하드디스크 드라이브 Dual Actuator 기술의 동향

이 호 성, Lin Guo
Maxtor Corporation

1. 서론

1957년 IBM에 의해 RAMAC 350이 소개됨으로써 flying head를 이용하는 하드 디스크 드라이브 (HDD)의 역사가 열리게 되었다[1]. 이 RAMAC 350은 대형 냉장고의 크기이며 24인치(610 밀리미터) 디스크 50장으로 구성되어 있는데 총 저장 용량은 5MB(메가 바이트 = 10^6 바이트)에 불과하였다. 디스크 드라이브의 상대적 저장용량을 비교하는데는 면적밀도(areal density)가 이용된다. 이것은 선형밀도(linear density)와 트랙밀도(track density)의 곱으로 계산된다. 선형밀도는 정보저장 트랙을 따라 단위 길이 당 비트의 개수를 말하며 그 단위는 BPI(Bits Per Inch)이다. 트랙밀도는 1인치 당 몇 개의 트랙이 있는가를 표시하며 그 단위는 TPI(Tracks Per Inch)이다. IBM의 RAMAC 350의 선형밀도는 100 BPI (즉 1밀리미터 당 4 비트), 트랙밀도는 20 TPI(즉 1밀리미터 당 0.8 트랙)이므로, 면적밀도는 대략 2000 bits/in^2 = 1 mm^2 당 3 비트)가 된다.

1981년에 시판된 IBM 3380 디스크 드라이브는 총 저장용량이 1.25GB(기가 바이트 = 10^9 바이트)에 달하였으며, 면적밀도는 12 Mbits/in^2 (= 1 mm^2 당 18,600 비트)였다. 즉 1957년부터 1981년까지 24년 동안 면적밀도는 6000배 증가하였다. 이 IBM 350과 3380은 전적으로 대형 (main frame) 컴퓨터용으로 제작되었으며 대 당 가격이 수 십만 불에 달하였다. 이때까지 디스크 드라이브는 IBM에 의해 disk file 또는 DASD (direct access storage device)라 불리었으며, IBM의 독점 산업이라 해도 과언이 아니었다.

1981년에 일어난 획기적인 일은 IBM 350의 개발에 참여하였던 Al Shugart에 의해 설립된 Seagate Technology가 PC (Personal Computer) 전용 ST506을 시판한 것이다. ST506은 Winchester technology를 이용한 5.25인치 (133밀리미터)급 디스크 드라이브인데 총 저장용량이 IBM 350과 같은 5MB이었다. 면적밀도는 2 Mbits/in2 (= 1 mm2 당 3.100 비트), 선형밀도는 7690 BPI, 트랙밀도는 255 TPI이다. 이 하드디스크 드라이브는 Apple Computer에 의해 시판된 Lisa 컴퓨터 (Macintosh 컴퓨터의 전신)에 처음으로 장착되어 PC용 디스크 드라이브 산업의 새 장을 열게 되었다. 이 후 IBM PC에 장착이 됨으로써 PC의 성능을 높임과 동시에 폭발적인 PC 수요를 유발하는 한 계기가 되었다.

2000년도 말에는 일반 PC용 3.5인치 (89밀리미터)급 디스크 드라이브의 면적밀도가 15 Gbits/in^2 (= 1 mm^2 당 23,250.000 비트)에 이를 것으로 전망된다. 이것은 3.5 인치 디스크 한 장 당 10GB에 상당한다. 1981년 ST506이 소개된 이후 2000년까지 20년 동안 면적밀도는 7500배 증가한 셈이다. 트랙밀도를 보면 올해 말까지 30.000 TPI (= 1밀리미터 당 1200 트랙)에 달할 것이다. 이러한 저장 용량의 꾸준한 증가는 자기 기록 기술의 혁신적인 발전에 의한 것이다. 자기기록 기술은 읽기·쓰기 헤드, 자기기록 디스크 (또는 미디어), 데이터 encoding을 포함한 채널 전자 회로 (channel electronics) 및 헤드와 디스크 사이의 간격을 일정하게 유지하는 기술 등을 포함하고 있다.

단위 드라이브 당 저장 용량의 급격한 증가는 최근 몇 년 사이의 기하급수적 인터넷 사용자의 증가에 따른 막대한 정보저장 수요와 밀접한 관계가 있다. 인터넷의 대중화로 인하여 전세계에 퍼져있는 숫자, 문자 정보뿐만 아니라 음성, 화상 정보를 쉽게 얻을 수 있게 되었다. 인터넷 상업의 실현으로 엄청나게 많은 정보 저장용량을 요구하게 되었으며, 정보 저장기기에 대한 폭발적인 수요를 불러일으키고 있다. 정보 저장용량을 보다 획기적으로 늘리기 위한 여러 기술 중에서 기계·제어 기술과 밀접한 관련이 있는 dual actuator에 대하여 소개하고자 한다. Dual actuator 기술은 이미 compact disk (CD) 드라이브와 DVD 드라이브에 이미 오래 전부터 실용화가 되었지만, HDD에는 멀지 않은 장래에 실용화가 될 전망이다. 2장에서는 디스크 드라이브가 당면하고 있는 기술적 과제에 대해 기술하고, dual actuator가 가져다 줄 이익에 대해 서술하였다. 3장에서는 현재 제안되고 연구 중인 각종 dual actuator의 종류에 대해 나열하고 장·단점에 대해 기술하였다. 이 dual actuator를 제어하기 위한 여러 제어계를 4장에서 서술하였다. 마지막으로 dual actuator와 전반적인 정보 저장 기술에 대한 전망을 기술하였다.

2. 고용량 디스크 드라이브 실현을 위한 기술 과제

디스크 드라이브의 용량을 획기적으로 높이기 위한

기술개발은 꾸준하게 진행되고 있으며, 그 중 점진적인 기술의 발전은 디스크와 헤드 사이의 간격을 최소한으로 하는 것이다. IBM 350이 1957년에 소개되었을 때 디스크와 헤드 간격은 20 마이크론 이었는데, 2000년 현재의 디스크 드라이브는 25 나노미터 (= 0.025 마이크론) 미만에 다다르고 있다. 이 것을 위하여 super-smooth한 디스크를 사용해야 하며, 이 경우 헤드가 디스크 위에 정지하게 되면 헤드가 디스크에 접착하게 되어 스핀들 모터가 다시 구동하지 않거나, 헤드가 상하게 된다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 스핀들 모터가 정지하면 헤드가 디스크 바깥쪽의 ramp에 정착하게 하는 ramp load/unload mechanism이 개발되었다.

디스크 드라이브의 기본 구성요소가 그림 1에 나타나 있다. 여기에는 주로 기계장치로 구성되어 있는 헤드 디스크 조립등체 (head-disk assembly: HDA)를 보여주고 있다. 디스크 드라이브의 구성요소와 헤드 위치 제어계의 기본 사항은 [2],[3]에 잘 설명되어 있다. 현재 거의 모든 디스크 드라이브의 서보 시스템은 embedded 또는 sector 서보 방식인데, 이것은 사용자가 쓸 수 있는 저장 데이터 트랙 사이에 일정한 간격으로 서보 위치정보를 검출할 수 있도록 servo pattern을 집어넣은 것이다. 이 servo pattern이 있는 부분을 servo sector 또는 서보 트랙이라 하며, 이 servo pattern을 쓰는 작업을 "서보 트랙 writing"이라 한다. Servo sector는 어떠한 경우에도 사용자에 의해 파손되지 않도록 잘 보호 되어있으며, 서보 트랙 writing은 디스크 드라이브 생산에 있어서 매우 중요한 부분을 차지한다.

