

최근 광 정보저장장치의 개발동향 및 기술 과제

이 글에서는 광 정보저장장치로서 최근 개발된 DVD를 중심으로 광 저장장치 기술 및 시장 동향과 주요 기술 및 미래전망에 대해 살펴보고, 근접장 광학기술을 이용한 초소형 광 정보저장장치와 광 탐침형 기록 장치의 주요 기술 과제에 대해 소개한다.

김수경, 전종업

지난 몇 년 동안 정보저장 장치로서 광디스크 매체를 이용한 디스크 드라이브는 급속한 발전을 해 오고 있다. 최근에 발표된 재기록 가능한 광 정보저장장치는 동화상 정보를 장시간 기록하는 대용량 광 또는 광자기 기록디스크 저장장치로서 이미 수Gbit/in² 급의 고밀도화·고속화기술이 구현되고 있다. 현재 우리가 자주 접하고 있는 CD-ROM, DVD-ROM 등 광 저장장치는 출판, 정보와 소프트웨어의 배포, 멀티미디어 제작, 시스템 백업 및 개인 데이터 저장 등 여러 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 이것은 특히 저장용량 대비 가격면에서 타 매체에 비해 탁월하며, 또한 데이터의 저장 및 재생 성능이 탁월하여 PC 주변장치로서 확고한 위치를 점하고 있기 때문이다.

650 MB의 저장용량을 갖고 있는 CD-ROM은 최근 1 달러 이하의 가격으로 디스크 제작이 가능하며, 이미 우리의 생활 속에서 소

프트웨어나 정보의 배포를 위한 미디어로서 위치를 확고히 하고 있다. 한편, 기록재생이 가능한 광 저장장치로서 1 회 기록이 가능한 CD-R(Recordable), 1,000 회까지 기록 재생이 가능한 CD-RW(ReWritable) 드라이브가 있으며, 기록 매체의 가격 하락과 드라이브의 가격 하락으로 급속히 확산되고 있다. 이들 기록·재생용 드라이브는 소비자의 정보 저장 욕구를 해소하면서 재생전용인 CD-ROM을 대체해 나아가고 있다. 그리고 기록 가능한 DVD 기술은 여러 종류의 규격이 경쟁적으로 개정 또는 제정 중에 있다. 10만 회 반복 기록이 가능한 DVD-RAM은 2.6 GB 기록이 가능한 버전 1.0, 저장용량 4.7 GB 기록 재생이 가능한 버전 2.0이 제정되어 이미 소비자에게 판매되고 있다. 또한 1 회 기록이 가능한 DVD-R도 4.7 GB 기록이 가능한 버전 2.0이 제정되었으며, 4.7 GB 용량을 1,000 회 반복 기록이 가

능한 DVD-RW도 버전 1.0의 규격을 제정하였다. 이 외에도 반복 기록이 가능한 규격으로 DVD+RW가 있다. 이들 다양한 규격들은 각 규격 제정 그룹들의 이해 득실 및 기술적인 안정화 등으로 인하여 그 확산이 다소 늦어지고 있다. 이 글에서는 먼저 광 정보저장장치로서 최근 주요 개발 DVD를 중심으로 광 저장장치 기술 및 시장 동향을 살펴보고 주요 기술 및 미래전망 등에 대하여 살펴본다. 다음으로 차세대 광 기록 기술로서 현재 주목받고 있는 근접장 광학기술을 이용한 초소형 광 정보저장장치에 대해 소개하고 주요 기술과제를 살펴본다. 마지막으로 초정밀 광학 현미경 기술을 응용한 광 탐침형 기록장치에 대해 연구현황 등을 살펴보고 주요 기술적 과제에 대해 알아보기로 한다.

CD, DVD계열의
광 정보저장장치의 동향

김수경/ LG전자 DM연구소 DCT그룹, 책임연구원/ E-mail : sookim@wm.lge.co.kr
전종업/ 삼성종합기술원, Nano System Lab., 수석연구원/ E-mail : jeon@sait.samsung.co.kr

기술 동향

광 저장장치의 추세는 크게 대용량화와 기록/재생 속도의 고 배속화, 그리고 역방향 호환성의 확보로 분류된다. 소프트웨어의 용량이 방대해지고 게임이나, 영화 등 대용량의 정보를 저장하기 위해 저장용량의 대용량화에

대한 요구는 꾸준히 제기되고 있다. 광 디스크는 직경이 12 cm, 8 cm가 있으며, 12 cm의 경우, CD계의 디스크는 650 MB, DVD계의 디스크는 편면 4.7 GB의 용량으로 CD계의 약 7.2배의 용량이다. 한편 미래에는 DTV 등의 고화질 정보를 저장하기 위해서는 20 GB 이상의 저장용량을 요구하고 있고 현재 상당한 수준의 기술 개발이 이루어지고 있다.

