

표 1 고밀도 정보저장기기의 bit 크기

종류 (출현예상)	Adv. HDD (~2003년)	HD-DVD (~2003년)	PDS (2005년~)
기록 방식	Magnetic	Optical	Nano probe
기록 용량 /기록 밀도	>300 GB 100 Gb/in <sup>2</sup>	~25 GB 16 Gb/in <sup>2</sup>	~2 GB 250 Gb/in <sup>2</sup>
Track Pitch /Bit length	170 nm 38 nm	300 nm 130 nm	64 nm 40 nm
제어정밀도	20 nm	24 nm	10 nm
Coarse/Fine Actuator	VCM/ MEMS	VCM ?/ Micro VCM	MEMS/ Probe

## 1. 머리말

정보저장기기의 기록밀도가 높아짐에 따라 데이터를 기록하고 읽기 위해서는 수십 나노미터 수준의 정밀한 위치제어 정밀도가 요구되고 있다. 표 1은 대표적인 정보저장기기인 HDD(hard disk drive)와 향후 개발될 HD-DVD(high density DVD) 및 PDS (probe-based data storage)의 저장용량 및 기록밀도에 대한 전망이다. 정보저장기기의 기록밀도 증가에 따라 데이터의 bit 크기의 감소와 함께 트랙 폭(track pitch)이 급격하게 좁아지고 있으며,<sup>(1)</sup> 기존의 액추에이터로는 향후 요구되는 10~20 nm수준의 트랙 추종 정밀도를 달성하기 어려운 상황을 맞이할 것이다. MEMS기술을 이용한 마이크로 액추에이터(microactuator)는 이러한 제어 정밀도 요구를 충족시킬 수 있는 방법으로 여러 곳에서 연구, 개발되어 저장기기에 적용을 시도하고 있는 단계에 있다.

이 글은 필자가 참여하였던 두 종류의 마이크로 액추에이터에 대한 연구 경험을 토대로 마이크로 액추에이터를 정보저장기기

\* E-mail: cs\_kim@sait.samsung.co.kr

의 미세 구동기로 적용하기 위한 과정에 대해서 기술하고자 한다.

지금까지 개발된 마이크로 액추에이터는 초정밀 구동 및 높은 구동 대역폭이 장점으로 부각되고 있다. 그러나 MEMS 센서와는 달리 밀리미터 크기의 슬라이더나 미디어를 고속으로 구동해야 하는 정보저장기기용 마이크로 액추에이터는 설계, 제작 및 조립에 이르기까지 높은 수준의 기계적 성능(정밀 구동, 구동주파수대역, 정적/동적 하중)을 요구한다. 또한 마이크로 액추에이터가 실용화에 접근함에 따라 신뢰성(내충격, 온도특성)이 문제로 떠오르고 있으며 기존의 시스템과 호환성 및 저가격화에 대한 강한 요구도

