

◆특집◆ 초정밀 생산공정에서의 청정환경제어기술

# 정보저장기기 Nano-Contamination

이대영\*, 황정호\*, 좌성훈\*\*

## Nano-Contamination in Information Storage Device

Dae-Young Lee\*, Jungho Hwang\* and Sung-Hoon Choa\*\*

**Key Words :** Information storage device (정보저장기기), Hard disk drive (하드 디스크 드라이브), Particle contamination (입자 오염)

### 1. 서론

정보저장기기는 자료를 저장하고 읽어내도록 하는 기억장치의 하나이다. 처음 정보저장기기는 컴퓨터에 관련된 몇몇 분야에만 국한되어 사용되었다. 하지만 최근에는 컴퓨터 분야 외에도 냉장고, HDTV 등의 가전분야에서, 휴대폰, PDA 등의 통신분야, 산업계, 멀티미디어분야에 이르기까지 매우 다양하게 사용되고 있다. 이렇게 정보저장기기의 적용분야가 넓어짐에 따라 시장에서의 중요성 또한 증가하고 있는데 정보저장기기의 세계시장규모는 2002년 현재 510억 달러에서 2010년에는 약 2040억 달러로 크게 늘어날 것으로 예상되며 이러한 정보저장기기의 기술은 첨단 기술이 집약되어 있어 반도체와 신호처리, 정밀기계 부문에 미치는 기술 파급효과도 매우 클 것으로 전망된다.

현재 이런 정보 저장기기의 종류에는 Fig. 1 같이 기록 및 재생방식에 따라 자기형, 광 기록형,

반도체 메모리 그리고 자기형과 광 기록형의 혼합형으로 나눌 수 있다. 자기형 정보저장기기로는 Hard disk drive, Floppy disk drive, Magnetic tape 등이 있으며, 광 기록형 정보저장기기로는 CD-ROM, CD-R, CD-RW, DVD-ROM, DVD-RW, DVD-RAM 등 매우 다양하게 있으며 반도체 메모리로는 Dynamic RAM, Static RAM, Flash RAM 등이 있다.

현재 정보저장기기는 소형화, 고용량화, 고속화되고 있으며 이러한 기술적 추세는 향후에도 계속될 전망이다. 따라서 기술 또한 매우 정밀화되어 가고 있는데 Fig. 2는 정보저장기기의 정밀도를 머리카락과 비교해 본 것으로 정보를 저장하기 위한 디스크의 트랙간의 간격이 머리카락 지름의

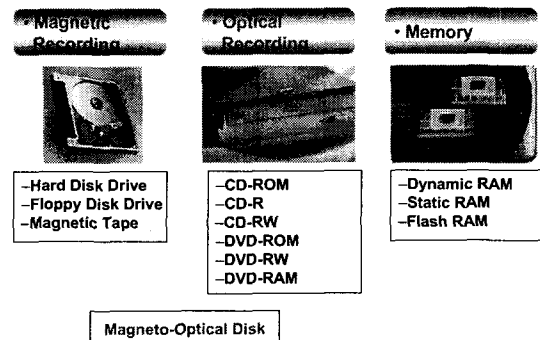


Fig. 1 Typical information storage device

\* 연세대학교 기계공학부

Tel. 02-2123-4679, Fax. 02-312-2159

Email hwangjh@yonsei.ac.kr

정보저장기기 특히, 기기내의 입자에 의한 오염과 저감을 위한 기술 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

\*\* 삼성 종합 기술원

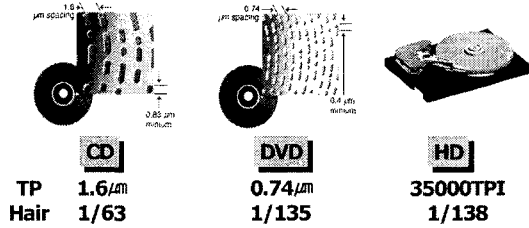


Fig. 2 Dimension comparison

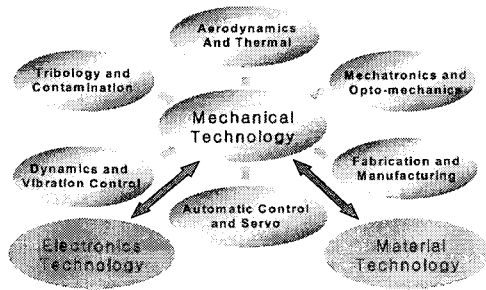


Fig. 3 Mechanical areas of storage technology

최고 1/138 에 불과할 정도로 소형화, 고용량화 그리고 정밀해지고 있다. 이런 정보저장기기의 개발을 위해서는 다양한 첨단 기술이 요구되고 있는데 Fig. 3 과 같이 기계, 전자, 재료 기술을 기반으로 자동제어, 신호처리, 제조공정, 광학, 마찰 그리고 유체 등의 다양한 기술이 요구되고 있다. 이러한 기술은 현재 정보저장기기의 개발추세에 따라 더욱더 중요해 질 것으로 예상된다.

