

# 헤드/디스크 시스템의 마찰력 측정 및 stiction 특성

## Characteristics of friction and stiction in head/disk interface

이성창 · 정구현 · 김대은\*

연세대학교 대학원

\*연세대학교 기계공학과

### Abstract

In recent years the recording density of hard disk has been increasing largely due to the decreasing flying height of head. However, as the flying height is decreased the reliability issue becomes ever more critical. This is because the reliability and durability of hard disk is related to the head/disk interaction as the two components come into partial or full contact.

In this work characteristics of friction and stiction in head/disk interface was investigated using constant speed drag test and CSS(contact-start-stop) test. The purpose of this research is to identify the frictional properties of head/disk interface

**Key words** : friction, stiction, head/disk interface, relative humidity  
CSS(contact-start-stop), constant speed drag test

### I 서 론

정보화 시대와 더불어 이루어진 컴퓨터의 비약적인 발전에서 데이터 저장 장치의 중요성은 날로 커지고 있는데, 가장 중요한 정보 저장기기중 하나인 하드 디스크에 관한 지금까지의 연구 결과에 의하면, 헤드와 디스크의 상호 작용은 디스크가 회전을 시작하거나 멈출 때는 미끄럼 접촉을 일으키게 되고, 정상 상태에서는 공기 베어링에 의한 hydrodynamic lubrication이 이루어져 헤드는 디스크 표면 위를 일정 높이로 떠있게 된다[1]. 또한 데이터의 저장밀도와 전송속도, 디스크의 신뢰성과 내구성은 이러한 상호 작용에 의해 결정된다.

최근에는 저장 밀도의 획기적인 향상을 위해 헤드/디스크의 간격을 극소로 감소시키는 방안으로 near contact/contact 헤드의 사용이 제안되었으며 현재 헤드와 디스크의 간격

을 수십 nm 까지 감소시키는데 성공하였다 [2-4]. 그러나 헤드/디스크의 간격이 감소될 경우, 헤드/디스크의 접촉으로 인한 마찰·마멸 및 표면파손에 문제를 극복하는 것이 매우 시급하다. 디스크의 평균 표면 거칠기는 현재 약 3 nm이므로 최대 거칠기에 해당하는 요철의 높이는 약 20 nm 정도로 볼 수 있다. 그러므로 헤드와 디스크의 간격이 약 20 nm 이하로 감소될 경우에는 접촉이 불가피하다.

헤드와 디스크의 미끄럼 접촉시 마멸을 줄이는 방법으로는 carbon coating이나 수 nm의 윤활제를 사용하는 방법이 실용화되어 있으며[1], 현재 헤드 슬라이더의 소형화 및 경량화가 진행되고 있다. 그러나 획기적인 방법이 제시되지 않은 점을 고려하면 헤드/디스크 인터페이스에서의 접촉으로 인한 마찰 특성에 관한 기초적이고 체계적인 연구가 시급하다.

## II 실험 방법

본 연구에서는 다양한 하중과 환경의 변화에 대한 저속회전 실험(constant speed drag)과 헤드 슬라이더가 디스크 표면 위에서 이·착륙을 반복하는 CSS(constant start stop) 실험을 통하여 실제 하드 디스크의 작동시 발생하는 정마찰계수와 동마찰계수를 구하고 이를 통하여 head/disk 인터페이스에서의 특성을 파악하고자 하였다.

하드 디스크의 종류에 따라, 헤드 슬라이더의 재료나 디스크의 코팅 성분이 다르므로 마찰·마멸 특성은 크게 영향을 받게 된다. 따라서, 실험시편은 현재 상용화되는 1.6 GByte 용량 하드 디스크의 헤드 슬라이더와 디스크로 통일하였으며, 모든 실험은 Class 100의 청정환경에서 진행되었다.

### 2.1 Constant Speed Drag 실험

헤드와 디스크를 완전히 접촉시킨 상태에서 상대 운동을 유발함으로써, 저속에서의 헤드 슬라이더와 디스크의 접촉으로 인한 마찰특성을 파악하고자 하였다. 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 반도체 strain gage를 부착한 load beam을 제작하여 수직 하중과 디스크 회전시의 마찰력을 측정하였다.

