

# 고밀도 HDD 용 MEMS 마이크로 액추에이터의 동적 해석

°김철순\*, 전종업\*\*, 정성환\*\*, 최재준\*\*, 민동기\*\*, 김영훈\*\*

## Dynamic Characterizations of a MEMS Microactuator for High Density Hard Disk Drive

Cheol-Soon Kim, Jong Up Jeon, Sunghwan Jung, Jae-Joon Choi, Dong-Ki Min, Young-Hoon Kim

### ABSTRACT

This paper presents the fabrication and testing results of a dual stage microactuator system for fine positioning of magnetic heads in hard disk drives. An electrostatic rotary microactuator was newly designed and fabricated. The microactuator was integrated into the head gimbal assembly of a disk drive system and its dynamic characteristics were investigated. Experimental results show that natural frequency and voltage gain of the microactuator are 4.3 kHz and 25 nm/V and the dual stage microactuator system achieves the tracking accuracy of 30 nm.

### 1. 서론

1998년 이후 하드디스크드라이브(hard disk drive, HDD)의 용량은 면 기록밀도(areal density)에 있어서 년 100%의 폭발적인 증가율을 보이고 있다. 이러한 기록밀도 증가 추세는 자기 헤드/매체의 발전에 따른 데이터의 선밀도(bit density)의 증가와 아울러 메커니즘의 발전으로 인한 트랙밀도(track density)의 증가가 중추적인 역할을 하고있다[1]. 현재 3.5"크기의 HDD의 경우 트랙밀도가 35,000 TPI(track per inch)를 넘어서고 있으며 최근 업계에서는 50,000 TPI 이상의 고밀도 HDD를 개발하고 있다. 이 경우 트랙 폭은 0.5 $\mu$ m 이하가 되며 이에 따른 헤드의 위치제어 정밀도는 0.05 $\mu$ m까지 요구될 것으로 예측된다. 이에 따라 현재 HDD에서 사용하고 있는 VCM(voice coil motor)을 이용한 서보 메커니즘으로는 앞으로 요구되는 제어 정밀도 달성에 있어 한계에 이를 것으로 예측하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 현재 학계 및 산업계에서는 이단 구동기(dual stage actuator) 및 제어시스템에 관한 연구가 활발히 진행중에 있다.

HDD용 이단 구동기 시스템 중 현재 가장 많이 연구되고 있는 압전(piezoelectric) 소자를 이용한 서스펜션(suspension) 구동방식은 허친슨[3], 후지쯔

[4], 히타치 등에서 연구가 진행중에 있으며 대부분 마이크로 액추에이터(microactuator)가 장착된 HGA(head gimbal assembly)를 HDD에 적용하여 제어 성능을 시험중이다. 서스펜션 구동방식의 경우 많은 업체에서 상용화 수준으로 개발하여 성능을 검증하였고, 제작이 용이하고 기존의 HGA를 그대로 사용할 수 있는 점에서 실용화에 유리하다. 그러나 이는 압전 구동기가 서스펜션을 통하여 헤드(head)/슬라이더(slides)를 구동하므로 서스펜션에 의하여 구동질량이 증가하며, 서스펜션에서 발생하는 공진을 제어할 수 없게 되어 제어시스템의 성능을 저하시킬 가능성이 존재한다. 마이크로 액추에이터가 헤드/슬라이더만을 구동하는 구동방식은 미국의 IBM[5]과 버클리대학[6]에서 MEMS 기술을 적용하여 연구중이며 TDK사[7]에서는 적층 압전소자를 이용한 연구를 진행하고 있다. MEMS 기술을 이용한 슬라이더 구동방식의 마이크로 액추에이터는 양산이 가능하며 구동질량이 슬라이더에 국한되므로 구동주파수를 높일 수 있는 장점이 있다. 또한 서스펜션에 발생하는 진동을 충분히 억제할 수 있으며 VCM과 마이크로 액추에이터의 동적 커플링이 거의 없어 제어가 용이한 장점이 있다. 반면에 기존 드라이브의 HGA와의 조립 호환성이 떨어지는 단점이 있다. 마이크로 액추에이터가 헤드만을

\* 정희원 삼성종합기술원 Microsystems Lab

\*\* 삼성종합기술원 Microsystems Lab

구동하는 헤드 구동방식은 동경대[8] 및 후지쯔[9] 등에서 연구하고 있다. 이 방식은 구동 주파수대역이 가장 높아 우수한 방식으로 여겨지나 액추에이터와 헤드를 동일한 공정상에서 제작하여야 하는 제작상의 난점을 갖고 있어 현재는 개념 정도만 제시된 상태에서 액추에이터 부분만 제작하고 있는 실정이다. 이상에서 볼 때 향후 HDD용 이단 구동기에는 서스펜션 구동형 압전 액추에이터가 먼저 채용될 것으로 예상되며, 다음에 슬라이더 구동형 마이크로 액추에이터, 최종적으로는 헤드 구동형이 사용될 것으로 예상된다.

