



고밀도·소형화를 위한 하드디스크 기술동향

글 ■ 박영 필, 양현 석, 박노 철 / 연세대학교 정보저장기기연구센터, 교수 e-mail ■ park2814@yonsei.ac.kr

이 글에서는 차세대 정보저장 기술인 초고밀도 미디어 기술, 초소형 하드디스크 설계기술, 램프토딩 기술 그리고 Air-Bearing Surface 설계 기술에 대해 소개한다.

우리는 현재 수백Gbit/in² 정보기록 밀도 시대를 눈앞에 두고, 본격적인 인터넷시대/동화상 통신 시대를 맞이하고 있으며, 대용량 데이터를 전송하고 저장하는 스토리지 기술 혁명이 본격화된 시점에 서 있다. 자기 기록, 광기록 등의 기술분야에서 세계의 많은 연구 기관들이 각종 기록을 갱신 중인 상황이다. 휴대용 저장장치도 개인 이동 컴퓨터의 중요 부분으로 자리잡아 가고 있으며, 이 분야도 역시 대용량화를 추구하고, 발전하고 있다.

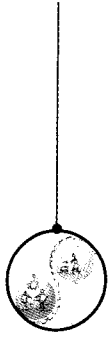
정보저장기기 분야에서 기술혁신의 속도는 반도체를 상회할 만큼 거세다. 21세기에 접어들면서 점점 그 발전속도가 빨라져서 앞으로의 2~3년을 예견하는 것이 가능한 정도이고, 2010년 이후에는 어느 정도의 모습이 될 것인지, 목표도 세울 수 없다고 하는 것이 실상이라고 할 수 있다. 이제 21세기 초인 현시점에 있어서, 컴퓨터의 세대 보급률은 급속히 증가하고 있으며, 기업에서의 1인 당 PC보유 대수도 거의 같은 경향으로 증가하고 있다. 또한, 이들이 인터넷 등의 네트워크에 결합되고, 정보의 송신이나 수집,교환이 보다 빈번하게 행해지면서 정보

저장기기는 이들이 이용하는 모든 장치에 필수적인 것이 되었고, 성능(용량, 속도, 신뢰성 등) 또한, 취급하는 정보의 분량이 증가함에 따라, 더욱 더 엄격하게 요구되고 있다. 이러한 고밀도, 고속, 고정밀의 정보 저장기기 시스템의 구현을 위해서 많은 차세대 기술들이 연구되었고, 발전되고 있다.

차세대 정보저장 기술

초고밀도 미디어 기술

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



어 버린다. 이러한 조건 하에서는 열에 의해 자성입자의 자화방향이 달라질 확률이 매우 높아진다. 약 40~100Gbit/in²가 되면 열 요동에 의한 영향이 무시 할 수 없을 만큼 커질 것으로 예상된다. 이 문제를 극복하기 위한 연구가 꾸준히 진행되어 왔고 그 중에서 괄목할 만한 연구 결과가 일본의 후지쯔사와 히타치 제작소에 의해 연구되었다. 후지쯔사에서 발표된 내용은 현존하는 직사각형 기록매체에 새로운 층을 구성하는 방법이며 히타치 제작소의 방법은 면 기록 밀도의 혁신적인 증가를 위한 수직기록기술이다. 이 두 기술은 현재의 기록밀도를 상회할 뿐만 아니라 잠재능력이 우수한 것으로 나타나고 있다.

직사각형 기록 방식의 개량

후지쯔의 방법은 그림1 에서 보는 바와 같이 기존의 층에 안정화 층을 추가하여 기록 매체의 열 요동에 의한 신호열화를 대폭 억제하는 기록 매체이다. 안정화층과 기록층 사이에 0.6nm~0.7nm 정도의 Ru 층을 끼워 넣으면 양자가 반강자성 결합하는 것을 이용한다. 반강자성 결합한 기록층과 안정화층은 기록층의 자화가 변화하면 안정화층의 자화도 달라지듯이 마치 하나의 층인 것처럼 행동한다. 즉 안정화층을 만들어 기록층

의 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 면 기록밀도의 한계를 약 3배 정도 높일 가능성이 있는 것으로 알려져 있다. 각각의 층의 두께는 같으므로 기록층의 두께가 3배가 되는 것과 같은 효과를 기대할 수 있다. 자성입자의 체적도 3배로 늘어난다고 생각하면 자성입자의 자기에너지도 마찬가지로 3배가 된다. 동일한 자성재료를 사용한 경우, 자기에너지의 크기는 체적에 비례하기 때문이다. 이번 기록매체가 기존 직사각형 기록매체와 비교해 기록밀도의 한계를 3배로 끌어올릴 수 있다고 하는 근거는 여기에 있다.

