

◆특집◆ 정보저장기기

고기록밀도 HDD 개발 기술의 동향

박영필*, 양현석*

Technology Trends for High Recording Density in HDD

Young-Pil Park*, Hyun-Seok Yang*

Key Words : Hard Disk Drive(하드 디스크 드라이브), Air Bearing(공기베어링), Head Gimbal Assembly(헤드 감발 어셈블리), Dual Actuator(이중 구동기), Perpendicular Magnetic Recording(수직자기기록)

1. 서론

1957년 IBM에서 발표한 최초의 하드디스크 드라이브 (Hard disk drive, HDD)인 RAMAC (IBM 350)이래 수 십년 동안 HDD는 대표적인 정보저장기기로 눈부신 발전을 이루었다. 기록밀도의 관점에서 살펴보면, 개발 초기인 1950년대 제품은 선기록 밀도(Bits Per Inch, BPI)가 100 BPI, 트랙 밀도(Tracks Per Inch, TPI)가 20 TPI인 지름 24인치, 50장의 디스크를 사용하여 5 Mbyte의 정보 용량을 저장할 수 있었으나 현행 제품의 면기록밀도(Areal Recording Density)는 이미 15 G비트/(인치)²를 넘었다. HDD 기록밀도의 발전은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 1989년까지 약 매년 30%의 성장을 보였으나 미국의 IBM에서 MR(Magnetoresistive) 헤드의 개발로 당시 제품의 몇 십 배에 해당하는 1 G비트/(인치)²의 면기록밀도를 갖는 HDD를 발표한 이후 HDD 기록밀도는 매년 60%가 성장하였고 최근에는 약 100%의 빠른 성장을 보이고 있다. 고밀도 정보저장기기는 21세기가 정보화 사회로 컴퓨터의 멀

티미디어화, 소프트웨어의 user friendly화와 인터넷 사용의 증가로 중요성이 증대되고 있다. 특히 앞으로 정보의 디지털화가 급속도로 증가 할 것으로 예상됨에 따라 대용량 정보저장기기의 필요성은 더욱 더 강조 될 것이다. 최근의 자료에 의하면 세계적으로 기록된 자료의 1% 정도만이 정보저장기기에 수록되어 있고 4% 정도는 사진필름, 그리고 95% 정도는 아직도 종이에 기록되어 있어 아직도 정보의 디지털화가 미미한 실정이다.

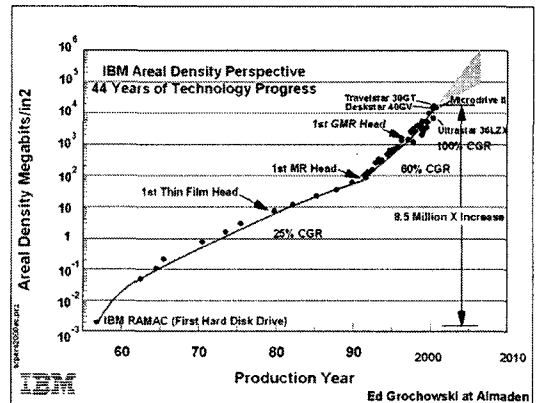


Fig. 1 Areal density perspective (IBM)

기록 밀도가 증가함에 따라 제한된 공간 내에 많은 데이터를 저장하고 재생하기 위해 필요한 기술의

* 연세대학교 정보저장기기 연구센터

Tel. 02-2123-2814, Fax. 02-312-2153

Email park2814@yonsei.ac.kr

정보저장기기, 특히 HDD, ODD의 진동 해석 및 정밀 제어에 관심을 두고 연구하고 있다.

정밀도는 계속적으로 증가해 왔으며 마이크로 수준에서 나노 수준으로 고정밀도를 요구한다. 따라서 정밀도를 높이기 위한 다양한 메카니즘과 제조 방법 등 첨단 기술들이 개발되었다. 그러나 지금까지 대부분의 기술은 주로 미국의 선진업체 및 연구 기관에서 선점하고 있는 실정이다. 고기록밀도 HDD의 개발을 위해 미국은 정부 주도하에 NSIC(National Storage Industry Consortium)를 구성하였으며 일본에서는 Hitachi, Fujitsu, NEC, Toshiba 등과 대학들이 SRC(Storage Research Consortium)를 구성하여 기술적 우위에 있는 미국을 추격하고 있다. 국내에서도 연세대학 정보저장기기 연구 센터가 설립되어 산학 컨소시엄을 구성하여 활발한 연구를 수행하고 있다.

이와 같은 선진국에서의 활발한 연구는 정보저장기기 산업이 기술 집약적 산업으로서 정보화 산업에서 핵심 산업임을 단적으로 말해 준다고 할 수 있다. 기록 밀도를 늘리기 위해서는 데이터를 고밀도로 저장할 수 있는 미디어의 개발과 미디어에 데이터를 기록하고 재생할 수 있는 헤드의 개발 그리고 헤드의 부상높이(Flying Height)의 감소로 헤드와 미디어 사이에서 발생하는 다양한 현상과 오염 등 많은 분야의 연구가 있어야 한다. 본 논문에서는 고기록밀도 HDD 개발을 위한 연구분야를 검토하고자 한다.

2. 이중 구동기 및 초정밀 위치 제어기

기록밀도는 트랙밀도와 선기록밀도의 곱으로 표시된다. 앞으로의 기록밀도의 향상은 주로 트랙밀도의 향상을 통해서 이루어질 것으로 예상된다. VCM(Voice Coil Motor) 구동방식의 한계로 예측되던 25,000 TPI를 넘어, 현재 이미 30,000 TPI가 이상의 HDD가 상용화되어 있다. 한편, 트랙밀도의 증가는 트랙의 폭이 좁아짐을 의미하며, 이는 헤드를 트랙 중심에 더욱 더 정밀하게 위치시켜야 함을 의미한다.

