

고밀도 정보 저장 장치 기술 현황

이 준 희, 오 형 열, 권 대 갑*
한국과학기술원 기계공학과

1. 서론

1-1 고밀도 정보 저장 장치의 필요성

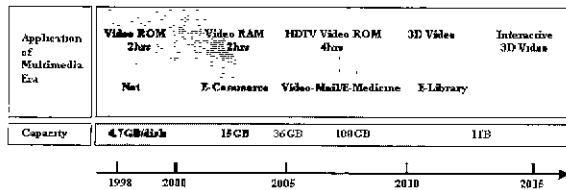


그림 1. 정보저장 장치의 기록 용량 증가

21세기 정보화 사회의 도래에 따른 정보통신 서비스 시스템의 발전으로 개인의 취급 정보량이 위의 그림 1에서 나타나는 바와 같이 1990년 100MB에서 2000년 10GB, 2010년 1TB 단위로 엄청난 증가가 예상된다. 또한 그림 2와 같이 현재의 아날로그 방송이 고화질의 디지털 방송으로 전환되고 있어, 각 가정에서의 개인 정보 취급량은 더욱 증가할 것으로 판단 된다.

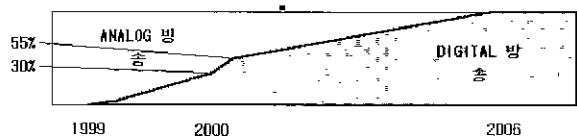


그림 2. 미국의 디지털 방송 계획

정보저장 산업은 이러한 Multimedia 시대의 주요 산업의 하나로서, 이 산업은 현재 DVD, CD로 대표되는 Optical 방식과 HDD로 대표되는 자기 기억 저장기술로 양분되어 있으며, 이 분야의 주요 관심사는 저장장치의 초소형화, 기록 밀도 및 정보 전송속도의 고도화이다. 특히 소비자 기호의 고급화로 고화질 동영상 처리의 수요가 증가함에 따라 HDTV, MPEG2가 등장하였고, 이를 위한 소요 정보저장 용량은 현재의 기술 수준을 능가하고 있다. 즉 HDTV 급의 영상 데이터를 MPEG2의 화질로 영화 하나를 (2시간 기준) 디스크에 저장하기 위해서는 20Gbytes 이상의 정보저장 용량이 필요하다 그러나 이러한 수십 기가급 정보저장 기기의 필요성에 비하여, 1998년 기준으로 고밀도 기록 재생장치로

개발중인 상변화(Phase change) 계열의 DVD-RAM Drive system은 기록용량이 12cm disk를 사용하여 4.7Gbytes 수준이며, 1999년도 이후에 상용화로 출시될 것으로 기대되고 있는 광자기 (Magneto optic) 계열의 ASMO (Advanced Storage Magneto Optical) Drive system에서는 기록용량이 6.1Gbytes 수준으로서, PC 주변장치로서의 기록 저장 장치로는 그 용량이 어느 정도 충분하다고 판단되나, 고화질의 동영상의 정보 저장장치나 VCR의 기능을 대체할 수 있는 HD-TV 급의 VDR로서의 용량으로는 소요 용량의 절반에도 미치지 못하고 있는 실정이다. 따라서 이와 같은 기록 용량을 충족하기 위해서는 기록 미디어의 부피가 커지거나 여러 장을 사용해야 한다.

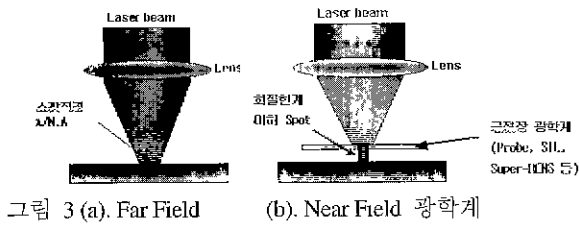
이러한 요구에 대응하기 위한 차세대 고밀도 정보 저장 장치를 개발하기 위해서, 이제까지 널리 사용되고 있는 630nm 적색 레이저와 렌즈 개구(NA)가 0.7 정도인 렌즈로 구성된 광픽업(Optical Pickup)은 회절 한계로 인하여 더 이상의 고밀도화가 불가능하여 고려되지 않고 있으며, 기록용량을 높이기 위한 한 수단으로 DVD에서는 양면 다층 기록 방법, ASMO에서는 MAMMOS (자극 확대 광자기 시스템) 등의 방법을 개발되고 있다. 또한 파장이 450nm인 청색 레이저의 상용화도 고려되고 있다. 그러나 이러한 시도들은 그 계를 들어내고 있다.