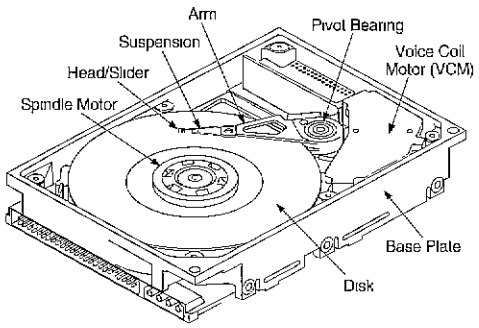

그림 1. 디스크 드라이브 HDA의 구성요소

그림 2는 자기헤드 위치 제어계를 간단한 블록선도로 나타낸 것이다. 그림에서 y는 위치 오차신호 (position error signal: PES)를 나타내며, 헤드가 원하는 데이터 트랙 (실제로는 서보 트랙)의 중심선에서 얼마나 벗어나 있는가를 나타내는 신호이다. 헤드가 servo pattern 위를 지날 때마다 PES가 검출되며 이것에 따라 서보 제어기가 헤드를 원하는 위치로 보내게 된다. 원하는 데이터를 오차 없이 정확히 읽기 (또는 쓰기) 위해서는 헤드가 데이터 트랙의 중앙에 읽기 (또는 쓰기) 작동이 끝날 때까지 계속 머물러 있게 하여야 한다. 이 것이 track-following 제어기의 역할이다. 하지만 헤드가 servo sector를 지날 때에는 정확한 PES가 측정되지만 실제로 정보를 데이터 트랙에 쓰고 읽을 때의 정확한 위치 정보는 다음 servo sector를 읽을 때까지는 불확실하다. 이 경우 자기헤드가 실제 데이터 트랙의 중심선에서 벗어난 거리를 track misregistration (TMR)이라 한다[4]. 즉 TMR은 헤드가 얼마나 신뢰성 있게 데이터를 쓰고 읽을 수 있는가를 나타내는 수치이다. TMR은 통계적 수치이며 정확한 예측을 하기가 쉽지 않다. 디스크 드라이브 제작업체마다 고유한 계산 방식을 가지고 있다.

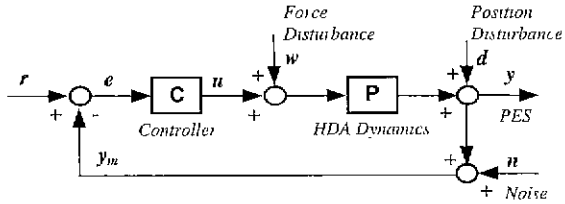

그림 2. 디스크 드라이브 서보 시스템의 블록선도

그림 2에는 헤드의 track-following을 방해하는 세 가지 외란(disturbance: w, d, n)이 표시되어 있으며, 이들이 TMR을 결정하는 중요한 요소로 작용한다. 따라서 이들이 PES에 미치는 영향을 해석하여 이들의 영향을 최소화할 수 있는 설계를 하는 것이 제품의 성공을 좌우한다. w는 외력 외란(force disturbance 또는 torque disturbance)을 나타내며, 외부 진동· 충격, 헤드에 미치는 공기 베어링의 외력(air-bearing windage), 피봇 베어링의 마찰력, flex cable에 의한 편향력(bias), 그리고 digital-to-analog converter(DAC)와 VCM power-amplifier에 의한 noise 등이 포함된다[5], [6].

위치 외란(position disturbance)으로 표기된 d에는 주로 기계적 외란인 스핀들 모터· 베어링의 진동, 디스크 회전에 따른 디스크의 진동(disk flutter)과 헤드가 부착되어 있는 슬라이더의 진동 등이 포함된다. 전기적 소음(electrical noise)은 n으로 표시되어 있는데 이것은 자기미디어 소음, servo demodulation noise, 그리고 analog-to-digital converter(ADC)의 제한된 resolution에 의한 quantization error 등에 의한 것이다.

이들 기계적· 전기적 외란에 의한 오차를 런아웃(runout)이라 하며, 다음과 같은 두 가지 요소로 분류된다. 주파수 영역에서 볼 때 회전수의 정수 배에 나타나는 오차를 repeatable runout (RRO), 그리고 회전수의 정수 배와 무관하게 나타나는 부분을 non-repeatable runout (NRRO)이라 한다. RRO는 주로 기계적 외란에 의하며, 특히 서보 트랙 writing 과정 중에 포함되는 것을 written-in RRO라 한다. NRRO는 기계적· 전기적 외란의 합성에 의해 나타난다.[6],[7]. 따라서 PES는 RRO와 NRRO의 통계적 합으로 표기된다.

$$PES = \sqrt{RRO^2 + NRRO^2} \qquad (1)$$

10,000 TPI 정도 되는 디스크 드라이브 PES 예가 그림 3에 나타나있다. 일반적으로 제일 큰 RRO 성분은 1차 또는 2차 고유 주파수(5400 RPM 드라이브에서는 90 Hz 또는 180 Hz)에서 나타난다. 따라서 이 주기적인 RRO 성분들은 런아웃 제어기(repeatable runout compensator)에 의해서 상쇄될 수 있다. 그림 3에는 1차 주성분만 제거된 PES를 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 가장 큰 1차 RRO 성분이 제거된 후에도 많은 잔류 성분이 나타남을 볼 수가 있다. 특히 TPI 증가함에 따라 이 잔류 RRO 성분이 전체 PES에서 차지하는 부분이 점차 커지고 있다. 이 RRO 성분들은 이론적으로 런아웃 제어기에 의해 제거될 수 있지만 실제로 세 개 이상의 RRO 성분을 제거하는 것은 어려운 문제이다.

