

## 오염입자가 Picoslider의 헤드-디스크 인터페이스 마찰 마모에 미치는 영향

윤의성 · Bharat Bhushan\*

한국과학기술연구원 트라이볼로지연구소  
오하이오주립대학, 기계공학과\*

### Effect of Particulate Contamination on the Friction and Wear of Head-Disk Interface with Picoslider

Eui-Sung Yoon and Bharat Bhushan\*

Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology  
\*Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University, USA

**Abstract** – The effect of particulate contamination on friction and wear between a negative-pressure picoslider and a laser-textured disk was studied. Particles of different concentrations, materials and sizes were injected to the head-disk interface (HDI), consisting of disks with various textures, at the same speed. In a contaminated environment, durability of head-disk interface gradually decreased as the particle concentration increased. Large particles caused HDI failure early and resulted in an extensive damage to the slider and disk surfaces. Hard particles also caused HDI failure earlier and damages more extensive than soft ones. Based on the test results, mechanisms of HDI failure with picoslider were presented.

**Key words** – particle contamination, head disk interface, durability, hard disk drive, picoslider.

#### 1. 서 론

하드디스크 드라이브의 신뢰성에 영향을 미치는 요소로는 디스크의 오염 정도 및 부식 현상을 들 수 있다. 최근 하드디스크의 저장 밀도를 증가시키기 위해, 슬라이더의 크기가 소형화되고 헤드-디스크 인터페이스(HDI)에서의 부상 높이(flying height)가 점차 감소됨에 따라, 이러한 입자의 오염의 영향이 더욱 중요시되고 있다[1]. 이러한 입자들은 하드디스크 드라이브의 제작 조립과정에서 유입된 오염입자이거나 디스크 드라이브의 작동 중에 발생된 마모입자들로, 공기의 흐름을 따라 헤드-디스크 인터페이스로 유입되거나 디스크 또는 헤드의 표면에 붙게 된다. 이로 인하여 하드디스크 드라이브는 작동 중 파손되어 그 안에 저장되어 있는 정보를 잃어버리게 된다.

입자에 의한 하드디스크 드라이브의 오염이 헤드-디스크 인터페이스에 치명적인 손상을 준다는 연구가

많은 연구자들에 의해 연구되어졌다[2]. Tokuyama 등 [3,4]과 Uy[5]는 슬라이더 전면의 테이퍼진 부분에 입자들이 뭉쳐져서 헤드-디스크 인터페이스에서의 유체 압력과 슬라이더의 부상 높이가 감소되어, 헤드-디스크의 접촉과 디스크 마모를 유발시킨다고 하였다. Hiller와 Singh[6,7]은 입자들이 헤드-디스크 인터페이스로 이동하고 슬라이더의 trailing edge를 따라 뭉쳐지는 whisker의 성장 기구(mechanism)를 형광 polystyrene latex 입자를 이용하여 연구하였다. 그들은 whisker의 크기가 부상 높이의 약 3배 정도까지 커질 수 있다고 하였다. Liu 등[8]은 입자들이 공기 베어링 표면의 edge 위와 아래 단에 whisker의 형태로 뭉쳐진다는 것을 발견하였다. 그러나 Koka[9]와 Hiller 와 Brown[10]은 단단한 입자 자신이 슬라이더의 테이퍼진 부분에서 뭉쳐지지 않고 디스크 마모를 유발시킨다고 하였다. Whisker 성장 mechanism은 디스크 위에서 발생된 마모입자들이 trailing edge에서

뭉쳐져서 만들어진다는 것이며, 디스크 마모는 일반적으로 leading edge에 있는 큰 입자들에 의해 발생된다고 알려져 있다.

HDD의 오염 분석을 위한 또 다른 기술들이 Mee 등[11]과 Bhushan[12]에 의해 연구되었다. 입자 오염에 대한 대부분의 연구들은 단 한번 입자를 드라이브 안에 분사하는 방법으로 입자를 오염시켰으나, 한번의 입자 분사는 실제 오염된 드라이브의 작동 조건을 모사 할 수 없으므로, Chandra와 Bhushan[13]은 헤드-디스크 인터페이스의 내구수명에 있어서의 오염 입자의 효과를 연구하기 위하여 시험 기간 중에 계속적으로 입자를 분사함으로써, nanoslider가 장착된 HDI의 트라이볼로지적 성능을 계속적으로 관찰하였다.