따라서 현재 사용되고 있는 저장기기의 연속선상에서 개발되는 저장기기의 기록밀도 한계를 극복하기 위해서는 새로운 방식의 광 기록 기술 개발이 필요한데, 최근 차세대 저장기기의 기록방식으로서 가장 유력하게 고려되고 있는 기술이 근접장 광학(Near Field Optics)을 응용한 광 기록 기술로서, 현재 이 분야의 기술 개발 경쟁이 매우 치열하다.

2. Far Field vs. Near Field 광학계의 비교

일반적인 Far-field 광학계는 회절한계(diffraction limit)로 인하여 렌즈의 초점 평면상에서 최소 스폿 직경이 다음과 같이 나타난다

$$d = \frac{\lambda}{n \sin \theta} = \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$



여기서 λ 는 입사 되는 빛의 파장, n 은 빛이 통과하는 매질의 굴절률, θ 는 사용하는 렌즈의 구경각(aperture angle)으로 나타낸다. 그림 3(a) 일반적으로 GaAs 레이저를 이용하는 경우 파장이 670-840nm 정도이고, 광픽업에서 사용되고 있는 광학계의 경우 NA는 대략 0.5-0.6 정도이다. 따라서 현재 사용되는 광픽업에서 최소 스폿 직경은 대략 1 μ m 정도가 되고, 이와 같은 스폿 직경의 최소 크기가 정보저장 장치의 기록 피트(pit)의 크기가 되고, 이와 같이 스폿 직경의 크기가 광을 이용한 정보저장 장치의 단위 면적당 기록/재생 밀도를 높이는데 한계로 작용하게 된다.

이를 극복하기 위해 짧은 파장의 파란색 레이저(400-500nm)를 사용하거나, 직경이 크고 초점거리가 짧은 렌즈를 사용하거나 ($\theta \approx 90^\circ$) 하는 방법 등을 사용하고 있지만, 이와 같은 렌즈는 초점 심도(depth of focus)가 작아져 초점을 맞추기 어려워지는 단점이 있다. 또한 식 (1)에서 볼 수 있듯이 이와 같은 방법으로는 결국 파장 이하의 직경을 갖는 스폿을 만들 수 없다.

이와 같은 회절한계로 인한 스폿 직경의 크기의 한계를 극복하기 위해 제안된 방법이 그림 3(b)와 같이 근접장 광학(Near Field Optics)을 이용하는 것이다. 그 원리는 광의 출사 구경(Aperture)을 Probe, SIL, Super-RENS 등의 근접장 광학계를 이용하여 줄임으로 출사 광의 스폿 직경이 파장 이하가 되도록 제약하는 것이다. 이때 근접장 광학계를 통해 출사되는 빛을 소멸파(Evanescent Wave)라고 한다. 이와 같은 소멸파는 출사 구경을 나온 후 진행 방향으로 지수함수적으로 소멸하기 때문에 기록 미디어를 출사 구경으로부터 매우 근접하게 - 파장 이하의 거리 - 위치 시켜야 한다. 따라서 근접장 광학계와 기록 미디어 사이의 거리를 나노정밀도로 위치제어 해야 할 필요가 생긴다. 결국 근접장 광학계를 이용하여 출사 구경의 크기를 파장 이하로 줄이고, 근접장 광학계와 기록 미디어와의 간격을 나노 정밀도로 제어하면, 스폿의 직경을 파장 이하로 줄일 수 있어 회절한계에 의한 스폿 직경 크기의 제약에서 벗어나 정보 저장 장치의 단위 면적당 기록/재생 밀도를 높일 수 있다.

3. 관련 기술 현황

3-1. AFM(Atomic Force Microscope) 주사 방식 : IBM

IBM에서는 AFM(Atomic Force Microscope) Cantilever와

광기술을 융합시켜, 수십 nm 크기의 피트를 형성하여 그것을 읽어내는 각종 고밀도기록 기술을 보고하고 있다. 또한 이와는 별도로 스탠포드 대학과 함께 Cantilever tip을 접촉 방식으로 압축 저항과 joule열을 이용하여 기록하고 읽어내는 방법으로 30Gb/in²의 기록밀도를 보고 하였다. 이 방식의 작동 특징은 다음과 같다.

