

TAA신호를 이용한 하드디스크의 헤드/디스크 인터페이스 분석

박용식*, 이재모**, 김대은**

Evaluation of Head/Disk interface using TAA Signal

Yong Shik Park*, Jae Mo Lee** and Dae Eun Kim**

ABSTRACT

The durability of head/disk interface is an important issue for hard disk drives. Currently, there are several means of assessing the performance and integrity of the head/disk interface. In this work Track Average Amplitude (TAA) signal was used to analyze the head/disk interface with respect to variations in disk velocity, slider pre-load and preformed scratch on the disk. Particularly, TAA variation due to disk defect in the form of a scratch was investigated.

Key Words : Hard disk drive (하드디스크드라이브), DLC overcoat (Diamond like carbon 코팅), Scratch test (스 크래치테스트), TAA (Track Average Amplitude)

1. 서론

산업의 발달과 더불어 모든 분야에서 컴퓨터의 사용이 일반화되었다. 가장 보편적인 저장장치인 하드디스크의 저장 용량은 14.3 Gbit/in²를 저장할 수 있을 정도로 급속히 증가하였으며, 대용량 정보저장장치의 개발을 위한 고밀도의 정보저장을 위해서 헤드 슬라이더와 디스크간의 간격이 수십 nm까지 작아지게되었다¹. 그러나 헤드와 디스크의 간격감소는 두 표면간의 순간적인 접촉이 발생할 확률을 높여 하드디스크의 내구성 감소를 초래하게 되었고, 이러한 접촉 현상에 대한 하드디스크의 내구성을 향상시키기 위하여 디스크에 DLC overcoat를 10~20nm로 코팅한 후 15Å의 두께로 윤활제를 도포하고 있다. 최근 저장 용량의 증대를 위하여 헤드 슬라이더와 디스크간의 간격을 좀 더 줄이려는 방법으로 DLC overcoat의 두께도 점차로 감소하

고 있다². 이러한 DLC의 두께의 감소는 디스크의 내구성의 감소를 더욱 가속화하게 되므로, 디스크의 내구성에 대한 평가가 매우 필요하게 되었다. 그러나 지금까지 하드디스크의 내구성 평가기준은 stiction의 크기나 AE신호 정도만을 이용하였기 때문에 실제 헤드 슬라이더의 데이터 기록 및 재생능력에 대한 검토가 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 TAA signal이 disk의 회전 속도, head의 위치에 따라 어떤 변화가 생기는지 확인하여 TAA 신호가 내구성 평가의 기준이 됨을 보인다. 그리고 scratch test를 통하여 DLC overcoat의 내구성을 평가하고, DLC overcoat가 파괴되는 임계 하중을 찾아 인위적으로 디스크에 임계 하중이상으로 scratch를 가한 후 디스크에 자기 정보를 기록/재생하는 TAA를 실시하여 디스크 손상과 데이터 손실의 관계를 평가한다.

2. 실험 방법

* 삼성전기
** 연세대학교 기계공학과

먼저 CSS(Contact-Start-Stop) 실험 중 disk의 회전 속도와 head의 위치를 변화시키면서 디스크에 직접 자기 신호를 쓰고 읽는 과정인 TAA(Track Average Amplitude)를 실시하여 TAA peak가 변하는 요인을 확인한다. 다음으로 디스크의 DLC overcoat의 내구성을 평가하기 위하여 diamond tip으로 disk에 하중을 0 gf 에서부터 점차로 증가시킬 때 DLC층의 파손 시점을 측정하는 scratch test를 실시하고, 여기서 얻은 결과를 바탕으로 Hertzian Contact Theory를 적용하여 DLC overcoat의 최대 임계 하중 및 압력을 얻는다. 또한 앞에서 얻은 임계 하중 보다 큰 하중으로 디스크에 scratch를 가했을 때 CSS 실험 도중 scratch 주변에서 TAA를 실시하여 헤드 슬라이더와 디스크의 내구성을 평가한다. 디스크의 DLC overcoat의 임계 하중을 얻기 위하여 scratch tester를 제작하였다. Scratch tester는 시편을 수평 방향으로 움직이는 micro-linear actuator와 tip의 하중을 측정하는 load cell을 수직 방향으로 움직이는 micro-linear actuator로 구성되어 있다. Micro-linear actuator의 이송 해상도는 60 nm이고, tip은 끝단 반경이 5 μm 이며 경도가 약 8000-10000 HV인 다이아몬드 팁을 사용하였다. 하중을 측정하는데 사용한 load cell의 경우 상용화되어 있는 것을 사용하였고 해상도는 약 10 mg, 최대 측정 가능 하중은 5 gf이며 실험 장치의 구성은 Fig. 1과 같다.

