

## 회전구동 정전형 마이크로 액추에이터를 이용한 고트랙밀도 HDD 용 이단 구동 시스템

전종업<sup>#</sup>, 정성환<sup>\*</sup>, 최재준<sup>\*</sup>, 박지황<sup>\*</sup>, 이창호<sup>\*</sup>, 김철순<sup>\*</sup>, 민동기<sup>\*</sup>, 김영훈<sup>\*</sup>, 이승희<sup>\*</sup>

### Dual Stage Actuator System for High Density Magnetic Disk Drives Using a Rotary-type Electrostatic Microactuator

Jong Up Jeon<sup>#</sup>, Sunghwan Jung<sup>\*</sup>, Jae-Joon Choi<sup>\*</sup>, Jihwang Park<sup>\*</sup>, Chang-Ho Lee<sup>\*</sup>  
Cheol-Soon Kim<sup>\*</sup>, Dong-Ki Min<sup>\*</sup>, Young-Hoon Kim<sup>\*</sup>, Seung-Hi Lee<sup>\*</sup>

#### ABSTRACT

This paper presents the design, fabrication, and testing results of a dual stage actuator system for a fine positioning of magnetic heads in magnetic disk drives. A novel rotary microactuator which is electrostatically driven and utilized as a secondary actuator was designed. The stator and rotor electrodes in the microactuator was revised to have the optimal shapes and hence produces much higher rotational torque compared with the conventional comb-shape electrodes. The microactuators were successfully fabricated using SoG(silicon on glass) processing technology, which is known as being cost-effective. The fabricated microactuator has the structural thickness of 45 $\mu$ m with the gap width of approximately 3 $\mu$ m. The dynamic characteristic of microactuator/slider assembly was investigated, and its natural frequency and DC gain were measured to be 3.4kHz and 32nm/V, respectively. The microactuator/slider assembly was integrated into a HDD model V10 of Samsung Electronics Co. and a dual servo algorithm was tested to explore the tracking performance of dual stage actuator system where the LDV signals instead of magnetic head signals were used. Experimental results indicate that this system achieves the tracking accuracy of 30nm. This value corresponds to a track density of 85,000 track per inch(TPI), which is about 3 times greater than that of current hard disk drives.

**Key Words :** HDD (하드디스크드라이브), Dual stage actuator (이단구동기), Rotary microactuator (회전형마이크로 액추에이터), Dual servo system (이단서보시스템)

#### 1. 서론

HDD(Hard Disk Drive)의 고집적, 대용량화에 따라 데이터 트랙밀도(track density)의 증가율은 년평

균 약 60%에 달하고 있다. 현재 사용되고 있는 VCM(Voice Coil Motor)를 이용한 일단구동기(single stage actuator)만으로 이러한 고 트랙밀도를 갖는 HDD 의 데이터 트랙을 정밀하게 추종 제어하는

<sup>\*\*\*</sup> 접수일: 2004 년 11 월 16 일; 게재승인일: 2005 년 6 월 29 일

<sup>#</sup> 교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail: jujeon@ulsan.ac.kr Tel: (052) 259-2139

<sup>\*</sup> 삼성종합기술원

것은 가까운 장래에 한계에 봉착하게 될 것이다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 현재 학계 및 산업계에서 이단 구동 시스템(dual stage actuator system)에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. HDD 용 이단구동기 시스템은 크게 3 가지 방향으로 연구가 진행 중에 있다. 마이크로 액추에이터(microactuator)가 헤드(head)와 슬라이더(slidebar), 서스펜션(suspension)을 구동하는 서스펜션 구동방식은 현재 가장 활발히 연구되고 있는 방식으로 IBM, 허친슨(Hutchinson)<sup>1</sup>, 후지쯔<sup>2</sup>, 히타치, 마그네콤(Magnecom) 등에서 연구가 수행 중에 있다. 허친슨의 경우 현재 HDD 완성업체에 마이크로 액추에이터가 장착된 HGA(Head Gimbal Assembly) 샘플을 제공하여 그 성능을 모니터링하고 있는 중이다. 피에조(piezo) 소자를 이용한 서스펜션 구동방식의 경우 비교적 제작이 용이한 장점을 가지고 있으나 슬라이더 뿐만 아니라 서스펜션까지도 구동하여야 하므로 구동질량이 증가하여 가동주파수를 높이는 데 한계가 있다. 또한 서스펜션이 피에조 소자와 헤드사이에 위치함으로 인해 서스펜션에 발생하는 불필요한 동적거동을 제어할 수 없게 되어 제어시스템의 성능에 불확실성이 존재한다. 아울러 VCM과 피에조 소자의 운동임간에 동적 커플링(dynamic coupling)이 상당히 커 제어 안정성이 떨어지는 단점이 있다. 마이크로 액추에이터가 헤드와 슬라이더만을 구동하는 슬라이더 구동방식은 미국의 IBM<sup>3</sup>과 UC 버클리<sup>4</sup>, 칼텍<sup>5</sup>, TDK<sup>6</sup> 등에서 연구 수행 중에 있다. 슬라이더 구동방식에 있어서 마이크로 액추에이터는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술을 이용하여 제작하므로 양산성 측면에서 우수하며 구동질량이 슬라이더에 국한되므로 가동주파수를 높일 수 있는 장점이 있다. 또한 서스펜션의 불필요한 동적거동의 영향을 제거할 수 있으며 VCM과 마이크로 액추에이터의 운동임간에 동적 커플링이 거의 없어 제어가 용이한 장점이 있다. 반면에 기존 HDD와의 조립 호환성이 떨어지는 단점이 있다. 마이크로 액추에이터가 자기 헤드만을 구동하는 헤드 구동방식은 동경대<sup>7</sup> 및 후지쯔<sup>8</sup> 등에서 연구하는 방식으로 가동주파수 등 성능면이나, 가격, 양산성 측면에서 가장 우수한 방식으로 여겨지나 액추에이터와 헤드를 한 공정 상에서 제작하여야 하는 제작상에 난점을 가지고 있어 현재는 개념정도만 제시된 상태에서 액추에이터 부분만 제작하고 있는 실정이다. 이상에서 볼

때 향후 HDD 용 이단구동기에는 서스펜션 구동형이 먼저 채용될 것으로 예상되며 다음에 슬라이더 구동형, 최종적으로는 헤드구동형이 채용될 것으로 예상된다.

본 논문에서는 저자들에 의해 개발된 고밀도 HDD 용 이단 구동 시스템에 관하여 논한다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 마이크로 액추에이터는 슬라이더와 서스펜션 사이에 장착되며 이 장착된 마이크로 액추에이터와 기존의 VCM을 연계 제어함으로써 헤드의 위치를 정밀하게 제어한다. 본 연구에서는 MEMS 기술을 이용한 정전형 마이크로 액추에이터의 설계 및 제작, 마이크로 액추에이터를 채용한  $\mu$ -HDA(microactuator Head Disk Assembly)의 개발, 이단 구동 제어 알고리즘의 개발 및 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 이용한 서보 실험등을 수행하였다. 이하, 그 결과에 대하여 기술한다.