슬라이더와 회전하는 디스크 사이에서 오염입자의 운동은 오염에 의해 발생하는 HDI의 파손을 이해하는데 아주 중요한 요소이다. 이렇게 공기중에 떠다니는 오염 입자들은 헤드-디스크 인터페이스의 안쪽과 주변의 공기 흐름에 의해 그 운동이 지배를 받으며, 공기 흐름은 HDD에서 사용되는 디스크 속도, 디스크 표면 형상과 슬라이더 형태에 의해 영향을 받는다. 이러한 요소 외에도, 입자의 재질과 크기 또한 HDI 파손의 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 negative-pressure picoslider와 laser-textured disk를 사용하여 HDI에서의 입자 오염의 효과를 관찰하고자 하였다. 오염된 환경하에서의 내구수명 시험은 입자의 오염 정도, 재질과 크기를 변화

시키며 data zone과 laser-textured zone에서 시험하였다. 마지막으로 picoslider에 대하여 오염된 환경하에서 HDI 파손 메카니즘을 규명하고자 한다.

## 2. 시 험

### 2-1. 시험장치 및 시편

본 연구에서는 상용 디스크 드라이브 시험기(Lotus Technologies Inc, Model No.5038)를 사용하였다. Fig. 1은 헤드-디스크 시험 장치 외에 시험 분위기 조절을 위한 오염도 발생 장치 및 측정 장치들의 전체적 시험 장치의 모습을 보여주고 있다. 헤드-디스크 시험 장치부는 시험시간 동안 주변 환경 조건 제어를 위해 투명 PMMA 재질의 챔버로 밀폐시켰으며, PTFE membrane filter에 의해 여과된 깨끗한 공기를 챔버 내로 계속 공급하여 챔버내의 오염도가 0.001 particles/cc 이하로 유지되도록 하였다. 또한 시험기의 회전 스피들에서 발생하는 오염원을 제거하기 위해 진공 발생기를 이용하여 스피들 하우징으로부터 내부 공기를 흡입하여 챔버 밖으로 방출하였다. 물에 떠 있는 오염 입자를 fluid dispenser를 이용하여 분사함으로써 오염입자를 분리하며 오염입자 공급용 챔버내를 일정 오염도로 유지하도록 하였다. 이 챔버내에서 발생된 공기중에 떠있는 입자들을 시험중 시험기 챔버로 분사함으로써 챔버 내를 입자로 오염시켰다. 시험기 챔버의 오염도는 샘플링 유량이 0.28 lpm인 laser particle counter (PMS Inc., ULPC-

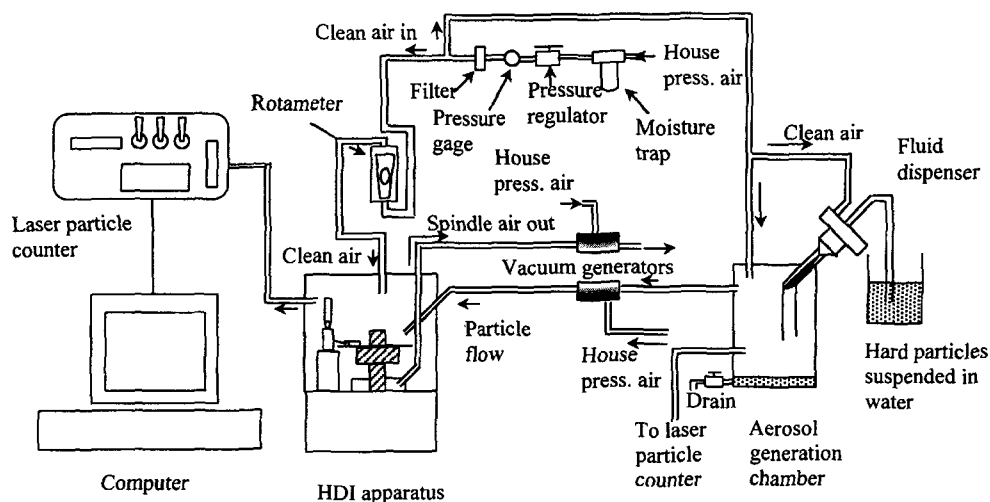


Fig. 1. Schematic view of test apparatus.

1001-CPC-2CH)로 계속적으로 측정하였으며, 각 오염도는 매 30초 동안 0.1-0.3  $\mu\text{m}$ 의 크기의 입자와 0.3  $\mu\text{m}$  보다 큰 크기의 입자의 수를 측정하여 오염입자수로 표시하였다.

오염 입자들은 시험기 챔버 안에서 디스크 중심으로부터 반경 방향으로 80 mm 떨어진 디스크 높이로부터 60 mm 높은 위치에서 수직으로 분사되었다. 슬라이더는 디스크 중심으로부터 32 mm 떨어진 트랙에 놓여져 실험되었으며, 5000 rpm (약 17 m/s)의 속도로 2.2 g의 하중을 가하여 시험하였다. 특별한 경우의 시험은 각각의 시험에서 그 조건을 설명하였다.