HDD에서 헤드의 위치 제어는 헤드를 원하는 위치까지 빠른 시간 내에 이동시키는 Seeking Servo와 헤드를 트랙의 중심에 정확히 위치시키는 Track Following Servo로 구분된다. 이 중에서 증가된 트랙밀도에서도 데이터를 안정적으로 재생하고 기록하기 위해서는 Track Following Servo가 잘 이루어져야 한다. Track Following Servo의 성능은 외란과

Servo 제어기 및 구동기에 의해 결정된다. 따라서 Track Following Servo의 성능을 향상시키기 위해, 외란 자체를 줄이고자 하는 연구와 서보 제어기 및 구동기를 개선하고자 하는 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 일반적으로 트랙밀도의 증가는 더 넓은 서보대역폭을 요구하게 된다. 그런데, 최근에 와서 서보 대역폭의 증가가 더 이상 제어기만의 문제가 아닌 구동기의 문제로 확대되기 시작하였다. VCM의 동특성에 의한 대역폭의 제한과 저주파 영역의 VCM 피봇 베어링 마찰 특성에 의해 VCM만으로는 앞으로의 트랙밀도 증가에 대처하기 힘든 상황에 부딪치게 된 것이다. 이런 상황 속에서 대역폭을 확보하고 마찰 특성을 개선하기 위한 방안으로 이중 구동기(Dual actuator)가 제안되었고, 이에 따라 이중 구동기를 이용한 초정밀 위치 제어에 관한 연구도 부각되게 되었다.

2.1 이중 구동기

이중 구동기 방식은 구동력과 미소 구동기 위치에 따라서 분류할 수 있다[1]. 구동력에 따라서 분류하면 피에조(piezoelectric), 전자력(electromagnetic)과 정전기(electro-static) 방식으로 나눌 수 있다. 미소 구동기 위치에 따라서는 헤드, 슬라이더, 서스펜션 및 E-Block으로 나눌 수 있다. 각각에 적용되는 구동력과 관련하여 살펴보면, 헤드를 움직이는 방식에는 정전기력이 사용되며, 슬라이더를 움직이는 힘으로는 정전기, MEMS에 의해 제작된 미소 구동기의 전자력과 피에조가 이용된다. 서스펜션을 움직이는 힘으로는 전자력과 피에조가 적용되고 있으며, E-Block의 구동은 피에조가 쓰인다.

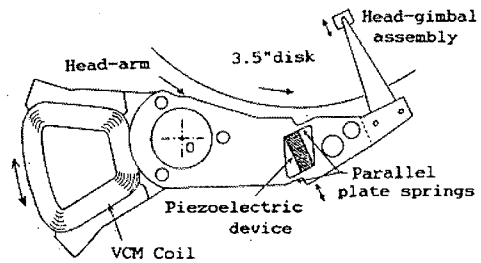


Fig. 2 Stack type PZT to drive E-Block (Hitachi 1991)

피에조를 이용하여 서스펜션을 구동하는 방식에는 Stack, Planar, Shear 타입의 피에조가 적용된 예가

있다. Fig. 2는 1991년 일본 Hitachi사가 발표한 Stack 타입의 피에조를 사용한 예이다. Fig. 3은 이중 구동기 연구를 지속적으로 수행하고 있는 일본 Fujitsu사가 1999년 Shear 타입의 PZT를 사용한 사례이며, Fig. 4는 미국의 Hutchinson사가 Planar 타입의 PZT를 사용하여 개발한 Magnum 서스펜션을 보여주고 있다. Hutchinson사는 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.

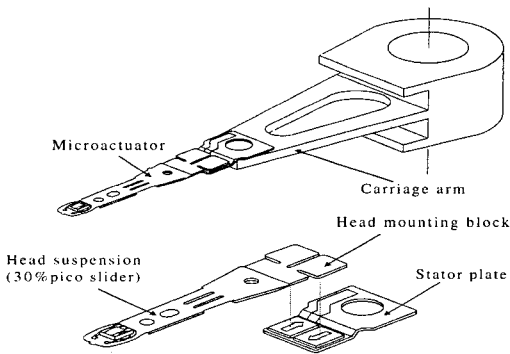


Fig. 3 Shear Type PZT to drive Suspension (Fujitsu 1999)

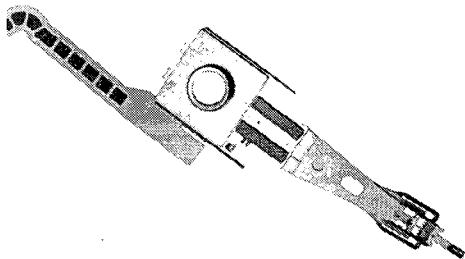


Fig. 4 Planar Type PZT to drive E-Block (HTI 1998)

가장 이상적인 이중 구동기 방식인 헤드를 직접 구동시키는 방식에 대해서는 일본의 동경대학교 Fujitsu사가 정전기 힘을 이용한 연구를 진행하고 있으며, 슬라이더를 구동하는 방식은 일본의 TDK사가 피에조를 이용한 연구를 발표하였고, 미국의

IBM사 및 Caltech에서는 정전기 힘을 이용한 논문을 발표한 바 있다. 이상과 같은 헤드와 슬라이더 구동 방식은 미소 구동기의 추가로 인해 HSA(Head Stack Assembly)에 불필요한 가중을 가할 가능성이 거의 없고, 기존의 서스펜션을 변형 없이 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 제조 단가, 부상 특성과 전기적 노이즈 등을 고려하면 미소구동기를 김발(gimbal) 영역에 위치시킬 시에는 다음과 같은 문제가 야기된다[2]. 김발 영역 내에 미소구동기는 전원 공급을 위한 별도의 선이 필요하게 되는데, 이것이 김발의 움직임을 방해할 수 있으며, 미소구동기에 의해서 야기되는 전기장 및 자기장이 헤드에 간섭을 일으킬 수 있다. 또한, 슬라이더와 김발 사이에 위치한 미소구동기로 전체적인 두께 증가를 가져오게 되어 디스크 사이의 공간을 늘려야 하는 문제가 있으며, 기존의 구조와 비교할 때 상대적으로 비대하여 충격이나 진동에 취약할 수 있다. 반면, 서스펜션을 피에조로 구동하는 방식은 높은 인가 전압이 요구되며, 서스펜션의 공진 주파수에 의해 서보 대역폭이 제한된다는 단점이 있다.