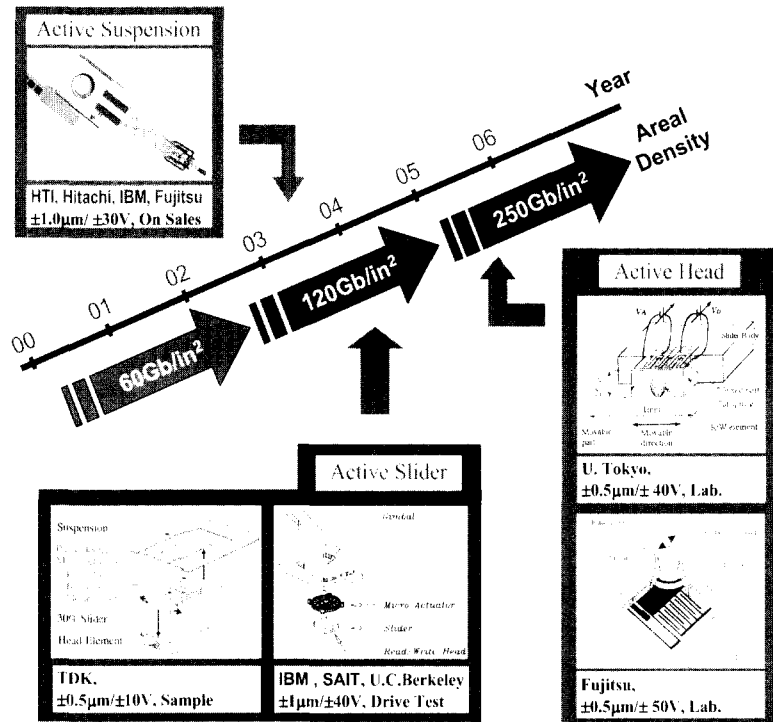


그림 1 HDD용 2단 구동기의 Roadmap

있다.

HDD용 이단 마이크로 액추에이터의 연구동향은 그림 1과 같다. 허친슨,<sup>(2)</sup> 후지쯔, 히타치 등에서 연구가 진행중인 압전 소자를 이용한 서스펜션(suspension) 구동방식은 HDD에 적용하여 제어 성능과 신뢰성을 시험중이다. 이 방법은 실용화에 가장 접근하였지만 드라이브에 장착시 온도특성, 내충격성 및 outgasing 등의 신뢰성을 개선하기 위해 보완 연구가 진행중이다. 다음으로 마이크로 액추에이터가 슬라이더(slidebar)를 구동하는 방식은 미국의 IBM, 버클리대학<sup>(3)</sup> 그리고 삼성종합기술원<sup>(4)</sup> 등에서 MEMS 기술을 적용하여 연구중이다. 슬라이더 구동방식의 마이크로 액추에이터는 구동질량이 슬

라이더에 국한되므로 구동주파수를 높일 수 있는 장점이 있다. 끝으로 마이크로 액추에이터가 헤드(head)를 구동하는 방식은 동경대<sup>(5)</sup> 및 후지쯔 등에서 연구하고 있다. 이 방식은 구동 주파수대역이 가장 높아 우수한 방식으로 여겨지나 액추에이터와 헤드를 동일한 공정상에서 제작하여야 하는 제작상의 난점을 갖고 있어 현재는 액추에이터 부분만을 연구하고 있다. 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.

그림 2는 이단 구동 마이크로 액추에이터

시스템을 가진 HDD의 개략적인 구조이다. 여기서 마이크로 액추에이터는 슬라이더와 서스펜션 사이에 장착되어 슬라이더를 구동하고 VCM은 전체 액추에이터 암(arm)을 구동한다. 이단 액추에이터 시스템에서는 VCM이 비교적 저주파수 대역의 대변위 제어를 담당하고 마이크로 액추에이터는 고주파 대역의 정밀 위치제어를 담당하여, 헤드가 데이터 트랙을 정밀하게 추종하도록 한다.

다음으로 향후 5년 이내에 제품화를 목표로 개발중인 초소형 대용량 정보저장기인 PDS에 대해 살펴본다. 그림 3의 개념도와 같이 PDS는 나노미터 크기의 곡률 반경을 갖는 다수의 탐침(multi-probe)이 기록매체 표면에 근접하여 정보를 기록/재생하는 것으로 표면의 요철(topology)이나 불리량을 원자나 분자단위로 모니터링할 수 있는 SPM(scanning probe microscope) 기술을 기본 원리로 하고 있다. 이러한 MEMS를 기반으로 한 초소형 대용량 저장기기를 구현하기 위한 연구가 해외 및 국내에서 활발히 진행 중에 있다. PDS의 핵심 요소기술은 SPM 기술을 이용한 나노미터 크기의 정보 기록/재