- servo-error가 cantilever spring의 동작으로서 보상되므로 readout speed는 AFM cantilever의 공진주파수에 의해 결정된다.
- probe와 매체간의 gap-force 특성상 AFM은 cantilever의 deflection이 gap에 비례하는 구간의 힘인 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ N에서 작동된다.
- cantilever의 통상의 공진주파수는 force free조건에서 약 40kHz이나 10^{-8} N의 반발력이 인가되면 20배 증가한 800kHz에 이른다.
- 10MHz의 재생을 위해서는 400kHz의 공진주파수와 0.1N/m의 스프링상수를 가진 advanced cantilever의 개발이 필요하다

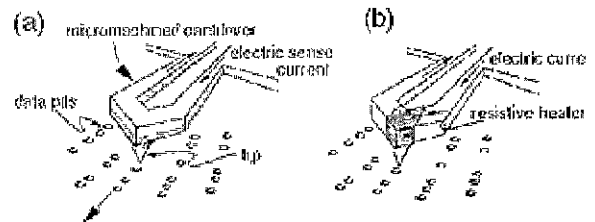


그림 4. AFM을 응용한 정보저장기기 개념도

- Signal-noise ratio(SNR)는 surface roughness와 pit depth 또는 dot height의 비에 따라 결정된다.
- 실험적으로 공기 중에서 SiO₂/Si 표면에 15nm 직경의 금으로 된 bit를 형성/측정할 수 있고, 이를 계산하면 6Tb/in²의 기록 밀도를 이룰 수 있다.

3-2. Aluminum coated optical fiber probe : E.Betzig et al.[AT&T]

AT&T Bell 연구소에서는 근접장 광을 발생시키는 파장 이하의 크기를 갖는 미소한 출사 구경을 광파이버를 이용하여 만들었다. 광파이버 끝단에 레이저를 이용하여 순간적으로 강한 열을 가하며 당기면 끝단 직경이 100nm 이하인 탐침이 만들어지게 되는데, 이 파이버 탐침을 기록 미디어 표면에 파장 이하의 거리로 근접시키고, 그 파이버를 통해 빛을 주사함으로써 탐침 끝단에서 파장 이하의 스폿을 형성할 수 있다. 이때 형성된 광을 이용하여 기록/재생을 실시하여 대용량 정보저장 장치를 구현하는 시도를 하고 있다. 이를 위해 기록 및 읽기 속도의 향상, 광출력 증대, Tracking제어의 실현 등에 관한 연구를 행하고 있으며, 광 출력을 증대하기 위하여 광 Fiber Probe로 Nd³⁺ Dope Fiber를 이용하며, 1.06 μ m인 파장으로 Nd³⁺ Laser 발진 Threshold

부근에서 동작시키는 방법을 보고 하였다. 이와 같은 방법으로 100nW Power로 100nm인 공간분해능으로 피트를 읽어낼 수 있는 것으로 보고 되고 있다.

그러나 대량의 정보를 고속으로 기록, 재생하기 위해서는 기록 미디어를 고속으로 회전시키면서, 근접장을 이용하기 위해 파이버 탐침과 기록 미디어 표면의 거리를 수십 나노미터로 일정하게 유지하도록 제어해야 한다. 여기에 탐침 끝단의 직경과 형상 그리고, 탐침과 기록 미디어 사이의 거리가 기록 및 재생 신호의 특성에 큰 영향을 준다. 만약 작은 충격이 가해지면 탐침과 미디어가 충돌하게 되고, 직경이 100nm이하인 미세한 광파이버 탐침 끝단은 쉽게 부서진다. 결국 정밀한 위치 제어 기술이 고속화 및 안정화의 필수적인 요소가 된다.

