

하드 디스크의 표면 파손 기구에 관한 고찰

Surface Damage Mechanism of Hard Disk

정 구현(연세대학교 대학원), 김 대은(연세대학교 기계공학과), 김 상국(대우 전자)
Koo-Hyun, Chung (Graduate School, Yonsei Univ.), Dae-Eun, Kim (Yonsei Univ.),
Sang-Kook, Kim (Daewoo Electronics Company)

ABSTRACT

In this work the surface damage mechanism of hard disk was investigated. Experiments were performed to simulate the contact during start and stop. Evidence of significant surface damage appeared after 20,000 cycles. It was found that despite higher hardness, the slider showed more signs of damage than the disk. Optical microscopy showed that the surface was damaged by abrasive action as well as adhesion of wear debris.

Key Word : Hard disk(하드 디스크), Head(헤드), Disk(디스크), Wear(마멸), Surface damage(표면 파손)

1. 서 론

하드 디스크는 컴퓨터의 자료를 보관하고 기억하는 장치로서 컴퓨터의 보급이 증대함에 따라 필수적인 장치로 중요성이 날로 커지고 있다. 현재 하드 디스크의 연구는 용량의 증대, 전송 속도의 고속화와 더불어 하드 디스크의 신뢰성 및 내구성을 높이는 방향으로 진행되고 있다^[1]. 지금까지의 연구 결과에 의하면, 헤드와 디스크의 상호 작용은 작동시 공기 배어링에 의한 hydrodynamic lubrication이 이루어지고, 디스크가 회전을 시작하거나 멈출 때는 미끄럼 접촉을 일으키게 되는데, 이러한 상호 작용에 의해 데이터의 저장 밀도와 전송 속도, 디스크의 신뢰성과 내구성은 많은 영향을 받는다. 즉 현재 이룩하도록 되어 있는 헤드/디스크 시스템의 경우, 헤드와 디스크의 간격이 작아질수록 데이터의 저장 밀도와 전송 속도는 커지는 반면, 신뢰성 및 내구성은 떨어지게 된다^[2,3]. 일반적인 하드 디스크의 경우 헤드와 디스크 사이의 간격은 수백 나노미터 정도이다. 그러나, 보다 높은 저장 밀도를 가진 하드 디스크의 사용이 불가피함에 따라 near contact/contact 헤드의 사용이 제안되었고^[4], 이를 위해 많은 연구가 진행되고 있는 형편이다. 특히, 디스크의 경도^[5]나 표면 거칠기의 영향^[6], 환경의 영향에 따른 하드 디

스크의 성능 평가^[7], 각 재료에 따른 마찰 마멸 성능 평가 등이 이루어지고 있다^[8]. 일반적으로 마멸을 줄이는 방법으로는 carbon coating이나 수 나노미터의 윤활제를 사용하는 방법이 실용화되어 있으나^[2] 헤드와 디스크의 마찰, 마멸에 대한 연구는 아직 중요한 과제로 남아 있다.

본 연구에서는 하드 디스크의 내구성과 관련되는 기계적인 파손에 대하여 고찰하고자 한다. 헤드와 디스크의 내구성을 평가하기 위하여 실험은 2가지로 나누어 진행하였다. 실험의 내용은 첫째, 디스크가 회전을 하기 시작할 때와 멈출 때 발생하는 헤드와 디스크의 접촉으로 인한 파손을 알아보기 위해 CSS (contact start/stop) 실험을 수행하였으며, 둘째, 저속에서 헤드와 디스크를 접촉시킴으로써 발생하는 마멸 및 표면 파손에 대하여 고찰하였다.

위의 실험 결과들을 비교하여, 현재 헤드와 디스크의 접촉으로 인한 표면 파손 현상을 분석하고자 하였다.

2. 실험 시편

실제로 이용되는 하드 디스크의 헤드와 디스크를 이용하여 실험을 진행하였다. 각 부분의 경도와 표

면 거칠기는 하드 디스크의 종류에 따라 다르게 나눠났으며 이를 정리하면 Table 1 과 같다.