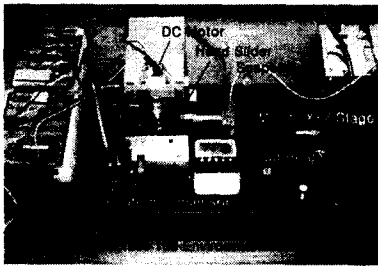


Fig. 1 Constant speed drag tester setup

### 2.2 CSS (contact-start/stop) 실험

실제 하드 디스크를 이용하여, 정지 상태에서부터 가속되어 정속에 이르기까지, 다시 감속되어 완전히 정지될 때까지를 반복하여 이 때 발생하는 헤드와 디스크의 마찰특성에 대하여 고찰하고자 하였다.

실험 장치는 Fig. 2와 같으며, 디스크의 일정 트랙 위에 헤드 슬라이더를 고정시킨 후, 프로그램 상에서 on/off 주기와 CSS 회수를 결정할 수 있도록 회로를 제작하여 헤드가 고정된 위치에서 이·착륙을 반복하도록 하였다.

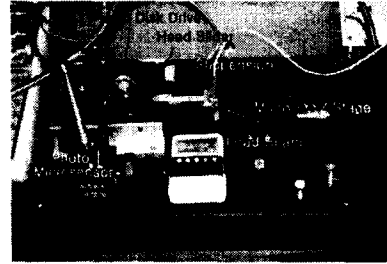


Fig. 2 CSS tester setup

### 2.3 실험 조건 및 측정방법

실험은 실제 하드 디스크의 작동 상태를 유지하도록 Class 100의 청정도와 3.5 gf의 preload를 기본적으로 설정하였고, 미끄럼 거리 및 선속도의 일관성을 위해 반경 4 cm 위치에서 미끄럼 접촉이 일어나도록 하였다. 각 실험조건을 정리하면 table 1과 같다.

Table 1 Experimental condition

	Temp (°C)	RH (%)	Normal load (gf)	Disk speed (rpm)	Sliding distance (cycles)
Drag	20 ~25	20 ~60	3.5, 2, 0.3, 0.04, 0.0035	60, 120, 180, 1200, 3600	10000, 30000, 50000, 100000, 200000
CSS	20 ~25	18 ~25	3.5	0~3600	300, 1000, 1600, 3200

디스크 가·감속시의 속도 변화와 접촉으로 인한 마찰계수의 변화는 Fig. 3과 같이 나타난다. 디스크가 회전을 시작하면 stiction force에 의한 마찰 계수는 Fig. 3의 a 지점과

같이 매우 큰 값을 가진다. 디스크가 가속되는 동안 헤드 슬라이더는 pitch, roll 운동을 일으키고 이에 따라 접촉 면적이 감소하고 마찰계수 또한 감소하게 된다. 디스크의 속도가 b 지점에 이르면 헤드 슬라이더의 부상은 정상 상태에 도달하고, 헤드 슬라이더와 공기의 경계면에서는 유동으로 인한 힘이 존재하므로(no-slip condition)[1,5] 디스크 회전 방향으로의 힘이 마찰력으로 환산되어 나타난다. 디스크가 감속하여 c 지점에 이르면 헤드 슬라이더의 pitch, roll각은 감소하기 시작하며 작록하게 된다. 이 때 접촉으로 인한 마찰계수는 서서히 상승하게 되며 디스크가 정지하기 직전의 마찰계수는 d 지점과 같이 큰 값을 갖게 된다.

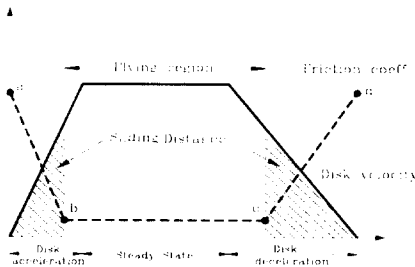


Fig. 3 Disk velocity and friction coefficient behavior for CSS test

### III 실험 결과

#### 3.1 Constant Speed Drag 실험

##### 3.1.1 하중, 속도 및 환경에 따른 마찰계수의 비교

Fig. 4는 3.5 gf의 하중, 온도 20 °C, 습도 40 %의 Class 100 환경에서 디스크 속도 60, 120, 180, 1200, 3600 rpm에 대한 마찰계수 변화를 나타내는 그래프이다. 디스크가 완전히 정상 상태에 도달한 직후부터 마찰계수를 측정하였고 sampling rate, 50 Hz로 1 초 동안 평균값을 취하였다. (5회 반복) 180 rpm 이하의 저속에서 마찰계수는 약 0.25~0.3 의 값을 나타냈으나 1,200 rpm 이상에서는 약 0.05 정도로 감소하게 된다. 이는 hydrodynamic lubrication에 의한 것으로 보

여지며, 180 rpm 이하에서는 헤드 슬라이더와 디스크의 직접적인 접촉이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러므로 저속에서 헤드 슬라이더와 디스크의 접촉으로 인한 초기 마찰계수는 20 °C, 40 % RH에서 약 0.25~0.3 정도의 값을 가진다.

