



# 나노시대의 정보저장장치 :

## SPM 정보저장장치를 중심으로

글 ■ 김 영 식 / LG전자 기술원 소재재료 연구소, 책임연구원

e-mail ■ ysrevol@lge.com

이 글에서는 차세대 정보저장장치 기술 중에서 특히, IBM의 Millipede로 인해 부각되고 있는 SPM 정보저장장치의 연구 동향을 살펴보고, 이 기술에서 해결해야 할 과제를 바탕으로 국내의 연구 동향에 대해 간략하게 살펴볼 것이다.

### 나노기술과 정보저장장치

20세기 전자산업을 주도했던 마이크로 기술은 21세기에는 나노기술이 그 역할을 떠맡고 있다. 정보저장장치의 대표격인 HDD는 비약적인 기록밀도 증가에 힘입어 PC에서 대용량 고속화가 필요한 서버용 저장장치로의 활용이 요구되고 있다. 이러한 추세 속에 향후 10년 내 nm 크기의 비트에 정보를 반복적으로 기록 재생 가능한 1Tb급의 정보저장 장치에 대한 수요가 급격히 증가할 것으로 보인다<sup>(1)</sup>.

특히 주목할 점은 최근에 PVR(Personal Video Recorder), 게임기 등 AV 정보가전 분야 및 초소형 휴대형 정보저장장치 분야로 정보저장 장치의 응용범위가 확대되고 있다는 점이다.

이미 지능형 휴대기기(smart hand-held device) 시장은 2001년에는 약 85억 달러, 2003년에는 190억 달러로 연간 30% 이상 시장이 성장할 것이라는 분석이 나오고 있다.

이러한 시장 흐름은 차세대 정보저장 장치가 갖추어야 할 조건으로, 기록밀도 향상은

물론이고 휴대형 정보저장장치 응용에 적합한 소형화, 경량화, 저전력화를 동시에 구현할 수 있는 기술을 필요로 한다.

현재 정보저장 기술을 선도하고 있는 HDD용 자기기록장치 분야는 IBM과 Seagate에서 다중층 반강자성 이중결합(AFC : Anti-Ferromagnetically Coupled) 미디어를 이용하여 100Gb/in<sup>2</sup> 정도의 기록밀도를 구현하는데 성공시켰고<sup>(2)</sup>, 더 높은 기록밀도를 위해서 수직기록(PMR : Perpendicular Magnetic Recoding) 방법에 관한 연구가 그 뒤를 잇고 있다. PMR기술은 아직까지 헤더(head)기술, 신호처리기술, 기록방법 기술에 대한 연구개발이 미디어 기술 연구개발에 비해 훨씬 못 미치고 있기는 하지만, 이 기술이 향후 정보저장장치 기술 개발에 있어서 핵심적인 위치를 차지할 것이라는 점에서는 많은 사람들이 동의하고 있다.

하지만 이들 기술은 물리적인 측면에서 자기기록 미디어의 초상자성 한계(superparamagnetic limit)를 완전히 극복한 것이 아니다<sup>(3)</sup>. 이러한 한계를 극복하는 기술로서 패턴 미디어에 대한 연구가 진행되고 있지만,



이 기술의 경우 20nm의 선폭을 갖는 나노 리소그래피 기술을 필요로 하고, 시스템적으로 패턴된 자기미디어와 기록 시간을 정확하게 맞추어야 하는 많은 어려움이 있는 것으로 알려져 있다<sup>(3)</sup>. 그러므로 정보저장 장치 기술개발의 주요 장벽들은 패턴 미디어에 와서 시스템 전체 차원부터 연구가 체계적으로 진행되어야 극복할 수 있음을 나타낸다.

이와 같은 이유와 함께 무엇보다도 Tb급 휴대기기용 정보저장장치에 대한 강력한 요구는 완전히 새로운 접근 방법에 대한 필요성을 증대시키고 있다. 현재 연구가 진행 중인 차세대 정보저장 장치에 대한 기술로는 근접장 기록(NFR) 장치, SPM 정보저장 장치, 홀로그래픽을 응용한 3차원 정보저장장치에 대한 연구가 언급되고 있다<sup>(4, 5)</sup>.

이 글에서는 차세대 정보저장장치 기술 중에서 특히, IBM의 Millipede로 인해 부각되고 있는 SPM 정보저장 장치의 연구 동향을 살펴보고, 이 기술에서 해결해야 할 과제를 바탕으로 국내의 연구 동향에 대해 살펴볼 것이다. 맺음말에서는 기존 기술을 대체할 신기술을 선택할 때 적절한 기준에 대해 간략하게 정리한 다음 이 기준을 바탕으로 SPM 정보저장장치가 갖는 위상에 대해 언급하고자 한다.