한편, 이중 구동기가 아닌 다른 방법으로 Track Following Servo의 성능을 향상시키고자 하는 연구도 진행되고 있다. VCM을 이용한 제어시스템의 대역폭을 확보하기 위한 방법으로 가속도계를 이용한 연구가 이미 수 년 전에 수행되었으며, 최근에 와서 IBM에서는 좀 더 현실성 있는 방법으로 Active Damping이라는 기술을 고안해 내었다[3]. 이 방법은 VCM의 Butterfly 모드의 크기를 구동기에 장착된 센서를 이용해 능동적으로 줄여주는 것으로, 이 방법에 의해 VCM을 이용한 제어시스템의 대역폭을 더 확보할 수 있게 된다.

고기록밀도 HDD를 위한 트랙밀도 향상의 노력은 계속될 것이며, 이에 대한 대안으로 적용될 이중 구동 방식 중 가장 먼저 실용화될 기술은 피에조를 이용하여 서스펜션을 구동하는 방식이 될 것 이지만 몇 년간 사용될지는 예측하기 힘들며, 이는 앞서 언급한 다른 방식의 문제점들이 해결되는 것에 의존될 것이다.

2.2 초정밀 위치제어기

이중 구동기의 초정밀 위치 제어를 위해 다양한 방법들이 제안되어왔다. Fig. 5~8은 대표적인 이중 구동기 설계 방법으로 제어 시스템 구조의 차이에 의해 고유의 특징을 갖고 있다[4]. 최근 몇 년 전부

터 이중 구동기 자체에 대한 연구가 활발히 이루어졌으나, 이중 구동기를 실제로 HDD에 적용한 연구 사례는 최근에 와서야 소개되었다. 따라서 앞으로는 이중 구동기의 실용화를 목표로 이중 구동기를 이용하여 Track Following Servo의 성능을 향상시키기 위한 다양한 제어 기법이 연구될 것으로 기대된다.

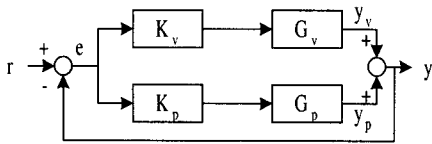


Fig. 5 Parallel Loop System

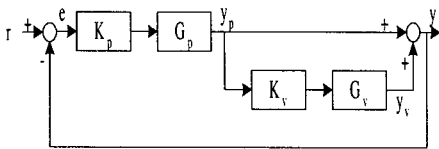


Fig. 6 Master-Slave Loop System

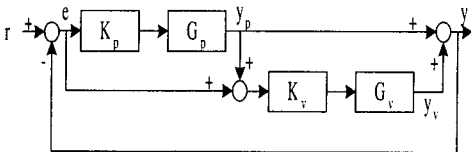


Fig. 7 Decoupled Master-Slave Loop System

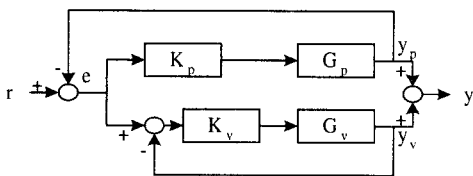


Fig. 8 Dual Feedback Loop System

이중 구동기의 실용화 측면에서 다른 관련된 기술도 같이 발전되어야 하는데, 이는 강력하고 저렴한 마이크로 프로세서의 필요성과 서보 트랙을 신뢰도 높게 쓸 수 있는 servo track writer의 기술 발전이다.

3. Self-Servo Writing 기술

90년대 들어서 HDD로 대표되는 자기기록 방식에 의한 정보저장기기의 저장용량의 증가율은 자기기록 기술의 발전 및 전자·기계장치에 의한 자기헤드 위치 제어기술 등의 지속적인 개발에 힘입어 매년 60% 이상의 성장을 하다가 최근에는 100%의 성장을 보인다. 이러한 발전 속도를 유지하기 위한 노력들이 여전히 계속되고 있지만 많은 부분에서 점차 기술적 한계에 부딪치게 되어 지금까지와는 다른 방향으로의 기술 개발이 점차 중요하게 되었다. Self-Servo Writing 기술 역시 이러한 맥락에서 부각되고 있는 방식이라 할 수 있다.

Servo Writing이란 HDA(Head Disk Assembly)가 조립된 후에, 헤드의 위치 측정에 사용되는 서보패턴을 디스크 면에 기록하는 것을 말하며, 현재까지 HDD 업체에서는 STW(Servo Track Writer)라는 장치를 이용하여 서보패턴을 기록해왔다. STW는 클락 헤드(Clock Head)를 이용하여 HDD 헤드의 트랙 방향 위치를 측정하고, 푸시핀(Push-pin)과 같은 기구를 이용하여 HDA 내부의 헤드를 잡아 반경방향의 원하는 곳에 헤드를 위치시켜 서보패턴을 기록한다. 따라서, STW의 반경 방향 헤드 위치결정기구는 매우 정밀해야 한다.

HDD의 용량이 꾸준히 증가함에 따라서 요구되는 STW의 헤드 위치결정기구의 정밀도가 더욱 커지게 되었고, 이에 따라 STW가 생산비용에 차지하는 비율도 점차로 높아지게 되었다. 또한 증가한 용량에 따른 Servo Writing 시간의 증가로 이전보다 더 많은 STW 장치가 생산에 필요하게 되었다. 이 때문에 최근에 와서 기존의 STW 방식과는 다른 방법으로 서보패턴을 기록하는 Self-Servo Writing 기술이 부각되었다.

