

하드 디스크 드라이브용 패드 슬라이더의 트라이볼로지 특성에 관한 실험적 연구

홍수열 · 좌성훈*[†] · 고정석* · 이형재

Samsung Information System America, San Jose, CA 95134, USA

*삼성 종합기술원 Storage Lab.

Experimental Analysis of Tribological Performances of Padder Slider in HDD

Soo-Youl Hong, Sung-Hoon Choa*[†] Jeong-Seok Koh* and Hyung Jai Lee

Samsung Information System America, San Jose, CA 95134, USA

*Samsung Advanced Institute of Technology, Storage Lab.

Abstract – In magnetic hard disk drives, higher areal recording density requires reduction of head-disk spacing. To overcome the increase of stiction associated with reduction of head-disk spacing, a padder slider, which adds pads to slider's air bearing surface, can be one of the practical solution for sub 20 nm flying height, and even for near contact recording. This study investigated the tribological characteristics of a padder slider. A padder slider took off slowly but showed less friction force than a normal slider. The hot/dry CSS test and drag test indicated that pad wear of a padder slider was negligible. The tribological performance of disk is an important factor to be considered. In particular, less carbon overcoat layer of the disk will result in higher stiction and wear in slider/disk interface. In conclusion, a padder slider shows encouraging tribological performances for practical use in HDD.

Key words – hard disk drive, head/disk interface, padder slider.

1. 서 론

현재 자기 하드 디스크 드라이브(HDD)에서는 고속으로 회전하는 디스크와 슬라이더 사이에 형성된 공기동압 베어링 효과로서 슬라이더가 부상하게 된다. 이러한 CSS(contact-start-stop) 기술에 있어서 주요 문제 중의 하나는 stiction이다. 과도한 기동 stiction은 슬라이더의 부상을 불가능하게 하고 flexure의 변형도 유발할 뿐 아니라 마모와 윤활막 손상을 초래하여 헤드/디스크 인터페이스(head/disk interface, HDI)를 심하게 손상시킨다. 따라서 CSS 기술을 적용한 하드 디스크 드라이브의 성공적인 설계를 위해서는 기동 stiction의 제어가 필수적이다. 고밀도 자기 기록을 위하여 디스크

와 헤드 사이의 간극은 더욱 더 작게 해야 하고 디스크 표면은 더욱 더 매끄러워져야 한다. 현재 헤드와 디스크 사이의 부상 높이는 약 20 nm(0.8 μ inch)로 pseudo-contact 영역에 이미 근접하고 있다. Fig. 1은 기록 밀도 증가에 따른 헤드 부상 높이의 감소 변화를 보여주는 한 예이다. 최근 상용화된 하드 디스크 드라이브에서 기록 밀도가 15 Gb/in² 정도이고 부상높이가 20 nm임을 감안하면 몇 년 후면 부상 높이가 수 nm에 도달하여 contact recording[1] 수준의 기술이 도입될 것으로 보인다.

한편 부상 높이가 감소함에 따라 기존보다 훨씬 더 매끄러운 디스크를 만들어야 하기 때문에 레이저 텍스처링(laser texturing)과 같은 잘 발달된 기술조차도 이미 성능면에서 한계를 보이고 있다. 즉, 현재 레이저 텍스처링에서 사용되고 있는 레이저 범프(bump)의 높

[†]주저자 · 책임저자 : shchoa@sisa.samsung.com

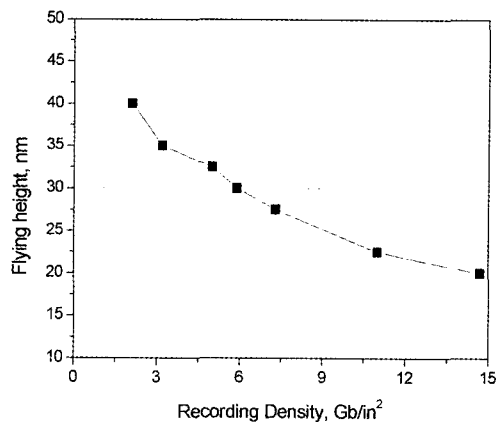


Fig. 1. Flying height trend vs. recording density.