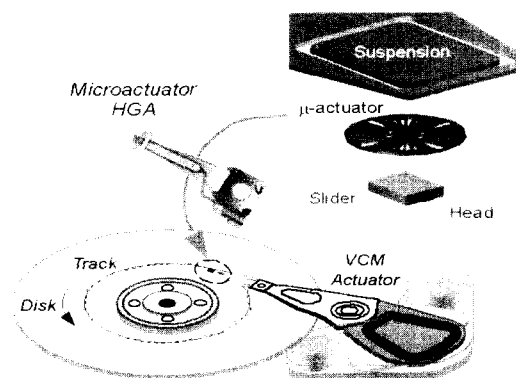


그림 2 Microactuator를 부착한 HDD

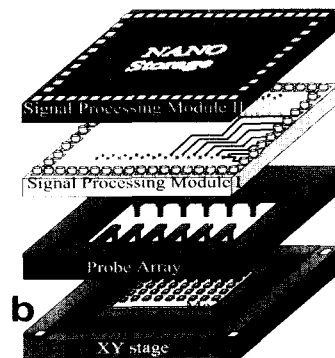
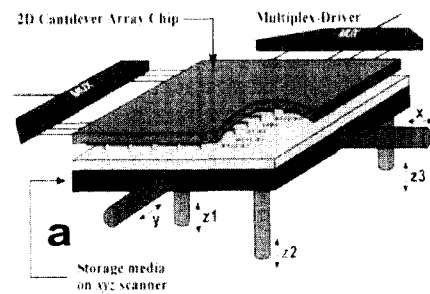


그림 3 (a) IBM "millipede" PDS의 개념도, (b) 탐침 모듈 위에 집적화된 신호처리 모듈을 갖는 PDS 개념도(삼성종합기술원)

생 기술 및 기록매체 제조 기술과 MEMS 기술을 이용한 대변위, 초정밀 2차원 구동기의 제작 및 다중 탐침 제작 기술 등이 있다. PDS에서 기록매체는  $100 \mu\text{m}$  정도의 구동 범위와  $10 \text{ nm}$ 의 분해능을 갖는 마이크로 액추에이터에 의해 구동되며, 주사 탐침 배열(probe array)에 대하여 평면상 상대운동을 하게 된다.

이 글은 MEMS 기술을 이용한 HDD의 슬라이더 구동형 마이크로 액추에이터와 PDS의 매체를 구동하는 대변위, 초정밀 2차원 구동기(XY-stage)의 설계 및 제작에 대해 알아보기로 한다.

2. 마이크로 액추에이터의 설계

정보저장기기용 MEMS 마이크로 액추에이터에서 가장 중요한 성능은 단위 면적 대비 구동력이다. MEMS 액추에이터의 구동 방식은 정전력(electrostatic force)이나 전자기력(lorentz force)을 이용하는데 수 밀리미터 크기의 마이크로 구동기에서 발생시킬 수 있는 힘은 매우 제한적이다. 정전력은 식 (1)과 같이 전극 면적(A)과 인가전압(V) 및 전극간의 간극(g)으로부터 결정되고, 전자기력은 식 (2)와 같이 코일의 길이(l)와 인가 전류(i) 그리고 코일에서의 자기장의 세기(B)의 곱에 비례한다. 정전력을 이용하는 경우는 액추에이터를 위한 공간이 제한된 상태에서 전극간의 간극이 중요한 공정 설계 변수가 된다.

- 평판 전극에서의 정전력:

$$F = \frac{\epsilon AV^2}{g^2} \tag{1}$$

- 마이크로 코일에서의 전자기력:

$$F = Bil \tag{2}$$

여기서  $\epsilon(=8.85410^{-12} \text{ F/m})$ 은 유전상수이다.

