

특 집

탐침형 정보저장장치의 개요 및 기술 개발 동향

최영진

전자부품연구원 나노정보에너지 연구센터

I. 서론

물질의 표면을 원자수준의 해상도를 가지고 영상화할 수 있는 주사형 터널링 현미경(scanning tunneling microscope; STM)의 발명 이후, 많은 사람들은 이 기술이 초고밀도 정보저장장치로 응용될 수 있는 가능성에 대해 주목하기 시작하였다. STM은 원자 수준의 수평 해상도를 가지고 물질의 표면을 영상화할 수 있을 뿐만 아니라 표면의 상태를 변조시킬 수도 있어, 이를 이용하면 원리적으로 수 Pbit/in²(Pbit=10¹⁵bit) 정도의 기록밀도를 갖는 초고밀도 정보저장장치를 구현할 수 있다.

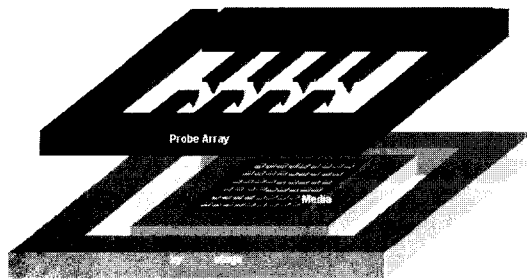
STM의 주사형 탐침기술은 여러 가지 형태의 주사형 탐침 현미경(scanning probe microscope; SPM)에 응용되었는데, SPM의 발전과 더불어 다양한 형태의 정보 기록/재생방식이 연구되어왔다. 연구 초기에는 높은 수준의 기록밀도에 반하여 매우 낮은 데이터 입출력 속도를 가짐으로 인해 실제 정보저장장치로의 적용이 가능할 것인가에 대한 의구심이 있었지만, 마이크로머시닝 기술의 발전에 힘입어 탐침의 병렬 제작 및 운용이 가능해짐으로써 보다 현실적이며 미래 지향적인 정보저장장치로 부상하고 있다.

본 고에서는 더 이상 미래 기술로만 치부할 수 없는 탐침형 정보저장장치에 대한 개괄적인 소개와 함께 각 요소기술의 현재 수준 및 상용화를 위해 선결되어야 할 문제 등에 대해 알아보기로 하겠다.

II. 탐침형 정보저장장치의 개요 및 특성

탐침형 저장 장치는 <그림 1>처럼 정보를 기록하는 매체부와 매체에 정보를 기록하고, 매체로부터 재생하는 헤드부, 그리고 원하는 위치 이동을 위한 구동부 등 크게 세 부분으로 설명될 수 있다. 실제로 어떻게 정보를 기록하고 재생할 것인가에 따라 헤드부의 디자인이나 기록매체의 종류가 결정되므로 헤드부와 기록매체는 따로 떼어서 이야기할 수는 없으나, 일반적으로 헤드부는 곡률 반경이 10nm 이하의 매우 뾰족한 탐침으로 이루어져 있어, nm의 데이터를 기록하고 재생할 수 있도록 해준다. 그림에서는 이들 탐침이 이차원 배열을 이루는 배열형 탐침으로 표현되어 있는데, 이는 탐침 기록 장치의 속도 문제를 해결하기 위해서는 탐침을 이차원 배열형으로 배치하여 동시에 기록하고 재생하는 방식을 취하기 때문이다. 각 탐침은 탐침마다 기록 및 재생을 담당하는 영역이 있고, 이 영역 내에서의 이동을 그림에서 xy-stage와 같이 보이는 구동부가 담당하므로, 기록위치의 정밀도와 재연성 등은 바로 이 구동부가 담당하게 된다. 10nm 이하의 기록을 가능하게 하기 위해서는 nm급의 정밀도와 정확도를 가지는 구동기가 필요하다. 탐침형 정보저장장치에서는 모터구동 방식이 아니라, xy stage 방식이라는 점에 주목할 필요가 있으며, 모터부가 없어 전력과 소음 측면에서 이점을 가진다.

그럼, 이와 같은 구조를 가지는 탐침형 정보저장 장치의 특징에 대해서 살펴보자.



〈그림 1〉 탐침형 정보저장장치의 구조도

첫 번째 장점은 고기록 밀도의 달성에 있어서 원리상으로 가장 유리하다는 점이다. 탐침의 곡률 반경은 10 나노미터 이하이며, 현재 일부 매체의 경우 10 나노미터 이하의 비트 크기를 보여주고 있는 수준이다. 데이터 전송율의 경우, 1024개의 배열형 탐침을 사용할 경우 현재 수준에서 20 Mbps 정도의 속도를 달성할 수 있으며, 향후 굴곡형 매체가 아닌 평면형 매체를 사용할 경우 이보다 훨씬 높은 속도를 구현할 수 있을 것으로 평가된다.

두 번째 장점은 마이크로머시닝 일괄공정을 통해 제작되므로 값이 싸다는 점이다. 잘 알려진 하드디스크와 비교해 볼 때 하드디스크는 매체, 구동부 및 헤드가 하나의 시스템으로 조립되는 것으로 전제로 하는 저장장치로서, 더 이상 떨어질 수 없는 가격의 바닥 선이 이미 존재한다. 이는 하드디스크의 시장 가격에서 잘 보여지고 있는데, 용량대비 가격이 계속 떨어지고 있는 것이지, 절대적인 가격 자체가 떨어지고 있는 것은 아니다. 플래시 메모리와 비교해 본다면, 플래시 메모리 공정은 기술적으로 반도체와 동일하므로 lithography 한계에 의해서 적정한 가격대 성능비에서 포화될 것이다. 당분간은 기존 반도체 라인의 전용을 통해 가격이 하락할 것이나, '규모의 경제'가 포화되는 순간 가격도 포화될 것이다. 기술 자체가 저가 기술은 아니라는 의미이다. 반면, 탐침형 저장 장치의 경우 반도체 공정을 전제로 하되, 핵심 부품 제조공정은 마이크로머시닝 공정 정도의 선평이면 충분하므로 lithography에 의존하지 않는다는 장점을 가지고 있다.

이러한 장점을 바탕으로 탐침형 정보저장장치는 유력한 차세대 정보저장장치로 활발히 연구되고 있으며, 조만간 가시적인 성과를 보일 것으로 전망된다.