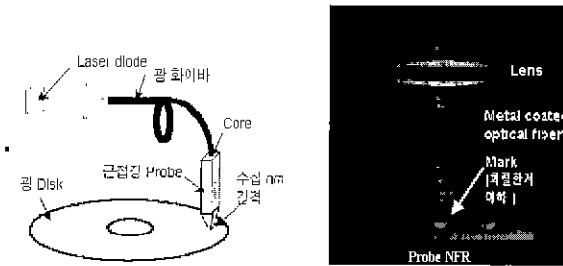


그림 5. 광파이버를 응용한 정보저장장치 개념도

3.3 SIL(Solid Immersion Lens)를 이용한 저장장치 : IBM, TeraStor

IBM(B.D. Terris et al.)과 TeraStor에서는 Probe를 이용한 방식이 가지는 고속화의 한계를 극복하기 위하여 Immersion Optics의 방식을 이용한 SIL을 기존 HDD의 Flying Head에 탑재하는 연구를 수행하고 있다. 즉 Objective 렌즈로 SIL에 레이저를 집광시키면 굴절률(n)이 높은 SIL 내부 밀면에 스팟이 형성되며, 이 스팟의 직경은 식 (1)에서 알 수 있듯이 SIL의 굴절률에 반비례하여 감소하며, 일반적으로 SIL의 굴절률이 >1.7 이기 때문에 회절한계 이하 직경의 스팟을 얻을 수 있다.

이때 기록 미디어를 SIL 렌즈와 파장 이하의 거리로 유지하면 스팟에 집광된 광은 evanescent파의 형태로 기록 미디어에 전파되어 표면을 가열시킨다. 여기에 가열된 영역만 자화코일에 의해 특정방향으로 자화시키는 방식으로 피트(pit)정보를 저장한다

기록된 정보를 읽을 때에는 기록된 미디어의 자화에 영향을 주지 못할 정도의 세기의 편광이 일정한 광을 입사 시키면, Kerr effect에 의해 입사된 광의 편광 방향이 바뀌게 되고, 이 편광 방향의 변화를 측정하면 기록된 피트를 읽어낼 수 있다.

이 방법에서는 probe 방식에서의 수직방향 위치제어를 Flying Head에 의해 기록 미디어가 회전하면서 자동으로 유지 되기 때문에 수직위치 제어가 비교적 용이

하여 고속화가 가능하다. 이 방법은 현재 차세대 저장 기기의 헤드로서 가장 유력하게 인정 받고 있는 기록 기술로서 TeraStor 사에서 1999년 시제품을 선보였다.

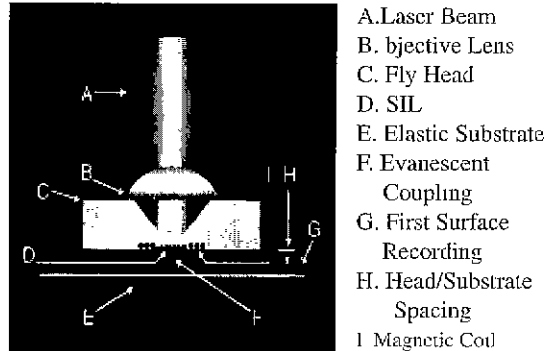


그림 6. SIL를 응용한 정보저장장치 개념도 (TeraStor 사 홈페이지 자료)

TeraStor사에서 제작된 SIL 응용 정보저장장치의 개념도는 그림 6과 같으며 HDD 와 MO기록 장치에 비해 현재 기록 밀도는 현재 10배 정도 더 뛰어나다고 밝히고 있다. 앞으로의 발전 속도는 그림 7과 같이 예상된다.

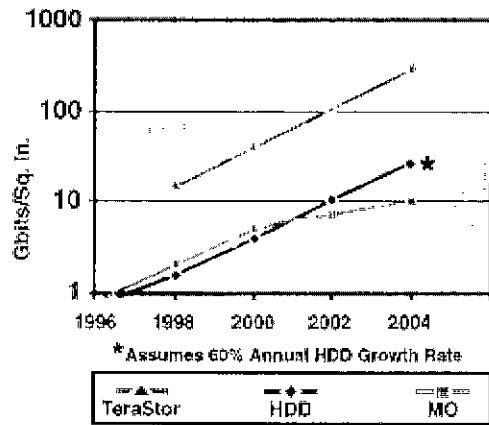


그림 7. SIL vs HDD & MO 기록 밀도 비교 (TeraStor 사 홈페이지 자료)

3.4 포토다이오드가 형성된 Silicon cantilever를 이용한 방식 : NTT

NTT(S.Akamine et al.)에서는 구조가 AFM 응용 방식과 같으며, MEMS 기술로 제작한 probe 센서 일체형의 탐침을 이용한 저장장치 개발을 시도하고 있다. 이 방식에서는 AFM cantilever 구조를 NSOM 헤드로 이용하며, 근접장 광의 수광은 cantilever 한면에 반도체 기술로 형성된 포토 다이오드로 수행함으로써 대량 생산이 매우 용이하도록 하였다. 그러나 이 방식도 NSOM probe를 이용하는 방식과 같이 고속화의 문제가 있다.