### SPM 정보저장장치의 연구 동향

1959년 미국의 세계적 물리학자 파인만 교수는 그의 논문에서 100개 정도의 원자로 구성된 미세구조에 정보를 저장할 수 있게 돼 전 세계에 있는 모든 책들의 정보를 200분의 1인치 크기의 정육면체 한 개 속에 기록할 수 있는 날이 올 것이라고 예언한 바 있다. 이 예언은 26년이 지난 1986년 스위스의 노벨 물리학상 수상자인 Rohrer와

Binnig이 주사 터널링 현미경(STM : Scanning Tunneling Microscopy) 개발을 통해서 실현 가능성이 증명되었다<sup>(6, 7)</sup>. 이후 STM처럼 탐침을 이용한 측정장치는 측정 물리량에 따라 급속도로 발전해, 탐침과 사료 사이의 원자력으로 측정하는 AFM (Atomic Force Microscope), 시료의 자성력을 측정하는 MFM(Magnetic Force Microscope), 정전기력을 측정하는 EFM (Electrostatic Force Microscope), 그리고 가시광선의 파장에 의한 해상도의 한계를 개선한 SNOM(Scanning Near-field Optical Microscope)로 발전하였다.

이후, 스탠포드 대학의 Quate 그룹<sup>(8)</sup>과 IBM의 Rugar 그룹<sup>(9)</sup>에서 STM을 기본으로 하여 나노미터 크기의 물리량을 기록하고 재생하는 데 성공한 바 있어 차세대 대용량 정보저장 장치 기술의 후보로 부상했다.

현재, 탐침을 이용한 나노 저장장치는 IBM을 선두로 하여 휴렛-팩커드(HP), Hitachi 등과 같은 대기업뿐 아니라, 미국의 Nanochip, Kionix 등과 같은 벤처기업, Carnegie Mellon University(미국), 도쿠 대학(일본) 등과 같은 대학에서 연구가 진행되고 있다.

미국의 Nanochip 사는 258Gb/in<sup>2</sup>의 저

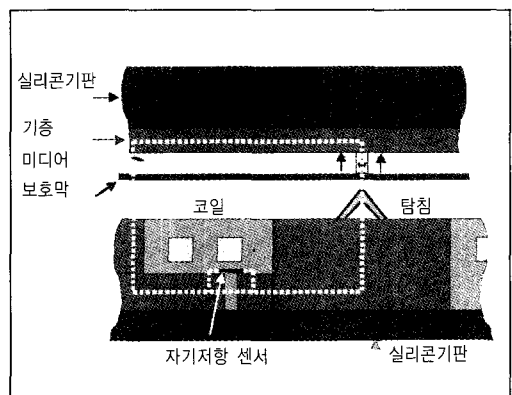


그림 1 Carnegie Mellon 대학에서 개발 중인 Head

장밀도를 가지며, 단위소자로는 900MB의 용량을 가지는 NC900SX를 개발하였다고 발표하였으나(2001. 8.), 아직까지 검증된 보고는 존재하지 않은 형편이며<sup>(8)</sup>, Kionix 사는 마이크로머시닝 기술을 이용하여 10Gb의 용량을 가지는 MEMS Data Storage Card의 개발을 시도하였으나, 확보된 기록/재생 메커니즘이 존재하지 않아 현재는 연구가 중단된 상태이다.

미국의 Carnegie Mellon University (CMU)에서는 동전 크기에 10GB의 저장용량을 가지는 휴대용 정보저장장치를 자기 기록 방식과 탐침 어레이를 이용하여 구현하고자 하는 시도를 진행하고 있다.

기본적으로 자기 탐침(magnetic tip)을 PMR방식에 적용하고 있으며, 정보 기록용 코일과 재생용 GMR(giant magnetoresistance) 센서가 집적되어 있다. 미디어로는 광자기(opto-magnetic) 기록방식에서 사용하는 Pt/Co나 희토류/전이금속을 이용하고, 수직 기록방식과 같이 Underlayer를 도입하고 있다<sup>(9)</sup>.

