

1Tb/in²의 정보저장을 위한 MEMS/NEMS 기술

이 동 원

전남대학교 기계시스템공학부
mems@chonnam.chonnam.ac.kr

일반적으로 정보 저장장치라고 하면 컴퓨터의 하드 디스크나 음악을 듣기 위해 이용되는 콤팩트디스크(compact disk- read only memory, CD-ROM)를 생각하게 된다. 1956년 미국 캘리포니아주의 산호세에 위치한 IBM의 한 연구소에서 자성체를 이용한 정보저장장치(hard disk, HD) RAMAC 이 처음 개발된 이래 지난 50년간 HD는 매년 60~100%의 저장용량의 능력을 증가시키며 컴퓨터 산업과 더불어 눈부시게 성장해 오고 있다. 개발 초기의 HD는 대형 냉장고 두대 정도의 크기에 무게만 해도 2톤에 도달하는 거대한 기억 보조장치였으나 정보의 저장용량은 불과 4 MB, 가격은 무려 미화 35,000불 이었다. 1990년대에 들어 오면서 고기능의 컴퓨터와 초고속 인터넷 산업의 눈부신 발전에 힘입어 HD는 용량 증가와는 반대로 가격은 현저하게 감소하게 되었다. Fig. 1에서 보여지는 것과 같이 오늘날의 HD는 손바닥 정도의 크기에 약 100GB 이상의 정보를 저장하며 약 미화 150불 미만에서 가격대를 형성하고 있다. 참고로 1B는 8bits (bit: 정보의 최소단위이며 0 또는 1의 정보를 가지고 있다) 이며 한글 한자를 위해서는 2B 그리고 영문한자를 위해서는 1B의 공간이 필요하다. 저장 용량과 관련해서 좀 더 쉬운 이해를 위해 부가 설명을 하면 CD-ROM은 700MB의 정보를 저장하며 1GB (=1,000MB)는 CD음질의 MP3오디오 파일을 약 12시간 저장할 수 있다. 그리고 100GB로는 1800장의 디지털 사진, 4시간짜리 디지털 영화, 40시간 MP3 음악, 15개의 게임 그리고 25개의 응용프로그램을 동시에 저장할 수 있다.

가장 최근의 HD 개발소식에 의하면 새로운 용량의

HD가 상품으로 나오기 위해 화물 컨테이너에 실리는 순간 또 다른 고용량의 HD 상품이 개발되어 상품화를 준비하고 있는것이 오늘날의 HD의 개발 속도이다. 하지만 이런 속도로의 개발이 언제까지나 계속해서 될 수 없다고 많은 연구자들은 오래전부터 예상하고 있다.

1990년대 IBM은 슈퍼파라마그네틱 효과로 불리우는 자성체의 초상자성효과(한 bit 가 일정크기 이하로 되었을때 그 자성체의 자화방향은 온도와 같은 외부의 영향에 의해 쉽게 잃어버리는 현상)에 의해 HD에서 저장능력의 물리적 한계는 약 100 Gb/in²에서 나타날 것이라