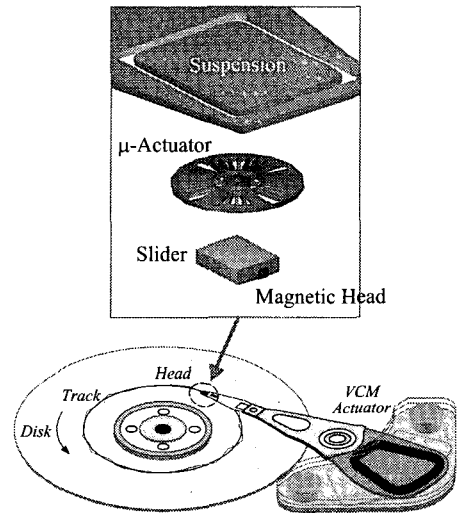


Fig. 1 Dual stage actuator system. The microactuator is sandwiched between the slider and suspension

## 2. 마이크로 액추에이터의 설계

### 2.1 최대 구동력을 갖는 전극의 최적형상

기존의 평판전극형(parallel plate type) 마이크로 액추에이터의 경우<sup>4</sup>, 전극간 간격을 작게 설정함으로써 비교적 큰 구동력을 얻을 수 있는 반면 구동범위에 제한이 있으며 회전형으로 제작시 반경

이 증가할수록 전극간 간격이 증가하여 구동력이 저하되는 단점이 있다. 또한 기존의 빗살형(comb type) 마이크로 액추에이터의 경우<sup>3</sup> 넓은 구동 범위를 얻을 수 있는 반면 구동범위가 작은 경우에는 평판형에 비하여 구동력이 떨어지는 단점이 있다. 저자 등은 상기한 단점을 각각 보완하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 전극 모양을 기울어지게 배치함으로써 반경에 무관하게 전극간 수직간격이 일정하게 하여 주어진 면적당 최대 구동력을 발휘할 수 있는 최적의 전극 형상을 고안하였다.<sup>9</sup>

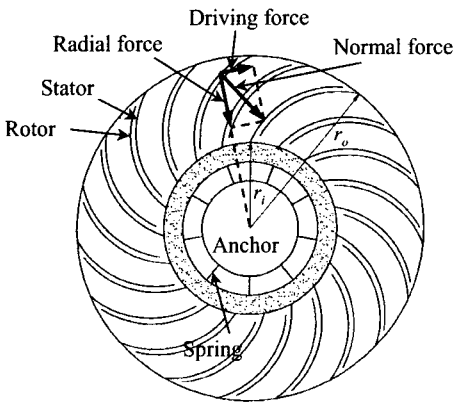


Fig. 2 Microactuator with optimal curve-shaped electrodes<sup>9</sup>

이와 같은 커브 형상 전극의 마이크로 액추에이터는 전극간 간격이  $3\mu\text{m}$  일 때 기존 빗살형 마이크로 액추에이터에 비해 수 배 이상 큰 구동력을 얻을 수 있다. (구동력의 한계는 현 MEMS 공정 능력에 좌우되며 전극간 간격을, 예를 들어  $3\mu\text{m}$  에서  $2\mu\text{m}$  로 줄일 경우 구동력은 더욱 더 커지게 된다.) 한편, 커브 형상 전극의 경우, 전극의 길이가 길어져 전극자체의 강성이 약해지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 저자 등은 커브 형상 전극과 동일한 구동력을 가지면서 전극 자체의 강성을 증가시킨 Fig. 3에 나타난 톱니형태의 전극 형상을 고안하였다.<sup>9</sup>

## 2.2 원형의 외곽형상을 갖는 마이크로 액추에이터의 설계 및 문제점

Fig. 4는 전극패드를 포함하여 설계된 원형의 외곽형상을 갖는 마이크로 액추에이터(CFMA,

Circular Frame MicroActuator)의 한 예이다. 회전구동형 마이크로 액추에이터의 경우 Fig. 4와 같이 원형의 외곽형상을 선택하는 것이 자연스러울 수 있으나 이는 단위면적당 구동력 관점에서 주어진 면적을 효과적으로 사용하지 못하는 구조이다. 웨이퍼상에 제작된 수백 개의 액추에이터 단품들을 날개로 자를 때 자른 후의 외형은 사각형이므로 Fig. 4에서 보는 바와 같이 액추에이터의 전극 및 전극패드들이 차지하는 면적 외에 불필요한 면적이 남게 된다. 또한 기록/재생 헤드 신호에의 전기적 배선처리를 위해 고정자 및 회전자 전극의 일부를 제거해야 하는 데 이로 인해라도 구동력의 손실을 가지게 된다. 한편, 외부충격에 대한 강성 관점에서 살펴보면, 고정자 및 회전자 전극의 일부 제거로 인해 액추에이터의 회전부는 비대칭 구조물이 되고, 따라서 무게중심과 회전중심이 일치하지 않게 되어 외부 충격에 취약한 구조가 된다. 즉, 외부 충격시 충격의 등가 입력점과 회전중심이 일치하지 않아 회전 토크가 발생하게 된다. 원형 외곽형상의 또 하나의 취약점은 회전구동형의 경우 전극이 방사형으로 설계되어 외곽으로 갈수록 사용되지 않는 공간이 증가하게 되고 이로 인해 구동력의 손실이 발생하는 것이다. 이러한 문제점들을 제거하기 위하여 본 연구에서는 사각형의 외곽형상을 가지는 회전구동형 마이크로 액추에이터(RFMA, Rectangular Frame MicroActuator)를 고안, 설계하였다.

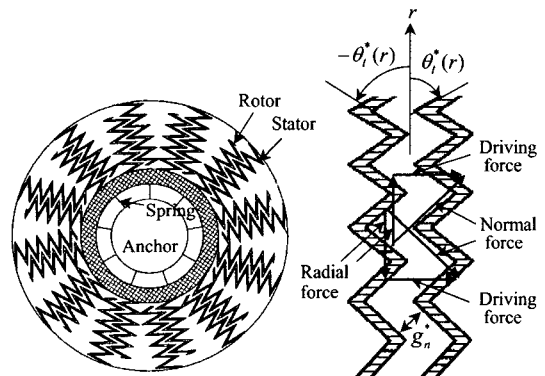


Fig. 3 Microactuator with saw-shaped electrodes, where  $g_n^*$  and  $\theta_i^*(r)$  are minimum fabricable gap length and maximum angle to be tilted, respectively<sup>9</sup>