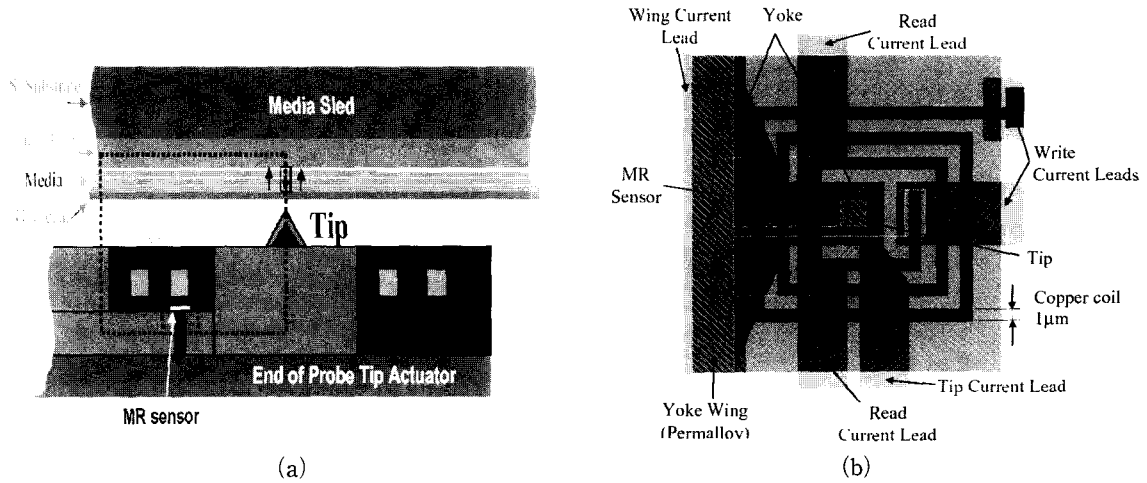
III. 기록/재생 메커니즘

탐침형 정보저장장치 기록/재생 메커니즘의 유력한 후보는 크게 탐침과 기록미디어 사이의 자기적인 상호작용력을 이용한 방식(자기기록 방식)과, 탐침을 가열하여 기록미디어에 물리적인 홈을 형성하는 방법(열기계 기록 방식), 탐침과 기록미디어를 접촉시킨 후 전류를 흘려 기록미디어의 국부적인 영역의 전기적인 특성을 변화시키는 방식(상전이 기록 방식) 등이 있다. 이외에도 탐침을 이용하여 질화막과 산화막 사이에 전하를 국부적으로 포획하는 방법이나 강유전체 박막에 탐침을 이용하여 국부적으로 전기쌍극자를 형성하여 기록하는 방법 등이 있으나, 전하포획의 경우 기록밀도가 여타 다른 저장장치에 비해 그리 높은 편이 아니라 탐침형 정보저장장치의 고유 특징인 고밀도화가 어렵고, 강유전체 박막을 이용하는 경우는 데이터를 유지하는 시간이 짧다는 문제와 정보를 재생할 수 있는 탐침이 아직 개발되지 않고 있다는 측면에서 가능성을 탐색하는 수준이다.

1. 자기 기록방식

자기기록방식의 경우 미국의 Carnegie Mellon 대학(CMU)과 네덜란드의 Twente 대학에서 주로 연구하고 있는데, CMU의 경우는 inductive 기록부와 GMR 센서를 캔틸레버 프로브에 집적하는 방식을 채택하고 있으며, Twente 대학의 경우는 캔틸레버 위에 강자성체 탐침을 형성하여 기록/재생하는 방식을 채택하고 있다.

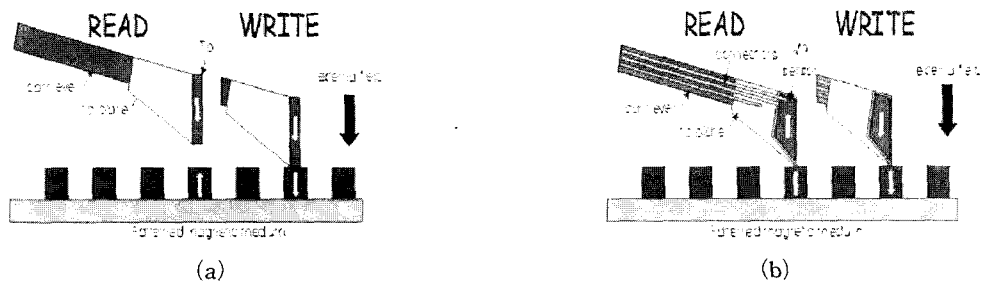
〈그림 2〉는 CMU에서 개발하고 있는 기록/재생 헤드부의 개념도로서, 자성물질로 이루어진 탐침 주변을 코일이 둘러싸고 있어 코일에 전류



〈그림 2〉 CMU에서 개발 중인 기록/재생 헤드 구조 (a) 단면 (b) 평면

를 흘려주면 탐침이 monopole의 역할을 하여 데이터를 기록할 수 있도록 설계되었으며, 재생을 위해서는 yoke 형태의 GMR 센서를 장착하였다. 이 때 기록층은 수직자화방향을 가지는 PtCo 자성박막을 사용하였고, 기록시 탐침에 강한 자속이 걸릴 수 있도록 기록층 아래에 연자성 박막을 두었다. 이러한 구조는 다른 탐침형 정보 저장장치의 기록/재생 헤드부에 비해 복잡한 형태를 보이며, 제작공정이 복잡한 단점을 가지고 있다. 아직 기록/재생한 결과는 보고 되고 있지 않지만, 모델링 결과에 따르면 최소 250 Gbit/in² 수준의 기록밀도와 구동기의 물리적인 한계를 고려하지 않는다면 단일 탐침으로 1 Gbit/sec 수준의 데이터 입출력 속도를 가질 수 있다고 발표하였다^[1].

Twente 대학에서는 magnetic force microscopy(MFM)에 기반한 형태의 자기기록 방식을 채택하고 있는데, 이는 강자성 탐침을 patterned media에 접촉시켜 기록매체의 자화방향을 바꿔주어 정보를 기록하고, 재생시에는 기록매체와 탐침 사이의 자기력에 의해 캔틸레버의 휘어지는 정도를 측정함으로써 데이터를 판독하는 방식이다^[2]. 이 경우 2진법의 데이터를 기록하기 위해서는 탐침의 자화 방향이 up/down 두 가지가 모두 가능해야 하며, 외부 자극에 의해 탐침의 자화방향이 바뀌는 개념이 도입되어야 하나, 실제 디바이스로의 구현이 어렵다. 또한 정보를 재생할 때는 탐침과 미디어 사이의 간격을 일정하게 유지해야 하기 한다는 어려움을 가지고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 MR 센서가 집



〈그림 3〉 Twente 대학에서 개발 중인 기록/재생 방식 (a) MFM 방식 (b) MR 모드 방식

적화된 탐침을 제작하여 미디어와 접촉된 상태에서 미디어의 자화방향에 따라 변하는 MR 신호로써 정보를 재생하는 방법을 고안하고 있다. 그러나 이 경우에도 역시 up/down 두 가지 방향의 정보를 기록할 수 있는 기록헤드의 제작이 어렵다는 점은 공통적으로 가지고 있다. 이러한 문제로 인해 Twente 대학의 방식 역시 아직 기록/재생한 결과는 보고 되고 있지 않다.

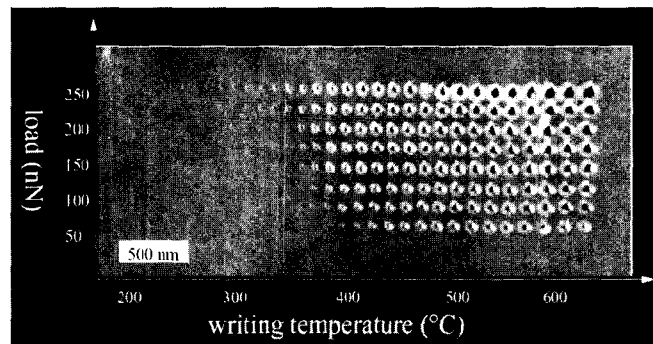
2. 열기계 기록방식

탐침형 정보저장장치에 가장 현실화된 기록/재생 방식으로 IBM에서 다년간 연구해오고 있는 열기계 기록방식(thermomechanical recording)을 꼽을 수 있다^[9]. 이 방식은 날카로운 탐침을 이용하여 얇은 폴리머 박막에 nm 크기의 물리적인 홈을 내는 방식으로, 홈을 내기 위하여 탐침을 폴리머 막에 대고 누르면서 동시에 열을 가

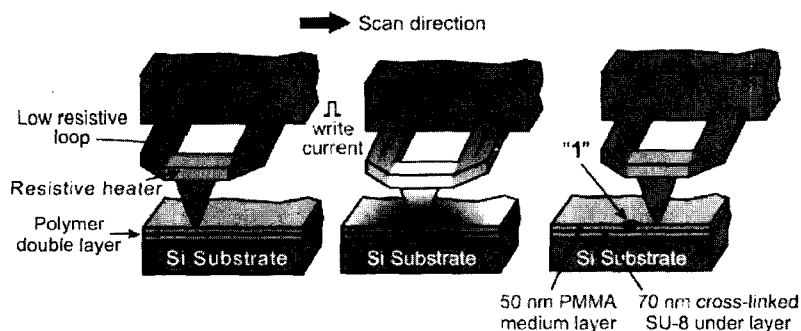
한다. 이 때 홈의 크기는 인가된 힘과 열의 크기에 의존하며, 폴리머 미디어는 주로 PMMA를 사용한다.