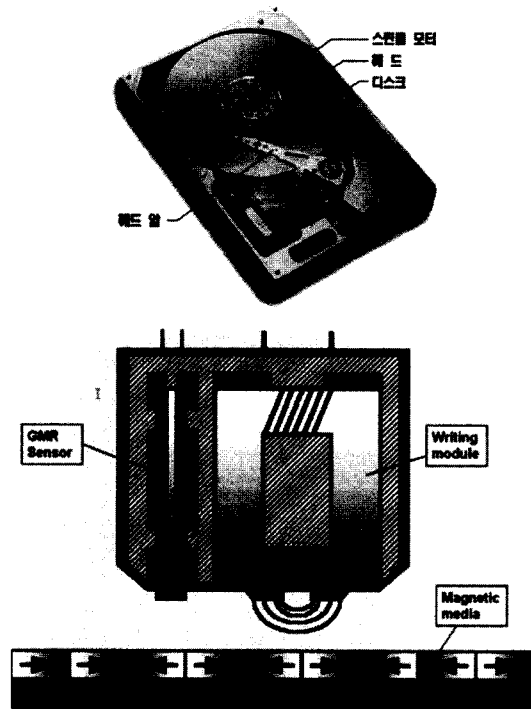


Fig. 1. 하드디스크(hard disk)의 내부와 헤드의 구조



고 발표하였다. 다시 말하면 2004년 현재 컴퓨터 시장에 나오고 있는 HD의 상품은 그 용량면에서는 거의 물리적 한계 까지 도달하고 있다고 말해도 과언은 아니다. 기존의 HD방법으로 물리적 한계를 넘어서기 위해서는 고용량의 정보저장을 위해서는 새로운 미디어와 수십nm 크기의 비트 사이즈를 인식할 수 있는 고감도 자기센서를 가진 헤드 등의 개발이 필수적이다. 1990년대 중반부터 IBM을 비롯해서 일본의 많은 기업체 연구소에서는 HD의 용량을 더욱 더 증가 시키기 위해 수직자화 방식과 초미세 공정을 이용하여 미디어에 패턴을 하는 방법등의 미디어 개발과 더불어 GMR(Giant Magnetic Resistance) 과 TMR (Tunneling Magnetic Resistance)과 같은 고감도 헤드의 개발에 더욱 더 박차를 가하기 시작하였다. 한 예로서 최근 일본의 한 기업체에 의해 기존의 미디어에 개선된 헤드를 이용하여 100Gb/in²의 고용량이 연구실 수준에서 증명되었고 또 이 헤드를 이용한 HD의 물리적 한계는 300Gb/in²에서 나타날 것이라고 발표하였다. 하지만 이러한 새로운 기술의 적용에도 불구하고 지난 50년 이상 지속되어온 HD 기술은 그 저장용량면에서 머지않아 물리적 한계에 도달하지 않을까하고 예상된다.

Fig. 2에서 보여지는 것과 같이 HD 이외에도 디지털 정보저장장치 시장에서는 음악용으로 가장 많이 사용되고 있는 CD-ROM, CD-R(record), 컴퓨터에서 정보저장

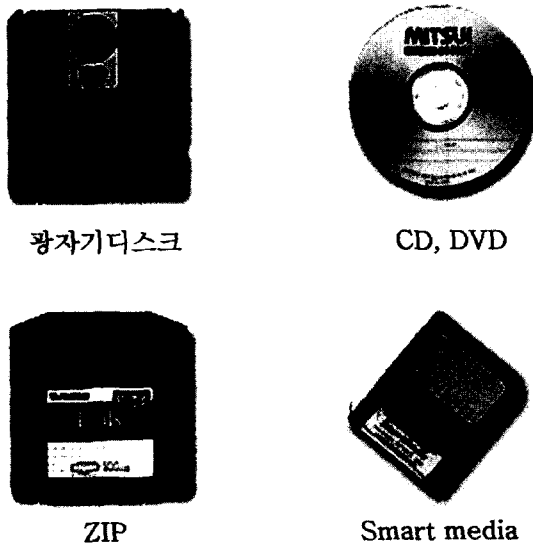


Fig. 2. 정보저장장치의 종류.

용으로 많이 이용되는 광자기 디스크(magneto-optical disk, MO), CD-RW(rewritable), 고화질 영화의 저장장치로 이용되고 있는 digital video display(DVD)-ROM 그리고 -RAM, DVD-RW, 그리고 휴대폰, 디지털 카메라 등과 같은 휴대용 기기의 저장장치로 이용되는 플래쉬 메모리 등이 있다. 이들 저장장치를 나누는 방법에는 여러가지가 있지만 먼저 크게 정보의 저장을 위해서 전원이 필요한 장치와 필요없는 장치 그리고 사용자가 기록할 수 없는 장치, 한번만 기록이 가능한 장치 그리고 여러번 기록이 가능한 장치 등으로 나누어지게 되며 이들 장치는 기록방법에 따라 다시 세부적으로 나누어지게 된다.