이가 20 nm 정도임으로 부상 높이가 20 nm인 슬라이더가 부상하여 동작할 경우 디스크의 레이저 텍스처링의 범프와 슬라이더 사이의 간섭이 발생하여 많은 신뢰성 문제를 발생시키며 특히 stiction의 증가가 큰 문제로 대두되고 있다. 즉 슬라이더와 디스크의 간극을 줄이기 위해서는 디스크 레이저 범프의 높이를 감소시키는 것이 필수적이나 레이저 범프의 높이가 어느 한계 이상 감소할 경우 stiction이 급격히 증가하게 된다[2]. 따라서 CSS 기술을 연장하기 위하여 stiction을 줄이고자 하는 다양한 다른 방법들이 연구되고 있다. 그 중의 하나가 슬라이더 공기 베어링 표면(air bearing surface, ABS)에 패드(pad)를 만드는 것이다[3]. 패드 슬라이더(padder slider)는 ABS위에 etching이나 lithographic 기술을 이용하여 일정한 패턴을 가지거나 임의의 모양을 가진 랜딩 패드(landing pads)를 만드는 것으로 제조 방법이 간단하다는 장점이 있다[4,5]. 패드를 가진 공기 베어링 슬라이더는 슬라이더와 디스크 사이의 접촉 면적을 크게 줄여 stiction 감소에 효과가 있다는 것이 여러 연구자들에 의해 실험적으로 규명되었다[3,5,6]. 하지만, CSS 동작할 때 국부적인 패드/디스크 접촉에 의해 야기되는 패드 마모는 패드를 가진 ABS에서 해결되어야 하는 문제이다[7]. 또한 디스크의 윤활막 및 카본 오버코트(carbon overcoat) 보호막의 트라이볼로지 특성도 패드 슬라이더에 맞도록 설계되어야 하는 문제가 있다[3]. 이러한 잠재적인 위험 요소들을 최소화하기 위해서는 접촉 및 부상(take-off)하는 동안의 패드 공기 베어링 슬라이더의 마모 특성을 해석적으로 예측하는 것이 필요하고, 패드/디스크 인터페이스에 있어서 다양한 패드 설계와 인터페이스 변수들

의 영향도 철저히 연구되어야 한다. 즉, 현재까지는 패드 슬라이더를 실제 HDD에 적용하는데 있어서 해결해야 할 문제가 다수 남아있는 실정이다. 본 논문에서는 현재 개발 중인 패드 슬라이더와 패드 슬라이더용 디스크를 이용하여 여러 종류의 CSS 실험을 통하여 패드 슬라이더의 마찰 마모 특성을 분석하고 실제로 HDD에 적용할 수 있는지를 검토하였다. 또한, 패드 슬라이더 설계 시 고려해야 될 여러 가지 설계 인자들을 검토하였다.

2. 실험

본 연구에서는 헤드/디스크 실험에 상용 Lotus CSS 테스터 Model 7200을 사용하였고, back-cogging 마찰 실험에는 CETR CSS 테스터를 사용하였다. 실험은 단품 레벨의 헤드 및 디스크의 내구성 및 트라이볼로지 성능을 평가하는 데 일반적인 기준이 되는 6 종류의 실험을 수행하였다. 실험의 종류는 슬라이더가 초기 기동 시의 슬라이더/디스크에서의 부상 특성을 알기 위한 1 cycle CSS 실험 및 20 K cycle CSS 실험, 고온/저습(55°C/10% RH) 조건에서의 20 K cycle CSS 실험, fly stiction CSS 실험, drag 실험, 그리고 back-cogging 마찰 실험이다. 고온 고습 CSS 실험을 제외한 모든 실험은 상온(25°C), 상습도(40~50% RH)에서 수행되었으며 4회 반복하였다. 각 실험의 조건이 Table 1에 나타나 있다. 서스펜션(suspension)이 슬라이더를 통해 디스크에 가하는 초기하중, 즉 preload는 3.0 gf이다. 각 실험에서는 테스터에 부착된 stain gage를 이용하여 마찰력을 측정하였으며, 측정된 마찰력이 평균 8.3 gf 보다 높을 경우 기준 마찰력을 초과하여 사용에 적합치 않은 것으로 판단하였다. 1 cycle CSS 실험은 정지상태에서 5400 rpm에 도달하기까지의 시간이 3초, 등속 시간 1초, 등속에서 랜딩 존(landing zone)에 다시 착륙할 때까지의 시간, 즉 감속 시간을 7초, 그리고 정지 시간을 1초로 설정하였다. 1 cycle CSS 시의 슬라이더/디스크의 접촉 거동을 파악하기 위하여 stain gage와 acoustic emission(AE) 센서를 이용하여 마찰 계수 및 AE 신호를 측정하고 분석하였다. Fly stiction은 헤드가 일정 기간동안 디스크 위를 부상한 후 발생하는 stiction을 의미한다. 헤드가 부상하고 있을 동안 오염물질 및 윤활유 등이 슬라이더/디스크 사이에 축적되어 슬라이더/디스크 사이의 부착력을 증가시켜 stiction이 증가되며 슬라이더의 부상 높이가 감소