그림 4는 초고밀도 HDD를 위한 정전 구동형 마이크로 액추에이터의 마스크 패턴이며 전극의 간극을 일정하게 유지하게 위해서 톱니형 구조를 적용하였다.<sup>(6)</sup> 표 2는 그림 4의 HDD용 마이크로 액추에이터 설계 사양을 나타낸 것으로  $15V_{\text{bias}} \pm 15 \text{ V}$ 의 구동 전압에서  $\pm 1 \mu\text{m}$ 의 변위를 발생시키며, 슬라이더 부착시 고유진동수가 5 kHz 이상으로 되도록 설계하였다. 마이크로 액추에이터의 전극간 간격 및 액추에이터의 높이는

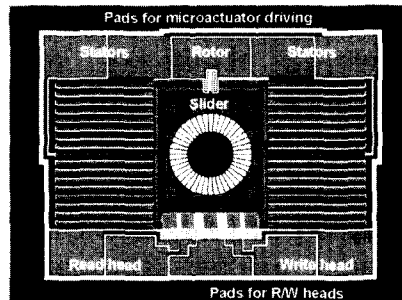


그림 4 HDD용 정전 구동형 microactuator

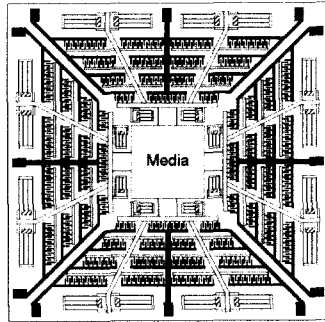
표 2 HDD용 microactuator의 설계사양

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

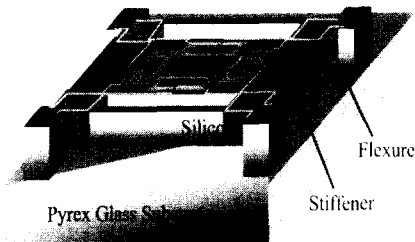
실리콘의 공정조건의 최대치에 가까운 3  $\mu\text{m}$ 과 45  $\mu\text{m}$ 로 각각 설계하였다.<sup>(6)</sup> 마이크로 액추에이터를 구동하기 위하여 외곽에 고정자 전극을 4개의 영역으로 분할 배치하였다. 그림 4에서 액추에이터를 시계 방향으로 구동시에는 좌상면과 우하면에 위치한 고정자에 전압을 인가하고, 반시계 방향으로 구동시에는 우상면과 좌하면에 위치한 고정자에 전압을 인가한다.

다음으로 그림 5에 나타낸 PDS의 매체(media)를 구동하기 위한 정전력(a) 및 전자기력(b)을 이용한 XY-stage를 살펴본다.

표 3은 두 종류의 MEMS 액추에이터에 대한 설계사양이다. 정전력 액추에이터는 장치의 두께를 메모리 정도로 얇게 할 수 있고 전체 시스템을 단일 공정으로 제작할 수 있는 장점이 있다. 전자기력 액추에이터의



(a) Electrostatic



(b) Electromagnetic

그림 5 PDS의 미디어를 구동하기 위한 정전력 (a) 및 전자기력(b)으로 구동하는 2축 microactuator 개략도

표 3 XY-stage용 microactuator 설계사양

Item	Specification
<b>Electrostatic actuator</b>	
Driving range	50 $\mu\text{m}$ @ 30V-30V
Natural freq.	0.35 kHz
Actuator size	22 22 0.350 [mm]
Media size	5 5 [mm]
Act. gap/height	3 $\mu\text{m}$ / 45 $\mu\text{m}$
Spring constant	28 N/m
<b>Electromagnetic actuator</b>	
Driving range	50 $\mu\text{m}$ / 200mA
Natural freq.	0.34 kHz
Actuator size	13 13 0.250 [mm]
Media size	5 5 [mm]
Coil size	5 30 m, 100 turns

경우는 구동력을 크게 할 수 있어 시스템의 고유진동수를 상대적으로 크게 할 수 있는

장점이 있다.<sup>(7)</sup> 반면 자기장을 발생시키기 위한 소형 전자석 및 요크(yoke)가 필요하여 두께가 5 mm 정도로 높아지고 구동전류가 높아 전력소모 및 발열이 많은 단점이 있다. 어느 경우나 면적이용률(매체면적/전체면적)이 10 % 미만이다. 이는 구동력을 크게 하기 위해서 액추에이터의 면적을 넓게 설계했기 때문이다.