CMU에서는 구동기로 Comb Drive 방식의 X-Y 구동기를 개발하고 있으나, 아직 제작 완료 여부는 알려지지 않고 있다. 목표 스펙은 전체 크기는 14mm×14mm, 미디어

크기는 8mm×8mm, 구동변위는 50V의 구동전압을 인가하였을 때 ±50 $\mu$ m로 보고하고 있다.

또한 일본의 도쿠 대학은 상전이(phase-change) 미디어를 이용한 방식을 연구하고 있으나, 아직 시스템적인 접근은 부족한 형편이다<sup>(10)</sup>. 상전이 미디어의 경우 재생감도가 높고 고속동작이 가능하며, probe 제작이 상대적으로 간단한 장점이 있으나, 미디어의 산화를 막을 수 있는 대책이 필요하고, probe 탐침의 마모를 줄일 수 있는 방안이 개발되지 않는다면 실제 적용에 있어 어려움이 있을 것으로 보인다.

일본의 Hitachi 사는 HDD와 유사한 회전 디스크 형태에 탐침을 폴리머에 두드려서 데이터를 기록하고 일반적인 AFM 방식으로 데이터를 읽어내는 Force Modulation AFM Recording 방식을 개발해오고 있다. 보고된 바로는 1.5Tb/in<sup>2</sup>의 저장밀도가 가능한 것으로 되어 있으나, 데이터 재생속도는 5Mb/s에 불과해, 탐침을 병렬 어레이화하는 문제가 해결되지 않는 한 데이터 입출력 속도에 큰 문제를 가지고 있는 것으로 판단된다<sup>(11)</sup>.

미국의 HP 사는 초기에는 강유전체 물질을 이용한 기록/재생방식에 대해 연구를 진

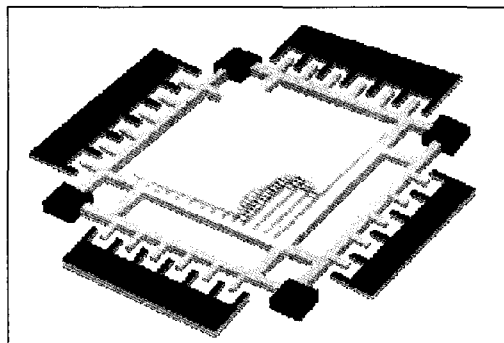


그림 2 Carnegie Mellon 대학에서 개발 중인 Comb Drive 개념도

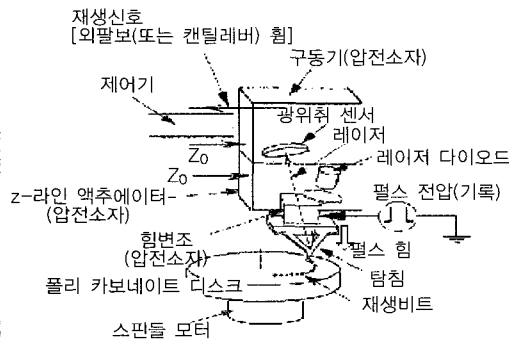


그림 3 Hitachi 사의 AFM 기록 방식

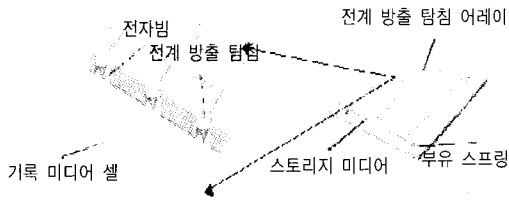
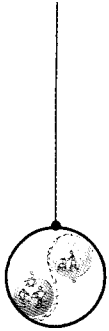


그림 4 휴렛-팩커드(HP) 사의 ARS(Atomic Resolution Storage) 개념도

행해오다 최근에는 상전이 미디어에 대한 전계 방출 방식을 이용한 ARS(Atomic Resolution Storage)를 집중적으로 연구하고 있다<sup>(12, 13)</sup>.

현재 ARS 연구는 전자를 제어하여 충분한 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)를 확보하기 위해 노력하고 있다고 발표한 바 있다.

이러한 방식의 경우 국부적인 미디어와 탐침의 열화 문제가 있을 수 있으며, 기본적으로 진공 패키지를 해야 하는 어려움이 있다.

그러나 HP 사의 접근 방법에서 SPM 정보저장 장치의 구동기 부분은 주목할 만하

다. 상부 전극과 하부 전극 사이의 정전기력을 이용한 Electrostatic Surface Drive를 적용하고 있으며, 1997년 HP 사의 Storrs Hoen에 의해 제안된 이후 SPM용 정보저장 장치 구동기로 적용하기 위해 개발되어 오고 있다.