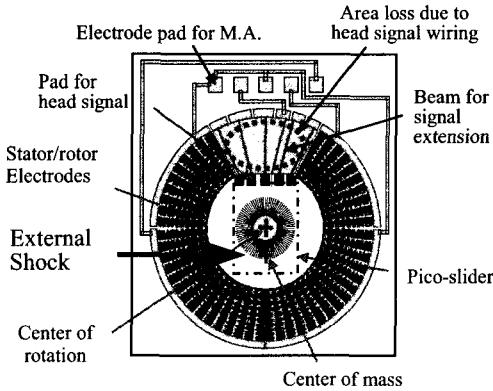


Fig. 4 Design of a circular frame saw-shaped microactuator with pads for wiring

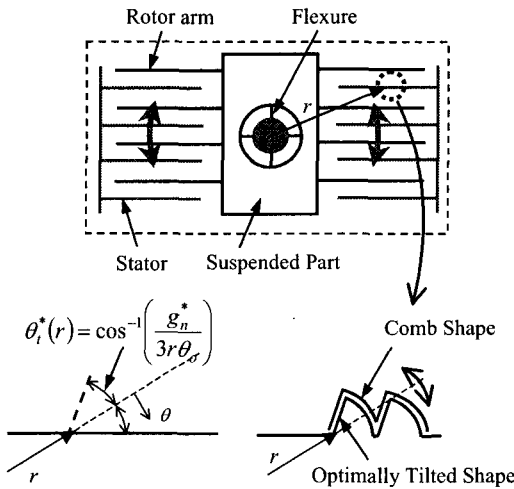


Fig. 5 Schematic view of RFMA (Rectangular Frame MicroActuator), where  $g_n^*$ ,  $\theta_i^*(r)$  and  $\theta_0$  are minimum fabricable gap length, maximum angle to be tilted and required angular displacement of microactuator, respectively

### 2.3 사각형의 외곽형상을 갖는 마이크로 액추에이터의 설계

등각사상법(conformal mapping)을 이용하여 CFMA의 전극 형상을 RFMA의 전극 형상 설계에 적용하였다. Fig. 5는 RFMA의 설계 개념도이다. 각 톱니형태 전극의 한 면은 2.1절에서 언급한 최적의 전극형상으로 구현하고 다른 한면은 일반적

인 빗살형 전극형상(interdigitated configuration)을 채용함으로써 사각형상의 외형에 적합한 수정된 전극 형상을 구현하였다. 여기서 전극형상의 일부를 최적형상이 아닌 빗살형으로 대체하여 구현하였기 때문에 각각의 전극 암마다 약 10% 정도의 구동력 손실이 있었으나, RFMA의 경우 2.2절에서 기술한 CFMA에 있어서의 면적 손실을 제거할 수 있어 단위면적당 구동력은 CFMA에 비해 약 2배 정도 크게 된다.

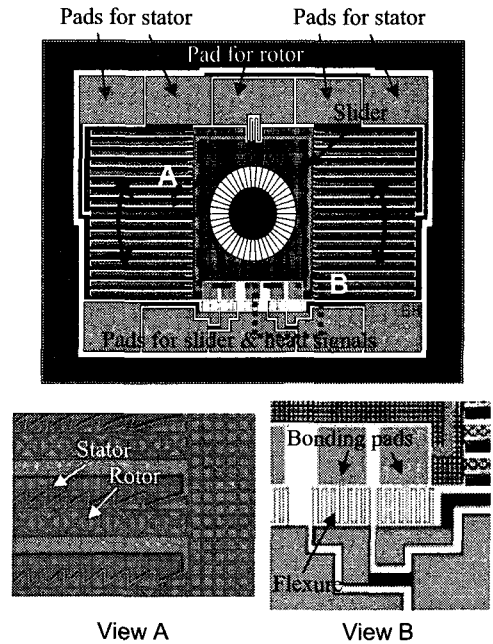


Fig. 6 Design of RFMA (Rectangular Frame MicroActuator)

Fig. 6은 설계된 톱니형 RFMA의 형상이고 Table 1은 설계 사양을 나타낸다. 전극간 간격 및 액추에이터의 두께는 각각  $3\mu\text{m}$ 와  $45\mu\text{m}$ 로 구조물의 중형비는 1:15이다. 구동변위는  $\pm 1\mu\text{m}$ 로 이는 25kTPI(Track Per Inch)급 HDD의 2트랙에 해당되는 값이다. 본 연구에서는 톱니형 RFMA와 기존의 빗살형 RFMA의 구동력을 비교하기 위해 Table 1의 설계 사양 중 구동전압만을 설계변수로 하고 나머지는 고정값으로 하여 빗살형 RFMA에 대해서도 설계작업을 수행하였다. 그 결과 빗살형 RFMA의 경우 톱니형과 동일한 성능을 발휘하기

위해서는 톱니형의 두배인 약 60V의 인가전압을 필요로 하였다. 구동력이 인가전압의 제곱에 비례한다는 것을 고려하면 이는 동일 전압하에서 톱니형이 빗살형보다 약 4 배 정도 구동력이 크다는 것을 의미한다.

Table 1 Specification of a designed microactuator (including pads). 'w' and 'w/o' mean 'with' and 'without'

Item	Specification
Driving range	$\pm 1\mu\text{m}@30\text{V}$
Natural freq.	5kHz/10kHz (w, w/o slider)
Actuator size	$3.1 \times 1.5\text{mm}^2 / 3.3' \times 2.3' \text{mm}^2$
Total size	$3.9 \times 2.9 \times 0.455\text{mm}^3$
Gap/height	$3\mu\text{m}/45\mu\text{m}$
Vertical preload	20mN (2gf)

한편, 5.1 절에서 후술하는 바와 같이 액추에이터를 차동구동방법(differential driving method)으로 구동하기 위해 고정자 전극은 4 개의 영역으로 분할 배치된다. 여기서 우상면과 좌하면에 위치한 고정자 전극에, 그리고 좌상면과 우하면에 위치한 고정자 전극에 각각 동일한 전압이 인가된다. Fig. 6의 윗부분에 배치된 5 개의 패드는 고정자 및 회전자용 전극패드이고 밑부분의 5 개의 패드는 슬라이더용 1 개와 헤드 신호용 4 개의 전극패드이다. 회전자 및 슬라이더, 그리고 헤드용 신호는 Fig. 6의 확대도 B에서 보는 바와 같이 액추에이터의 회전강성에 거의 영향을 주지 않는 유연한 스프링 구조물을 이용하여 전극패드로 연결하였다.