먼저 CD-ROM은 미디어 직경이 12cm 에 두께가 1.2mm의 원형으로 생긴 플라스틱 기판에 가열된 프레스를 이용하여 신문을 인쇄하듯이 찍으므로 정보를 저장하는것이 가능하고 780 nm의 파장을 가진 적외선 레이저로 빛을 미디어 표면에 조사한 후 반사되어 나오는 빛의 감도를 판단하므로 저장된 정보를 읽는 것이 가능하다. 이 기술의 장점은 무엇보다도 대량생산이 쉽게 가능하다는 점과 미디어만 들고 다니면 언제 어디서나 정보를 읽을 수 있다는 장점이 있지만 비트의 최소 크기가 빛의 회절한계에 의해 수백 나노미터로 제한된다는 단점이 있다. 오늘날에는 읽기만 가능하다는 또 하나의 단점을 보완하기 위해 높은 파워를 가진 레이저로 미디어의 표면을 선택적으로 녹이는 것을 가능하게 하였으며 각각의 가정에서도 원하는 정보를 개인용 컴퓨터로부터 미디어로 한번 기록하는 것이 가능하다 (CD-R).

Fig. 3과 같이 MO의 경우는 광(레이저)과 자기를 동시에 이용하는 방법이다. 미디어는 하드디스크와 같은 자성체로 구성되어 있으나 단 자화의 방향은 하드디스크와는 다르게 미디어의 표면에서 수직방향이다. 먼저 기록을 쉽게하기 위해 레이저를 이용하여 미디어로 이용되는 자성체를 그 물질의 큐리 온도까지 가열하고 높은 온도로 인해 자성체가 그 자성을 잃었을때 외부에서 자기헤드로 자화의 방향을 결정시킴과 동시에 냉각하므로 정보의 기록이 가능하다. HD와는 다르게 기록된 정보를 읽기 위해서는 레이저만을 이용하며 자기의 방향에 따라 빛의 편광면이 회전하는 Kerr 효과라는 것을 이용하

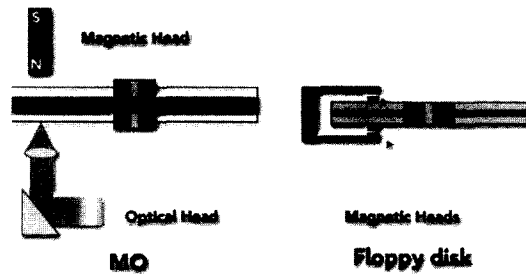


Fig. 3. MO와 기존의 플로피 디스크와의 차이점.

므로 재생이 가능하다. 기존의 콤팩트 디스크에 비해 기록, 삭제, 그리고 재생이 가능하지만 두개의 헤드를 이용하므로 가격이 비싸다는 단점이 있다.

CD-R에서 저장된 정보의 삭제가 불가능하다는 단점을 보완하기 위해 CD-RW라는 새로운 미디어가 일본에서 다시 개발되었다. CD-RW에 이용되는 미디어는 상변화 재료(phase change materials)라는 것을 이용하며, 상변화 재료의 결정구조는 가열하는 온도와 냉각속도에 따라 크리스탈과 아몰포스 상태로 존재하게 된다. 저장된 정보를 읽기 위해서는 빛을 표면에 조사후 결정 구조에 따라 빛의 반사도는 달라지는 것을 이용하게 된다. 즉 일반유리와 크리스탈로 만들어진 제품에서 나오는 빛 반사 차이를 사람의 눈으로 느끼는 원리와 같은 것을 이용한다.