Table 1. CSS tests performed and test conditions

Test	Test Condition
1 Cycle CSS	: Acceleration : 3 seconds / Settling: 1 second / Deceleration: 7 seconds / Rest: 1 second
20 K Cycle CSS	20,000 cycles with 1 hour parking every 4,000 cycles and 24 hours parking at the end of the 20,000 cycles.
Fly Stiction CSS	1. Do 4,000 cycles CSS and park the head at landing zone for 1 hours and measure the break-away stiction force at every 2,000 cycles after 1 hours soak. 2. Spin-up and move the head to OD at $r = 1.70$ inches and fly the head for 24 hours at OD. 3. Park the head at landing zone for 24 hours. Measure the stiction force: this is the fly stiction
Drag Test	500 rpm of constant speed with duration of 7200 minutes on the landing zone
Back-cogging Test	Back-cogging : 0.25 seconds or 0.375 seconds Return to original position : 0.25 seconds or 0.375 seconds Acceleration : 2.5 seconds or 2.25 seconds Final speed : 5400 rpm

함에 따라 이 경향은 심화된다[8]. Drag 실험은 디스크를 저속으로 회전시킴으로써 슬라이더가 디스크 위를 부상할 수 있는 양력을 얻을 수 없기 때문에 슬라이더가 디스크와 완전히 접촉한 상태에서 서스펜션에 의해 가해진 preload가 디스크에 직접 전달되게 된다. 이 실험은 슬라이더/디스크 사이의 마모 및 파손 특성을 파악하기 위해서 주로 사용된다. 본 실험에서는 500 rpm으로 일정하게 회전시키면서 실험하였다. 한편 슬라이더/디스크 인터페이스에서 마찰 현상에 많은 영향을 주는 인자로서 back-cogging 현상이 있다. Back-cogging은 HDD 모터에 전원이 인가된 순간 모터가 정방향으로 회전하기 전, 순간적으로 역방향으로 회전하는 현상을 말하며 BLDC sensorless 모터의 특성 중의 하나이다. 마찰력은 대체적으로 모터가 회전하기 시작하는 순간에 가장 큰 값을 보이는데 back-cogging에 의한 마찰력의 증가도 심한 편이다. 본 실험에서는 CSS 테스터 모터의 back-cogging 회전시간과 회전각도를 조절하여 back-cogging이 슬라이더의 마찰력에 미치는 영향을 관찰하였다.

본 실험에서는 일반적으로 사용되는 negative pressure 타입의 슬라이더와 이 슬라이더에 원통형의 패드를 형성시킨 패드 슬라이더를 제작하여 각각 성능을 비교하여 보았다. 각 슬라이더는 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 제질로 만들어졌으며 $1\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ 크기의 30% pico slider이다. 헤드부, 즉 GMR(giant magnetoresistive) 센서는 슬라이더 후단부(trailing edge) center rail의 끝 단에 위치하여 있다. 각 슬라이더는 디스크 회전속도 5400 rpm에서 약 $18\text{ nm}(0.7\text{ }\mu\text{in})$ 의 부상높이를 갖도록 설계되어 있다. 각 슬라이더의 형상이 Fig. 2에 나타나 있

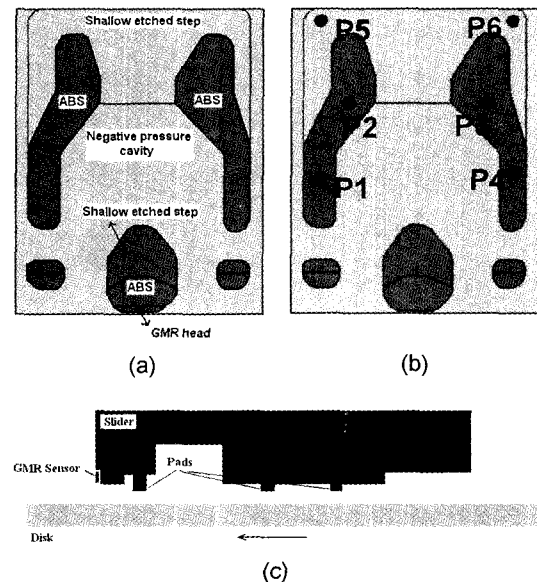


Fig. 2. Schematics of slider configurations (a) a normal negative pressure slider, (b) a padder slider, and (c) a sectional view of padder slider.