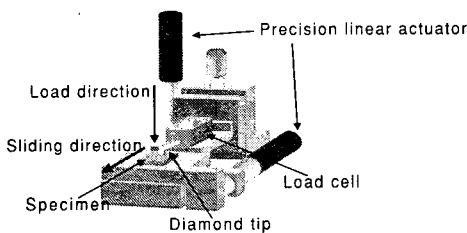


Fig. 1 Schematic diagram of scratch tester

위의 실험 장치를 이용하여 디스크에 일정 하중으로 scratch를 내고, 이때 디스크의 내구성을 평가하기 위한 실험 장치는 friction과 AE (Acoustic Emission), 그리고 TAA의 측정이 가능한 Fig. 2와 같은 상용화된 CETR CSS tester를 사용하였다. 본 연구에 사용한 디스크는 landing zone이 기계적으로 가공된 MZT (Mechanical Zone Textured) 디스크를 사용하였다.

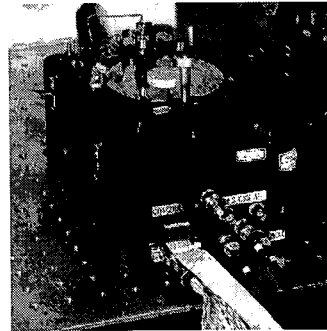


Fig. 2 CETR CSS tester

MZT 디스크의 경우 정보를 쓰고 읽는 영역인 data zone의 평균 거칠기는 약 1 nm이고 landing zone의 경우는 7 nm정도이며, 각 코팅층은 액체 윤활제인 PFPE (Perfluoropolyether)가 있는 1.5 nm 두께의 윤활층, 보호층인 15 nm의 DLC층, 자성층인 50 nm의 Co/Cr층, 40 nm 두께의 NiP층, 그리고 substrate인 Al으로 이루어져 있다. 이때 scratch test에 사용한 디스크는 윤활층이 없는 DLC 코팅된 디스크를 사용하여 scratch test 도중 윤활층에 의한 영향을 배제하였다. TAA 실험에 사용한 헤드 슬라이더는 2.0 mm \times 1.6 mm의 크기를 가진 nano 슬라이더를 사용하였다. Nano 슬라이더의 경우는 헤드 가 trailing edge의 중앙 pad에 위치하는 tri-pad 슬라이더이고 부상 높이는 약 40 nm를 가지며 표면은 내구성의 향상을 위하여 DLC로 코팅되어 있다. Scratch test에서 DLC overcoat의 임계 하중을 알기 위하여 수직 방향으로 5 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로, 수평 방향으로 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 또는 20 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 속도로 동시에 움직여 하중을 천천히 증가시키면서 load cell에서 나오는 출력을 AD board를 통하여 컴퓨터에 실시간으로 저장하였다. 실험이 끝난 후 저장된 데이터는 전기적 노이즈 등의 고주파 성분에 대한 영향을 제거하기 위하여 low pass filter를 사용한 후 하중의 기울기 성분을 제거하기 위하여 시간에 대하여 하중을 미분하였다. 이때 DLC overcoat가 깨지는 시점에서 미세한 하중의 변화가 생기게 되고 하중을 미분한 값에서는 peak가 발생하게 되어 임계 하중을 구할 수 있다. 이러한 데이터 처리 과정을 이용하면 외란에 대한 영향의 제거와 하중의 민감한 변화를 찾

을 수 있기 때문에 임계하중을 찾는 데 매우 유리하다. 디스크의 내구성을 평가하는 실험에서는 디스크에 scratch tester를 이용하여 1 gf, 2 gf, 3 gf, 4 gf, 5 gf로 scratch를 원주 방향으로 가한 후 scratch 부근에서 TAA 실험을 한다. TAA 실험은 헤드 슬라이더를 landing zone에서 디스크를 5400 rpm 으로 하여 부상시킨 후 scratch 부근으로 이동시켜 scratch 부근에서 TAA를 하여 그 영향을 살펴보았다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Scratch test

