

오염입자가 pico/nano-slider의 마찰 마모에 미치는 영향

윤의성 · Bharat Bhushan*

한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터

*Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University, USA

Effect of Particulate Contamination on the Friction and Wear of Pico/Nano-Slider

Eui-Sung Yoon and Bharat Bhushan*

Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

*Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University, USA

Abstract – The effect of particulate contamination on the friction and wear between a negative-pressure picoslider/tri-pad nanoslider and laser-textured disk was studied. Particles of different concentration were injected at the head-disk interface consisting of disks with various textures and slider types at different speed. Durability increased and coefficient of friction decreased as the disk speed increased in a contaminated environment. Frictional characteristics and durability in the data zone were better than those in the laser-textured zone. It was also found that durability of head-disk interface (HDI) decreased as the particle concentration increased. The interface durability with a picoslider was better than that with a nanoslider at any condition in a contaminated environment. Based on the test results, mechanisms were proposed to explain the reasons why durability with a picoslider was superior to that with a nanoslider.

Keywords – particle contamination, head-disk interface, durability, hard disk drive, picoslider, nanoslider.

1. 서 론

하드디스크의 저장 밀도를 증가시키기 위해, 슬라이더의 크기가 소형화되고 헤드-디스크 인터페이스(HDI)에서의 부상 높이(flying height)가 점차 감소됨에 따라, 입자의 오염이 하드디스크 드라이브의 성능과 내구수명에 미치는 영향이 중요시되고 있다[1]. 이러한 입자들은 하드디스크 드라이브의 제작, 조립과정에서 유입된 오염입자이거나 디스크 드라이브의 작동 중에 발생한 마모입자들로, 디스크 또는 헤드의 표면에 달라 붙거나 공기의 흐름을 따라 헤드-디스크 인터페이스로 유입되게 된다. 따라서 이러한 오염 입자들에 의해 HDI의 파손을 초래하게 되며, 결국 작동 중인 하드디스크 드라이브를 파손시켜 그 안에 저장되어 있는 정보를 잃어버리게 한다.

헤드-디스크 인터페이스에 치명적인 손상을 주는 오염입자에 관하여 많은 연구자들이 연구하였다[2].

HDI의 파손은 작은 마모입자 또는 오염입자들이 뭉쳐져서 형성된 입자에 의해 발생되거나 혹은 하나의 큰 오염 또는 마모된 입자에 의해서도 발생된다[3]. 슬라이더의 테이퍼진 부분에 입자들이 뭉쳐지면, 헤드-디스크 인터페이스의 유체 압력과 슬라이더의 부상 높이가 감소되며, 헤드-디스크가 접촉되어 헤드-디스크의 마모를 발생시키며 파손된다[4-6]. 슬라이더의 trailing edge를 따라 뭉쳐지는 입자, 즉 whisker의 성장 mechanism은 디스크 위에서 발생한 마모입자들에 의해 형성되어지며, whisker의 크기는 부상 높이의 약 3배 정도이고, 이러한 leading edge에 있는 큰 입자들에 의해 디스크가 마모 되어진다[7-9]. 헤드-디스크 인터페이스에서의 입자 운동 기구(mechanism)도 형광 polystyrene latex 입자를 이용하여 연구된 바 있다[7,8]. 슬라이더와 회전하는 디스크 사이에서 오염입자의 운동은 오염에 의해 발생하는 HDI의 파손을 이해하는데 중요한 요소이다. 이러한 입자들의 움직임

은 슬라이더-디스크 인터페이스 안과 주변의 공기 흐름에 의해 지배되며, 디스크 속도, 디스크 표면 형상과 슬라이더 형태에 의해 영향을 받는다. 또한, 경한 입자 자신에 의해서도 테이퍼진 부분에서 디스크를 마모시킬 수 있다[10,11].

입자 오염에 대한 연구들이 과거에는 입자를 드라이브 안에 한번만 분사하여 오염시킨 상태로 밀폐시켜 시험하였으나, 한번의 입자 분사 방법으로 실제 오염된 작동 조건을 모사 할 수 없기 때문에, 시험기간 중에 계속적으로 입자를 분사시켜 드라이브 안을 입자들로 일정 오염도를 유지시키며, 헤드-디스크 인터페이스의 내구수명에 있어서의 입자의 효과를 연구하기도 하였다[12,13].