Fig. 1은 본 논문에서 다루고자 하는 이단 구동 마이크로 액추에이터 시스템을 가진 HDD의 개략적인 구조이다. Fig. 1에서 마이크로 액추에이터는 슬라이더와 서스펜션 사이에 장착되어 슬라이더를 구동하고 VCM은 전체 액추에이터 암(arm)을 구동한다. 이단 액추에이터 시스템의 동작은 VCM이 비교적 저주파수 대역의 대변위(coarse position) 제어를 담당하고 마이크로 액추에이터는 고주파 대역의 정밀 위치제어를 담당하도록 연계 제어함으로써 헤드의 위치를 정밀하게 제어한다.

본 논문에서는 고 트랙밀도 HDD를 위한 이단 액추에이터 시스템을 구현하기 위하여 정전형(electrostatic) 마이크로 액추에이터의 설계 및 MEMS 기술을 이용한 제작과 디스크 드라이브에 실장 시험을 위해 마이크로 액추에이터를 채용한 m-HGA(microactuator-HGA)를 개발하였다. 그리고 m-HGA의 설계 검증 및 제어를 위하여 시스템의 동적 거동을 실험적으로 규명한다. 또한 제작된 이단 구동 마이크로 액추에이터에 제어 알고리즘을 적용하여 서보(servo) 성능실험을 수행함으로써 마이크로 액추에이터를 이용하여 HDD의 기록밀도를 현재보다 2.5배 이상 높일 수 있음을 보였다.

## 2. 마이크로 액추에이터의 설계

본 연구에서는 마이크로 액추에이터의 구동 성능을 극대화하기 위해서 기존의 빗살(comb) 형태의 전극을 갖는 액추에이터[5]에 비해 4배 이상의 구동력을 갖는 톱니(saw-tooth) 형상의 전극을 갖는 정전구동형 액추에이터[10]를 설계하였다. Fig. 2는 톱니형 전극을 가지는 정전구동형 액추에이터의 형상이고 Table 1은 액추에이터 설계 사양을 나타낸다. 마이크로 액추에이터는  $15V_{bias} \pm 15V$ 의 낮은 구동 전압에서도  $\pm 1\mu m$ 의 변위를 발생시키도록

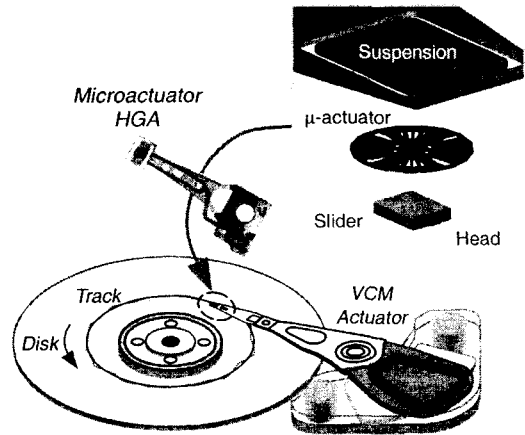


Fig. 1. HDD with dual stage microactuator system.