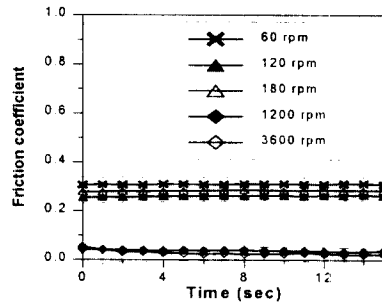


Fig. 4 Friction coefficient with respect to steady-state disk velocity (3.5 gf, 20 °C, 40 %, Class 100)

Fig. 5는 습도를 20, 40, 60 %로 변화시키고 각각에 대하여 하중을 1 gf, 2 gf, 3.5 gf로 바꾸어가며 디스크 속도 60 rpm에서 마찰계수를 측정하여 그 그래프이다. 정상 상태에 도달한 후 1 분간의 평균값을 구하고 5 회 반복 실험에 대한 편차를 나타냈다. 같은 하중에 대해서 습도가 증가할수록 마찰계수는 증가하는 것을 알 수 있는데, 이것은 습도 증가에 따라 디스크 표면 위에 습기가 응축되고, 그로 인한 표면 장력 및 meniscus effect에 의한 영향으로 보여진다. 즉, 슬라이더와 디스크의 표면 거칠기가 수 nm로써 요철간 접촉에서 발생하는 틈은 상대적으로 매우 작으므로, 습도증가에 의해 습기가 응축될 경우 발생하는 표면 장력 및 간접적인 접촉 면적의 증가는 마찰력을 결정하는 지배적인 요소로 작용하게 되는 것으로 생각된다. 상대 습도가 20 %일 경우에는 하중에 대한 마찰계수의 변화는 나타나지 않았으나, 60 %로 커졌을 경우 마찰계수는 급격하게 상승하게 되는 것을 알 수 있다. 실제적으로 1~3.5 gf의 하중은 마찰계수에 크게 영향을 미치지 못하였으나 습도가 높은 경우, Fig. 6과 같이 수직하중이 상승하면 실제 접촉 면적이 증가

하고 습기가 응축될 가능성이 커지게 되어 마찰계수가 상승하는 효과를 나타내는 것으로 생각된다.

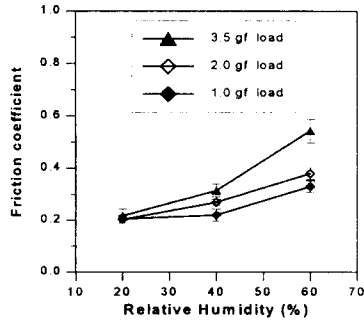


Fig. 5 Friction coefficient with respect to relative humidity and load (60rpm, 20 °C)

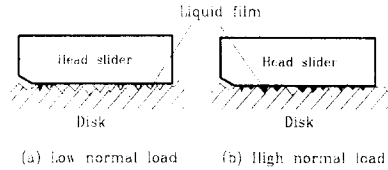


Fig. 6 Meniscus effect for different normal load

### 3.2 CSS 실험

#### 3.2.1 디스크 가·감속시 마찰계수의 변화

실험에 이용된 스피들 모터는 전원이 켜진 후 가속되어 약 2초 후에 정속에 도달하고 전원이 꺼진 후 감속되어 약 20 초 후에 정지하게 된다. Fig. 7은 1회 CSS에 대한 디스크의 속도와 마찰계수의 변화를 나타낸다. 여기서 디스크 속도 약 1000 rpm 이상에서 마찰계수는 일정한 값을 유지하므로 헤드 슬라이더는 디스크 속도 약 1000 rpm에서 안정되게 부상되는 것을 알 수 있다.

디스크의 속도 변화에 따라 마찰계수가 다르게 나타나는 것은 hydrodynamic lubrication에 의한 효과이다. 그러나 정속에 도달했을 경우에도 헤드 슬라이더의 표면과 공기의 경계면에서는 no-slip condition이 적용되므로[1,5] 접선 방향의 힘은 존재하며, 이에 의

한 마찰계수는 0.1 이하인 것을 알 수 있다.