본 연구에서는 picoslider/nanoslider와 laser-textured disk를 사용하여 HDI에서의 입자 오염의 효과를 관찰하였다. 오염된 환경하에서 HDI에 미치는 속도와 표면 형상의 효과를 발견하기 위해 미끄럼 속도의 변화시키며 data zone과 laser-textured zone에서 시험하였다. 또한, 오염된 환경하에서 picoslider와 nanoslider의 내구수명을 디스크 속도, 입자 크기 변화에 따라 비교하였으며, 내구수명에 있어 picoslider와 nanoslider의 차이를 설명할 수 있는 mechanism을 제안하였다.

2. 시 험

2-1. 시험장치 및 시편

본 연구에서는 헤드-디스크 시험에 상용으로 사용

되는 CSS(Contact Start and Stop) 시험기(Lotus Technologies Inc, Model No.5038)를 사용하였으며, Fig. 1에 전체 시험 장치의 모습을 보여주고 있다. 시험기는 시험시간 동안 주변 환경 조건을 제어하기 위하여 투명 PMMA 재질의 챔버로 밀폐시켰으며, PTFE membrane filter에 의해 여과된 깨끗한 공기를 챔버 내로 유량 25 lpm으로 계속 공급하여 챔버내의 오염도가 0.00 1/cc 이하로 유지되도록 하였다. 시험기의 회전 스피들에서 발생하는 오염원을 제거하기 위해 진공 발생기를 이용하여 스피들 하우징으로부터 흡입하여 챔버 밖으로 내어보냈다.

Fluid dispenser에 의해 발생된 깨끗한 공기중에 떠 있는 시험 대상 입자들을 시험중 계속적으로 챔버로 분사함으로써 챔버 내를 일정 오염도로 오염시켰다. 시험 챔버의 오염도는 샘플링 유량이 0.28 lpm인 laser particle counter (PMS Inc., ULPC-1001-CPC-2CH)로 계속적으로 측정하였으며, 각 오염도는 매 30초 동안 0.1-0.3 μm 의 크기의 입자와 0.3 μm 보다 큰 크기의 입자의 수를 누적하여 측정하여 단위 부피(cc)당 오염입자수로 표시하였다.

하드디스크 드라이브의 작동 조건을 모사하기 위해, 디스크 중심으로부터 32 mm 떨어진 트랙에서 5000 rpm (약 17 m/s)의 속도로 2.2 g의 하중을 가하여 시험하였으며, 특별한 경우의 시험은 각각의 시험에서 그 조건을 명시하였다. 입자들은 시험기 안쪽에서 디스크 중심으로부터 반경 방향으로 80 mm 떨어지고 디스크 높이로부터 60 mm 높은 위치에서 수직으로 분사되었다[12].

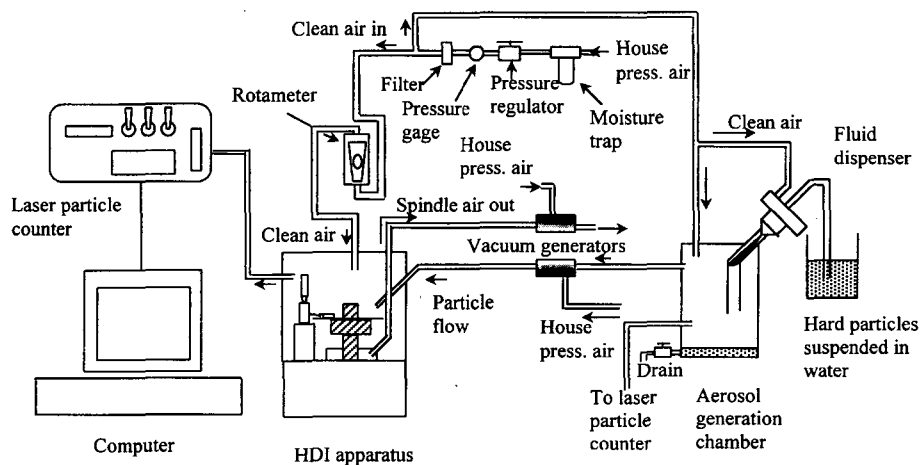


Fig. 1. Schematic view of test apparatus.

