

AFM을 이용한 Head/Disk의 표면 파손에 관한 고찰

이성창*, 정구현*, 김대은**

A Study on the Surface Damage between Head/Disk Interfaces by Using AFM

Sung-Chang Lee*, Koo-Hyun Chung*, Dae-Eun Kim**

ABSTRACT

In this work the surface damage of head and disk of a hard disk drive was analysed using an Atomic Force Microscope. The initial damage of the disk occurred by generation of extremely small wear particles. Also it was shown that wear particles tend to pile up near the front side of the slider. The surface damage mechanism of drag test and contact-start-stop test was found to be quite similar.

Key Words : Surface damage (표면파손), wear (마멸), head/disk (헤드/디스크), AFM (atomic force microscope, 원자 현미경)

1. 서론

정보화 시대와 더불어 이루어진 컴퓨터의 비약적인 발전에서 자기 저장 장치의 중요성은 날로 커지고 있다. 프로그램의 용량이 증대하고 컴퓨터가 고속화됨에 따라 고 저장밀도와 고속의 데이터 전송률을 추구하고 있으며, 신뢰성 및 내구성 또한 강조되고 있다. 지금까지의 연구 결과에 의하면, 헤드와 디스크의 상호 작용은 디스크가 회전을 시작하거나 멈출 때는 미끄럼 접촉을 일으키게 되고, 정상 상태에서는 공기 베어링에 의한 공기동압 윤활 (hydrodynamic lubrication)이 이루어져 헤드는 디스크 표면 위를 일정 높이로 떠다니게 된다⁽¹⁻³⁾. 그러나, 헤드와 디스크의 간격이 작아질수록 데이터의 저장 밀도

와 전송 속도는 커지는 반면, 헤드와 디스크의 접촉이 발생하기 쉬워져 신뢰성 및 내구성은 떨어지게 된다. 특히 헤드/디스크의 간격을 극소로 감소시키기 위해 근접 접촉/접촉 (near contact/contact) 헤드의 사용이 제안되었고, 현재 헤드와 디스크의 간격을 수십 nm 까지 감소시키는데 성공하였다. 그러나 헤드/디스크의 간격이 감소될 경우, 서로간의 접촉이 일어날 확률이 높아지게 되므로 고체와 고체의 접촉으로 인한 마찰·마모 및 표면 파손에 관한 문제를 극복하는 것이 매우 시급하다⁽⁴⁻⁶⁾.

본 연구에서는 현재의 헤드/디스크 시스템에서 발생하는 접촉으로 인한 표면 파손 및 마멸에 대한 메커니즘을 규명하고 주된 영향을 미치는 인자를 파악하고자 하였다.

* 연세대학교 대학원 기계공학과
 ** 연세대학교 기계공학과

2. 헤드/디스크 인터페이스에서의 마멸현상

헤드 슬라이더와 디스크의 파손에 영향을 미치는 요인으로는 디스크, 헤드, 슬라이더의 재료 및 표면 상태, 헤드 및 슬라이더의 형상, 하드 디스크 내부의 환경 등으로 나눌 수 있다.

2.1 헤드의 마멸

슬라이더 및 헤드의 주된 마멸 현상은 흡착 (adhesive), 연삭 (abrasive), 피로, 충격마멸로 알려져 있으며⁽⁷⁾, 일반적으로 마멸은 미끄럼 거리에 비례하게 된다. 또한, 헤드와 디스크의 인터페이스에서 하중의 크기와 미끄럼 속도에 따라 마멸 현상은 달라지게 된다. 하드 디스크는 실제로 CSS (Contact-Start-Stop)를 반복하게 되므로, 접촉시 디스크의 요철들은 슬라이더에 반복적인 충격을 가하게 되며 그 압력은 매우 크다. 또한 외부의 충격이나 이물질의 침입에 의하여 헤드와 디스크간에 충격 마멸이 발생하기도 한다. 특히 박막 헤드는 마멸 입자의 영향을 보다 많이 받기 때문에 마멸 현상의 파악은 매우 중요하다.