현재까지 보고된 바에 따르면 1nm의 정밀도를 가지고 50 $\mu$ m를 구동했다고 보고하고 있으며, 기본적으로 구동변위는 구동전압의 제곱에 비례하므로, 상대적으로 낮은 전압에서 대변위 구동이 가능할 것으로 예견된다.

탐침기록방식의 가장 선두주자인 IBM 주리히 연구소에서 Millipede라는 이름으로 탐침기록 방식을 다년간 연구해 오고 있다. 이들은 탐침을 국부적으로 가열한 후 폴리머계열의 미디어 접촉시켜 데이터를 기록한 후, 이를 같은 탐침의 열저항 변화를 통해 데이터의 유무를 읽어내는 열기계(thermo-mechanical) 방식을 기록/재생방식으로 채용하고 있다.

IBM 주리히에서는 단순한 기록/재생 결과 뿐 아니라 구체적인 시스템까지 개발하고 있는데, 데이터 입출력 속도를 증대시키기 위하여 32 $\times$ 32 캔틸레버 어레이를 개발 완료하였고 현재는 64 $\times$ 64 어레이 개발을 하고 있으며, 미디어 구동을 위하여 마이크로머시닝 기술을 이용하여 Electromagnetic actuator를 개발하였다. 기본적으로 전류가 흐르는 코일이 자기장 속에 놓여 있을 때 코일이 받는 자기력(Lorentz force)을 이용하여 기록미디어를 구동하는 원리를 갖는다.

그 결과, 단일 캔틸레버로 40nm 정도의 bit size, 즉 400Gb/in<sup>2</sup> 정도의 기록밀도의 가능성을 발표하였고 최근에는 1Tb/in<sup>2</sup> 정도까지 단일 캔틸레버 실험을 통해 입증한 바 있다. 아울러 32 $\times$ 32 캔틸레버 어레이를 이용하여 HDD와 유사한 Data rate와 100~200Gb/in<sup>2</sup> 정도의 기록 밀도를 발표

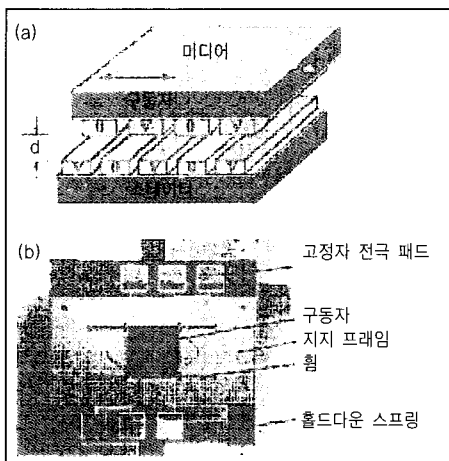


그림 5 Electrostatic Surface Drive의 개념(a) 및 실제 적용 예(b)

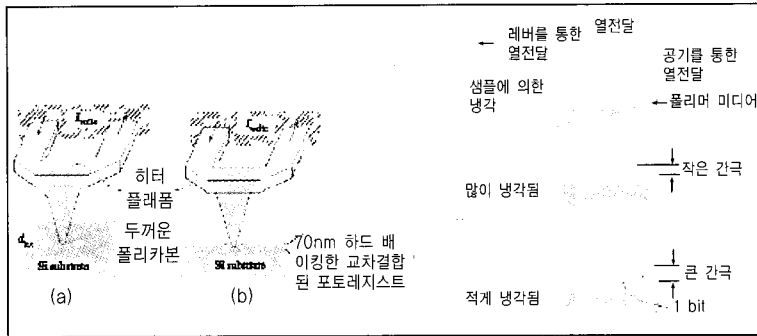


그림 6 IBM의 열기계(Thermomechanical) 기록·재생 방식의 개념도

하여 탐침을 이용한 대용량 나노 정보저장 장치의 실현 가능성을 높였다. 그 결과 전체 크기는 15mm×15mm×1.6mm, 300mW의 구동전력으로 최대 80μm의 구동변위를 확보하였다.

이제까지 살펴본 해외 연구 그룹들 중 IBM은 시스템 차원에서 가장 선도적으로 연구를 진행하고 있다. 이러한 IBM의 선도적 위치에도 불구하고, 이들의 성과는 SPM 정보저장 장치를 제품화하기 위해서 해결해야 할 많은 문제점들을 잘 드러내 주고 있기도 하다.