### 3. 마이크로 액추에이터의 제작

기존의 마이크로 액추에이터 제작방법으로는 IBM의 금속 도금법<sup>3</sup>과 UC Berkeley의 HexSil 방법<sup>4</sup> 등이 있다. 그 중 금속 도금법은 복잡한 다층 구조물을 제작할 수 있는 반면 제작 프로세스가 복잡하고 높은 종횡비(aspect ratio)의 구조물을 제작하기가 용이치 않은 단점이 있다. HexSil 방법은 LPCVD를 이용하기 때문에 고가의 제작비용이 소요되며 이 또한 제작 프로세스가 복잡한 단점이 있다. 본 연구에서는 구조물의 높은 종횡비(>1:15), 저가의 제작비용, 제작의 용이성 등을 고려하여

SoG(Silicon on Glass)를 사용한 제작방법을 이용하였다. 기판으로 유리를 사용함으로써 실리콘의 ICPRIE(Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching)시 에치스톱(etch stop)이 가능하여 구조물의 두께를 균일하게 유지할 수 있고, 유리 식각시 유리 에칭액이 실리콘과 반응하지 않으므로 장시간의 유리식각에도 실리콘이 식각될 염려가 없다. 그리고 실리콘 기판을 사용할 경우에 발생하는 구조물과 기판간의 기생용량을 제거할 수 있다. Fig. 7은 제작공정도이다.

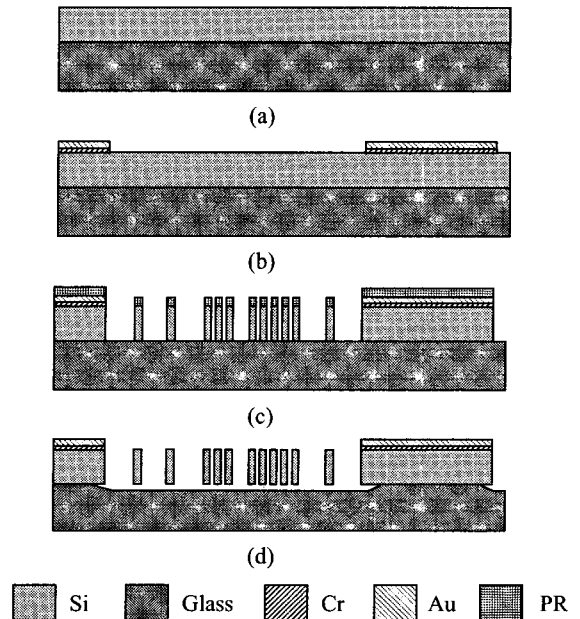


Fig. 7 Fabrication process flow. (a) Anodic bonding and CMP. (b) Metal deposition and patterning. (c) PR patterning and Si deep dry etching. (d) Glass wet etching and drying

### 3.1 제작 공정

#### (1) 양극접합 및 CMP

파이렉스 유리(pyrex glass)(Corning #7740)와 (100) 결정방향의 p<sup>+</sup>형 실리콘 웨이퍼를 접합온도 320°C, 인가전압 900V의 조건하에서 양극접합(anodic bonding)한다. 그 후 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정을 수행하여 실리콘은 액추에이터 구조물의 두께인 45μm로, 파이렉스 유리는 두께 400μm로 가공한다.

(2) 금속증착 및 패터닝

접합된 실리콘 웨이퍼에 DC 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 장비를 사용하여 Cr 과 Au 를 각각 500Å, 2000Å의 두께로 증착한다. 그 후 감광제(AZ1512)를 이용하여 패터닝 작업을 실시하여 마스크를 형성한 뒤 Cr/Au 를 습식식각하여 전극 배선작업을 수행한다.

(3) 감광제 패터닝 및 실리콘 건식식각

형성된 전극위에 다시 감광제(AZ7220)를 이용하여 마스크 패턴을 형성한 후 ICPRIE 를 이용하여 실리콘을 식각한다. 일반적으로 ICPRIE 공정에 있어서 파이렉스 유리와 실리콘의 선택비(>1:120)는 매우 크기 때문에 오버 에칭(over etching)시에도 파이렉스 유리는 거의 식각되지 않는다. 본 연구에서는 웨이퍼내에서의 전 실리콘의 완벽한 식각을 위하여 약 5% 정도 오버에칭하였다.

(4) 유리기판의 습식식각

ICPRIE 시 플라즈마에 의해 경화된 감광제를 황산과 과산화수소수를 이용하여 완전히 제거한다. 그 후 conc. HF 를 이용한 유리의 등방성 습식식각을 35 초 동안 수행하여 회전자와 스프링 부분을 유리 기판으로부터 릴리즈(release)한다. 스프링과 회전자의 릴리즈 후에도 앵커(anchor)와 고정자는 그 폭이 스프링과 회전자에 비해 넓게 설계되어 있으므로 유리로부터 릴리즈되지 않고 부착되어 있게 된다.

(5) 건조

회전자 전극과 고정자 전극간의 스틱션(stiction)을 방지하기 위해 메탄올에서 5 분간 치환하고 300°C 의 IPA 에서 10 분간 가열한 후 건조시킨다.

3.2 제작 결과

Fig. 8(a)는 제작된 마이크로 액추에이터의 전체 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진이며 Fig. 8(b)는 HF 를 이용한 유리 에칭시 고정자에 접합되어 있는 유리기판 부위가 적절하게 언더컷(undercut)되어 있음을 보여주고 있다. Fig. 8(c)와 (d)는 각각 제작된 스프링 부위와 튕니형상의 전극이다. 제작된 마이크로 액추에이터의 고정자와 회전자 전극간 간격은 약 3µm 이었으며 종횡비는 1:15 이었다. 다이싱(dicing)후의 액추에이터의 최종 크기는 약 3.9×2.6mm<sup>2</sup>이었다.

4. 마이크로 액추에이터를 채용한 HDA 조립

시판되고 있는 삼성전자(주)의 V10 HDD 모델을 기본으로 마이크로 액추에이터를 채용한 HGA(Head Gimbal Assembly) 및 HSA(Head Stack Assembly), HDA(Head Disk Assembly) (이하, 각각 µ-HGA 및 µ-HSA, µ-HDA 라고 칭한다)의 조립작업을 수행하였다.

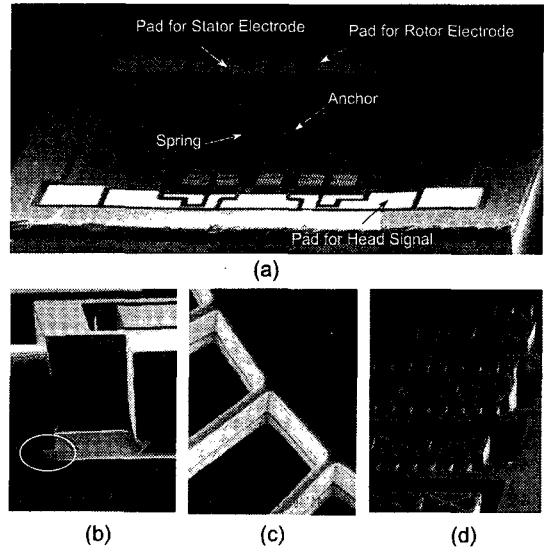


Fig. 8 SEM photograph of a fabricated microactuator. (a) Overall view. (b) Undercutting of glass. (c) Springs. (d) Stator/rotor electrodes

4.1 µ-HGA 의 기계적 조립

Fig. 9 는 조립된 µ-HGA 의 사진이다. 슬라이더는 크기 1×1.2×0.3mm<sup>3</sup> 의 자체 제작한 피코 슬라이더(pico slider)를, 서스펜션(suspension)은 허친슨(사)의 모델 3430 을 이용하였다. 먼저 마이크로 액추에이터와 슬라이더를 UV 에폭시를 이용하여 부착한 후 이를 다시 서스펜션의 슬라이더 장착 위치에 UV 에폭시를 이용하여 조립하였다. 본 연구에서는 µ-HGA 의 정밀한 조립작업을 수행하기 위하여 전용 조립지그를 제작하였으며 조립정밀도는 15µm 이내였다.

