

## 근접 탐침형 정보 저장기 기술의 현황과 전망



**박강호**  
(한국전자통신연구원 선임연구원)

### 1. 근접 탐침형 정보 저장기 기술의 정의

#### 1.1 근접 탐침형 정보 저장기 기술의 필요성

정보통신의 발달로 다양화되는 정보화 사회의 요구에 따라 정보 저장기의 대용량화 및 소형화의 근간이 되는 고밀도 기록 기술로의 발전은 가속화되고 있지만 기존의 하드디스크, 광디스크로 대표되는 현재의 자기, 광 저장 기술은 그 원리적 한계로 인하여 정보 수요량의 증가에 따른 기술 발전 속도를 감당하기 어려워지고 있다. 이러한 위기를 극복하기 위해서 기술 선진국에서는 수년 전부터 새로운 개념의 정보 저장기 기술의 가능성을 탐색하여 왔고 그러한 노력의 결과로서 대두되는 기술 중에서 면기록 밀도 면에서 월등하고 완전히 새로운 접근 방법을 모색하고 있는 것이 근접 탐침형 정보 저장기 기술이다[1].

본 고에서는 새로운 개념의 대용량 초소형 정보 저장 장치의 가시화라는 관점에서 국내외에서 연구된 탐침형 정보 저장기

기술의 기술적인 관점에서의 연구 현황과 함께 제품화의 관점에서의 연구 전망에 대해서 다루고자 한다.

#### 1.2 근접탐침 정보 저장기 기술의 원리 및 분류

1981년 IBM zurich 연구소의 Binnig, Rohrer등이 개발한 STM(scanning tunneling microscopy)은[2] 작은 금속 탐침을 시료 위에서 정밀하게 주사 제어하면서 시료의 원자 단위의 관찰이 가능함을 보여주었고 이후 많은 연구자에 의해 다양한 탐침 구조 및 주사 원리를 이용하여 여러 물리량을 측정할 수 있는 다양한 형태의 근접 탐침 현미경 기술로 발전되었는데 이를 통칭하여 SPM(scanning probe microscopy)이라 한다[3].

SPM의 기본 원리는 나노미터 수준으로 끝이 매우 뾰족한 탐침과 이를 시료 위로 주사할 수 있게 하는 PZT 스캐너, 그리고 이들을 제어하고 여러 물리적인 신호를 처리하는 제어 및 정보 처리 시스템으로 구성된다[4].

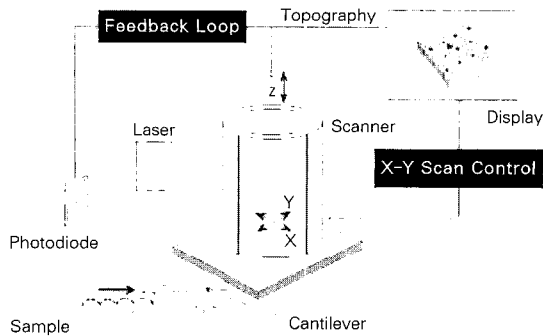


그림 1. SPM중 대표적인 AFM의 측정 원리(4). 캔티레버 끝 부분에 달린 탐침과 시료 표면의 원자사이의 힘에 의하여 캔티레버가 휘는 정도를 레이저 광선이 뒷면에서 반사되는 각도를 포토다이오드로 측정하여 표면 구조의 영상을 얻는다.

탐침의 구조와 측정되는 물리량에 따라 다양한 형태의 SPM 기술들이 개발되었는데, 이들 중에서 정보 저장기 기술에 응용 가능하거나 응용되고 있는 주요 기술들을 아래의 표 1에서 분류하였다.

## 2. 각종 탐침형 저장 기술의 메카니즘 분석

각종의 탐침형 현미경 기술을 이용한 정보 저장 기술들이 현재까지 다양하게 연구되고 있는데 아래 분류표에 해당하는 주요 탐침 기술별로 각각의 기록/재생 메카니즘 원리 및 기술 개발 현황에 대하여 기술하고자 한다.

### 2.1 STM(scanning tunneling microscopy) 기술

STM은 전도성 탐침과 시료사이의 전자의 양자역학적 터널링 현상을 이용하여 시료 표면의 전자 구조를 서브 Å의 해상도로 직접적으로 관찰할 수 있다. 전자의 터널링 전류는 시료와 탐침 사이의 거리에 지수 함수적인 의존성을 갖기 때문에 각종의 탐침형 현미경 기술 중에서 가장 좋은 해상도와 함께 정밀한 전자 구조 측정에 유리하여 정보 저장기 기술로의 응용 가능성이 일찍부터 시도되었다.

표 1. 주요 SPM의 기술별 분류.

SPM 분류	탐침구조	물리량	개발년도	개발자
STM	도체탐침	터널링 전류	1981	Binnig et al.
AFM	도체 및 부도체 탐침	힘	1985	Binnig et al.
EFM	도체탐침	정전기력	1987	Martin et al.
NSOM	개구탐침 (Aperture)	근접광	1982	Pohl
FEP	도체탐침	전계유도 전류	1996	Gibson et al.
MFM	자성탐침	자기력	1987	Wickramasinghe et al.

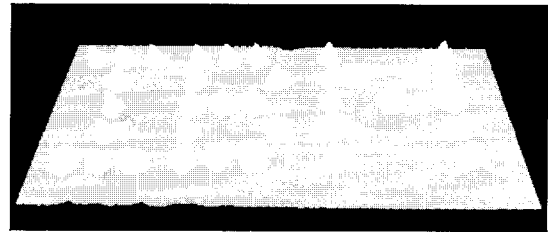


그림 2. STM의 원자 조작 기술을 이용하여 기록된 금속 표면 위의 Xe 원자로 이루어진 IBM 로고(5).

그림 2는 1990년 IBM의 Eigler등이 STM을 이용하여 Ni 표면 위에서 35개의 Xe의 원자 단위의 제어를 통한 1 Peta( $10^{15}$ )bit/in<sup>2</sup>의 정보 기록 가능성을 보여준 결과이다(5). 그러나 STM은 전기 전도가 가능한 도체 및 반도체 등의 시료에서 측정이 용이하고 표면이 오염되면 측정이 어려워지는 약점이 있다. 또한 터널링 전류를 되먹임 회로를 이용하여 일정하게 유지하는 constant current mode(CCM)의 측정이 일반적인데 이러한 원리를 이용할 경우 서브 Å이하의 정밀 간극제어에 따른 탐침과 시료의 충돌에 따른 주사 속도에 제한이 있어 실용적인 정보 저장기 기술의 구현이 어렵다. 최근에는 유기물 박막에서의 전도도의 변화를 탐침으로 유도하여 1nm의 기록 비트를 구현할 수 있는 유기 미디어 중심적인 연구(6)가 진행되고 있는데 위에서 다루어진 약점들 때문에 초고진공(UHV)내에서 반도체 및 금속 표면의 원자 구조의 이해나 미디어의 원리 연구에는 적합하지만 실제적인 정보 저장기 기술로의 발전 가능성은 제한적인 기술로 인식되고 있다.

### 2.2 AFM(atomic force microscopy) 기술

전도성이 있는 시료만이 측정 가능한 STM의 한계를 극복하고자 하는 시도에서 개발된 AFM기술은 탐침이 형성된 캔티레버를 이용하여 탐침과 시료사이의 원자단위의 반발력 또는 인력으로 인하여 캔티레버가 휘거나 그 고유진동수가 변화하는 값을 광학적 또는 전기적으로 측정하여 제어하는 원리로서 시료 표면의 형상을 측정하고 기계적인 상호 작용을 유도하는 기술이다. AFM의 작동 유형은 접촉식(contact mode), tapping mode, 비접촉식(non-contact mode)으로 크게 세 가지로 나눌 수 있다(4).