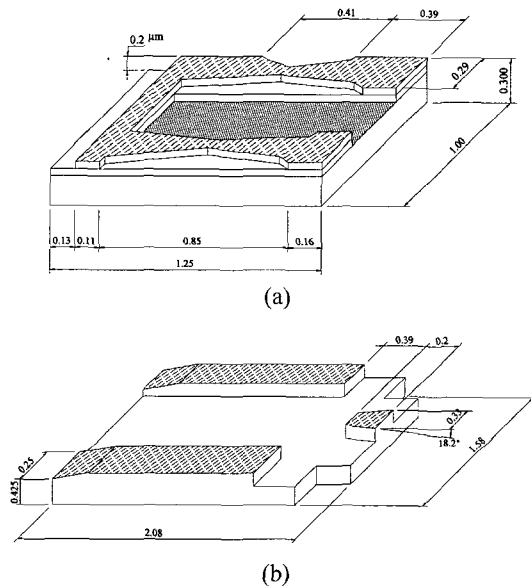


Fig. 2. Schematic views of (a) a negative-pressure picoslider, and (b) a tri-pad type nanoslider.

슬라이더 크기에 따른 오염도 하에서의 슬라이더 성능 비교를 위해 슬라이더는 negative-pressure picoslider (30%)와 tri-pad type nanoslider (50%)를 사용하였으며, Fig. 2에 그 모습들을 보여주고 있다. 각 미끄럼 속도에서의 각 슬라이더의 부상 높이를 측정 한 결과는 Table 1과 같다. 직경 95 mm인 laser-textured disk가 사용되었으며, data zone 에서의 rms 표면 조도 (R_{ms})는 1.3 nm이었다. 사용된 입자들은 평균 직경이 각각 0.33 μm 와 3 μm 인 다이아몬드와 알루미나 입자였다.

Table 1. (a) Flying height for negative-pressure picoslider

Radius (mm) @ 5400 rpm	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

Table 1. (b) Flying height for tri-pad type nanoslider

Radius (mm) @ 4500 rpm	Flying height (nm) at		
	leading edge	trailing edge	tail pad
19.1	319	87	16.8
21.3	346	95	25.7
23.7	375	107	28.3
28.7	431	124	31.1
31.2	457	128	31.1
33.7	481	138	30.6
38.7	510	150	30.4
42.5	554	157	30.2
44.8	573	162	31.4

2-2. 시험 방법

시험은 각기 다른 회전 속도 (rpm), 표면 형상, 입자 오염도, 입자 크기에 대하여 HDI가 파손될 때까지 행하였다. 평균 마찰력은 시험기간 중 계속적으로 측정하여 10초 간격으로 평균하여 저장하였으며, 입자 오염도 역시 계속적으로 측정하여 30초 간격으로 저장하였다. HDI에서의 속도 효과를 관찰하기 위해 0.33 μm 다이아몬드 입자로 1 cc당 22개의 입자 오염도로 하여 data zone에서 1000, 3000, 5000, 7000 rpm으로 속도를 변화시키며 시험하였다. 또한 표면 조직의 효과를 관찰하기 위해 laser-textured zone 에서 200, 3000, 5000 rpm으로 속도를 변화시키며 시험하였다. 시험들은 일반적으로 5000 rpm, data zone 에서 입자 오염도 조건을 변화시키며 시험하였다.

시험은 HDI의 파손 발생 시까지 하였으며, 파손 기준은 내구수명을 그 기준으로 하였고, 내구수명은 flying 조건에서 마찰력이 다음의 2 조건 중 1개의 조건에라도 도달하기 바로 전까지의 접촉회전수로 정의하였다. 첫째는 마찰계수의 변동량이 10%를 넘을 때, 즉 마찰계수가 갑자기 10% 이상 증가할 때로, 이 변동량이 전형적으로 디스크 표면에 손상을 주기 때문이다. 둘째는 마찰계수가 시험 시간에 따라 서서히 증가하여 초기 마찰계수의 2배 이상으로 되었을 때로, 이 마찰계수는 HDI의 파손을 발생 시킨다고 생각되기 때문이다.