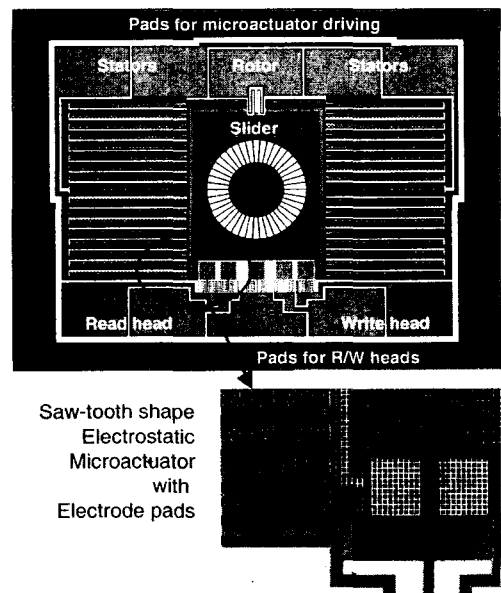


Fig. 2 Design of saw-tooth shape microactuator

설계되었다. 전극간 간격 및 액추에이터의 두께는 각각  $3\mu m$ 와  $45\mu m$ 로 구조물의 종횡비는 1:15이다. 액추에이터를 차동구동하기 위해 고정자 전극은 4개의 영역으로 분할 배치하여, Fig. 2에서 시계 방향 구동시에는 좌상면과 우하면에 위치한 고정자에 전압을 인가하고, 반시계 방향 구동시에는 우상면과 좌하면에 위치한 고정자에 전압을 인가한다. 그리고 Fig. 2에서 윗 부분에 배치된 5개의 패드(pad)는 구동용 고정자 및 회전자 전극 인출을 위한 패드이고 밑부분의 5개의 패드는 기록/재생 헤드 신호 전달 및 슬라이더 접지용 전극 패드이다.

### 3. 마이크로 액추에이터의 제작

마이크로 액추에이터의 구조는 높은 종횡비 (>1:15), 저가의 제작비용, 제작의 용이성 등을 고려하여 SoG(silicon on glass)를 사용한 제작방법을 이용하였다. 유리를 기판으로 사용함으로써 실리콘(Si)의 ICPRIE(inductively coupled plasma reactive ion etching)시 유리는 거의 식각(etching)이 되지 않으므로 구조물의 두께를 균일하게 유지할 수 있고, 유리의 식각시에는 유리 식각액이 실리콘과 반응하지 않으므로 실리콘이 식각될 염려가 없어 유리만을 원하는 깊이로 식각시킬 수 있다. 또한 실리콘 구조물과 유리 기판간의 기생용량이 없어 구동 및 정전용량 측정시 유리하다.

Fig. 3은 마이크로 액추에이터의 제작 공정도로 크게 유리 와 실리콘 기판의 접합 및 두께가공(Fig. 3(a)), 전극 패터닝(patterning) 및 감광재 패터닝(Fig. 3(b)), 실리콘 건식 식각(Fig. 3(c)), 유리기판의 습식 식각 및 건조(Fig. 3(d)) 등으로 이루어진다.

(a) 유리 와 실리콘 기판의 양극 접합 및 CMP: 파이렉스 유리(pyrex glass, #7740)와 (100) 결정방향의 p+형 실리콘 웨이퍼를 양극(anodic) 접합한 다음 CMP(chemical mechanical polishing) 공정을 이용하여 실리콘은 액추에이터 구조물의 두께인 45 $\mu$ m로, 유리 기판은 400 $\mu$ m로 가공한다.

(b) 전극용 금속 증착 및 패터닝: 접합된 실리콘 웨이퍼에 스퍼터링(sputtering) 장비를 사용하여 Cr/Au를 50/200nm의 두께로 증착한다. 그후 감광재 패터닝으로 마스크를 형성한 뒤 Cr/Au를 습식 식각하여 액추에이터의 구동과 헤드 신호 전달에 필요한 전극을 완성한다. 그리고 형성된 전극 위에 다시 감광재를 사용하여 마이크로 액추에이터 구조물의 마스크 패턴을 형성한다.

(c) 실리콘의 건식 식각(dry etching): 마스크 패턴의 형성후 ICPRIE를 이용하여 실리콘을 건식 식각한다. 이 공정 중 실리콘의 완전한 관통 식각을 위해 5% 정도 초과하여 식각한다.

(d) 유리기판의 습식 식각 및 건조: 플라즈마에 의해 경화된 감광재를 황산과 과산화수소수를 이용하여 제거한 다음 HF(hydrogen fluoride)를 이용한 유리의 등방성 습식 식각을 수행하여 액추에이터의 회전전극과 스프링 부분을 유리 기판으로부터 분리(release)시킨다. 이 공정동안 앵커(anchor)와 고정자 부분은 충분한 폭을 가지고 있어서 식각되지 않아 마이크로 액추에이터가 기판에 부착되어

Table 1. Specifications of a designed microactuator.

Item	Specification
Driving range	$\pm 1 \mu\text{m}@15\text{V} \pm 15\text{V}$
Natural frequency	5 kHz with slider
Actuator size	$3.1 \times 2.3 \times 0.045 \text{ [mm]}$
Total size	$3.9 \times 2.6 \times 0.445 \text{ [mm]}$
Act. gap/height	3 $\mu\text{m}$ / 45 $\mu\text{m}$
Vertical preload	2 gf

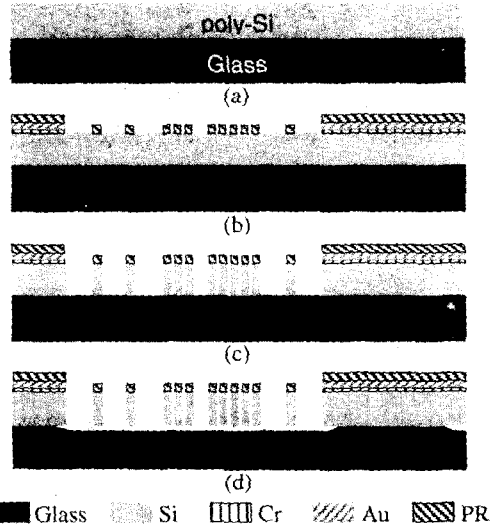


Fig. 3 Fabrication process of a microactuator.