광 디스크 장치들은 '90년대 중반 이후의 CD-ROM 드라이브의 배속 경쟁에서 알 수 있듯이 고 배속화 및 안정된 고속탐색이 중요한 요인으로 꼽을 수 있다. 현재 급속히 확산되고 있는 DVD-ROM의 경우에도 '99년도에 이미 8배속을 실현하였고 현재는 12 배속 이상을 실현한 제품들이 선을 보이고 있다. 또한 고속탐색에 있어서도 재생배속에 따라 꾸준히 감소하고 있다. 한 조사기관의 통계에 따르면 1999년 한 해에 전 세계에 보급된 CD-ROM 드라이브는 1억 2,000만 대를 상회한 것으로 나타났다. 그만큼 많은 CD계 미디어가 확산 보급되어 있는

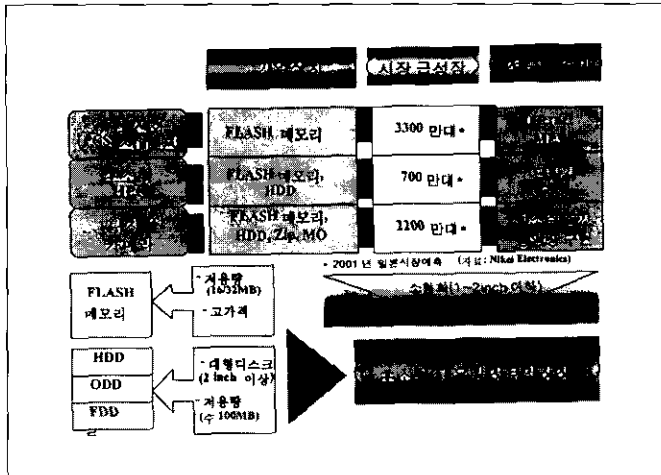


그림 1 휴대형 기기에서의 각종 기억장치와 시장전망

것이다. 이런 논리로 보면 DVD-ROM에서 CD계의 미디어에 대한 재생 호환성을 갖는 것은 당연한 일로 여겨진다. 향후의 광 디스크 제품군들도 이미 소비자에게 보편화된 미디어에 대한 역방향 호환성을 확보하는 것이 중요한 요인임에 틀림없다.

주요 기술개발 이슈 및 전망

광 디스크의 기술 동향에서 언급했듯이 광 저장장치의 중요 기술로는 고밀도화, 고배속 기록/재생 기술 그리고 역방향 호환성 등을 들 수 있다. CD계의 경우, CD-ROM의 재생 전용 드라이브 범용화 이후 상당한 기간 뒤에 CD-R, CD-RW 등의 기록 재생기가 발전되어 왔지만 DVD의 경우에는 DVD-ROM의 재생 전용 드라이브의 확산 이전에 이미 규격이 결정되고 시장에 선을 보였다. 따라서 향후 보다 대용량 드라이브는 재생 및 기록 규격이 병행될 것으로 보인다. CD 기술 기반 위에서 DVD 기술이 발전되었듯이 향후의 대용량 광 저장 매체 및 드라이브 기술도 DVD의 기록 재생 기술 기반

위에서 전개되는 것은 당연하다고 할 수 있다. 그리고 가장 보편적으로 확산되어 있는 미디어에 대한 역방향 호환성은 자연스럽게 확보될 것으로 판단된다.

DVD 기록 또는 재생기의 중요한 기술을 살펴보면 다음과 같다.

① 미디어 제작 기술

미디어는 광 기록 재생에 있어서 핵심이 될 수 있는 중요한 기술로서 노이즈가 적도록 설계된 기관 제작 기술이 필요하다. 또한 고밀도화되면서 트랙 사이에 발생하는 상관노이즈(cross noise)의 저감, 기록용 디스크의 경우 기록시 인접 트랙에 영향을 최소화할 수 있는 항상 방법, 기록 매질의 구성에 있어서 기록 후에 높은 CNR을 확보할 수 있도록 하는 기술이 필요하다.