으며, Fig. 2(c)는 패드 슬라이더를 측면에서 관측한 단면도이다. 패드 슬라이더에는 지름이 $40\text{ }\mu\text{m}$ 인 원통형의 패드가 존재하고 있으며, 공기 베어링 슬라이더 표면에 4개(P1, P2, P3, P4) 그리고 슬라이더 후단부에 2개(P5, P6), 총 6개의 패드가 제작되어 있다. 슬라이더 공기 베어링 표면에 형성된 4개의 패드 높이는 약 400 \AA 이다. Fig. 3은 디스크 위치에 따라 각 슬라이더의 부상 높이를 수치적인 방법에 의하여 계산한 값이다. 디스크 위치에 따른 각 슬라이더의 부상 높이

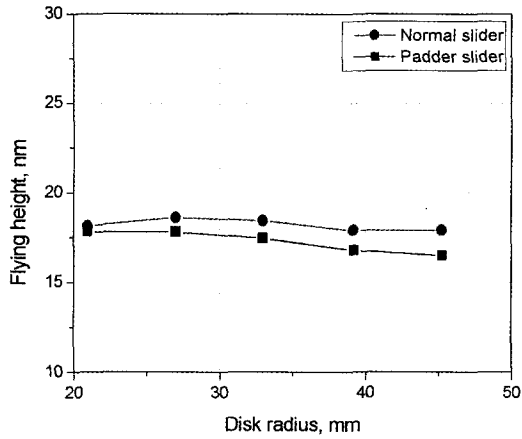


Fig. 3. Flying height variation with disk radius for normal slider and padder slider.

의 차이는 크지 않았으며 일반 슬라이더가 패드 슬라이더 보다 약간 큰 부상 높이를 보여주고 있다. 그러나 랜딩 존에서의 부상 높이는 동일하였다. 한편 각 헤드의 슬라이더 표면은 약 50 Å 두께의 diamond-like carbon(DLC) 보호막으로 코팅되어 있다.

디스크는 지름이 95 mm인 AlMg/NiP 재질을 사용하였으며 레이저 텍스처링을 랜딩 존에 적용하였다. 레이저 범프의 형상은 crater type(V-type)이다. 디스크도 헤드와 마찬가지로 패드가 없는 일반 슬라이더용 디스크(타입 A 디스크)와 패드 슬라이더용 디스크(타입 B 디스크)를 사용하여 각각 실험하였다. 패드 슬라이더용 디스크의 특징은 레이저 범프의 높이 및 지름 등이 기존에 사용하였던 디스크와 다른 특징을 갖고며 윤활막의 두께도 약간 다르다. 일반적으로 사용되는 패드 슬라이더용 디스크는 일반 디스크에 비하여 레이저 범프의 높이가 작고 지름은 크며, 윤활막은 약간 두껍다. Table 2에 각 디스크의 제원이 나타나 있다. 디스크는 카본 보호막으로 코팅 되었고 그 위 표면은 perfluoropolyether(PFPE) 종류의 윤활제로 도포되어 있다. 디스크 표면조도는 평균 10 Å이다. 윤활막의 두께는 fourier transform infrared(FTIR) spectroscopy를 이용하여 측정하였으며, 표면조도는 atomic force microscopy(AFM)를 이용하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4(a)는 패드가 없는 일반 negative pressure 슬라이더와 타입 A 디스크를 사용하여 20 K cycle CSS

Table 2. Design parameters of tested disks (a) a normal disk (type A disk), (b) a disk for padder slider (type B disk)

Item	Unit	Normal Disk (Type A)	Disk for Padder Slider (Type B)
Roughness, Ra	Å	6.5	6.5
Bump Height	nm	16.5	13.0
Bump Diameter	µm	6	11.0
Bump Pitch (Tangential Dir.)	µm	40	25
Bump Pitch (Radial Dir.)	µm	25	25
Carbon Thickness	Å	50	50
Lubricant Thickness	Å	14	17