Contact mode는 탐침과 시료간에 그림 3에서 처럼 1-10nN의 척력이 작용하는 거리에서 주사하여 캔티레버의 휘는 정도를 일정하게 유지하면서 이미지를 얻는 방법이고, tapping mode는 캔티레버를 일정한 주기로 진동시켜 접촉이 일어나는 시간 영역에서 캔티레버의 휘는 정도를 일정하게 유지하면서 이미지를 얻는 방법이다. 이 방법은 해상도는 contact mode와 유사하지만 탐침과 시료가 연속적으로 접촉되지 않으므로 시료의 훼손이 크게 감소되는 효과가 있다. Non-contact mode의 경우, 탐침과 시료사이의 0.1-0.01nN의 인

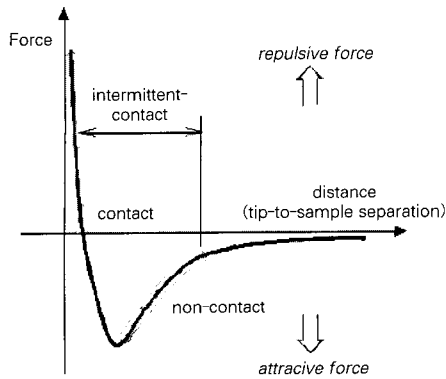


그림 3. 탐침과 시료 표면의 원자 간력과 거리에 따른 인력과 척력의 관계를 보여주는 그림. 접촉식 AFM의 경우 척력을 비접촉식 AFM의 경우 인력을 이용한다(4).

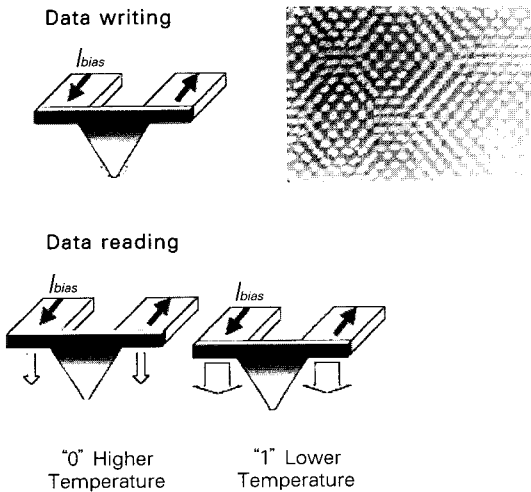


그림 4. AFM탐침의 전기저항열에 의한 PMMA박막에서의 Thermomechanical 데이터 기록 및 재생 방식(7). (Inset) 기록밀도 400Gb/in<sup>2</sup>에 해당하는비트 크기 40nm의 기록 패턴(8).

력이 작용하는 원거리에서 캔틸레버가 고유 진동수로 진동하면 원자간의 인력에 의해 고유진동수가 변하게 되어 진폭과 위상에 변화가 생기고 그 변화를 lock-in amp로 측정한다.

AFM의 경우 접촉식이 정보 저장기 기술에서 가장 유리한데, 그 이유는 탐침과 시료사이를 일정하게 유지하기 위한 되먹임 회로나 lock-in amp와 같은 부수적인 장치가 필요하지 않고 따라서 고속으로 주사가 가능하여 정보 저장기에 있어서 기록 밀도 못지 않게 중요한 정보 처리 속도(data rates)를 키울 수 있기 때문이다. 문제는 탐침의 훼손과 미디어의 열화(degradation)인데 유기 미디어 등의 경우는 이러한 문제를 극소화할 수 있다.

일반적으로 AFM은 표면 형상을 직접적으로 정보 비트로

이용하거나 표면 형상에 의한 간접적인 열저항 차이를 정보 재생에 응용하는 방법 그리고 전기전도 탐침을 이용하여 전기전도도의 차이를 정보 비트로 이용하는 방법들이 가능하다. 이제까지 개발된 많은 기술 중에서 가장 상용화에 접근한 기술이 그림4의 IBM의 thermomechanical 기록/재생 방식인데, 이는 전기저항에 의해 가열되는 탐침을 이용하여 PMMA 등의 폴리머에 pit를 형성하여 정보를 기록하고 정보를 재생할 때는 형상 자체를 읽거나 탐침이 미디어에 접촉하는 면적이 넓어져 가열된 탐침의 온도 저항이 달라지는 것을 측정하는 방법을 이용한다(7,8). IBM은 이러한 기술을 이용하여 디스크형 또는 MEMS 스캐너형의 정보 저장기 시제품을 개발하고 있는데 "Millepede"라고 불리는 MEMS스캐너를 이용한 정보 저장기의 경우 32x32개의 다중 탐침이 다중으로 정보를 기록하고 이를 재생하기 때문에 데이터 전송속도를 원리적으로 크게 향상시킬 수 있는 장점이 있다(9).

전기 전도도의 차이를 정보 기록/재생에 응용하는 기술은 일본의 Matsushita[10]에서 광디스크의 재기록 미디어에 이용되는 상변환 미디어를 전기적으로 가열하여 결정-비정질의 상변화를 유도하고 이에 따른 전기 전도도의 차이를 AFM 탐침으로 측정하여 정보를 재생하는 기술과 함께 Langmuir-Blodgett(LB) 박막에서의 전기 전도 변화를 유도하는 기술들이 Canon[11]등에서 연구되고 있다.

### 2.3 EFM(electrostatic force microscopy) 기술

EFM은 시료 표면의 정전기력을 감지하여 이미지로 보여주는 것으로, 그 원리는 전압이 가해진 탐침과 시료 표면에 존재하는 다양한 종류의 전하 및 전압에 의해 발생하는 미세한 정전기력을 측정하여 표면의 전기적 성질을 얻는 것이다. 비슷한 기술로서 탐침과 시료사이의 정전용량 (capacitance)를 측정하여 이를 영상화하는 SCM(scanning capacitance microscopy)도 비슷한 기술 계보로 분류될 수 있다.

이러한 정전하를 이용하는 정보 저장 기술로서는 그림5에서 처럼 1) 전기 전하를 산화물 박막에 trap시켜 전기용량 변화

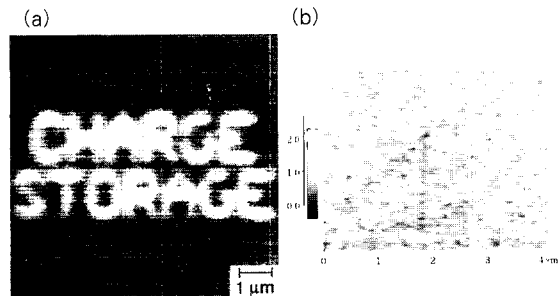


그림 5. (a) NOS 박막에서의 SCM을 이용한 정보 저장 기술(12), (b) EFM을 이용한 PZT 박막 위에서의 기록 크기 60nm 정보 기록/재생 예(삼성).

를 측정하는 방법[12] 2) 강유전체 박막의 도메인을 인위적으로 형성하여 EFM으로 읽는 방법[13]등이 연구되고 있다. 이 방법은 정전하를 이용하므로 재기록이 원리적으로 수월한 장점 때문에 많이 연구되고 있는 상황이다.