우선 IBM방식은 기록과 재생 모두 열기계(thermomechanical) 방식을 사용하고, 병렬동작이기 때문에 헤드에서 소비되는 전력

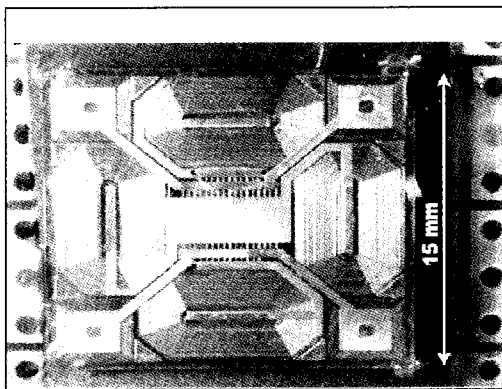


그림 7 IBM에서 실제로 제작된 Electromagnetic Actuator

이 기본적으로 클 수밖에 없다. 아울러 미디어와 탐침은 접촉방식으로 기록 재생하므로 탐침과 미디어의 마모 문제가 중요하게 부각되는데, 이를 해결하기 위해서는 캔틸레버-팁에서 높은 uniformity가 요구된다. 그리고 재생 신호의 낮은 신호 대

잡음비 또한 큰 문제로 지적되고 있다.

시스템 차원에서는 저전력 구동이 가능하고 안정된 구동기 기술 개발과 기록밀도와 주변장치의 효율문제, CMOS 집적화의 문제, 미디어와 헤더 사이에서 Tracking문제와 충격(shock)문제가 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다.

이러한 산적한 문제들은 역으로 이 분야에서 어떤 그룹도 주도적인 위치에 있다고 말할 수 없다는 의미이기도 하기 때문에, 국내 연구진들의 활발한 연구 활동을 기대할 수 있는 영역으로 볼 수 있다.

대우전자의 경우 32×32 캔틸레버 어레이를 제작하기 위하여 박막구동기 및 센서가 집적화된 캔틸레버를 제작해왔으나, 아직 어레이화까지 성공하지는 못한 상태이다. 전자 부품연구원의 경우 미디어 구동을 위한 MEMS 구동기를 개발해오고 있으나, 아직 어떤 미디어를 사용할 것인가에 대한 결론이 나지 않아, 미디어를 집적화하는 것까지 나아가지 못하고 있는 상태이며, 기록/재생 원리 역시 확실한 결론이 나지 않고 있는 상태이다. 삼성전자는 강유전체박막을 이용한 기록·재생방법과 이에 적합한 캔틸레버를 개발해오고 있고, 미디어구동을 위한 마이크로 구동기를 제작한 경험이 있으며, 현재는 안정적인 기록·재생 메커니즘 확보를

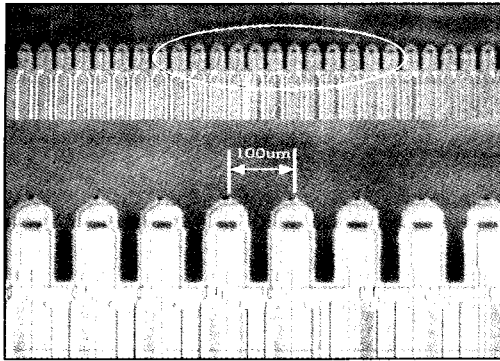


그림 8 LG에서 개발한 1X25 캔틸레버 어레이. 센서와 액추에이터를 집적하고 있다.

위한 연구에 집중하고 있다.

LG전자는 PZT 액추에이터 및 piezo-resistive 센서를 집적한 SPM용 캔틸레버(이하 복합형 캔틸레버) 기술에 대해 세계적

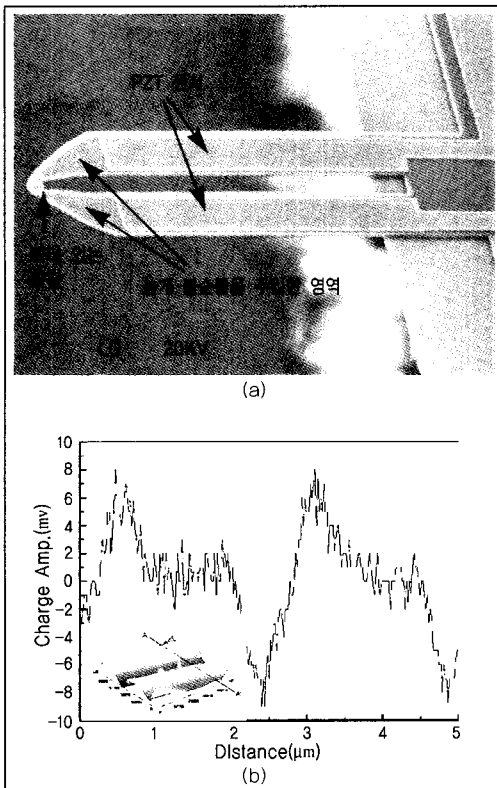


그림 9 PZT 압전센서와 Heater를 집적한 캔틸레버(a)와 센싱한 신호(b)