열기계 기록방식 초기에는 탐침을 가열하기 위해 외부에서 레이저를 조사하고, 데이터 재생은 일반적인 AFM의 측정모드인 optical lever 방식을 사용하였다. 그러나 이 경우 전체 시스템의 크기가 커질 뿐 아니라, 탐침형 정보저장장치가 가지는 낮은 데이터 입출력 속도를 개선하기 위한 탐침의 병렬 운영이 불가능하기 때문에, 탐침을 가열할 수 있는 히터를 캔틸레버 위에 집적화하고 캔틸레버 자체 내에서 재생 신호를 감지할 수 있는 구조들이 연구되었다.

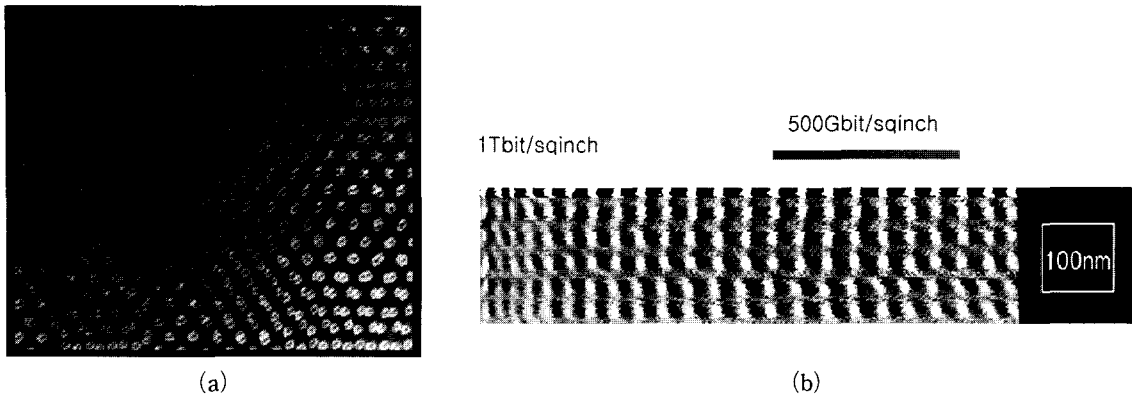
기록을 위한 히터는 캔틸레버의 특정 부위를 다른 부위에 비해 적게 도핑하여 상대적으로 저항값을 크게 만들어 제작하였다. 이렇게 만들어진 캔틸레버에 전류를 흘려 탐침부를 약 400도



〈그림 4〉 인가된 힘과 열의 크기에 따른 데이터비트의 크기 변화



〈그림 5〉 열기계 기록방식의 개념도



〈그림 6〉 IBM의 열기록 결과 (a) 400Gbit/in² 기록 결과 (b) 1Tbit/in² 기록 가능성

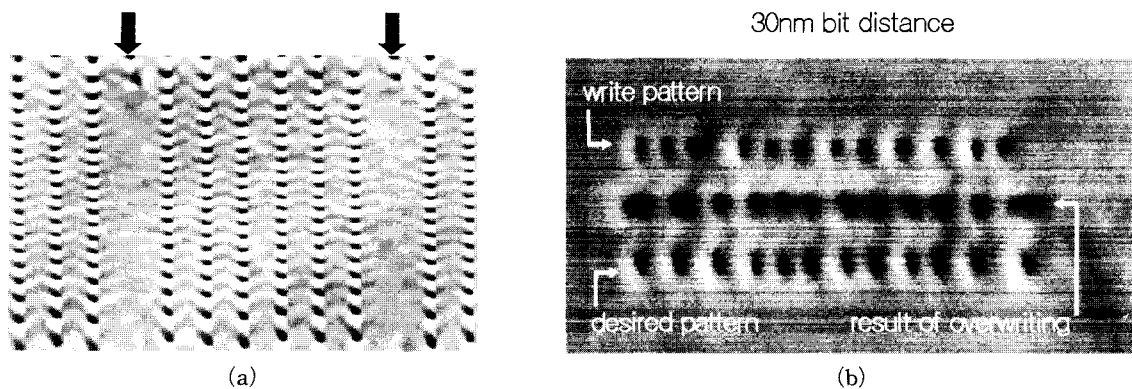
정도까지 가열하면서 탐침을 기록미디어인 PMMA에 접촉시키면, PMMA가 국부적으로 녹으면서 물리적인 홈을 만들게 되고 이로써 데이터비트를 기록하게 된다. 여기에서 탐침이 견고한 Si 표면과 직접 접촉함으로써 발생할 수 있는 탐침의 마모 방지 및 열전달의 효율성 제고를 위해 데이터 기록층 바로 아래에 경화된 폴리머 얇은 층(60~80 nm)을 두었고, 데이터 비트 크기 확대를 막기 위하여 가능한 데이터 기록층을 얇게 (20~50 nm) 만들었다.

이러한 방식으로 IBM에서는 단일 탐침으로 40 nm 정도의 bit size, 즉 400 Gbit/in² 정도의 기록밀도의 가능성을 발표하였고 최근에는 1 Tbit/in² 정도까지 단일 탐침 실험을 통해 입증한 바 있다. 또한, 단일 탐침으로 37 nm 정도의

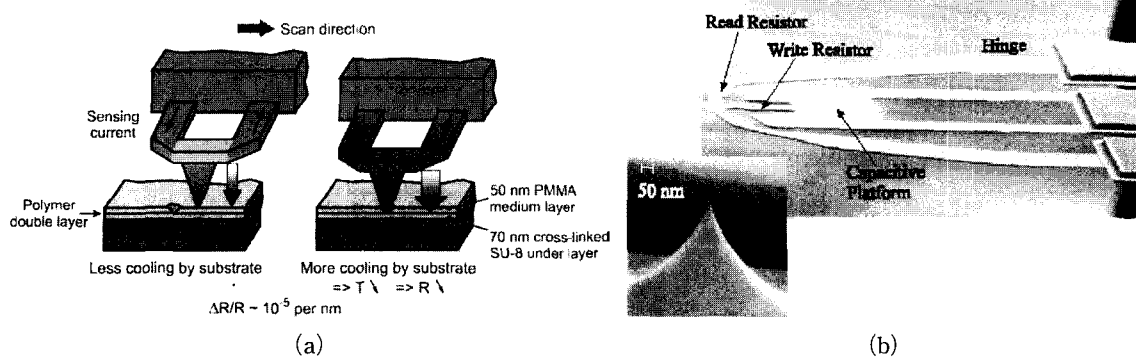
bit size, 즉 641 Gbit/in² 정도의 기록밀도에서 raw BER (bit error rate)이 10⁻⁴ 수준임을 보고하였다.

IBM의 열기록 방식은 데이터의 소거 및 재기록이 가능하다. 〈그림 7〉은 기록된 데이터비트를 소거한 예와 따로 소거작업 없이 데이터를 바로 재기록하는 예를 보여준다. 이미 기록된 데이터비트 바로 옆에 탐침을 접근시키고 가열하면 폴리머가 살짝 녹으면서 reflow하여 데이터 홈을 채워 데이터비트를 소거하게 되며, 이 때 좀 더 오랜 열을 가하면 그 자리에 데이터의 재기록이 가능하다.

