

하드 디스크의 표면 파손과 데이터 손실과의 관계

이성창*, 박용식*, 전규찬**, 김대은***

Relationship between Hard Disk Surface Damage and Data Loss

Sung-Chang Lee*, Yong-Shik Park* , Gyu-Chan Jun** , Dae-Eun Kim***

ABSTRACT

In recent years the recording density of hard disks has increased significantly largely due to the decreasing flying height. As a result of decreased flying height, the reliability issue become more critical. In this work the relationship between hard disk surface damage and data loss was investigated by using an actual hard disk drive. The purpose of this research was to identify the key factor which leads to data loss. It was shown that data loss is directly related to the physical damage of the Co-magnetic layer and there was no data loss when only carbon protective coating was damaged by the diamond tip.

Key Words : Hard Disk Drive (하드 디스크), surface damage (표면파손), data loss (데이터 손실)

1. 서론

1.1 연구배경

최근 20년간 자기저장 기록방법은 현대의 컴퓨터 시스템에서 정보를 저장하는 지배적 기술로 자리잡았다. 헤드/슬라이더와 디스크와의 상대운동을 통하여 정보를 읽고 기록하는 하드 디스크는 대표적인 자기저장 기록장치로서, 저장밀도가 연간 60% 이상씩 증가하고 있어 그 중요성이 크게 부각되고 있다.

디스크의 랜딩 존(landing zone)에서만 이·착륙을 하는 하드 디스크의 작동 조건으로 볼 때 저장된 데이터가 손실될 수 있는 경우는 다음과 같이 세가지로 구분할 수 있다.

첫째, 하드 디스크에 가해지는 외부충격으로

고속 디스크 회전시에 슬라이더가 비정상적으로 접촉함으로써 디스크 표면에 파손을 줄 경우이다. 현재 널리 사용되고 있는 하드 디스크는 5400rpm 이상으로 매우 빠르게 회전하고 있고 슬라이더의 부상높이는 30nm 이하로 낮아지고 있다. 게다가 노트북에서와 같이 하드 디스크에 외란이 가해지는 경우가 많아지고 있어서 디스크와 슬라이더의 접촉가능성이 점차 커지고 있다.

둘째, 큰 정마찰력으로 인해 발생할 수 있는 흠착마멸 혹은 계속되는 이·착륙으로 발생할 수 있는 연삭마멸 때문에 슬라이더의 안정적인 부상이 불가능할 경우이다. HDI에 매니스커스(meniscus)효과로 얇은 유막이 형성되면 큰 값의 정마찰력이 발생하게되어 헤드/슬라이더가 부상하는 것을 방해하고, 흠착마멸을 유발시켜서 슬라이더를 지지하는

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 삼성전기(주)

*** 연세대학교 기계공학과

플렉서(flexure)에 적정 수준 이상의 힘이 작용하면 슬라이더의 안정적인 거동을 방해할 수 있다. 또한 계속적인 이·착륙으로 슬라이더 표면에는 디스크와의 물리적 접촉으로 인한 연삭마멸이 발생할 수 있으며 이러한 연삭마멸은 슬라이더의 안정적인 부상을 방해할 수 있다.

셋째, 트랙 찾기 도중에 발생하는 불안정한 거동과 미세 오염입자들에 의해서 발생하는 디스크 표면의 연삭마멸의 경우이다. Liu [7]는 슬라이더의 공기 베어링 표면에 슬라이더가 디스크 위를 지나갈 (track seeking)때 미세 입자들이 모이고 축적되는 경향을 보여주었다. 특히, 트랙 찾기 (track seeking)를 하는 중에 발생하는 슬라이더의 불안정한 거동은 디스크와의 충돌을 야기 시키고 그 결과 슬라이더에 쌓였던 입자들이 흩어지게 된다. 이렇게 흩어진 축적 입자들이 디스크/슬라이더 사이에서 연삭마멸을 일으킨다.