## 2. 자기형 정보저장기기 내에서의 나노 입자 오염

### 2.1 자기형 정보저장기기

1957년 IBM 에서 50 장의 24 인치 디스크로 구성된 5 MB 용량의 HDD 가 처음으로 생산되었지만 높은 가격과 방대한 크기 때문에 메인 프레임에서 주로 사용되었다. 1980년대 이후 PC 의 보급으로 소형 및 저가의 HDD 에 대한 수요가 증가되었고, HDD 제조회사에서 소형화, 저가화 및 정보저장용량의 고밀도를 실현하여 현재 거의 모든 PC 에서 HDD 를 주 정보 저장매체로 사용하고 있다. 또한, 용량이 크고 다양한 소프트웨어가 일반

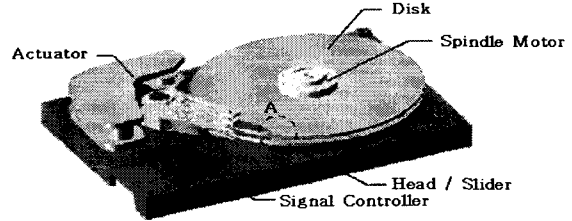


Fig. 4 Configuration of a hard disk drive

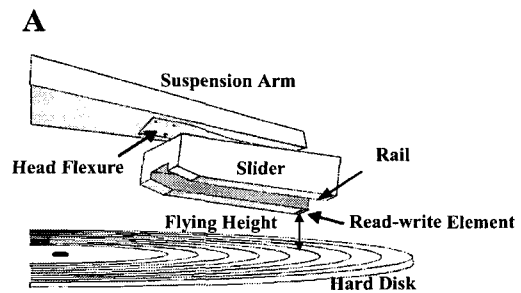


Fig. 5 Head/slider disk interface

적으로 사용되고, 방대한 용량을 갖는 음악 및 동영상 등의 멀티미디어를 구현하기 위해 높은 저장 밀도를 갖는 HDD 가 요구되고 있어 HDD 의 단위면적당 저장 밀도를 높이기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 최근 10 년 간 HDD 의 단위면적당 저장 밀도는 지수함수에 비례한다고 할 정도로 급격히 발전하였는데 IBM Almaden Research Center 의 자료에 의하면 하드디스크 드라이브의 저장 밀도 증가 달성이 1992년 100 Mbits/in<sup>2</sup> 이었던 저장 밀도를 1997년에 2.64 Gbits/in<sup>2</sup> 까지 높였고, 2000년에는 10 Gbits/in<sup>2</sup> 에 도달 점차 100 Gbits/in<sup>2</sup> 로 갈 것임을 예측하고 있다.

현재 개인용 컴퓨터에 일반적으로 사용되는 HDD 외형의 크기는 가로 146.1mm, 세로 101.6mm, 높이 25.4mm 이며, 외부로부터 완전히 밀폐되어 있다. 이러한 HDD 의 내부를 Fig. 4 에 나타내었는데 주로 기계적인 장치들로 이루어져 있으며, 내부부품으로는 헤드/슬라이더, 액츄에이터, 디스크, 스피들 모터, 내부공기순환필터, 그리고 데이터의 신호처리를 위한 칩이 있다. 특히 Fig. 4 의 'A'는 헤드/슬라이더 디스크 인터페이스(HDI)를 가리키며, 데이터의 입출력이 이루어지는 중요한 부분으로 Fig. 5 에 자세히 나타내었으며 각 부품에 대한 설

명은 다음과 같다. 먼저 헤드/슬라이더는 Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 액츄에이터에 연결된 suspension arm 에 의해 지지된다. 슬라이더는 suspension arm 끝 부분의 flexure 라는 얇은 스프링에 의해 연결되어 있어서 디스크 표면의 돌출부나 굴곡을 부드럽게 지나갈 수 있도록 설계되어 있다. 또한 밑면에 레일과 테이퍼가 가공되어 있어 디스크의 회전시 슬라이더 밑면에 공기 베어링이 형성되어 일정한 높이로 부상하여, 슬라이더의 후미 쪽에 부착된 헤드가 디스크표면의 자성 매체에 데이터를 입출력할 수 있게 한다. 특히 레일의 형상은 공기 베어링 및 슬라이더와 디스크간의 마찰, 그리고 HDI 의 기계적인 성능과 관계가 있으므로 다양한 레일의 형상이 저장 밀도가 높은 HDD 에서 사용되고 있으며 저장 밀도가 높아지면서 슬라이더 자체의 크기도 작아지고 있다. 헤드는 주로 슬라이더 후미의 밑면에 부착되어 있으며 자기 유도 헤드가 주로 사용되었으나 현재는 자기저항을 이용하는 MR(magnetoresistive)헤드가 사용되고 있다.