② 고정도 서보 기술

광 디스크가 고밀도화 되면서 포커스 신호의 안정된 검출, 트랙 신호의 검출 및 트랙 센터의 추종, 그리고 광 디스크의 기울어짐에 의한 기록/재생 시 검출 신호의 열화를 방지하기 위한 틸트 서보(tilt servo) 등을 중요한 서보 기술로 나열할 수 있다.

③ 신호처리

기존의 CD계에서와는 달리 DVD계에서는 검출신호의 정도를 높이기 위해서 디지털 동화기(digital equalizer), 비터비 검출(viterbi detection) 등을 적용할 필요가 있다.

④ 픽업(pick-up) 제작 기술

광 픽업은 광 디스크로부터 신호를 검출하고 기록할 수 있는 장치로서 광 디스크의 고밀도 기록 재생을 위해 짧은 파장의 LD(Laser Diode)를 채용하고 광 디스크의 깊이에 따른 대물렌즈의 개발과 안정된 서보 신호를 검출하기 위한 광학적 구성 등 난이도가 높은 장치이다. 이를 위해 온도 변화에 안정되고 기록을 위해 고 파워에 신뢰성있는 LD의 개발이 필수적이다.

⑤ 기록규격

CD 기록/재생기를 비롯하여 각 DVD계 기록/재생기들은 사용하는 기록용 미디어의 특성에 맞는 기록규격을 적용하여 보다 안정된 기록 재생을 추구하고 있다. 이는 드라이브의 기록 알고리즘 외에 기록 미디어의 특성 연구 및 기록시 제어기술이 복합적으로 적용되어야 한다.

⑥ 호환성

앞에서도 언급된 바 있지만 역방향 호환성(compatibility) 확보 그리고 드라이브 상호간 호환성 확보, 그리고 PC 주변기기인 경우에 있어서는 각종의 PC에 안정된 호환성을 갖을 필요가 있다.

⑦ 복사방지

소프트 및 각종 콘텐츠의 무단 복제를 방지하는 것은 정보화시대에 있어서 당연한 일이다. 보다 효율적이고 강력한 복제방지 방법이 필요한 것이다.

초소형 광 정보저장 장치의 동향

현재 대용량의 정보 저장 능력을

요구하는 휴대용 전자기기로는 디지털 카메라 또는 디지털 캠코더가 대표적인 제품이다. 현재는 플래시 메모리를 사용하여 32 MB 기준으로 140 장 정도의 고화질 영상을 저장할 수 있는 수준이다. 그러나 플래시 메모리는 현재 MB 당 가격이 수 달러 수준으로서 대용량화에 따라 가격 부담이 커진다는 단점을 가지고 있다. 따라서 1,000 장 이상의 영상을 저장하는 전자앨범의 개념으로 사용하기에는 적절치 않고 이를 대체할 수 있는 저가형 초소형 고밀도 저장장치의 출현이 필연적이라고 볼 수 있다. 나아가 디지털 캠코더 또는 동영상의 데이터를 전송하거나 다운로드 등의 저장장치의 필요성이 절실히 대두되고 있다. 이러한 제품의 저장장치로 응용하기 위해서는 수 GB 급의 대용량의 저장능력을 지니면서, 카트리지에 내장된 광디스크 형태로 착탈이 가능하고 가격도 저렴한 초소형 광 저장장치에 대한 필요성이 점차 제품화로서 가시화되고 있다. 최근 국가적 주요 전략품목으로 선정되어 있는 IMT2000 등 이동식 통신단말기 내장표준을 목적으로 하는 초소형 저장장치 제품으로서 화상정보의 대용량 저장 및 인터넷(internet) 정보 내려받기(download) 보관 및 전송에 그 필요성이 더해지고 있는 실정이다.