따라서, 본 연구에서는 앞서 언급한 3가지 이유로 인하여 디스크의 데이터 영역에 손상이 발생할 경우 디스크 미디어의 파손된 영역에 저장된 정보는 어느 정도의 파손까지 유지될 수 있는지를 파악하여 하드 디스크의 신뢰성과 내구성을 평가하고자 하였다. 현재까지 진행된 하드 디스크에 대한 연구들은 디스크의 표면파손 정도를 명확하게 정량화하지 못한 실정이다. 지금까지는 실험 전후의 디스크 표면거칠기나 토포그래피(topography)의 변화, 스크래치(scratch)의 생성 등을 통해 정성적으로 표면 파손을 판단할 뿐이었다. 따라서 본 연구에서는 다이아몬드 팁을 사용하여 하중에 따라 스크래치(scratch)를 발생시켜서 데이터 파손과의 관계를 상대적으로 파악하고자 하였다. Fig. 1에는 실제적

인 하드 디스크의 신뢰성 평가를 위한 개략도를 나타내었다.

1.2 하드 디스크 실험기법

하드 디스크의 신뢰성과 내구성을 평가하기 위한 방법으로는 일반적으로 2가지 종류의 시험법이 적용되고 있다. 하나는 일정 속도와 일정 하중에서 헤드/슬라이더가 디스크와 접촉하도록 유지시키는 항력(drag) 실험이며 다른 하나는 CSS 실험으로 가장 널리 활용되고 있다. 항력(drag) 실험은 헤드/슬라이더와 디스크와의 접촉상태를 유지할 수 있도록 공기 베어링이 형성되지 않는 속도로 디스크를 회전시키는 것이다. 슬라이더가 부상하지 않는 저속에서 디스크를 회전시키게 되면 CSS 실험시 가속과 감속시에 발생하는 헤드/슬라이더와 디스크와의 물리적 접촉을 가속시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만, 슬라이더의 부상시와 착륙시에 HDI에서 발생하는 여러 환경을 충족시켜줄 수 없으므로 실제 하드 디스크의 작동 조건과는 거리가 있다 [1-3].

일반적인 하드 디스크 시험법인 CSS와 drag 실험 역시 각각의 장단점을 갖고 있기 때문에 이의 보완을 위한 연구가 진행중이다. 두 실험간의 상관관계를 파악함으로써 drag 실험을 통하여 헤드/슬라이더 그리고 하드 디스크의 전반적인 트라이볼로지 특성을 먼저 파악한 후 추가 실험이 필요하다고 판단되는 것에 대하여 CSS 실험을 하는 방법에 대한 연구가 진행중이다[4,5]. 즉, 새로운 하드 디스크 개발초기에 소모되는 많은 시간을 절약함으로써 하드 디스크의 개발주기를 단축시킬 수 있고 이를 통하여 경쟁력 있는 제품을 만들 수 있도록 하기 위함이다.

그러나, CSS와 drag 실험에서 중요시하는 것은 마찰력(정마찰력 포함)과 마멸 측면이다. 즉, 하드 디스크의 본래 목적인 '데이터의 저장' 측면은 고려하지 않고 있기 때문에 어느 순간에 디스크에 저장된 데이터에 손실이 발생하는지에 대한 구체적인 정보를 제공하지는 못하므로, 본 연구를 통해 표면 파손과 데이터 손실과의 관계를 알아보하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