DLC overcoat의 임계 하중을 구하기 위하여 수평 방향의 이송 속도를 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 했을 때 scratch test를 한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 결과에서 보면 약 0.050 gf 부근에서 하중이 약간 흔들리는 것을 관찰 할 수 있고 하중을 시간에 대하여 미분한 그래프의 경우 peak가 발생하는 것을 볼 수 있으며 이때가 디스크의 DLC overcoat가 깨지는 시점, 즉 DLC overcoat의 임계 하중이 된다. 즉, DLC층이 깨지는 순간 다이아몬드 팁의 하중은 급격한 변화가 생기게 되고 이것이 load cell에 의하여 측정이 된 것이다. 임계하중은 각 이송 속도 당 2번씩 실시하여 Fig. 3과 같은 이송 속도가 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 인 경우 0.085 gf와 0.051 gf를 얻었고, 이송 속도가 20 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 인 경우는 0.074 gf와 0.056 gf를 얻었으며 이것들의 평균을 취하면 DLC overcoat의 임계하중은 0.067 gf임을 얻을 수 있었다.

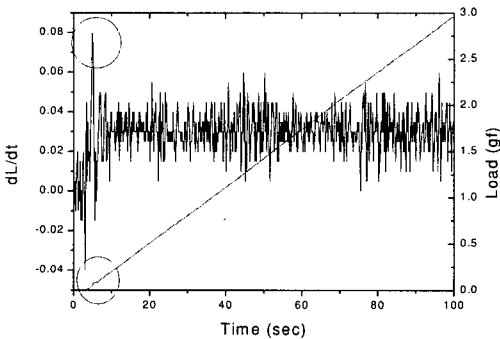


Fig. 3 Load and differentiated load variation w.r.t. time (thrust velocity :10 $\mu\text{m}/\text{sec}$)

앞에서 얻은 결과를 Hertzian contact theory에 적용하여 다이아몬드 팁과 디스크간의 임계 하중에서의 DLC overcoat가 깨지는 순간의 최대 압력을 구해보았다. 다이아몬드 팁의 끝단은 구의 일부이고 디스크는 평탄 면이라고 할 때 Fig. 4와 같이 반경 R을 가진 구가 평면에 L의 하중으로 접촉할 때로 가정할 수 있고 접촉부의 압력 분포 p와 접촉 면적의 반지름인 a는 다음과 같이 구해진다³.

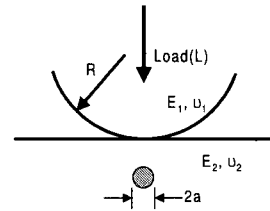


Fig. 4 Contact geometry of diamond tip and disk specimen

$$p = \frac{3L}{2\pi a^2} \left(1 - \frac{R^2}{a^2}\right)^{1/2} \quad (1)$$

$$a = \left[\frac{3LR}{4} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3} \quad (2)$$

여기서 L은 하중, E_1, E_2 는 Young's modulus, 그리고 ν_1, ν_2 는 Poisson's ratio이다. 이때 최대 압력은 r이 0인 접촉 중심부에서 발생하게 되어 다음 식으로 정리된다.

$$p_{\max} = \frac{3L}{2\pi a^2} \quad (3)$$

이때 diamond tip의 반경 R은 5 μm , Young's modulus E_1 은 1000 GPa, Poisson ratio ν_1 은 0.2이며 디스크의 DLC overcoat의 Young's modulus E_2 는 110 GPa, Poisson ratio ν_2 는 0.3이다⁴. 이를 이용하여 접촉 면적의 반경 a를 구하면 약 0.285 μm 를 구할 수 있고 최대 접촉 압력은 3.94 GPa을 얻을 수 있다. 일반적인 DLC의 경도가 5-15 GPa^5 이므로, 본 실험에서 얻은 결과와 비교하면 유사한 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서 DLC overcoat는 3.94 GPa 이상의 압력을 받게 되면 파손이 발생하여 자

성충인 Co층이 손상이 발생할 가능성이 커지게 되어 하드디스크의 failure가 일어나게 된다. 따라서 헤드/디스크 인터페이스의 설계 기준으로 두 표면 간의 접촉 압력이 3.94 GPa 보다 낮게 설계되어야 한다.