최근 관심을 끌고 있는 고용량의 HDD 는 새로운 헤드, 고정밀 액츄에이터, 고속/고정밀 베어링, 새로운 재질의 디스크 표면 코팅, 부상높이 감소 등 다양한 기술이 요구되고 있다. 특히 부상높이를 감소시키는 것은 저장 밀도와 직접적인 관련이 있으며 Fig. 5 에 나타난 바와 같이 저장밀도를 증가시키기 위해서는 하나의 정보를 기록하는데 필요한 면적을 최소화 해야 하고, 그렇게 하기 위

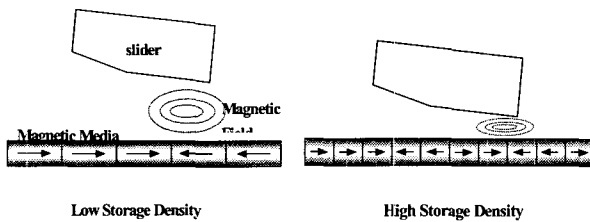


Fig. 6 Comparison of low and high recording density

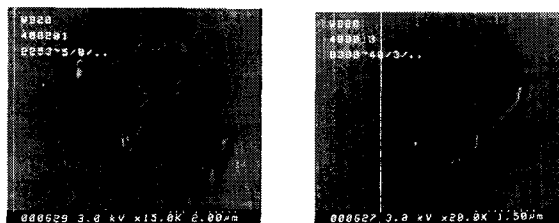


Fig. 7 Thermal asperity (TA) problem

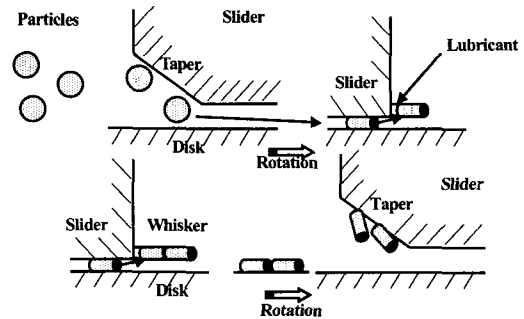


Fig. 8 Scenario of whisker formation

해서는 헤드와 자성 매체의 간격을 최대한 낮추어야 하므로 향후 고밀도 HDD 에서의 슬라이더 부상높이는 더욱더 감소 할 전망이다. 하지만 이런 낮은 부상높이는 슬라이더와 디스크사이(HDI)에서 입자 유입으로 인한 마찰력의 증가나 순간적인 마찰열에 의한 Fig. 7 과 같은 열점(thermal asperity)등의 문제점을 발생시킨다. 이러한 현상은 고밀도 HDD 의 정보저장기기로서의 신뢰성을 저하시킴으로서 심각한 문제로 대두되었다.<sup>(1)</sup> 또한 변형된 입자는 디스크 표면의 윤활제와 섞이게 되고, 슬라이더의 후미에 휘스커(슬라이더의 후미에 입자가 연속적으로 부착되어 나타나는 모양, Fig. 8)를 형성하게 된다.<sup>(2)</sup> 이렇게 형성된 휘스커는 슬라이더의 무게를 증가시켜 부상 높이를 변화시킨다. 휘스커는 유동의 전단력으로 파손되어 미세입자를 발생시키는데 HDD 내부 유동으로 재비산되어 슬라이더의 테이퍼나 후미에 부착되어 공기 베어링을 파손시킴으로서 부상높이를 불안정하게 하거나 슬라이더의 크래쉬를 유발한다. 이러한 입자가 발생하는 원인을 살펴보면, HDD 의 구동 및 정지시 슬라이더가 완전히 부상하기 전에 디스크 표면을 슬라이딩하게 되는데 이때 발생하는 마찰로 인해 디스크 표면의 코팅제가 마멸 입자(debris)로 발생되는 경우가 있고, 액츄에이터 베어링에 주입되는 그리스가 입자로 발생되거나 내부 고분자 부품에서 잔류 단량체(monomer) 등이 표면에서 떨어져 나가서 입자로 나타나는 것 등이 있다. 또한 HDD 부품의 제작 및 조립공정에서 입자가 불가피하게 내부로 들어올 수도 있다.