### 3. 마이크로 액추에이터의 제작

본 연구에서 사용된 마이크로 액추에이터의 구조는 높은 종횡비(1:15), 저가의 제작 비용, 제작의 용이성 등을 고려하여 SoG (silicon on glass)를 사용한 제작방법을 이용하였다. 그림 6은 정전 구동형 마이크로 액추에이터의 일반적인 제작 공정으로 크게 유리와 실리콘 기판의 접합 및 CMP



(a) Anodic bonding and CMP



(b) Metal deposition and patterning



(c) Si deep dry etching



(d) Glass wet etching

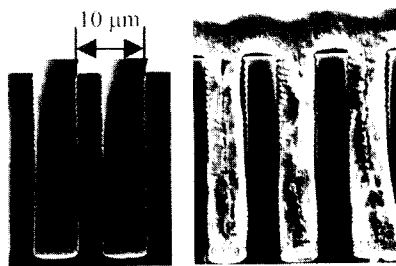
Legend: Glass (white), Si (hatched), Cr (black), Au (grey), PR (dark grey)

그림 6 HDD용 Microactuator의 제작공정

(chemical mechanical polishing)를 이용한 두께가공(a) ; 전극 패터닝(patterning) 및 감광제 패터닝(b) ; ICP-RIE (inductively coupled plasma reactive ion etching)를 이용한 실리콘 건식 식각(c) ; 유리기판의 습식 식각 및 건조(d) 등으로 이루어진다. 유리의 습식 식각 공정에서 식각 액이 실리콘과 반응하지 않으므로 유리만을 원하는 깊이로 식각시킬 수 있다. 구조물이 높은 종횡비를 갖는 경우 그림 6(c)의 건식 식각 공정에서 전극이 원하는 폭으로 정확히 가공되지 않고 과다 식각되는 경향이 있으므로 정전구동형 액추에이터의 설계시 이를 고려해야 한다.

그림 7은 PDS용 전자기력을 이용한 XY-stage의 공정 일부를 SEM으로 촬영한 것이다. 먼저 두께 250 m의 실리콘에 폭 5 m, 깊이 30 m의 도랑(trench)을 ICP-RIE를 이용하여 가공하고 여기에 Au/Cr seed layer를 증착한 후 그 위에 구리를 도금하였다. 최종적으로 CMP 공정으로 돌출된 구리를 제거하여 마이크로 코일을 완성한다.

마이크로 액추에이터가 시스템에서 성능을 발휘하기 위해서는 기계적 조립과 구동 및 데이터를 읽고, 쓰기 위한 전기적 결선



(a) Si trench (b) Cu filled trench

그림 7 SEM photos of silicon trench(a) and copper filling results(b)

(wiring)이 필요하며 이는 마이크로 액추에이터의 설계, 제작에 못지 않게 중요한 과정이다. 따라서 정보저장기용 액추에이터를 개발하기 위해서는 전체적인 조립 및 성능 시험을 고려한 설계가 되어야 한다.

그림 8은 HDD용 마이크로 액추에이터가 HGA에 조립된 상태를 나타낸 것이다. 마이크로 액추에이터는 먼저 1×1.25×0.3 mm 크기의 슬라이더에 자외선 경화 에폭시(epoxy)를 이용하여 접착하고 다시 마이크로 액추에이터의 유리기판과 서스펜션을 에폭시를 이용하여 접합하며 구동을 위한 전기적 결선을 한다.

그림 9는 PDS용 정전력(a) 및 전자기력(b) 구동방식의 XY-stage가 시험을 위한 PCB위에 조립된 상태를 나타낸다.