오늘날 레이저를 이용하는 저장장치에서의 가장 큰 문제점은 실제 그 파장의 이하 크기의 비트를 만들기 어렵다는 것에 있다. 이러한 단점은 빛의 회절현상의 물리적 한계로 인하여 나타나며 이 현상은 광을 이용한 정보 저장장치에서 저장용량의 한계로 이어진다. 즉 사용되어지는 레이저의 파장은 그 저장장치의 용량을 결정한다는 이야기가 된다. 현재 시장에 나오고 있는 DVD의 경우 635 ~ 650 nm의 파장을 가진 적색광을 이용하므로 최소 400 nm 정도의 비트를 만드는 것이 가능하며 CD와 같은 면적에 약 6배 이상의 정보를 저장하는 것이 가능하다. 그리고 비트의 크기를 더욱 더 줄이기 위해 적색광보다 더 낮은 파장을 가진 청색레이저 (405 nm)에 관하여서도 많은 기업체에서 2003년 양산화를 위하여 박차를 가하였고 현재 소니에서 Blu-ray라는 이름으로 양산을 시도하였지만 다른 미디어에 비해 상대적으로 가격이 너무 비싸다는게 단점이다. 또 기술적인 측면에서의 어려운 점으로는 상변화재료에서 물질의 상태를 바꾸기 위

해 일정 (30mW) 이상의 고출력이 요구되어지는데 현재 기술로는 고출력을 가진 청색광 반도체 레이저를 만드는 것이 쉽지않다.

기존의 HD 방식과 더불어 완전히 새로운 개념의 정보 저장장치의 개발도 많은 기업체에서 연구되어 오고 있으며 이는 크게 두가지 방식으로 나누어 진다. 그 첫번째 방법이 인간의 꿈으로 불리어 왔던 시스템, 원자 현미경, 주사탐침현미경 (scanning probe microscope, SPM)을 이용하는 방법이다. 1981년 IBM Zurich Research Laboratory에서 연구원으로 있던 G. K. Binnig등에 의해 발명되었으며 동작원리는 Fig. 4와 같다. 먼저 주어진 샘플 위에서 10 nm정도의 직경을 가진 텅스텐 바늘이 샘플과의 거리를 1 nm이하로 일정하게 유지하기 위해 두 전극간의 진공 터널링 전류를 측정하면서 바늘을 상하로 움직이는 방법이었다. 그리고 그 바늘의 상하 움직임은 이동 거리와 함께 컴퓨터를 이용해서 3차원적으로 나타내는 것이 가능하며 실제 한 동안 논란이 되어 왔던 실리콘 <111>면의 원자 구조를 아주 깨끗하게 영상화 하였다. 그 후 이 방법은 더욱 더 발전하게 되어 각각의 원자를 관찰하는 것 뿐만 아니라 고체샘플 표면에서 원하는 원자를 원하는 장소로 이동하는 것을 가능하게 만들었다. 즉 원자의 이동 그리고 존재 유무를 판단하므로 정보 저장 시스템에서 궁극적인 목표인 하나의 원자를 디지털 정보의 최소 단위인 비트로 이용하는 것을 현실화 하였다. 이는 주어진 면적에서 기존의 정보 저장장치보다 수 백만배 이상 저장 가능하다는 것을 증명하는 계기가 되었으나 실제로는 상온에서의 원자상태의 불안정성과 원자

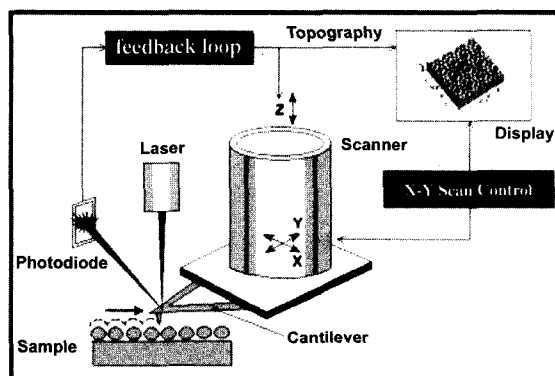


Fig. 4. 주사탐침현미경(scanning probe microscope)의 구조.