Table 1 Specimen property

Hard disk specimen	A	B
Air-bearing surface hardness	600 HV	760 HV
Disk surface hardness	106 HV	155 HV
Disk surface roughness (Ra)	8 nm	7.4 nm

3. CSS (contact-start-stop) 실험

하드 디스크는 실제 작동 중, 스팬들이 회전을 시작하여 가속 후 정속에 이르기 전까지, 또는 감속되어 정지할 때까지 디스크와 물리적인 접촉이 일어나게 된다. 현재 하드 디스크의 기술은 전원이 꺼지면 자동으로 파킹 영역에 헤드가 위치하도록 하여 저장된 데이터의 손상을 방지하도록 하고 있다. 그러나 실제로는 외란, 즉 충격이나 진동 등에 의하여 작동 중에도 디스크와 헤드가 접촉을 일으킬 수 있는데, 이것은 디스크의 수명과 성능에 직접적으로 연관된다. 그러므로 본 실험에서는 실제 하드 디스크를 이용하여, 가속되어 정속에 이르기까지, 다시 감속되어 완전히 정지될 때까지의 과정을 반복하여 헤드와 디스크의 기계적인 파손에 대하여 고찰하고자 한다.

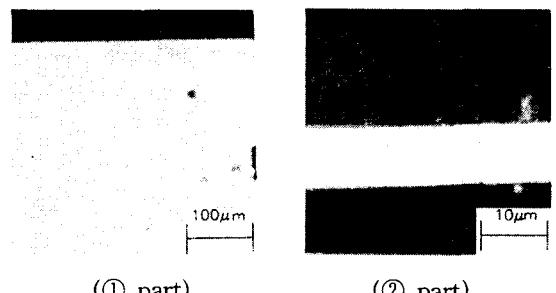
3.1 실험 방법 및 장치

실제의 하드 디스크에서 헤드와 디스크를 분리하지 않고, 헤드의 위치만을 바꾸어 가며 실험을 진행하였다. 따라서 디스크의 경우에는 각 부분에 따라 on/off 회수가 달라지게 되나, 헤드는 on/off 회수가 계속 누적되게 된다. PIC16C84를 이용한 회로를 자체 제작하여 실험을 진행하였으며, A 시편을 이용하였다. 일반적인 하드 디스크의 수명을 고려하면 헤드/디스크 인터페이스의 메커니즘이 유지되는 CSS 회수는 7,500~10,000회 정도이므로^[2] 실험은 5,000회에서부터 25,000회까지 행하였다.

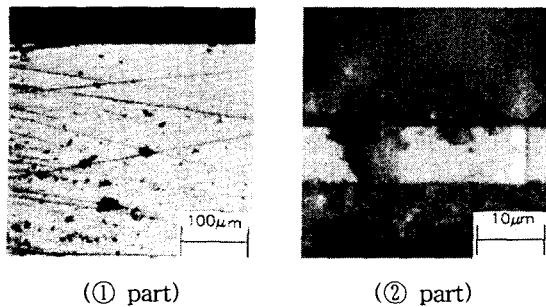
3.2 실험 결과

CSS 회수는 5,000회, 10,000회, 12,500회, 17,500회, 20,000회, 25,000회로 진행하였으며, 환경은 상온 (20°C), 습도 20~30%에서 밀폐된 상태를 유지하며 실험하였다. 실험 후 각각의 표면 조도를 측정하고, 금속 현미경을 통해 사진 촬영하여 디스크와 헤드의 마멸 및 표면 파손 상태를 알아보았다. 실험 과정에서 디스크가 회전을 시작할 때 보다 정지할 때 더 오랜 시간이 소요되었으므로, 정지할 때 마멸이 더 크다는 것을 예측할 수 있다. 디스크가 가/감속되는 것은 하드 디스크의 종류에 따라 다른 양상을 보이나, 시편 A의 경우 디스크가 회전을 시작하여 정속에 도달할 때와 전원이 꺼진 후 완전히 정지할 때까지의 회전수를 카운터를 이용해서 측정한 결과, 회전을 시작할 때는 약 80회의 회전 후 정속에 도달하고, 회전을 멈출 때는 약 400회의 회전 후에 정지하게 되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 1 은 광학 현미경을 이용하여 사진 촬영한 것이다. ①부분은 공기 베어링 표면(air-bearing surface)이며, ②부분은 헤드에 근접한 부분이다. 본 실험의 결과로서, 공기 베어링 표면의 손상이 CSS 회수에 따라 증가하는 것으로 나타나는데, Fig. 1의 a와 b를 비교해 보면, b의 경우에 표면 파손이 훨씬 심하게 진행되었음을 알 수 있다. 이러한 것으로 보아 약 20,000회 이후부터 마멸 및 표면 파손이 급속하게 진행됨을 알 수 있다. 일반적인 슬라이더의 마멸 현상은 연삭, 피로, 충격 마멸로 알려져 있는데^[2], Fig. 1.b에서 스크래치의 형상으로 보아 연삭 마멸로 예측할 수 있고, 부분 부분 나타나는 파손 흔적을 볼 때, 흡착 마멸도 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, 헤드와 디스크는 정지 상태부터 4500 rpm의 고속까지 경험하므로 그에 따라 모든 형태의 마멸, 즉 저속의 경우 발생하는 흡착 마멸, CSS의 반복으로 인한 피로에 의한 마멸도 발생할 것으로 여겨진다.