4.2 µ-HGA 의 전기적 결선

헤드신호를 이용한 기록/재생은 시간이 많이

소요되고 또한 조립공정이 매우 복잡하므로, 본 연구에 있어서는 마이크로 액추에이터의 성능을 실제 드라이브에서와 유사하게 확인할 수 있는 나노미터 정밀도의 LDV(Laser Doppler Vibrometer) 신호를 이용하여 제어를 수행한다. 따라서 마이크로 액추에이터의 구동을 위한 결선만을 고려하였다. 마이크로 액추에이터의 구동에는 차동구동을 위해 4분할된 고정자 전극용 4 선과 이동자 전극용 1 선 등 총 5 선이 필요하다. 이 중 대항하고 있는 한쌍의 고정자 전극은 마이크로 액추에이터 자체내에서 결선되어 있으므로 4 선만을 외부로 연결하면 된다. 와이어 본딩 머신(wire bonding machine)을 이용하여 마이크로 액추에이터상의 전극용 패드와 기존 서스펜션상에 형성되어 있는 헤드 신호용 와이어 트레이스(wire trace)간을 금선(Au wire)으로 결선하였다. Fig. 9(b)는 전기적 결선이 완성된  $\mu$ -HGA의 확대사진이다.

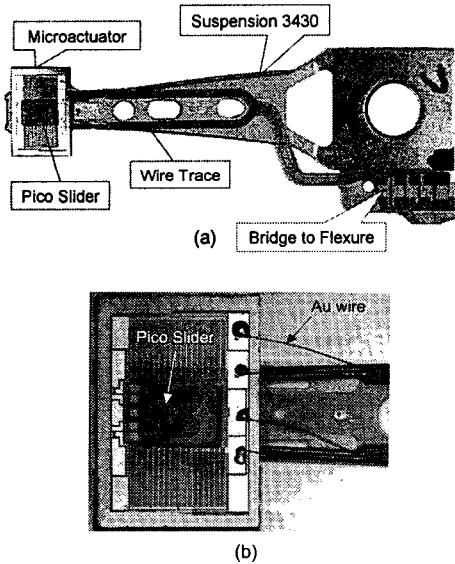


Fig. 9 Assembled  $\mu$ -HGA(microactuator Head Gimbal Assembly). (a)  $\mu$ -HGA. (b) Magnified view showing wiring

### 4.3 $\mu$ -HDA 조립

상기의  $\mu$ -HGA 와 액추에이터 암(arm) 등으로 구성되는  $\mu$ -HSA 를 조립한 후 안정된 부상을 위해 그램로드(gram load) 조절을 실시하였다. 원래의 HTI3430 서스펜션은 마이크로 액추에이터가 없는

상태에서 3gf 를 유지하도록 설계되어 있으므로 0.445mm 의 마이크로 액추에이터 높이가 추가됨으로 인해 그램로드가 증가하게 된다. 조정하기 전  $\mu$ -HGA 의 그램로드는 4~4.5gf 이었으나 조정 후 3gf 에서 5% 이내로 유지하였다. Fig. 10 은 삼성전자(주)의 V10 HDD 를 기본으로 조립된  $\mu$ -HDA 의 사진이며, 마이크로 액추에이터에 부착된 슬라이더는 조립된 드라이브 상태에서 안정된 부상상태를 유지하였다.

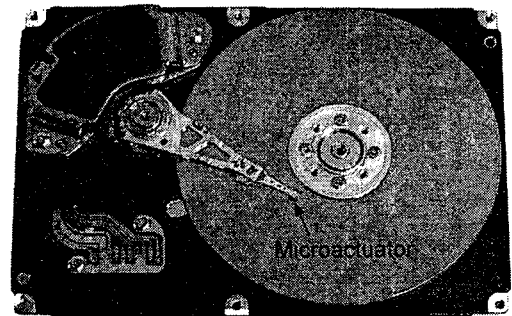


Fig. 10 Assembled  $\mu$ -HDA (Microactuator Head Disk Assembly)

## 5. 마이크로 액추에이터의 구동 특성 측정

### 5.1 구동 및 변위 측정 회로

튽니형 마이크로 액추에이터에 있어서 발생 구동력은 인가전압 및 구동변위에 대하여 강한 비선형성을 갖는다. 이를 선형화하기 위해 본 연구에서는 마이크로 액추에이터를 차동방식으로 구동한다. 또한 본 연구에서는 구동용 전극과 검출용 전극을 주어진 공간 안에 분할 설치함으로써 검출용 전극에 의해 발생하는 구동력의 손실을 방지하기 위하여 별도의 검출용 전극의 설치없이 구동용 전극을 이용하여 변위를 검출할 수 있도록 하였다. 즉, 검출을 위한 여기신호(excitation signal)의 주파수 대역을 마이크로 액추에이터의 구동 주파수 대역보다 높게 설정하여 마이크로 액추에이터가 여기신호에 의하여 구동되지 않도록 하였다. Fig. 11 은 구동 및 검출 시스템의 블록선도이며 Fig. 12 는 회로상의 각 노드점에서의 파형을 나타낸다.

마이크로 액추에이터의 구동변위는 고정자와 회전자간의 정전용량의 변화량을 S/H(Sample/

Holder) 방식을 이용하여 측정함으로써 검출된다. 마이크로 액추에이터의 고정자에 여기신호  $v_e$  를 인가하면 다음과 같이 구동변위  $x$  에 비례하는 전하증폭기(charge amplifier)에의 입력전류  $i_{in}$  이 발생한다.

$$i_{in} \approx 2 \frac{\partial C}{\partial x} x \frac{dv_e}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $C$  는 정전용량이다. 입력전류  $i_{in}$  에 의해 발생된 전하증폭기의 출력전압  $v_{co}$  는 초기값  $R_f i_{in}$  으로부터 시상수  $R_f C_f$  로 감쇠되는데 이 때 S/H 제어 신호  $v_{sh}$  에 의하여  $v_{co}$  의 최대값을 홀딩(holding)함으로써 구동변위에 비례하는 최종 출력전압  $v_o$  를 얻게 된다. 여기서, 시상수  $R_f C_f$  는 여기신호의 주기  $T_e$  의 1/2 안에 출력전압  $v_{co}$  가 완전히 감쇠되도록 설정한다. 본 연구에서는  $R_f=20k\Omega$ ,  $C_f=2pF$ ,  $T_e=8.3\mu s$  로 설정하였다.