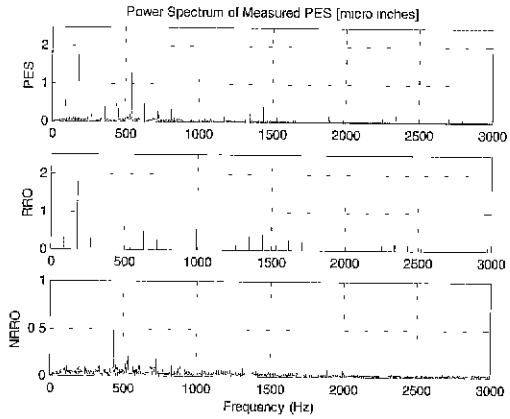

그림 3. 주파수 영역에서의 PES 성분 :
(상) PES (중) RRO (하) NRRO

NRRO는 다음과 같은 요소의 합으로 나타내진다.

$$NRRO = \sqrt{DM^2 + BD^2 + WN^2 + PN^2 + HS^2 + MS^2} \quad (2)$$

여기서 DM은 disk mode vibration, BD는 스핀들 모터의 베어링 결함 (bearing defect), WN은 windage vibration, PN은 position sensing noise, HS는 헤드, 서스펜션과 actuator arm의 진동 모드, MS는 기타 여러 가지 원인에 의한 NRRO 요소를 나타낸다. 각 NRRO 요소들이 전체 PES에서 차지하는 비중은 드라이브의 설계에 따라 많은 차이가 있다. 몇 년 전만 해도 유체 동역학 베어링(fluid dynamic bearing: FDB)을 도입하면 베어링 결함에 의한 NRRO 성분이 상당히 줄어들 것으로 예상하여 많은 연구가 진행되었으나 실제로 (2)에서 보는 바와 같이 BD 성분은 전체 PES 중 아주 작은 부분만 차지하는 것으로 판명이 되어 아직 FDB가 널리 쓰이지는 않고 있다. DM을 줄이기 위하여 최근에는 두꺼운 디스크를 쓰는 경향이 있으며 10,000 rpm 이상의 고성능 드라이브에는 작은 직경의 디스크를 쓰고 있다 (즉 3.5인치 HDD에 3인치 디스크를 씀). 트랙밀도가 증가함에 따라 PN을 줄이는 것이 또한 큰 과제로 되어 있다. 이 PN성분을 구체적으로 규명하기 위하여 많은 연구결과가 나와있다[6],[8].

그림 1에서 보는 바와 같이 세 가지의 외란 (w, d, n)들이 세 가지의 다른 전달함수를 통해 PES에 더해진다. 제어기의 설계 시 이들 외란의 영향을 최소화하기 위하여 여러 가지 기법이 사용되고 있으나, 실제 완벽한 성능을 기대하기는 어렵다. 즉 한 외란의 영향을 줄이기 위하여 제어기를 설계하면 다른 외란의 영향을 높이는 부작용을 수반한다. 따라서 단지 제어기의 성능을 조정함으로써 디스크 드라이브의 성능을 높이는데는 한계가 있으며, 스핀들 모터, 베어링 및 기타 부품의 질과 성능을 같이 향상시키는 것이 중요하다. 아울러 전기 부품· 회로에서 발생하는 전기적 소음을 최소화하는 것이 중요하다.

그림 4에는 위치외란의 전달과 관련 있는 error 전달함수의 주파수 응답의 한 예를 보여주고 있다. 그림에서 곡선이 0 dB 선과 만나는 주파수를 대략 350 Hz 정도로 본다. 따라서 350 Hz 아래의 기계적 외란의 영향은 모두 감소하나, 반면에 350 Hz에서 2000 Hz 사이의 기계적 외란은 증폭되게 된다.

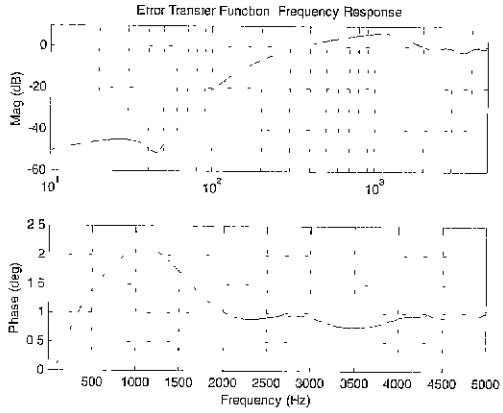

그림 4. Error 전달함수의 주파수 응답 :
(위) log scale (아래) linear scale

그림 3에서 보는 바와 같이 350 Hz와 2000 Hz 사이에는 많은 RRO와 NRRO 성분이 있으며, 따라서 단순히 error rejection bandwidth만 수 백 Hz 높임으로써 런아웃에 의한 오차가 크게 줄어들지는 않는다. 하지만 트랙밀도가 증가함에 따라, 외부의 진동· 충격에 대해 견실하게 반응할 수 있도록 closed-loop bandwidth는 계속 높여 주어야한다.

앞에서 기술한 바와 같이 PES를 크게 줄이기 위해서는 서보 bandwidth의 획기적인 증가가 필요하다. bandwidth 증가에 있어 가장 걸림이 되는 것은 기계적 공진 현상이다. 디스크 드라이브에는 많은 공진 모드(resonance mode)가 있는데 그 중 가장 문제가 되는 첫

번째 모드는 드라이브에 따라 다르긴 하지만 대개 4000 Hz에서 5000 Hz 사이에 있다. 공진 현상을 막기 위하여 노치 필터(notch filter)를 쓰게 되는데, 이것으로 인하여 디스크 드라이브의 성능 향상을 제한하게 된다. 이 고유 주파수를 높이기 위하여 많은 노력을 하지만 결정적인 한계가 있으며 이 한계를 넘어서는 기술이 다음 장에 설명되어 있는 piggyback microactuator 또는 dual actuator 기술이다. 트랙 밀도가 높아짐에 따라 track-following 동안 arm이 움직이는 각도가 점점 작아지게 된다. 따라서 피봇 베어링의 영향이 점점 커지게 되는데, 특히 비선형 마찰력에 의해 limit cycle, 주파수 응답의 변형 등 바람직하지 않은 현상이 나타나게 된다. Dual actuator는 이 피봇 베어링에 무관하게 작동하여 피봇 베어링의 영향에 상관없이 성능을 올릴 수 있는 장점이 있다.

디스크 드라이브 제어계의 성능을 표시하는데는 여러 변수를 쓸 수 있는데 일반적으로 서보 bandwidth를 많이 사용한다. 하지만 이 서보 bandwidth에도 세 가지가 있으므로 주의해서 사용하여야 한다. bandwidth는 일반적으로 closed-loop bandwidth를 칭하나, 디스크 드라이브 업계에서는 open-loop bandwidth (또는 open-loop crossover frequency) 주로 사용한다. 세 번째 bandwidth는 error 전달함수의 cutoff frequency이다. 현재 디스크 드라이브의 bandwidth (즉 open-loop crossover frequency)는 600 Hz에서 1000 Hz 정도이며, dual actuator를 쓸 경우 2000 Hz 이상을 목표로 하고 있다.

3. Dual Actuator 시스템의 소개

디스크 드라이브용 dual actuator는 actuation 원리에 따라 피에조(piezoelectric), 전자력(electromagnetic) 또는 정전기(electrostatic) 모터로 분류된다. 또한 dual actuator의 설치 위치에 따라 서스펜션 dual actuator 또는 슬라이더 dual actuator로 분류된다. 본 장에서는 actuator 설치 위치에 따른 dual actuator 기술을 나열하고자 한다.