3.5 Super RENS(Super Resolution Near field Structure)를 이용한 저장장치 : 공업기술원(일)

工業技術院(Atoda et al.) 산업기술융합영역 연구소(차세대 광기반 연구Gr.)에서는 정보의 기록 밀도를 현재 광 Disk의 100배 이상으로 높일 수 있는 새로운 기록 방식을 개발하고 있다. 이 방법은 기존 Optical Pickup에서 헤드를 Super-RENS(Super-Resolution Near-Field Structure : 초 해상 근접장 구조)라고 명명된 구조로 바꾼 것만으로 광의 회절 한계를 초월한 미소 피트의 기록, 재생이 가능하도록 한 것으로 광 헤드부의 구조가 종래의 광 Disk에 사용되어 지고 있는 것과 기본적으로 같아도 되기에 실용성이 높은 기술로 평가되고 있다.

이 방법은 강한 광의 조사에 의해 불투명한 막이 투명으로 변화하는(광학적 창이 열림) 물질을 기록층의 위에 형성시켜(Mask 층) 레이저 스팟 중심의 광이 최고로 강한 부분에서만 광학적 창, 즉 미소 개구가 형성되어 미소 스팟의 형성이 가능하다. 여기에 사용되는 매체는 Rewritable형의 DVD에도 사용되고 있는 상 변화 기록 재료 및 $Ge_2Sb_2Te_3$ 를 이용하며, 근접장 개구와 기록막의 거리는 보호막의 두께에 의해 고정되어 일정하게 유지된다.

Super-RENS를 DVD용 디스크 드라이브 테스트에 적용하여 CD의 4배속 속도로 회전시키면서 파장 680 nm, Spot경 약1um의 레이저를 이용 기록, 재생 성능을 평가하였을 때 최소 90nm의 피트를 기록 및 재생 가능하였다. 즉 기존 CD의 100배(65Gbyte)이상의 대용량이 구현 가능하다. 여기에 단파장 청색 레이저 (파장480nm)와 고해상도의 광학계를 이용할 경우 최소 피트 크기를 50~30nm 까지 낮출 수 있어, 기록 용량을 sub Tera byte 영역으로 증대 가능하다.

이 방식은 probe방식과 같은 접촉에 의한 파손의 위험성이 없기 때문에 고속화가 가능하며, 현재의 광 Disk용의 Drive 구성을 대폭으로 변경할 필요가 없다. 또한 현재의 CD 나 DVD계열의 Removability를 유지할 수 있는 장점이 있으나, 기록과 저장을 동시에 만족시키는 사양이 trade-off되어야 하는 단점이 있다.

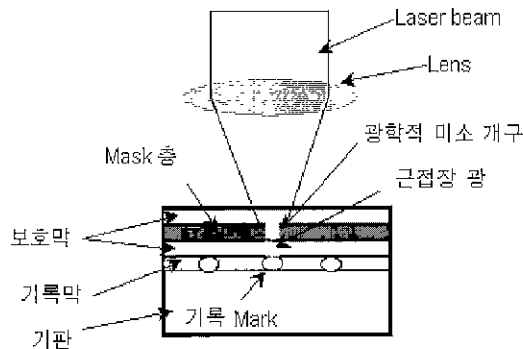


그림 8. Super RENS를 응용한 정보저장기기 개념도

3.6 GMR 헤드를 이용한 광자기 기록방식 : Hitachi

Hitachi에서는 기존의 CD의 광 기록 방식과 HDD의 자기 기록 방식을 혼합한 형태의 기록 장치를 개발하고 있다. 이 방법은 기존에 비하여 기록밀도는 높으나, 기록헤드에 소요되는 비용과 부피가 매우 커지는 단점이 있다