2.2 미디어의 마멸

헤드/디스크 인터페이스의 파괴는 미끄럼 접촉으로 인한 마멸 입자 생성에 의한 것과 외부 환경에 의한 오염에 의한 것으로 나누어 질 수 있다⁽⁷⁾. 미끄럼 접촉에 의한 파괴는 흡착, 연삭마멸에 의해 생성되거나, 요철간의 접촉시 높은 압력으로 인한 크랙의 형성 및 전파 등에 의해 발생하게 된다. 한편, 외부 환경에 의한 파괴는 하드 디스크 내부의 다른 미끄럼 요소, 즉 베어링 등으로부터 생성된 입자가 헤드와 디스크 사이에 침입함으로써 헤드의 충격을 유발하여 발생한다. 이러한 영향에 의해 디스크의 윤활막이나 보호막이 파손되어 건식 접촉을 일으키기도 한다. 일반적으로 헤드와 디스크의 경도가 비슷할 경우 마멸이 가장 적다고 알려져 있으나, 디스크 표면의 경도, 탄성계수, 코팅 재의 마찰, 마멸 특성, 윤활제의 두께 및 점성도, 환경 등에 영향도 중요하다⁽⁷⁾.

3. 실험 방법

헤드 슬라이더와 디스크간 접촉으로 인한 표면 파손 및 마멸을 측정하는 대표적인 방법인 저속 회전 실험과 CSS 실험을 행하였다. 즉, 다양한 하중에 대하여, 저속 회전

실험을 진행하여 헤드 슬라이더와 디스크의 미끄럼 접촉시 발생하는 표면파손 및 마멸기구를 분석하고, 헤드 슬라이더가 디스크 표면 위에서 이·착륙을 반복하는 CSS 실험을 통하여 실제 하드 디스크의 작동시 발생하는 마멸기구를 파악하고자 하였다.

3.1 실험 장치

실험은 Fig. 1과 같이 Class 100의 청정 환경에서 진행하며 반도체 스트레인 게이지를 부착한 load beam을 제작하여 수직 하중과 디스크 회전시의 접선방향의 힘, 즉 마찰력을 측정하고 표면 파손 및 마멸정도를 비교하였다. 디스크는 아날로그 PID 제어기를 이용하여 DC 모터로써 외부 구동하였다.

또한 실제 하드 디스크의 스피들을 이용하여, 정지 상태에서부터 가속되어 정속에 이르기까지 다시 감속되어 완전히 정지될 때까지를 계속적으로 반복하는 CSS 실험을 진행하고 그 때 발생하는 헤드와 디스크의 기계적인 파손에 대하여 고찰하고자 하였다.

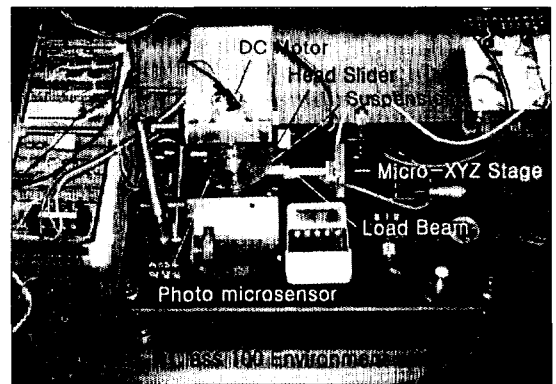


Fig. 1 Constant speed drag tester setup

3.2 실험 시편

현재 상용화되고 있는 1.6 GByte 용량 하드 디스크의 헤드 슬라이더 및 디스크로 실험 시편을 통일하였으며 Table 1은 각각의 표면 거칠기, 코팅 성분을 나타낸다.

본 실험에 사용된 헤드 슬라이더는 내구성을 위해 Si substrate에 7.5 nm의 탄소 코팅이 이루어져 있으며, 서스펜션에 의하여 약 3.5~3.7 gf의 초기하중 (pre-load)을 받게 되고 디스크 속도 5400 rpm에서 40~50 nm의 부상 높이를 갖도록 설계되어 있다.

Table 1 Property of slider and disk

	Surface Roughness	Coating layer	Substrate
Head Slider	1.8 nm Ra	7.5 nm carbon coating	Silicon
Disk	3 nm Ra	Lubricant Carbon Cobalt Chrome	Aluminum

Fig. 2는 정속에서 이륙하기 위해 설계된 슬라이더의 배면 형상으로써 양끝에 공기 베어링 표면이 존재하고 한 쪽 끝에 헤드가 위치하고 있는 것을 알 수 있으며, 박막 유도 헤드 (thin film inductive head)이다. 디스크 시편은 0.8 mm의 두께를 가지며 상하로 Fig. 3과 같은 코팅층을 이루고 있다.