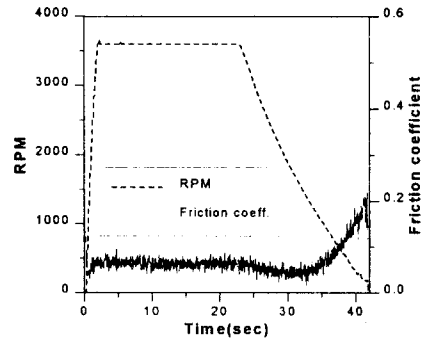


Fig. 7 Friction coefficient vs disk velocity for CSS test (3.5 gf, 20 °C, 20 %, Class 100)

디스크 가·감속에 따라 헤드 슬라이더가 이·착륙할 경우 마찰계수는 급격한 변화를 나타내지 않았으며 디스크 속도 변화에 따라서 서서히 변하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 8과 같이 설명할 수 있다. 즉, 디스크 회전 초기에 Fig. 8(a)와 같은 완전 접촉 상태에서는 부상력이 존재하지 않으므로 헤드 슬라이더와 디스크의 요철간 접촉에서, 상대적으로 큰 실제 접촉면적(real contact area)을 가지게 되고 큰 마찰계수를 나타낸다. 디스크가 가속되면서 정속에 도달하기 전까지는 Fig. 8(b)와 같이 헤드 슬라이더가 완전히 부상하지 못하고 pitch, roll 운동을 일으키며, 이때 부상력이 발생하여 요철에 가해지는 유효하중이 작아진다. 그러므로 실제 접촉면적이 감소하여 마찰계수는 작아지는 경향을 나타낸다. 디스크 속도가 약 1000 rpm 이상에 도달하면 Fig. 8(c)와 같이 헤드 슬라이더는 부상하고, 마찰력은 헤드 슬라이더와 공기의 경계면에서의 유체에 의한 힘만으로 나타나게 된다. 디스크가 감속되게 되면 슬라이더의 pitch angle과 roll angle은 작아지게 되므로, 접촉 면적이 증가하여 디스크 표면 요철과의 접촉이 많이 발생하고 마찰계수는 점차적으로 상승하게 된다. 디스크 속도가 저속에 이르면 슬라이더와 디스크는 서로 면접촉을 일으키고 디스크가 정지하기 직전에 마

찰계수는 가장 큰 값을 나타낸다

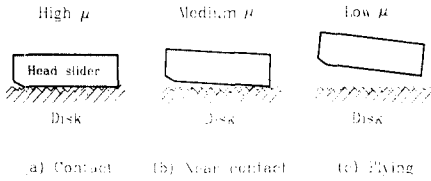


Fig. 8 The motion of head slider during disk acceleration

디스크의 속도 변화에 따라 실제 접촉면적이 증가하게 되면 상대적으로 큰 전단응력을 받는 요철의 접촉이 많아지므로, 전단응력에 의한 소성변형이 마찰력을 야기시킨다고 볼 때 접촉면적의 증가는 마찰력의 증가를 유발하며 표면파손 또한 가속된다.

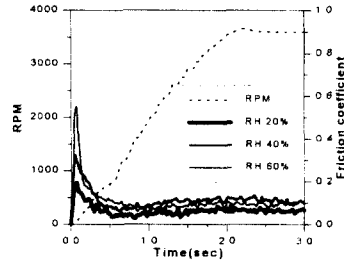
### 3.2.2 습도 변화에 따른 디스크 가·감속시 마찰계수의 변화

Contact-start-stop에 대한 습도의 영향을 파악하기 위하여 습도를 20, 40, 60 %로 변화시키며 그에 따른 마찰계수의 변화를 측정하였다. Fig. 9(a)는 디스크 가속시 습도 변화에 따른 마찰계수의 변화이며 Fig. 9(b)는 감속시의 마찰계수의 변화를 나타낸다.

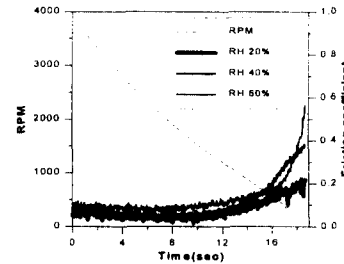
Constant speed drag test에서와 같이 습도증가에 따라 마찰계수가 상승하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 9에서 마찰계수의 변화를 보면, 습도 60 %에 대해서도 디스크 정속에서 마찰계수는 작은 값을 유지함을 알 수 있다. 그러므로 습도 60 %까지는 hydrodynamic lubrication이 유지되는 것을 알 수 있고 실제 하드 디스크 작동시 습도의 상승은 디스크가 저속에서 접촉할 때 지배적인 요소로 작용하며 헤드 슬라이더가 부상한 후에는 상대적으로 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Constant speed drag 실험에서 알 수 있듯이 습도가 증가하여 디스크 표면 위에 막이 형성될 경우에는 순간적으로 마찰계수가 커지며 공기 베어링 효과의 파괴를 일으킬 수 있다. 특히 실제 작동시 stiction force의

순간적인 상승을 유발하게 된다. 이러한 영향은 헤드 슬라이더나 디스크 표면의 파손을 급격히 증가시키며 하드 디스크의 수명에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 하드 디스크 내부의 습도를 약 20% 이하로 유지해야 할 것으로 생각되며, meniscus effect를 고려한 습도의 제어뿐만 아니라 윤활제의 두께 결정도 중요하다고 사료된다.