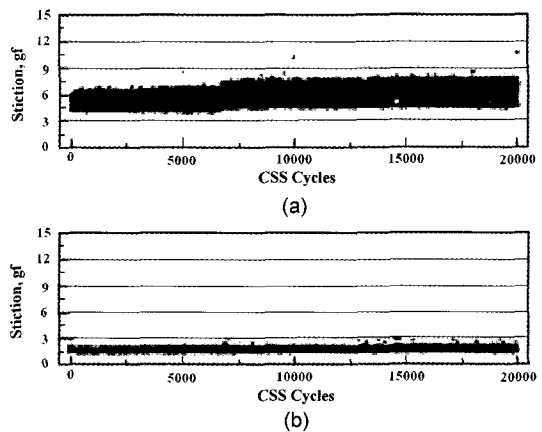


Fig. 4. Stiction force variation as a function of CSS cycles for (a) a normal slider tested with type A disk (b) a padder slider tested with a type B disk.

실험한 결과의 한 예이다. 마찰력이 전 실험 기간에 걸쳐 매우 높은 것을 알 수 있으며, 약 7500 cycle 이후부터는 적합성 검토의 판단 기준이 되는 8.3 gf 값에 거의 도달함을 알 수 있다. 실험을 종료한 후 GMR 센서가 있는 부분인 pole tip 부를 검사한 결과, Fig. 5에서 보듯이 pole 부분에 스크래치 및 기타 손상이 발생하였음을 알 수 있었다. 실제로 4번의 반복 실험 하였을 때 3회에 걸쳐 마찰력이 실험 도중 급격히 증가하였으며 슬라이더/디스크의 파손이 발생된 것으로 판단되어 실험을 중단하였다. 이러한 슬라이더/디스크 조합은 실제 사용에 적합하지 않다. 한편 Fig. 4(b)는 패드 슬라이더와 패드용 디스크(타입 B 디스크)를 사

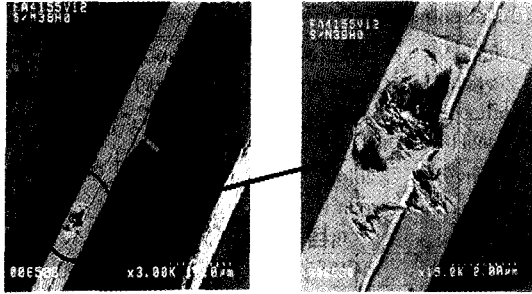


Fig. 5. SEM pictures of pole tip area of a normal slider after 20 K CSS cycles.

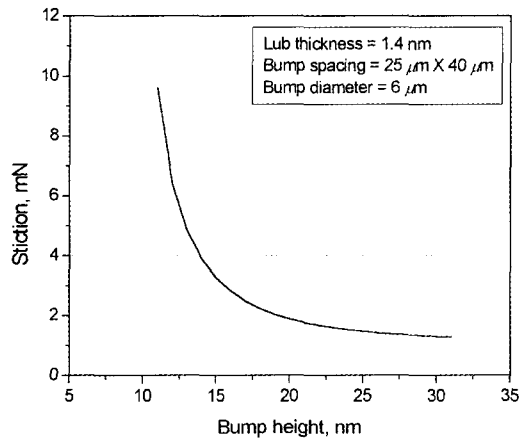


Fig. 6. Predicted stiction value as a function of laser bump height of the disk.

용하여 20 K cycle CSS 실험한 결과이다. 전 실험 기간에 걸쳐 마찰력이 매우 낮았으며 3.0 gf를 넘지 않았다. 따라서 부상 높이 18 nm에서는 패드 슬라이더의 사용이 필요하다는 것을 알 수 있다. 물론 부상높이가 낮아 질수록 패드 슬라이더의 사용은 더욱 더 필요할 것이다. 한편 일반 negative pressure 슬라이더와 레이저 범프 사이의 stiction을 예측하는데 주로 사용되고 있는 meniscus 효과를 고려한 stiction model[2]을 이용하여 stiction을 계산해보면 Fig. 6에서 보듯이 레이저 범프의 높이가 약 18 nm 정도가 되면 stiction이 점차적으로 증가하기 시작하여 범프의 높이가 15 nm 가 되면 stiction이 급격히 증가하기 시작한다. 일반 슬라이더의 경우 부상 높이를 감소시키기 위해서 레이저 범프의 높이를 낮출 수는 있으나, 이 경우 stiction의 증가를 조래하게 됨을 알 수 있다. 따라서 부상 높이를 감소시키는 한 가지 방법으로 패드 슬라이더의 사용이 매우 유용하다는 것을 알 수 있다.