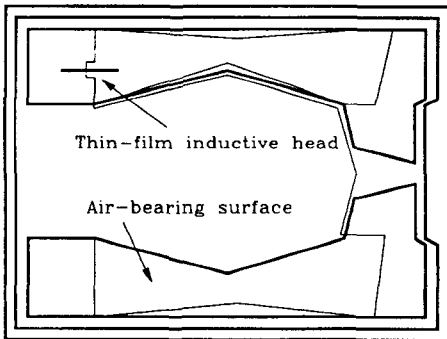


Fig. 2 Bottom view of slider

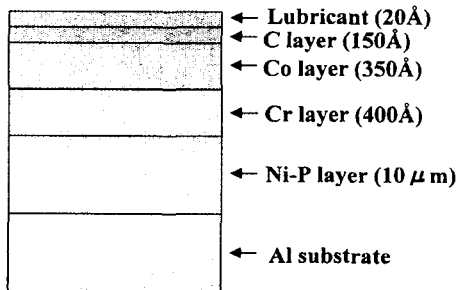


Fig. 3 Coating layer of hard disk

3.3 실험 조건 및 측정방법

실험 조건은 실제 하드 디스크의 작동 상태를 유지하도록 Class 100의 청정도와 3.5 gf의 초기하중 (preload)

을 기본적으로 설정하고, 미끄럼 거리 및 선속도의 일관성을 위해 반경 4 cm 위치에서 미끄럼 접촉이 일어나도록 하였다. Table 2와 같은 조건으로 CSS실험과 저속 회전 실험을 행하였으며 실험 후 헤드 슬라이더와 디스크의 표면 파손 관찰을 위해 광학 현미경과 SEM (Scanning Electron Microscope) 및 AFM을 이용하였다.

Table 2 Experimental conditions

	Normal load (mg)	Disk speed (rpm)	Sliding distance (cycles)
Drag test	3.5, 2, 0.3, 0.04, 0.0035	120	10,000, 30,000, 50,000, 100,000, 200,000
CSS test	3.5	0~3600	300, 1,000, 1,600, 3,200

4. 실험 결과

4.1 저속 회전실험 (Drag test)

본 실험에서는 3.5 gf, 2 gf, 300 mgf, 40 mgf, 3.5 mgf의 하중에 대하여 미끄럼 거리를 10000~300000 cycle으로 증가시키며 헤드 슬라이더 및 디스크의 표면 파손에 대하여 관찰하였다.

Fig. 4는 20℃, 25%, Class 100 환경에서 200000 cycle의 미끄럼 거리에 대한 헤드 슬라이더의 표면 파손을 나타내고 있다. 미끄럼 방향에 대해서 뒷부분에 많은 입자들이 쌓이는 것을 알 수 있으며 이는 디스크 표면의 요철이 떨어지며 발생한 것으로 보인다.

슬라이더는 공기 베어링 표면에 높이 차가 존재하므로 디스크의 파손 입자들은 상대적으로 높은 부분에 걸리게

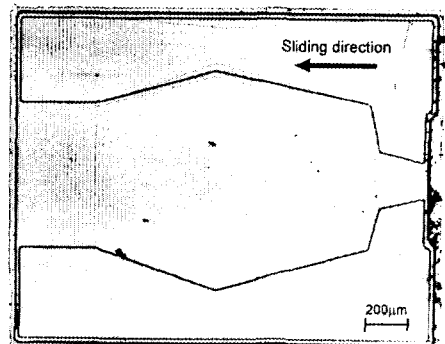


Fig. 4 Surface damage of slider after 200,000 cycles (3.5gf preload)