정보의 재생을 위해서는 IBM에서 꾸준히 연구해오고 있는 열변위 감지센서 방식과 최근 국내 기업인 LG전자에서 개발한 압전센서 방식이



〈그림 7〉 열기록 방식은 데이터의 소거 및 재기록 (a) 데이터의 소거 예 (b) 재기록 예

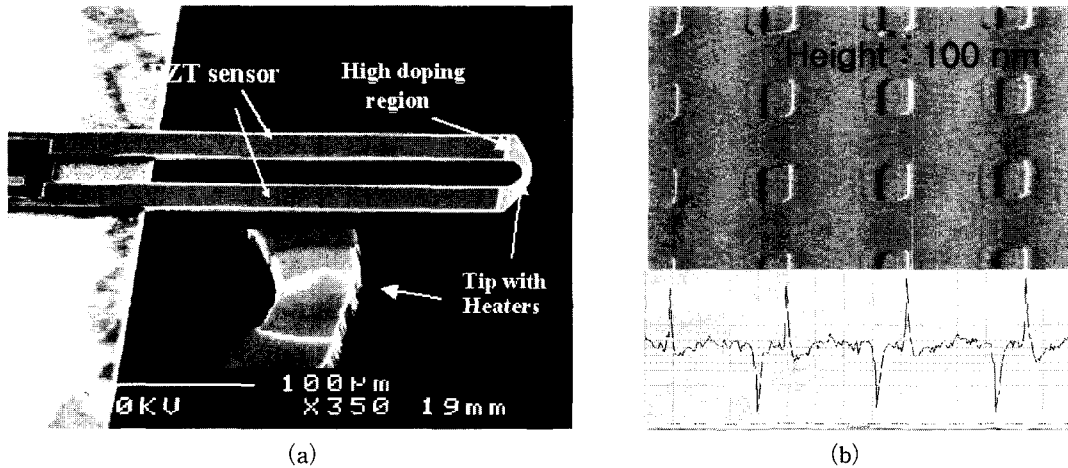


〈그림 8〉 IBM의 열변위 감지 센서 (a) 동작 개념도 (b) 실제 제작된 캔틸레버 사진

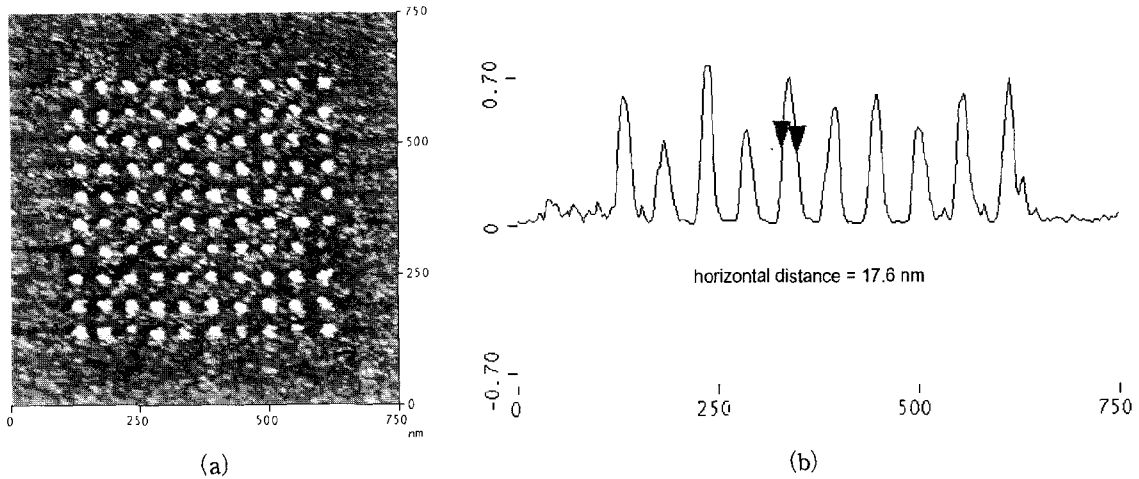
유력하다. IBM의 열변위 감지 센서 방식은 열기계 기록을 위한 캔틸레버 제작공정에서 동시에 센서 제작이 가능하다는 점에서 가장 간단히 제작되어질 수 있다. 〈그림 7〉은 열변위 감지 센서 방식의 개념도 및 실제 제작된 기록/재생을 위한 캔틸레버 사진이다. 열변위 감지 센서는 데이터 기록면을 주사하면서 탐침을 PMMA가 녹지 않는 약 300도 정도로 순간적으로 가열하면, 흠이 있는 부위에서는 쉽게 냉각이 되고, 흠이 없는 부위에서는 더디게 냉각이 되는 성질을 이용한 것으로, 탐침의 온도는 열저항을 통해서 알 수 있는 바, 이러한 방식으로 데이터의 유무를 알 수 있게 된다. 이 열변위 감지 센서의 감도는 1nm당 10^{-5} 정도이며, 열응답 속도는 usec 수준으로 단

일 탐침으로는 100kbit/sec 정도의 데이터 입출력 속도를 가진다.

국내 기업인 LG전자에서는 IBM과 같은 열기록 방식을 쓰면서 데이터를 재생하는 방식으로는 압전센서를 이용한 방식을 개발하였다. 이는 압전체인 PZT 박막을 캔틸레버 위에 도포하여, 캔틸레버가 데이터를 읽을 때 캔틸레버가 휘는 정도를 전기적인 신호로 바꾸어 주는 방식이다. 이 방식은 열감지 센서 방식과는 달리 정보를 재생할 때 추가적인 외부 전원이 필요 없기 때문에 소모전력 면에서 열감지 센서 보다 우수하며, 응답속도가 매우 빨라 데이터 입출력 속도는 순전히 캔틸레버나 미디어 구동기의 기계적 응답 속도에만 제한된다^[4].



〈그림 9〉 (a) LG전자에서 개발한 압전 센서 일체형 cantilever (b) 이를 이용한 데이터 재생 신호

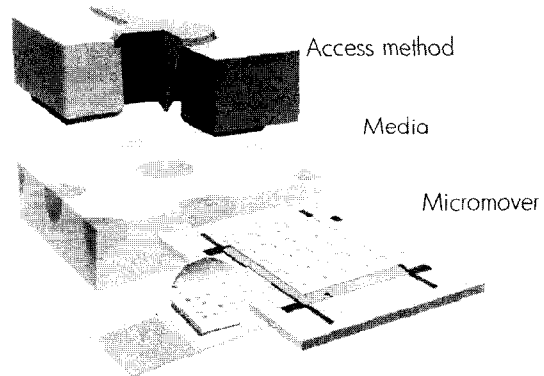


〈그림 10〉 GeSbTe 박막을 이용하여 데이터를 기록하고, 재생한 결과 (a) 데이터비트 영상 (b) 데이터비트의 실측 결과

3. 상전이 기록방식

상전이 물질을 이용한 기록 방식은 상전이 광 기록 방식과 유사하게 상전이 물질이 비정질 상태에 있을 때와 결정질 상태에 있을 때의 물리적 특성의 차이를 이용한 것으로, 광기록 방식에서는 빛의 반사도 차이를 이용하나 탐침형 정보저장장치에서는 전기저항의 차이를 이용한다. 〈그림 10〉은 10nm 두께의 GeSbTe 박막 위에 도전성을 가지는 탐침을 접촉시킨 후 전압펄스를 인가하여 데이터를 기록하고, 재생한 결과이다. 이를 보면 대략 20nm 이하의 데이터 비트가 형성되었음을 알 수 있다.