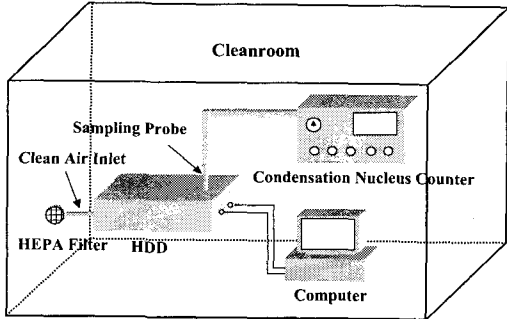


Fig. 9 Experimental setup 1

## 2.2 자기형 정보저장기기의 나노 입자 오염 연구

지금까지 수행된 자기형 정보저장기기의 Nano-contamination 에 관한 연구는 크게 HDD 내에서 자연적으로 발생하는 입자의 특성에 대한 것과 인위적으로 입자를 분사시켜 입자가 기기에 미치는 영향에 관한 것으로 나눌 수 있다.

HDD 에서 발생하는 입자의 특성에 대하여 정구현<sup>(3)</sup>은 슬라이더와 디스크가 접촉되었을 때 발생하는 마멸 입자가 슬라이더의 테이퍼에 부착됨을 실험적으로 규명하였고, Prater 등<sup>(4)</sup>은 액츄에이터의 베어링 그리스가 입자로 발생하는 메커니즘을 분석하고, 발생하는 입자의 크기분포를 레이저 입자 계수기(LPC)로 측정하였다. Nagarajan 등<sup>(5)</sup>은 HDD 의 최종 조립전의 내부부품 세척 과정에서 발생하는 입자의 크기분포를 액체 부유 입자계수법으로 측정하여 입자의 크기분포가 일반적으로 알려진 로그정규분포와 유사함을 실험적으로 입증하였다. 한편, 입자의 분사를 통해 하드디스크 드라이브가 받는 영향에 관하여 Hiller 등<sup>(6)</sup>은 에어로졸 발생기(tri-jet aerosol generator, TSI3460)를 사용하여 크기가 0.9  $\mu\text{m}$ 인 PSL(polystyren latex) 입자를 HDI 에 분사시켜 디스크나 슬라이더에 미치는 영향을 연구하였으며 진동판을 이용하여 크기가 2~4  $\mu\text{m}$ 인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자를 하드디스크 드라이브 내에 분사시킨 후 다양한 속도로 디스크를 검색하도록 작동하여 입자가 디스크 표면에 삽입 또는 부착되었을 때 디스크 표면 거칠기의 변화를 측정하였다. Bergin 등<sup>(7)</sup>은 분무형 입자 발생기로 크기가 0.5, 0.94  $\mu\text{m}$ 인 PSL 입자와 VOAG(vibrating orifice aerosol generator, TSI3450)로 크기가 5  $\mu\text{m}$ 인 NaCl

입자를 HDD 내에 분사 후 HDD 를 구동시키고 레이저 입자 계수기(TSI3753)로 HDD 내에 남아 있는 입자 수를 측정하여 하드디스크 드라이브의 오염 레벨을 구하였다. Koka 등<sup>(8)</sup>은 HDD 내에 평균 크기가 0.4  $\mu\text{m}$ 인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자를 분사시켜 HDI 내 입자의 변형 및 휘스커 형성 메커니즘에 관하여 연구하였다.

Fig. 9 의 실험 장치는 하드디스크 드라이브 내 입자발생 메커니즘을 규명하기 위하여 실제 HDD 의 운전 조건 중에서 HDD 의 구동 및 정지 시 나노 입자 발생 특성 분석을 위한 실험 장치이다. 실험 장치에서 하드 디스크 드라이브를 연속적으로 구동/정지시켜 입자를 발생시키고 image) 응축 핵 계수기(CNC)를 이용 입자 수를 측정해 구동 조건에 따른 입자 발생 특성을 알 수 있다.