Self-Servo Writing 기술을 요약하면, STW의 푸시핀과 클락 헤드의 역할을 본래의 HDD를 통해 수행하는 것이다. 최근에 와서 Self-Servo Writing 기술이 더욱 부각되는 이유는 HDD의 용량 증대로 인해 STW의 정밀도만으로 해결되지 않는 문제가 발생되었기 때문이다. STW에서는 헤드의 위치는 결국 푸시핀과 접촉되는 E-Block의 위치를 측정함으로써 얻어지게 되며, 이 때문에 트랙밀도가 높은 경우에는 STW의 위치 정밀도와 상관없이 디스크나 서스펜션의 진동이 Servo Writing의 정밀도에 심각한 영향을 끼치게 된다. 또한 푸시핀과 E-block의

접촉면도 큰 영향을 끼치게 된다. 게다가 선기록밀도가 증가할수록 디스크의 진동은 STW에서 헤드의 트랙방향 위치 측정에 장애가 된다. STW에서는 디스크의 OD(Outer Diameter) 쪽에 클락 헤드를 위치시키고 이를 통해 트랙방향 위치를 측정하기 때문에, 디스크의 진동은 실제 헤드의 위치 측정에 악영향을 주게 된다. 즉, STW에서는 헤드의 위치 측정 지점이 헤드 자체가 아니기 때문에, 용량이 증가할수록 디스크나 서스펜션의 진동에 의해 서보패턴이 부정확한 위치에 기록된다.

Self-Servo Writing 기술의 기본적인 아이디어는 이미 80년대부터 제안되었지만, 기술 연구는 최근에 와서야 활발히 진행되고 있다. 현재 Self-Servo Writing 기술에 대한 자료는 대부분 IBM의 특허로 발표되었으며, 이 기술이 실제 상용 제품에 적용되었다는 보고는 아직까지 찾아볼 수 없는 실정이다.

IBM의 특허 중 잘 알려진 Self-Servo Writing 기술은, 첫 번째 트랙은 헤드를 Crash Stop을 이용해 OD로 이동시킨 후 자체 타이밍 정보로 서보패턴을 기록하고, 그 이후에는 바로 이전 트랙의 서보패턴 정보를 이용하여 헤드의 반경방향과 트랙방향 위치를 얻어내어 다음 트랙(실제 트랙의 반)의 서보패턴을 기록해나가는 방식이다[5]. Quantum에서는 OD에서 ID(Inner Diameter)로 개루프에 의해 원하는 나선형 트랙 형상이 나올 때까지 헤드를 반복 이동시킨 후, Missing Bit를 포함한 펄스 열에 의해 나선형 트랙을 디스크에 기록하여, 이를 통해 헤드의 반경방향과 트랙방향의 위치를 얻어내어 서보패턴을 기록해나가는 방식을 제안하였다[6]. 이 외에 Self-Servo Writing 방법에서 발생할 수 있는 여러 문제점에 대한 해결 방안이 특허를 통해 발표되어 왔다. 싱가포르의 DSI(Data Storage Institute)에서는 MR 헤드의 사용으로 인한 Self-Servo Writing에서의 문제점에 대한 연구를 발표하였다. 헤드의 반경방향 위치는 트랙 프로파일을 특성을 통해 얻어지는데, MR헤드는 스큐 각(Skew angle)에 따라 트랙 프로파일의 비대칭 특성이 더욱 증가하며, 헤드마다 특성의 편차가 있어 Self-Servo Writing에 장애요소가 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 방편으로 이 연구에서는 MR 헤드의 바이어스 전류의 방향을 전환하는 방법을 사용하였다[7].

최근에 와서 IBM에서는 완전한 Self-Servo Writing 기술은 아니지만, 이에 상당하는 기술인 NCH(No-Clock-Head) Servowriting 이라고 명명된

기술을 개발하였다. 이 기술은 서보 패턴을 트랙방향에 대해 보다 정확하게 맞추기 위한 방법으로 Self-Servo Writing에서 클락 헤드를 대체하는 방법과 동일하다. 앞서 언급했듯이, 클락 헤드를 이용한 서보패턴은 선기록밀도가 증가할수록 디스크 진동의 영향을 많이 받게 되므로, NCH Servowriting과 같이 이웃한 트랙으로부터 타이밍 정보를 얻어내어 서보패턴의 트랙방향 위치를 결정하면 더욱 정확히 서보패턴을 위치시킬 수 있게 되고, 그 결과 서보오차가 줄어들게 된다. 또한 이 기술을 이용하면, 클락 헤드가 HDA 내부로 들어감으로써 발생하는 문제점들이 없어지게 되고, Servo Writing을 행함과 동시에 그 과정을 모니터링할 수 있어, Servo Writing 과정이 효율적으로 이루어지게 된다.

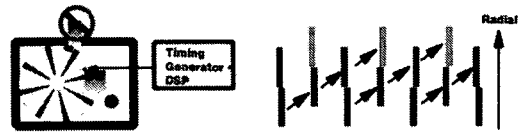


Fig. 9 NCH Servowriting (IBM, 1999)

Self-Servo Writing 기술은 HDD의 용량이 증가할수록 그 중요성이 더욱 커지게 된다. 아직까지 Self-Servo Writing 기술이 어떤 업체에서도 양산에 직접 이용되지 않는 것은 해결되지 않은 문제점들이 아직도 많이 남아 있기 때문일 것이다. 그러나, Self-Servo Writing에 의한 경제적 이익을 생각한다면, 그 문제점들은 반드시 해결될 것이며, 머지 않은 장래에 이 기술이 HDD 양산에 실제 적용될 것으로 기대된다.