a. CSS test - 17,500 (Sliding distance : 330,000m)



b. CSS test - 35,000 (Sliding distance : 905,000m)

Fig. 1 Optical micrographs - air-bearing surface of slider and head part

Fig. 1.b에서 마멸 트랙이 여러 방향인 것을 나타내고 있는데, 이는 rotary actuator로 인한 skew angle에 의하여 발생한 것이다. 또한, 슬라이더의 표면에 크랙이나 입자가 달라붙어 있는 것이 보이는 데, 공기 베어링 표면의 경도 (600 HV)는 디스크의 경도 (106 HV)에 비해 상대적으로 매우 크나, 디스크에 비해 헤드의 미끄럼 거리가 크기 때문에 마멸 흔적이 크게 나타나는 것으로 보인다. 미끄럼 거리는 헤드와 디스크가 접촉하는 동안 디스크의 회전수를 측정해 보면 알 수 있다. 실험시 관찰 결과로서 디스크의 회전속도가 약 1500 rpm일 때 헤드와 디스크의 접촉으로 인한 마찰 계수의 급격한 변화가 발생하는 것을 알 수 있었으므로, 디스크가 정지 상태로부터 가속되어 약 1500 rpm에 도달할 때까지의 회전수와, 1500 rpm에서부터 감속되어 정지할 때까지의 회전수를 측정하였다. 그 결과 가속될 때는 약 20회, 감속될 때는 약 100회의 회전이 소요되는 것을 알 수 있었다. 디스크의 접촉 부위는 슬라이더의 크기 (2.8 mm)만큼만 해당하므로 회전수에 따른 디스크의 미끄럼 거리를 구하고, 디스크에서의 접촉 반경과 접촉시의 회전수를 이용하면, 헤드의 미끄럼 거리를 예측할 수 있다 (Table 2).

Table 2 Sliding distance of slider and disk - CSS test

CSS 회수	5,000	10,000	17,500	20,000
디스크 접촉 부분의 미끄럼 거리(m)	1,680	3,360	5,880	6,720
CSS 회수	17,500		35,000	
헤드의 미끄럼 거리(m)		330,000		905,000

위의 표를 보면, 헤드의 경우에 미끄럼 거리가 더 크므로 디스크 보다 많은 표면 파손이 일어난 것을 설명할 수 있다. 직접적으로 마멸량을 측정하여 마멸 계수를 구하기는 어려웠으므로 마멸량의 비교를 위해 Archard's law를 이용하였다.

$$V = \frac{kLS}{3H} \quad (1)$$

여기서 k는 마멸 계수, L은 접촉 하중, S는 미끄럼 거리, H는 접촉하는 두 재료의 경도이다. 마멸 계수는 건식, 불완전 윤활에서 금속/비금속 접촉의 경우 약 1.7×10^{-6} 이라 예측할 수 있으므로^[9], 간접적으로 마멸량을 계산해 보았다. L은 약 10 gf 정도, 디스크와 헤드의 경도는 각각 106 HV, 600 HV이므로 Table 3 과 같이 된다.

Table 3 Estimated wear volume - CSS test

CSS 회수	5,000회	10,000회	17,500회	20,000회
디스크의 마멸량(mm^3)	90×10^{-6}	180×10^{-6}	314×10^{-6}	360×10^{-6}
CSS 회수	17,500회			
헤드의 마멸량(mm^3)	3.1×10^{-3}			

Fig. 1 의 헤드 부분을 보면, CSS 회수가 증가할 수록 입자가 많이 달라붙는 것을 알 수 있다. 이는 마멸이 진행되면서, 슬라이더의 형상과 미끄럼의 진행 방향에 의하여 마멸 입자가 헤드 쪽으로 이동하는 것으로 생각할 수 있다. 즉 디스크 회전시 접선 방향은 슬라이더의 아래쪽에서부터, 헤드가 위치한 위쪽으로 진행되므로 마멸 입자들이 헤드 쪽으로 이동한 것으로 설명할 수 있다. 그러나 상대적으로 약 20,000회의 CSS 실험으로는 디스크의 파손이나 마멸 흔적은 구분하기 힘들었으며 표면 거칠기의 변화는 나타나지 않았다.