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

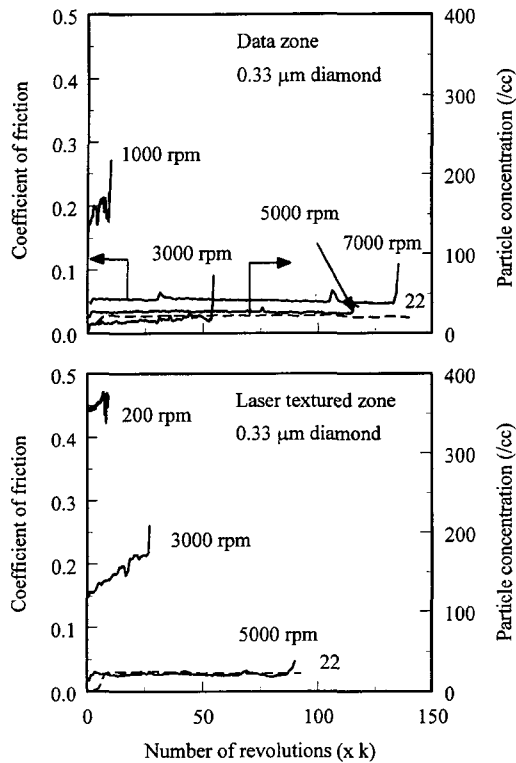


Fig. 3. Coefficient of friction as a function of number of revolutions for tests conducted in the data zone and the laser-textured zone at different speeds at a particle concentration of 22 particles/cc.

3. 시험 결과 및 고찰

3-1. 속도와 표면 형상의 효과

Fig. 3은 data zone과 laser-textured zone에서 디스크 속도(rpm) 변화에 따른 picoslider와의 마찰계수의 변화를 보여주고 있다. 시험은 $0.33\ \mu\text{m}$ 다이아몬드 입자로 22입자/cc의 오염도 하에서 시험하였다. 내구수명이 디스크의 속도가 증가함에 따라 data zone과 laser-textured zone 모두에서 증가함을 볼 수 있다. 특히 data zone에서는 1000 rpm에서의 내구수명이 가장 작은 반면에 마찰계수는 가장 크게 나타났다. 이 속도에서는 슬라이더가 적절한 부상 높이와 피치각(pitch angle)을 갖지 못하기 때문에, 슬라이더가 디스크 위에서 끌리거나 디스크와 부분적으로 접촉을 하게 될 것이다. 따라서 낮은 속도에서는 마찰계수가 높고 내구수명이 작아지게 될 것이다. 디스크의 속도가 증가함에 따라, 슬라이더와 디스크 사이의 간

극이 증가하여 트라이볼로지적 특성이 좋아 질 것이다. 이는 Fig. 4(a)에서 보여주는 것처럼 마모된 슬라이더와 data zone에서의 디스크의 광학 현미경 사진에 의해 쉽게 설명될 수 있다. 1000 rpm에서 슬라이더의 스크래치 자국은 슬라이더의 앞쪽 부분에서만 볼 수 있지만, 3000 rpm에서는 슬라이더에 전면에 걸쳐 불규칙하게 분포되어 있음을 볼 수 있다. 5000과 7000 rpm에서는 스크래치 자국이 슬라이더의 뒤쪽 부분에 위치하고 있음을 볼 수 있다. 1000 rpm에서는 leading rail에서의 부상 높이가 낮기 때문에 입자들이 인터페이스 내로 쉽게 들어갈 수 없을 것이다. 따라서 입자들이 슬라이더의 전면 부위에 묻쳐져 슬라이더의 앞쪽 부분에 주로 손상을 주게 된 것으로 생각된다. 그러나 디스크의 속도가 낮기 때문에 입자들이 충돌되는 힘이 작아 슬라이더와 디스크의 손상은 크지 않았고 스크래치 자국도 깊지 않았다. 3000 rpm에서는 부상 높이가 1000 rpm 보다는 상대적으로 높아서 더 많은 입자들이 인터페이스로 들어 갈 수 있을 것이므로, 스크래치 자국은 슬라이더 전면에 걸쳐 분포되어 있었으며, 슬라이더와 디스크 위의 손상은 1000 rpm의 것보다 더 심했으며 스크래치 깊이도 더 깊었다. 5000과 7000 rpm에서는 부상 높이가 슬라이더와 디스크의 접촉을 최소화하기에 충분할 만큼 높기 때문에, 인터페이스 내에 들어온 대부분의 작은 입자들은 어떠한 스크래치도 야기시키지 않고 trailing edge를 통해 빠져나갈 수 있다. 그러나, trailing edge에서의 간극(gap)이 leading edge에서의 간극보다 작기 때문에, 인터페이스에 들어온 큰 입자들이 슬라이더의 뒷부분에서 디스크와 접촉하여 스크래치 자국을 낼 것이다. 디스크 표면 위의 손상은 깊은 스크래치 자국과 함께 심하게 나타났으며, 특히 5000 rpm으로 시험한 디스크의 스크래치를 AFM으로 측정된 깊이는 약 150 nm이었다.