(a) Anodic bonding and CMP, (b) Metal deposition and patterning, (c) Si deep dry etching, (d) Glass wet etching.

있게 된다. 식각후 회전자와 고정자의 고착(stiction)을 방지하기 위해 메탄을 치환 후 고온의 IPA(iso-propyl alcohol) 용액에서 가열한 후 건조시킨다.

Fig. 4는 제작된 마이크로 액추에이터의 SEM(scanning electron microscope) 사진으로 전체 형상 및 스프링 부위와 톱니형상의 전극을 각각 보여주고 있다. 마이크로 액추에이터는 실리콘의 건식 식각 공정의 오차에 의해서 전극 간격은 설계보다 15%정도 넓어졌으며 스프링의 폭은 같은 정도로 좁아졌다. 제작된 마이크로 액추에이터의 다이싱(dicing) 후 최종 크기는  $3.9 \times 2.6 \times 0.445 \text{ [mm]}$ 이다.

### 4. 마이크로 액추에이터 HDA의 조립

마이크로 액추에이터를 드라이브에 조립하여 실험하기 위해서 삼성전자(주)의 HDD 모델을 기본으로 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 마이크로 액추에

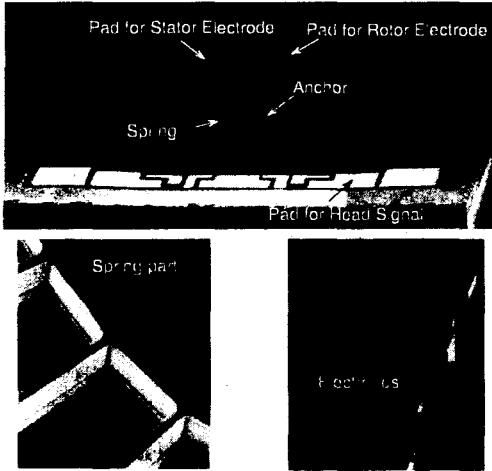


Fig. 4 SEM photograph of a fabricated microactuator

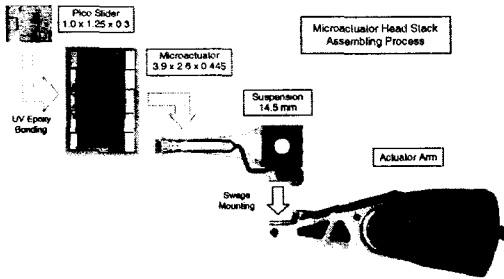


Fig. 5 Microactuator head stack assembly process

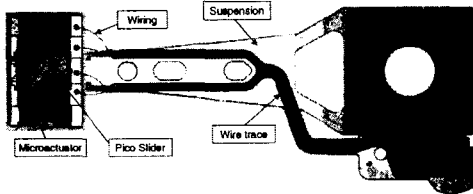


Fig. 6 Photograph of a assembled microactuator-HGA

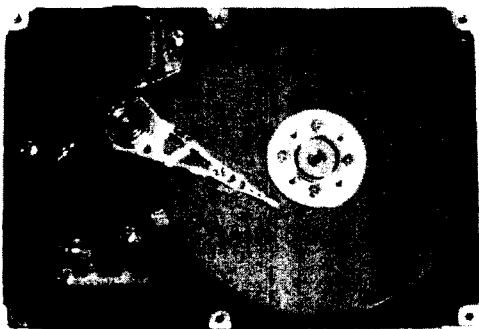


Fig. 7 Photograph of a assembled microactuator-HDA

이터를 채용한 m-HGA 및 HSA(head stack assembly), HDA(head disk assembly)의 조립작업을 수행하였다.