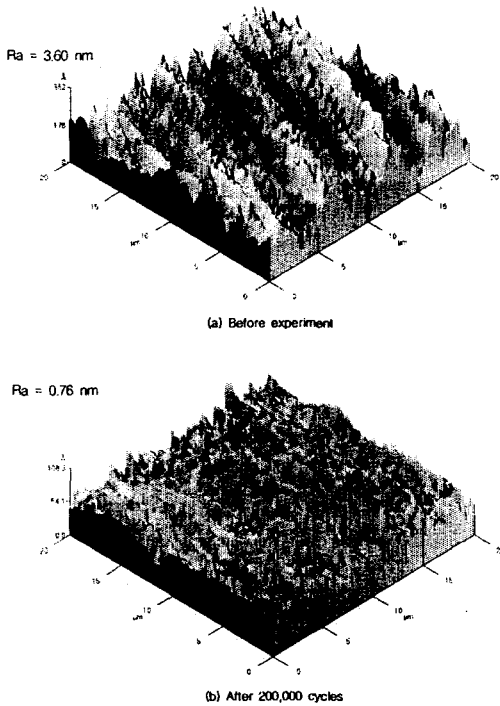


Fig. 5 3-D surface profile for disk specimen using AFM (3.5gf preload)

되고 슬라이더의 뒷부분에 점차로 쌓이게 된다. 또한 부분적으로 마멸 입자들이 표면 위에 달라붙게 되는 것을 볼 수 있는데, 이는 마멸 입자들이 요철 사이의 틈으로 침투한 것으로 생각된다.

Fig. 5(a)는 실험전의 디스크 표면을 AFM으로 측정 한 3차원 표면 형상과 거칠기를 나타내고 Fig. 5(b)는 20℃, 20%, Class 100 환경에서 200000 cycle의 미끄럼 거리에 의해 형성된 디스크 트랙 내부의 표면 형상이다. 여기서 표면의 요철의 높이가 감소하여 표면 거칠기가 향상된 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 6은 Fig. 5(a)와 (b)의 AFM 측정 결과를 2차원으로 나타낸 것으로써 요철의 높이가 현저하게 감소하였다.

즉 헤드 슬라이더와 디스크의 상대 운동이 발생하면, 디스크의 높은 요철은 슬라이더에 의해 표면으로부터 떨어져 나가 슬라이더의 뒷부분에 쌓이게 되며 디스크의 표면 상태는 상대적으로 좋아지게 되므로, 마멸 입자들이 접촉면을 빠져 나오게 되면 슬라이더의 뒷부분에 걸려 쌓이는 현상이 반복되게 된다.

3.5 gf의 하중에서 200000 cycle까지의 표면 파손 진행 및 입자들의 생성을 파악하기 위하여 동일 조건에서

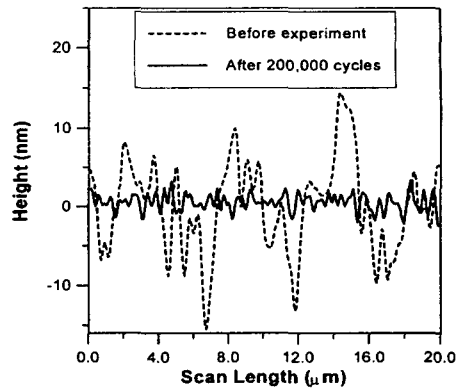
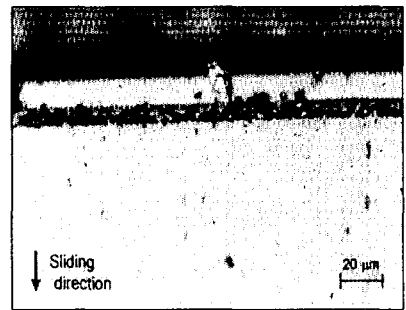
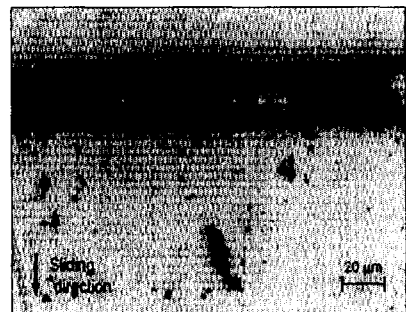


Fig. 6 2-D surface profile for disk using AFM

미끄럼 거리를 10000, 30000, 50000 100000, 200000 cycle로 증가시키며 파손 정도를 관찰하였다. Fig. 7은 미끄럼 거리의 증가에 따라 헤드 슬라이더의 뒷부분에 쌓이는 입자를 나타내며 Fig. 8은 그에 따른 헤드 부분의 표면 파손을 나타낸다.