3.2 TAA test with scratched disk

앞장에서 얻어진 결과 임계 하중 이상의 압력을 받게 되면 자성층이 손상될 수 있다고 하였다. 본 실험에서는 임계하중 이상의 하중을 디스크에 다이아몬드 팁을 이용하여 원주 방향으로 scratch를 내어 자성층을 손상 시켰을 때 scratch 부근에서 TAA의 영향을 관찰한다. 이를 위하여 먼저 disk의 회전 속도를 3600 rpm, 5400 rpm, 7200 rpm, 10000 rpm으로 변화시키면서 TAA 신호를 받아보았다. 그리고 head의 위치를 0.8 inch, 1.0 inch, 1.2 inch, 1.6 inch로 변화시키면서 TAA신호를 받아, TAA peak에 영향을 주는 요인을 확인하였다. 다음으로 디스크의 data zone에 1 gf, 2 gf, 3 gf, 4 gf, 5 gf로 scratch를 낸 후 scratch 부근에서 TAA 실험을 하여 그 영향을 살펴보았다.

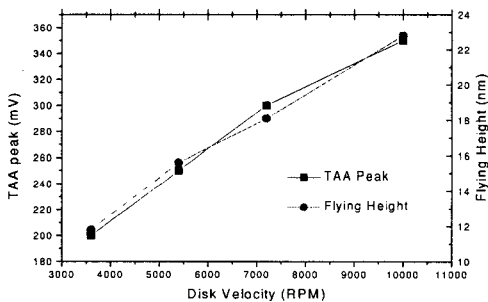


Fig. 5 TAA peak and flying height variation w.r.t. disk velocity

Fig. 5 와 Fig. 6은 각각 disk의 RPM 변화와 head의 위치에 따른 flying height의 변화와 TAA peak의 변화추이를 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 볼 수 있듯이 disk의 RPM과 head의 위치와 TAA peak는 선형적인 관계를 가지는 것을 볼 수 있다. 이러한 선형적 관계는 부상높이에 의한 것으로 보인다. 그러나, 부상 높이가 증가하면 디스크와 슬라

이더간의 거리가 멀어져 TAA신호가 약해져야 하지만 오히려 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 TAA peak의 변화는 자속의 시간에 대한 변화에 의한 것임을 알 수 있다.

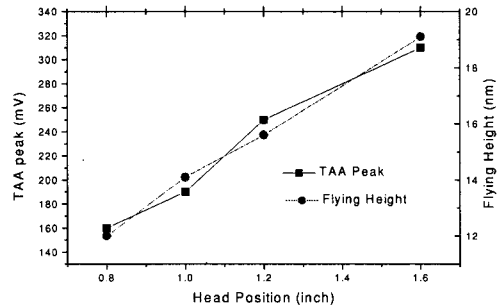


Fig. 6 TAA peak and flying height variation w.r.t. head position

이를 확인하기 위하여 헤드 슬라이더의 preload를 2.5 gf, 3.0 gf, 3.5 gf, 4.0 gf로 하여 부상 높이를 변화시키면서 TAA average 값을 비교해 보았다. Fig. 7은 preload가 각각 2.5 gf 일 때와 3.0 gf 일 때의 TAA average를 보여주고 있다. Fig. 8에서는 preload에 따른 TAA average 값과 simulation을 통해 얻은 헤드슬라이더의 부상 높이를 나타내고 있다. 실험 중 preload를 2.5 gf를 가했을 경우 헤드 슬라이더와 디스크가 완전히 접촉하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 즉, trailing edge 부분은 디스크와 닿아 있고 leading edge는 닿지 않았기 때문에 헤드슬라이더의 부상 특성이 매우 불안정하여 정상적인 자기 기록의 저장과 재생이 이루어지지 않았으므로 TAA average가 매우 낮게 나왔다. 그러나 preload가 3.0 gf에서 4.0 gf로 변화하면 부상높이가 21.3 nm에서 11.9 nm로 낮아짐에도 불구하고, TAA average는 거의 일정하다. 결과적으로 TAA 값은 부상높이에 의해 변하는 것이 아니라 자속의 속도와 헤드의 성능과 관련이 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 1 gf로 scratch를 disk에 가했을 때 AFM으로 측정한 3차원 형상과 2차원 형상을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 10은 scratch 부근에서 TAA를 했을 때 얻어진 결과이다. AFM으로 측정한 결과를 살펴보면 scratch의 깊이는 약 36 nm정도인데, 이 깊이는 윤활층이 약 1.4 nm이고 DLC 층이 약 15 nm이