기술동향

동화상의 정보가 기록되는 디지털 카메라 등에서는 고화질 정보의 기록을 위해서 반도체 메모리

카드 또는 미니 디스크, 마이크로 하드 디스크 등을 이용하는 제품들이 개발되고 있으나 기록용량, 제품 크기의 한계 그리고 비싼 가격 등으로 인하여 그 실용화나 시장 확대에 다소 문제가 되고 있다. 2001년 2월 현재 이와 유사한 제품의 개념으로 IOMEGA 사의 CLIK 디스크, Sanyo의 ID-Photo, IBM의 Micro HDD 및 Dataplay 사의 광디스크 드라이브가 이미 출시 또는 곧 출시 예정으로 되어 있다. 그러나 1 GB까지 기록 가능한 IBM의 마이크로 하드디스크를 제외하고는 이러한 제품의 기록 용량이 수십~수백 MB 급에 불과하며, 더 이상 고밀도화는 기록방식이 바뀌지 않는 한 쉽지 않을 전망이다. 그리고 마이크로 하드디스크는 비록 용량이 1 GB까지 출시되고 있기는 하나, 하드 디스크의 고유의 특성상 광디스크와 같이 카트리지 형태로 디스크만의 배포가 불가능하여 데이터의 배포성 측면에는 매우 불리한 상황이다. 따라서 향후 IMT2000 등의 이동식 통신단말기에서는 현재의 광디스크처럼 열가형으로 디스크 배포가 가능하면서도, 이동식 통신기기에 탑재가 가능할 만큼 작은 사이즈이고, 용량도 동영상을 일정 시간 이상 기록할 수 있도록 수 GB급이 되는 초소형 광 정보저장장치에 대한 제품의 개발이 주요 이슈로 되고 있다.

초소형 정보저장 장치로서는 크게 다음과 같이 광 정보저장 장치와 경쟁관계에 있는 제품까지 포함하여 보면 네 가지로 구분할 수

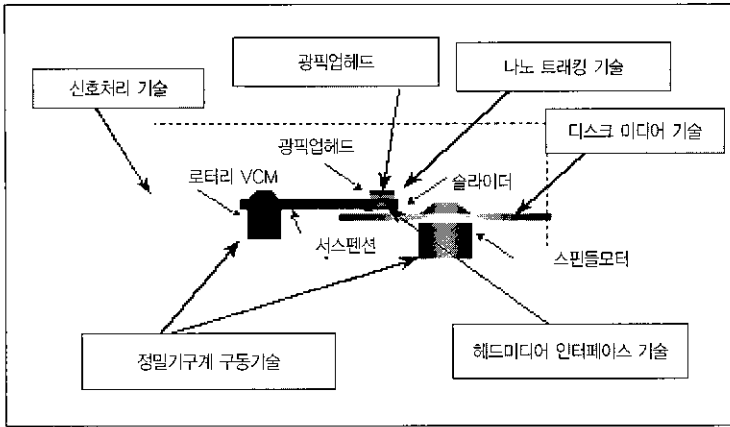


그림 2 근접장 광기록 방식의 초소형 정보저장장치의 주요기술

있다. 즉, 플래시 메모리, HDD, FDD(Zip), 광 정보저장 장치 등이다. 이 중 플래시 메모리는 반도체 메모리로서 임시 저장용의 성격이 강하므로 정보저장 장치에서는 제외하기로 한다. HDD나 FDD 등은 광 드라이브에 비해 각각 장단점이 있으나, 데이터 배포 측면에서 보면 광 정보저장 장치가 가장 큰 잠재력을 지니고 있다고 할 수 있다. 이는 현재의 CD-ROM, CD-RW가 싼 매체가격에 힘입어, 최근 수년 사이에 급속히 보급되어 고밀도 FDD 등을 대체시키고 현재 PC의 표준 정보저장 장치로 자리매김을 한 것으로도 잘 알 수 있다.

현재까지 시장에 출시되고 있는 광 및 자기기록 방식의(반도체 메모리 제외) 초소형 정보 저장장치의 제품 동향에 대해 살펴본다. 자기기록 방식의 초소형 정보저장장치는 초소형 광 정보저장장치의 강력한 경쟁제품으로 각각 장단점이 있어 향후 이동식 전자기기 등의 제품 적용에서 치열한 경쟁이 예상된다.

주요 기술개발 이슈 및 전망
초소형의 광 정보저장 장치에서

는 고밀도 광기록 기술이 앞으로 급속히 개발될 것으로 예상된다. 이를 위하여 다음과 같은 기술이 일본의 SONY 등 선진업체에서 개발되고 있으며, 국내에서는 LG 전자, 삼성전자 등이 근접장 광기록 기술의 개발에 박차를 가하고 있다.