Fig. 5는 m-HSA의 조립 과정을 나타낸 것이다. 먼저 마이크로 액추에이터와 슬라이더(pico slider,  $1 \times 1.25 \times 0.3$  mm)를 정밀 이송 스테이지(stage) 및 현미경을 이용하여  $15\mu\text{m}$  이내의 오차로 정렬시킨 후 UV 에폭시(epoxy)를 이용하여 접착한다. 그리고 마이크로 액추에이터의 기관과 서스펜션(허친슨(사) T3430)을 UV 에폭시를 이용하여 접합하여 m-HGA를 얻는다. 마지막으로 m-HGA를 액추에이터 암의 끝에 조립하면 m-HSA를 완성한다.

마이크로 액추에이터의 성능 시험 및 제어를 위해서는 구동 전극에서 선을 외부로 인출하여 HGA와 전기적으로 연결해야 한다. 이 때 마이크로 액추에이터의 구동에는 Fig. 2에서와 같이 차동 구동을 위해 4분할된 고정자 전극용 4선과 회전자 전극용 1선 등 총 5선이 필요하다. 이 중 대항하고 있는 한쌍의 고정자 전극은 마이크로 액추에이터 내부에서 연결되어 있으므로 4선만을 외부로 연결하면 된다. 본 연구에서는 와이어 본딩 머신(wire bonding machine)을 이용하여 마이크로 액추에이터상의 전극용 패드와 기존 서스펜션 상에 형성되어 있는 헤드 신호용 와이어 트레이스(wire trace)간을 금선(Au wire)으로 결선하였다. Fig. 6은 전기적 결선을 가진 m-HGA이다.

조립된 m-HGA와 m-HSA에 전기적 결선을 하여 이를 디스크 드라이브에 조립하여 최종적으로 Fig. 7과 같이 마이크로 액추에이터 HDA를 완성하였다. 그리고 부상 실험을 통해 마이크로 액추에이터에 부착된 슬라이더는 조립된 드라이브 상태에서 안정된 부상상태를 유지함을 확인하였다.

## 5. 마이크로 액추에이터의 동특성 규명

### 5.1 실험장치 구성

마이크로 액추에이터의 특성 규명을 위한 실험장치의 구성은 Fig. 8과 같다. Fig. 7의 m-HDA를 방진테이블 위에 고정하고, 디스크가 3600rpm으로 회전하는 상태에서 LDV(Laser Doppler Vibrometer, OFV3001)를 사용하여 슬라이더 끝의 헤드위치에서 변위를 측정하였다. 실험중 사용한 LDV의 변위 출력은  $2\mu\text{m/V}$ 이며 액추에이터의 차동 구동을 위해서 차동구동 전력증폭기를 제작하였다. 그리고 가진 신호의 발생 및 측정 신호를 분석하기 위하

여 신호발생기(function generator, HP33120A)와 파형 측정기(oscilloscope, 9374AM) 그리고 동적신호분석기(dynamic signal analyzer, HP35670A)를 이용하였으며, 응답 신호 파형 및 주파수 특성을 관찰하였다.

### 5.2 마이크로 액추에이터의 전달함수

Fig. 9는 m-HGA를 20Hz~20kHz 범위에서 Swept Sine 방법으로 가진하고 슬라이더의 변위를 측정하여 얻은 주파수 응답함수(frequency response function, FRF)이다. 실험중 마이크로 액추에이터의 고정자 바이어스 전압(bias voltage)은 +12V 이고 가진 전압은 ±4V를 사용하였다. 제작된 마이크로 액추에이터가 정확한 회전 구동을 하는지 알아보기 위해 슬라이더의 헤드측과 선단(leading edge)의 변위를 측정하였다. Fig. 9의 슬라이더의 헤드측(H)과

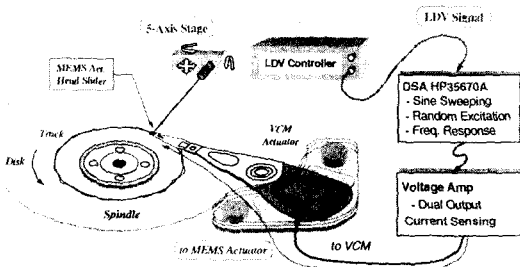
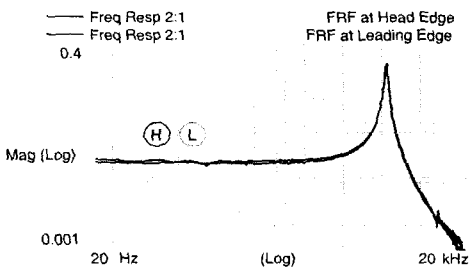
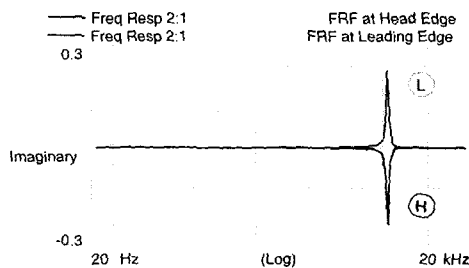