실험장치의 구성은 Fig 2와 같이 인위적으로 미소하중으로 파손을 가하려는 하드 디스크의 회전 중심에 유연한 커플링을 연결하여 디스크를 저속으로

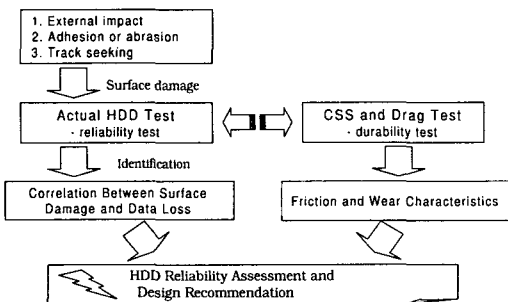


Fig. 1 Schematic diagram of practical HDD reliability test

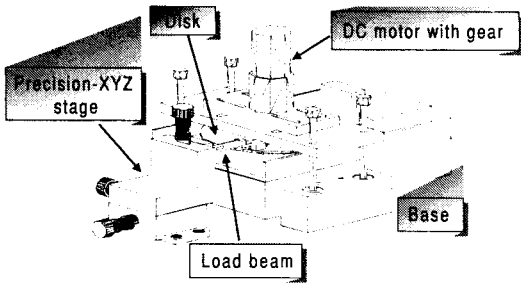


Fig. 2 Schematic of actual HDD reliability tester

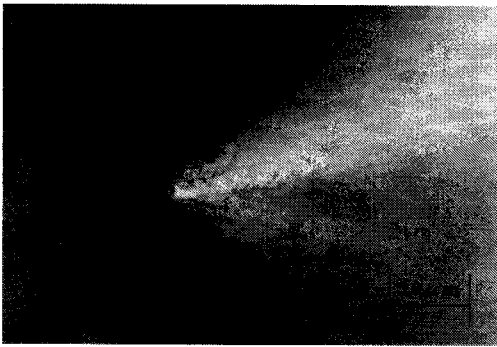


Fig. 3 Optical micrograph of diamond tip

로 회전시킬 수 있도록 하였다. 즉, 하드 디스크의 덮개를 개봉한 뒤 디스크의 회전중심에 커플링을 연결시켜 저속 모터의 회전력이 전달 될 수 있도록 하였다. 가하려는 하중만큼 precision-XYZ stage의 마이크로미터를 z-방향으로 조절하여 다이아몬드 팁이 디스크 미디어에 일정한 하중으로 접촉하도록 하였으며 모터를 회전시켜 디스크 표면을 인위적으로 파손시켰다. 다이아몬드 팁이 미소하중으로 디스크와 접촉한 상태에서 회전하게 되므로 회전시 하중의 변화를 줄이기 위하여 디스크를 저속으로 회전시켰다.

디스크 미디어에 인위적인 파손을 주기 위한 다이아몬드 팁은 수직하중을 측정할 수 있는 로드 빔(load beam)에 연결하였으며 안정적인 미소하중을 가할 수 있도록 다시 precision-XYZ stage에 부착하였다. Fig. 3은 디스크 표면파손을 위해 사용된 다이아몬드 팁의 광학현미경 사진이며 반경은 $5\ \mu\text{m}$, 경도는 약 $8000\sim 10000\ \text{HV}(\text{kg}/\text{mm}^2)$ 이다.

2.2 실험시편

본 실험에 사용된 270 MB 하드 디스크의 미디어

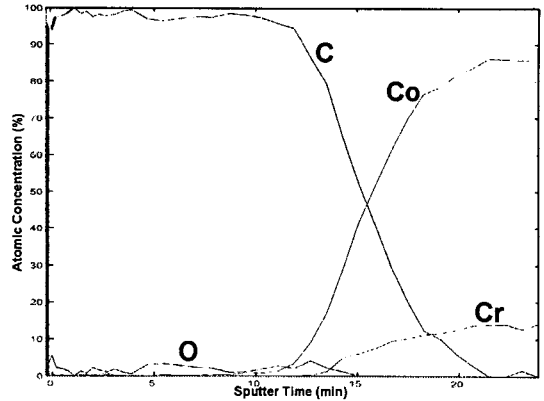
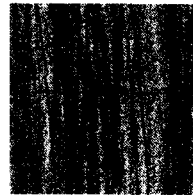