마찰계수는 디스크 속도가 증가함에 따라 data zone과 laser-textured zone 모두에서 감소하였다. Fig. 4(b)는 laser-textured zone에서 시험한 슬라이더와 디스크에 대한 각 시험 속도에서의 현미경 사진을 보여주고 있다. 이는 data zone에서의 속도 변화에 따른 손상의 경향과 유사함을 보여주고 있다. 즉, 저속에서 슬라이더의 손상은 슬라이더의 앞쪽 부위에서 볼 수 있었으며, 고속에서는 슬라이더의 뒤쪽 부위에 나타나고 있음을 알 수 있었다. 따라서 부상 높이는 입자의 오염 조건하에서 내구 수명과 마찰계수

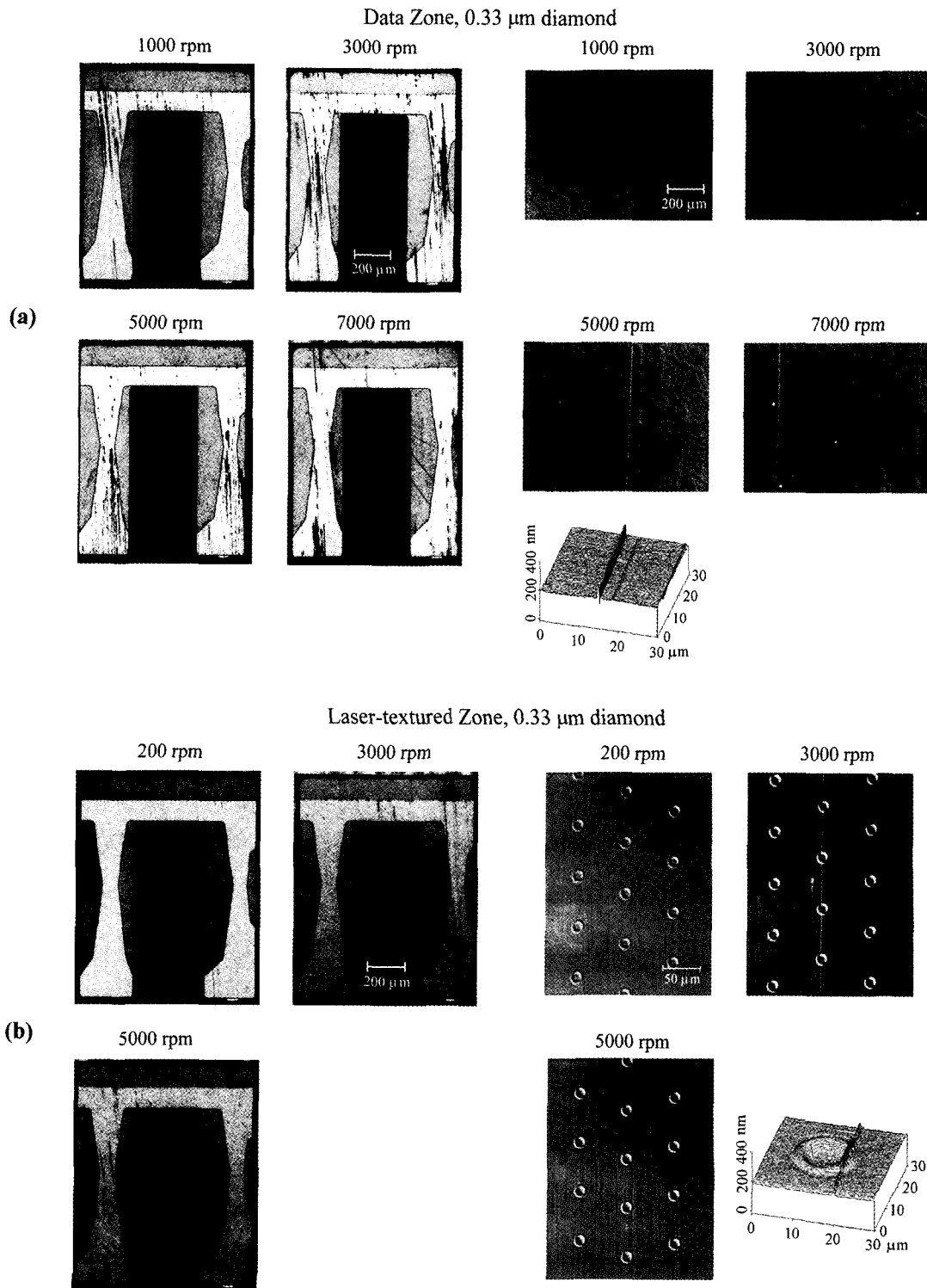


Fig. 4. Optical micrographs and AFM map of worn sliders (left) and disks (right) tested (a) in the data zone, and (b) in the laser-textured zone at different speeds in Fig. 3.

에 영향을 미치는 중요한 요소임을 알 수 있었다.

속도 변화에 따른 내구 수명과 마찰계수의 경향은 data zone과 laser-textured zone에서 모두 비슷하였다. 그러나 laser-textured zone에서의 마찰계수가 data zone에서보다 높은 반면에 내구 수명은 data zone에서 보다 짧았다. 이는 laser-textured zone 이 data zone과 비교해 볼 때 입자의 오염 때문에 쉽게 손상되는 경향이 있고 HDI를 쉽게 파손시킨다고 생각된다. 이는 laser-textured zone에서 슬라이더가 bump 위를 지나갈 때 슬라이더와 디스크 사이의 간극이 갑자기 감소하기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