## 2.4 SNOM(scanning near-field optical microscopy) 기술

광학 현미경이 갖고 있는 빛의 회절에 의한 해상도의 한계인  $0.6\lambda/NA$  ( $\lambda$ :파장,  $NA$ : numerical aperture)[14]를 극복하는 기술로서 20C 초반에 제안된 근접 aperture를 이용한 근접장 광 기술의 아이디어가 1980년대초 STM의 정밀 탐침 제어 기술의 발전을 통하여 IBM zurich의 Pohl.[15]등에 의해 현실화된 기술이 SNOM 또는 NSOM으로 불리는 기술이다. 광섬유의 끝을 식각하여 뾰족하게 만든 뒤, Al 또는 Au/Cr 등으로 코팅하여 aperture를 만드는 방법과 AFM 캔틸레버 형태에 피라미드형으로 공경하여 aperture를 제작하여 시료에 근접하여 주사함으로써 표면 형상 뿐만 아니라 100nm이하의 근접장 광 영상도 동시에 얻을 수 있는 기술로 발전되었다. [그림 6]

정보 저장 기술로의 적용은 Bell Lab.의 Betzig등에 의한 MO를 이용한 60nm 비트사이즈 광 정보 기록/재생 기술이 최초이고[16], 그 이후 일본의 Hitachi[17]등에서 상변화 미디어를 이용한 기록 기술 그리고 광변색 유기 미디어를 이용한 광 기록/재생 기술 등이 시도되었다[18]. 그림 7과 같이 비접촉 방식으로 정보 기록/재생 할 수 있고, 표면 형상의 정보보다 훨씬 더 안정적으로 정보를 입출력할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 VSAL(very small aperture laser)[19]을 이용한 고속 기록/재생 기술 및 aperture에서의 광 투과율의 증대를 위한 공정 기술 연구와 함께 어레이형 다중 aper-

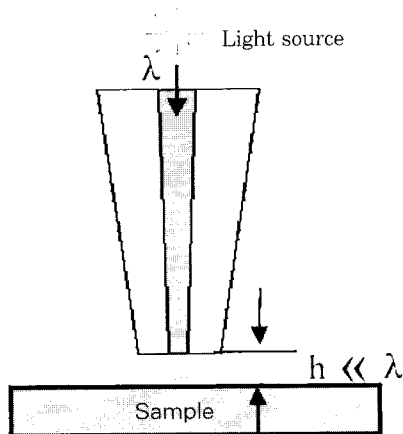


그림 6. 광섬유 탐침에서 나오는 근접장 광을 이용한 SNOM기술의 원리.

ture등을 이용한 고속 기록/재생 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

또한 전기적으로 정보를 기록하고 광학적으로 정보를 재생함으로써 data rates를 키울 수 있는 다기능 탐침형 정보 기록 기술(MPR: multi-functional probe recording)을 본 연구팀이 제안하고 있다[21]. 근접장 광학을 이용한 정보 저장

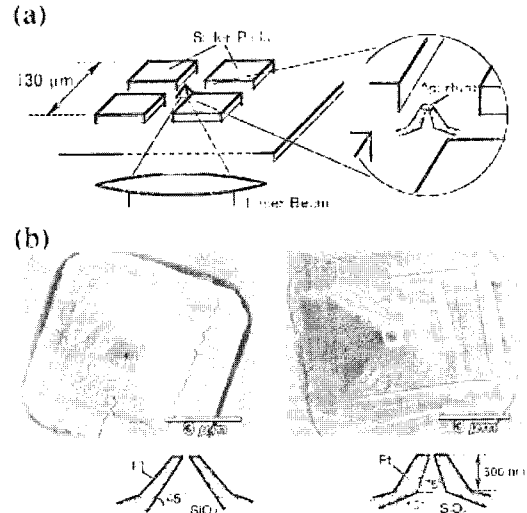


그림 7. (a) 슬라이딩 패드 중간에 형성된 SNOM 탐침 (b) single and double tapered aperture 탐침의 SEM 영상[20].

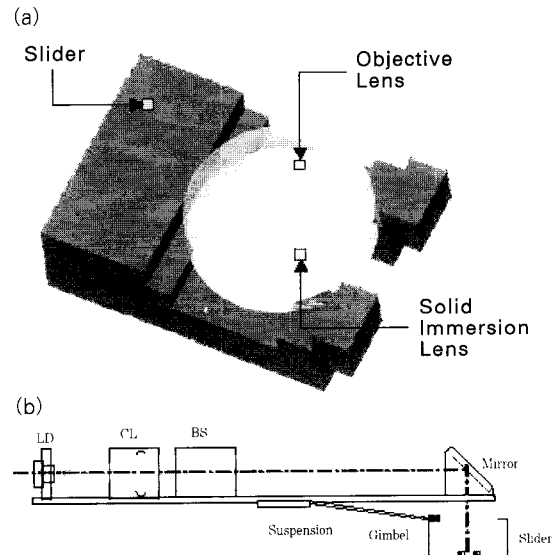


그림 8. (a) LG가 개발중인 SIL 렌즈를 이용한 근접장 헤드의 개략적인 구조도[23]. (b) SIL 렌즈를 이용한 근접장 헤드의 집광 구조.

기 기술은 SNOM과 같은 방식 말고도 NA(numerical aperture)가 큰 Solid Immersion Lens를 이용하여 현재의 광학 분해능을 2-3배 키워서 정보를 기록하고 재생하는 NFR(near field recording)기술이 미국 Stanford 대학과 TeraStor사를 중심으로 제안되었고[22] 현재는 일본과 한국의 CD/DVD 제조업체인 Sony, LG등이 하드 디스크의 슬라이드 헤드에 SIL을 장착한 고밀도 광 디스크 제품 개발에 매진하고 있다[23]. (그림 8)

그 외에도 현재의 광디스크 미디어에 비선형 매체를 삽입하여 매체의 온도 차이에 따른 근접장의 광 채널을 통한 Super-Rens[24], 그리고 광자기 매체에서 부가적인 자화 구조를 이용하여 기록 밀도를 향상시킨 MAMMOS[25]와 같은 매체의 근접장 광 기록 기술 등도 일본 업체를 중심으로 연구 개발되고 있다.

### 2.5 FEP(field emission probe) 기술

탐침과 시료가 너무 근접할 경우 탐침의 휘손이 야기되어서 기록/재생의 안정성이 문제가 될 수 있기 때문에 HP를 중심으로 진공 중에서 탐침에서 방출되는 전계 방출 전자에 의한 국소적인 상변화 유도와 함께 전계 방출 전류에 의한 발광을 이용하여 정보를 기록하고 재생하는 원리를 이용하는 다중 어레이 탐침형 정보 저장기 기술을 연구 개발하고 있다[26].

### 2.6 MFM(magnetic force microscopy) 기술

실리콘 탐침에 강자성체를 코팅시켜 시료 표면의 자기장과 탐침의 자기 모멘트와 작용하는 힘을 이용하여 표면의 자기장

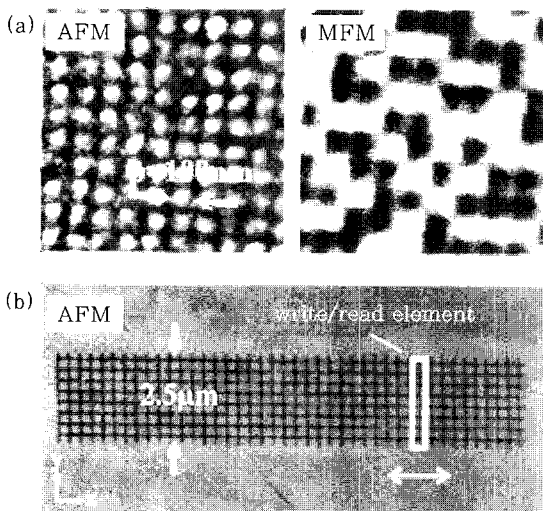


그림 9. (a) 패턴된 CoPtCr 수직자기 미디어의 자기 기록 AFM/MFM 영상 (b) 미디어 전체 패턴의 AFM 영상[28].

의 세기의 분포를 측정하는 기술이다. 일반적인 AFM처럼 자기력에 의한 캔틸레버의 휘는 정도를 이용하거나 캔틸레버의 고유진동수가 변화되는 것을 감지하여 자기력을 영상화할 수 있다. 이를 이용한 정보 기록/재생 기술은 자성체가 코팅된 탐침을 이용하여 코일을 이용하여 자성시료 표면을 국소적으로 자화시키고 기록된 자성도메인을 자화된 탐침으로 자기력을 측정함으로써 정보를 재생하는 원리를 이용한다[27].