- 초소형 통신 단말기용 광 정보저장 기술
 - 데이터 기록/재생의 안정성
 - 카드형의 초박형/최경량 구조
 - 저 소비전력
- 근접장 광학계 개발
- 미세 구동 및 트래킹 기술
- 초소형 MEMS 광픽업 헤드/미디어 기술

이들 기술 분류별로 보면 다음과 같은 기술개발이 필요하다.

- ① 광픽업 헤드 기술
 - * 근접광 광학소자 설계기술
 - * 고효율/저잡음 송광 설계기술
 - * 고감도/고속 수광소자 설계기술
 - * 고속탐색(seek)대응 초소형 헤드 설계기술
- ② 디스크 미디어 기술
 - * 고속/고감도/저잡음 매체/재료 설계기술
 - * 표면기록 대응 광학 윤활막 재료기술

- * 초정밀 기관 및 성막기술
- * 미디어 특성 평가기술
- ③ 나노 트래킹(Nano tracking) 기술
 - * 나노 트래킹 에러 신호 추출 기술
 - * 초정밀 고속 구동기 및 서보 기술
- ④ 헤드 미디어 인터페이스 기술
 - * 고질량 광학계 탑재용 헤드 슬라이더(head slider) 설계기술
 - * 근접거리 유지(Near-field gap) 기술
 - * 근접광헤드의 광특성 및 분석, 평가기술
 - * 공력구조 특성
- ⑤ 신호처리 기술
 - * 코딩/디코딩 기술
 - * 레이저 고속구동 기술
 - * 저전력 신호처리 기술
 - * ASIC 설계기술
- ⑥ 데크 메카니즘 기술
 - * 고속/초정밀 구동기술
 - * 반복 기록재생 신뢰성기술
 - * 착탈형 디스크 대응 기술
 - * 충격 및 오염 방지 기술
 - * 저전력 소모 디스크/헤드 구동 기술
 - * 초박형/초경량 설계기술

주사 탐침형 광 정보저장 장치의 동향

기술동향

1984년 IBM 주리히 연구소의 Durig, Pohl 등은 작은 개구(aperture)를 시료 표면에 근접시켜(1 ~ 100 nm) 빛의 파동성에 의한 회절현계를 넘어서 빛의 파장 이하의 분해능(빛의 파장의 수

십분의 1)을 얻을 수 있는 주사형 근접장광 현미경(NSOM : Near-field Scanning Optical Microscope)을 제안하였다. 그 후 1992년에 AT&T 벨 연구소의 Betzig는 이러한 주사형 근접장광 현미경의 원리를 이용하여 광자기(MO)기록막에 직경 60 nm의 자기 도메인을 기록함으로써 100 Gb/in² 이상의 광자기 초고밀도 메모리에의 가능성을 열었다. 이후 IBM의 Mamin, 아리조나 대학의 광학연구센터, 히타치의 Hosaka, SONY의 Ichimura, 가나가와 과학 아카데미의 Saeki 등이 근접장 응용 광메모리의 연구를 활발히 진행 중에 있다. Hosaka는 NSOM-MO 기록보다 검출신호가 2자리수 이상 큰 NSOM 상변화 기록을 제안, 기록재생 실험을 수행하였다. 장치는 반도체 레이저 조사계(파장 785 nm, 최대출력 50 mW), 미소개구를 갖는 광탐침, 매체 스캐너, 광검출계, 제어계 등으로 구성하였다. 반도체 레이저와 광탐침의 광결합을 위해 비구면 렌즈 두 개를 이용하였으며, 광탐침으로는 직경 약 50 nm의 미소개구를 갖도록 광파이버를 가공하여 사용하였다. 본 장치를 사용하여 Hosaka는 직경 60 nm의 정보비트를 기록재생함으로써 100 Gbits/in²급 초고밀도기록에의 가능성을 보여 주었다.

주요 기술개발 이슈 및 전망

주사 탐침형 광 정보저장 장치의 실용화에는 아직 해결하여야 할 문제가 산적해 있다. 이하에서는 그 중 기계공학적 측면에서 관심

있는 몇 가지 주요 연구개발 이슈에 국한하여 설명한다.