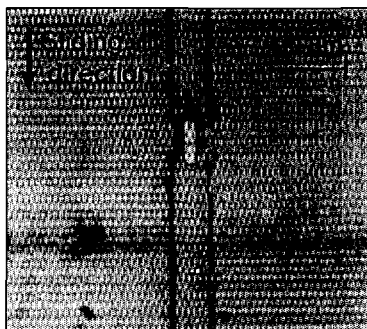


(a) After 50,000 cycles



(b) after 200,000 cycles

Fig. 7 Surface damage of slider with respect to sliding distance (3.5 gf, 20℃, 20%)



(a) After 50,000 cycles



(b) After 200,000 cycles

Fig. 8 Optical micrographs of surface damage of head with respect to sliding distance (3.5 gf, 20°C, 20%)



(a) After 50,000 cycles



(b) After 200,000 cycles

Fig. 9 SEM micrographs of wear debris at head slider (3.5 gf, 20°C, 20%)

미끄럼 거리의 증가에 따라 헤드 슬라이더의 뒷부분에 쌓이는 입자가 많아지고 헤드의 파손 또한 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 미끄럼 거리 50000 cycle과 200000 cycle에 대해 헤드 슬라이더의 뒷부분에 쌓인 입자들의 SEM 사진이다. cycle 수가 증가함에 따라 보다 작은 마멸 입자들이 많이 생성되어 쌓이게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 AFM을 이용하여 미끄럼거리 증가에 대한 표면 거칠기의 변화를 측정 한 것으로 10000 cycle에서 표면 거칠기는 급격히 변하기 시작하여 점차 완만해지며, 300000 cycle까지 표면 거칠기가 계속 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 약 10000 cycle 이내에서 디스크 표면 위의 높은 요철이 제거되며 표면 거칠기는 급격히 좋아지고, cycle이 증가할수록 상대적으로 표면 거칠기의 감소는 완만하게 발생하게 된다.

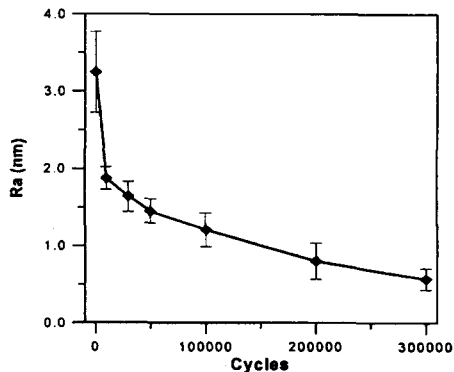


Fig. 10 Surface roughness with respect to sliding cycles using AFM

Fig. 11은 Class 100, 20°C, 20%의 환경에서 300 mgf의 하중에 대한 미끄럼 거리의 증가에 따른 헤드 슬

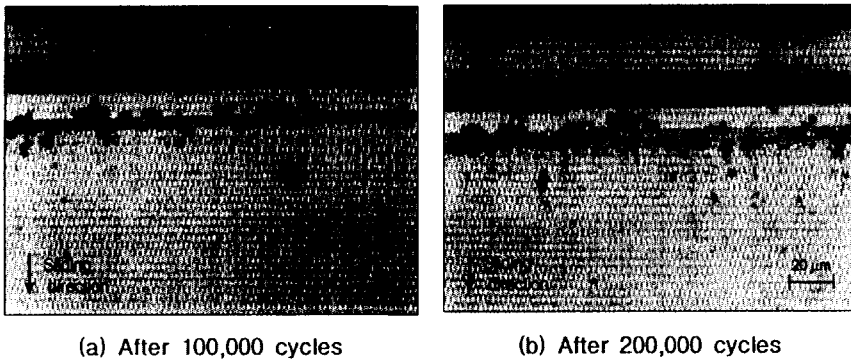


Fig. 11 Surface damage of slider with respect to sliding distance
(300 mgf, 20 °C, 20%)

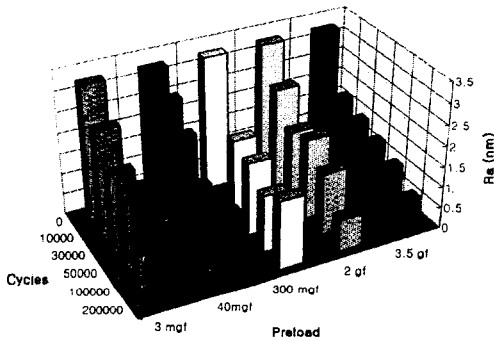


Fig. 12 Surface roughness with respect to preload and sliding distance using AFM

라이더의 파손을 나타내며, 하중이 커질수록 가속되는 경향을 나타냈다.