3-1. Suspension/Arm Based Dual Actuator Systems

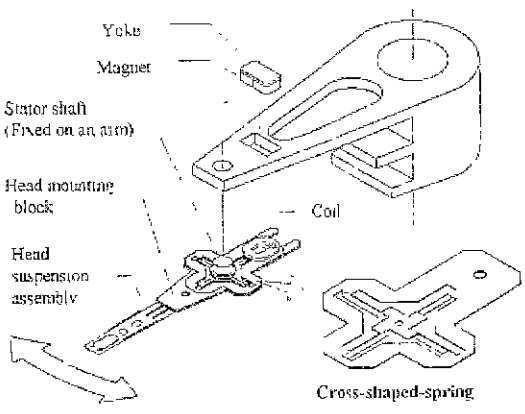

그림 5. Electromagnetic piggyback milli-actuator(Fujitsu 1996)

그림 5는 전자력을 이용한 mill-actuator의 적용 예를 보여주고 있다[9]. 기본 원리는 arm과 서스펜션 사이에 작은 VCM을 집어넣은 것이다 이 milh-actuator를 2.5인치 급 디스크 드라이브에 장착하여 실험하였으며 3300 Hz의 서보 bandwidth와 25000 TPI를 얻을 수 있는 것으로 보고되었다.

최근의 milli-actuator의 전반적인 추세는 피에조 재료를 이용한 piezoelectric 모터를 사용하는 것이다. 그림 6에는 피에조 모터를 이용한 dual stage actuator의 초창기 구조를 보여주고 있다[10] 1991년 당시 1000 Hz 서보 bandwidth와 17000 TPI를 얻을 수 있는 것으로 보고되었다.

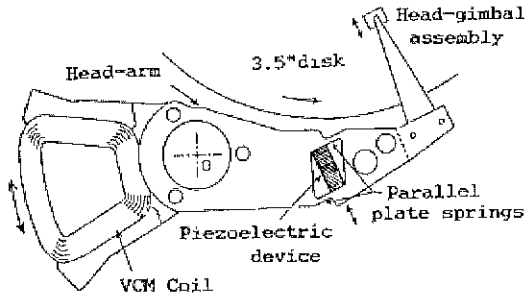

그림 6. Piezoelectric element를 이용한 dual stage actuator (Hitachi 1991)

그림 7에는 1996년에 Fujitsu가 개발한 피에조 dual actuator를 보여주고 있다. Fujitsu에 의하면 서보 bandwidth가 300 Hz에서 1000 Hz로 증가함에 따라 PES는 ± 0.43 마이크론에서 ± 0.26 마이크론으로 줄어든 것으로 보고되었다[11]. 1999년의 개량된 Fujitsu의 피에조 dual actuator는 2100 Hz의 서보 bandwidth를 달성함으로써 PES가 0.085 마이크론 까지 줄어들었으며 이것은 30,000 TPI의 트랙밀도에 상당한 것으로 발표되었다[12].

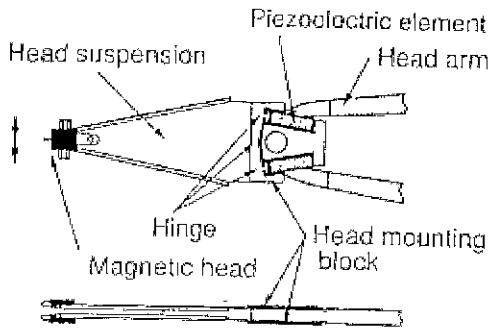

그림 7. Planar piezoelectric element를 이용한 dual stage actuator (Fujitsu 1996)

그림 8에는 Hutchinson Technology(HTI) 에서 개발 중인 Magnum 서스펜션을 보여주고 있는데 그림 7에 보인 Fujitsu dual actuator와 아주 근사한 구조를 보이고 있

다. HTI는 서스펜션 전문 생산업체로 거의 모든 디스크 드라이브 생산업체에 서스펜션을 공급하고 있으며, 대부분 디스크 드라이브 회사들은 이 Magnum dual actuator에 기초한 고용량 디스크 드라이브 개발에 열중하고 있다. Magum 서스펜션 피에조 모터의 공진 주파수는 6000에서 8000 Hz 정도로 설계하고 있다. 이 Magnum 서스펜션을 이용한 제어기술의 예는 [13],[14]에 보고되어 있다.

이 서스펜션에 장착된 dual actuator의 장점으로는 dual actuator의 작은 변위가 서스펜션 길이에 따른 스윙에 의해 헤드의 변위가 확대되는 것이다. 반면에 서보 bandwidth가 서스펜션의 공진 주파수에 의해 제한되는 단점이 있다. 이 단점을 보완하는 것이 다음절에 기술할 슬라이더에 장착된 dual actuator 방식이다.

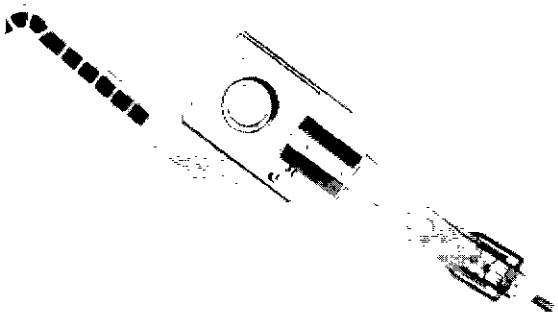

그림 8. Hutchinson Magnum 서스펜션(HTI 1998)

3-2. Slider Based Dual Actuator Systems

피에조 모터를 슬라이더에 직접 부착하는 방식이 그림 9에 보이고 있다. 피에조 actuator의 한쪽 끝을 서스펜션에 부착하고 다른 쪽 끝에 slider를 직접 접착하여 slider를 좌우로 움직일 수 있다. TDK사가 제안한 이 슬라이더 부착 피에조 모터의 공진 주파수는 20,000 Hz 이상 되는 것으로 보고되었다[15]. 이 방식을 적용하면 현재 사용하는 서스펜션을 변형 없이 그대로 사용할 수 있으며, 마이크로 모터에 의해 arm과 VCM의 동역학을 불필요하게 가진하는 가능성이 줄어든다. 반면에 actuator가 헤드에 밀접하게 설치됨으로 인하여 actuator 구동에 따른 전기적 소음이 헤드에 영향을 미치지 않

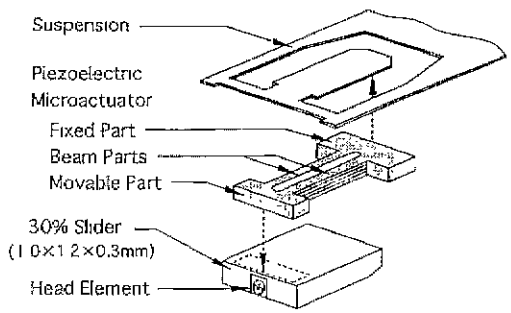

그림 9. Slider-based 피에조 micro-actuator(TDK 1998)

도록 하는 것이 중요하다. 이 슬라이더에 설치된 피에조 모터 방식은 서스펜션에 설치된 피에조 모터 다음 세대로 실용화될 것으로 전망된다.