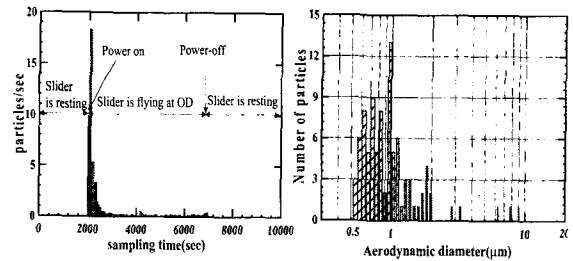


Fig. 10 Typical trend of a particle generation in a hard disk drive

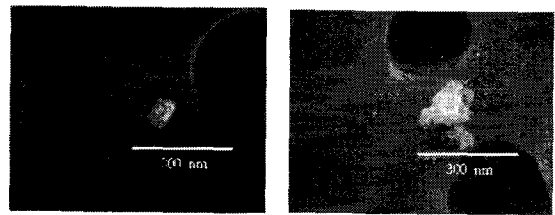


Fig. 11 Particle size generated in a hard disk drive (SEM image)

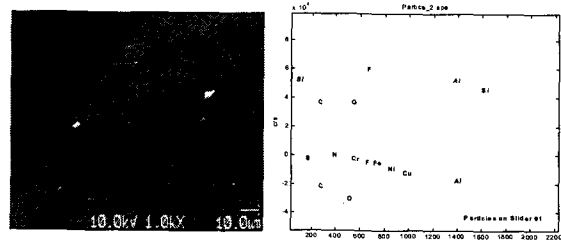


Fig. 12 Particle element generated in a hard disk drive (AES spectrum)

Fig. 10 에서 왼쪽 결과는 HDD 를 구동/정지 시켰을 때 발생하는 입자들의 발생경향을 나타낸 것으로 HDD 의 구동과 동시에 입자들이 발생함을 보여주고 있으며, 오른쪽은 HDD 를 구동/정지 시켰을 때 발생하는 입자의 크기 분포를 나타낸 것으로 거의 대부분의 입자들이 1  $\mu\text{m}$  이하에서 발생함을 알 수 있다. Fig. 11 은 Membrane filter 를 이용 HDD 의 구동시 발생하는 입자를 포집 한 것으로 나노 입자들이 발생했음을 보여 준다.<sup>(9)(10)</sup> Fig. 12 는 구동 중 슬라이더에 부착된 입자들을 AES (Auger Electron Spectroscopy) spectrum 을 이용 분석한 것으로 Cr, F, Fe, Ni, Al 등의 다양한 성분들로 입자들이 구성되어 있음을 확인 할 수 있다.

### 3. 광 기록형 정보저장기기 내에서의 입자 오염

#### 3.1 광 기록형 정보저장기기

정보화 사회로의 급격한 변화에 따라 다양한 정보저장매체가 개발되어 왔다. 광 기록형 정보저장기기(Optical Disk Drive, ODD)의 경우 뛰어난 확장성, 데이터 보관의 편리성, 저렴한 미디어의 가격 등에 있어 자기 디스크 드라이브에 비하여 많은 장점을 지니고 있지만, 상대적으로 낮은 데이터 저장 용량과 느린 액세스 타임(Access Time) 등이 문제점으로 지적되고 있다.<sup>(11)(12)</sup> 최근 들어 이러한 ODD 에서 디스크의 회전속도 증가와 액츄에이터의 고속화 및 경량화, 렌즈와 디스크 사이의 간격을 좁게 하여 기록/재생시 사용하는 빔 스폿 사이즈(Beam Spot Size)를 작게 하여 위에서 언급한 문제점을 해결하고 있다. 이는 ODD 의 사용이 더욱 더 보편화되고 있다는 것을 의미한다.

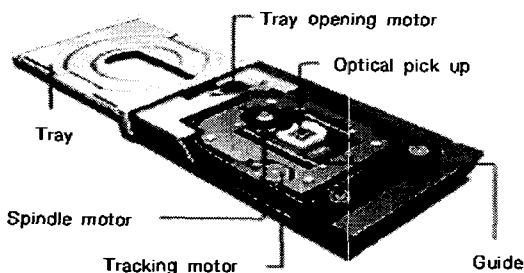


Fig. 13 Configuration of an optical disk drive

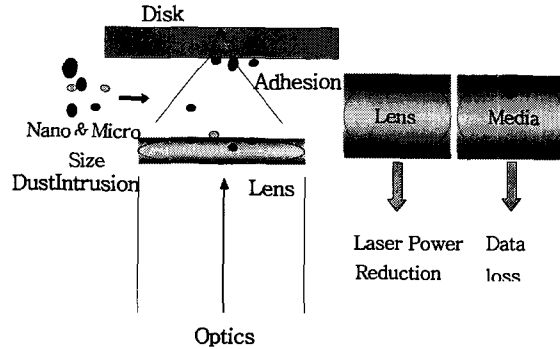


Fig. 14 Particle contamination in an optical disk drive

현재 개인용 컴퓨터에 일반적으로 사용되는 ODD 는 HDD 와는 달리 외부로부터 개방되어 있는 형태로 이러한 ODD 의 내부를 Fig. 13 에 나타내었는데 주로 기계적인 장치들로 이루어져 있으며, 내부는 스피들 모터(Spindle Motor), 트레이(Tray), 광 픽업장치(Pick-up), 트래킹 모터(Tracking Motor), 트레이 개폐 모터, 가이드, 그리고 데이터의 신호처리를 위한 기판 등으로 이루어져 있다.