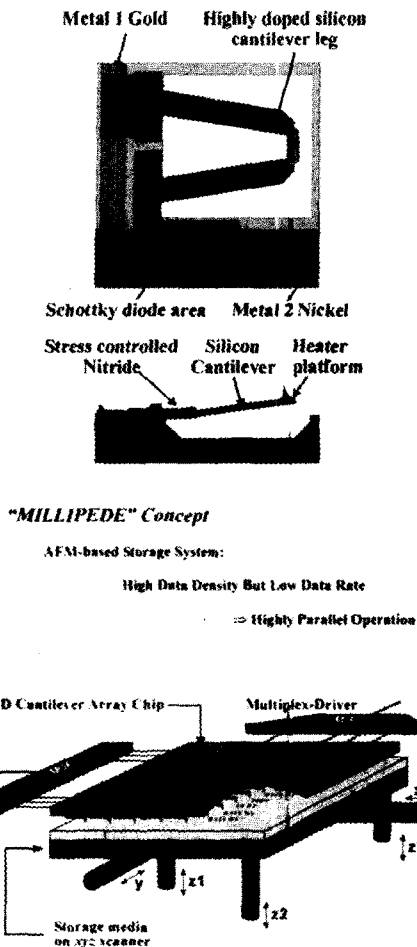


Fig. 5. 기록헤드로 이용되는 바늘의 구조와 저장장치의 개념.

의 이동을 위해 극저온을 유지해야 한다는 어려움 그리고 원자의 이동을 위해 많은 시간이 요구된다는 단점으로 인해 현재기술 그대로 원자를 하나의 비트로 이용하기는 어렵다. 그러나 그 기술을 응용하여 현재사람 머리카락 60가닥 크기의 단면적에 CD정도 분량의 정보를 저장하는 방법론, 즉 Fig. 5에 보여지는 것과 같이 밀리페드(Millipede)로 불리는 초소형 고용량 정보저장장치가 1995년 IBM Zurich Research Laboratory에서 맵스/넵스(Micro/Nano Electro Mechanical System) 기술을 기초로 하여 처음으로 차세대 정보저장장치에 관하여 연구가 시작되었으며 1990년말에는 병렬 캔틸레버 어레이의 상용화 가능성에 대하여 실험적으로 증명하였다. 현재는 수년내 상용화를 목표로 연구 개발에 더욱 더 박차를 가하고 있다.

'Millipede'를 사전에서 찾아보면 '노래기'라고 풀이

되어 있다. 다리가 많아 백족충이라고도 불리며 다족류를 일컫는 말이기도 하다. Fig. 5를 보면 수천 개의 AFM(atomic force microscope) 팁(tip)들에서 수 많은 다리를 가진 곤충의 이미지를 바로 연상시킬 수 있다. 밀리페드는 자기적 혹은 전기적 수단을 이용하는 전통적인 방법들 대신에 나노 크기의 뾰족한 팁을 이용해서 얇은 플라스틱 박막위에 각각의 비트를 나타내는 작은 구멍들을 만들어서 정보를 저장하고 읽어 들인다. 이것은 마치 백여 년 전의 '천공카드'의 나노버전(nanotech version)과도 같다. 차이점이 있다면, 밀리페드 기술은 re-writable해서 읽고 쓰기를 계속 반복 할 수 있다는 것과, 예전의 천공카드에 쓰인 구멍만한 크기에 삼십억 개 이상의 bit를 저장 할 수 있을 것이라는 점이다.

현재 상업화를 위한 Millipede의 목표는 우표 사이즈 크기의 디바이스에 5GB (CD 8장 분량)이며 전력소모는 기존의 HD의 100분의 1정도이다. 궁극적으로 PDA, 디지털 카메라등의 휴대용 기기의 사용에 적합하게 하기 위해 플래쉬 메모리(flash memory)와 같은 수준의 전력소모를 목표로 하고 있다.