슬라이더는 Fig. 2에서와 같이 negative-pressure picoslider (30%)를 사용하였으며, 각 미끄럼 속도에서의 슬라이더의 부상 높이는 Table 1과 같다. 디스크는 직경 95 mm인 laser-textured disk를 사용하였으며, data zone에서의 rms 표면 조도 ( $R_{ms}$ )는 1.3 nm였다. 인터페이스에서 입자 재질의 효과 연구를 위해, 다이아몬드, 알루미늄, 알루미늄, 실리콘의 4종류의 입자를 사용하였으며, 입자 크기 효과를 비교하

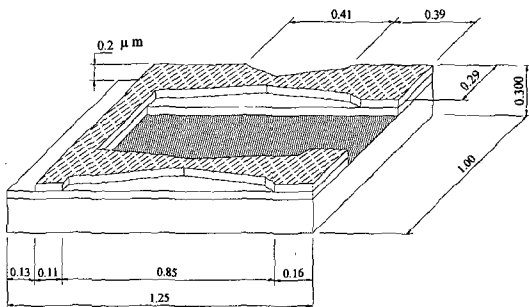


Fig. 2. Schematic views of a negative-pressure picoslider.

Table 1. Flying height for negative-pressure picoslider

Radius (mm)	Flying height (nm) at		
	leading edge	trailing edge	gap
18.4	181	55.3	46.7
20.8	197	53.2	45.0
23.9	215	53.2	45.0
26.9	230	52.2	45.5
29.9	244	52.9	47.0
36.0	266	55.9	49.0
39.1	273	58.2	50.1
42.2	279	61.3	51.2
45.2	284	65.1	52.5

기 위해 크기가 다른 입자들을 사용하였다. 사용된 입자들의 평균 크기는 다이아몬드가 0.33  $\mu\text{m}$ 와 3  $\mu\text{m}$ , 알루미늄이 0.33  $\mu\text{m}$ 와 3  $\mu\text{m}$ , 알루미늄이 2  $\mu\text{m}$ , 실리콘이 2  $\mu\text{m}$ 이었다.

## 2-2. 시험 방법

시험은 입자 오염도, 입자 재질, 입자 크기, 표면 형상 변화에 대하여 HDI가 파손될 때까지 행하였다. HDI의 파손 기준은 내구수명을 그 기준으로 하였으며, 내구수명은 부상 조건에서 마찰력이 다음의 2 조건중 1개의 조건에라도 도달하기 전까지의 접촉회전수로 정의하였다. 첫째는 마찰계수의 변동량이 10%를 넘을 때, 즉 마찰계수가 갑자기 10%이상 증가할 때로, 이러한 변동량은 전형적으로 디스크 표면 손상을 나타내어 주기 때문이다. 둘째는 마찰계수가 시험 시간이 따라 서서히 증가하여 초기 마찰계수의 2 배 이상으로 되었을 때로, 이러한 마찰계수는 HDI의 파손을 야기 시킨다고 생각되기 때문이었다.

평균 마찰력은 시험기간 중 계속적으로 측정하여 10초 간격으로 평균하여 저장하였으며, 입자 오염도 역시 계속적으로 측정하여 30초 간격으로 저장하였다. 시험들은 일반적으로 5000 rpm, data zone에서 입자 오염도 조건을 변화시키며 시험하였으며, HDI의 파손에 미치는 오염도 변화의 영향을 관찰하였다. HDI에서 입자 재질의 효과를 관찰하기 위해 크기가 큰 4 종류의 입자 (3  $\mu\text{m}$  다이아몬드, 3  $\mu\text{m}$  알루미늄, 2  $\mu\text{m}$  알루미늄, 2  $\mu\text{m}$  실리콘)를 사용하였으며, 또한 크기가 작은 2 종류의 입자 (0.33  $\mu\text{m}$  다이아몬드, 0.33  $\mu\text{m}$  알루미늄)도 입자 재질 효과를 관찰하기 위해 사용하였다. 또한 0.33  $\mu\text{m}$ 와 3  $\mu\text{m}$ 의 다이아몬드와 알루미늄 입자를 사용하여 오염입자 크기 효과를 관찰하였다.

시험 후 슬라이더와 디스크 표면은 광학 현미경과 SEM(Scanning Electron Microscope) 및 AFM(Atomic Force Microscope)으로 분석하였다.