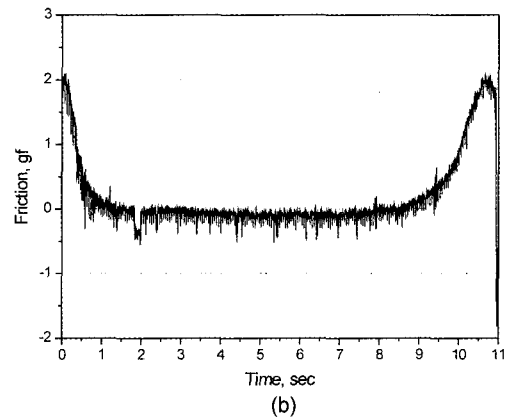
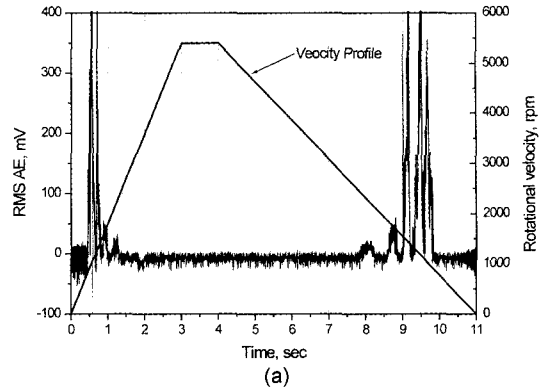


Fig. 7. Characteristics of take-off and landing process for normal slider (a) AE-rms values (b) friction forces.

Fig. 7은 1 cycle CSS 실험, 즉 패드가 없는 슬라이더가 랜딩 존에서 부상하고 착륙할 때의 AE 신호 및 마찰력을 측정된 것이다. 슬라이더가 초기 부상 시 슬라이더와 디스크 범프 사이의 연속적인 충돌로 AE 신호가 급격히 증가함을 알 수 있으며 약 1초 후에는 AE 신호가 다시 급격히 감소한다. 마찰계수도 초기 높은 값을 보이다가 1.5초 이후에는 0이 되었다. 따라서 이 슬라이더는 디스크가 회전하기 시작한 후 1.5초 이후에는 레이저 범프들과의 접촉 없이 완전히 부상하는 것으로 보인다. 부상 시에는 레이저 범프와 슬라이더의 충돌이 없으므로 AE 신호 및 마찰력은 0이 되며 착륙 시에는 부상 시와 마찬가지로 착륙하기 전 마찰력과 AE 신호가 증가하기 시작한다. Fig. 8은 패드 슬라이더의 AE 신호 및 마찰력을 나타내고 있다. 패드 슬라이더의 경우 부상 시 AE 신호가 2초까지 여러 개의 높은 peak 값을 보여주고 있으며 이는 패드 슬라이더의 부상 시간이 패드가 없는 슬라이더 보다 늦다는 것을 의미한다. 이는 패드 슬라이더에 존재하

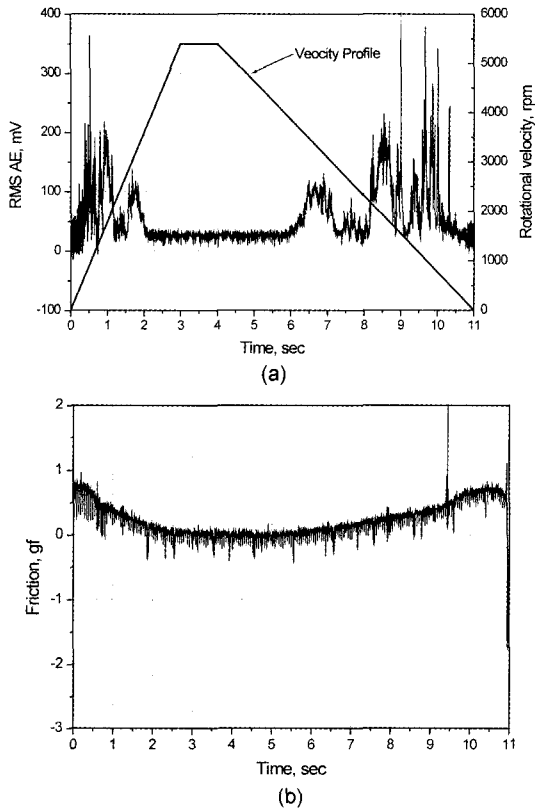


Fig. 8. Characteristics of take-off and landing process for padder slider (a) AE-rms values (b) friction forces.