수직 자기기록 방식

삼성종합기술원 등에서 기록밀도를 높이기 위한 방안으로 활발히 연구하고 있는 수직 기록방식은 그림 2에서 보는 바와 같이 기록매체를 막 두께(수직) 방향으로 자화하여 데이터를 기록하는 방식이다. 수평방향의 자화를 이용하는 직사각형 기록방식과 비교

해 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 선 기록밀도를 높여 나아갈수록 인접한 기록 비트 사이에 작용하는 반자계가 감소하고 기록한 자화가 안정하게 된다. 직사각형 기록방식보다 기록밀도를 높

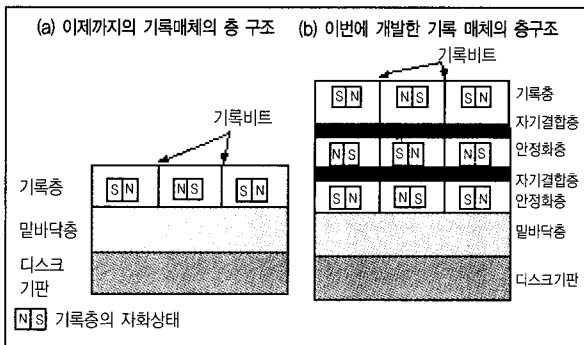


그림 1 후지쯔 사가 개발한 기록매체(SFMedia)

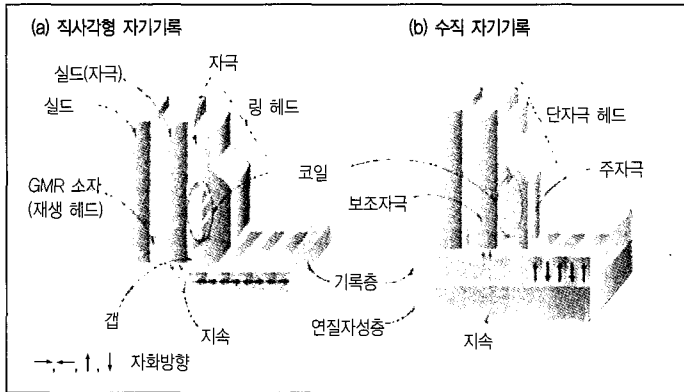


그림 2 기록 방식에 따른 기록 방법의 비교

일 수 있는 이유가 여기에 있다.

히타치제작소에서 채용한 기록방식은 단자극 헤드와 2층 수직기록매체를 이용하는 것이다. 이 방식을 이용하는 한 가지 이점은 직사각형 기록방식에서 이용되고 있는 링 헤드를 사용하는 경우와 비교해 보면 기록 매체에 인가하는 자계를 더 강하게 할 수 있다는 점이다. 강한 기록자계를 발생시킬 수 있다면 보다 보자력이 높은 매체에 데이터를 기입하는 것이 가능해진다. 일반적으로 보자력이 높은 매체일수록 강한 이방성 에너지를 갖기 위해 열 요동에 강하다. 단자극 헤드가 링 헤드와 비교해 강한 자계를 발생시킬 수 있는 것은 다음 이유 때문이다. 링 헤드에서는 갭에서 누설되는 자계를 이용해 매체를 자화하므로 매체가 갭에서 떨어질수록 자계는 작아진다. 이에 대해 단자극 헤드와 2층 매체를 이용한 경우는 헤드의 주자극과 기록층 아래에 있는 연질자성층 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.

이렇게 기록밀도의 증가를 보여주는 수직 자기 기록에도 문제점은 가지고 있다. 그 일

례가 부유자계 문제이다. 부유자계란 다양한 원인에 의해 하드디스크의 내부에 발생하는 매우 작은 자계를 가리킨다. 예를 들면 통상의 하드디스크에서는 내장되어 있는 액추에이터나 스피들 모터로부터, 1~2Oe의 자계가 자기 헤드부에 인가되어 있다. 하드디스크가 놓인 환경에 따라서는 이 정도 이상의 자계가 더해질 가능성도 있다. 이러한 현상이 일어나면 발생하는 자

계의 세기에 따라서는 기록층을 잘못 자화하여 하드디스크가 놓인 환경에 따라 데이터가 소실할 우려도 있다.