Fig. 8 Experimental setup for microactuator test



(a) Magnitude at head/leading edge



(b) Imaginary part at head/leading edge

Fig. 9 FRF of the m-HGA by swept sine method

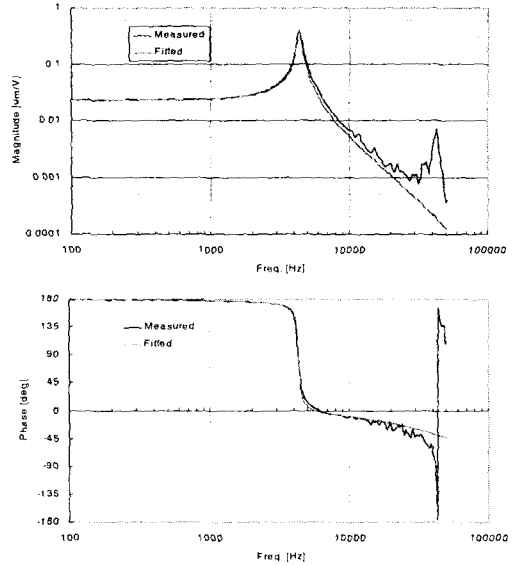


Fig. 10 Measured & fitted FRF of the microactuator

선단(L)에서 측정한 FRF를 비교해 보면 변위 이득 (gain)은 +24.1/25.1 [nm/V]로 크기는 거의 같고 부호가 서로 반대로 나타남을 알 수 있다. 즉 조립된 m-HGA에서 마이크로 액추에이터는 순수한 회전 운동을 발생시킴을 알 수 있다. 그리고 측정된 FRF로부터 슬라이더를 부착한 m-HGA의 고유진동수는 4.34 kHz임을 알 수 있다.

Fig. 10은 m-HGA를 100Hz~50kHz 범위에서 Swept Sine 방법으로 가진하고 변위를 측정하여 구한 FRF와 이를 식 (1)을 이용하여 커브 피팅(curve fitting)한 결과를 함께 나타낸 것이다. 커브 피팅한 FRF는 10kHz 이하의 관심 주파수 영역에서 측정된 FRF와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 10kHz 이상에서는 42kHz에서의 뒤틀림 모드를 고려하지 않아 약간의 차이가 발생하고 있다.

$$\frac{X}{V}(\omega) = \frac{A}{1 + 2j\xi\omega/\omega_n - (\omega/\omega_n)^2} \frac{1}{1 + j\omega/\omega_c} \quad (1)$$

여기서  $X$ ,  $V$ ,  $\omega$ 는 변위, 가진 전압 및 주파수,  $A$ ,  $\omega_n$ ,  $\xi$ 는 마이크로 액추에이터의 변위/전압 이득, 고유진동수, 감쇠계수, 그리고  $\omega_c$ 는 1차 계의 절점 주파수를 각각 나타낸다. 커브 피팅 결과 마이크로 액추에이터의 변위/전압 이득은 25.1 nm/V, 고유진동수는 4.34 kHz, 감쇠계수는 0.03, 그리고 1차 계의 절점 주파수는 42 kHz를 얻었다.

제작된 마이크로 액추에이터의 실험결과에서 고유진동수 및 감쇠계수는 Table 1의 설계 값보다 낮게 나타났는데 이는 실리콘의 식각 공정중 측면 침투로 스프링의 폭이 좁아지고 전극간의 간격이 넓어졌기 때문이다. 변위/전압 이득의 경우 평판형 정전구동기에서 기인하는 비선형성 때문에 실험 범위에서 25nm/V로 낮게 나타났지만,  $\pm 4V$ 의 구동 전압으로 HDD의 트랙 추종시 필요한 변위  $\pm 0.1\mu m$ 를 충분히 발생시킬 수 있음을 보여주고 있다. Fig. 10의 FRF로부터 제작된 m-HGA는 1.5kHz 범위까지 위상 지연이 없고 일정한 이득을 유지하므로 이단 구동기의 제어 대역폭을 1.5kHz 이상으로 높일 수 있음을 알 수 있으며 MEMS 구동기의 감쇠계수 0.03은 압전 구동기[3]의 감쇠계수 0.009보다 3배 이상 커서 동적으로 보다 안정된 이단 구동 시스템을 제공함을 알 수 있다.