밀리페드의 정보저장 방법론에 있어 좀 더 쉬운 이해를 구하기 위해서는 과거 블랙디스크로 불리는 턴테이블을 생각하면 된다. 미디어로는 검정색의 두꺼운 레코드판을 대신하여 약 50 nm 두께의 PMMA라는 부드러운 폴리머가 사각 기판위에 코팅되고 있고 폴리머 아래에는 팁의 마모를 줄이기 위해 SU-8이라는 포토 레지스트가 다시 코팅되어 있다. 헤드로 이용되는 바늘 모양의 팁 끝부분은 400도 이상에서 부분적으로 가열하는 것이 가능하며 가열직 후 실온까지의 냉각을 위해 걸리는 시간은 불과 1μsec 미만이다. 그리고 팁 끝의 직경은 가능한 작은 사이즈의 비트를 만들기 위해 제작 되었으며 현재 가능한 팁 사이즈는 원자 50개 정도의 크기 즉 10 nm 정도이다. 먼저 기록을 위해서는 팁이 미디어 위에 완전히 접촉이 되고 난 후 전류를 흘려 팁을 가열하므로 미디어 위에서 선택적으로 열을 인가하고 그 열에 의해 미디어 표면에서 내부로 약 10nm정도의 구멍을 만드는 것이 가능하다. 그 구멍의 구조는 화산의 분화구와 같은 모양을 지니며 만들어진 구멍은 1 또는 0의 디지털 정보로 이용된다. 만들어진 구멍의 위치 정보를 읽기 위해 팁은

미디어에 영향을 주지 않을 낮은 온도(약 300도)로 가열하고 그 다음 텀의 전기적 저항은 계속해서 측정된다. 바늘이 미디어의 표면을 여행하다가 텀 끝부분이 구멍이 있는 곳에 들어가게 되었을때 순간적으로 텀의 온도는 미디어와의 거리 감소로 인해 내려가게 되고 이로 인해 바늘의 저항값이 변화하게 된다. 그 저항값의 변화는 상업용 정보 저장장치로서의 비트신호로 응용하기에 충분할 정도이다. 기록된 정보의 삭제를 위해서는 형성된 비트의 도너스형 가장 자리의 두 부분을 적당한 온도에서 가열하므로 선택적으로 지우는 것이 가능하며 현재로는 1,000번이상의 재기록이 가능하다는 것을 실험적으로 증명하였다.

Fig. 6은 상용화를 위해 연구가 진행중인 밀리페드의 내부 구조와 실험결과를 보여준다. MEMS/NEMS 기술의 발달과 더불어 캔틸레버의 구조에서 상당부분 변형되었으나 정보저장 장치로서의 근본적인 개념은 같으며 현재 실험실 수준에서 싱글레버를 가지고 기록할 경우

저장가능한 용량은 2Tb/in²이다. 구조 등에 대한 좀 더 자세한 기술적인 설명은 생략하고자 한다.