3-2. picoslider와 nanoslider의 내구수명 비교

Fig. 5는 0.33 μm 크기의 입자로 주어진 오염도 하에서 data zone과 laser-textured zone에서 회전속도 변화에 따른 nanoslider와의 마찰계수 변화를 보여주

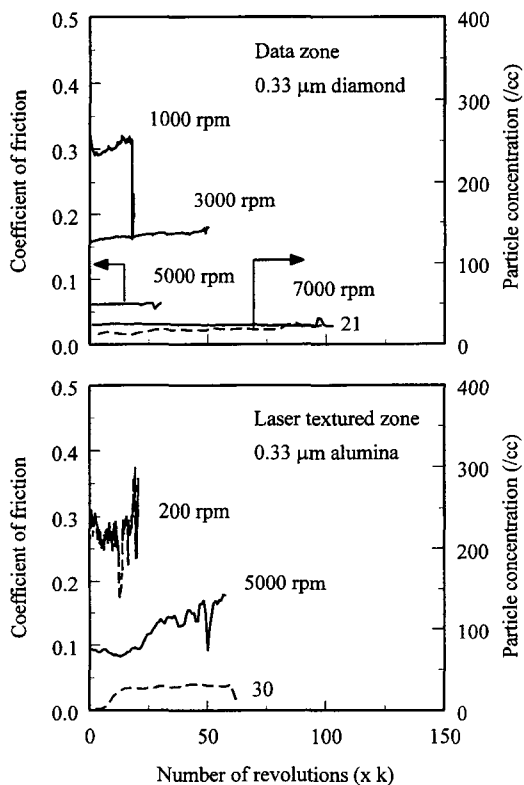


Fig. 5. Coefficient of friction as a function of number of revolutions for the tests conducted in the data zone and the laser-textured zone at different speeds with nanoslider at a particle concentration of 22 particles/cc (Chandra and Bhushan, 2000).

고 있다. 내구수명은 Fig. 3의 picoslider의 경우에서와 마찬가지로 디스크의 속도가 증가함에 따라 data zone과 laser-textured zone 모두에서 증가하였다. 또한, 마찰계수는 디스크 속도가 증가함에 따라 data zone과 laser-textured zone 모두에서 감소하였다. 즉, 내구 수명 및 마찰계수의 속도에 의한 영향은 picoslider나 nanoslider 모두 같은 경향을 보여 주었다.