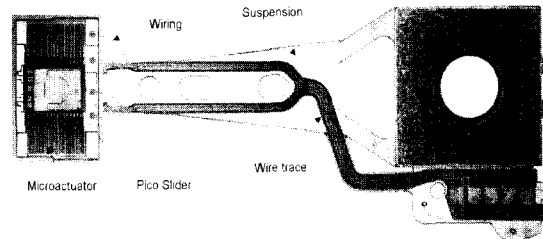
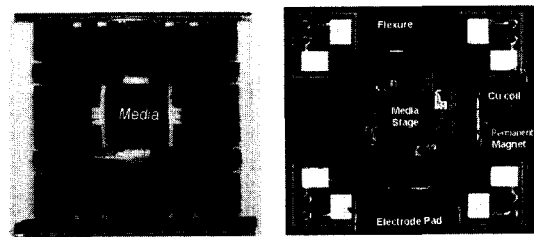


그림 8 Microactuator head stack assembly for HDD



(a) Electrostatic (b) Electromagnetic

그림 9 PDS용 2축 마이크로 액추에이터 조립도: (a)정전력, (b) 전자기력 구동방식

#### 4. 마이크로 액추에이터의 특성 규명

일반 구조물과는 달리 마이크로 액추에이터는 정지 구조물로 가려져 있어 별도의 돌출부가 없는 경우 구동 변위를 정확히 측정하기 어렵다. HDD용 마이크로 액추에이터는 원래 부착된 슬라이더의 끝에서의 변위를 LDV(laser doppler vibrometer)를 이용하여 측정하였으며 PDS용 XY-stage에서는 매체 위에 측정을 위한 미소 표적을 부착하여 변위를 측정하였다. 마이크로 액추에이터의 동특성 측정을 위해 그림 10과 같은 실험장치를 구성하였으며 주파수 특성을 분석하기 위하여 동적신호분석기(dynamic signal analyzer)를 이용하였다.

그림 11(a), (b)는 각각 그림 8의 HGA와 그림 9(b)의 XY-Stage를 swept sine방법으로 가진하고 구동 변위를 측정하여 구한 FRF(frequency response function)이다. 그림 11(a)를 2차 시스템으로 모형화 하면 식 (2)와 같다. 마찬가지로 그림 11(b)도 식 (2)로 근사화 할 수 있으며 이 모형은 제어기 설계에 이용된다.

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

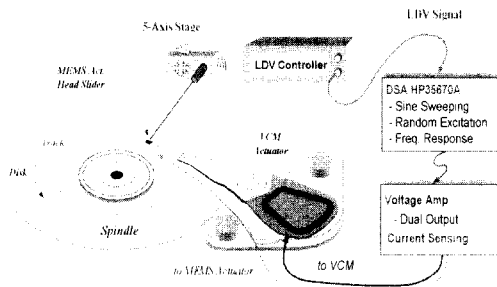
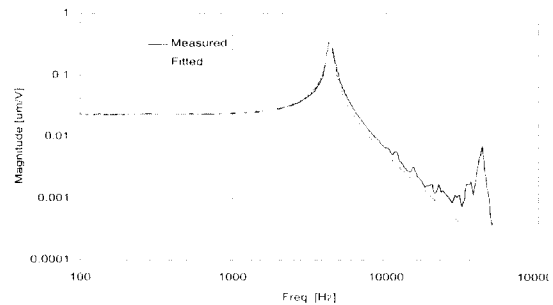


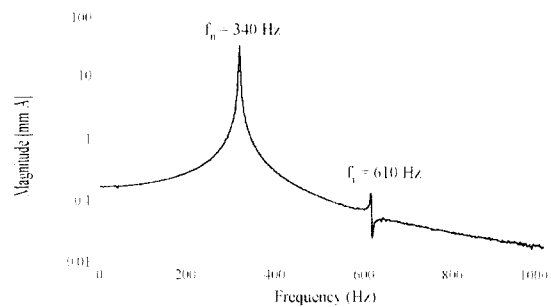
그림 10 Microactuator의 구동성능 시험을 위한 실험장치 개략도