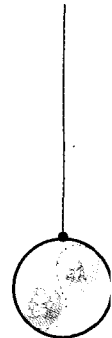
으로 독보적인 기술을 확보해 놓고 있다. LG전자는 복합형 캔틸레버를 통해 고속 동작시 발생하는 센서와 액추에이터 신호 사이 커플링(coupling)현상을 현격하게 줄였으며, 1x25 캔틸레버 어레이를 제작하여 고속 AFM 기술을 발표하였다<sup>(16~19)</sup>.

이러한 복합형 캔틸레버를 통해 SPM 정보저장장치에 적용시 고속 동작을 가능하게 하며, 제어회로의 IC화까지 고려해야 하는 문제를 안고 있지만 Z축 제어를 캔틸레버에서 가능하게 한다는 장점을 가지고 있다.

아울러 SPM 정보저장장치 개발에 있어 IBM과 차별되는 새로운 접근을 시도하고 있는데, 기록·재생 모두 열기계(thermo-mechanical) 방식을 사용하는 IBM방식과는 달리 재생시는 압전 센서를 도입하였다. IBM 방법의 경우 재생시 감도(sensitivity)를 유지하기 위해 재생·기록시 모두 heater에 충분한 열을 발생시켜야 한다. 이때 발생하는 과도한 소비전력은 캔틸레버 어레이의 개수를 제한하게 하고, 실리콘의 열팽창문제를 발생시켜 심각한 Tracking문제를 유발하게 된다. LG에서 개발한 압전 센싱 방법은 이러한 단점을 보완하여 재생시는 소비전력이 없기 때문에 기록시 소비전력도 현격하게 낮출 수 있는 가능성을 제공해 주고 있는 것이다<sup>(20)</sup>. 현재 이러한 국내 연구들은 개별적으로 진행되지 않고 서로 협력하여 시스템 차원으로까지 연구영역을 확장하고 있다.

### 맺음말

21세기에도 여전히 HDD영역에서는 자기 기록방식이 주요한 연구 분야임은 의심할 바 없다. 그러나 자기 기록방식이 아무리 지배적인 기술이라고 하더라도 그 기술은 곧 기본적인 한계에 봉착하게 되고, 아직은 잘



알려져 있지 않은 새로운 기술로 대체될 것이다. IBM에서 NanoDrive 프로젝트를 추진하고 있는 P. Vettigerr는 그 새로운 신기술 도입의 과정을 다음과 같이 설명하고 있다.

“일반적으로 기존 기술이 물리적인 한계에 부딪히면, 새로운 대안기술이 기존기술과 병행해서 나타난다. 이러한 경우 일반적으로 기존 기술은 상당한 투자를 바탕으로 한계를 극복하기 위해 모든 가능한 기술 개발에 주력한다. 만약 기존의 기술에 있어서 모든 발전 가능성이 다 소진했다고 하더라도 이 기술은 사라지지 않고 특정한 영역에서 여전히 이용된다. 이때, 새로운 대안 기술은 기존의 기술의 한계를 극복하고 새로운 방향과 새로운 전망을 개척하게 되는 것이다.”<sup>(4)</sup>

예를 들면 트랜지스터와 진공관의 예가 여기에 해당되는데, 진공관은 여전히 소수의 응용분야에 남아 있지만, 트랜지스터는 지속적으로 발전하여 VLSI영역으로 발전하고 있다.

“오늘날, 많은 영역에서 마이크로 구조에서 나노 구조로 바뀌고 있음을 목격할 수 있다. 현재 사용하고 있는 많은 기술들은 다가오는 나노 시대에 적합하지 않을 것이다. 어떤 기술은 작게 혹은 크게 수정될 것이고, 또 어떤 기술은 부분적으로 혹은 전체적으로 신기술로 대체될 것이다. 그러나 어떤 기술들이 그러할 것인지를 예측하기는 매우 어렵다. 정보 기술분야의 핵심영역에서도 어떤 기술들이 마이크로 일렉트로닉스와 정보 저장 장치 영역에서 사용될 것인지는 장담할 수 없다.