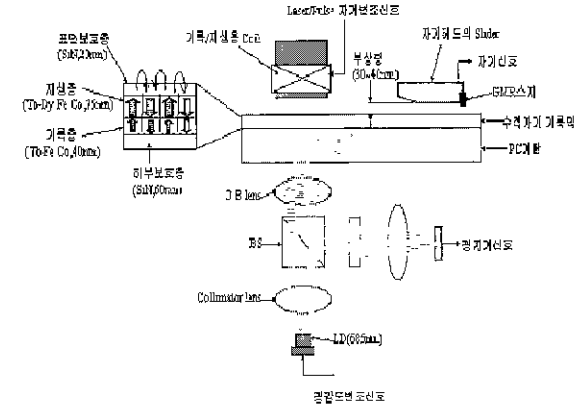


그림 9. GMR 헤드를 응용한 광자기 정보저장기기

3.7 SIM(Solid Immersion Mirror)에 의한 기록 방식 : 삼성전자

삼성전자에서는 TeraStor사의 SIL과 유사하게 렌즈 매질 내에서 광이 집광되도록 하여, 광스팟을 줄이는 근접장 발생 광학계를 고안하였다. 이 방법은 SIL과 원론적으로 같은 방법이나, SIL과 달리 1차 집광렌즈의 필요 없이 평행광을 사용하며, 렌즈 벽면을 mirror coating함으로써 광이 수차 없이 집광되는 특징을 가지고 있다.

그러나 SIM은 그 부피가 커서 초소형의 기록헤드에 장착되기 곤란하며, 형상이 복잡하여 대량 생산성이 어려운 단점이 있다.

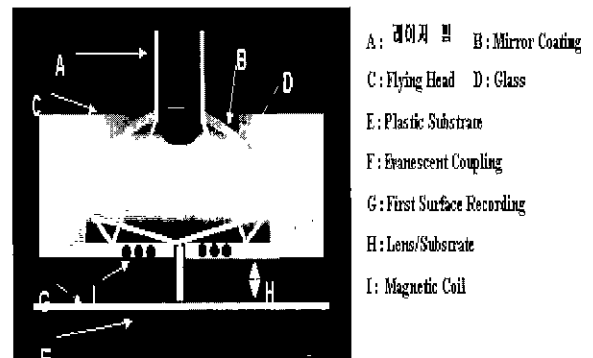


그림 10. SIM을 응용한 정보저장기기 개념도

3.8 관련 기술 요약

앞에서 언급한 차세대 정보저장 기기의 특징을 요약하면 다음과 같다.

기술 분류	개발업체	개발업체	단 점	개념도
SIL-MO	TeraStor	- HDD기술 응용 - 고속화 가능	- 상대적으로 저밀도 (10 Gbits/in ²)	
Optical Fiber Pippet	AT&T	- 고밀도 (45 Gbits/in ²) - Read and Write	- 고속 Access 곤란 - 시스템복잡/대형 - 탐침의 수직 방향 위치 제어 - 탐침의 파괴	
Super RENS	공업 기술원(일)	- Conventional optics system 가능 - DVD의 상변화 기록 재료 이용	- Mask층의 고속 개폐	
AFM Recording	IBM	- 15nm bit 형성 가능 → 6 Tbits/in ² 가능	- Gap control(수 nm) - 탐침의 마모 - advanced cantilever 개발 필요	
광자기 기록 /GMR 재생	Hitachi	- 재생시 GMR헤드 이용 → 재생 분해능 향상 - 기존 광자기 시스템을 이용 → 먼기록 밀도 대폭 확장	- HDD의 기반 기술 필요 - 기록헤드 비용 - 부피가 커짐	
SIM	Samsung	- 플라스틱 렌즈로 NA1.5 실현 가능 - 집광 렌즈 불필요 - 수차 없이 집광	- SIM 렌즈 가공의 어려움	

4. 결론

지금까지 광 기록 정보저장 장치의 기록 밀도의 한계와 이를 극복하기 위한 차세대 고밀도 정보저장 장치들을 살펴 보았다. 각 정보저장 장치들의 기본적인 동작 원리와 특성을 설명하였고, 각각의 장단점을 소개 하였다.