CD-ROM, CD-RW 등의 ODD 는 디스크의 저장 용량이 (650 MB~700 MB) 정도로 낮고 한 비트(bit)가 차지하는 면적이 넓기 때문에 Nano 사이즈의 작은 입자나 오염원에 의한 데이터의 손실이 크지 않았다. 이는 렌즈와 디스크 사이의 공간이 상당히 넓고, 먼지가 디스크에 부착이 된다고 하더라도 디스크에 맺히는 광 Spot 의 크기가 부착된 먼지의 크기보다 수 백배이상 크기 때문에 큰 영향을 주지 않기 때문이다. 또한 에러정정코드(Error Correction Code)의 사용으로 일반 사용자들이 데이터를 읽고 쓰는 데에는 별 어려움이 없다. 하지만 실제로 Fig. 14 와 같이 디스크나 렌즈에 많은 입자가 부착될 경우는 여러 가지 문제점을 보인다. 예를 들자면, 에러정정코드가 많이 사용되어짐에 따라 속도가 그만큼 느려지고, 오염이 심각한 수준에 이르면 데이터 사용이 불가능해 지기도 한다. 또한 용량이 높은 DVD-ROM, DVD-RAM 드라이브는 기존의 광 디스크 드라이브에 비해 높은 저장 용량 (5.4 GB~12 GB)과 한 비트가 차지하는 면적이 좁기 때문에 입자 등의 오염원에 의해 데이터의 손실이 크다. 또한 최근 자기형 정보저장기기와의 경쟁으로 인해 기록 밀도의 향상은 주요 회사들의 기술 개발 동향이 되고 있으며, 차

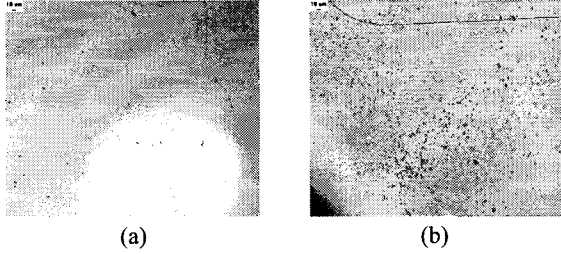


Fig. 15 Contamination in lens

세대 영상매체의 고용량을 충족하기 위해서도 이 같은 기록 밀도의 증가 추세는 계속 진행될 예정이다. 즉, 광 디스크 드라이브의 용량과 저장밀도가 증가할수록 Nano 사이즈의 작은 입자 등의 오염원에 의한 데이터의 손실이 발생할 확률은 증가하게 될 것으로 예상된다. 따라서 ODD 내에서 지금까지 중요시되지 않았던 기기 내의 Contamination 문제가 주요 문제로 떠오를 것이다.

차세대 ODD 는 랜덤한 기록/재생 방식과 데이터의 빠른 전송속도가 요구된다. 따라서 광 spot 이 감소하며, 디스크의 회전속도는 증가할 것으로 생각된다. Spot 의 크기가 감소함에 따라 입자나 부유 물질이 디스크 표면에 부착되면 광 산란이 발생하므로 노이즈나 데이터 기록/재생의 오류가 발생할 가능성은 증가한다. Fig. 15 는 ODD 내에서 입자에 의한 렌즈 부분의 오염을 나타내는 것으로 (a)는 렌즈의 중앙부분 (b)는 렌즈의 외곽부분의 오염을 보여주고 있다. 본 그림에서와 같이 ODD 내에서의 핵심 부품이라 할 수 있는 렌즈의 모든 부분에 오염현상이 일어나고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 이런 오염입자들이 대물렌즈에 부착될 경우는 레이저 강도를 감소시켜 데이터의 입출력을 어렵게 할 것이다.