4. 저속 회전 실험

본 실험에서는 헤드와 디스크를 완전히 접촉시켜 상대 운동을 유발함으로써 그 때 발생하는 문제를 파악하도록 한다. 그럼으로써 디스크가 고속에서 회전할 때의 접촉 현상을 간접적으로 해석하고, 하드 디스크의 내구성을 파악하고자 한다.

4. 실험 방법 및 장치

하드 디스크의 기본적인 상태, 즉 슬라이더에 걸리는 preload, rotary actuator의 상태 등을 유지하면서 디스크를 저속에서 회전시킴으로써, 디스크 회전 시 발생하는 양력을 줄여, 헤드와 디스크를 접촉시키도록 한다. 디스크의 속도는 헤드와 디스크가 확실하게 접촉하는 것으로 보여지는 120rpm으로 설정하였으며, 일정 시간 실험 후 마멸 정도를 관찰하고, 다시 헤드의 위치를 변화시켜 실험하였다.

4.2 실험 결과

다음은 시편 B를 이용하여 습도 40%에서 육안으로 마멸 트랙이 판별될 때까지 120rpm으로 실험한 결과이다. 실험 시간은 180시간이 소요되었으며, Fig 2, 3은 표면 파손에 대한 광학 현미경의 사진을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 슬라이더의 공기 베어링 표면 부분에 심한 표면 파손이 나타났는데, 이는 디스크에 비해 미끄럼 거리가 훨씬 크기 때문에 발생한 것이다. Fig 3은 디스크에 마멸트랙이 발생한 부분을 광학 현미경으로 촬영한 것인데, 공기 베어링 표면 만큼의 마멸 트랙이 형성되었다. 또한 CSS 실험과 마찬가지 방법으로 미끄럼 거리와 마멸량을 계산하면 Table 4와 같다.

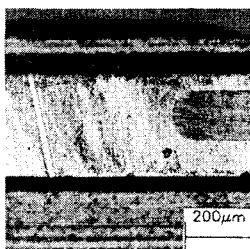
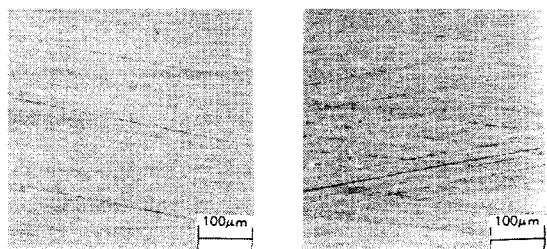


Fig. 2 Optical micrographs of slider after 391 hours - drag endurance test



a. Before experiment

b. After 180 hours

Fig. 3 Optical micrographs of disk - drag endurance test

Table 4 Sliding distance and estimated wear volume

구 분	접촉시간	미끄럼 거리(m)	마멸량(mm^3)
디스크	180시간	3,629	0.9×10^{-4}
헤드	391시간	500,139	2.98×10^{-3}

5. 고찰

CSS 실험과 저속 회전 실험에서의 미끄럼 거리에 대해 비교하면, 같은 트랙 위를 지날 경우에 CSS 실험 1,200회는 20시간의 실험에 해당한다. 저속회전 실험에서 180시간의 접촉 후 디스크 표면의 파손이 나타남을 알 수 있었으므로, 디스크의 표면 파손이 발생하는 미끄럼 거리는 약 11,000회의 CSS 실험에 해당한다. 그러나 실제 실험 결과에서는 20,000회까지도 디스크의 표면 파손은 나타나지 않았다. 또한, 시편 A의 디스크 경도 (106 HV)는 B의 경도 (155 HV)에 비해 작으므로 A의 표면 파손이 B보다 심할 것으로 보인다. 그러나 실험 결과에서 같은 미끄럼 거리에 대하여 시편 B의 경우 디스크의 표면 파손이 심하게 나타나고 있다. 이것은 헤드/디스크의 상대 속도 차이로 인하여 마멸과 표면 파손을 유발하는 기구가 다른 것으로 해석할 수 있다. 즉 CSS 실험의 경우에 접촉이 발생하는 구간은 대략적으로 0~1,500 rpm 이므로 저속 회전 실험에 비하여 디스크의 회전 속도가 평균적으로 빠르고, 디스크의 회전 속도가 빠를수록 슬라이더에 작용하는 양력이 커지게 되어 헤드/디스크의 인터페이스에서의 힘의 합력은 작아지게 된다. 이러한 현상이 CSS 실험에서 상대적으로 적은 마멸과 표면 파손을 유발한 것으로 보인다. 그러나, 이상적으로 계산된 마멸량을 비교해 보면, Table 3에서 17,500회의 CSS 실험에 대한 디스크의 마멸량 (0.314×10^{-3})은 Table 4에서 180시간의 저속 회전 실험에 대한 디스크의 마멸량 (0.9×10^{-4})보다 크게 나타났다. 이것은 두 실험에서 마멸 계수의 차이가 있다는 것을 나타내며, 마멸량을 측정하여 비교해야 할 것이라고 사료된다.