MEMS (micro electromechanical systems)를 이용한 micro actuator는 구동력의 발생 방식에 따라 두 가지로 나누어진다. 그 첫 번째는 그림 10에 보는 바와 같은 전자력 (electromagnetic force)에 의해 구동되는 방식이다 [16],[17]. 마이크로 가공 방법을 이용하여 미소 모터를 실리콘 위에 직접 제작하여 올리며, 슬라이더와 서스펜션 사이의 flexibility를 제공하는 micro gimbal도 동시에 가공되어 진다. 이 것의 단점으로는 micro actuator의 구동 자력이 자기 헤드에 영향을 미칠 가능성이 높으며, 또한 외부 충격과 진동에 대한 저항력이 매우 낮다는 점이다. 이 전자력을 이용한 MEMS 모터는 캘리포니아 공대 (Cal Tech)와 Texas Instrument에서 계속 연구· 개발 중이다.

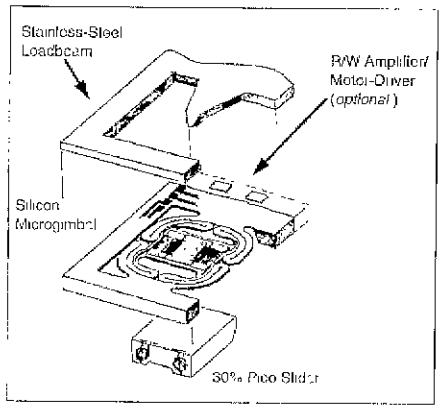

그림 10. Electromagnetic MEMS micro-actuator (UCLA-Cal Tech 1995)

두 번째 MEMS 구동방식은 정전기력 (electrostatic force)을 이용하는 것으로, 그 실용화를 위하여 IBM, 캘리포니아 대학 (Berkeley), 동경대학 등에서 활발하게 진행 중이다[4], [18]-[24]. Berkeley에서 제작한 micro actuator의 주공진 주파수는 50,000 Hz 이상에 다다르고 있으며, 서보 bandwidth도 2000 Hz 이상을 성취할 수 있음을 발표하였다.

그림 11은 IBM에서 제작한 MEMS actuator를 디스크 드라이브에 장착한 모습을 보여 주는데, 디스크 드라이브에 실제로 설치되어 작동하는 MEMS actuator의 최초의 발표 사진이다. 슬라이더에 비하여 상대적으로 비대한 micro actuator의 모습을 볼 수 있으며, 따라서 외부의 충격이나 진동에 취약할 것으로 예상된다. 이 MEMS micro actuator는 아날로그 제어기를 사용할 때에 5000 Hz의 서보 bandwidth가 실현되었으며, 29,000 Hz의 sampling frequency를 사용하는 디지털 제어기를 사용할 때의 서보 bandwidth는 2200 Hz를 성취할 수 있음이 보고되었다[18],[24]. 이때 PES가 0.024 마이크론 까지 감

소하였다. PES를 트랙 넓이의 10% 까지 허용하는 것으로 볼 때 이 것은 100,000 TPI(= 1 밀리미터 당 4200 트랙)에 상당하는 것을 의미한다.

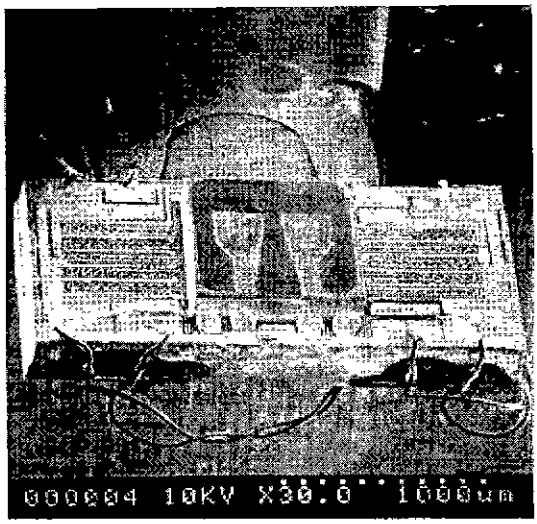

그림 11. Electrostatic MEMS micro-actuator(IBM 1998)

동경대에서 제안한 MEMS micro actuator는 가장 첨단의 발상으로 micro actuator를 슬라이더와 헤드 사이에 집어넣는 것이다 [19].[20]. 이 경우 actuator가 구동해야 하는 운동부위가 헤드를 포함하여 최소한의 질량이 되므로 이론적으로 가장 높은 서보 bandwidth를 성취할 수 있다. 하지만 micro actuator와 헤드를 같이 가공해야 하므로 생산 공정이 복잡해지며, 이에 따라 수율(yield)이 낮아지며 생산 단가가 높은 단점이 있다.

4. Dual Loop 제어 시스템의 설계

Dual loop 서보 시스템의 설계에는 여러 가지 방법이 있을 수 있겠으나, 여기에서는 고전적 설계방법 중 대표적인 것을 네 가지 소개한다. 또한 각 방법의 장점 및 단점을 비교하고자 한다.

4-1. Parallel Loop

이 설계 방법은 그림 12에서 보는 바와 같이 아주 간단한 구조로 되어 있다. 여기에는 단 하나의 feedback 신호인 PES가 필요하다. Closed-loop 전달 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$G_{cl} = \frac{G_1 + G_2}{1 + G_1 + G_2} \tag{3}$$

여기서 $G_1 = C_1 P_1$ 그리고 $G_2 = C_2 P_2$이다. C_1과 P_1은 음성 코일 모터 (voice coil motor: VCM)의 제어기와 플랜트 동역학을 각각 표시하며, C_2와 P_2는 micro-actuator (MA)의 제어기와 플랜트 동역학을 각각 나타낸다. 전체 시스템의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$1 + G_1 + G_2 = 0 \tag{4}$$

외란 억제 전달함수는 다음과 같이 표기된다.

$$G_{di} = \frac{PES}{d} = \frac{1}{1 + G_1 + G_2} \tag{5}$$

수식 (4)에서 보는 바와 같이 전체 시스템의 안정성은 G_1과 G_2 루프를 각각 안정화시킴으로 성취될 수 없다. 다시 말하면 전체 시스템 설계가 각각의 루프를 따로 분리 설계함으로 이루어 질 수 없다. 하지만 단 하나의 feedback 신호로 설계가 가능한 것이 가장 큰 장점으로 볼 수 있다. 또한 dual actuator 제어기의 설계에 있어, VCM과 MA 사이의 상대적 위치 정보가 없는 경우 이 설계 방식은 특별히 유용하다.

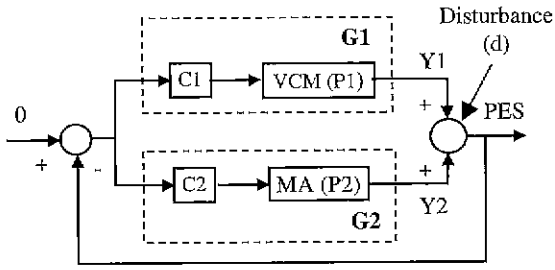

그림 12. Parallel loop.