### 5.3 입력전압-변위 궤적 측정

마이크로 액추에이터에  $12V_{bias} \pm 12V$ , 1.6kHz의 정현파를 인가했을 때 가진 전압과 슬라이더 끝단에서 측정된 변위를 Fig. 11에 나타내었으며 측정된 변위를 주파수 변환하여 Fig. 12에 나타내었다. 응답특성 실험에서는 3.4kHz의 고유진동수를 갖는 액추에이터를 사용하였다. Fig. 11, 12에서 마이크로 액추에이터가 고조파 진동을 발생시킴을 볼 수 있는데 이는 구동력이 인가전압/전극간격의 제곱에

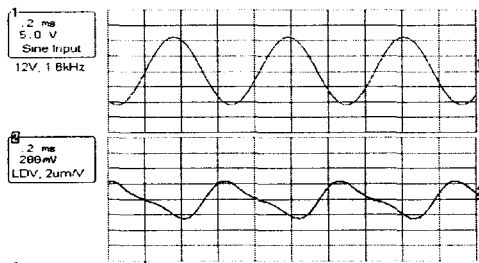


Fig. 11 Time responses of the microactuator with  $12VDC \pm 12V$  sine wave excitation at 1.6 kHz.

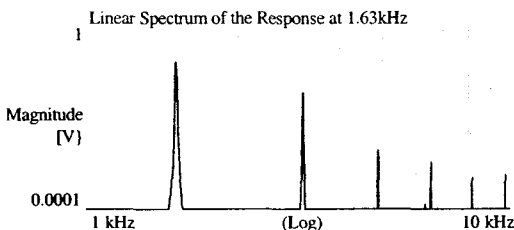


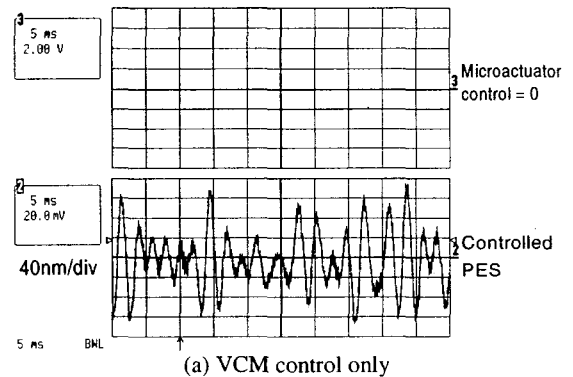
Fig. 12 Spectrum of the measured response of Fig. 11

비례하는 비선형 관계를 갖기 때문이다. 이를 분석하면 가진 주파수 및 이의 2-, 3-고조파에서의 응답은 각각 396, 83, 4.2 nm로 2-고조파 응답이 액추에이터의 공진 근처에 존재하여 크게 나타나고 있지만, 각 주파수에서의 변위/전압 이득 33, 500, 22 nm/V를 고려하면 마이크로 액추에이터의 2-, 3-고조파에서의 비선형 가진 성분은 0.16V, 0.19V로 12V 가진에 비해 매우 작은 1.4% 정도임을 알 수 있다.

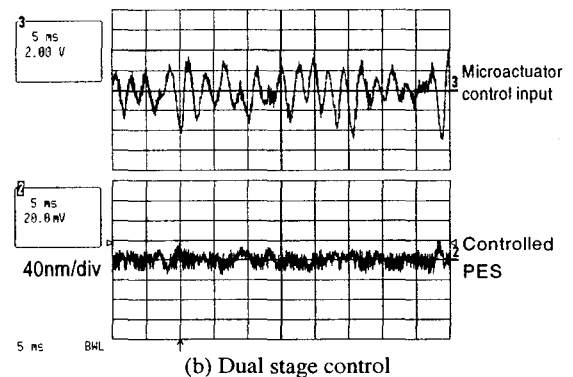
### 5.4 이단 구동 마이크로 액추에이터의 제어

조립된 m-HGA를 이용하여 이단 구동 제어 시스템의 서보 성능 실험을 수행하였다. 헤드/슬라이더의 위치는 Fig. 8에서와 같이 LDV를 이용하여 측정하였으며 제어기로는 dSPACE(사)의 50MHz DSP (digital signal processor) 및 16 bit ADC & DAC를 이용하였다. 실험시 스피들의 회전수는 3600rpm, 샘플링 주기는  $69.4 \mu s$  (14.4 kHz)이었다.

Fig. 13(a)와 (b)는 VCM만을 이용하여 제어했을 때와 VCM과 이단 구동 마이크로 액추에이터를 사용하여 제어하였을 때의 트랙추종시의 PES (position error signal)를 각각 보여 주고 있다.