마지막으로 이렇게 빠른 속도로 진행되고 있는 정보저장장치의 용량과 그 시스템의 크기와 관련된 연구가 과연 어디까지 필요한가에 관하여 한번쯤 생각해 보아야 할 것 같다. 이 글의 시작부분에서도 언급되었듯이 처음 HD가 개발되었을때 냉장고 두 대 분량의 크기에 그 용량은 불과 4 MB 이었으나 오늘날의 HD는 성인 손바닥 정도의 크기에 저장용량은 개발초기의 10,000배 이상을 저장하고 있다. 그리고 현재 각각의 개인용 컴퓨터들도 수십GB이상의 HD 용량은 기본적으로 가지고 있다. 이는 불과 10년전만 생각해도 엄청난 발전이 아닐 수 없다. 그럼 이렇게 많은 용량을 가진 저장장치를 과연 어디에 사용할까 하고 생각하는 궁금증을 가지지 않을 수 없다. 일반적으로 컴퓨터의 멀티미디어 응용은 좋은 음질의 음악이나 좋은 화질의 영화를 만들어 내기 위해 더 높은 메모리의 용량과 더 높은 시스템의 성능을 요구한다. 비록 압축된 파일일지라도 MP3 한국을 위해서는 약 4 MB의 용량을 요구하고 디지털 영화 한편은 약 10GB에 가까운 정보의 용량을 가지긴 하지만 이것도 MPEG-4 기술로 압축하면 1GB로 줄일 수 있다. 가장 최근의 마이크로소프트 동작 시스템인 윈도우 XP의 경우 그 이전의 버전에 비해 약 3배에 가까운 용량을 요구하며, 일반적으로 동작 시스템(OS), 마이크로 소프트웨어 오피스, 그리고 네스케이프를 포함해서 요구되어지는 용량은 불과 2.5GB 정도에 불과하며 이는 HD전체용량의 10%에도 미치지 않는다. 물론 디지털 방송이 완벽하게 시작되고 모든 방송을 컴퓨터 속으로 기억시켜야 한다면 별개의 문제가 되겠지만 이는 방송국에서 해야 하는 일이라고 여겨지며, 고품질의 좋은 영상을 방송국에서 무료로 보급하지는 않으리라 생각된다. 그럼에도 불구하고 왜 고용량의 정보저장장치를 요구하게 될까? 100GB의 용량이면 CD음질 수준의 음악을 약 2만곡이나 넣을수가 있으며 이를 시간으로 환산하면 30일동안 아무것도 하지 않고 음악만 들어야 하며, 선명한 화질을 가진 사진을 100만장 이상 넣을수 있는 분량인데 과연 그 이상의 용량이 필요할까라고 다시 의문을 가져본다. 디지털 산업의 발전 그리고 초고속 인터넷의 대중화와 더불어 오고 있는 개인용 휴대 통

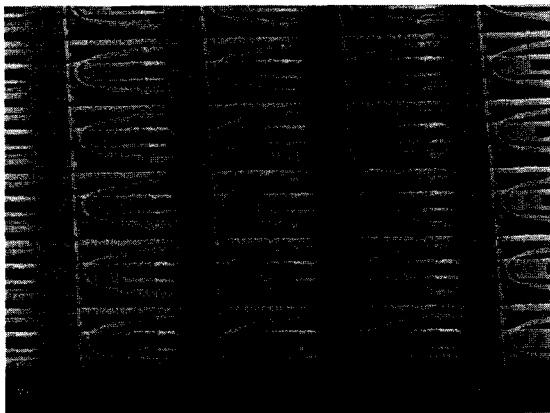
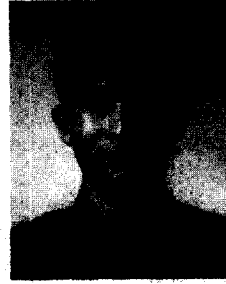


Fig. 6. 멤스/넴스 기술에 의해 제작된 밀리페드의 내부 구조와 여러 수정 코딩기술에 의해 복원된 디지털 이미지.



신을 위한 저장장치의 소형화는 필수이지만 이는 고용량 HD의 개발과는 별개의 문제가 되리라고 본다.

새로운 정보저장장치 개발자의 입장에서 일반인이 필요한 용량이 과연 어디까지 일까 가끔 고민도 하여 보지만 쉬운 해답을 얻지는 못하고 있다. 이미 예견된 일이 있는지도 모르지만 오늘날 HD의 용도는 개발의 초기 목적과는 조금 다르게 사용자들의 요구에 따라 조금씩 변형되어 왔으며 영화나 게임산업의 발전과 더불어 고화질 영상의 저장 매체 그리고 고음질 음악을 저장하기 위한 수단으로서 그 큰 용량이 채워지고 있는게 현실이다.



이 동 원

- 2001년 일본 동북대학 기계전자공학과 MEMS/NEMS 전공(박사)
- 2001년 일본 동북대학 공과대학 강사
- 2001년 IBM Zurich Research Laboratory (Post Doc.)
- 2004년 전남대학교 공과대학 ~현재 기계시스템공학부 조교수