이밖의 문제점으로서 2층 기록매체의 연질자성층에서 발생하는 잡음을 염려하는 경향이 있다. 연질자성층에 불규칙한 자계가 발생하고 그것이 이동하여 기록이 불완전해지거나, 재생파형에 잡음이 더해지는 문제다. 제품화에 즈음해서는 이러한 문제를 미연에 방지하는 연구가 필요해질 것이다.

이밖에도 높은 면 기록밀도에 대응한 서보방식, 신호처리 LSI의 개발이나, 실제 이용시의 온도환경 하에서의 열 요동의 평가 등, 많은 해결 문제를 가지고 있다.

초소형 하드디스크 설계 기술

앞으로 휴대용 디지털 기기는 더욱 급속도로 발전하고, 응용범위도 확대 될 것으로 예상하고 있다. 현재 사용되고 있는 휴대용 디지털 기기의 대표적인 예로는 개인정보단말기(PDA : Personal Digital Assistant), 휴대폰, 디지털 오디오 플레이어, 디지털 캠코더, 디지털 카메라, 초소형 컴퓨터 등이 있으며, 이들 기기의 기능이 더욱 복잡해지고 다양해짐에 따라 더욱 더 큰 용량의 소형



정보저장기기가 요구되고 있다. 현재 이들 기기에는 주로 플래시 메모리가 정보저장을 담당하고 있으나, 가격이 비싸다는 단점이 있어 대용량의 저장기기로 사용하기에는 한계가 있다.

하드디스크는 기록 용량이 매년 거의 두 배 정도로 늘어날 정도로 발전속도가 빠르며, 가격에 비해 용량이 매우 크다는 점에서 앞으로 소형 정보 저장기기에서도 우위를 차지할 것으로 기대되고 있다. 이러한 가능성은 1999년 IBM에서 마이크로 드라이브(microdrive)라는 이름으로 350MB 용량의 1인치 하드디스크를 시판하면서 더욱 구체화되었다. 이 제품은 디지털 카메라, 팜탑 컴퓨터 등에 적용되어, 이전에 하드디스크가 아닌 다른 소형 저장 장치가 갖고 있었던 기억용량의 한계를 극복하는 계기가 되었다. 그리고 2003년 8월경에는 4GB 이상의 제품을 출시할 것으로 예견되고 있다.

이들 소형 하드디스크의 설계에는 노트북용으로 사용되는 2.5인치 하드디스크나 데스크탑용으로 사용되는 3.5인치 하드디스크의 단순한 기계·전자 부품 사이즈의 축소뿐만 아니라 휴대용 기기에서 사용됨으로써 발생하는 여러 문제들도 함께 고려되어야 한다. 예를 들면, 휴대용 기기에 사용되

기 때문에 전력 소비를 최대한으로 줄여야 하고, 충격에도 강하게 설계되어야 한다. 다시 말해, 회로부와 구동부의 저전력화는 물론 공기 유동 및 베어링 마찰에 의한 기계적 손실도 함께 고려되어야 하며, 외충격 방지 제어기법 및 외충격 방지 메커니즘 기술도 적용되어야 한다.