① 광 탐침 제작 기술

현재까지 주사 탐침형 광 저장 장치의 연구에 사용되고 있는 광 탐침은 주로 광 파이버를 이용하여 제작되고 있다. 즉, 탄산가스 레이저로 광 파이버를 국소가열하고 첨단부분을 잡아 늘임으로써 뾰족하게 만든 다음 금속막 코팅작업을 수행하여 수십 nm의 미소 개구를 형성하도록

제작한다. 그러나 이러한 광 파이버 탐침은 빛이 그 탐침 선단부에서 빛의 파장보다도 좁은 영역을 빠져나가야 하기 때문에 빛이 미소개구에 도달할 때까지 상당한 손실이 발생하는 문제점이 있다. 기존 광 파이버 탐침의 광 전달효율은 약 10⁻⁵ 정도로 저장 장치의 실용화에 가장 큰 장애물이 되고 있다. 이를 해결하고자 현재 세계 여러 연구기관에서 광 탐침의 전달효율을 높이기 위한 연구가 진행 중에 있다. Islam 등은 피펫 플라스틱법으로 탐침선단을 첨예하게 한 뒤 화학 에칭으로 선단의 꼭대기각을 15~60°로 가공하는 방법을 제안하였다. 미소 개구경 40~80 nm를 갖는 광 탐침을

제작, 실험한 결과 빛의 전달효율을 10⁻²~10⁻³까지 높이고 있다. 빛의 전달 효율을 더욱 높이기 위한 방법으로 Yatsui 등은 비대칭 탐침을 제안하고 있다. 이 방법은 화학 에칭한 대칭형 탐침 코어의 클래드(clad)의 돌출 부분을 FIB

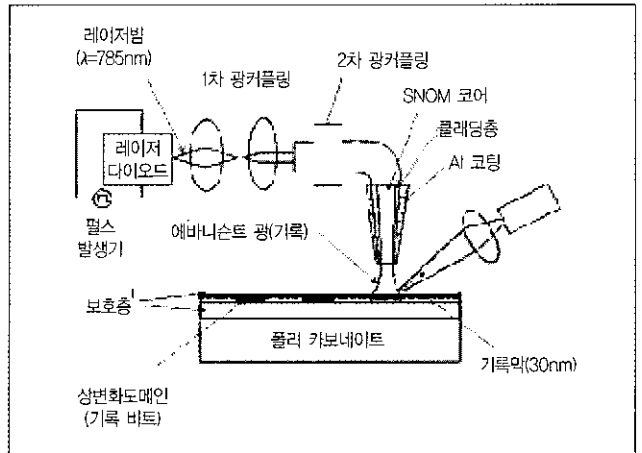


그림 3 반도체 레이저를 이용한 NSOM 상변화 기록장치(Hosaka, etc.)

(Focused Ion Beam) 가공법으로 잘라내어 비대칭 탐침을 형성하는 방법이다. 실험에 의하면 대칭형에 비해 빛의 전달 효율이 약 10 배 향상된다고 한다. 한편, 최근들어 MEMS 기술을 이용한 외팔보 형태의 광 탐침을 제작하고자 하는 시도가 이루어 지고 있다. 실리콘 미세 가공기술에 의해 형성된 외팔보형 탐침은 탐침 첨단부의 각도를 크게 형성할 수 있을 뿐만 아니라 배치 프로세스에 의한 대량생산이 가능하다는 장점이 있다.

② 헤드와 매체간 간격제어 기술 고밀도의 광기록을 수행하기 위해서는 광탐침 첨단부와 매체간의 거리를 근접장 거리(약 10 nm)로 일정하게 유지하여야 한다. 광 파

이러한 탐침의 경우 통상 NSOM에서 사용되고 있는 전단력(shear force)을 이용한 거리 검출법이 사용되고 있다. 즉 광 탐침을 지탱하는 부분에 디더피에조(dither-piezo)라 불리는 가진소자를 부착하여 탐침을 매체와 수평방향으로 진동을 가하고 이 진동수의 변화를 탐침과 매체간 간격제어에 사용하고 있다. 이 방법의 경우 장치가 bulky해지고 제어가 복잡한 단점이 있다. 한편 MEMS 기술을 이용한 외팔보형 광 탐침의 경우 SPM에서 사용하는 기술을 그대로 이용할 수 있다. 광탐침 선단과 매체간 거리는 외팔보와 대한 전극간 정전 용량의 변화를 측정하거나 광학레버(optical lever)를 이용한 측정방식 등이 개발되고 있다. 실용적 측면에서 살펴보면 상기한 능동적 간격제어를 수행하지 않고 수동적으로 간격을 일정하게 유지할 수 있으면 가장 바람직하다. 이를 위해 유체기술을 이용하여 안정부상을 수행할 수 있는 공기 축반이 방식에 대한 연구가 진행 중에 있다. 즉 부상기능과 근접장 광 탐침기능을 갖는 부상 슬라이더를 이용하고 있다.