실험 결과를 통하여 하드 디스크의 헤드/슬라이더와 디스크 표면의 접촉으로 인한 표면 파손에 대하여 보면, 기계적인 관점에서 볼 때 하드 디스크의 내구성은 디스크의 파손에 비해 헤드/슬라이더의 파손이 보다 큰 역할을 하는 것을 알 수 있다. 실제로도 시편의 경도를 보면, 슬라이더의 경도가 디스크에 비해 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, 하드

디스크의 내구성을 향상시키기 위해서는 슬라이더의 경도를 향상시켜야 함을 알 수 있다. 또한 CSS 실험에서 나타난 바와 같이 스픈들의 가/감속도는 헤드와 디스크가 접촉하는 미끄럼 거리에 영향을 주게 된다. 그러므로 보다 높은 내구성을 위해서는 헤드 가 이/착륙할 때의 가/감속도를 크게 하는 것이 좋을 것이라고 사료된다.

6. 결 론

- 1) 슬라이더의 경도가 디스크에 비하여 훨씬 크나, 미끄럼 거리에 의하여 슬라이더의 파손이 하드 디스크의 내구성에 큰 영향을 미친다. 그러므로 하드 디스크의 내구성을 향상시키기 위해서는 상대적으로 디스크의 마멸은 슬라이더와 비교하여 훨씬 적다.
- 2) 같은 트랙에서 CSS test를 반복적으로 할 경우, 약 20,000회 이후부터 슬라이더 표면의 파손이 심해졌으며, 표면에서 연삭 마멸 흔적과 마멸 입자가 붙어 있는 것을 알 수 있고, 헤드 부근에 마멸 입자가 쌓이는 것을 알 수 있었다.
- 3) 헤드/슬라이더와 디스크의 마멸 및 표면 파손에서는 양력 발생으로 인하여 상대 속도가 큰 역할을 하는데, 저속에서의 접촉은 큰 표면 파손을 유발할 수 있다.

7. 참고 문헌

- [1] M. S. John and P. R. Peck, "Behavior of the Head-Disk Interface in Future Disk Drives", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, 1994, pp. 410-416.
- [2] B. Bhushan, "Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices", Springer-Verlag, 1990.
- [3] C. Denis Mee and E. D. Daniel, "Magnetic Recording", McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [4] H. Hamilton, R. Anderson, and K. Goodson, "Contact Perpendicular Recording on Rigid Media", IEEE Trans. on Mag., Vol. 27, 1991, pp. 4921-4926.
- [5] E. R. Kral, K. Komvopoulos, and D. B. Bogy, "Hardness of Thin-Film Media : Scratch Experiments and Finite Element Method", Journal of Tribology, Vol. 118, 1996, pp. 1-11.
- [6] Y. Wu and F. E. Talke, "The Effect of Surface Roughness on the Head-Tape Interface", Journal of Tribology, Vol. 118, 1996, pp. 376-381.
- [7] H. Tian and T. Matsudaria, "The Role of Relative Humidity, Surface Roughness and Liquid Build-Up on Static Friction Behavior of the Head/Disk Interface", Journal of Tribology, Vol. 115, 1993, pp. 28-35.
- [8] Y. Kawakubo and Y. Yahisa, "Transparent Pin Wear Test on Thin-Film Magnetic Disk", Journal of Tribology, Vol. 117, 1995, pp. 297-301.
- [9] E. Rabinowicz "Wear Coefficients-Metals", Wear Control Handbook, NY, ASME, 1980, pp. 475-506.