Fig. 4 AES depth profile of disk surface



Scan size	$20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$
Length	$18.477\ \mu\text{m}$
Ra	10.1nm
Rmax	67.3nm

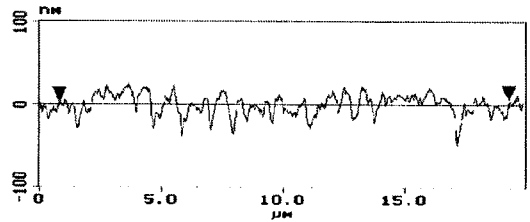


Fig. 5 AFM surface profile of disk specimen

어는 0.8mm의 두께를 가지며 Fig. 4의 AES (Auger Electron Spectroscopy) depth profile에서 확인할 수 있는 것처럼 깊이방향으로의 스퍼터링(sputtering)시간이 증가할수록 탄소층, 코발트층, 크롬층이 차례로 나타난다. 코발트층은 스퍼터링(sputtering) 시간 10분 이후에서 탄소층이 줄어들기 시작하면서 급격히 증가하기 시작하고 크롬층도 코발트층과 함께 서서히 증가하기 시작하는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 저용량 하드 디스크를 사용한 이유는 데이터 손실과 물리적 파손을 용이하게 파악하기 위함이다.

AFM (Atomic Force Microscope)을 사용하여 분석한 디스크 미디어의 평균 거칠기는 $Ra = 10.1\ \text{nm}$, $Rmax = 67.3\ \text{nm}$ 이었으며 Fig. 5에 디스크 미디어의 2차원 형상과 표면정보를 나타내었다.

Table 1에는 본 실험에 사용된 하드 디스크의

물리적 정보를 정리하였다. 하드 디스크의 저장밀도 계산에 사용되는 TPI(track per inch)와 track/surface 값을 이용하여 계산한 물리적 트랙 1개의 폭은 $1/2875 = 3.4783 \times 10^{-4} \text{ in} = 8.8348 \times 10^{-6} \text{ m}$ 이고, 실제로 데이터가 읽고 쓰여지는 디스크 미디어의 데이터 영역 크기는 약 2.54 cm (1 in)이다. 270 MB 하드 디스크의 논리적 제원은 총 클러스터수가 32984, 클러스터당 섹터수는 16, 섹터당 바이트는 512이다. 따라서, 논리적 정보를 이용하여 계산한 본 실험용 HDD의 전체용량은 $32984 \times 16 \times 512 = 270,204,928 \text{ byte}$ (약 263.8 MB)이다.

Table 1 Disk drive configuration (270 MB)

Disks	1
Heads	2
Recording Surfaces	2
Tracks per Surface	2,740
Sectors per Track	62 to 125
Bytes per Sector	512
Track Density (tpi)	2,875
Encoding Method	RLL 1,7

2.3 실험방법

본 실험에서는 디스크의 표면파손으로 인한 영향을 알아보기 위한 변수로 다이아몬드 팁으로 디스크 표면에 가하는 미소하중을 설정하였다. 다이아몬드 팁으로 270 MB 하드 디스크 미디어에 가하는 미소하중은 2.5g, 2.7g, 2.9g, 3.1g, 3.2g으로 설정하였으며, 동일 트랙에서 2회전시키면서 충분히 하중이 가해질 수 있도록 하였다. 이와 같이 하중을 선택한 것은, 실제 상용화된 하드 디스크의 슬라이더에 가해지는 예압(preload)의 값과 같은 하중을 가함으로써 실제 하드 디스크의 작동 상황에서의 표면 파손과 유사한 결과를 얻기 위함이다.