최근에는 고속 주사가 가능한 자기저항(MR : magneto resistance) 헤드 기술을 응용한 자기 탐침 구조를 채택한 고밀도 기록/재생 기술들이 IBM[28] 및 CMU(Carnegie Mellon Univ.)의 DSSC (data storage systems center)등에서 연구 개발되고 있다. (그림 9)

## 3. 탐침형 저장 기술의 핵심 요소기술 분석

탐침형 정보 저장 기술은 높은 기록 밀도에도 불구하고 탐침과 시료사이가 근접하여야 하므로 생기는 탐침의 마모 및 휘손, 시료의 열화 그리고 기록/재생 속도의 저하 및 불안정성이 극복되어야 할 과제이다. 이러한 기술적 관점에서 핵심이 되는 요소 기술을 분류하고 세부적인 분석을 수행하였다.

### 3.1 미디어

탐침형 정보 저장기의 미디어의 경우, 공기중에서도 안정적이고 또 탐침의 휘손을 극소화하는 특성을 가져야만 한다. 이제까지 연구되고 있는 소재들은 표2에서와 같이 유기물, 산화물 박막, 자성 박막, 금속 박막 등이 있는데 유기물이 가장 적합한 특성을 갖고 있고 반응성 소재의 경우 표면 passivation 처리가 필수적이므로 표면 처리에도 불구하고 기록/재생이 가능한 메카니즘 및 그 매체 선택이 중요한 핵심 사항이다. 현재까지 다루어진 매체 중에서 thermomechanical 방식의 PMMA 미디어나 conductivity를 이용하는 LB등의 유기 미디어 그리고 SNOM을 이용하는 표면 passivation이 된 상변환 미디어, 자기 미디어 그리고 SCM이나 EFM을 이용하는 산화막, 강유전체(PZT) 박막등이 유력한 후보들이다. 단 박막의 경도가 너무 클 경우는 접촉식의 AFM방식은 탐침의 휘손 때문에 어려움이 있다.

### 3.2 탐침

탐침형 정보 저장기에서 탐침은 가장 핵심이 되는 요소기술이다. 일반적으로 AFM 탐침의 경우, 견고성과 안정성을 동시에 갖고 있어야 하며 마찰에 따른 기계적 열적 변화에 강해야 하므로, 실리콘 캔틸레버 탐침을 그대로 사용하거나 견고하고 산화가 잘 안되는 물질을 코팅하는 형태가 가능하다. 가장 많이 쓰이는 코팅 재료로는 W, Ti, Pt, Au등의 금속성 재료가 일반적이고 다이아몬드나 카본 나노튜브등의 재료도 경도가

표 2. SPM 기술 응용 미디어 및 기록/재생 메카니즘 기술 현황.

SPM type	Read/Write mechanism	bit size(nm)	W/R speed	Media	Research Institutes
STM	Conductance change	1	1 $\mu$ s/?	conjugated organic compounds (NBMN-pDA)	Oak Ridge NL and Chinese Academy of Science(6)
AFM	Thermomechanical	10-50	4 $\mu$ s/1 $\mu$ s	polymethyl methacrylate(PMMA)	IBM(7)
	Conductance change	10	0.5ms	a-GeSb <sub>2</sub> Te <sub>4</sub>	Matsushita Co.(10)
	Conductance change	10	2 $\mu$ s/10 $\mu$ s	polyimide Langmuir-Blodgett films	Cannon Inc.(11)
EFM/SCM	Charge storage(SCM)	75	20 s	nitride-oxide-silicon(NOS)	Stanford U.(12)
	Polarization(EFM)	40-50	100 $\mu$ s/?	PZT	Hewlett-Packard(13)
SNOM	magneto-optic domain switching	60	N/A	Co/Pt multilayer films	AT&T Bell lab. and Carnegie Mellon Univ.(16)
	Phase change	60-80	0.5ms/?	Ge2Sb2Te4	Hitachi Ltd.(17)
	Phase change(VSAL)	50-250	40ns/40ns	Ge0.4Sb0.1Te0.5	Bell Lab.(19)
MFM	Magnetoresistive(MR) head probe	60-100	N/A	patterned CoPtCr film	IBM(28)

뛰어나고 해상도를 키울 수 있기 때문에 많이 사용되고 있다. 또한 전기적, 자기적, 열적, 광학적 기능을 보유하는 탐침이 필요하므로 다기능을 위한 설계 및 공정 제작 기술도 요구된다.

IBM의 thermomechanical 방식의 기록/재생 기술에 사용되는 탐침은 실리콘 탐침의 끝을 전기저항이 크게 제작하여 저항열을 발생시키고 이것을 미디어에 접촉시켜 형상 변화를 유도한다. MFM에 많이 사용되는 자기 탐침은 Co, Cr 등의 자성재료를 탐침에 코팅하여 사용하게 된다. 가장 제작이 어려운 탐침이 SNOM용 탐침으로서 초기에는 광섬유를 pulling 또는 식각하여 제작하는 형태로 사용되었으나(16), 최근에는 실리콘의 방향성 식각 공정을 이용하여 피라미드 형태로 수십나노미터의 aperture를 만들거나(29) 그림 10과 같이 실리콘 저온 산화막 기술을 이용하여 제작(30) 또는 FIB 등으로 직접 구멍을 뚫는 등(19) 다양한 방식의 실리콘 캔티레버형 aperture 탐침이 제작 사용되어 사용되고 있다.

특히 SNOM탐침의 경우 빠른 속도의 정보 기록이 관건이기 때문에 광이 aperture를 투과하는 광효율이 중요하데, 최근에 탐침 끝의 각도를 완만하게 만들어서 광 투과율 감소에 큰 영향을 미치는 cut-off effect를 최소화하거나(30), 굴절률이 큰 소재를 이용하는 방법, 자체 집광 원리를 이용하는 방법(31), 그리고 금속 표면에 주기적으로 격자 구조를 형성하여 표면 플라즈몬과의 연계(32)를 이용하여 광투과율을 수십 배 이상 키우는 기술들이 활발하게 연구 개발되고 있다. 더 나아가 개구 구조가 없는 뾰족한 금속 탐침 끝에서 산란광의 간섭에 의한 S/N 20dB의 30MHz이상의 고속 근접광 정보 재생 기술도 개발되고 있다(33).

### 3.3 캔티레버

캔티레버의 고유진동수는 정보를 기록하고 재생하는 속도와 관련한 기계적 반응 시간을 결정하는 중요한 요소가 된다. 또

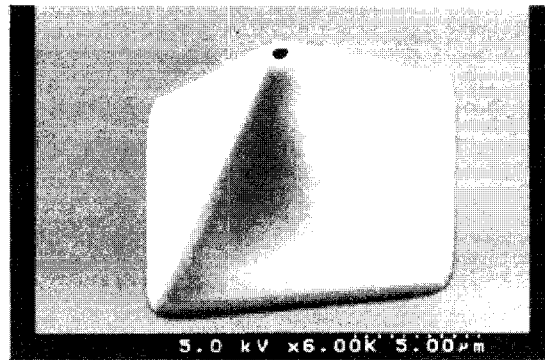


그림 10. Cr 코팅된 SiO<sub>2</sub> 피라미드형 SNOM 개구 탐침의 SEM 영상(30) (Inset) 지름 25nm의 aperture.

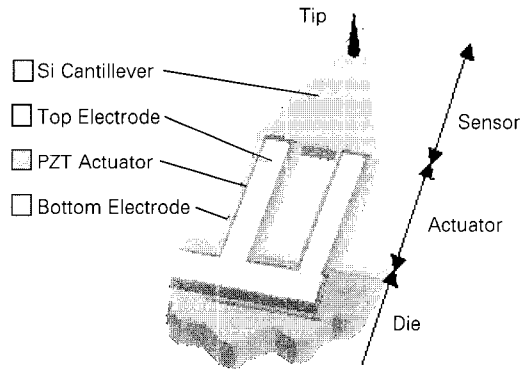


그림 11. PZT 박막 actuator와 piezoresistive 센서가 집적된 AFM 캔티레버.