4. 초고밀도 미디어 개발

초고밀도 HDD의 개발을 위해서는 기록매체의 개발이 가장 중요한 요소이다. 현존의 기록매체를 이용할 때 면기록밀도가 증가함에 따라 주위의 열에 의해 매체에 기록한 데이터가 사라지기 쉬운 소위 열 요동 문제가 발생하게 된다. 면기록밀도가 높아질수록 열 요동의 영향이 현저해지는 것은 직사각형 기록방식에서 밀도를 높이려면 자성층을 얇게 할 필요가 있기 때문이다. 자성층이 얇아지면 그 안에 포함된 개개의 자성입자의 체적이 줄어들며 자성입자의 체적이 작아지면 입자가 가진 자기 에너지의 크기가 열에너지의 크기를 무시할 수 없

게 되어 버린다. 이러한 조건하에서는 열에 의해 자성입자의 자화 방향이 달라질 확률이 매우 높아지며 약 40G~100G비트/(인치)²가 되면 열 요동에 의한 영향이 무시할 수 없을 만큼 커질 것으로 예상된다. 이 문제를 극복하기 위한 연구가 꾸준히 진행되어왔고 그 중에서 괄목할 만한 연구 결과가 일본의 후지쓰사와 히다치제작소에 의해 2000년 4월에 발표되었다. 후지쓰사에 발표된 내용은 현존하는 직사각형 기록매체에 새로운 층을 구성하는 방법이며 히다치제작소의 방법은 수직자기기록(Perpendicular Magnetic Recording)기술이다. 이 두 기술은 현재의 기록밀도를 상회할 뿐만 아니라 잠재능력이 우수한 것으로 보고되었다.

최근에는 국내의 삼성종합기술원에서 수직자기 기록방식을 이용하여 60G비트/(인치)²의 기록 밀도를 달성하기도 했다.

4.1 직사각형 기록 방식의 개량

후지쓰의 방법은 기존의 층에 안정화층을 추가하여 기록 매체의 열 요동에 의한 신호열화를 대폭 억제하는 기록 매체이다. 안정화층과 기록층 사이에 0.6mm~0.7mm 정도의 Ru 층을 끼워 넣어 양자가 반강자성 결합하는 것을 이용한다. 반강자성 결합한 기록층과 안정화층은 기록층의 자화가 변화하면 안정화층의 자화도 달라지듯이 마치 하나의 층인 것처럼 행동한다. 즉 안정화층을 만들어 기록층의 막 두께가 증가적으로 늘었다고 간주할 수 있는 것이다. 기록층에 포함되는 자성입자의 체적도 늘어난다고 간주할 수 있으므로 그 만큼 열 요동에 강해진다. 이 기록 매체를 SFMedia(Synthetic Ferri Media)라고 부르며 이 매체를 사용할 경우 현재 직사각형 기록 매체의 면기록밀도의 한계를 약 3배 높일 가능성이 있는 것으로 알려져 있다.

4.2 수직 자기기록 방식

수직자기기록방식은 기록매체를 막 두께(수직) 방향으로 자화하여 데이터를 기록하는 방식이다. 수평방향의 자화를 이용하는 직사각형 기록방식과 비교해 기록층이 비교적 두꺼워도 높은 기록밀도를 실현할 수 있다. 즉 기록층 안의 자성입자의 체적을 직사각형 방식보다 늘릴 수 있으므로 소위 열 요동에 대해 원리적으로 강하다. 게다가 기록한 자화는 인접한 비트와 서로 끌어당기는 방향을 향하고 있으므로 선기록밀도를 높여 나갈수록 인접한

기록 비트 사이에 작용하는 반자계가 감소하고 기록한 자화가 안정하게 된다. 직사각형 기록방식보다 기록밀도를 높일 수 있다고 말해지는 까닭은 여기에 있다.

히다치제작소는 초첨단 전자기술 개발기구(ASET), 동북대학 전기통신연구회, 秋田현 고도 기술연구소(AIT)와 공동으로, 수직자기기록방식을 이용해 HDD의 면기록밀도를 52.5G비트/(인치)²로 높일 수 있다는 것을 실증했다. 이 기록밀도로 데이터를 기록/재생했더니 10⁻⁶ 이하라는 실용적인 비트 오류율을 얻을 수 있었다. 이 기록밀도는 현행 제품의 3배 이상에 상당하고, 기존 HDD가 이용하고 있는 직사각형 기록방식에서도 극히 최근 실증된 최첨단 값이다. 이들이 채용한 기록방식은 1979년에 岩崎 교수 등에 의해 제창된 기본적인 방식으로, 단자극 헤드와 2층 수직기록매체를 이용하는 것이다[8]. 이 방식을 이용하는 한 가지 이점은 직사각형 기록방식에서 이용되고 있는 링 헤드를 사용하는 경우와 비교해, 기록매체에 인가하는 자계를 강하게 할 수 있다는 점에 있다. 강한 기록자계를 발생할 수 있다면 보다 보자력이 높은 매체에 데이터를 기입하는 것이 가능해진다. 일반적으로 보자력이 높은 매체일수록 강한 이방성 에너지를 가지기 위해 열 요동에 강하다. 단자극 헤드가 링 헤드와 비교해 강한 자계를 발생할 수 있는 것은 다음 이유 때문이다. 링 헤드에서는 갭에서 새는 자계를 이용해 매체를 자화하므로 매체가 갭에서 떨어질수록 자계는 작아져 버린다. 이에 대해 단자극 헤드와 2층 매체를 이용한 경우는 헤드의 주자극과 기록층 아래에 있는 연결자성층 사이에 강한 자기적인 상호작용이 생긴다. 소위 링 헤드의 갭 사이에 기록층을 배치시킨 듯한 것이다. 이 결과 단자극 헤드와 2층 기록매체를 사용하면 링 헤드보다 강력한 자계를 매체기록층에 인가할 수 있다. 이 실험은 어디까지나 수직 기록방식의 실용화를 겨냥한 첫 걸음에 불과하다. 제품을 만들어 내기 전에 해결해야 할 과제는 많이 남아 있다. 그 일례가 부유자계 문제이다. 부유자계란 다양한 원인에 의해 HDD의 내부에 발생하는 매우 작은 자계를 가리킨다. 예를 들면 통상의 HDD에서는 내장되어 있는 액추에이터나 스핀들 모터로부터, 1~20e의 자계가 자기 헤드부에 인가되어 있다. HDD가 높은 환경에 따라서는 이 정도 이상의 자계가 더해질 가능성도 있다. 이러한 현상이 일어나면 발생하는 자

계의 세기에 따라서는 기록층을 잘못 자화하여 HDD가 놓인 환경에 따라 데이터가 소실할 우려도 있었다.