어떤 경우라도 기존의 기술을 대체할 신기술은 이후 장기간의 전망을 가지고 있어야 한다. 예를 들면 마이크로 일렉트로닉스 영역이나 정보저장장치 영역은 매우 거대한

영역이며, 방대한 기술 투자가 이루어지고 있어 자연스럽게 장기적인 기술로 위치 지워져 있다.”

결론적으로, Vettiger에 따르면 기존기술을 대체하는 신기술은 선택할 때에는 장기적인 전망을 가지고 있어야 한다는 것이다. 좀더 구체적으로 한국에서 가능한 신기술을 선택한다면 세 가지 면에서 장기적인 전망을 고려해야 할 것이다.

첫 번째로 물리적인 면에서 장기적인 전망을 가져야 한다. SPM 정보저장장치의 경우 현재 정보저장장치 기술인 자기기록장치보다 더 큰 기록밀도를 즉 나노미터 크기와 그보다 더 작은 원자단위 크기의 기록 밀도를 가질 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

두 번째로 기술 확장면에서 장기적인 전망이 있어야 한다. 이러한 확장성은 두 가지로 나눌 수 있는데, 정보저장장치에서의 확장성과 부가 기술로의 확장성을 들 수 있다. 주류 정보저장장치 제품 속에서 장기적인 전망을 가지기 위해서는 기존의 HDD가 적용하기 어려운 휴대형 정보저장장치에 저가로 적용 가능해야 한다. IBM에서는 1999년에 HDD기술을 그대로 축소 한 170MB/340MB/1GB 용량의 마이크로 드라이브를 제품으로 내놓고 있으나, 이 제품은 자기기록장치를 이용한 HDD는 소형화할수록 단가가 상승한다는 문제점과 기존 HDD의 높은 전력 소모로 휴대용 장비 적용의 한계점을 드러내고 있다. 그러나 SPM 정보저장장치의 경우 실리콘으로 제작되기 때문에 소형화할수록 단가 면에서 유리한 측면이 있다. 아울러 모터를 이용하지 않기 때문에 저전력화가 용이하다.

휴대장치로의 확장성과 함께 부가 기술로의 확장성을 고려해 본다면, SPM 정보저장장치 기술은 바로 반도체 기술을 선도할 나노 리소그래피 기술과 나노 측정장치 기술



과 직접 연관되어 있기 때문에 그 확장성은 매우 우수하다 판단할 수 있다.

마지막으로 주요하게 다루어져야 할 판단 기준으로는 한국에서 선도할 수 있는 기술 인지 여부이다. 이러한 측면에서 SPM 정보 저장장치는 반도체 기술과 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System) 기술을 사용하고 있기 때문에 기술 개발에 있어 한국은 유리한 위치를 차지하고 있다. 또한 SPM 정보저장장치의 탐침은 마이크로 기술(예를 들면 DRAM제조 기술에서 4M 혹은 16M DRAM 제조 기술)로 나노기술을 구현할 수 있어 기술 호환성 면에서도 우수하다.

이렇듯 한국의 기술 상황(후발주자)과 기술의 미래지향성(고밀도화, 소형화, 저렴화, 저전력화)을 고려했을 때 SPM 정보저장장치는 이후 산업 발전에 있어 유망한 기술이라 평가할 수 있다. 이미 작년 IBM 주리히 연구소에서 SPM 기술을 적용한 기록장치인 Millipede를 발표하여, 고밀도 저장장치의 제품화 가능성 증명한 바 있어, 이러한 사실을 뒷받침하고 있다.