한 탐침과 미디어의 훼손을 극소화하려면 캔티레버는 다소 부드럽게 휘어져야 한다. 정보 저장기에 적합한 캔티레버는 높은 고유 진동수와 함께 낮은 stiffness를 가져야 하며 이러한 조건을 맞추려면 캔티레버는 기하학적으로 얇고, 좁으며 짧아

야만 한다. 현재까지 대략 수 MHz의 고유진동수를 갖는 캔티레버가 제작 가능하다는 것이 알려져 있다.

또한, 탐침과 시료사이의 간극을 정밀 제어하는 기능을 수행하여야 하므로 광학적으로 또는 전기적으로 휘는 정도를 측정하는 데 적합한 구조가 요구된다. 일반적인 AFM의 경우 휘는 정도를 집속된 레이저 광이 캔티레버 표면에서 반사되어 4분할된 광검출기에서 검출하는 형태로 이를 제어하지만 정보 저장기의 경우 광학적 장치에 의한 제어는 그 부피가 커지는 약점이 있으므로 piezoresistive막을 이용하여 전기적으로 캔티레버의 휘는 정도를 측정하는 기술들이 개발되고 있다[34]. 비접촉방식의 탐침 간극 제어를 이용하는 경우, 캔티레버를 고유진동수로 진동시키는 구동기가 필요한데 그림 11과 같이 캔티레버 표면에 PZT, ZnO등의 박막형 actuator를 공정으로 제작하여 마이크로 구동기 기능을 수행하는 기술도 함께 개발되고 있는 추세이다[34].

### 3.4 구동/제어 기술

#### 가. 디스크형 회전 구동

현재 자기(HDD) 및 광(ODD) 정보 저장기에서는 그 구조가 단순하고 가격이 저렴하지만 제어 정밀도가 뛰어난 장점 때문에 회전 디스크형 구동장치가 주로 사용되고 있다. 탐침형 정보 저장기에서도 대면적 기록이 용이하며 주사속도가 빠른 장점 때문에 초기부터 연구가 많이 진행되었다[35].

IBM의 경우, 접촉 방식의 AFM 탐침을 이용하여 ROD(read only disc)나 WORM(write once read many) 방식의 정보 저장기 기술을 개발하여 발표하였다. 원리는 단순하여 마스터링 기법으로 기록된 형상 정보를 AFM탐침이 레코드판의 바늘처럼 디스크형 회전기로 주사되는 미디어를 따라 접촉식으로 정보를 재생하는 방법이 ROD이고, thermomechanical 방식으로 pit를 형성하고 이를 회전 주사하면서 AFM탐침으로 읽는 방법이 WORM이다. 이 때, 탐침이 부착된 헤드는 현재의 광헤드식으로 제어되는 경우도 있고 AFM 현미경의 헤드처럼 제어되는 경우도 있다. WORM 타입의 경우 앞장에서 언급한 집적회로 형태의 히터가 탐침 끝에 공정 제작되어 시료를 가열하여 형상 정보를 기록하고 그 정보는 piezoresistive 캔티레버를 이용하여 전기적으로 재생된다. 그림 12는 이러한 원리로 기록-재생이 가능한 집적 캔티레버의 그림이다.

그림 13은 이 캔티레버로 기록된 데이터의 AFM 영상과 정보를 재생할 때의 readback 파형을 보여준다. 이 때, clock cycle은 30 $\mu$ s로서 data rate로 환산하면 50kbit/s정도이다. 기록 속도는 thermal time constant에 제약을 받는데 이 탐침의 경우, 최소 냉각 시간은 1 $\mu$ sec정도이다. 이러한 기술로서 달성 가능한 최고 기록 속도는 200kbit/s정도이다. Hitachi에서는 가열시키지 않고 polycarbonate 시료를 기계

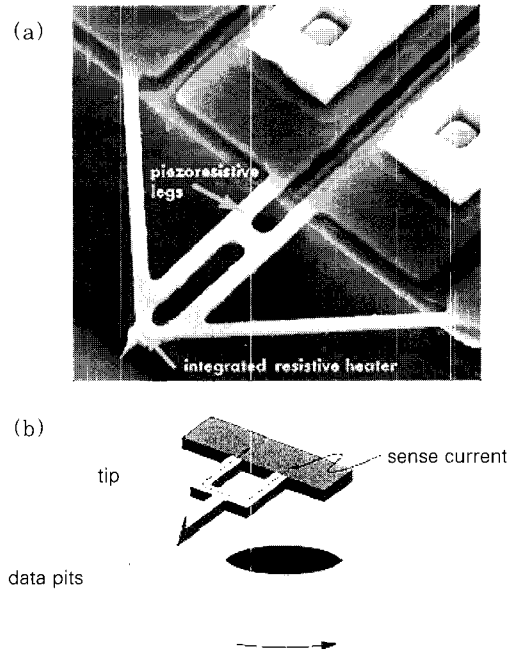


그림 12. (a) 전기저항에 의한 가열 기록이 가능한 piezoresistive 캔티레버 (b) 디스크형 구동기를 이용한 thermomechanical 기록/재생.

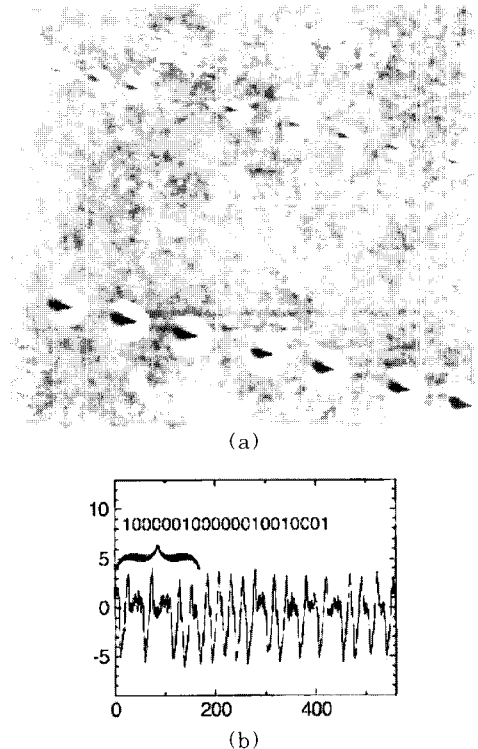


그림 13. (a) Thermomechanical 방식으로 기록된 데이터 트랙의 AFM 영상 (b) 50 kb/s로 재생된 출력 파형[35].

적으로 접촉시킴으로써 형성 정보를 기록하는 방식도 보고 하였다[36]. 기록된 정보를 재생하는 속도는 탐침의 성능에 의존하지만 현재로서는 대략 1MHz 정도가 한계이다.

CD-ROM처럼 디스크형 미디어에 대량으로 기록된 정보를 단지 재생만 하는 기술도 유망한 형태이다. 이러한 기술을 위해서는 수십나노미터의 정보 비트를 단순한 공정으로 대량으로 복제하는 마스터링 기술이 필수적이다. 그림 14는 50nm의 minimum dimension을 갖는 마스터와 복제패턴의 영상이다. 이와 같이 제작된 디스크 미디어를 3600r/min으로 회전시키면 2.5mm 반경에서의 선속도는 1m/s가 된다. 그림은 90ns 기계적 반응을 보이는 readout 파형으로서 적어도 10Mb/s의 readback data rate가 가능하다는 것을 보여준다.

