병렬 연결된 전기회로로 모델링하면 등가 임피던스는  $R_{eq} \approx 8M\Omega$ ,  $C_{eq} \approx 740pF$ 로 계산되었다. 그림 7에서 100Hz 미만의 점선 부분은 등가회로를 이용하여 추정된 값이다.

#### 2.4 입력전압-변위 궤적 측정

압전형 액추에이터에 20V의 정현파를 인가했을 때 가진 전압과 슬라이더 끝에서의 변위 사이의 궤적을 그림 8에 나타내었다. 이를 보면 입력신호를 크기 20V로 한 경우 1.0kHz 이하의 주파수 대역에서는 압전형 액추에이터가 선형적인 거동을 보이고 있다(그림 8(a), (b)). 그림 8(b)에서 응답 궤적이 10%정도 퍼지는 것은 1.0kHz에서 액추에이터의 미소한 위상지연(phase delay)에 의한 것이다. 반면 가진 주파수를 변화시켜 압전형 액추에이터를 장착한 시스템 즉 HGA의 1차 고유 진동수인

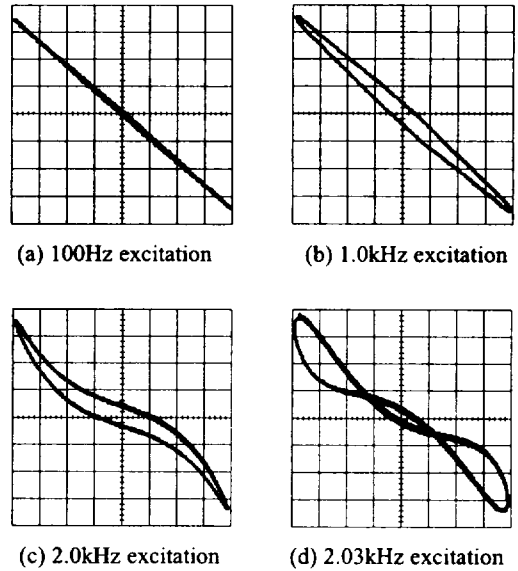


Fig. 8 Orbital responses of the piezoelectric microactuator with 20V sine wave excitation.

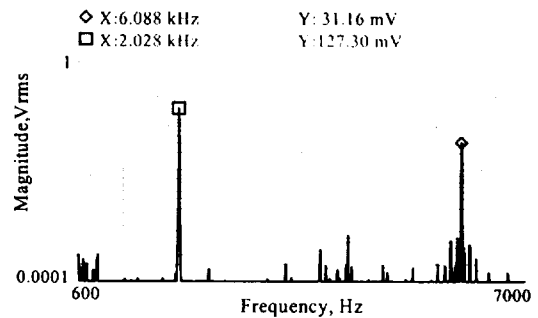


Fig. 9 Spectrum of the measured response at 2.03kHz.

6.3kHz의 서브 하모닉(sub-harmonic)이 되는 경우에는 압전형 액추에이터의 히스테리시스에 의한 비선형 응답이 서스펜션의 공진을 일으켜 응답변위가 비선형성을 보이고 있다(그림 8(c), (d)). 그림 8(d)에 나타낸 것과 같이 6.3kHz의 1/3 부근인 2.03kHz에서 현저한 비선형 응답 현상을 관찰할 수 있었다. 그림 8(4)의 응답을 주파수 변환하여 결과를 그림 9에 나타내었다. 이를 변위로 환산하면 2.03kHz와 이의 3고조파인 6.09kHz에서 각각 360nm, 88nm로 발생됨을 알 수 있으며 3고조파의 응답이 크지만 각각의 주파수에서 시스템의 이득 즉 26nm/V 및 390nm/V을 고려하면 압전 구동기가 3고조파에서 동기(synchronous) 성분에 비해 1.7%의 비선형 출력을 발생시킴을 알 수 있다. 이로부터 압전형 액추에이터의 비선형성이 매우 작다 하

더라도 시스템의 감쇠가 매우 적기 때문에 가진 주파수가 고유진동수와 연관되면 매우 큰 응답을 발생 시킴을 알 수 있다. 압전형 액츄에이터를 하드디스크 드라이브에 사용할 때 제어기의 대역폭이 2kHz 까지 예상되며 이 경우 6.3kHz의 고유진동수를 가진 할 가능성은 적지만 탐색(seek) 모드에서는 계단(step) 입력이 가해지므로 마이크로액츄에이터-HGA의 고유진동 모드를 가진하게 된다. 따라서 압전형 액츄에이터를 이용시 HGA에 감쇠가 큰 물질을 도입하거나 제어기에서 고유진동수 부근의 민감도를 낮추기 위한 적절한 필터를 사용해야 함을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 HDD용 2단 구동기로 개발된 압전형 액츄에이터의 입력전압에 따른 주파수 응답 특성을 측정, 분석하고 제어기 설계를 위한 2차 모델을 제안하였다. 측정된 주파수 응답함수에서 가진 입력신호의 증가에 따라 변위 이득 및 감쇠가 증가함을 관측할 수 있었으며 트랙 추종 제어기 설계에 요구되는 액츄에이터의 모델 규명시 적절한 가진 입력의 크기를 제시하였다. 그리고 액츄에이터의 구동회로를 위한 부하특성 및 등가 임피던스를 규명하였다. 이로부터 최대 구동 영역에서도 액츄에이터의 등가 임피던스가  $20k\Omega$  이상으로 드라이브회로 설계시 부하전류가 문제가 되지 않음을 알 수 있었다. 또한 압전형 구동기-스펜션의 고유진동수에서 감쇠가 매우 작아 압전체의 비선형 특성에 의해 고조파 공진을 유발시킬 수 있음을 발견하였다. 그리고 이에 대한 해결책으로 스펜션에 감쇠가 큰 물질을 도입하거나 제어기 출력단에 고유진동수 부근의 민감도를 낮추기 위한 필터를 설계해야 함을 제시하였다.

### 참고 문헌

- [1] T. Howell, R. Ehrlich "TPI growth is key to delaying superparamagnetism's arrival," Data Storage, Sept. 1999.
- [2] R.B. Evans, J.S. Griesbach, and W.C. Messner, "Piezoelectric microactuator for dual stage control," IEEE Trans. on Mag., Vol.35, No.2, Mar. 1999.
- [3] Y. Soeno, S. Ichikawa, T. Tsuna, Y. Sato, and I. Sato, "Piezoelectric piggy-back microactuator for hard disk drive," IEEE Trans. on Mag., Vol.35, No.2, 1999.
- [4] S. Koganezawa, Y. Uematsu, and T. Yamada, "Dual-Stage Actuator System for Magnetic Disk Drives

Using a Shear Mode Piezoelectric Microactuator," IEEE Trans. on Mag., Vol.35, No.2, 1999.

- [5] R.B. Evans and W.C. Messner, "Extending bandwidth with dual-stage suspensions," Data Storage, Sept. 1999.
- [6] T. Hirano, L.-S. Fan, W.Y. Lee, J. Hong, W. Imano, S. Pattanaik, S. Chan, P. Webb, R. Horowitz, S. Aggarwal, and D.A. Horsley, "High-bandwidth high-accuracy rotary microactuators for magnetic hard disk drive tracking servos," IEEE/ASME Trans. on Mecha., Vol.3, No.3, Sept. 1998.
- [7] S.H. Lee, Y.H. Kim, and S.E. Baek, "Design of a Dual-Stage Actuator Servo System for Hard Disk Drives," InterMAG 2000 CS06, May 2000.