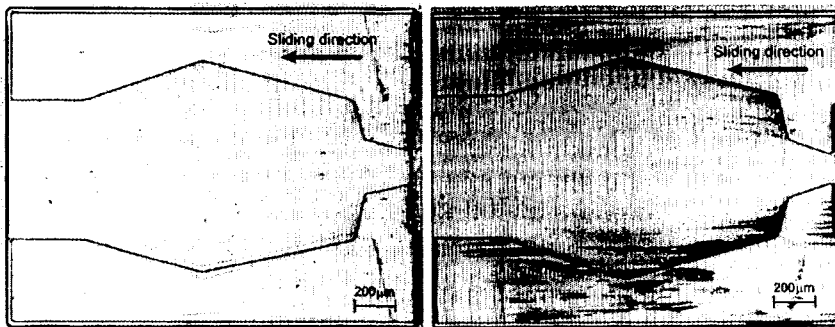
헤드 슬라이더와 디스크의 접촉으로 인하여 발생하는 입자들은 하중이 커질수록, 미끄럼 거리가 증가할수록 많

이 생성되고 그 입자들은 헤드 슬라이더의 뒷부분에 쌓이게 되는 것을 알 수 있다. 이는 하중이 커짐에 따라 접촉 압력이 상승하기 때문에 디스크 표면이 파손이 가속되는 것으로 사료된다.

Fig. 12는 하중과 미끄럼 거리의 변화에 따른 디스크의 표면 거칠기 변화를 AFM을 이용하여 측정한 값을 나타낸다. 실험전의 디스크 표면 거칠기보다 향상된 것을 알 수 있으며, 미끄럼 거리가 증가할수록 표면 거칠기는 감소하는 경향을 보인다.

4.2 CSS 실험

CSS 회수를 300, 1000, 1600, 2000, 3600회로 증가시키며 헤드 슬라이더와 디스크의 표면파손 정도를 측정하였다. Fig. 13은 5 gf의 preload, 20°C, 20%, class 100 환경에서 CSS 회수 증가에 따른 헤드 슬라이더의 표면 파손을 나타낸다. 1,600회까지는 입자들이 헤



(a) After CSS 1,600 (b) After CSS 2,000
Fig. 13 Optical micrographs of head with respect to CSS cycles

드 슬라이더의 뒷부분에 적층을 형성하고 표면을 오염시키게 되는 것을 알 수 있다. 그러나 CSS 2000회에 대해서는 표면 파손이 심하게 진행되어 흡착(adhesion) 및 연삭(abrasion) 마멸흔적이 보이며 입자의 전이가 발생한 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 1600 회까지의 CSS 회수 증가에 따른 디스크의 표면 변화를 나타내는 AFM 측정 결과와 표면 거칠기의 변화이다. 1600 회의 CSS까지는 디스크의 요철이 제거되며 표면의 상태가 좋아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 CSS 2000회 실험시 헤드 슬라이더의 한쪽 공기 베어링 표면에 의해 형성된 디스크 트랙을 나타내는 광학 현미경 사진이다. A 부분은 코팅층이 파손된 것이며 B 부분은 입자의 전이에 의해 형성된 층으로 생각된다. C 부분은 마멸 입자들이 쌓여있는 것을 나타낸다.

즉, 마멸이 어느 정도 이상 진행되면 접촉하는 두 표면의 파손은 급격히 가속되는 것을 나타낸다. 즉 요철간의 접촉에서 초기에 발생하는 입자들은 상대적으로 연하고, 이러한 입자들은 미끄럼 거리가 증가할수록 오히려 디스크의 표면 정도가 좋아지기 때문에 대부분이 슬라이더의

뒷부분에 쌓이게 된다. 그러나 이러한 현상이 반복될수록 실제 접촉 면적은 증가하게 되고 이에 따라 요철간에서 탄/소성 변형 및 연삭, 흡착마멸이 발생하며 표면 파손은 급증하게 된다.