이러한 디스크형 Read Only Disc구조에서는 탐침이 일정한 힘을 유지하게 하는 수직방향의 서보가 필요하고 IBM에서

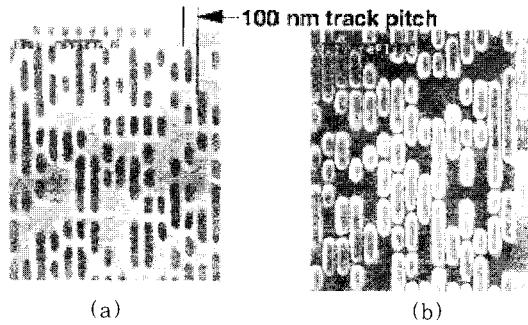


그림 14. (a) 전자빔으로 기록된 마스터 와 (b) 100nm의 트랙피치위에 기록된 복제판.

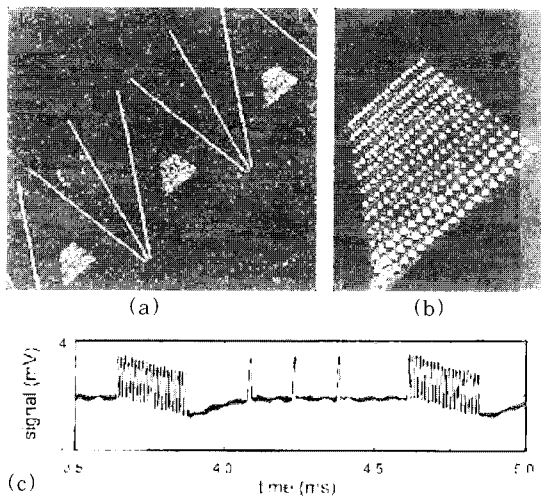


그림 15. (a) 트랙서보를 위한 타이밍 선 (b) 타이밍 선사이의 데이터 (c) AFM 출력 파형.

는 CD 플레이어의 헤드 구동기를 이용하는 구조를 고안하였다. Voice coil과 같이 전자기적으로 구동되는 헤드 구동기는 수백 마이크로미터의 수직 또는 수평방향의 제어가 가능하다. 디스크형 미디어에서는 기록된 정보를 정확히 액세스할 수 있는 데이터 트래킹 기술이 가능해야 되는데, IBM에서는 그림 15에서와 같이 특별한 타이밍 라인을 마스터링 기법으로 제작하여 회전 주사할 때, 바깥쪽 두선 사이의 시차를 측정하여 지름방향의 트래킹 서보에 이용하게 된다. 이러한 방법으로 표준 편차가 31nm의 트래킹이 가능한 것을 알 수 있었다.

이러한 디스크형 구동기를 이용한 접촉방식의 정보 저장기 시스템의 마모나 안정성을 측정된 결과 148시간의 주사 테스트 이후에도 탐침 및 미디어의 마모가 거의 없음을 알 수 있었는데, 이는 16km의 거리동안 500,000번 정보를 읽는 동안 탐침과 미디어에 무리가 가지 않는다는 것을 보여준다.

본 연구팀에서는 근접장 광 캐티레버가 장착된 마이크로 광학부를 CD플레이어 헤드에 장착하여 디스크형 구동기를 통하여 고속으로 정보를 기록하고 재생하는 연구를 수행하고 있다. 디스크형 구동기는 대면적 주사가 가능하고 구동이 단순하며 현재의 잘 개발된 정보 저장기의 트래킹 및 seeking기술을 응용할 수 있다는 장점이 있는 반면에 다중 탐침으로의 전환이 다소 복잡하고 단일 탐침의 기록/재생 속도가 빨라져야만 현실화될 수 있다.

#### 나. MEMS형 raster 스캐너 구동

고속의 정보 처리 속도를 달성하는 좋은 방법은 어레이 형태의 다중 탐침으로 정보를 기록하고 재생하는 것이다. 실제로 이러한 기술은 STM, Field emission mode, 그리고 AFM mode에서 사용되었는데, Stanford대학에서는 대면적 영상 및 리소그래피를 위해서 그림16처럼 독립적인 구동기와 센서가 형성된 50개의 탐침을 평행하게 제작하여 다중 채널로 데이터를 수집하는 기술을 선보였다[34].

이러한 기술의 결정판이 그림 17처럼 IBM zurich에서 제

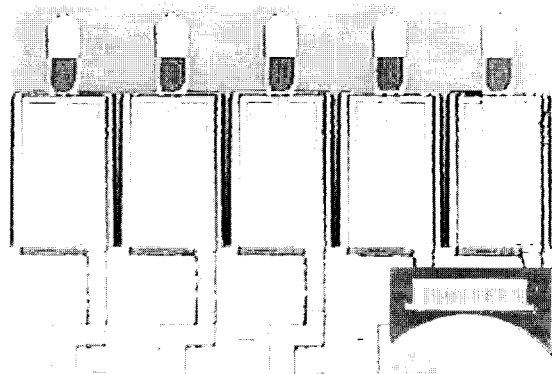


그림 16. 다중 어레이형 AFM 캔티레버 탐침[34].



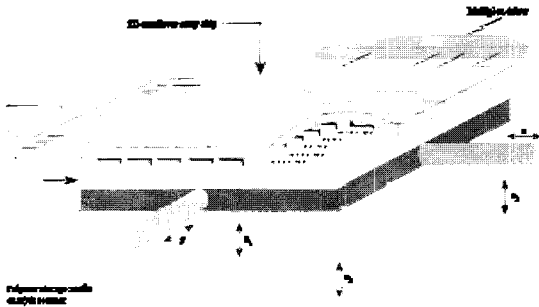


그림 17. 32x32 어레이형 Millepede 개념도.

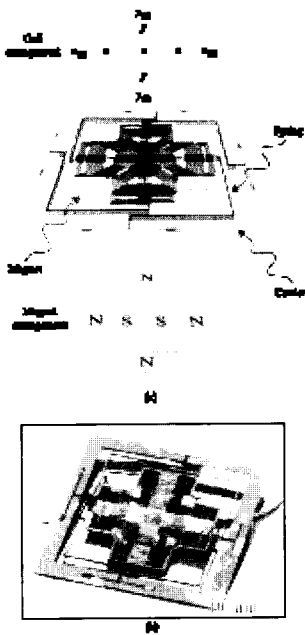


그림 18. (a) 마이크로 자기력 xyz 스캐너의 구조도  
(b) 마이크로 자기력 xyz 스캐너의 사진.

작한 32x32 어레이 실리콘 캔틸레버가 thermomechanical 방식으로 정보를 다중으로 액세스하는 일명 "Millepede" 정보 저장기 기술이다[9]. "Millepede"는 사전적인 의미로는 노래기 같은 다지 동물을 일컫는 말로 STM 개발자인 Binnig를 포함한 IBM연구자들은 실리콘 공정으로 다지류의 발처럼 생긴 1024개의 캔틸레버 탐침이 유기미디어 박막 위에서 parallel process로 정보를 기록하고 재생하는 그들의 시스템의 이름으로 사용되고있다.

이때 미디어는 MEMS형 구동기인 comb driver나 그림 18의 마이크로 electromagnetic driver로 x-y raster scan하면서 정보 기록/재생을 할 수 있게 한다. 비록 현재까지는 1024개가 완벽히 동작하지는 않지만 400Gb/in<sup>2</sup>의 기록밀도가 가능한 최초의 시스템 기술로서 탐침형 정보 저장기를 가시화한

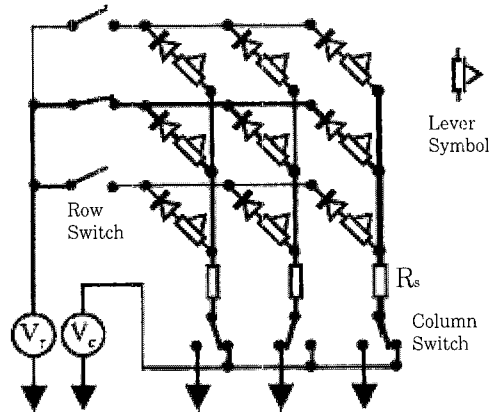


그림 19. 어레이 탐침에 흐르는 전류를 라인별로 제어하기 위한 구동 회로[37].