그러나 탐침을 단단한 상전이 박막에 직접 접촉시키는 경우, 탐침의 마모나 신호의 재연성 등이 문제가 되기 때문에 적절한 보호박막에 대한 연구가 필수적이다. 보호막을 생각하지 않는다면 미국의 HP사에서 시도하고 있는 ARS(Atomic Resolution Storage) 방식이 적절할 수 있다¹⁶⁾. 이 방식은 탐침과 기록막을 접촉시키지 않고 탐침으로부터 전계방출되는 전자를 이용하여 정보를 기록하는 방식이다. 재생을 위해서는 EBIC(전자빔 유도 전류)라는 현상을 이용하는 데, 이는 전자빔이 결정화된 데이터 비트에 조사될 때 기록미디어의 표면과 바닥면 사이에 큰 전류가 흐르는 현상을 이용하는 것이다. 이 때 결정



〈그림 11〉 HP의 ARS 개념도

화된 부분과 비정질인 부분과의 전류 차이는 14 배에 달하며, 단일 탐침을 사용하는 경우 재생 신호의 밴드는 550 kHz 정도로 보고 되었다. 그러나 이 방식의 경우 전자빔의 안정도가 가장 큰 이슈가 되고 있다.

IV. 미디어 구동기

탐침형 정보저장장치에서 데이터를 연속적으로 기록하기 위해서는 기록매체를 기록헤드인 캔틸레버에 대해 상대적으로 움직일 수 있는 구동장

치가 필요하다. 하드디스크와 CD/DVD의 경우는 기록매체 구동을 위하여 모터 기반의 회전디스크를 미디어 구동기로 사용하고 있으나 이를 탐침형 정보저장장치에 적용하게 되면, 캔틸레버의 배열이 어려워질 뿐 아니라 데이터 비트의 크기를 모터부의 정밀도가 따라가지 못하는 현상이 발생하게 된다. 따라서 탐침형 정보저장장치의 경우는 회전디스크 형태가 아니라 2차원적으로 미디어를 주사하는 방식이 유리할 것으로 판단된다. 특히 탐침형 정보저장장치는 소형화를 추구하고 있으므로, 마이크로머시닝 기술을 이용하여 소형의 미디어 구동기를 제작하는 것이 필수적이다. 이 때 미디어 구동기의 구동변위는 캔틸레버 한 셀이 차지하는 영역(수십 $\mu\text{m} \times$ 수십 μm) 이상에 대응 가능해야 정보가 기록되지 않는 사각지대의 발생을 막을 수 있으며, 구동정밀도는 데이터 비트 크기(수십 nm) 보다 작아야 할 것이다.

이렇게 수십 μm 이상의 구동 변위를 가지며, 나노미터 수준의 구동 정밀도를 가질 수 있는 마이크로 구동기는 크게 압전현상(piezoelectric effect)을 이용한 것과 정전기력(electrostatic force)을 이용한 것, 그리고 전자기력(electromagnetic force)을 이용한 것 등 3가지 유형으로 나눌 수 있다.

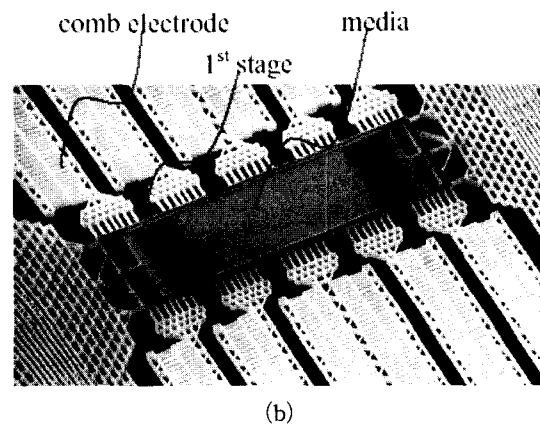
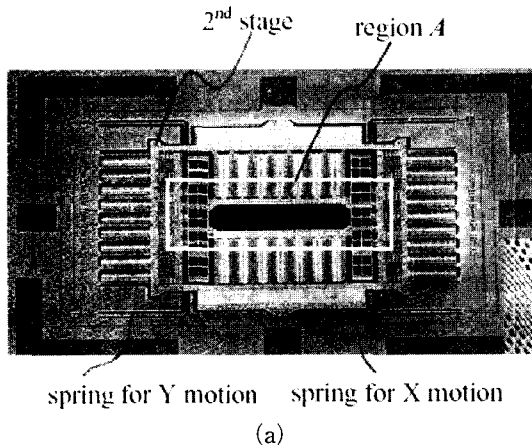
1. 압전 구동기

인가 전압에 따른 압전체의 부피변화를 이용한 압전 구동기는 구동전압에 비해 이송변위가 작다는 치명적인 단점을 가지고 있다. 실제로 1인치 튜브 형태의 압전체를 2차원 구동기로 사용하는 경우 $0.01 \mu\text{m}/\text{V}$ 정도의 구동거동을 보임으로, 탐침형 정보저장장치에 적용하기 위한 수십 μm 이상의 구동 변위를 얻는 것은 불가능하다. 벌크 형태가 아닌 박막 또는 후막 형태의 압전체 구조를 제작하는 경우 구동 변위는 더 작아지는 것이 자명하다. 따라서 압전 현상을 이용한 마이크로 구동기는 탐침형 정보저장장치에 적용이 어렵다고 볼 수 있다. 물론 크기를 고려하지 않고 단지 구동변위만을 얻기 위해서 다양한 구조들이 제안되어 이를 주사탐침현미경의 나노 구동기로 상용화하고 있는 경우도 존재하나, 이러한 구조는 소형화를 추구하는 탐침형 정보저장장치의 미디어 구동기로는 적합하지 않다.

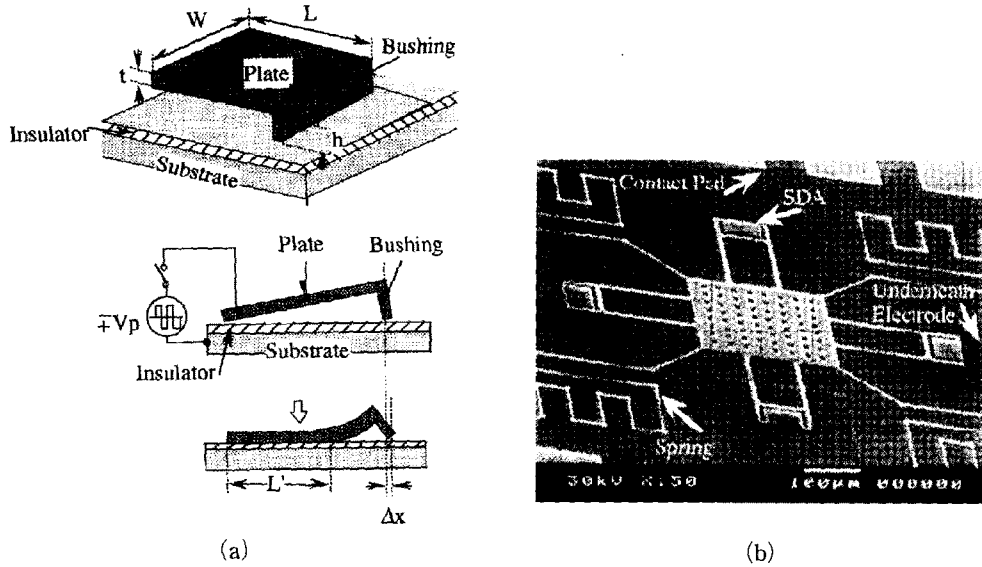
2. 정전기력을 이용한 구동기

정전기력을 이용한 구동기는 가장 연구가 많이 이루어져 왔다.

정전기력을 이용한 구동방식은 빗살 모양의 전극간의 정전기력을 이용한 콤 구동기(Comb Drive), 구동판과 기판 사이의 정전기력과 마찰



〈그림 12〉 Kionix사에서 개발한 콤 형태의 미디어 구동기
(a) 미디어 구동기 전체 모습 (b) (a)의 region A 영역을 확대한 모습



〈그림 13〉 (a) 스크래치 구동기의 구동원리 (b) 일본 동경대학에서 제작한 이차원 구동이 가능한 스크래치 구동기

력을 이용한 스크래치 구동기(Scratch Drive), 정전기력에 의한 클램핑 현상을 이용한 정전 셔플 모터(Electrostatic Shuffle Motor), 상부 전극과 하부 전극 사이의 정전기력을 이용한 정전 표면 구동기(Electrostatic Surface Drive) 등이 있다.