므로 자성층인 Co층까지 손상이 되었다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 scratch는 자기 정보의 기록 및 판독에 영향을 미치게 되고 Fig. 10에서 보는 것과 같이 일정 위치에서 TAA가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이때 Fig. 10 (a)는 scratch 부근의 TAA 신호를 3차원으로 나타낸 것으로 그림에 나타난 head position이 3인 부분에서 다른 부분에서 보다 낮은 값을 갖는다는 것을 볼 수 있고 Fig. 10 (b)에서는 Fig. 10 (a)를 위에서 본 것으로 밝은 부분이 TAA가 낮은 부분이 된다. 따라서 디스크 자성층의 손상은 데이터의 기록 재생을 방해하는 것을 알 수 있다.

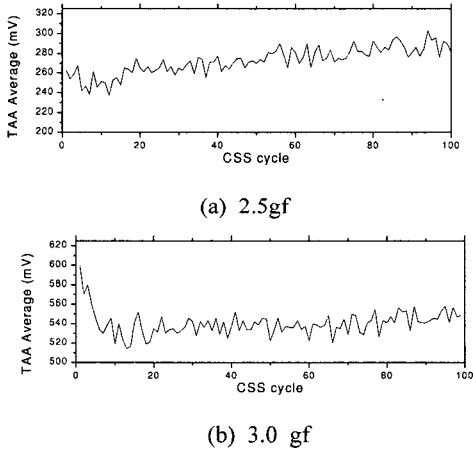


Fig. 7 TAA Average change w.r.t CSS cycles for (a) 2.5 gf, (b)3.0 gf

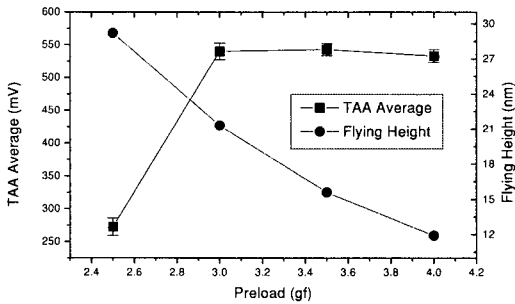


Fig. 8 TAA average and flying height variation w.r.t. preload

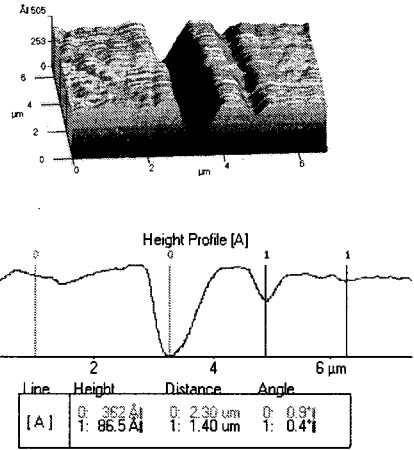
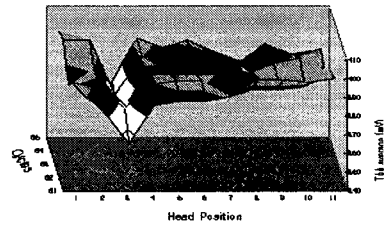
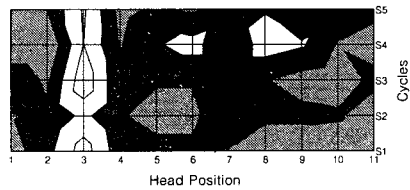


Fig. 9 AFM image of scratched groove using 1 gf load



(a) 3D view



(b) 2D view

Fig. 10 TAA average variation near scratched groove (1 gf load)

2 gf 로 scratch한 경우 scratch의 형상을 AFM으로 측정한 것을 Fig. 11에 나타내었다. Scratch의 깊이는 약 44 nm이고 1 gf의 경우보다 더 자성층을 손상시켰다. 본 실험에서는 scratch가 2개가 있는데, 이것은 scratch를 가하는 과정 중 다이아몬드 팁이 일정 트랙에 있지 않게 되면서 발생하였다. 이때

TAA를 한 경우 scratch가 두 지점인 경우 Fig. 12와 같이 TAA가 낮아지는 지점이 두 지역으로 나타났으며 1 gf의 결과와 마찬가지로 자성층의 손상으로 인하여 정상적인 자기 정보의 입력과 출력이 방해가 되었다.