## 3. 시험 결과 및 고찰

### 3-1. 입자의 오염도와 크기 효과

Fig. 3 (a)는 laser-textured zone에서 5000 rpm의 속도로 시험 시 입자 크기 변화가 HDI 내구수명에 미치는 영향에 대해 보여주고 있다. 0.33  $\mu\text{m}$ 와 3  $\mu\text{m}$ 의 다이아몬드 입자로 22입자/cc의 오염도 하에서 시

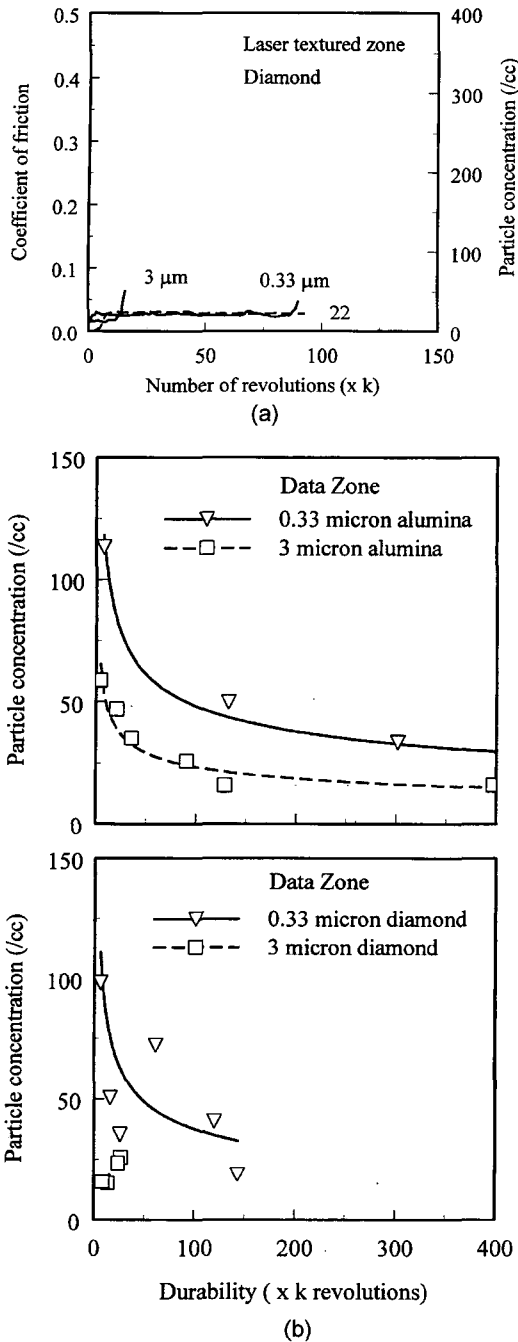


Fig. 3. Durability for the tests conducted with different particle size (a) with diamond particles in the laser-textured zone, and (b) with diamond and alumina particles in the data zone at 5000 rpm or 17 m/s.

험하였으며, 오염하에서 마찰계수의 변화는 전형적인 HDI 파손의 경향을 보여주고 있다. 내구수명은 작은

입자를 사용하였을 때가 큰 입자를 사용했을 때보다 길게 나타났으며, 큰 입자를 사용했을 때의 슬라이더와 디스크의 표면 손상은 Fig. 4에서와 같이 작은 입자를 사용했을 때보다 아주 크게 나타났다. 또한 AFM을 이용한 표면 측정 결과로부터 큰 입자를 사용했을 때의 마모 깊이가 작은 입자를 사용했을 때보다 약 2배 정도 깊게 되었음을 알 수 있었다.

Data-zone에서의 경우에 대하여는 Fig. 3 (b)에 보여주고 있다. 그림에서 모든 입자 크기 및 종류에 관계없이 내구수명은 입자의 오염도가 증가함에 따라 점차 감소함을 알 수 있었다. 즉, 오염도의 증가는 내구수명의 감소를 야기시킴을 알 수 있었다.

내구수명은 입자의 종류에 관계없이 laser-textured zone 에서와 같이 작은 입자를 사용했을 때가 큰 입자를 사용했을 때보다 길게 나타났다. 특히, 3 μm의 다이아몬드 입자를 사용한 경우는 시험 시작 후 바로 HDI가 파손되었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 큰 입자를 사용했을 때의 슬라이더와 디스크의 표면 손상이 아주 크고 깊게 나타났다. AFM을 이용한 표면 측정 결과로부터도 이를 알 수 있었다.