콤 형태의 구동기 경우는 마이크로 가속도센서, 자이로 센서 등에 폭넓게 적용되고 있는 기술이나 미디어 구동기로 적용하기에는 구동력이 작고, 고전압이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 과거에 미국의 Kionix사 및 국내의 삼성중기원에서 이를 제작한 경험이 있으며, 현재는 Carnegie Mellon 대학에서 전체 크기 14mm×14mm, 미디어 크기 8mm×8mm, 구동변위 ±50μm (구동 전압 120V)를 가지는 구동기를 제작하고 있다.

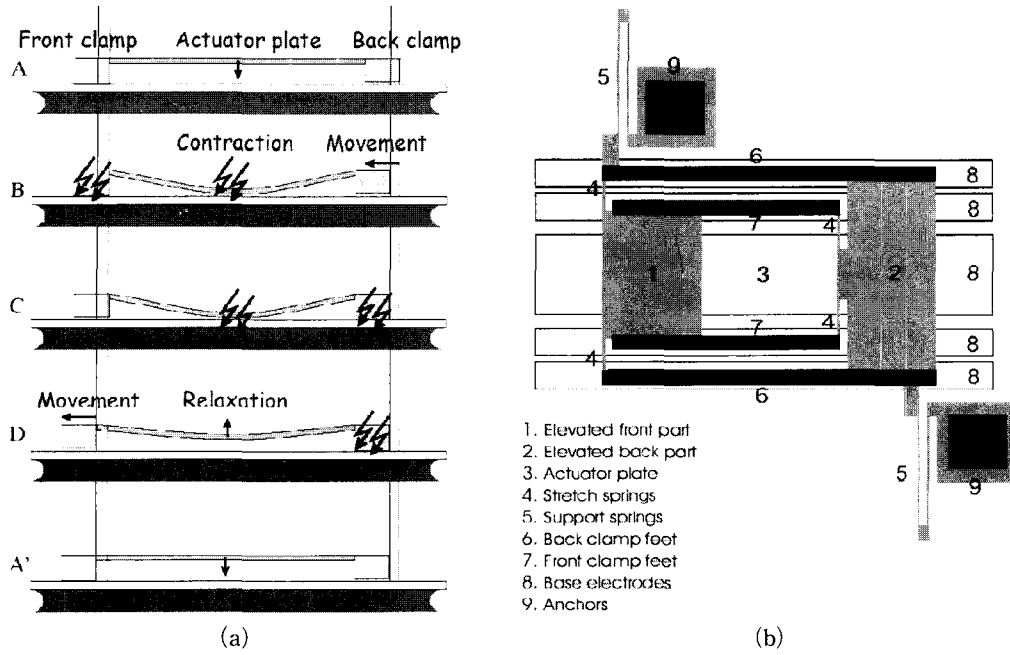
구동판과 기판 사이의 정전기력과 마찰력을 이용한 스크래치 구동기는 끝에 작은 부싱이 달려 있는 유연한 도전성 판으로 이루어져 있는데, 이 판과 부도체로 덮여 있는 전도성 기판 사이에 전압이 인가되면 위쪽 판이 정전기력에 의해 휘어지면서 부싱을 떨어내게 된다. 그 후 전압을 제거하면 부싱과 부도체 면 사이의 마찰력의 비대

칭성 때문에 위 판이 조금 밀려가게 된다. 이러한 방식으로 1997년 일본 동경 대학의 Fujita는 Transducers '97에서 구동전압이 200V일 때, 최대 변위 50μm, 제어정밀도 25nm를 갖는 2차원 구동기를 보고하였다.

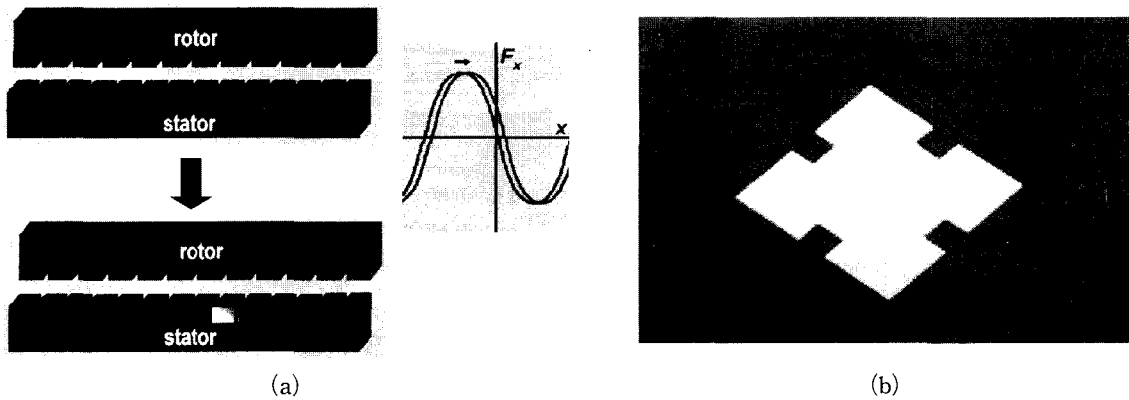
그러나 스크래치 구동기는 대변위를 확보하기 위한 구동전압이 크고 (>200V), 부상 부분이 마찰에 의해 마모될 가능성이 크기 때문에 신뢰성에 문제가 있으므로 탐침형 정보저장장치의 구동기로는 고려되고 있지 않다.

1998년 네덜란드의 Niels Tas 등에 의해 고안된 정전 셔플 모터는 정전기력에 의한 클램핑 현상을 이용하여 25V의 판(plate) 인가전압과 40V의 클램프(clamp) 전압을 사용하여 최대 43μm의 변위를 얻었다. 이는 스크래치 구동기에 비해 상대적으로 낮은 전압에서의 구동이 가능하다는 장점을 가지고 있으나, 이 구조의 경우 역시 클램프 부분과 기판 사이의 마찰이 존재하여 신뢰성의 문제를 가지고 있으며 아직 2차원 구동기로의 개발된 적이 없는 상태이다⁶⁾.

상부 전극과 하부 전극 사이의 정전기력을 이용한 정전 표면 구동기는 1997년 HP의 Storrs Hoen에 의해 제안된 이후 탐침형 정보저장장치



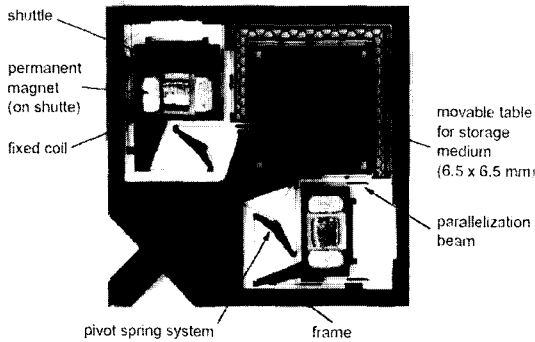
<그림 14> 정전 셔플 모터 (a) 동작 개념도 (b) 구조도



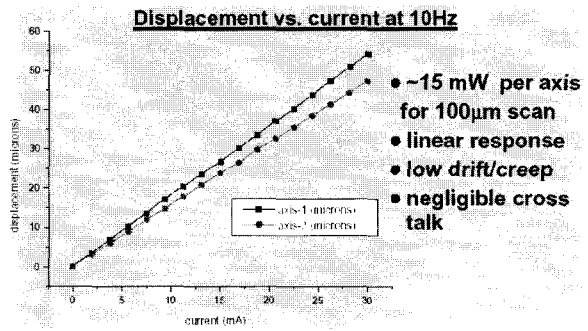
<그림 15> 정전 표면 구동기 (a) 개념 (b) 제작된 정전표면 구동기