기술로 자리 매김 하고있다. 현재 이 기술은 block단위로 기록된 정보를 지울 수 있고 비트 단위로도 재기록이 가능한 정보 저장기 기술로 발전되고 있다. 현재로서는 MEMS 스캐너의 최대 구동 영역이 대략 수십  $\mu\text{m}$ 이기 때문에 기록밀도가 높더라도 전체적인 기록용량이 낮아서 문제가 되고 있는데 MEMS기술의 발전에 따라 이 문제도 멀지 않아 크게 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

다중 탐침을 이용한 정보 기록/재생을 위해서 필요한 탐침에 흐르는 전류를 parallel하게 제어하는 회로는 그림 19와 같다[37]. 다이오드를 이용하여 다양한 기생 path에 의한 누설 전류를 극소화하면서 특정한 라인의 탐침에 전류를 흐르게 하여 라인별로 기록하고 또 기록된 정보를 전기 저장을 측정하여 라인별로 재생할 수 있는 개념으로 설계 제작되었다.

#### 4. 탐침형 저장 기술의 미래 전망

탐침형 저장 기술은 원리적으로 10nm급의 기록크기를 갖는 1Tb/in<sup>2</sup>의 초고밀도가 가능한 정보 저장기 기술이다. 그러나 상용화 제품으로 탄생하기 위해서는 우선 높은 기록밀도에 맞는 고속의 정보 처리 속도가 가능하여야 한다. 이러한 목적을 위해서는 단일 탐침의 정보 기록 및 재생 속도를 향상시켜야 한다. 여기에는 기록/재생 메카니즘 연구 뿐만 아니라 높은 고유진동수를 갖는 캔틸레버의 설계 제작 기술과 함께 탐침과 시료의 훼손 문제도 개선되어야 할 과제이다. 특히 전체 시스템의 기록용량을 키우기 위해서는 대면적 주사가 가능한 구동/제어 시스템이 완성되어야 하며, 다중 탐침의 기록/재생 및 다중 채널의 신호를 처리하기 위한 기술 그리고 데이터 트레이킹 기술 등 시스템 기술의 확보도 필요하다.

지금까지 개발된 다양한 탐침형 저장 기술에 대해서 그림 21과 같이 기록 밀도와 데이터 처리 속도의 관점에서의 분류

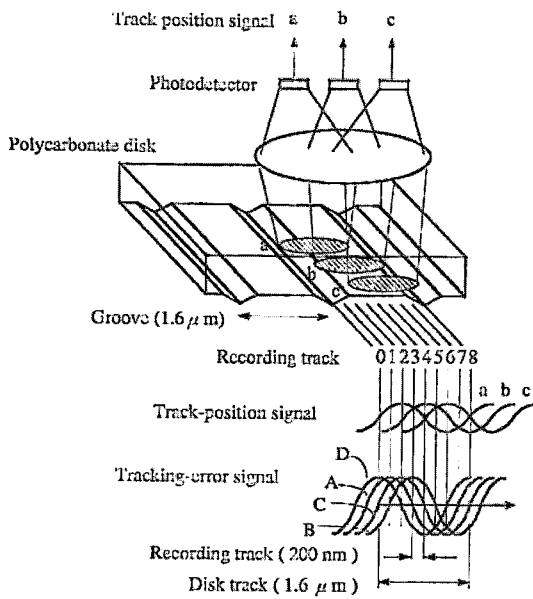


그림 20. 광디스크의 groove를 8분할한 트랙러러 신호를 이용한 탐침형 정보 저장기용 초 정밀 피치 트래킹 방법의 예(38).

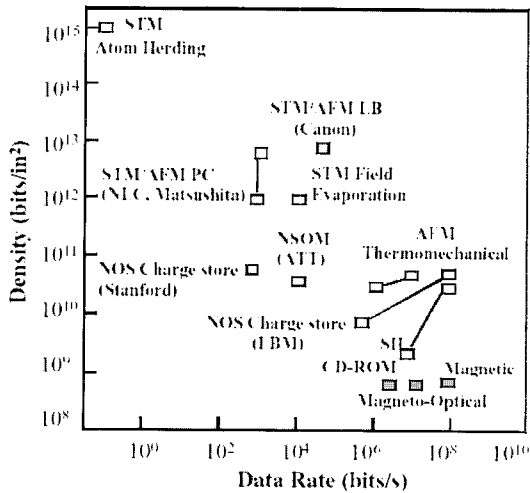


그림 21. 기록 밀도와 기록/재생 속도의 관점에서의 탐침형 정보 저장 기술의 분류도(1).

도 볼 보면 기록 밀도는 HDD(hard disk drive)나 ODD(optical disk drive)에 비해서 월등하나, 데이터 처리 속도 향상이 관건임을 알 수 있다. 물론 속도의 향상에 병행하는 기록/재생의 신뢰성도 중요하고 그 외에 seeking time을 고려한 액세스 시간의 단축, 에러율의 감소 등 고려해야 할 그 이외의 기술 요소들도 다수 존재한다. 이러한 어려움이 극복된다면, 초소형 대용량의 개인용 정보 저장기로서 잠재적 시

장을 확보할 수 있을 것으로 예측된다. 궁극적으로는 탐침형 정보 저장기는 자체 기술 문제 뿐만 아니라 제조 비용, 시장 수요, 그리고 자기 및 광 저장장치 등 경쟁 기술의 발전 등 많은 요소를 포괄적으로 고려하여야 한다.

장기적인 관점에서는 정보 저장기 기술에 국한되지 않고 이러한 탐침 기술에 대한 연구를 통하여 우리는 나노 스케일 영역에서의 전기, 자기, 광, 기계적인 물성을 직접적으로 만지듯이 연구할 수 있는 도구를 가질 수 있기 때문에 나노 기술(NT) 영역 전반, 그리고 바이오 기술(BT) 영역에 있어서도 선도적인 연구를 수행할 수 있는 기반 기술을 확보할 수 있다. 1959년 미국의 물리학자 리처드 파인만이 "There's plenty of room at the bottom"이라는 말로 예언적으로 제시했던 조그만 편 머리 위에 Brittanica 백과사전의 정보를 모두 집적하는 나노 기술의 현실화가 이러한 탐침 기술을 통하여 성큼 앞당겨지고 있다.

### Acknowledgments

교정 및 조언을 해준 송기봉, 김준호, 이성규 박사에게 감사드립니다. 본 연구는 정통부 선도기반기술개발 사업 "분자스 위칭을 이용한 다중 캔티레버형 고밀도 나노 광디스크 기술" 및 산자부 차세대 대용량 정보 저장 장치 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] S. Esener and M. Kryder, "The future of data storage technologies", WTEC panel report, Chap. 7, 1999.
- [2] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, "Surface studies by scanning tunneling microscopy", Phys. Rev. Lett., Vol. 49, No. 1, p. 57, 1982.
- [3] J. A. Stroscio and W. J. Kaiser, "Scanning tunneling microscopy", Academic press, p. 80, 1997.
- [4] S.-I. Park, J. Hong, and Y. Nho, "Scanning probe microscopy", \www.psia.co.kr.
- [5] D. M. Eigler and E. K. Schweizer, "Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope", Nature, Vol. 344, p. 524, 1990.
- [6] H. J. Gao, K. Sohlberg, Z. Q. Xue, H. Y. Chen, S. M. Hou, L. P. Ma, X. W. Fang, S. J. Pang, and S. J. Pennycook, "Reversible, nanometer-scale conductance transitions in an organic complex", Phy. Rev. Lett., Vol. 84, No. 8, p. 1780.