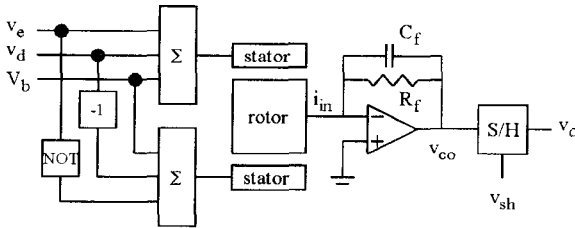


Fig. 11 Block diagram of driving and sensing system, where  $v_e$ ,  $v_d$ ,  $V_b$  and  $v_{sh}$  are excitation signal, driving voltage, bias voltage and control signal for sample and holder(S/H), respectively

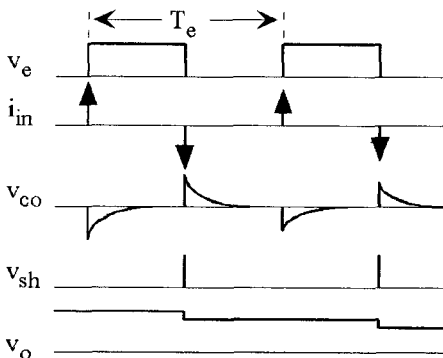


Fig. 12 Signals at each node point

본 S/H 방식은 구성이 매우 간단하고며, 신호 레벨이 타 방법에 비해 한층 더 크며 안정적인 검출이 가능하다.

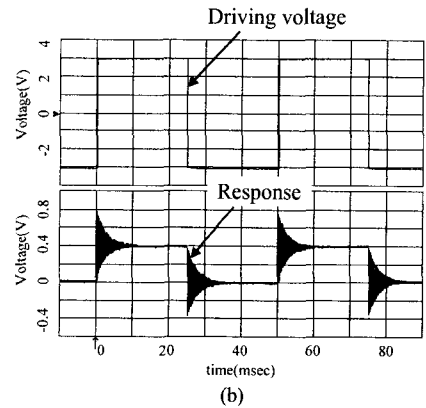
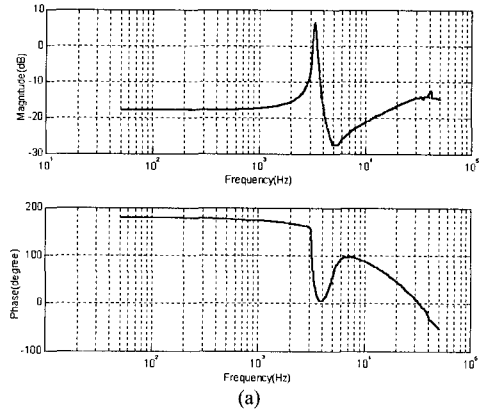


Fig. 13 Dynamic characteristic of microactuator/slider assembly. (a) Frequency response. (b) Step response

### 5.2 측정 결과

슬라이더가 부착된 마이크로 액추에이터의 응답 특성 실험을 수행하였다. Fig. 13(a)는 S/H 변위 센서를 이용하여 측정된 주파수 응답 특성이다. 측정시 인가한 전압은 바이어스전압 12V, 구동전압 3V 이었으며 측정결과 공진 주파수는 3.4kHz, DC 이득(gain)은 32nm/V 이었다. 측정된 주파수 특성을 보면 개발된 마이크로 액추에이터가 약 2kHz 까지는 일정한 이득(flat gain)을 유지하고 위상 지연(phase delay)이 거의 없음을 알 수 있으며 이로부터 마이크로 액추에이터의 구동 대역폭을



2kHz 까지는 쉽게 높일 수 있음을 알 수 있다. 정전형 마이크로 액추에이터는 수정진동자(quartz crystal)와 동일한 등가회로를 가지며 <sup>10</sup> 분 S/H 변위 센서는 정전용량의 변화량으로부터 위치를 검출하기 때문에 Fig. 13(a)에서 보는 바와 같이 공진 주파수 이외에 안티 공진주파수(anti-resonant frequency)가 나타남을 알 수 있다. 실제 본 측정회로를 이단 구동 시스템의 마이크로 액추에이터 변위 검출용 회로로 사용하기 위해서는 상기한 안티 공진에 대한 대책이 필요하다. Fig. 13(b)는 마이크로 액추에이터에 바이어스 전압 12V, 구동전압 3V, 주파수 100Hz의 구형파(square wave)를 인가하였을 때 액추에이터의 구동변위를 폴리텍(사)의 LDV(이득: 0.5 $\mu$ m/V)를 이용하여 측정한 결과이다. 마이크로 액추에이터가 입력 파형에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 응답특성으로부터 계산된 마이크로 액추에이터의 감쇠계수는 약 0.02 이고 이는 허친슨(사)의 PZT 마이크로 액추에이터보다 약 2.5 배 정도 큰 값으로 서보계의 동적 안정성 및 성능 향상 관점에서 바람직한 값으로 판단된다.

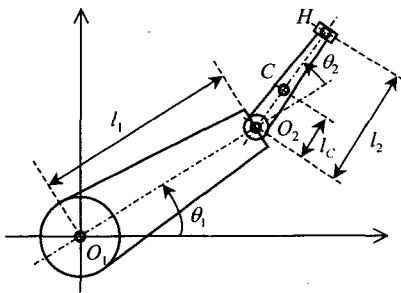


Fig. 14 Configuration of a general-type dual-stage actuator

## 6. 이단구동 제어기의 설계 및 서보 실험

### 6.1 시스템 모델링

일반적인 이단 구동기의 구성은 Fig. 14에 나타낸 바와 같다. 각 구동기의 회전축  $O_1, O_2$ 에 가해지는 토크  $T_1, T_2$ 와 해당 변위  $\theta_1, \theta_2$  간의 동적관계는 잘 알려진 Euler-Lagrange 방법을 이용하여 구할 수 있으며, 이때  $\theta_2$ 의 미세 동작범위를 가정하면 선형적인 동적 방정식을 얻게 된다. 본 연구에서는 슬라이더의 회전구동방식을 사용하므로  $O_2$ 와 미세

구동기(마이크로 액추에이터)의 질량중심인 C 간의 거리  $l_c$ 는 0 이고 이는 주구동기(VCM)와 미세구동기의 동적 간섭(dynamic coupling)이 효과적으로 분리됨을 의미한다. 따라서, 제어기의 설계시 Fig. 15와 같이  $\Sigma_1$ (주구동기와 약간의 커플링)과  $\Sigma_2$ (미세구동기)의 두가지 부시스템(subsystem)으로 분리된 이단 구동기의 등가 모델을 이용한다. Fig. 15에서  $u_1$ 은 주구동기의 코일전류,  $u_2$ 는 미세구동기의 제어전압,  $y_1$ 은 주구동기의 구동에 기인하는 등가 변위,  $y_2$ 는 미세구동기에 의한 등가 변위,  $y$ 는 헤드의 변위를 각각 나타낸다.