소형 하드디스크의 중요 설계 기술을 열거하면, 스피들 모터, LSI 및 회로실장, 전력관리, 진동 및 쇼크 등이 있다. 스피들 모터의 경우, 소형화는 물론 베어링의 강도를 고려해야 하는데, 휴대용에 장착되는 하드디스크라는 특성상 충격, 수명, 마찰, 런 아웃(runout) 등의 조건을 만족시키는 설계 기술이 필요하다. IBM의 마이크로 드라이브의 경우에는 여러 방식의 베어링을 고려했지만, 이들 조건을 만족시키지 못해 기존의 볼 베어링을 사용한 것으로 알려져 있다. 하지만, 기록밀도의 증가를 위해서는 베어링 설계에 있어서 기술적 돌파구가 반드시 필요할 것이다. LSI 및 회로 실장은 전력, 사용전압 및 주어진 크기에 맞도록 설계가 이루어져야 한다. 마이크로 드라이브의 경우에는 SLC(Surface Laminar Circuit)와 DCA(Direct Chip Attachment) 기술이 이용되었다고 한다. 전력관리 기술은 LSI 소자의 전력 손실과 베어링 및 디스크와 같은 기계적 부품에서 기인하는 전력 손실을 최소화하는 기술과 하드 디스크의 미사용을 감지하여 디스크의 회전을 멈추게 하는 등의 저전력 모드로 전환하는 기술을 포함한다. 진동 및 쇼크 관련 기술로는 헤드의 로드·언로드(load/unload) 시스템 설계 기술, 서스펜션(suspension) 설계 기술, 서보 기술 등이 관련되어 있다. 이러한 여러 기술들의 발전에 의해 소형 하드디스크의 크기와 소비전력은 줄어들고, 용량은 더욱 커져 갈 것이다.

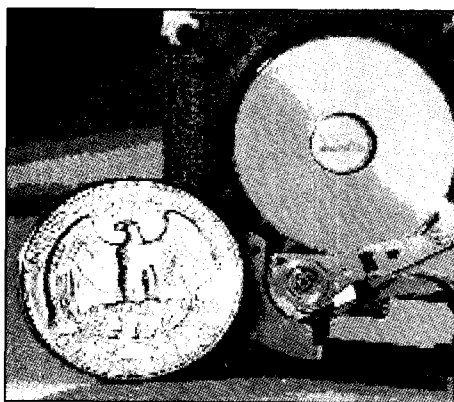


그림 3 1인치 마이크로 드라이브(IBM)



램프 로딩(Ramp L/UL) 기술

하드디스크는 가격 대비 기록밀도가 다른 정보 저장기기에 비하여 높은 장점을 갖고 있어 대부분의 PC에 주요 저장기기로 활용되고 있다. 하드디스크의 기록 밀도가 증가함에 따라 헤드-디스크 사이의 간격이 점점 감소하고 있다. 낮은 부상 높이와 긴 수명을 위한 헤드-디스크 인터페이스 변수의 최적화는 그 자체로서 하나의 기술적인 도전이지만 하드디스크의 기동과 정지시의 거동도 다루어야 하므로 더 복잡한 구조와 제한 조건들을 갖게 된다.

자기 기록 방식의 정보 저장기인 하드디스크에 있어서 기록 밀도의 향상과 관련된 중요한 기술 중의 하나가 헤드-디스크 간의 마찰 마모 문제이다. 공기 부상 슬라이더에 의하여 헤드는 디스크 회전시 디스크 표면상에서 정해진 부상 높이를 유지할 수 있다. 현재 하드디스크에서 이 부상 높이는 약 20nm 정도이다. 하드디스크의 전원이 꺼지면 디스크의 회전은 느려지고 슬라이더의 공기 부상력은 서스펜션의 예압을 이기지 못 할 정도로 낮아져서 슬라이더는 디스크 표면에 닿게 된다. 이러한 기동과 정지의 과정을 CSS(Contact Start Stop)라고 부르며, 디스크 표면에 미리 적절히 가공된 영역에서 이루어진다. 이 두 표면간의 접촉은 마모를 일으키게 되고 기록 밀도의 향상을 위하여 해결해야 하는 큰 기술적인 난제 중의 하나이다. CSS는 기구적으로 단순하기 때문에 2.5인치 및 3.5인치 하드디스크의 해결책으로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 CSS 설계방식의 장점이 역으로 CSS의 주요 고장모드 중 하나로 되어 하드디스크 산업계에서 다루는 심각한 문제들 중의 하나가 됨에 따라 퇴색되고 있다.

또한 기존의 하드디스크는 외부 충격에 약한 단점 때문에 운반시 제품 손상의 우려가

있으며, 휴대용 컴퓨터에 장착할 경우에도 주의를 하여야 한다. 그러므로 이러한 단점을 극복하기 위하여 하드디스크의 내충격성 향상에 대한 요구가 증대되고 있으며, 내충격성이 향상될 경우 휴대용 저장기기에 사용이 용이하여 하드디스크가 적용될 수 있는 영역이 디지털 캠코더의 저장장치와 같은 디지털 가전기기 등으로 확대되어 질 수 있다.