디스크 미디어의 표면파손으로 인한 데이터 손실을 확인하기 위하여 하드 디스크 표면에 파손을 가하기 전에 미리 5,171 KB 크기의 이름만 달리한 같은 그림파일 45개 (Fig. 6)를 저장하였으며 그 뒤 하드 디스크의 덮개를 개봉하여 저속모터와 커플링으로 연결하였다. 유연한 커플링을 연결한 후 다이아몬드 팁으로 디스크 미디어와 일정하중으로 접촉



Fig. 6 Original figure

시켜 2rpm으로 저속 회전시켰다. 2회전 후에는 다시 하드 디스크의 덮개를 덮고 PC와 연결하여 데이터의 손실여부를 확인하였다.

정보 유실 측면에서 디스크의 파손 확인 방법으로는 먼저 실험 전에 하드 디스크에 저장한 그림파일들이 어떻게 손상되었는지를 그래픽 프로그램으로 읽어들이 시각적으로 확인하였으며, 그 다음 윈도우95의 '디스크 검사' 프로그램을 사용하여 물리적으로 손상된 클러스터의 위치와 크기를 확인하였다.

실제 다이아몬드 팁으로 인한 물리적인 파손은 AFM을 사용하여 스크래치(scratch)의 폭과 깊이를 측정하였고, AES를 이용하여 scratch에서 어떤 성분이 검출되는지를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

다이아몬드 팁에 의하여 디스크 미디어에 가해지는 미소하중이 2.5g, 2.7g, 2.9g인 경우, 실험 후에 다이아몬드 팁에 의한 디스크 표면 파손을 광학 현미경을 사용하지 않고도 확인할 수 있었으며 디스크에 저장된 그림파일 45개에는 아무런 손상도 발생하지 않았다. Fig. 7은 미소하중이 2.5g, 2.7g, 2.9g일 경우에 다이아몬드 팁에 의해 생긴 디스크 표면 파손을 나타내는 광학 현미경 사진이다.

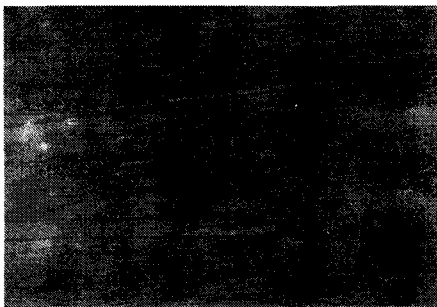
본 실험에 사용된 하드 디스크는 데이터 인코딩 방법으로 RLL 1,7 방법을 사용하였는데, 이러한 인코딩 방법과 적절한 ECC(Error Correction Code)에 의해서 물리적 표면파손이 국부적으로 있음에도 불구하고 데이터의 손실은 없는 것처럼 보일 수 있다^[7,8]. 보다 정확한 표면파손 위치의 확인을 위하여



(a) After scratching with 2.5g



(b) After scratching with 2.7g

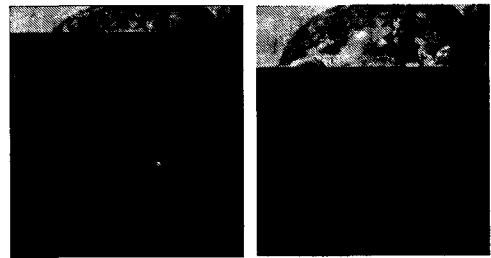


(c) After scratching with 2.9g

Fig. 7 Optical micrographs of wear track of disk

윈도우95의 응용프로그램인 '디스크 검사' 프로그램을 사용하였다. '디스크 검사' 프로그램은 디스크의 모든 데이터 영역을 클러스터 순서대로 순차적으로 읽고 쓰기 검사를 실시하여 디스크 오류를 확인하는 프로그램으로 시각적인 확인 방법보다 좀더 정확한 파손정보를 알 수 있다. '디스크 검사' 결과 역시 아무런 오류도 확인되지 않았으므로 데이터의 손실은 없다고 결론지었다.