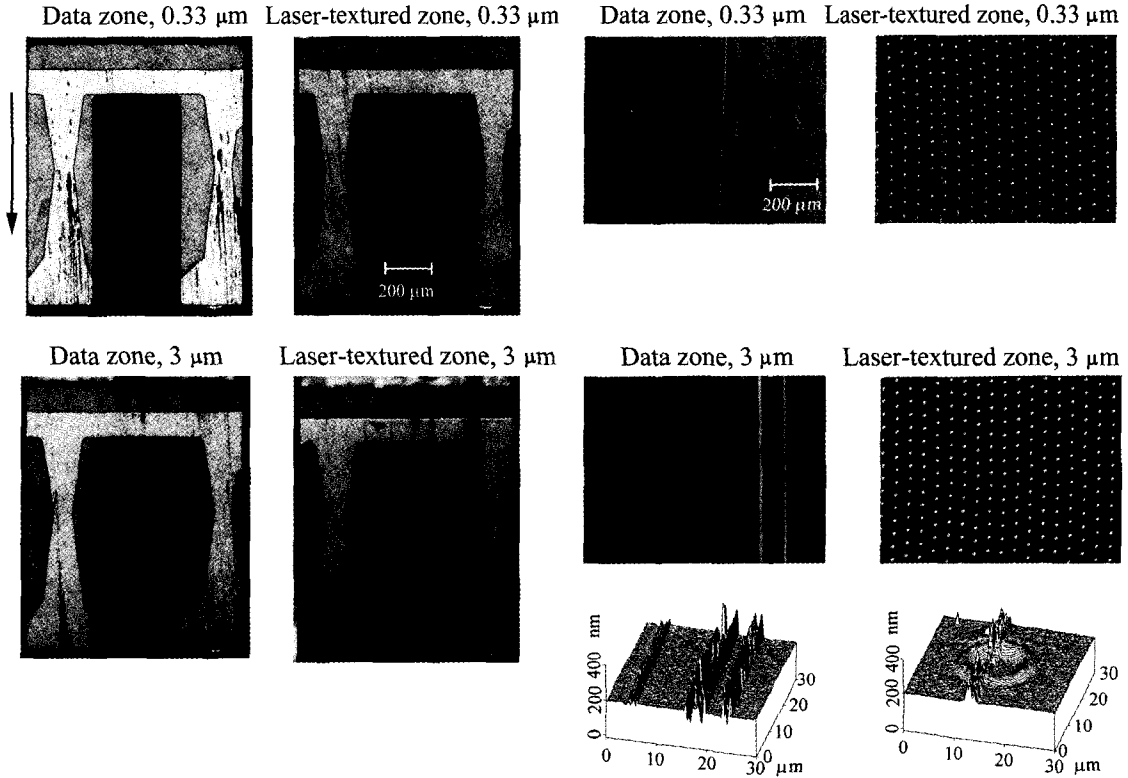
### 3-2. 입자의 오염도와 재질 효과

Fig. 5는 data zone에서 5000 rpm의 속도로 시험 시 입자의 오염도, 재질 및 크기 변화가 HDI의 내구수명에 미치는 영향에 대해 전체적으로 보여주고 있다. 모든 입자 재질과 크기에 대하여 내구수명은 입자의 오염도가 증가함에 따라 점차적으로 감소함을 알 수 있었다.

큰 입자(위쪽)에 대하여는 가장 작은 내구수명을 갖는 3 μm 다이아몬드 입자의 경우를 제외하고는 입자의 재질 종류에 따른 내구수명의 비교는 할 수 없었다. 그러나 단단한 입자로 오염된 경우가 단단하지 않은 입자로 오염된 경우보다 내구수명이 작은 경향을 보이고 있다. 작은 입자의 경우에는 단단한 입자인 다이아몬드 입자로 오염된 경우의 내구수명이 알루미늄의 경우보다 명백히 작게 나타남을 볼 수 있으므로, HDI의 파손이 단단한 입자로 오염된 경우에서 보다 쉽게 발생하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6 (a)에서 보는 바와 같이 크기가 큰 오염입자로 시험을 했을 경우에 시험 후 디스크 표면의 현미경 사진에서 다이아몬드 입자로 시험한 디스크는 손상이 아주 컸으며, 알루미늄으로 시험한 경우는 약간의 손상이 있었고, 알루미늄으로 시험한 경우는 손

**Diamond Particles, 5000 rpm**



**Fig. 4.** Optical micrographs and AFM maps of worn sliders (left) and disks (right) tested with different particle size with diamond particles in the data and the laser-textured zones in Fig. 3.

상을 거의 찾아 볼 수 없었다. AFM으로 손상 부위의 표면을 측정된 결과로부터 알루미늄으로 시험한 경우의 peak-to-peak 마모 깊이는 약 30 nm이었고, 다이아몬드로 시험한 경우는 약 250 nm이었다. 따라서 단단한 입자들이 슬라이더와 디스크 표면에 더 강하게 손상을 미치는 경향이 있음을 알 수 있었다. 작은 오염입자로 시험하였을 경우에는 Fig. 6 (b)에서 보는 바와 같이 다이아몬드 입자로 시험한 디스크의 표면 손상이 알루미늄 입자로 시험한 경우보다 컸으며, 크기가 큰 오염입자에서의 경우와 마찬가지로 단단한 입자들이 슬라이더와 디스크 표면에 더 강하게 손상을 미치는 경향이 있었다.

**3-3. Negative-pressure picoslider의 HDI 파손 기구**

시험 결과들로부터 negative-pressure picoslider는 2 종류의 파손 기구에 의해 HDI가 파손됨을 알 수 있었다. 첫째는 작은 마모 또는 오염 입자들이 뭉쳐져

서 형성된 입자에 의해 파손된다는 것이고, 둘째는 단지 하나의 오염 또는 마모된 입자에 의해 파손된다는 것이다.