4-2. Master-slave Loop

이 설계 구조는 그림 13에서 보는 바와 같다. 이 구조의 특징은 micro actuator가 VCM 보다 훨씬 먼저 외란에 반응할 수 있다는 것이다. 따라서 MA 루프가 master 루프(또는 main 루프)가 되며, VCM 루프의 역할은 MA 루프가 운동(또는 위치) 영역을 벗어나지 않도록 즉각 MA 루프를 따라 움직이는 것이다. 따라서 VCM 루프는 slave 루프라 불린다. Closed-loop 전달 함수는 다음과 같다.

$$G_{cl} = \frac{(1 + G_1)G_2}{1 + (1 + G_1)G_2} \tag{6}$$

외란 억제 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$G_{di} = \frac{PES}{d} = \frac{1}{1 + (1 + G_1)G_2} \tag{7}$$

수식 (6) 또는 (7)에서 보는 바와 같이 open-loop 전달함수는

$$G_{ol} = (1 + G_1)G_2 \tag{8}$$

로 표기된다. 결과적으로 두 개의 open-loop가 각각 독립적으로 설계될 수 있다. 하지만 (7)에서 보는 바와 같이, 외란 억제 전달함수의 원하는 특성을 만족하는 설계를 하기는 어렵다. 게다가 이 설계 구조는 PES와 Y_1의 두 개의 신호를 필요로 하고 있다. 즉 VCM과

MA 사이의 상대 변위를 측정할 필요가 있다. 서스펜션에 설치된 저가의 piezoelectric micro actuator에 있어 상대 변위 측정은 쉽지 않다. 이 어려움을 극복할 수 있는 한 방법은 micro actuator의 모델을 사용한 estimator로부터 상대 변위 신호를 취득하는 것이다. 이 경우 micro actuator 모델의 정확도가 아주 중요하다.

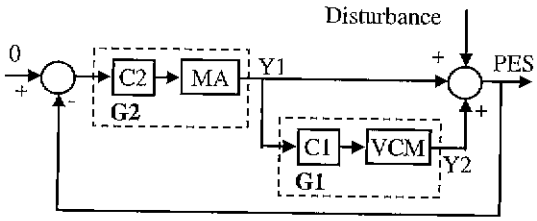

그림 13. Master-slave loop

4-3. Dual Feedback Loop

이 설계 방식은 VCM과 MA의 위치 정보를 feedback 신호로 이용하는 것이다. 이 제어계의 구조는 그림 14에 보는 바와 같다. Closed-loop 전달 함수와 외란 억제 전달함수는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$G_{cl} = \frac{G_1 + G_2 + G_1 G_2}{(1+G_1)(1+G_2)} \tag{9}$$

$$G_{dr} = \frac{1}{(1+G_1)(1+G_2)} \tag{10}$$

또한 전체 시스템의 특성 방정식은 다음과 같다

$$(1+G_1)(1+G_2\}=0 \tag{11}$$

이 설계 방식의 가장 큰 장점은 G_1과 G_2 루프의 설계가 완전히 독립적으로 분리 (decoupled) 될 수 있다는데 있다. 즉 G_1과 G_2 루프를 각각 안정된 시스템으로 설계함으로써 전체 시스템을 안정화시킬 수 있다. 또한 (10)에서 보는 바와 같이 외란 억제 전달함수를 G_1과 G_2 루프 특성에 맞도록 독립적으로 설계할 수 있으며, 결과적으로 전체 시스템의 외란 억제 전달함수를 원하는 모양으로 설계하기가 용이하다. 다시 강조하면 이 설계 방식은 Y_1과 Y_2 신호의 feedback을 필요로 한다. PES 신호는 통상적으로 feedback 신호로 늘 쓸 수 있으므로 Y_1 또는 Y_2 신호 중 하나만 더 측정할 수 있으면 된다.

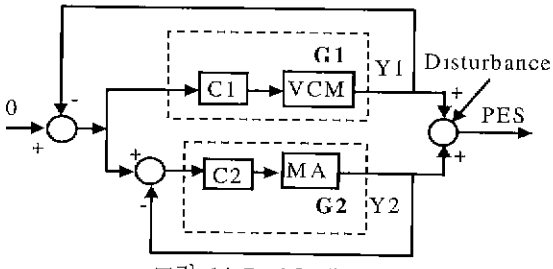

그림 14. Dual feedback loop.

4-4. Decoupled Master-Slave Loop

네 번째 설계방식은 그림 15에 나타나 있다 [25]. 이것은 이미 기술한 master-slave 설계 구조와 유사한데, feedforward 루프를 더함으로써 완전히 분리된 (completely decoupled) 제어계를 구성하게 된다. 따라서 4.3절에서 이미 설명한 원리와 동일한 방정식, 즉 (9), (10)과 (11)이 같이 적용된다. Open-loop 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$G_{ol} = G_1 + G_2 + G_1 G_2 \tag{12}$$

여기에서도 추가적인 위치 측정 또는 변위를 estimate하는 것이 필요하다 (Y_1 또는 Y_2). 하지만 위에서 설명한 dual feedback loop 설계 방식과 달리 단 하나의 PES feedback 루프만 있으면 된다.

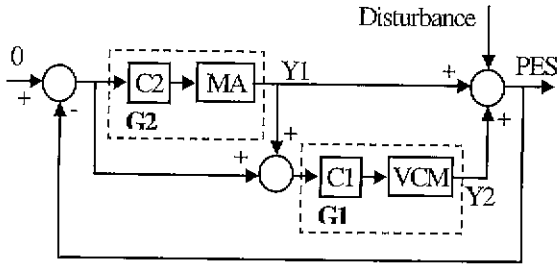

그림 15. Decoupled master-slave.

4-5. Dual loop 제어계 설계에 대한 요약

위에서 기술한 dual loop 제어계에 대한 설계 방식 중에서 parallel-loop와 decoupled master-slave loop가 가장 실용 가능성이 많은 것으로 평가된다. Dual loop가 됨에 따라 제어기 설계를 위한 변수가 늘어나며 이에 따라 제어기의 tuning이 쉽지가 않게 된다. 간단한 PD(proportional-derivative) 또는 lead 제어기에서 μ -synthesis를 이용한 고차의 제어기에 이르기까지 여러 설계 방식이 제안되었다[22]. 또한 제어계를 dual-input/single-output (DISO)로 해석하여 두 개의 single-input/single-output (SISO)로 전환한 후 제어기를 설계하는 방법이 제안되어 있다. 이것을 PQ 설계 방법이라 부른다[26].

5. 전망과 맺음말

디지털 카메라, 초소형 휴대용 컴퓨터(hand-held PC), PDA(personal data assistant), GPS(global positioning system), 인터넷 겸용 휴대용 전화기 등의 보편화로 저렴한 가격의 대용량 정보 저장기기에 대한 수요가 늘어가고 있다. 이에 따라 초소형 디스크 드라이브의 시장이 형성됨에 따라, 이미 IBM에 의하여 1 인치(25.4 밀리미터) 마이크로 드라이브가 시판되고 있다. 이 작은 장치 안에 dual actuator를 장착하는 것이 또한 어려운 기술적 문제로 등장할 것이다.