이중 3.5인치 데스크 탑용 하드디스크의 경우도 PC 조립업체 들의 내충격성 사양에 대한 요구가 높아져 가고 있는 반면 기존의 CSS 로딩 방식으로 이러한 요구를 만족시키는 것은 기술적인 한계로 인하여 매우 어렵게 되었다.

램프 로딩 기술은 이러한 CSS 고장모드를 제거할 수 있는 또 다른 설계 방식을 제공하고 있으며, 마모 및 점착(stiction) 문제에 관련된 바람직하지 않는 기술적인 과제들을 피할 수 있다.

램프 로딩 방식의 하드디스크에서 보이스코일 모터 작동기가 디스크의 외경 밖으로 서스펜션을 이동시키면 서스펜션 로드 빔에서 연장되어 나온 승강탭(lift tab)이 램프(ramp) 또는 캠과 연동하기 시작하여 헤드를 디스크 면상에서 들어 올리고 안전 영역으로 옮기는 것이다. 하드디스크의 기동과 정지 시에만 헤드의 로드·언로드(load/unload) 과정이 발생한다. 하드디스크가 동작하기 시작하는 초기 단계에서 서스펜션은 적절하게 제어된 속도로 램프에서 미끄러져 나오며, 슬라이더는 디스크의 회전수가 정속도에 도달하면 디스크 표면에 도달하게 된다. 슬라이더의 평균 로딩 속도는 보이스코일 모터(VCM) 작동기의 역기전력이 피드백되는 서보 제어계에서 제어된다.

램프 로딩 방식의 종류는 그 기하학적 형상에 따라 여러가지가 있지만 그림 5에서

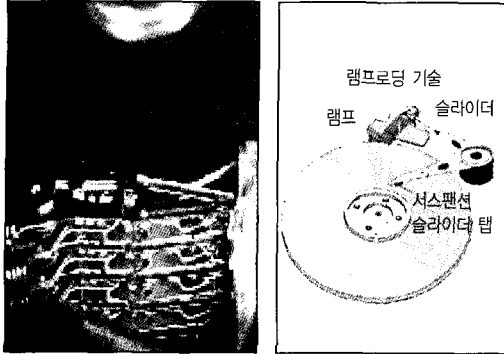


그림 4 램프 로딩 방식의 HDD

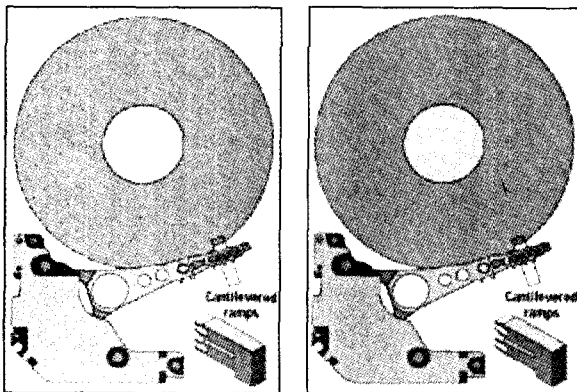
보통이 가장 기본적인 형태로는 종단승강(end-lift)형과 중간승강(mid-lift)형이 있다.

종단 승강형은 그림 5에서 보는 바와 같이 서스펜션에서 헤드 끝 쪽으로 승강(lift) 장치가 돌출되어 있는 반면에 중간 승강형은 서스펜션 고정부와 헤드 사이의 로드빔(load beam)부가 램프부에 연동하도록 되어 있다. 종단승강형은 대칭형 램프(backside merge ramp)를 사용하므로 가공 및 적용이 용이하지만 서스펜션 끝단에 추가 질량이 더 해지므로 서스펜션의 공진 주파수를 낮추는 단점이 있다. 중간승강형은 서스펜션에 추가 질량이 더 해지지는 않지만 피코슬라이더를 쓰는 경우 램프 로딩을 위한 충

분한 공간 확보가 어렵다.

램프는 복잡한 형상을 저렴한 가격으로 생산하기 위하여 일반적으로 플라스틱 몰드를 사용하며, 정밀한 치수 공차, 저마찰, 저마모, 안정성 등을 만족시킬 수 있는 최적의 재료를 사용한다. 또한, 플라스틱에 고체윤활제(PTFE 등)를 첨가하여 마찰과 마모를 줄이기도 한다.