작은 마모 또는 오염 입자들이 뭉쳐져서 형성된 입자들에 의한 HDI의 파손 기구를 Fig. 7에서 잘 설명하여 주고 있다. 그림에서는 HDI의 파손 모드의 순서를 잘 보여주고 있으며, 여기서 그림은 파손 기구를 설명하기 위하여 간략히 표현하였다. 1단계에서는 공기 중에 떠다니는 입자들이 디스크가 회전함에 따라 슬라이더와 디스크 인터페이스로 접근하여 오며 어떤 입자들은 디스크 표면에 부착되기도 한다. 2단계에서는 공기 중에 떠다니는 입자들과 디스크 표면에 붙어 있던 입자들이 슬라이더의 rail과 디스크 표면에 부딪쳐 표면을 손상시키며 마모입자를 발생시킨다. 3단계에서는 공기 중에 떠다니는 입자들과 마모입자들이 디스크 표면에 존재하는 윤활유와 함께 leading edge에서 뭉쳐진다. Leading edge에

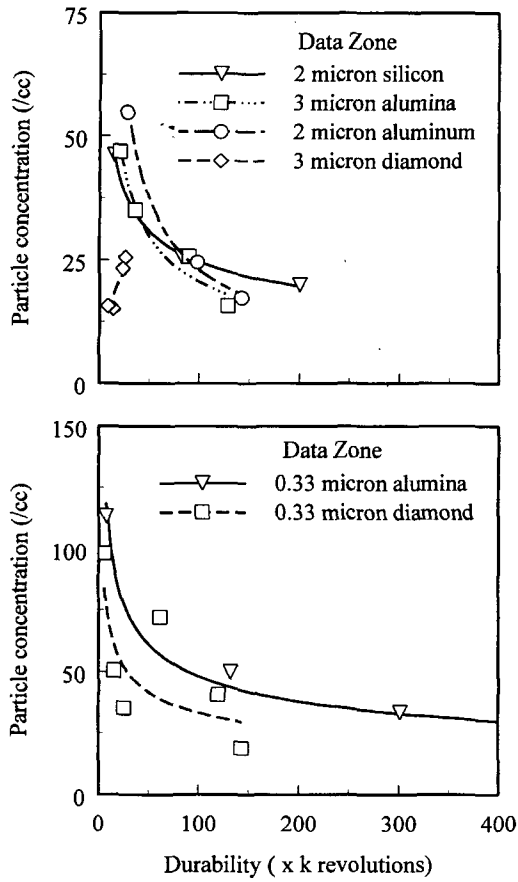


Fig. 5. Durability for the tests conducted with different particle materials and size in the data zone at 5000 rpm or 17 m/s.

몽쳐져 있는 입자들은 마침내 그 크기가 임계 크기를 초과할 때 떨어져 나간다. 4단계에서 보는 바와 같이 큰 입자들이 HDI로 들어가게 되어 마찰계수를 증가시키고, 1개 또는 그 이상의 몽쳐진 입자들이 디스크와 슬라이더의 표면을 손상시키고 결국에는 HDI를 파손시킨다. EDS(Energy dispersive X-ray spectrometry) 결과로부터 몽쳐진 입자들이 주로 디스크와 슬라이더의 코팅 층으로부터 발생된 탄소 성분의 물질임을 알 수 있었다. 몽쳐진 입자들은 결국 점차적으로 또는 갑작스럽게 마찰계수를 증가시킨다. 손상된 스크래치의 깊이는 몽쳐진 입자의 강도와 몽쳐진 정도에 의해 영향을 받는다. 만약 몽쳐진 입자들이 디스크와 슬라이더의 표면보다 강도가 작다면, 입자들은 슬라이더와 디스크 사이에서 압착되어 슬라이더와 디스크 표면 위에 Fig. 8 (a)에서와 같이 물