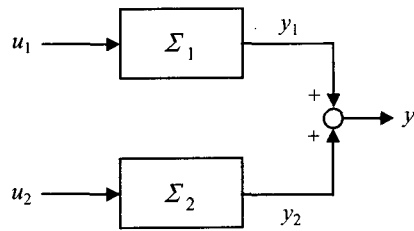


Fig. 15 Block diagram model of the dual-stage actuator under consideration

### 6.2 제어기의 설계

제어기는 상태공간(state space) 방법을 이용하여 설계하였다. 먼저  $\Sigma_1, \Sigma_2$ 의 상태변수  $x_1$ 과  $x_2$ 의 값을 알고 있다고 가정하고 제어기를 설계한 다음, 실제 제어기에는 상태변수들을 일반적인 선형 관측자(observer)를 이용한 추정치  $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ 로 대체한다.

Fig. 15에서 시스템  $\Sigma_1$ 은 기존의 HDD에서 사용되어 왔던 일단구동기의 동역학과 거의 유사하므로, 이의 제어에는 기존에 사용되고 있는 제어기를 그대로 이용할 수 있다. 따라서 잘 알려진 극배치법(pole placement)을 이용한 상태변수 되먹임 제어기를 이용하였으며, 이 때 제어목적은 위치오차  $e_1 = y_r - y_1$ 을 0으로 하는 것이다. 여기서,  $y_r$ 은 주어진 트랙명령이다. 한편, 전체 제어기의 목적이 PES(Position Error Signal) =  $y_r - y = y_r - y_1 - y_2$ 를 줄이는 것임을 고려하면 마이크로 액추에이터 부시스템  $\Sigma_2$ 의 제어목적은 출력  $y_2$ 가 시변(time-varying)의 신호를 추종해야함을 쉽게 알 수 있다. 이를 위하여 기존의 상태변수/명령(state/command)의 구조를 갖는 추종제어기(tracking controller)<sup>11</sup>를 사용할 수 있다. 그러나, 기존의 추종제어기를 그

대로 사용하는 경우 다음과 같은 문제점이 발생한다.  $\Sigma_1$  시스템의 페루프 제어오차인  $e_1$  은 스텝(step) 입력 인가시 불연속적으로 변한 후 페루프의 제어 대역에 의해 결정되는 일정한 시상수(time constant)로 0 으로 감쇄하는 형태를 가지게 된다. 특히,  $\Sigma_1$  의 페루프 제어대역이 커질수록 응답은 임펄스(impulse) 형태에 근접하게 된다. 따라서  $e_1$  을 추종하는 신호  $y_2$  에는 상당량의 위상지연이 발생하는데, 이는 PES 에 있어서 오버슈트(overshoot)의 형태로 나타나게 된다.

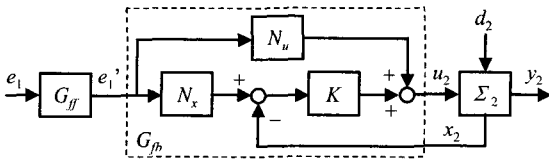


Fig. 16 Block diagram of the tracking controller for microactuator subsystem

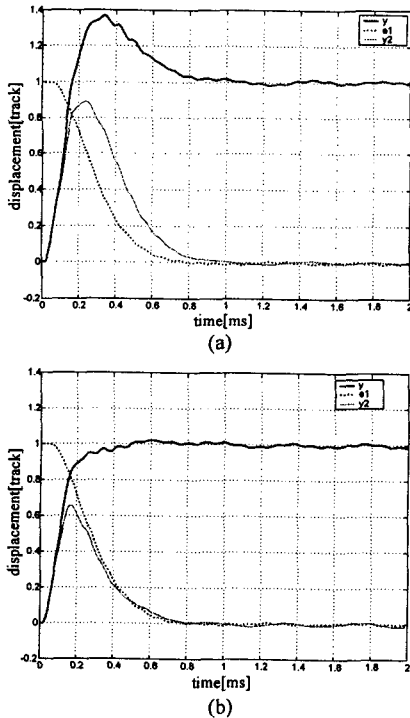


Fig. 17 Simulated one-track step response (a) without and (b) with preview filter

상기한 문제점에 대한 해결책으로써 본 연구에서는 Fig. 16 에 나타난 바와 같이 프리뷰 필터 (preview filter)  $G_{ff}$  를 사용하여 위상지연을 보상하는 방법을 고안하였다. 여기서  $G_{ff}$  는 되먹임 제어기  $G_{fb}$  에 의한 페루프 전달함수  $y_2/e_1$  의 위상오차를 0 으로 보상해 주도록 안정된  $G_{fb}$  의 역전달함수(stable inverse)를 선택한다. 그러나, 일반적으로  $G_{ff}$  는 non-causal 한 전달함수가 되어 입력신호  $e_1$  의 미래값(preview)을 필요로 한다. 본 연구에서는 주구동기의 동특성이 미세구동기에 비하여 훨씬 느린 점에 착안하여 신호  $e_1$  의 미래값을 주구동기의 동적 방정식으로부터 구해진 추측치(predicted value)로 대체하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 프리뷰 제어기의 효과를 입증하였으며 그 결과는 Fig. 17 에 나타난 바와 같다. Fig. 17(b)에서 보는 바와 같이 프리뷰 제어기의 도입으로 오버슈트가 완전히 제거됨을 알 수 있다.

본 연구에서 제안한 방식은 기존의 일단 구동기용 제어기의 설계 노하우(know-how)를 그대로 활용할 수 있어 강인성 측면에서 유리하고, 매우 간단하게 구현할 수 있으며 기존 연구결과에서 공통적으로 보여지던 트랙 오버슈트 문제가 자연스럽게 해결된다는 장점이 있다.

### 6.3 서보 실험 결과

조립된  $\mu$ -HDA 를 이용하여 이단 구동 시스템의 성능실험을 수행하였다. 헤드의 위치는 LDV 를 이용하여 측정하였으며 제어기로는 dSPACE(사)의 DSP(Digital Signal Processor)(50MHz TI C4x DSP, 16 bit ADC & DAC)를 이용하였다. 실험시 스피너들의 회전수는 3600rpm, 샘플링 주기는 69.4 $\mu$ s(14.4kHz) 이었다.