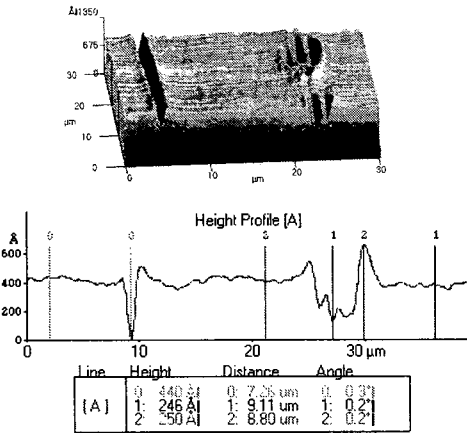
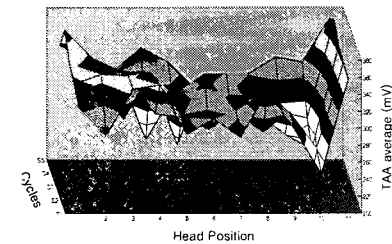
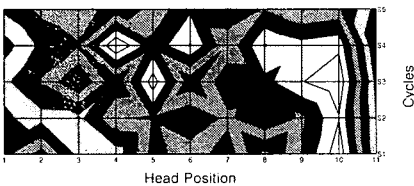


Fig. 11 AFM image of scratched groove using 2 gf load



(a) 3D view



(b) 2D view

Fig. 12 TAA average variation near scratched groove(2 gf load)

Scratch 하중을 3 gf 이상으로 한 경우에는

scratch 가공으로 인한 burr등에 의해서 scratch 부분에서 헤드 슬라이더가 조기 파괴가 되어 TAA 신호를 얻을 수 없었다. Fig. 13은 5 gf로 하중을 가했을 때 surface profiler로 scratch 부분을 측정된 것이다. Scratch 깊이는 약 700 nm정도이고 이 깊이는 디스크의 기저층까지 파고 들어간 것이다. 이때 TAA를 하기 위하여 scratch 부분에서 헤드 슬라이더를 조금씩 이동시켜 실험을 한 결과 Fig. 14와 같이 scratch가 있는 곳에서부터 burr에 의해 헤드가 파괴되어 TAA의 신호가 아주 낮은 값을 나타내었다. Fig. 15는 5 gf의 scratch에 대한 TAA 실험을 할 때의 AE 그래프이다. 초기 3초는 landing zone에서 5400rpm으로 가속한 후 1초 동안 dwell후 scratch쪽으로 seek하는 과정을 갖는다. 이 실험결과에서 AE는 scratch 영역으로 이동한 후 그 값이 많이 상승하는 것을 관찰할 수 있고 이것은 burr들과 충돌하면서 발생한 것이다.

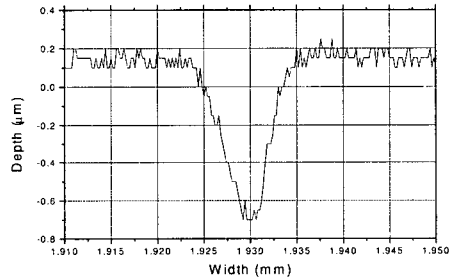


Fig. 13 2D profile of scratched groove using 5 gf load

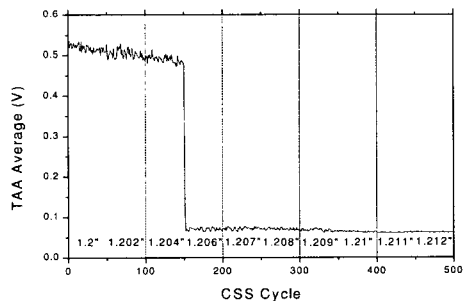


Fig. 14 TAA average variation near scratched groove (5 gf load)