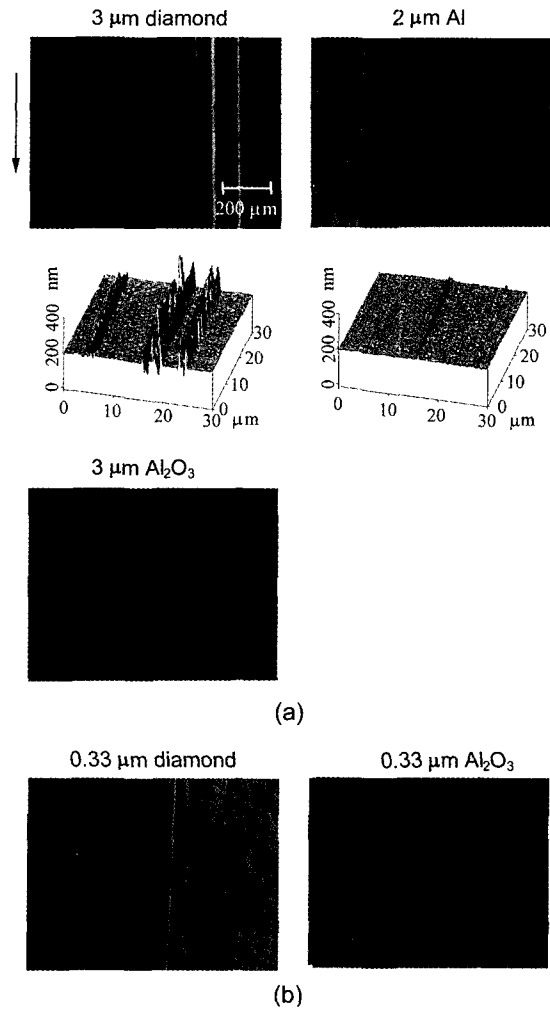


Fig. 6. Optical micrographs and AFM maps of worn disks tested with different particle materials and size in the data zone in Fig. 5.

질 전이될 것이다.

단 하나의 입자에 의한 HDI 파손 기구는 three-body abrasive 마모 기구와 유사하다. 입자의 크기가 부상 높이 보다 작다면 입자는 HDI로부터 빠져나갈 수 있고, 큰 입자가 HDI로 들어오면 슬라이더와 디스크에 손상을 주며 진행 중에 슬라이더를 들어올릴 것이다. 이는 three-body abrasive mechanism 의해 마찰계수를 증가시키며 HDI를 파손시킨다. 표면 손상 스크래치의 깊이는 슬라이더의 현가 장치의 강성, 입자경도와 입자크기에 영향을 받는다. 스크래치의 수는 HDI로 들어간 입자수에 의존할 것으로 사료된다. 내구수명 또한 입자의 경도에 영향을 많이

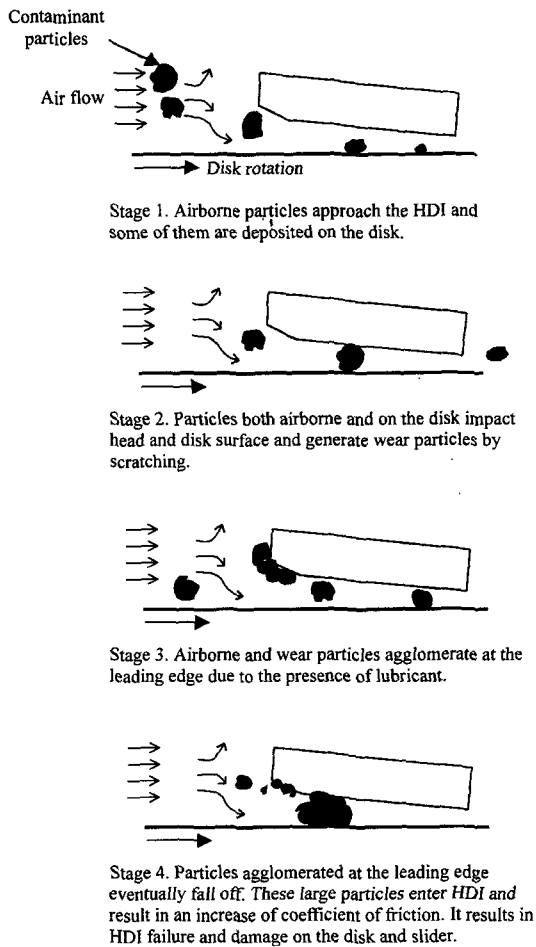
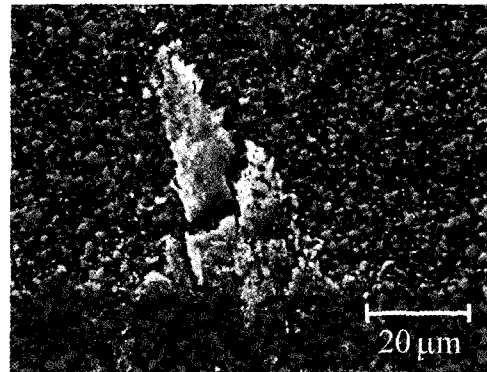


Fig. 7. Schematics showing particle agglomeration at the leading edge for negative- pressure picoslider. The schematics are not to scale and the horizontal scale to the vertical scale ratio is several orders larger than that shown here.

받는다. Fig. 8 (b)는 한 개의 큰 다이아몬드 입자가 디스크에 스크래치를 형성시키며 실같은 마모입자들을 슬라이더의 전면에 쌓는 경우의 모습을 보여주고 있다.