- 2000.
- [7] G. Binnig, M. Despont, U. Drechsler, W. Häberle, M. Lutwyche, P. Vettiger, H. J. Mamin, B. W. Chui, and T. W. Kenny, "Ultrahigh-density atomic force microscopy data storage with erase capability", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, No. 9, p. 1329, 1999.
- [8] W. P. King, T. W. Kenny, K. E. Goodson, G. Cross, M. Despont, U. Dürig, H. Rothuizen, G. K. Binnig, and P. Vettiger, "Atomic force microscope cantilevers for combined thermomechanical data writing and reading", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, No. 9, p. 1300, 2001.
- [9] P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler, U. Dürig, W. Häberle, M. I. Lutwyche, H. E. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, G. K. Binnig, "The millipede-more than one thousand tips for future AFM data storage", *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 44, No. 3, p. 323, 2000.
- [10] H. Kado, and T. Tohda, "Nanometer-scale recording on chalcogenide films with an atomic force microscope", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, No. 22, p. 2961, 1995.
- [11] K. Yano and T. Ikeda, "Stable bit formation in polyimide Langmuir-Blodgett film using an atomic force microscope", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 80, No. 6, p. 1067, 2002.
- [12] R. C. Barrett and C. F. Quate, "Charge storage in a nitride-oxide-silicon medium by scanning capacitance microscopy", *J. Appl. Phys.*, Vol. 70, No. 5, p. 2725, 1991.
- [13] T. Hidaka, T. Maruyama, M. Saitoh, N. Mikoshiba, M. Shimizu, T. Shiosaki, L. A. Wills, R. Hiskes, S. A. Dicarolis, and J. Amano, "Formation and observation of 50 nm polarized domains in  $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  thin film using scanning probe microscope", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, No. 17, p. 2358, 1996.
- [14] A. B. Marchant, "Optical recording : a technical overview", Addison-Wesley, p. 106, 1990.
- [15] U. Dürig, D. W. Pohl, and F. Rohner, "Near-field optical-scanning microscopy", *J. Appl. Phys.* Vol. 59, No. 10, p. 3318, 1986.
- [16] E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe, E. M. Gyorgy, P. L. Finn, M. H. Kryder, and C.-H. Chang, "Near-field magneto-optics and high density data storage", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 61, No. 2, p. 142, 1992.
- [17] S. Hosaka, "SPM based storage", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 32, No. 3, p. 1873, 1996.
- [18] M. Hamano and M. Irie, "Rewritable near-field optical recording on photochromic thin films", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, Pt 1, p. 1764, 1996.
- [19] A. Partovi, D. Peale, M. Wuttig, C. A. Murray, G. Zydzik, L. Hopkins, K. Baldwin, W. S. Hobson, J. Wynn, J. Lopata, L. Dhar, R. Chichester, and J. H. Yeh, "High-power laser light source for near-field optics and its application to high-density optical data storage", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 75, No. 11, p. 1515, 1999.
- [20] F. Issiki, K. Ito, K. Etoh, and S. Hosaka, "1.5-Mbit/s direct readout of line-and-space patterns using a scanning near-field optical microscopy probe slider with air-bearing control", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 7, p. 804, 2000.
- [21] J. Kim, K.-B. Song, and K.-H. Park, "Near-field optical readout combined with atomic force probe recording", *ISOM'01 digest paper*, p. 306, 2001, *Jpn. J. Appl. Phys.* in press.
- [22] S. M. Mansfield, W. R. Studenmund, G. S. Kino, and K. Osato, "High numerical aperture lens system for optical storage", *Opt. Lett.*, Vol. 18, No. 4, p. 305, 1993.
- [23] 김수경, 김영식, 박진무, 김진용, 김진홍, "근접장 광 기록용 부상형 광학헤드의 설계와 특성 평가", *광학과 기술*, 6권, 1호, p. 13, 2002.
- [24] T. Nakano, A. Sato, H. Fuji, J. Tominaga, and N. Atoda, "Transmitted signal detection of optical disks with a superresolution near-field structure", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 75, No. 2, p. 151, 1999.
- [25] H. Awano, M. Sekine, M. Tani, N. Kasajima, N. Ohta, K. Mitani, N. Tkaki, and S. Sumi, "0.04 $\mu\text{m}$  domain expansion readout for the magnetic amplifying magneto optical system", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, Pt 1, No. 2B, p. 725, 2000.
- [26] G. Gibson, T. I. Kamins, M. S. Keshner, S. L. Neberhuis, C. M. Perlov, C. C. Yang, "Ultra-

- high density storage device", US Patent, No. 5, 557, 596, 1996.
- [27] M. Lederman, D. R. Fredkin, R. O' Barr, S. Schultz, and M. Ozaki, "Measurement of thermal switching of the magnetization of single domain particles", J. Appl. Phys., Vol. 75, No. 10, p. 6217, 1994.
- [28] J. Lohau, A. Moser, C. T. Retner, M. E. Best, and B. D. Terris, "Writing and reading perpendicular magnetic recording media patterned by a focused ion beam", Appl. Phys. Lett., Vol. 78, No. 7, p. 990, 2001.
- [29] S. Münster, S. Werner, C. Mihalcea, W. Scholz, and E. Oesterschulze, "Novel micromachined cantilever sensors for scanning near-field optical microscopy", J. of Microsc., Vol. 186, Pt 1, p. 17, 1997.
- [30] P. N. Minh, T. Ono, and M. Esashi, "Microfabrication of miniature aperture at the apex of SiO<sub>2</sub> tip on silicon cantilever for near-field scanning optical microscopy", Sensors & Actuators A, Vol. 80, p. 163, 2000.
- [31] K.-B. Song, J.-Y. Kim, and K.-H. Park, "Enhancement of the throughput on a near-field aperture using self-focusing effect", ISOM'01, p. 184, 2001, Appl. Phys. Lett. in press.
- [32] T. Thio, K. M. Pellerin, R. A. Linke, H. J. Lezec, and T. W. Ebbesen, "Enhanced light transmission through a single subwavelength aperture", Opt. Lett., Vol. 26, No. 24, p. 1972, 2001.
- [33] Y. Martin, S. Rishton, and H. K. Wickramasinghe, "Optical data storage read out at 256 Gbits/in.", Appl. Phys. Lett., Vol. 71, No. 1, p. 1, 1997.
- [34] S. C. Minne, G. Yaralioglu, S. R. Manalis, J. D. Adams, J. Zesch, A. Atalar, and C. F. Quate, "Automated parallel high-speed atomic force microscopy", Appl. Phys. Lett., Vol. 72, No. 18, p. 2340, 1998.
- [35] H. J. Mamin, R. P. Ried, B. D. Terris, and D. Rugar, "High-density data storage based on the atomic force microscope", Proc. IEEE, Vol. 87, No. 6, p. 1014, 1999.
- [36] S. Hosaka, H. Koyanagi, A. Kikukawa, M. Miyamoto, K. Nakamura, and K. Etoh, "Force modulation atomic force microscopy recording for ultrahigh density recording", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 15, No. 4, p. 788, 1997.
- [37] M. I. Lutwyche, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, W. Häberle, H. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, G. K. Binnig, and P. Vettiger, "Highly parallel data storage system based on scanning probe arrays", Appl. Phys. Lett., Vol. 77, No. 20, p. 3299, 2000.
- [38] K. Nakamura, H. Koyanagi, and S. Hosaka, "Narrow pitch tracking using optical head for recording with atomic force microscopy", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, Pt 1, No. 4B, p. 2271, 1998.

## 저 자 약 력

**성명 : 박강호**

**❖ 학 력**

- 1987년            서울대 물리학과 이학사
- 1989년            서울대 대학원 물리학과 이학석사
- 1994년            서울대 대학원 물리학과 이학박사

**❖ 경 력**

- 1994년 - 현재    한국전자통신연구원 선임연구원