#### [참고문헌]

- (1) D. A. Tompson, J. S. Best, 2000, "The future of magnetic data storage technology", IBM J. Res. Develop. Vol. 44 No. 3 pp. 311~322.
- (2) seagate website.http://www.seagate.com/newsinfo/technology/d4g.html.
- (3) Robert L. White, 1997, "Patterned Media: A Viable Route to 50Gbit/in2 and Up for Magnetic Recording?", IEEE Trans. on Mag. Vol. 33, No. 1 pp. 990~995.
- (4) P. Vettiger, G. Cross, M. Despont, U. Drig, B. Gostmann, W. Haberle, M. A. Lantz, H. E. Rothuizen, R. Stutz, and G. K. Binnig, 2002, "The "Millipede" --Nanotechnology Entering Data Storage", IEEE Tran. NanoTech. Vol. 1 No. 1 pp. 39~55.
- (5) Peter Vettiger and Gerd Binnig, Jan. 2003, "The NanoDrive Project", Scientific American, pp. 35~41.
- (6) H. Jonathon Mamin, Robert P. Ried, Bruce T. Terris and Daniel Rugar, 1999, "High Density Data Storage Based on the Atomic Force Microscope", Proc. of IEEE, Vol. 87 No. 6 pp. 1014~1027.
- (7) P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, W. Haberle, M. I. Lutwyche, H. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, and G. K. Binnig, 2000, "The 'Millipede'—More Than One Thousand Tips for Future AFM Data Storage", IBM J. Res. Develop. Vol. 44, pp. 323~340.
- (8) Nanochips Inc. website,http://www.nanochip.com.
- (9) Quate; Calvin F., 1986, "Method and Means for Data Storage Using Tunnel Current Data Readout", US Patent, 4,575,822.
- (10) Foster; John S., Rubin; Kurt A., Rugar; Daniel, 1990, "Data Storage Method Using State Transformable Materials", US Patent, 4,916,688.
- (11) Sumio Hosaka, 2000, "SPM Based Recording Toward Ultrahigh Density Recording with Trillion bits/inch<sup>2</sup>", Asia-Pacific Magnetic Recording Conference, pp.



MC2/1-MC2/2.

(12) Steve Naberhuis, 2002, "Probe-based recording technology", J. of Magn. and Magn. Mat. Vol. 249, pp. 447~451.

(13) Gary Gibson, Theodore I. Kamins, Marvin S. Keshner, Steven L. Neberhuis, Craig M. Perlov, Chung C. Yang, 1996, "Ultra-High Density Storage Device", US Patent 5,557,596.

(14) L. Richard Carley, James A. Bain, Gary K. Fedder, David W. Greve, David F. Guillou, Michael S. C. Lu, Tamal Mukherjee, and Suresh Santhanam, Leon Abelmann, Seungook Min, 2000, "Single-chip computers with Microelectromechanical Systems-Based Magnetic Memory", J. App. Phys. Vol. 87, pp. 6680~6685.

(15) Dong Weon Lee, Takahito Ono, and Masayoshi Esashi, 2002, "Recording on PZT and AgInSbTe Thin Films for Probe-based Data Storage", IEEE Int. Proc. MEMS 2002, pp. 685~688.

(16) Young-Sik Kim, Hyo-Jin Nam, Seong-Moon Cho, Dong-Chun Kim, and Jong-Uk Bu, 2002, "A Self-Actuating Cantilever Integrated with Piezoresistor Sensor for AFM with High Speed Parallel Operation", IEEE Int. Proc. MEMS 2002, pp. 689~692.

(17) Young-Sik Kim, Hyo-Jin Nam,

Seong-Moon Cho, Jae-Wan Hong, Dong-Chun Kim, and Jong-Uk Bu, 1993, "PZT Cantilever Array Integrated with Piezoresistor Sensor for High Speed Parallel Operation of AFM", Sensor and Actuators B Vol. 103, pp. 122~129.

(18) Hyo-Jin Nam, Young-Sik Kim, Seong-Moon Cho, Caroline Sunyoung Lee, Jong-Uk Bu, and Jae-Wan Hong, 2002, "Piezoelectric PZT Cantilever Array Integrated with Piezoresistor for High Speed Operation and Calibration of Atomic Force Microscopy", J. of Semi. Tech. and Sci. Vol. 2, pp. 246~252.

(19) Hyo-Jin Nam, Young-Sik Kim, Seong-Moon Cho, Caroline Sunyoung Lee, Jong-Uk Bu, and Jae-Wan Hong, Zheong-Gu Khim, 2002, "Calibration of Non Linear Properties of Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub> Cantilever Using Integrated Piezoresistive Sensor for High Speed Atomic Force Microscopy", Jan. J. Appl. Phys. Vol. 41, pp. 7153~7157.

(20) Caroline Sunyoung Lee, Seong-Moon Cho, Hyo-Jin Nam, Young-Sik Kim Jong-Uk Bu, 2003, "Micro Cantilevers with Integrated Heaters and Piezo-electric Detectors For Low Power SPM Data Storage Application" IEEE Int. Proc. MEMS 2003, pp. 28~32.