몽쳐진 입자들에 의한 파손 기구는 저속에서 더 뚜렷하게 나타난다. 저속에서는 작은 입자들만이 헤드와 슬라이더의 인터페이스에 유입될 수 있으므로, 이러한 입자들이 디스크 윤활유의 도움으로 몽쳐지고, 결국 파손을 유도하게 된다. 반면에 고속에서는 한 개의 입자에 의한 파손 기구가 뚜렷하게 나타난다. 슬라이더와 디스크 표면에 큰 손상을 줄 수 있



(a)



(b)

Fig. 8. SEM images of (a) agglomerated particles smeared on the slider for a test with  $0.33 \mu\text{m}$  diamond particles at 1000 rpm, and (b) accumulated wear particles generated by single particle in front area of slider for a test conducted with  $3 \mu\text{m}$  diamond particles at 5000 rpm in the data zone of laser-textured disk.

는 큰 입자들이 인터페이스에 유입될 수 있기 때문이다. 그러나, 인터페이스의 공간이 커지는 것은 내구수명에 영향을 미치는 돌기 접촉을 감소시킬 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

오염입자가 picoslider의 헤드-디스크 인터페이스에 미치는 영향에 대하여 이상과 같은 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면 형상의 효과에 대해서는 data zone에서 실험했을 때가 laser-textured zone에서 보다 내구 수명이 길었고 마찰계수도 낮았다.

2. 입자의 오염도가 증가함에 따라 내구수명이 점차적으로 증가하였다. 오염입자의 재질의 효과는 큰 입자들 사이에서는 명확히 구별되지 않았으나 그 경향을 작은 입자들 사이에서는 명확하게 알 수 있었다. 단단한 입자로 오염되었을 때의 내구 수명이 단단하지 않은 입자보다 작게 나타났다. 또한 단단한 입자는 디스크와 슬라이더 표면 위에 깊고 큰 손상을 주었다.

3. 큰 입자들은 작은 입자들보다 HDI를 빨리 파손시키고 디스크와 슬라이더에 손상을 심하게 주며 내수 수명 또한 짧았다.

4. HDI의 파손 기구는 작은 마모 또는 오염 입자들이 뭉쳐져서 형성된 입자에 의한 것과 하나의 큰 오염 또는 마모된 입자에 의한 것의 2 종류의 파손 기구에 의해 발생됨을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Bhushan, B., *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices*, Second ed., Springer-Verlag, New York, 1996.
2. Hiller, B., "Contaminant Particles: The Microtribology Approach," in *Handbook of Micro/Nanotribology* (B. Bhushan, ed.), pp.505-557, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1995.
3. Tokuyama, M., Tanaka, K., Yamaguchi, Y., Takeuchi, Y., "Flying characteristics of sliders with dust adhering," 932nd Conf. Japanese Society of Mechanical Engineers, 850 (2), 1985.
4. Tokuyama, M., Hirose, S., "Dynamic flying characteristics of magnetic head slider with dust," *ASME Journal of Tribology*, 116, pp.95-100, 1994.
5. Uy, J.C., "Head/disk interface failure mechanism," *IEEE Trans. Magn.*, 26, pp.783-785, 1990.
6. Hiller, B., Singh, G.P., "Interaction of contaminant particles with the particulate slider/disk interface," *Adv. Info. Storage Syst.*, ASME, New York, 2, pp.173-180, 1991.
7. Hiller, B., Singh, G.P., "Mechanism for formation of whiskers on a flying magnetic recording slider," *IEEE Trans. Magn.*, 30, pp.1499-1503, 1994.
8. Liu, B., Soh, S.H., Chekanov, A., Hu, S.B., Low, T.S., "Particle build-up on flying sliders and mechanism study of disk wear and head-disk interface failure in magnetic disk drives," *IEEE Trans. Magn.*, 32, pp.3687-3689, 1996.
9. Koka, R., "Effect of Fine Particles on the Slider/Disk Interface in Rigid Disk Drives," *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Systems IV* (B. Bhushan and N.S. Eiss, Jr. ed.s), STLE SP-26, Park Ridge, IL, pp. 40-46, 1989.
10. Hiller, B., Brown, B., "Interaction of individual alumina particles with the head/disk interface at different speeds," *Adv. Info. Storage Syst.*, ASME, New York, 5, pp.351-361, 1994.
11. MEE, P.B., Smallen, M.J., Vickers, D.J., "Management of disk drive component microcontamination," *Insight(IDEMA)*, March/April. 10, pp.1-, 1997.
12. Bhushan, B., Chandra, S., "Detection and sizing of particulate contamination in rigid drives: instrument and sampling techniques," *IEEE Trans. Magn.*, Vol 35, pp956-962, 1999
13. Chandra, S., Bhushan, B., "Effect of particulate contamination on the friction and wear of magnetic head-rigid disk interface," *Proc. Instn Mech. Engrs Part J: J. Eng. Tribol*, Vol. 214, pp. 493-505, 2000.