미소하중을 3.1g으로 변화시켰을 때에는 총 45개의 그림파일 중 1개의 그림파일만 Fig. 8 (a)와 같



(a)

(b)

Fig. 8 Data loss after scratching with (a)3.1g and (b)3.2g

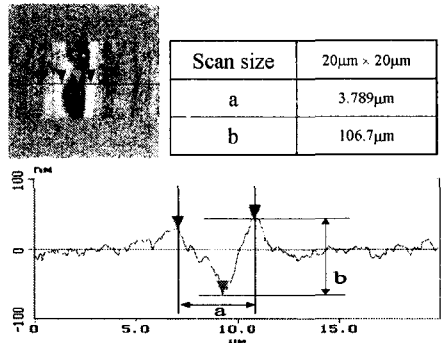


Fig. 9 AFM 2D profile after scratching with 3.1g

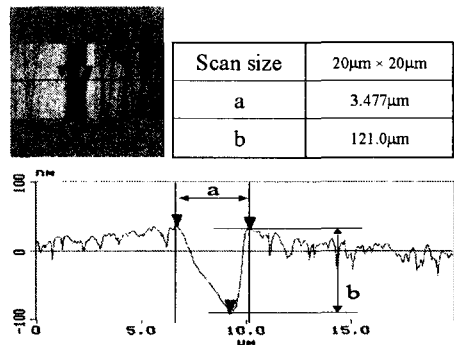


Fig. 10 AFM 2D profile after scratching with 3.2g

이 파손되었으며 나머지 44개의 파일은 아무런 손상도 없었다. 실험 후에 컴퓨터와 연결해서 '디스크 검사'를 해 본 결과 손상파일의 일부분이 저장되어 있는 25304, 25305, 25308, 25309, 25310 클러스터가 파손되었으며, 5개의 클러스터에 해당하는 저장공간은 40,960 바이트이다. AFM으로 측정한

scratch의 폭은 Fig. 9에 나타난 것처럼 약 $3 \mu\text{m}$ 이며 scratch의 깊이는 약 60 nm 정도이다.

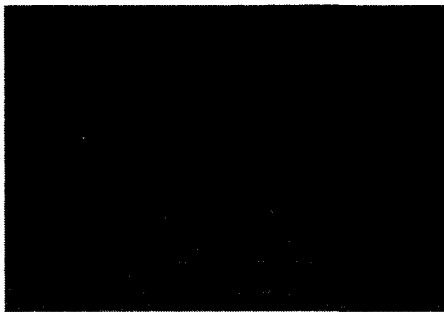
다시 미소하중을 3.2g 으로 변화시켰을 때에도 역시 총 45개의 그림파일 중 1개의 그림파일인 Fig. 8 (b)와 같이 파손되었으며 나머지 44개의 그림파일은 아무런 손상도 없었다. 디스크 검사 결과 21504, 21505, 21506, 21513, 21514, 21515, 21516, 21517, 21518, 21527, 21528 클러스터가 파손되었으며, 11개의 클러스터에 해당하는 저장공간은 90,112 바이트이다. AFM으로 측정된 scratch의 폭은 Fig. 10에 나타난 것처럼 역시 약 $3 \mu\text{m}$ 이며 scratch의 깊이는 하중이 3.1g 일 때 보다 더 큰 값인 약 90nm 정도이다.

Fig. 11은 미소하중이 3.1g , 3.2g 일 경우 다이아몬드 팁으로 인위적으로 표면파손을 가한 후의 광학 현미경 사진이며 Fig. 12는 Fig. 4에서 AES로 확인한 것과 같이 디스크 미디어의 여러 층들 중에서 어떤 층까지 파손이 일어났는지를 파악하기 위하여 AES 측정시 찍은 SEM 사진이다. Fig. 11 (b)의 광학 현미경 사진과 Fig. 12 (b)의 SEM 사진에서 확