③ 기록재생 속도

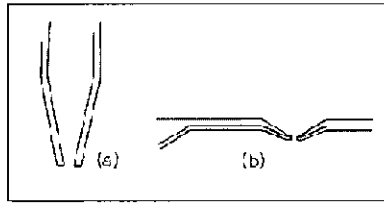


그림 4 광 탐침: 광 파이버형(좌)과 외팔보형(우)

데이터의 재생시 검출되는 광량, 즉 단위 비트당 검출 광자(photon)의 수는 데이터의 고속 읽기에 직접적으로 관계가 있다. 검출광량을 증가시키기 위해서는 미소개수의 전달효율의 향상 및 검출방식의 개량 등이 필요하다. 고속회는 레이저의 최대 발진 주파수에도 영향을 받는데 최근 주파수 한계를 극복하고자 반도체 레이저를 어레이로 제작하여 사용하는 VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 어레이에 대한 연구가 제안되어 있다. 한편, 현재의 CD, DVD와 같이 매체를 회전시키면서 읽기, 쓰기를 수행할 경우 광탐침은 매체의 고속회전에 따른 진동을 보상, 데이터 트랙을 정밀하게 추종하여야 한다. 기록재생 속도를 향상시키기 위한 또 하나의 방법으로 MEMS 기술을 이용하여 다중 탐침 어레이(multi-probe array)를 제작하고 각 광탐침으로부터의 신호를

병렬처리하는 방법도 제안되고 있다.

맺음말

근접장 광학기술을 이용한 광메모리 기술로서 성취할 수 있는 실용적인 면 기록 밀도는 대략 100 Gb/in² 급으로 예측되고 있다. 향후 회절한계 극복을 통한 고밀도화 기술은 SIL(Solid Immersion Lens)기술을 이용한 제1세대 제품이 출시될 전망이다. 미래형 기술로서 회절한계를 초월한 광기술의 실용화, 기능 고도화를 위하여는 MEMS 기술에 바탕을 둔 초소형 복합 광학계(Integrated hybrid optics) 설계 및 제작 기술 등 미래산업 핵심기술과의 기술융합이 필요하게 되므로 이에 따른 아이디어 창출과 개발 역량 배양을 위한 노력이 절실히 요구된다고 할 수 있다. 또한 국가적 차원에서도 신기술에 의한 산업 재산권 확보 및 시장 개척을 전략적으로 지원 및 추진해야 할 분야로 기대되며, 관련 분야의 종사자들의 보다 진일보한 연구 협력과 분발을 기대해 본다.

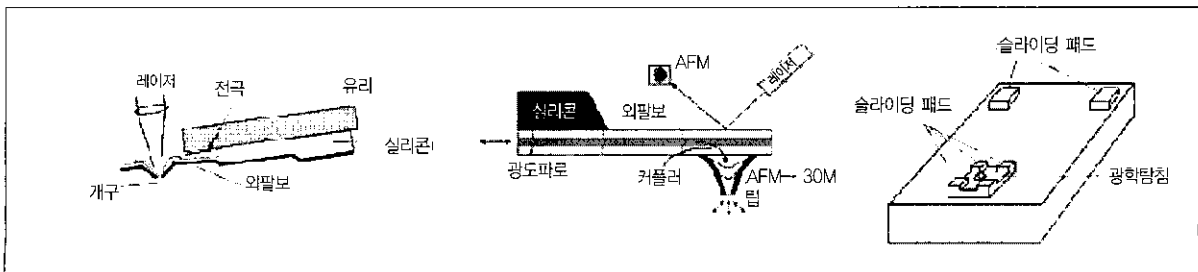


그림 5 헤드와 매체간 간격 제어 : 정전용량 검출방식(좌), 광학레버 방식(중), 공기부상형(우)