(a) VCM control only



(b) Dual stage control

Fig. 13 Controlled PES of the microactuator-HGA

Fig. 13의 제어결과로부터 이단 마이크로 액추에이터 시스템을 HDD에 적용함으로써 트랙추종 정밀도 30nm를 구현하였으며, VCM만 사용한 경우에 비하여 제어 정밀도가 70% 이상 향상된 것을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 고 트랙밀도 HDD를 구현하기 위해 이단 구동 MEMS 마이크로 액추에이터 시스템을 개발하였다. 기존의 빗살 전극형 마이크로 액추에이터에 비해 4배 이상의 구동력을 발생시킬 수 있는 톱니 형태의 전극형상을 갖는 마이크로 액추에이터를 고안하였다. 마이크로 액추에이터의 고정자와 회전자 전극 간격은 3 $\mu$ m, 두께는 45 $\mu$ m, 구동범위는  $\pm 1\mu\text{m}@30\text{V}$ , 슬라이더 부착 상태에서 공진주파수는 5kHz로 설계하였다.

액추에이터의 제작에는 제작의 용이성 및 양산성 등을 고려하여 SoG(Silicon on Glass)를 이용한 간단한 MEMS 공정을 이용하였다. 디스크 드라이브에 실장 시험을 위해 자체 제작한 정밀 이송 지그를 이용하여 m-HGA(microactuator head gimbal assembly)를 개발하였으며 삼성전자(주)의 HDD 모델을 기본으로 마이크로 액추에이터를 채용한 디스크 드라이브를 조립 완성하였다.

마이크로 액추에이터의 동 특성을 측정한 결과 변위 이득은 25nm/V, 고유 진동수는 4.3kHz, 감쇠계수는 0.03로 나타나 이단 구동 시스템의 제어 대역폭을 1.5kHz 이상 높일 수 있었다. 그리고 응답 특성에서 2-고조파 비선형 특징을 보였으나 트랙추종에 필요한 변위 내에서는 무시할 수 있을 정도였다.

제작된 이단 구동 m-HGA에 마이크로 액추에이터와 VCM을 연계 제어하는 알고리즘을 적용하여 트랙 추종 실험을 수행한 결과 헤드의 트랙추종 정밀도 30nm를 구현하였다. 이는 85,000TPI에 해당하는 것으로 HDD에 이단 구동 시스템을 적용함으로써 현재보다 트랙밀도를 2.5배 이상 높일 수 있음을 보여주고 있어, 향후 고밀도 HDD를 구현하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 후기

본 연구는 산업자원부와 과학기술부에서 시행한 선도기술개발사업(초소형 정밀기계 기술개발 사

업, 과제명: "고집적 HDD Head 개발")의 연구비 지원하에 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] T. Howell, R. Ehrlich "TPI growth is key to delaying superparamagnetism's arrival," *Data Storage*, Sept. 1999.
- [2] R.B. Evans and W.C. Messner, "Extending bandwidth with dual-stage suspensions," *Data Storage*, Sept. 1999.
- [3] R.B. Evans, J.S. Griesbach, and W.C. Messner, "Piezoelectric microactuator for dual stage control," *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] 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 Mechatronics*, Vol.3, No.3, 1998.
- [6] D. A. Horsley, M. B. Cohn, A. Singh, R. Horowitz and A. P. Pisano, "Design and Fabrication of an Angular Microactuator for Magnetic Disk Drives," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.7, No.2, pp. 141-148, 1998.
- [7] 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.
- [8] H. Fujita, K. Suzuki, M. Ataka and S. Nakamura, "A Microactuator for Head Positioning System of Hard Disk Drives," *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 35, No. 2, pp. 1006-1010, 1999.
- [9] T. Imamura, M. Katayama, Y. Ikegawa, T. Ohwe, R. Koishi and T. Koshikawa, "MEMS-Based Integrated Head/Actuator/ Slider for Hard Disk Drives," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 3, No. 3, pp. 166-174, 1998.
- [10] S. Jung, J. Jeon, Y. E. Pak and S. Lee, "Optimal Shape Design of Curved Electrodes for a Rotary Microactuator," *Proc. Actuator 2000*, Bremen, Germany, pp. 498-501, June, 2000.
- [11] S.-H. Lee, Y.-H. Kim and S.-E. Baek, "Modeling and Control of a Dual-Stage Actuator for Hard Disk Drive Servo Systems," *Proc. of American Control Conference*, pp. 4254-4258, June, 2000.