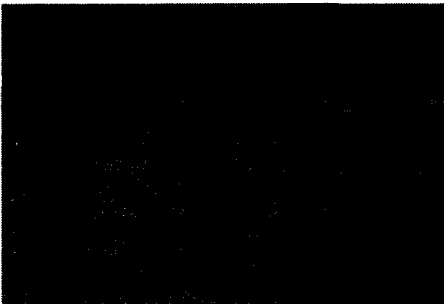
인할 수 있는 것처럼 미소하중이 3.2g 일 경우에는 다이아몬드 팁을 디스크의 일정 트랙 위에서 저속 2회전시키는 과정에서 2개의 scratch 선이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 8 (a)가 Fig. 8 (b)의 경우보다 적은 하중으로 미소 파손을 유발했는데도 좀 더 많이 파손된 것처럼 보이는 이유는 scratch로 인한 파손부위에서부터 그림 파일이 읽히지 않기 때문이며, 실제로는 윈도우95의 '디스크 검사'에서 확인했듯이 3.2g 의 경우에 2배 정도의 파손이 발생하였다. 이렇게 2배 정도의 파손이 발생한 이유는 미소하중이 3.2 g 일 경우에 디스크 표면에 다이아몬드 팁으로 인한 2개의 scratch 선이 확인된 것으로 설명할 수 있다. 즉, 다이아몬드 팁에 의한 scratch의 폭이 약 $3 \mu\text{m}$ 이고 실험에 사용된 하드 디스크의 물리적 디스크 트랙 1개의 폭이 약 $8 \mu\text{m}$ 이므로 저속회전모터의 진동과 회전중 미소하중에서의 다이아몬드 팁의 흔들림 등의 영향으로 1~2 개 정도의 트랙에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

다이아몬드 팁에 의한 파손 흔적인 Fig. 12 (a)

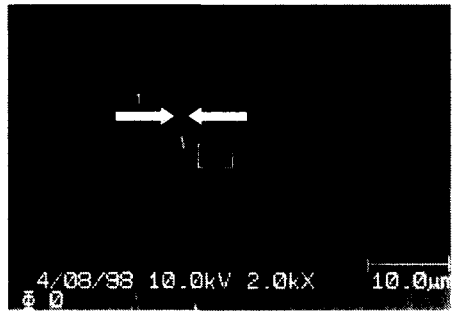


(a) After scratching with 3.1g

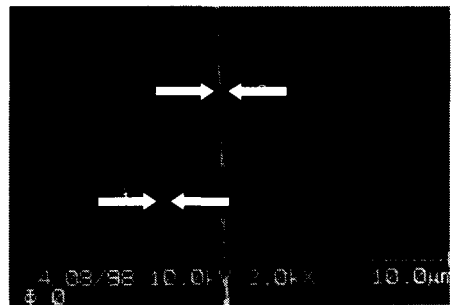


(b) After scratching with 3.2g

Fig. 11 Optical micrographs of wear track of disk



(a) After scratching with 3.1g



(b) After scratching with 3.2g

Fig. 12 SEM micrographs of wear track of disk

의 ①지역과 (b)의 ①,② 지역에 대한 AES 성분분석 결과 'Co' 성분이 검출되었으며, 그 외의 지역에서는 'C' 성분만이 지배적으로 검출되었다. 따라서, 하드 디스크의 표면파손과 데이터 손실을 연관지어 생각하여 볼 때 디스크 미디어의 C-보호층까지는 표면의 파손이 존재하더라도 헤드/슬라이더만 손상되지 않을 경우 데이터는 손실되지 않는다고 판단된다. 지금까지의 실험 결과들이 Table 2에 정리되어 있다.