Fig. 18(a)와 (b)는 VCM 만을 사용하였을 때와 이단 구동기를 사용하였을 때의 PES 를 각각 보여주고 있다. 이단 구동기를 사용함으로써 트래킹 정밀도가 VCM 만 사용한 경우에 비하여 약 70% 정도 개선됨을 알 수 있다. 본 연구에서 제어된 트래킹 정밀도는 약 30nm 정도로 이는 약 85kTPI 에 해당된다. Fig. 19 는 마이크로 액추에이터의 효과를 보여주는 또 하나의 실험결과이다. 마이크로 액추에이터 제어가 시작된 시점부터 PES 가 현저히 줄어들고 있음을 알 수 있다.

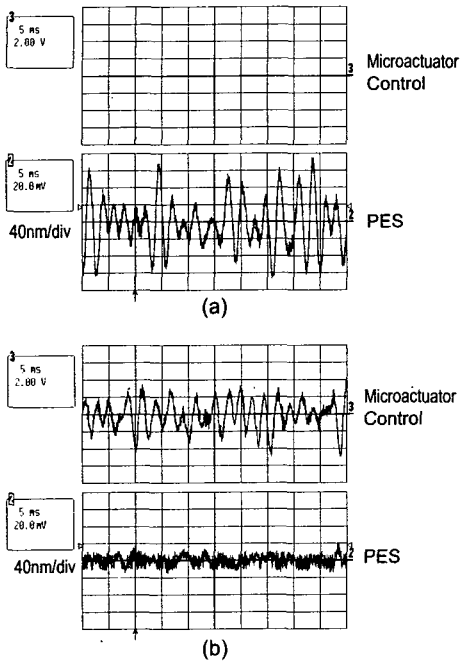


Fig. 18 PES(Position Error Signal) in case of (a) microactuator off and (b) microactuator on

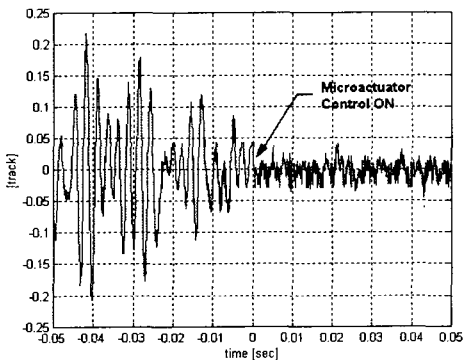


Fig. 19 Compensation of output disturbance by microactuator

### 7. 결론

본 연구에서는 MEMS 마이크로 액추에이터를 채용한 고밀도 HDD 용 이단 구동 시스템을 개발하였다.

기존의 빗살전극형 마이크로 액추에이터에 비

해 수 배(약 4 배) 이상의 구동력을 발생시킬 수 있는 톱니(saw) 형태의 전극형상을 갖는 마이크로 액추에이터를 고안하였으며 구동범위  $\pm 1\mu\text{m}@30\text{V}$ , 슬라이더 장착시의 공진주파수 5kHz 가 되도록 설계하였다. 고정자와 회전자 전극간 간격은  $3\mu\text{m}$  이며 액추에이터의 두께는  $45\mu\text{m}$  이었다. 마이크로 액추에이터의 제작에는 제작의 용이성 및 저가의 비용, 양산성 등을 고려하여 SoG(Silicon on Glass) 를 이용한 비교적 간단한 공정방법을 이용하였다. 제작한 마이크로 액추에이터에 피코 슬라이더를 부착하여 구동 특성을 측정하였다. 측정결과 공진 주파수는 3.4kHz, DC 이득(gain)은  $32\text{nm/V}$  이었다. 자체 제작한 정밀 지그를 이용하여  $\mu\text{-HGA}$ (microactuator Head Gimbal Assembly)를 개발하였으며 삼성전자(주)의 HDD V10 모델을 기본으로  $\mu\text{-HDA}$ (microactuator Head Disk Assembly)를 조립 완성하였다. 이단 구동기 제어 알고리즘을 개발하였으며 이를  $\mu\text{-HDA}$  에 적용하여 마이크로 액추에이터와 VCM 의 연계제어에 의한 트랙 추종 실험을 수행하였다. 실험결과, 이단 구동기를 사용함으로써 VCM 만을 사용한 일단 구동기에 비하여 약 70%의 PES(Position Error Signal) 개선효과가 있음을 알 수 있었다. 트랙킹 정밀도는 약 30nm 정도 이었으며 이는 약 85,000TPI 에 해당하는 것으로 현 HDD 의 트랙밀도의 약 3 배에 달한다.

### 후기

본 연구는 산업자원부와 과학기술부에서 시행한 선도기술개발사업(초소형 정밀기계 기술개발사업, 과제명: “고집적 HDD Head 개발”)의 연구비 지원 하에 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Evans, R. B., Griesbach, J. S. and Messner, W. C., "Piezoelectric Microactuator for Dual Stage Control," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp. 977-982, 1999.
2. Koganezawa, S., Uematsu, Y. and Yamada, T., "Dual-Stage Actuator System for Magnetic Disk Drives Using a Shear Mode Piezoelectric Microactuator," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp. 988-992, 1999.

3. Hirano, T., Fan, L.-S., Lee, W. Y., Hong, J., Imano, W., Pattanaik, S., Chan, S., Webb, P., Horowitz, R., Aggarwal, S. and Horsley, D. A., "High-Bandwidth High-Accuracy Rotary Microactuators for Magnetic Hard Disk Drive Tracking Servos," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 3, No. 3, pp. 156-165, 1998.
4. Horsley, D. A., Cohn, M. B., Singh, A., Horowitz, R. and Pisano, A. P., "Design and Fabrication of an Angular Microactuator for Magnetic Disk Drives," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 141-148, 1998.
5. Miu, D. K. and Tai, Y.-C., "Silicon Micromachined SCALED\* Technology," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 3, pp. 234-239, 1995.
6. Soeno, Y., Ichikawa, S., Tsuna, T., Sato, Y. and Sato, I., "Piezoelectric Piggy-Back Microactuator for Hard Disk Drive," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp. 983-987, 1999.
7. Fujita, H., Suzuki, K., Ataka, M. and Nakamura, S., "A Microactuator for Head Positioning System of Hard Disk Drives," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp. 1006-1010, 1999.
8. Imamura, T., Katayama, M., Ikegawa, Y., Ohwe, T., Koishi, R. and Koshikawa, T., "MEMS-Based Integrated Head/Actuator/Slider for Hard Disk Drives," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 3, No. 3, pp. 166-174, 1998.
9. Jung, S. and Jeon, J. U., "Optimal Shape Design of a Rotary Microactuator," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 460-468, 2001.
10. Putty, M. W., Chang, S. C., Howe, R. T., Robinson, A. L. and Wise, K. D., "One-Port Active Polysilicon Resonant Micro-structures," Proc. IEEE MEMS Conference, pp. 60-65, 1989.
11. Franklin, G. F. and Powell, J. D., Digital Control of Dynamic Systems, Addison Wesley, second edition, 1990.