가까운 장래에 실용화될 고화질 디지털 TV의 실용화는 PC와 TV와의 구분을 어렵게 할 것이다. 최근에는 가전용품의 전산· 디지탈화를 위한 연구가 진행 중이며 이를 통상 digital appliance라 한다. 멀지 않은 장래에 집안의 모든 장치를 전산 제어화한 주택이 등장하리라는 예측이 나오고 있다. 이를 위하여 집안에 LAN (local area network)이 설치될 것이며, 모든 디지털 정보를 한 곳에 저장할 수 있는 분리형 정보 저장기기가 필요하게 된다. 이러한 수요를 충족시키기 위한 정보 저장 시스템을 SAN (storage area network), NAS (network-attached storage)라 부르며, SAN은 중대형 사업체를, NAS는 소형 사업체 또는 가정을 대상으로 하고 있다.

정보 저장에 대한 수요가 계속 증가하는 한 디스크 드라이브의 저장 용량은 계속 급격하게 늘어갈 것이다. 기존의 디스크 드라이브 기술을 계속 개량하여 트랙 밀도를 높이는 노력은 계속될 것이지만 (이를 single actuator extendibility라 함) 앞에서 서술한 바와 같이 서보 알고리듬, 기계 요소의 개량 및 대체는 곧 한계에 달해 획기적 기술의 적용 없이는 더 이상 저장 용량을 늘릴 수 없을 것으로 예상된다. 이 한계를 몇 년 전에는 25,000 TPI (대략 1 밀리미터 당 1000 트랙 정도)로 예측하였다. 지금 현재 디스크 드라이브 업계의 전반적인 예측은 dual actuator를 쓰지 않고도 35,000 내지 40,000 TPI 까지 가능할 것으로 보고 있다. Dual actuator를 사용한 디스크 드라이브는 올해 (2000년도) 말이나 내년 초에 등장할 것이다.

가장 먼저 실용화될 dual actuator 기술은 "서스펜션에 장착된 피에조 모터"가 될 것이다. 이 기술이 이후 몇 년간 더 사용될지는 예측하기 힘들지만, 그 다음 기술 단계인 "슬라이더에 장착된 피에조 모터"가 실용화 될 것으로 본다. MEMS microactuator는 앞으로도 몇 년 더 개발 단계를 거쳐야 실용화 될 것으로 예측되며, 실용화하는데 가장 큰 걸림돌은 생산단가와 장기간 사용시 보장해야 하는 신뢰도 (long-term reliability)이다.

이 dual actuator가 실용화되는데 있어 다른 관련 기술도 같이 발전하여야 한다. 그 첫 번째는 복잡한 dual loop 서보 알고리듬을 처리할 수 있는 강력하고 저렴한 마이크로 프로세서가 필수적이다 2000 Hz 이상 되는 서보 bandwidth를 실현하기 위해서는 최소한 20,000 Hz 이상의 sampling frequency가 필요하며, 제어계의 성능과 안정도를 높이기 위해서는 알고리듬 계산에 의한 시간 지연을 최소한으로 줄여야 한다. 두 번째로 중요한 것은 servo track writer (STW) 기술의 발전이다. Dual actuator를 이용하여 50,000 TPI를 실현할 수 있을지라도 50,000 TPI에 해당하는 서보 트랙을 신뢰도 높게 쓸 수 없다면 dual actuator도 쓸모가 없는 것이 될 것이다. 특히 트랙밀도가 증가함에 따라 트랙 writing 시간이 길어지므로 생산단가를 최소한으로 하기 위해서는 STW의 성능을 향상시키는 것이 절대적으로 필요하다.

하드 디스크 드라이브 (HDD), 테이프 드라이브, CD-ROM, DVD, 반도체 메모리 등은 각각 장점과 단점이 있으므로 서로 상호 보완적으로 공존할 것으로 전망된다. 현재의 정보 저장용량을 획기적으로 늘리기 위한 많은 새로운 아이디어들이 나오고 있으며, 실리콘 밸리를 중심으로 이 아이디어들을 실현시키기 위하여 크고 작은 회사들이 연구와 개발을 계속하고 있다. 그 중에서도 HDD의 자기 기술과 CD-ROM의 광학 기술을 합성하여 한꺼번에 수십 배의 용량증가를 가능케 하는 near-field recording과 far-field recording의 실용화에 기대를 거는 사람들도 많다. 하지만 HDD의 급격한 용량증가와 가격의 저렴화로 이들 대체 기술에 대한 매력이 떨어지고 있다. 지금까지의 정보저장 방식과 전혀 다른 SPM (scanning probe microscopy)를 이용한 정보저장 기술이 제안되어 연구 중에 있다. 이 기술 안에는 다음과 같은 네 가지의 다른 방식이 있다[27]. 1) STM (scanning tunneling microscopy), 2) AFM(atomic force microscopy), 3) MFM(magnetic force microscopy), 4) SNOM(scanning near-field optical microscopy). 이중에서 STM방식에 의한 이론적 면적 밀도는 6 Pb/in^2 (1 페타 = 10^{15})이며, 현재 HDD의 면적밀도를 10 Gb/in2로 볼 때 600,000배에 달한다. 그림 16은 IBM에서 개발 중인 AFM을 이용한 정보 저장기기의 prototype을 보여주고 있다. 이 기술들은 현재 실험실에서 연구되고 있으며 실용화하기까지는 많은 노력과 시간이 요구된다

본 글에서는 HDD와 관련된 기술적 난제와 dual actuator 기술에 대하여 간략하게 기술하였다. 정보 저장용량의 급격한 증가로 인해 새로운 장치, 기계요소, 첨단 서보 알고리듬에 대한 지속적인 연구개발이 필요하다. 이 새로운 기술이 실용화되기 위해서는 무엇보다도 성능이 우수하면서도, 저렴하고 오랜 기간 동안 신뢰성이 보장되어야 한다.

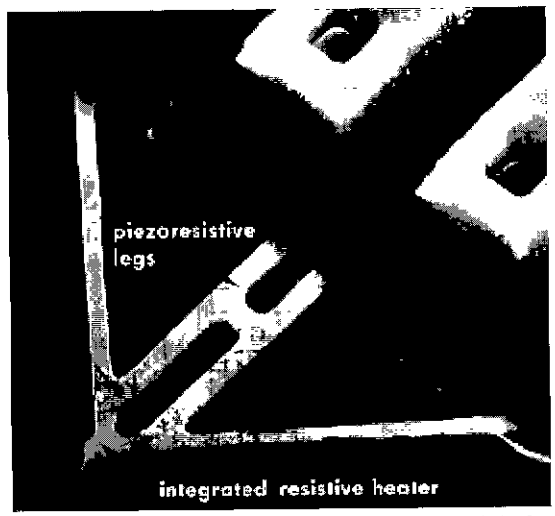

그림 16. AFM (Atomic Force Microscopy)을 이용한 정보 저장기기의 prototype.

참고문헌

[1] J. M. Harker, D .W. Brede, R. E. Pattison. G. R. Santana, and L. G Taft, "A quarter century of disk file innovation," *IBM J. of Research and Development*, vol. 25, no. 5, pp. 677-689, Sep. 1981.

[2] 이호성, "하드 디스크 드라이브 서보 제어기의 설계." *ICASE Magazine* (제어· 자동화· 시스템공학회지), vol 4, no. 3, pp.22-28, May 1998.