### 3.2 광 기록형 정보저장기기의 나노 입자 오염 연구

광 기록형 정보저장기기(ODD)에 관한 Nano-contamination 에 관한 연구는 자기형 정보저장 기기에서의 활발한 연구와는 달리 렌즈와 디스크 사이의 공간이 상당히 넓고, 먼지가 디스크에 부착이 된다고 하더라도 디스크에 맺히는 광 Spot 의 크기가 부착된 먼지의 크기보다 수 백배이상 크기 때문에 큰 영향을 주지 않기 때문에 많은 연구가 진행되지 않은 것이 현실이다. 하지만 현재 기록

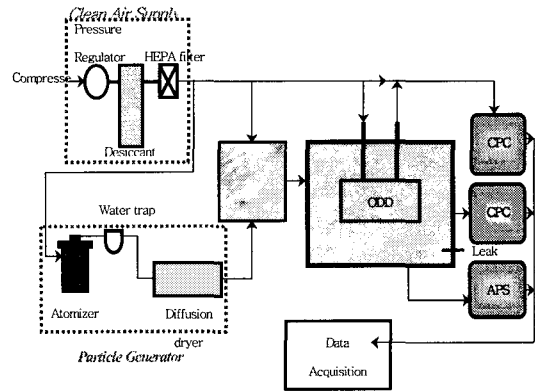


Fig. 16 Experimental setup 2

밀도의 증가나 자기형 정보저장기기와의 경쟁으로 인해 이러한 연구가 활발히 진행될 것으로 예상된다. 최근에는 이러한 원인으로 ODD 내의 입자오염 문제를 해결하기 위한 연구가 특허를 비롯하여 많이 진행되고 있다. 실제로 일본의 한 회사에서 생산되는 DVD-RAM 의 경우는 드라이브 내부에 또 하나의 상자를 넣고 밀폐율을 향상시킨 제품이 출시 중인데, 이 제품은 PC-Board 에서 발생하는 열까지 렌즈와 디스크에 전달되지 않게 하였으며, 다른 회사의 제품의 CD-RW 의 경우는 이런 밀폐율의 향상에 따른 내부 열 문제 해결을 위해 드라이브에 팬을 달아 드라이브 내부의 열을 식혀 주고 있다.

Fig. 16 은 ODD 내의 입자에 의한 오염 연구를 하기 위한 실험 장치로 실험의 진행은 실제 ODD 를 일정한 농도의 먼지 입자들 속에서 구동/정지를 반복했을 때에 드라이브 내부로 유입되는 정도를 조사하고, 실제 유입된 입자가 증가함에 따라 광 기록 정보저장기기내의 성능에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

Fig. 17 은 실험 결과로 외부 입자가 광 기록저장기기 내에 유입되는 유입도가 상당함을 알 수 있다. Fig. 18 은 이때 광 기록 저장기기내의 성능의 변화를 보여주는 것으로 (a)를 보면 광 기록 저장기기 내에서 Error 를 보정해주는 Error rate 이 입자의 오염 정도에 따라 급격하게 증가함을 알 수 있다. 또한 (b)를 보면 정보의 기록 및 재생에 필요한 Laser power 가 감소해 이런 입자에 의한 오염이 ODD 의 성능에 미치는 영향이 상당함을 알 수 있다.<sup>(13)</sup>

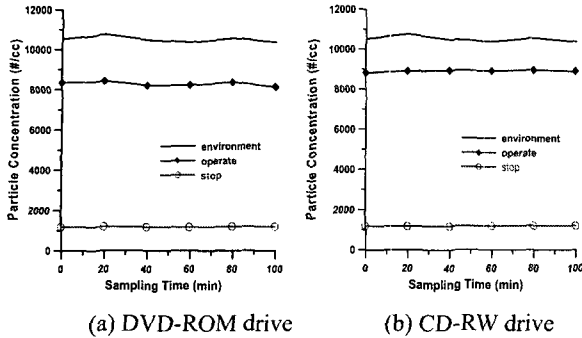


Fig. 17 Particle intrusion in an optical disk drive

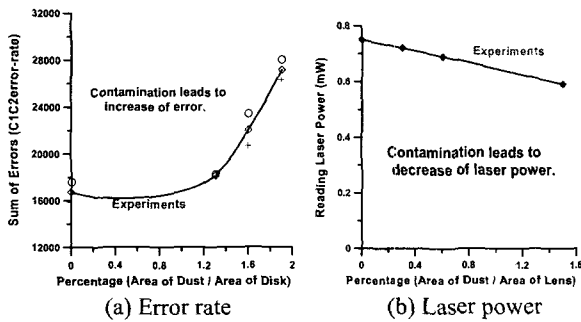


Fig. 18 Effect of particle contamination in an optical disk drive

#### 4. 결론

지금까지 자기 및 광 기록형 정보저장기기 내에서의 나노 입자에 의한 Contamination에 대해 설명을 주로 HDD(Hard Disk Drive)와 ODD(Optical Disk Drive)를 중심으로 설명하였다. 앞으로 정보저장기기의 저장용량 증가는 회사간의 경쟁, 소비자의 욕구 그리고 차세대 매체의 용량증가로 인해 앞으로 계속될 전망이다. 또한 고용량뿐만 아니라 휴대성을 강조하는 소비자들의 의식에 따라 Fig. 19와 같이 소형화 될 것으로 전망된다. 따라서 이러한 고용량과 소형화는 현재도 진행 중인 디스크의 회전속도 증가를 가져 올 것으로 예상되며 이런 회전속도의 증가는 드라이브 주위와 드라이브 내부의 압력차이를 증가시키며 따라서 입자 등의 오염물질이 포함된 외부의 공기가 유입될 가능성도 증가하게 될 것이다. 따라서 정보저장기기 내에서의 입자에 의한 영향이 계속 증가할 것이며 요구되는 내부 청정도 또한 증가할 것이므로, 기