Fig. 3과 Fig. 5를 비교해 보면 picoslider를 사용했을 때의 마찰계수가 nanoslider를 사용했을 때보다 data zone과 laser-textured zone 모두에서 또한 모든 회전속도에서 전체적으로 낮게 나타났다. Picoslider를 사용했을 때의 내구수명도 nanoslider를 사용했을 때보다 data zone과 laser-textured zone 모두에서 또한 모든 회전속도에서 길게 나타났다.

Fig. 6(a)는 picoslider와 nanoslider의 내구수명 비교를 위해 0.33 μm 크기의 다이아몬드와 알루미늄 입자를 사용하여 5000 rpm으로 data zone에서 시험 시 오염도 변화에 따른 내구수명 변화를 요약하여 보여 주고 있다. 입자 및 슬라이더의 종류에 관계없이 내구수명은 입자의 오염도가 증가함에 따라 점차 감소를 알 수 있다. 즉, 오염도의 증가는 내구수명의 감소를 야기시킴을 알 수 있었다. 또한 picoslider의 내구수명이 입자의 종류에 관계없이 nanoslider 보다 길다는 것을 알 수 있었다. 큰 알루미늄 입자(3 μm)의 경우에도(Fig. 6(a) 참조) picoslider의 내구수명 또한 nanoslider 보다 길게 나타났다. 따라서 오염된 환경 하에서 picoslider의 내구수명이 nanoslider 보다 우수하다고 말할 수 있다.

시험 결과들로부터 오염된 환경 하에서 picoslider가 nanoslider 보다 우수한 이유를 규명하기 위하여 다음과 같은 두 변수를 제안하였다(Fig. 7 참조). 첫째는 슬라이더의 leading edge로 입자 한 개가 들어갈 수 있는 시간(t_p)으로, 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$t_p = \frac{1}{N \times w \times h \times v} \times 10^6$$

여기서, N 은 입자 오염도로 단위 cc당의 입자의 수이고(particles/cc), w 는 슬라이더의 폭(mm), h 는 leading edge의 부상 높이(nm), v 는 디스크 회전속도(m/s)이다. 만약, $N=25$ particles/cc, $v=16.8$ m/s(5000 rpm)라고 가정하면 picoslider와 nanoslider에 대한 t_p 는 다음과 같다.

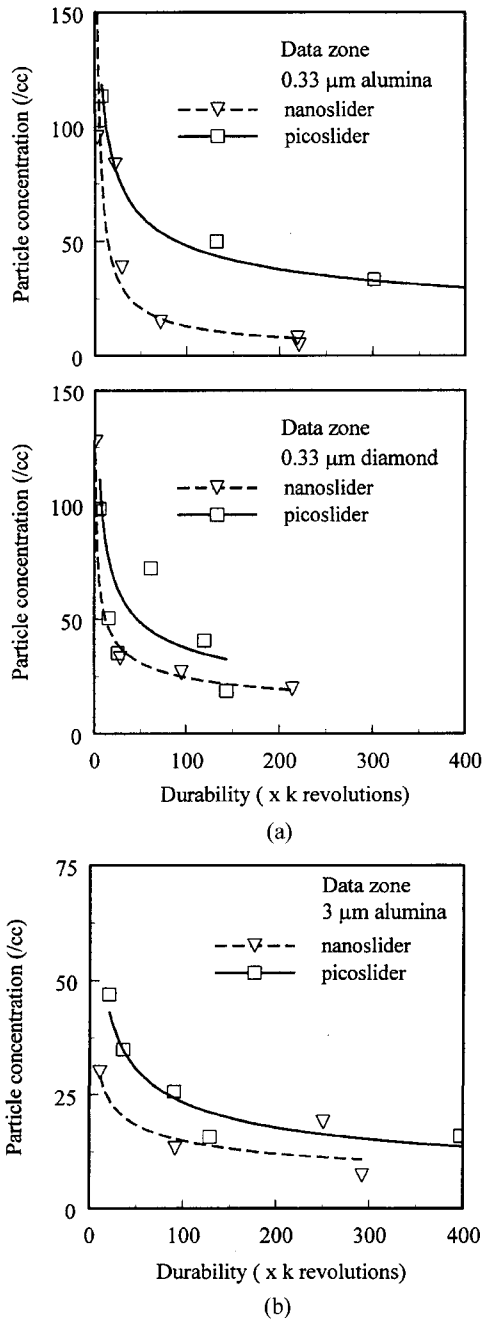


Fig. 6. Durability for the tests conducted with different sliders (a) with 0.33 μm alumina and diamond particles, and (b) with 3 μm alumina powder in the data zone at 5000 rpm or 17 m/s.