하드 디스크의 신뢰성 측면에서 볼 때 디스크의 C-보호층까지의 파손은 데이터의 손실이 발생하지 않으므로 데이터의 손실측면에서는 헤드/슬라이더의 파손이 더욱 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 그러므로, 헤드/슬라이더의 표면경도는 디스크 경도보다 높아야 하며 앞서 언급한 3가지 이유로 인하여 헤드/슬라이더가 디스크와 충돌할 경우 발생하는 마멸입자들의 영향도 고려해야 한다. 슬라이더와 디스크의 접촉으로 인한 표면 파손은 필연적으로 마멸입자들을 생성시키고 이렇게 생성된 마멸입자들은 HDI에서 연삭마멸을 촉진시킬 것이기 때문이다.

Table 2 Results of the scratching test

구분 preload	손상된 file수	파손된 클러스트수	scratch의 폭/깊이
2.5g	0	0	.
2.7g	0	0	.
2.9g	0	0	.
3.1g	1	5 (409,606bytes)	3 μm / 60nm
3.2g	1	11 (901,126bytes)	3 μm / 90nm

4. 결 론

본 연구에서는 실제 하드 디스크 작동중에 헤드/슬라이더와 디스크 미디어와의 충돌로 인하여 발생할 수 있는 디스크 표면파손이 데이터 손실과는 어떤 상관관계를 갖고 있는지를 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

) 다이아몬드 팁으로 디스크 미디어에 2.5g, 2.7g, 2.9g, 3.1g, 3.2g의 미소 하중을 가해 표면 파손을

일으킨 결과, 3.1g, 3.2g에서 데이터의 손실이 발생하기 시작하였다.

- 2) 다이아몬드 팁에 의한 인위적인 디스크 미디어의 표면파손과 데이터 손실과의 관계는 자성층인 'Co' 층과 밀접한 관련이 있다.
- 3) 이번 실험처럼 다이아몬드 팁에 의해 파손되는 스크래치(scratch)의 폭이 데이터를 저장하는 물리적 트랙 1개의 폭보다 작을 경우에는 자성층이 손상되지 않고, 보호층인 'C' 층만이 파손되었을 경우에는 데이터 손실은 발생하지 않는 것으로 판단된다.
- 4) 데이터 보호의 측면에서 볼 때 헤드/슬라이더의 경도는 디스크 미디어의 경도보다 높아야 하며, 헤드/슬라이더와 디스크와의 충돌로 인하여 생성되는 마멸입자들을 고려하여 헤드/슬라이더와 디스크 미디어의 표면 경도를 선정해야 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(과제번호: 97K3-0907-02-02-1)의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. F. E. Talke, "On Tribological Problems in Magnetic Disk Recording Technology," *Wear*, Vol. 190, pp. 232-238, 1995.
2. S. M. Forehand and B. Bhushan, "In Situ Studies of Wear Mechanisms in Magnetic Thin-Film Disks," *Tribology Transactions*, Vol. 40, pp. 549-558, 1997.
3. A. Khurshudov, B. Knigge and F. E. Talke, "Tribology of Laser-Textured and Mechanically-Textured Media," *IEEE trans. on Magn.*, Vol. 33, No. 5, pp. 3190-3192, 1997.
4. S. K. Ganapathi and F. E. Talke, "Correlation Between Contact Start/Stop and Contact Speed Drag Testing in Magnetic Head-Disk Tribology," *Journal of Tribology*, Vol. 115, pp. 387-391, 1993.
5. 정구현, "헤드/디스크 인터페이스에서의 표면파손 메커니즘에 관한 연구," 연세대학교 석사학

위 논문, 1997.

6. B. Liu, S. H. Soh, A. Chekanov, S. B. Hu and T. S. Low, "Particle Build-up on Flying Sliders and Mechanism Study of Disk Wear and Head-Disk Interface Failure in Magnetic Disk Drives," IEEE trans. on Magn., Vol. 32, No. 5, pp. 3687-3689, 1996.
7. Kanu G. Ashar, "Magnetic Disk Drive Technology," IEEE Press, pp. 197-207, 1997.
8. P. H. Siegel, "Recording Codes for Digital Magnetic Storage," IEEE trans. Magn., MAG-21, pp. 1344, 1985.