보이스 코일 모터 작동기의 래치(latch)는 하드디스크가 충격을 받았을 때 작동기가 디스크 방향으로 움직이는 것을 막아주는 역할을 하며, 자석형(magnet type)과 관성형(inertia type)이 있다. 램프 로딩 방식에는 관성형 래치가 많이 쓰이며, IBM은 한쪽 방향의 충격에 대한 안정성만을 갖는 단방향 관성형 래치를 개선하여 양방향의 충격 가속도에 대하여 안정성을 갖는 양방향 관성형 래치(bidirectional inertia latch)를 특허로 갖고 있다. 이 양방향 관성형 래치는 두 개의 레버를 한 쌍으로 갖는 복잡한 구조이다. 래치의 대형 암이 시계 방향 또는 반시계 방향으로 회전하면 두 방향 모두 래치의 소형 암이 시계 반대 방향으로만 회전하도록 만들어서 래치가 안정적으로 동작하게 만든다.



(a)종단승강(End-lift)형 (b)중간승강(mid-lift)형

그림 5 램프 로딩 방식

ABS(Air-Bearing Surface) 설계 기술

디스크 사용 면적의 향상, 보다 낮은 부상높이 실현, 디스크 표면(disk asperity) 등에 대한 우수한 응답 및 충격 성능 등을 위하여 슬라이더는 계속적으로 소형화, 경량화 되고 있으며, 최근에는 0.85x0.7x0.23mm의 크기를 가지는 펨토 슬라이더(femto slider)가 제시되었다. 또한 안정된 부상높이를 얻기 위하여 다양한 ABS 형상이 제안되었으며, 로드·언로드(load/unload) 기술을 구현하기 위해서는 높은 음압

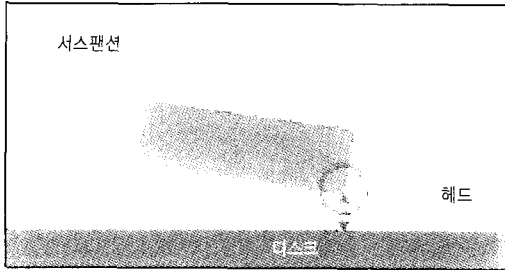


그림 6 HDD 시스템의 HDI(head disk interface)

(negative pressure)를 갖는 ABS 형상이 제안되고 있다. 또한 서스펜션에 의한 예압은 낮을수록 좋은 것으로 보고되고 있다.

슬라이더 공기베어링의 해석 및 설계

약 20nm 정도의 부상높이가 요구되는 정도가 되면 공기분자의 평균 자유거리와 간극의 크기가 비슷해지므로, 벽면에서의 미끄럼 효과의 고려가 필요하다. 최근까지는 비연속성 효과를 고려하기 위해 Fukui와 Kaneko가 제시한 선형화 된 볼츠만 방정식에 의거하여 구한 역송법을 이용한 식을 사용하고 벽면 미끄럼 효과를 고려하기 위한 Poiseuille 유동항이 포함된 Reynolds 방정식을 사용한다.

이러한 Reynolds 방정식으로 기술된 계는 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션에서 유한차분법(finite difference method), 유한요소법(finite element method) 또는 유한체적법(finite volume method)을 사용하여 해석한다. 과거에는 단순한 레일 형상이었던 슬라이더가 최근에는 위치가 변하더라도 부상높이의 변화가 적도록 레일의 형상이 2레일에서 3레일로, 사각형 평면에서 복잡한 형태로 설계되고 있다.

슬라이더의 추종성능 및 부상안정성

슬라이더에 작용하는 힘과 모멘트들이 평행상태에 도달되도록 최적화 기법을 사용한

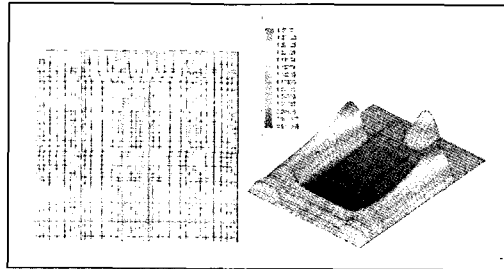


그림 7 고밀도 슬라이더의 격자와 압력구배

다. 슬라이더/서스펜션 계를 공기 베어링의 주요한 상하방향 운동의 1 자유도계로 설정하고 슬라이더의 추종성능에 대한 해석을 한다. 이 해석을 통해서 디스크의 진동에 가장 좋은 추종성능을 갖는 공기 부상 강성을 가질 수 있도록 ABS의 부상 강성을 구하고 HGA(Head Gimbal Assembly)의 특성을 알 수 있다.