구동기로 적용하기 위하여 개발되어 오고 있다. 정전 표면 구동기는 미디어 플랫폼 하부에 형성된 전극(translator)들과 지지판에 형성된 전극(stator)들 사이에 작용하는 정전기력을 이용한 것으로, stator 전극에 인가되는 전압을 변화시킴으로써 연속적인 구동을 얻는 방식이다. 현재 까지 보고된 바에 따르면 정전 표면 구동기는 4 V의 구동전압에서 3mm×3mm 크기의 미디어

를 8μm 정도 구동할 수 있다고 알려져 있다. 이론치에 의하면 구동변위는 구동전압의 제곱에 비례하므로, 다른 구조의 정전기력을 이용한 구동기에 비해 상대적으로 낮은 전압에서 대변위 구동이 가능할 것으로 예견되며, 7개의 전극 쌍을 가진 구동기를 실제로 제작하여 5nm 수준의 제어분해능을 달성한 것을 보고하였다^[7].



(a)



(b)

〈그림 16〉 IBM에서 제작한 전자기력을 이용한 미디어 구동기 (a) 구동기 사진 (b) 구동특성

3. 전자기력을 이용한 구동기

전자기력을 이용한 구동기는 자기장 하에 놓여 있는 도선에 작용하는 전자기력 (Lorentz force) 을 이용하여 미디어를 구동하는 방식이다. 전자기력을 이용한 구동기의 장점은 정전기력을 이용한 구동기에 비해 구동력이 크기 때문에 상대적으로 낮은 전력 구동이 가능하며, 정전기력을 이용하는 경우는 구동력이 인가전압의 제곱에 비례함에 비해 전자기력을 이용한 구동기는 구동력이 인가전류에 선형적으로 비례하므로, 인가전압/전류에 대해 구동범위를 제어하는 회로 구성에 있어 이점을 가지고 있다. 또한 정전기력을 이용한 구동기에 비해 마이크로머시닝을 이용하여 구현해야 하는 최소 구조물의 크기가 10배 이상 크기 때문에 공정이 상대적으로 용이하다는 장점을 가지고 있다.

탐침형 정보저장 장치 연구를 주도하고 있는 IBM은 이러한 이점에 바탕을 두고 전자기력을 이용한 미디어 구동기를 중점적으로 연구해오고 있다. 초기에는 영구자석을 하판에 고정하고 코일부에 미디어를 형성하는 방식으로 제작해왔으나, 이 경우 코일에서 발생하는 열문제로 인해 현재는 코일을 고정하고 자석부와 연계된 미디어부를 구동하는 방식을 시도하고 있다. 이 구조는 열문제 뿐 아니라 mass balance 개념을 도입해 외부의 충격이나 진동에 강한 구조를 가진다. 최근 이러한 구조 제작에 성공하여 우수한 구동 선

형성 및 저전력 소모 (100um 구동시 15mW 소모)의 특성을 가짐을 보고하였다^[8].

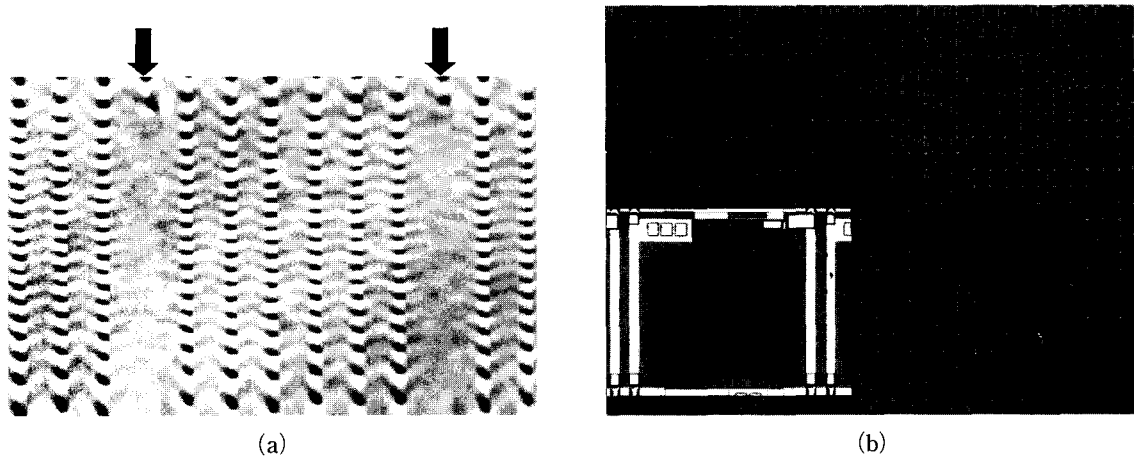
V. Integration

〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 탐침형 정보저장 장치는 여러 단계의 집적화 과정을 거친다. 첫 번째는 정보의 입출력속도를 향상시키기 위해 수백~수천 개의 캔틸레버를 어레이 구조로 집적화하는 것이며, 두 번째는 캔틸레버 어레이를 작동시킬 수 있는 회로와 집적화시키는 단계이며, 세 번째는 기록미디어를 미디어구동기에 집적화시키는 단계이며, 마지막으로 구동기/미디어부와 캔틸레버어레이/작동회로부를 전체적으로 조립하는 단계이다.

1. 이차원 캔틸레버 어레이

현재까지 가장 성공적으로 어레이 구조를 제작한 결과는 IBM과 LG전자의 결과로서, IBM은 열기계 기록/열변위 재생이 가능한 32×32 캔틸레버 어레이 구조를 성공적으로 제작하였으며, LG전자의 경우 역시 열기계 기록/압전센서 재생이 가능한 32×32 캔틸레버 어레이 구조 제작에 성공하였다.

이러한 어레이 구조에서 가장 중요한 것은 각



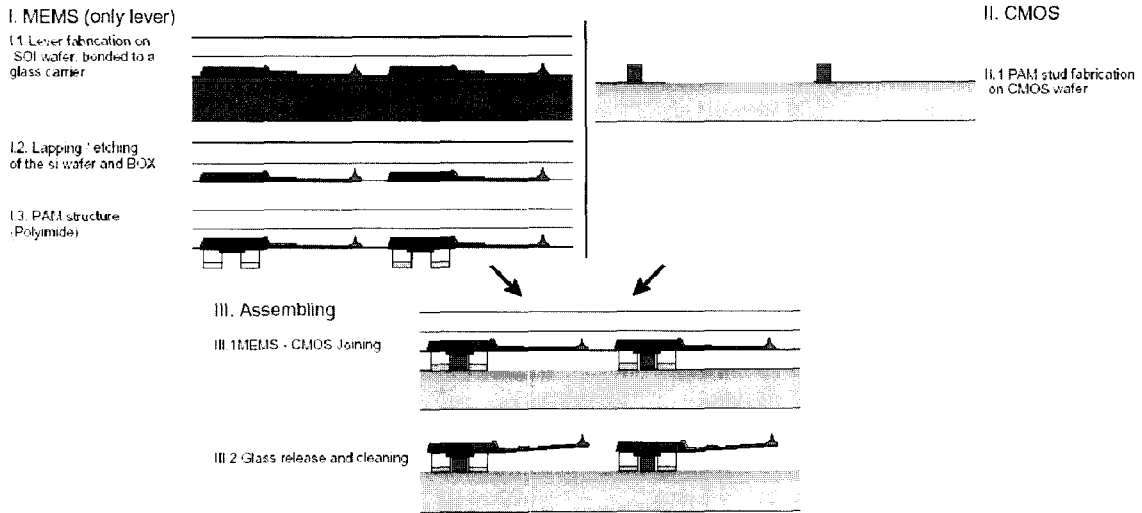
<그림 17> (a) IBM에서 제작한 32×32 캔틸레버 어레이 구조 (b) LG전자에서 제작한 32×32 캔틸레버 어레이 구조

캔틸레버의 균일도이다. 열기계 기록 방식에서는 개개의 캔틸레버의 수직 방향에 대한 구동기가 없기 때문에, 탐침의 높이 균일도나 히터 저항의 균일성이 요구된다. IBM의 결과에 따르면 탐침 높이는 80 nm 이하의 편차를 보이고, 히터 저항은 1% 이내의 오차를 갖는다.