여기서  $X$ ,  $V$ ,  $\omega$ 는 변위, 가진 전압 및 주파수,  $A$ ,  $\omega_n$ ,  $\xi$ 는 액추에이터의 변위/전압 이득, 고유진동수, 감쇠계수를 각각 나타낸다. 커브 피팅 결과 HDD용 마이크로 액추에이터의 변위/전압 이득은 25.1 nm/V, 고유진동수는 4.34 kHz, 감쇠계수는 0.03이다. 제작된 마이크로 액추에이터의 실험결과에서 얻어진 고유진동수 및 감쇠계수는 설계값보다 낮게 나타났는데 이는 실리콘의 식각 공정중 측면 침투로 스프링의 폭이 설계값보다 좁아져 강성이 낮아졌고 전극간의 간격이 넓어졌기 때문이다.

마이크로 액추에이터는 감쇠가 매우 적고 미세 구동범위 내에서도 가진 전압, 전류에 따라 특성이 변하는 비선형성을 나타내므로



(a) FRF of the microactuator for HDD



(b) FRF of the electromagnetic XY-stage

그림 11 제작된 microactuator의 주파수 응답함수 측정 결과

동특성 측정시 이를 고려하여 적절한 가진 입력을 설정하여야 한다.

그림 11의 FRF로부터 제작된 마이크로 액추에이터 HGA와 XY-stage는 각각 1.5 kHz, 150 Hz 범위까지 일정한 이득을 유지하므로 구동기의 제어 대역폭을 1.5 kHz 및 150 Hz 이상으로 높일 수 있다. 여기서 XY-stage용 액추에이터가 HDD용에 비해서 1/10의 매우 낮은 대역폭을 갖는 것은 XY-stage용 액추에이터가 HDD용에 비해 50배 이상의 넓은 구동범위( $\pm 50 \mu\text{m}$ )를 갖도록 유연하게 설계하였기 때문이다.

### 5. 맺음말

이 글에서는 차세대 정보저장기기에서 고 트랙밀도를 구현하기 위해 이단 구동 MEMS 마이크로 액추에이터 시스템의 설계, 제작 및 특성 측정에 대해 개략적으로 기술하였다. 아직 개발 단계이지만 마이크로 액추에이터는 공정 지식만으로 개발될 수 있는 것이 아니며 전체 시스템의 성능, 동특성 및 배치를 고려하여 설계하고 평가되어야 한다.

### 참고 문헌

(1) Howell, T., Ehrlich R., 1999, "TPI growth is key to delaying superpara-

magnetism's arrival," Data Storage, Sept.

(2) Evans, R. B. Griesbach, J. S., 1999, and W. C. Messner, Piezoelectric micro actuator for dual stage control, IEEE Trans. on Mag., Vol. 35, No. 2.

(3) Horsley, D. A., Cohn, M. B., Singh, A., Horowitz, R. and Pisano, A. P., 1998, "Design and Fabrication of an Angular Microactuator for Magnetic Disk Drives, Journal of Microelectromechanical Systems," Vol. 7, No.2, pp. 141 ~ 148.

(4) 전종업, 정성환, 최재준, 김철순, 민동기, 2001, "MEMS 마이크로 액추에이터를 채용한 고밀도 HDD용 이단 구동 제어 시스템," 제5회 대한 전기학회 MEMS 심포지움.

(5) Fujita, H., Suzuki, K., Ataka, M. and Nakamura, S., 1999, "A Microactuator for Head Positioning System of Hard Disk Drives," IEEE Trans. on Mag., Vol. 35, No. 2, pp. 1006 ~ 1010.

(6) Jung, S. H., Jeon, J. U., Pak, Y. E., and Lee, S. H., 2000, "Optimal Shape Design of Curved Electrodes for a Rotary Micro actuator," Proc. Actuator 2000, Bremen, Germany, pp. 498 ~ 501.

(7) Choi, J. J., Park, H. S., Kim, K. Y. and Jeon, J. U., 2001, "Electromagnetic Micro x y Stage with Very Thick Cu coil for Probe-based Mass Data Storage Device," SPIE 2001, CA, USA.