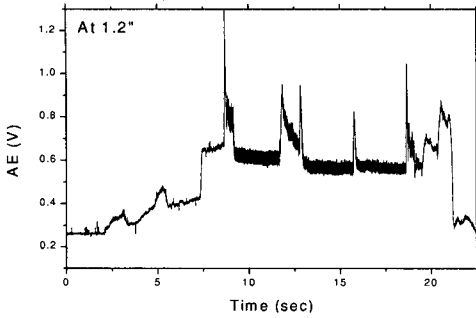
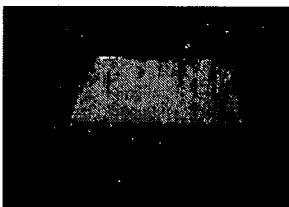


Fig. 15 AE rms around scratched groove

Fig. 16은 5 gf 로 disk에 scratch test로 scratch를 낸 뒤 TAA 실험한 슬라이더 표면 사진을 나타내고 있다. Scratch가 있는 부분 위를 지나간 슬라이더의 바깥쪽(사진에서는 위쪽) rail을 보면 scratch 부분을 지나지 않은 반대쪽 rail에 비해 많이 손상이 되어 있는 것을 볼 수 있으며 헤드가 있는 가운데 부분의 rail을 보면 오염이 많이 되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 이는 앞서 언급한바와 같이 burr에 의해서 슬라이더 표면과 헤드가 파괴 된 것이다. 이렇게 디스크 표면의 손상이 큰 부분을 지나가면 헤드 슬라이더는 조기 파손이 되고 또는 슬라이더 표면이 손상이 되면 디스크에도 표면 손상이 발생하는 경우가 있다.



(a)



(b)

Fig. 16 (a) Optical micrographs of nano slider surface after the test, (b) zoom image of (a)

실제로 이러한 scratch는 마멸입자들에 의해 발생하고 이것에 의하여 디스크의 자성층이 손상이 되면 정상적인 자기 정보의 입력과 출력이 이루어지지 못하게 된다. 또한 이러한 손상이 심해지면 헤드 슬라이더의 조기 파손이 일어난다. 따라서 마멸 입자의 발생을 최대한 억제할 수 있도록 재료의 선정을 하거나 입자 발생 시 헤드 슬라이더의 공기 베어링 표면에서 공기의 유동이 헤드 슬라이더에 마멸 입자를 쌓이지 않도록 하거나 마멸 입자의 거동을 제어 할 수 있는 기술이 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 디스크의 헤드/디스크 인터페이스를 scratch test와 TAA 실험을 통하여 평가하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TAA 신호값의 변화원인은 부상높이가 아니며, 자속의 속도와 헤드의 성능과 관계를 가진다.
2. 디스크의 DLC overcoat의 임계 하중은 scratch test를 통하여 구할 수 있고 이때 임계 하중은 0.067 gf이고 Hertzian contact theory에 의한 임계 압력은 3.94 GPa이다.
3. 임계 하중이상으로 디스크에 scratch를 가하면 자성층은 손상되고 따라서 TAA를 실시한 결과 데이터의 기록과 재생은 방해되었다.
4. 과도한 하중에 의한 scratch는 burr를 발생시키고 이것은 헤드 슬라이더와 디스크의 조기파손의 원인이 된다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(과제번호:2000G0201)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. H. Kondo, H. Takino, H. Osaki, N. Saito, and H. Kano, "Design and Construction of Magnetic Storage Devices," in Handbook of Micro/Nano Tribology, Edited by B. Bhushan, CRC press, pp. 597-672, 1999.
2. B. Bhushan, and Y. Li, "Wear studies of contact

- recording interface with microfabricated head," *J. Appl. Phys.*, Vol. 79, No. 8, 1996.
3. J. Halling, *Principle of Tribology*, The Macmillan Press, 1983.
 4. G. B. Sinclair, H-L Lee, and J. J. Keremes, "On the Stresses and Temperature Induced When a Head Hits a Disk," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 4, pp. 209-218, 1992.
 5. Francois Rossi, "Diamond and diamond-like carbon films," in *Advanced techniques for surface engineering*, Kluwer Academic Publishers, pp. 371-379, 1992.