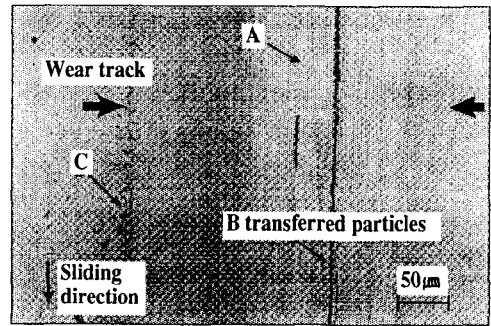
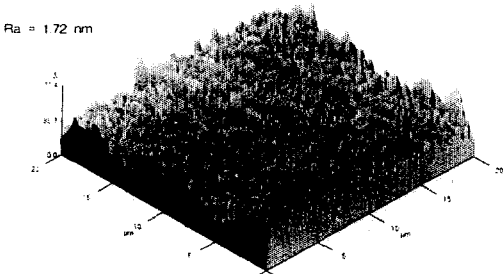
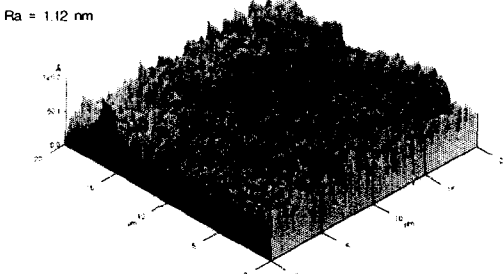


Fig. 15 Optical micrograph of wear track of disk specimen after CSS 2000 cycles



(a) After CSS 300



(b) After CSS 1,600

Fig. 14 3-D surface profile of disk using AFM

5. 결론

헤드 슬라이더와 디스크간 접촉으로 인한 표면 파손 및 마멸을 측정하는 대표적인 방법인 저속회전 실험과 CSS(Contact-Start-Stop) 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초기의 마멸 입자들은 디스크로부터 생성된 것으로 보이며 하중과 미끄럼 거리의 증가에 따라 증가하게 된다. 또한, 이러한 입자들은 슬라이더의 앞부분에 쌓이는 경향을 보인다.

2) 미끄럼 거리가 증가할수록 디스크의 표면 거칠기는 감소하는 경향을 보인다.

3) 저속 회전 실험과 CSS 실험에서 초기에 발생하는 마멸 입자의 거동은 비슷한 경향을 가진다.

4) 마멸이 어느 정도 진행되어 디스크의 표면 거칠기가 감소하게 되면 헤드 슬라이더와 디스크의 파손은 급증하게 되며 연삭, 흡착마멸과 함께 입자의 전이가 나타난다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. M. H. Wahl and F. E. Talke, "Numerical Simulation of the Steady State Flying Characteristics of a 50% Slider with Surface Texture," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 30, No. 6, pp. 4122-4124, 1994.
2. Y. Mitsuya, A. Mitsui, Y. Kawabw, and L. Lunde, "Three-Dimensional Measurement of Head Flying Height and Attitude Using Image Processing of Fringe Patterns Formed by Michelson Laser Interferometry," *J. of Tribology*, Vol. 118, pp. 564, 1996.
3. R. M. Crone, M. S. Jhon, B. Bhushan, and T. E. Karis, "Modeling the Flying Characteristics of a Rough Magnetic Head Over a Rough Rigid-Disk Surface," *J. of Tribology*, Vol. 113, pp. 739, 1991.
4. M. S. Jhon, P. R. Peck, R. F. Simmons Jr., and T. J. Janstorm, "Behavior of the Head-Disk Interface In Future Disk Drives," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 30, No. 2, pp. 410-416, 1994.
5. F. E. Talke, "On Tribological problems in magnetic disk recording technology," *Wear*, Vol. 190, pp. 232-238, 1995.
6. M. Futamoto, F. Kugiya, M. Suzuki, H. Takano, Y. Matsuda, N. Inaba, Y. Miyamura, K. Akagi, T. Nakao, H. Sawaguchi, H. Fukuoka, T. Munemoto, and T. Takagaki "Investigation of 2 Gb/in² Magnetic Recording at a Track Density of 17 kTPI," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 27, No. 6, pp. 5280-5285, 1992.
7. B. Bhushan, *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices*, Springer-verlag New York Inc., 1990.