이 밖의 문제점으로서 2층 기록매체의 연질자성층에서 발생하는 잡음을 염려하는 경향이 있다. 연질자성층에 불규칙한 자구가 발생하고 그것이 이동하여 기록이 불완전해지거나, 재생 파형에 잡음이 더해지는 문제다. 제품화에 즈음해서는 이러한 문제를 미연에 방지하는 연구가 필요해질 것이다.

이밖에도 높은 먼기록밀도에 대응한 서보방식, 신초처리 LSI의 개발이나, 실제 이용시의 온도환경 하에서의 열 요동의 평가 등, 제품화를 겨냥한 과제는 많다.

5. 자기 기록헤드/미디어 인터페이스

HDD의 저장밀도를 향상시키기 위해서는 헤드/디스크 간격을 감소시켜야 한다는 것은 주지의 사실이며, 현재 많은 기관에서 보다 낮은 부상높이를 얻기 위한 연구가 진행되고 있다. 현재 헤드/디스크의 간격은 20~30nm에 이르고 있으며 이 때의 저장밀도는 약 10 G비트/(인치)² 정도이며 2004년에는 100 G비트/(인치)²를 달성하리라 예상되고 있다.

현재 헤드/디스크 interface 기술은 공기 베어링을 이용한 hydrodynamic lubrication을 채택하고 있는데, 이는 디스크 회전에 따라 발생하는 공압을 이용하여 자기 헤드를 탑재한 슬라이더를 부상시키는 기술을 말한다. 그러나 디스크가 회전을 시작하는 경우나 정지하는 경우 슬라이더와 디스크간의 물리적인 접촉이 일어나므로 표면파손이 발생하며, 마찰 입자에 의한 헤드 오염 등이 유발된다[9]. 또한 높은 정마찰력인 스틱션 힘(stiction force)이 발생하게 되는데, 이를 방지하기 위하여 디스크의 안쪽 트랙에는 laser textured landing zone을 위치시켜, 접촉면적을 감소시킴으로써 스틱션을 감소시키고 있다. 그러나 이와 같은 파손을 원천적으로 방지하기 위하여 IBM에서는 load/unload technology를 제안하여 실용화시키고 있으며, Fujitsu에서는 landing zone의 bump 대신 padded slider를 실용화하였다.

특히 최근에는 100~1,000 G비트/(인치)²를 달성하기 위한 많은 연구가 진행되고 있는데, Fig. 10은 100 G비트/(인치)²를 달성하기 위해 요구되는 magnetic spacing과 이에 따른 PTR(Pole-Tip Recession), 부상높이, 코팅두께 등을 나타낸다[10].

여기서 알 수 있듯이 100 G비트/(인치)²를 달성하기 위해서는 헤드 부분에서 PTR과 보호 코팅에 의한 두께는 약 1.5 nm, 디스크에서 윤활(lubricant)과 보호 코팅에 의한 두께는 약 2.5 nm에 이르러야 하며 이 때 부상 높이는 약 6 nm가 되어야 한다.

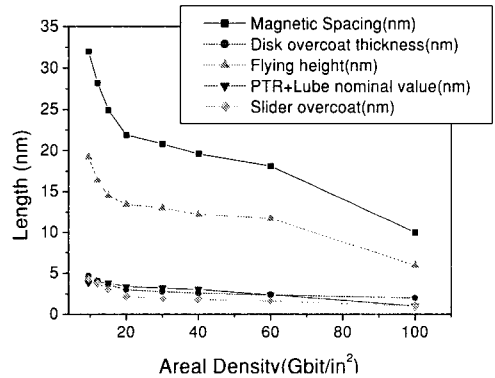


Fig. 10 Magnetic spacing requirement

또한 Fig. 11에서 알 수 있듯이 6 nm의 부상높이를 얻기 위해서는 디스크의 waviness는 약 2 nm, 표면 거칠기는 약 0.2 nm 이하로 유지해야 하며, landing zone의 범프(bump) 높이가 활주 높이(glide height) 보다 작아야 한다. 즉, 원자단위의 표면 거칠기를 가지는 디스크 매체를 개발해야 할뿐만 아니라 수 nm의 레이저 범프를 가공해야 한다.

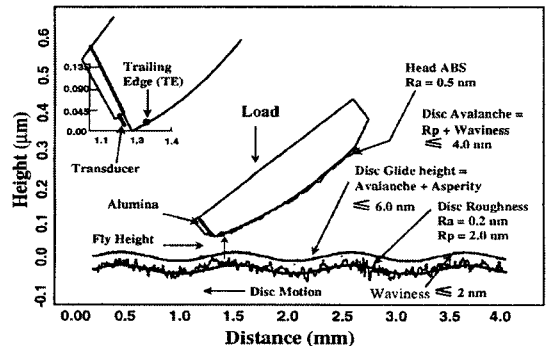


Fig. 11 Head-disk spacing budget for 100 Gbit/in²

그러므로 100 G비트/(인치)²의 저장밀도 달성을 위해서는 보다 미세한 트랙 폭 및 비트 길이의 구현이 가능하도록 적절한 헤드/미디어 재료 및

process 개발이 필요하며, 극소의 부상높이를 안정적으로 유지할 수 있는 HGA(Head Gimbal Assembly) system 및 ABS(Air-Bearing Surface) 설계 기술, 보다 작은 두께를 가지는 코팅 기술 등이 요구된다.