$$(t_p)_{\text{picoslider}} = 9.8 \text{ s/particle } (w = 1.00 \text{ mm}, h = 243 \text{ nm})$$

$$(t_p)_{\text{nanoslider}} = 3.1 \text{ s/particle } (w = 1.58 \text{ mm}, h = 487 \text{ nm})$$

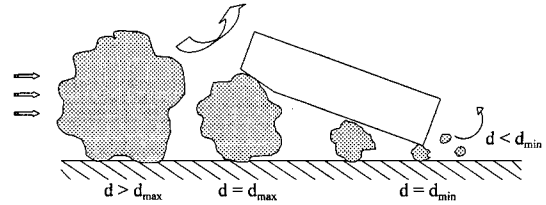


Fig. 7. Schematic explanation of the range of particle size which can reside at HDI.

따라서 입자 1개가 슬라이더의 leading edge로 들어갈 수 있는 시간이 nanoslider의 경우보다 약 1/3 정도로 짧다. 즉, nanoslider의 경우가 picoslider의 경우보다 같은 시간에 3배 정도의 입자가 많이 들어갈 수 있다. 따라서 nanoslider의 내구 수명이 짧아질 것이다.

둘째는 HDI 안에 존재할 수 있는 입자 크기의 범위 (d)로, 슬라이더의 leading edge와 trailing edge의 부상 높이에 의해 결정되어진다. 앞에서와 같은 조건하에서 picoslider의 d의 범위는 44~243 nm이고, nanoslider의 d의 범위는 30~487 nm로, nanoslider의 d의 범위가 picoslider의 범위보다 넓으므로, HDI의 파손이 쉽게 발생할 수 있으며, 따라서 nanoslider의 경우가 내구수명이 작게 될 것이다.

4. 결 론

오염입자가 pico/nano-slider의 마찰 마모에 미치는 영향에 대하여 이상과 같은 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 오염된 환경하에서 picoslider와 nanoslider 모두에서, 입자의 오염도가 증가함에 따라 내구수명이 점차적으로 감소하였으며, 디스크의 속도가 증가함에 따라 내구 수명은 증가하였고 마찰계수는 감소하였다. 이는 슬라이더와 디스크 표면 사이의 부상 높이와 pitch angle에 의해 영향을 받음을 알 수 있었다. Drag mode에서는 입자들이 인터페이스로 들어가 슬라이더와 디스크 표면의 손상을 쉽게 야기시킨다. 또한, Data zone에서 실험했을 때가 laser-textured zone에서보다 내구 수명이 길었고 마찰계수도 낮았다.

2. Picoslider의 마찰계수와 내구 수명이 nanoslider보다 모든 시험 조건하에서(속도, 표면 형상, 입자 크기) 우수하게 나타났다. 이를 제시된 두 parameter를 통하여 규명하였다. 즉, slider의 leading edge에 1개

의 입자가 들어갈 수 있는 시간이 nanoslider의 경우가 picoslider보다 1/3 정도로 짧고, HDI내에 머무를 수 있는 입자 크기의 범위가 nanoslider의 경우가 picoslider의 경우보다 더 넓으므로, nanoslider의 내구 수명이 짧게 됨을 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. 윤의성, Bhushan, B., "오염입자가 Picoslider의 헤드-디스크 인터페이스 마찰 마모에 미치는 영향," 한국윤활학회지, 제16권, 제5호, pp.395-402, 2000
4. 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.
5. Tokuyama, M., Hirose, S., "Dynamic flying characteristics of magnetic head slider with dust," ASME Journal of Tribology, 116, pp.95-100, 1994.
6. Uy, J.C., "Head/disk interface failure mechanism," IEEE Trans. Magn., 26, pp.783-785, 1990.
7. 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.
8. Hiller, B., Singh, G.P., "Mechanism for formation of whiskers on a flying magnetic recording slider," IEEE Trans. Magn., 30, pp.1499-1503, 1994.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Bhushan, B., Chandra, S., "Detection and sizing of particulate contamination in rigid drives: instrument and sampling techniques," IEEE Trans. Magn., Vol 35, pp.956-962, 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.