[3] 정정주, 이승희, 추상훈, "디스크 드라이브의 기술동향과 제어기술," *ICASE Magazine* (제어· 자동화· 시스템공학회지), vol. 4, no. 3, pp.15-21, May 1998.

[4] L. S. Fan, H. H. Ottesen, T. C. Riley, and R. W. Wood. "Magnetic recording head positioning at very high track densities using a microactuator-based two-stage servo system," *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 42, no. 3, pp. 222-233, June 1995.

[5] K. Eddy, J. Steele, and W. Messner, "Bias in disk drive rotary actuators: characterization. prediction. and compensation," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 33, no. 3. pp. 2424-2436, May 1997.

[6] L. Guo, H. S. Lee. A. Husdson, and S.-H. Chen, "A comprehensive time-domain simulation tool for HDD servo control design and mechanical enhancement," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35, no. 2. pp. 879-884, May 1999.

[7] H. S. Lee and L. Guo, "Servo performance prediction for high capacity disk drives," *Proc of the 1998 American Control Conference*, pp. 3050-3054, June 1998.

[8] D. Abramovitch, T Hurst. and D. Henze. An Overview of the PES Pareto Method for Decomposing Baseline Noise Sources in Hard Disk Position Error Signals, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 34, no. 1, pp. 17-23, January 1998.

[9] S. Koganezawa, K. Takaishi, Y. Mizoshita, Y. Uematsu, T. Yamada, S. Hasegawa, and T. Ueno, "A flexuaral piggy-back milli-actuator for over 5Gbit/in2 density magnetic recording," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 32, no. 5. pp. 3908-3910, Sep. 1996.

[10] K. Mori, T. Munemoto, H. Otsuki, Y. Yamaguchi, and K. Akagi, "A dual-stage magnetic disk drive actuator using a piezoelectric device for a high track density." *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 27, no. 6, pp. 5298-5300. Nov. 1991.

[11] K. Takaishi, T. Imamura, Y. Mizoshita, S. Hasegawa, T. Ueno, and T. Yamada, "Micro-actuator control of disk drive." *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 32, no. 3, pp. 1863-1866, May 1996.

[12] S. Koganezawa. Y. Uematsu, and T. Yamada, "Dual-stage actuator system for magnetic disk drives using a shear mode piezoelectric microactuator," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol 35, no. 2, pp. 988-992, Mar. 1999.

[13] L. Guo, D Martin and D. Brunnett, "Dual-stage actuator servo control for high density disk drives," *Proc. of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. pp. 132-137, Sep. 1999.

[14] R. B. Evans, J. S. Griesbach, and W. C. Messner. "Piezoelectric microactuator for dual stage control," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35, no. 2. pp. 977-982, Mar. 1999.

[15] Y. Soeno. S. Ichikawa. T. Tsuna, Y. Sato, and I. Sato. "Piezoelectric piggy-back microactuator for hard disk drive," *IEEE Trans. on Magnetics*. vol 35. no. 2, pp. 983-987. Mar. 1999.

[16] D. K. Miu and Y.-C. Tai, "Silicon microstructures and microactuators for compact computer disk drives," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 52-57, Dec. 1994.

[17] V. Temesvary, S. Wu, W. H. Hsieh, Y. C. Tai, and D. K. Miu, "Design, fabrication. and testing of silicon microgimbals for super-compact rigid disk drives," *J. of Micro-electromechanical Systems*, vol. 4, no 1, pp. 18-27, Mar. 1995.

[18] L. S. Fan, et al., "Electrostatic microactuator and design considerations for HDD applications," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35. no. 2. pp. 1000-1005, Mar. 1999.

[19] H. Fujita, K. Suzuki, M. Ataka, and S Nakamura. "A microactuator for head positioning system of hard disk drives " *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35, no. 2, pp. 1006-1010, Mar. 1999.

[20] S. Nakamura. K. Suzuki. M. Ataka, and H. Fujita. "An electrostatic micro actuator for a magnetic head tracking system of hard disk drives," *Int. Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment*, Tokyo, pp. 58-63. July 1997.

[21] S. K. Aggarwal, D. A. Horsley, R. Horowitz, and A. Pisano, "Micro-actuators for high density disk drives," *Proc. of the 1997 American Control Conference*, pp. 3979-3982, June 1997.

[22] D. A. Horsley, D. Hernandez, R. Horowitz, A. K. Packard. and A. P. Pisano, "Closed-loop control of a microfabricated actuator for dual-stage hard disk drive servo systems," *Proc. of the 1998 American Control Conference*, pp. 3028-3032, June 1998.

[23] D. A. Horsley, N. Wongkomet, R. Horowitz, and A. P. Pisano, "Precision positioning using a microfabricated electrostatic actuator," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35. no. 2. pp. 993-999, Mar. 1999.

[24] T. Semba, T. Hirano, J. Hong, and L.-S. Fan, "Dual-stage servo controller for HDD using MEMS microactuator," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35, no. 5, pp. 2271-2273. Sep. 1999.

[25] W. Guo, S. Weerasooriya, T.B. Goh, H. Li, C. Bi, K.T.

Chang, and T. S. Low, "Dual stage actuators for high density recording memory devices," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 34, no. 3, pp. 450-455, March 1998.

[26] S. J. Schroeck and W. C. Messner, "On controller design for linear time-invariant dual-input single-output systems," *Proc. of the 1999 American Control conference*, pp. 4122-4126, June 1999.

[27] S. Hosaka, "SPM based storage," *IEEE Trans. on Magnetics*. Vol. 32, No. 3, pp. 1873-1877, May 1996.

이 호 성

1979년 서울대학교 기계설계학과 (공학사). 1981년 서울대학교 기계설계학과 (공학석사). 1987년 Stanford University 기계공학과 (엔지니어 학위). 1994년 University of California at Berkeley 기계공학과 (공학박사). 스탠포드 대학에서는 기구학, 로보틱스, 센서를 이용한 자동화 기술을 연구하였음. 1988년부터 1993년까지 IBM Corporation에서 고성능 반도체 packaging의 생산 및 검사 자동화를 위한 장비 개발에 참여하였음. 1994년부터 1996년까지 Seagate Technology의 Advanced Concepts 연구소에서, 1996년 이후 현재 실리콘 밸리 소재 Maxtor Corporation의 Advanced Technology Group에서 연구원으로 일하고 있음. 관심 분야는 정밀기계 위치제어, 정보저장기기를 위한 제어 기술 개발, 메카트로닉 시스템 설계.

Lin Guo

1984년 Shanghai Jiao Tong University (Shanghai, China) 기계공학과 (공학사). 1987년 McGill University (Montrial. Canada) 기계공학과 (공학석사). 1996년 University of California at Berkeley 기계공학과 (공학박사). 1988년부터 1993년까지 Australia의 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization에서 실험 과학자로 일하였음. 1996년 이후 현재 Maxtor Corporation의 Advanced Technology Group에서 일하고 있음. 관심 분야는 micro actuator 제어기 개발, 디지털 위치 제어, 최적 제어, system identification, 디스크 드라이브 동역학.