회로를 집적화하는 것이 어려워서 한 줄씩 시간 분할로 구동하는 방식을 채택하였으나, 이 경우 동시에 작동할 수 있는 캔틸레버의 갯수는 한 줄에 국한된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 IBM에서는 최근에 “Device Transfer Method”를 고안하였는데, 이 방식은 CMOS 회로를 캔틸레버 구조와 완전히 분리하여 제작한 후 접합하는 방식으로 궁극적으로는 개개의 캔틸레버를 작동할 수 있도록 제작이 가능하다^[9].

2. 캔틸레버 어레이/동작회로 집적

초기에는 개개의 캔틸레버를 동작시키는 전자



<그림 18> IBM에서 고안한 Device Transfer Method 개략도

3. 기록미디어/미디어 구동기 집적

기록미디어를 구동기 위에 집적하는 방법은 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 첫 번째는 기록매체를 따로 제작하여 구동기에 접합시키는 방법인데, 이는 접합시 수직방향의 균일도를 맞추기가 어렵고, 미디어 전체 질량의 증가로 인해 안정적인 구동을 위한 주파수가 낮아짐으로써 데이터 입출력 속도가 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 다음으로는 기록미디어를 증착하는 방법인데, 구동기를 제작하기 전에 먼저 미디어를 증착하면 구동기 제작 공정에서 미디어를 보호하기가 힘들다는 단점을 가지고 있다. 따라서 가장 좋은 방법은 구동기 제작 후에 기록미디어를 증착하는 방법인데, 자성박막이나 상전이 박막의 경우 진공 증착이 가능하므로 문제가 안 되나 열기계 기록방식에서 사용하는 폴리머미디어의 경우 쉽지 않다는 단점이 있다. 결국 폴리머미디어의 경우는 스프레이 증착이 가장 좋은 해결책으로 생각된다.

4. 최종 조립

아직 이 단계까지 연구된 보고는 없지만, 캔틸레버부와 미디어구동기부를 접합하기 위해서는 수 μm 이내의 간격을 유지하면서 동시에 평평도가 확보되어야 하며, 높이 공차가 아주 작아야 한다. 또한 작은 먼지 입자 하나라도 시스템 전체 조립을 망칠 수 있으므로 아주 높은 청정 환경이 필요할 것으로 보인다. 하지만 이러한 기술은 충분히 확보될 수 있는 기술이므로, 현 단계에서 심각한 수준으로 고려해야 할 문제는 아니라고 판단된다.

VI. 시스템 제어

시스템 제어를 위해서는 서보시스템이 필수적이다. 서보시스템은 탐침이 임의의 위치에서 데이터를 기록/재생하고자 하는 데이터 영역을 찾아가는데 필요하며, 또한 기록/재생시 탐침이 데

이터 트랙에서 벗어나는 것을 방지하기 위해 필요하다. Comb 드라이브 형태의 구동기를 사용하는 경우 전극자체에서 구동기의 위치변화를 감지할 수 있기 때문에 되먹임회로를 이용하면 별도의 서보마크가 필요하지 않지만, 전자기력을 이용한 구동기를 사용하는 경우는 따로 서보마크 영역을 두어야 한다. IBM에서는 최근 위치 오류 신호를 감지하고 이를 되먹임회로로 제어할 수 있는 서보마크에 대한 연구결과를 보고하였으며, 이에 따르면 전체 데이터 영역의 5% 정도를 서보마크에 할당함으로써 탐침형 정보저장장치의 서보 기능을 원활히 수행할 수 있다고 한다^[10].

VII. 결 론

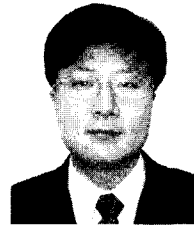
그동안 많은 연구를 통해 기록/재생을 위한 캔틸레버 어레이 제작기술이나 미디어 구동을 위한 구동기 제작기술 등 단위 기술에 있어서는 많은 진보를 가져왔지만, 탐침형 정보저장장치는 아직 전체 시스템 수준으로 완성되지는 않은 상태이다. 보다 높은 저장밀도와 신뢰성을 모두 갖춘 새로운 기록/재생 방식에 대한 요구도 여전히 존재하고 있으며(실제로 IBM에서는 열기계 방식이 단기적으로는 시스템화 될 수 있지만, 궁극적인 솔루션은 아니라는 입장임), 구동기에 있어서도 보다 값싸고 신뢰성 있는 성능을 발휘할 수 있으며, 미디어의 증착이 용이한 제작방식에 대한 요구가 남아있다. 특히 구동기 분야에 있어서는 현재 상태로는 실제 정보를 기록할 수 있는 영역보다 시스템을 구동하기 위한 영역이 더 많은 상태로 이러한 시스템 오버헤드 문제를 어떻게 해결할 것인가 등에 대한 문제가 남아있다.

그럼에도 불구하고 여전히 탐침형 정보저장장치는 기록밀도의 우수성과 소형화의 이점 및 저가격화 가능성 등에 기반하여 현재 정보저장장치의 물리적인 한계를 뛰어넘을 수 있는 차세대 정보저장장치의 유력한 대안 중의 하나임에 틀림없다고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] L. R. Carley et al., "Single-chip computers with microelectromechanical systems-based magnetic memory", *J. of Appl. Phys.*, 87, 6680-6685, 2000
- [2] T. Onoue, M. H. Siekman, L. Abelman, J. C. Lodder, *J. Mag. Magn. Mat.* 2004, to be published.
- [3] P. Vettiger et al., *IEEE Trans. Nanotech.* 2002, 1, 39-55, 2002
- [4] C. S. Lee, W. H. Jin, H. J. Nam, S. M. Cho, Y. S. Kun, J. U. Bu, *Proc. 16th Ann. Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems, IEEE*, 28-32, 2003
- [5] S. Neberhuis, "Probe-based recording technology", *J. Mag. Magn. Mat.*, 249, 447-45, 2002
- [6] N. Tas et al., "Modeling, design and testing of the electrostatic shuffle motor", *Sensors and Actuators*, A70, 171-178, 1998
- [7] S. Hoen et al., *Technical Digest, Transducers'03*, 344-347, 2003
- [8] T. R. Albrecht et al. private communication
- [9] M. Despont, U. Drechsler, R. Yu, H. B. Pogge and P. Vettiger, "Wafer-scale microdevice transfer/interconnect: from a new integration method to its application in an AFM-based data-storage system", *Transducer'03*, 1907-1910, 2003
- [10] E. Eleftheriou et al., "A nanotechnology-based approach to data storage", *IBM Research Report*, 2003

저자 소개



최영진

1993년 2월 서울대학교 물리학과 (학사), 1995년 2월 서울대학교 물리학과 (석사), 1999년 2월 서울대학교 물리학과 (박사), 1997년 11월~1999년 4월: 서울대학교 나노기억매체 연구단 연구원, 1999년 2월~현재: 전자부품연구원 나노정보에너지 연구센터 책임연구원, <주관심 분야: SPM, 탐침형 정보저장장치>