(a) Disk acceleration



(b) Disk deceleration

Fig. 9 Friction coefficient vs disk velocity with respect to relative humidity during disk acceleration and deceleration (3.5 gf, 20 °C, Class 100)

### 3.2.3. CSS 증가에 따른 정마찰계수 특성

CSS 회수를 300, 1000, 1600, 2000, 3600 회로 증가시키며 그 때의 정마찰계수를 측정하였다. 정마찰계수는 하드 디스크를 작동시킨 후부터 공기 베어링 효과에 의해 마찰계수가 감소하기 직전까지의 최고값으로 나타났다. Fig. 10은 CSS 회수 증가에 따른 정마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 각각의 CSS 회수에 대하여 4회의 반복 실험을 통한 평균값과 편차를 나타낸다. 300회의 CSS 이

후에서 정마찰계수가 비교적 급격히 상승하였는데 이것은 헤드 슬라이더와의 접촉으로 인하여 디스크 표면의 수 nm의 윤활제가 제거되면서 나타난 것으로 추측된다. 또한, 1600 회까지는 정마찰계수는 서서히 상승하는 경향을 나타내고, 이 후부터 급격히 상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 CSS 1600회부터 헤드 슬라이더 및 디스크의 표면과손이 급격히 이루어지기 때문으로 여겨진다.

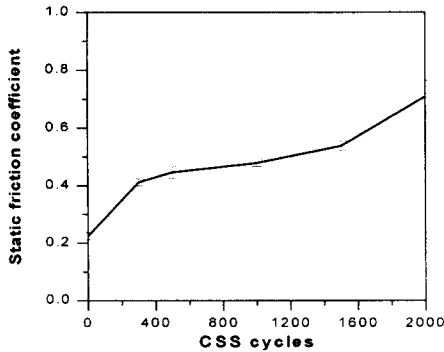


Fig. 10 Static friction coefficient with respect to CSS cycles (3.5 gf, 20 °C, 20 %, Class 100)

#### IV 결 론

하드 디스크의 헤드 슬라이더와 디스크의 접촉으로 인한 마찰특성을 파악하고자 constant speed drag 실험과 CSS 실험을 이용하였고, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하드 디스크의 헤드 슬라이더와 디스크 표면의 접촉에서 발생하는 마찰력에 주된 영향을 미치는 인자는 상대 습도이다.
2. 상대습도가 20 %에서 60 %로 상승할 때 마찰계수는 약 0.2에서 0.6으로 증가하는 경향을 보였다. 이것은 습도증가에 따라 디스크 표면 위에 막이 형성되거나 요철의 틈에서 발생하는 표면 장력의 증가로 인한 것으로 사료된다.
3. 상대습도가 낮을 경우에 수직 하중 변화에 따른 마찰계수의 변화는 크지 않았으

나, 습도가 높아질수록 수직 하중 증가에 대하여 마찰 계수의 상승폭이 커지는 경향을 나타냈다. 그러므로 헤드 슬라이더를 소형화함으로써 접촉 면적을 줄여 마찰력을 감소시킬 수 있으며 하중을 감소 시킴으로써 습도의 영향을 배제할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 후기

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

#### 참고 문헌

- [1] B. Bhushan, *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices*, Springer- verlag New York Inc., 1990.
- [2] D. B. Bogy, H. M. Stanley, M. Donovan, and E. Cha, "Some Critical Tribological Issues in Contact and Near-Contact Recording", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 29, No. 1, pp. 230-234, 1993.
- [3] A. R. Machcha, M. H. Azarian, and F. E. Talke, "An Investigation of Nano-Wear during Contact Recording", *Wear*, Vol. 197, pp. 211-220, 1996.
- [4] M. Suk, "The Effect of Disk Roughness on the Wear of Contact Recording Heads", *J. of Tribology*, Vol. 118, pp. 794-799, 1996.
- [5] B. J. Hamrock, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw Hill, 1994.