이와 같은 대용량 정보저장 장치는 21세기 멀티미디어 시대의 고밀도, 대용량 고속 정보처리가 요구되어 지는 분야의 산업에 다양한 응용 토대가 될 것으로 기대된다. 즉 차세대 정보저장 장치로서 고품질 동영상의 저장 및 재생이 필요한 HDTV산업, 정보저장 및 전송을 필수적으로 하는 개인용 PC 및 컴퓨터 Networking/server 산업, 기타 의료, 군사 산업에 이르기까지 다양하게 활용될 것으로 기대된다. 21세기에 형성될 이러한 차세대 대용량 정보저장 기기 산업에서 기술적 우위를 놓치게 되면 국가의 경제적 채산성은 회복할 수 없을 정도로 악화될 것이다. 또한 정보 저장 산업은 단순히 정보저장 기기 뿐 아니라 정보산업의 큰 부가가치 창출에 따른 그 파급효과가 커, 이 분야의 기술 및 시장 장악은 정보통신 서비스의 기반을 장악하는 것이 되어, 정보저장기기의 핵심기술의 확보는 나아가 전체 정

보통신 시스템의 주도권을 갖게 되는 파급효과가 있다. 이와 같은 상황에서 차세대 대용량 정보저장 기기의 핵심 부품 및 요소 기술의 확보와 관련 부품 산업의 기술개발 및 경쟁력 있는 독자적 설계/생산 기술 확보가 절실히 필요하다.

참고문헌

- [1] M. Mansuripur, *The Physical Principles of Magneto-optical Recording*, Cambridge University Press, New York, 1995.
- [2] J.Tomnaga, H.Fuji, A.Sato, T.Nakano, T.Fukaya, N. Atoda, "The near-field super-resolution properties of an antimony thin film", *Japanese Journal of Applied Physics Part 2 [Letters]*, Vol:37 Iss: 11A. pp. L1323-5, 1998.
- [3] H.J. Mamin, D Rugar, "Thermomechanical writing with an atomic force microscope tip" *Applied Physics Letters*, Vol:61 Iss: 8 pp.1003-5. 1992.
- [4] S. Hosaka, A. Kikukawa, H. Koyanagi, T. Shintani, M. Miyamoto, K. Nakamura and K. Etoh, "SPM-base data storage for Ultrahigh density recording", *Nanotechnology*, vol.8 , pp. A58-62. 1997.
- [5] 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, pp. 142-144, July 1992.
- [6] B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar, W. R. Studenmund and G. S. Kino, "Near-field optical data storage using a solid immersion lens" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65 (4) pp. 388-390, July 1994.
- [7] B. D. Terris, H. J. Mamin, and D. Rugar "Near-field optical data storage", *Appl. Phys. Lett.* vol. 68 (2), pp. 141-143, January 1996.
- [8] S. Hosaka, "SPM Based Storage", *IEEE Trans. of Magnetics*, vol. 32, no. 3, pp. 1873-1877. May 1996.
- [9] S. Hosaka, H. Koyanagi, A. Kikukawa, M. Miyamoto, and Ryo Imura, "Fabrication of nanometer-scale structures on insulators and in magnetic materials using a scanning probe microscope", *J. Vac. Sci. Technol. B.* vol. 13(3), pp 1307- 1311, May/June 1995.
- [10] S. Hosoki, H. Koyanagi and A. Kikukawa, "Nanometer recording on graphite and Si substrate using an atomic force microscope in air", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32B, pp. L464-L467, March 1993.

- [11] Hitachi Homepage : www.hitachi.com.
[12] TeraStor Homepage : www.terastor.com.

이 준 희

1997년 KAIST 기계공학과 (공학사). 1999년 KAIST 기계공학과 (공학석사). 1999년~현재 KAIST 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 Near Field 응용 및 초정밀 구동

오 형 렬

1992년 부산대 기계공학과 (공학사). 1994년 KAIST 기계공학과 (공학석사). 1996년~현재 KAIST 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 Near Field Recording

권 대 갑

1952년 4월 1일생. 1975년 한양대 기계과(공학사). 1977년 KAIST 기계과(공학석사). 1987년 독일 스투트가르트 대학교 기계과(공학박사). 77-82 부산대 기계과 조교수. 82-87 독일 IPA 연구서 객원연구원. 1987년~현재 KAIST 기계과 교수. 관심분야는 초정밀 위치 결정 기구 및 측정 기구