맺음말

차세대의 고밀도, 고정밀 정보 저장기기의 수요 속도는 빠르게 진행되고 있다. 이러한 수요에 대응하기 위한 정보 저장기기 전반에 걸친 연구의 기술 또한 빠르게 진행되고 있다. 수직자기기록기술 연구나, 초소형, 고밀도 정보 저장기기의 수요를 위한 소형 마이크로 드라이브의 개발 등을 예로 들 수 있다. 수직자기기록은 기록층 안의 자성 입자의 체적을 늘릴 수 있어서 열 요동에 대

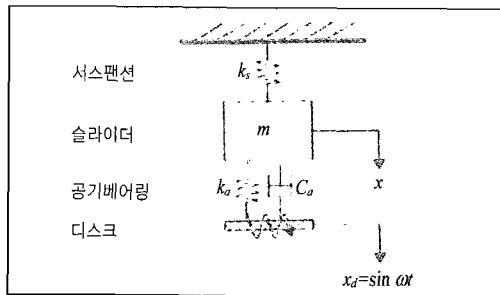
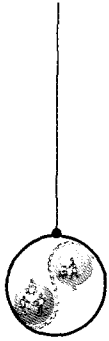


그림 8 1자유도 HGA의 모델링



해 강한 성질을 가지고 있고, 인접한 기록 비트 사이에 작용하는 반자계가 감소하여 안정성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다. 마이크로 드라이브는 고용량의 저가라는 장점을 가지고 있기 때문에 크게 발전하고 있다. 램프 로딩 기술은 소형 저장장치에서 작은 디스크 미디어에 고용량의 정보를 저장하기 위해서 필요한 기술이고, 소형화, 휴대화로 인한 문제점에서도 기존의 기술보다는 충격 등에서 큰 장점을 가지고 있다. 고밀도의 정보를 저장하기 위한 하드디스크 시스템에서 수 나노미터의 디스크 표면조도에 충돌 없이 디스크의 외란을 추종할 수 있는 슬라이더의 설계가 중요하게 되었고, 현재 15nm 정도의 부상높이를 가지면서 안정성을 확보하고 있는 슬라이더의 개발로 수백 Bit/in²의 저장 용량을 실현하고 있다.

[참고문헌]

(1) Cideciyan, R.D.: et al., 2002, "Perpendicular and longitudinal recording: a signal-processing and coding perspective", IEEE Transaction on Magnetics, VOL. 38, No 4, pp. 1698~1704.

(2) Iwasaki, 1984, "Perpendicular magnetic recording Evolution and future", IEEE Transaction on Magnetics, VOL. 20, No 5, pp. 657~662.

(3) Hitachi company, 1999, "Hard disk

drive Load/unload technology".

(4) T.C. Albrecht, et al., 1998, "Micro Drive—a pluggable one-inch disk drive for portable devices Reiley", Nonvolatile Memory Technology Conference, pp.51~54.

(5) Sha Lu, et al., 1996, "Air Bearing Design, Optimization, Stability Analysis and Verification", IEEE Transaction on Magnetics, VOL. 32, No 1, pp. 103~109.

(6) Qing-Hau Zeng, et al., 1999, "Dynamics of the Unload Process for Negative Pressure Sliders", IEEE Transaction on Magnetics, VOL. 35 No 2, pp. 916~920.

(7) T.C. Reiley, et al., 1996, "Microfile—A One-Inch Disk Drive Technology Demonstration", Int'l NonVolatile Memory Technology Conference

(8) Bernhard Hiller, et al., 2001, "Ramp Load/Unload Friction Dependence on Temperature, Velocity and Ramp Material", IEEE Transaction on Magnetics, VOL. 37, No 4, pp. 1852~1854.

(9) Stefan Weissner, et al., 2000, "Load/unload measurement using laser Doppler vibrometry and acoustic emission", Tribology International 33, pp. 367~372,