6. 슬라이더 공기베어링 해석 및 설계

디스크 사용 면적의 향상, 보다 낮은 부상높이 실현, disk asperity 등에 대한 우수한 응답 및 충격 성능 등을 위하여 슬라이더는 계속적으로 소형화, 경량화되어 최근에는 0.85×0.7×0.23mm의 크기를 가지는 femto slider가 제시되었다. 또한 안정된 부상높이를 얻기 위하여 다양한 ABS 형상이 제안되었으며, load/unload technology를 위해서는 높은 negative pressure를 가지는 ABS 형상이 제안되고 있다 또한 서스펜션에 의한 예압은 낮을수록 좋은 것으로 보고되고 있다[11].

약 20-30nm 정도의 부상높이가 요구되는 정도가 되면 공기분자의 평균 자유거리와 간극의 크기가 비슷해지므로, 벽면에서의 미끄럼 효과의 고려가 필요하다. 최근까지는 비연속성 효과를 고려하기 위해 Fukui와 Kaneko가 제시한 선형화된 볼츠만 방정식에 의거하여 구한 맥스웰에 의한 식을 사용하고 벽면 미끄럼 효과를 고려하기 위한 Poiseuille 유동항이 포함된 다음과 같은 Reynolds 방정식을 사용한다[12].

$$\frac{\partial}{\partial X}(\bar{Q}PH^3 \frac{\partial P}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\bar{Q}PH^3 \frac{\partial P}{\partial Y}) = \Lambda_x \frac{\partial PH}{\partial X} + \Lambda_y \frac{\partial PH}{\partial Y} + \sigma \frac{\partial PH}{\partial T}$$

여기서 \bar{Q} 는 비연속성을 고려하기 위한 계수.

슬라이더 공기 베어링 효과에 대한 수치해석은 유한차분법(Finite Difference Method), 유한요소법(Finite Element Method) 또는 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하여 해석한다. 과거에는 단순한 레일형상이었던 슬라이더가 최근에는 디스크의 위치에 따른 선 속도 차이에 의한 부상 높이의 변화를 최소화하기 위해 레일의 형상이 2레일에서 3레일로, 사각형 평면에서 복잡한 형태로 설계되고 있다.

7. HDD내의 미세 오염

현재 HDD의 부상높이는 약 20nm 정도로 디스

크 표면의 최대 거칠기 높이와 거의 같고, 향후에는 근 접촉이나 완전 접촉 방식으로 바뀔 것으로 예상된다. 이렇게 낮은 높이로 슬라이더가 디스크 표면을 부상하면서 슬라이더와 디스크사이(Head/slider Disk Interface, HDI)에서 입자의 유입으로 인한 마찰력의 증가나 순간적인 마찰열에 의한 열점(thermal asperity)의 발생 등의 새로운 문제가 나타났다. 특히 입자가 HDI에서 변형될 때 순간적인 마찰에 의해 발생하는 열점(hot spot)은 열적인 저항이 발생되어 자기 저항에 의해 데이터를 입출력시키는 MR 헤드가 정상적으로 작동할 수 없게 함으로써 고밀도 HDD의 정보저장기기로서의 신뢰성을 저하하는 심각한 문제로 대두되었다.

따라서 이런 입자에 의한 오염에 관한 연구는 향후 개발될 고밀도 HDD의 신뢰성과 안정성을 확보하는 데에 활용될 수 있도록 많은 연구가 필요하며 또한 이런 미세 입자 오염제어에 관한 연구가 세계적으로 진행되고 있다.

미국, 일본 등 일부 선진국에서는 오래 전부터 정보저장기기와 관련된 연구를 기업, 연구소 대학 등이 연계되어 진행하였다. 특히 미세 입자가 드라이브 오작동 시키는 것에 관한 연구는 최근에 MR 헤드를 사용하면 대두되었는데, UC Berkeley, 기계공학과와 Computer Mechanics Laboratory에서는 공기 베어링 표면에서의 입자의 거동을 연구하여 슬라이더 레일을 설계하고 있으며, Ohio State University, 기계공학과와 Computer Microtribology and Contamination Laboratory 에서도 드라이브 내의 미세 입자 측정 및 입자가 미치는 영향에 관한 연구를 수행 중에 있다. 또한 해외 연구소로는 IBM Almaden Research Center에서 1990년 대부터 입자에 관한 연구를 수행하여 왔다. 또한 Seagate Technology 역시 최근 입자의 영향에 관한 연구를 수행하고 있다.

8. 그 외의 중요 기술

8.1 Protective coating technique

최근 저장 용량의 확대에 따라 디스크와 슬라이드 간 간격이 나노 수준의 근 접촉 개념으로 전개됨에 따라 디스크의 마모 방지가 HDD의 발전에 매우 중요한 내용이 되었다. 따라서 HDD 표면에 고강도, 내마모 특성을 지니는 DLC 박막이 코팅되는데 기존의 증착방법인 sputtering의 경우 증착되는 탄

소입자가 중성이므로 가속이 불가능하고, 입자가 낮은 에너지를 갖기 때문에 다이아몬드 특성의 결합보다는 흑연에 가까운 박막이 얻어지므로 long time stability가 떨어지는 경향이 있다. 또한 기존의 CVD 공정으로 얻어진 DLC의 경우는 플라즈마 공정에 이용되는 carbon source가 hydrocarbon gas를 사용하기 때문에 DLC내에 기본적으로 수소가 개입되어 DLC의 열적 안정성을 떨어뜨리는 문제점이 제기되었다. 따라서 그 대안으로 Cs⁺ 이온 스퍼터링을 이용한 2차 음이온빔 증착기술이 연구되고 있다. Cs⁺ ion sputtering을 이용한 탄소음이온 증착을 통한 DLC의 합성은 증착되는 탄소입자가 음이온이므로 electrical lens를 이용하여 집속 및 가속이 가능하므로 증착 에너지를 높일 수 있으며, 수소의 개입을 배제할 수 있고, 기존의 이온빔 공정에서는 얻을 수 없었던 대면적의 증착이 가능하여 HDD 보호용 DLC 코팅분야에 매우 적합한 공정이라 할 수 있겠다.