Fig. 19 Size change of hard disk drive

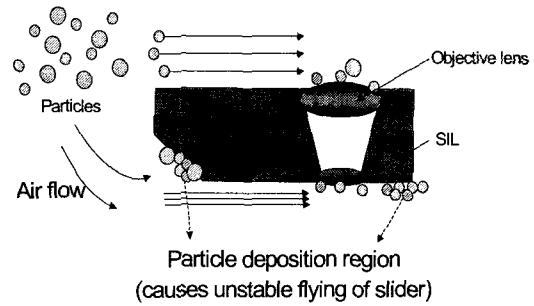


Fig. 20 Particle contamination in a NFR head/slider

록/재생의 안정성 향상을 위해서는 이에 관한 연구가 필요하다. Fig. 20은 차세대 저장장치로 각광 받고 있고 현재 활발히 연구 중에 있는 NFR(Near-Field Recording)에서의 입자 오염에 관한 현상을 나타낸 것으로 이러한 입자들의 부착은 NFR head/slider의 부상 높이를 불안정하게 해 앞으로의 개발에 어려움을 줄 것으로 예상된다. 따라서 이러한 나노 입자오염에 대한 연구가 제품의 생산에 중요한 사항이 될 전망이다.<sup>(14)</sup>

#### 참고문헌

1. Tsai, C. J., "A Study of Particle Phenomena in Computer Disk Drives," Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Eng., Univ. of Minnesota, 1990.
2. Ananth, G. P., "Experimental and Numerical Investigations of Particulate Contamination in Disk Drives," Ph. D. Thesis, Mechanical Engineering Department, University of Minnesota, 1988.
3. 정구현, "헤드/디스크 인터페이스의 표면과손 매커니즘에 관한 연구," 연세대학교 석사학위 논문, 1997.

4. Prater, W. and Stone, G., "Actuator Bearing Greases: Their Effect on Aerosol Contamination in Disk Drives," *Info. Storage and Processing Syst.*, Vol. 3, pp. 69-73, 1997.
5. Nagarajan, R. and Welker, R. W., "Size Distribution of Particles Extracted from Disk Drive Parts : Comparison with the MIL-STD-1246 Distribution," *J. Instit. Environ. Sci.*, Vol. 36, No. 1, pp. 43-48, 1993.
6. Hiller, B. and Singh, G. P., "Mechanism for Formation of Whiskers on a Flying Magnetic Recording Slider," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 30, No. 4, pp. 1499-1503, 1994.
7. Bergin, M. and Koka R., "Measurement of Particulate Contamination Levels in Disk With Aerosol Counters," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 5, pp. 387-395, 1993.
8. Koka, R. and Kumaran, A. R., "Visualization and Analysis of Particulate Buildup on the Leading Edge Tapers of Sliders," *Adv*, 1991.
9. Park, H. S., "Micro / Nano-sized Particle Contamination in a Slider Disk Interface," Ph. D. Thesis, Dept. Mech. Eng., Yonsei Univ, 2002.
10. Park, H. S., Yoo, Y. C., Bae, G. N., and Hwang, J., "Investigation of Particle Generation in a Hard Disk Drive During the Start/Stop Period," *J. KSME(B)*, Vol. 23, No. 6, pp. 744-752, 1999.
11. Kikawa, H., Kubo, T. and Yoshida, H., "Testing Method for Dust Effects on an Optical Disk Cartridge," *J. Magn. Soc. Jpn.*, 20, 411-414, 1996.
12. Senga, H., Kubo, T. and Ohta, T., "Testing Method of The Dust Influence on Thin Substrate DVD and The Results," *Int. Symp. Optical Memory 2000*, Japan, Fr-J-20, 2000.
13. Oh, S. Y., "Control of Particle Contamination & Heat Build-up for Noble Design of ODD," Ms. Thesis, Dept. of Mechanical Eng., Univ. of Minnesota, 2002.
14. Chong, T. C., "Contamination Issues in The Slider-based Near-Field Recording," *The Second International TBOC Workshop*, 2000.