8.2 윤활

현재 윤활은 첨가제를 포함한 Z-dol(PFPE)를 많이 이용하고 있으며, sub-nm의 두께를 실현하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 첨가제의 역할, 헤드/디스크 접촉시 bonded/mobile lubricant의 거동 및 확산 현상 등에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[13]. 부상높이가 감소할수록 헤드/디스크 사이에서 발생하는 마찰학적 거동에 대한 연구는 더욱 중요하게 대두되고 있으며, HDD의 내구성 및 신뢰성에 직접적인 영향을 미친다. 특히 CSS(Contact-Start-Stop)에서 나타나는 stiction, fly stiction 현상, 접촉으로 인한 표면 파손 및 마멸입자에 따른 오염 문제 등이 중요한 문제로 떠오르고 있다. 또한 CSS 기술을 대체할 것으로 예상되는 load/unload 기술에서도 suspension lift와 ramp에서 발생하는 ramp wear 및 loading/unloading이 이루어지는 디스크 바깥 트랙에서 발생하는 impact wear 등에 대한 연구가 수행되었으며, 현재 마찰학적 성능을 향상시키기 위하여 많은 연구가 수행되고 있다.

8.3 Ultra-smooth disk

슬라이더와 디스크의 물리적인 접촉을 제거하기 위해서는 디스크의 waviness는 2 nm이하를 가져야 하며, 원자단위의 거칠기를 가져야 한다. 이를

위해서는 고속으로 회전하는 디스크의 run-out을 감소시켜야 하므로 substrate는 높은 강성 및 damping capacity를 가져야 한다. 현재 glass, glass-ceramic, alumina, silicon carbide, zirconia 등에 대한 연구가 진행되고 있다.

9. 결론

정보저장산업의 중요성은 사회의 정보화로 인해 급속도로 증가하고 있으며 광기록방식, 광자기 기록방식, 반도체기록방식등 다양한 정보저장기기가 개발되어 정보저장기기산업을 선점하기 위한 기술 개발에 총력을 기울이고 있다. 정보저장기기 연구 개발의 흐름은 소형, 고밀도, 고속도, 저가격화이다. 그 중에서도 고기록밀도를 위한 연구는 비트당 가격을 결정하는 핵심 연구로 경제성 측면에서 매우 중요하다. 그러나 고기록밀도를 위해서는 기술의 정밀도가 나노 수준을 요구하는 첨단 기술 집약적인 산업이기 때문에 몇몇 기술 선진국에서 대부분의 기술을 선점하고 있으며 기술 개발 속도가 가속되고 있는 실정이다. 특히 정보저장기기 중에서도 HDD는 매년 약 100%의 기록밀도의 향상을 보일 만큼 개발 속도가 빠르게 진행되고 있다. 기록밀도의 향상을 위해서는 초고밀도 미디어, 정밀한 위치제어를 위한 제어기 및 구동기 개발과 헤드의 부상 높이의 감소에 따른 오염과 헤드 미디어 간의 인터페이스 등 다각적이고 심도 있는 연구가 수행되어야 한다[14].

참고문헌

1. Evans R.B., Griesbach J.S. and Messner W.C., "Piezoelectric Microactuator for Dual Stage Control," IEEE Trans. on Mag., 35, pp. 977-982, 1999.
2. Evans R. and Carlson P., "Two-stage microactuator keeps disk drive on track," Data Storage, 5, Issue 5, 1998.
3. F.Y. Huang, T. Semba, W. Imano, and F. Lee, "Active Damping in HDD Actuator," APMRC 2000.
4. 이호성, Lin Guo, "하드디스크 드라이브 Dual Actuator 기술의 동향," ICASE Magazine, Vol. 6, No. 2, 2000.

5. D.H. Brown, T.C. Christensen, E.A. Cunningham, W.A. Rogelstad, "Self Servo Writing File," Patent No. US6,040,955, 2000.
6. P.A. Swearingen, S.H. Shepherd, "System for Self-Servowriting a Disk Drive," Patent No. US5,668,679, 1997.
7. B. Liu, S.B. Hu and Q.S. Chen, "A Novel Method for Reduction of The Cross Track Profile Asymmetry of MR Head Curing Self Servo-Writing," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 4, 1998.
8. Iwasaki, S., Nakamura Y., and Ouchi, K., "Perpendicular Magnetic Recording with a Composite Anisotropy Film," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-15, pp. 1456-1458, Nov. 1979.
9. K. H. Cha, K. H. Chung, and D. E. Kim, "Effect of Slider Load on the Wear Debris Contamination Tendency of Head/Slider," IEEE Trans Magn., Vol. 35, pp. 2355~2357, 1999.
10. A. K. Menon, "Interface Tribology for 100 Gb/in²," Tribology International, Vol. 33, pp. 299~308, 2000.
11. Q-H Zeng, D. B. Bogy, "Slider Air-Bearing Design for Load/Unload application," IEEE Trans Magn., Vol. 35, pp. 746~751, 1999.
12. Fukui, S., and Kaneko, R., "A Database for Interpolation of Poiseuille Flow Rates for High Knudsen Number Lubrication Problems," ASME Journal of Tribology, Vol. 112, pp. 78-83, 1990.
13. M. S. Jhon, Phillips, D. Vinay, S. J. Messer, C., "The Dynamic Behavior of Thin-Film Lubricants," Digest of INTERMAG 99. pp. DA01 -DA01, IEEE International, 1999.
14. D. E. Kim, J. W. Park, D. K. Han, Y. S. Park, K. H. Chung, and N. Y. Park, "Strategies for Improvement of Tribological Characteristics at the Head/Disk Interface," IEEE Trans Magn., In press, 2001.