는 패드에 의한 것으로 판단된다. 통상적으로 부상 시간이 늦을 경우 헤드와 레이저 범프 사이의 접촉이 많아져 트라이볼로지 특성, 즉 마찰/마모 특성이 나빠진다. 그러나 마찰력만을 비교해 보면 마찰력은 패드 슬라이더가 훨씬 작음을 알 수 있다. 따라서 패드 슬라이더는 패드의 존재로 인하여 부상의 늦은 반면 마찰력을 적음을 알 수 있다. 한편 AE 신호에서 나타난 각 peak에 대한 주파수 분석은 수행하지 않았다. 그 이유는 이미 여러 연구[9]에서 밝혀졌듯이, 슬라이더 부상 시 발생된 주파수들은 슬라이더의 공진 주파수와 디스크의 레이저 범프 배열에 의한 주파수로 구성된다.

한편 슬라이더의 부상시간이 늦다는 것은 슬라이더와 디스크 위 범프와의 접촉이 많아지면서 HDI에서 마모가 발생할 가능성이 많다는 것을 의미한다. 각 슬라이더의 공기 베어링 표면에는 약 50 Å의 DLC 보호막이 코팅 되어 있는데 마모가 심하여 이 보호막이 벗겨질 경우 슬라이더의 마모는 급속히 증가하게 된다.

Table 3. Measured pad height of padder slider before/after hot/dry 20 k cycle CSS test

Test Set	P1(Å)	P2(Å)	P3(Å)	P4(Å)
1	409	433	428	421
Untested				
2	428	434	427	431
Head				
3	423	432	431	427
4	448	440	433	436
Average	427	434.75	429.75	428.75
Std Dev	16.14	3.59	2.75	6.34

Test Set	P1(Å)	P2(Å)	P3(Å)	P4(Å)
1	411	416	419	407
Hot/Dry				
2	396	423	423	401
CSS				
3	373	418	423	277
4	368	407	413	373
Average	387	416	419.5	364.5
Std Dev	20.11	6.68	4.72	60.18

본 실험에서는 패드 슬라이더의 마모의 정도를 정량적으로 파악하기 위하여 마모를 가속 시킬 수 있는 조건인 고온/저습 조건에서의 20 K cycle CSS 실험을 수행한 후 원통형 패드의 높이를 측정하여 보았다. Table 3은 실험 전후의 패드의 높이를 AFM으로 측정된 결과이다. 패드 높이의 측정 위치는 Fig. 2의 패드 슬라이더에서 P1, P2, P3, P4 지점이다. 실험 후 패드의 높이 변화는 최대 4%의 변화를 보이며 따라서 패드의 높이가 400 Å임으로 약 20 Å의 변화를 보이는 것으로 보아 패드의 마모 문제도 없는 것으로 판단된다. 따라서 패드 슬라이더의 경우 부상 시간이 클 때도 불구하고 마찰 마모 면에서 우수한 특성을 보인다고 할 수 있다. 한편 측정 후의 패드의 높이가 측정 전보다 높게 나타난 것은 AFM의 측정 오차이거나 실험 도중 패드에 오염 물질 등이 부착되어 패드의 높이가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 패드 슬라이더와 패드 슬라이더용 디스크(타입 B 디스크)로 fly stiction CSS 실험을 한 결과이다. 실험 결과 마찰력이 매우 낮음을 알 수 있으며 특히 디스크 위를 24시간 부상하고, 24시간 정지한 후의 마찰력 또한 낮은 값을 보이고 있어서 fly stiction 문제는 없는 것으로 판단된다. Fig. 10은 500 rpm의 속도로 drag 실험한 결과이다. 이 경우도 마찰력이 매우 낮다. 특히 drag 실험에서 자주 볼 수 있는 CSS cycle이 증가함에 따라 마찰력이 점진적으로 증가하는 경향이 없어 패드 슬라이더의 트라이볼로지 특성에는

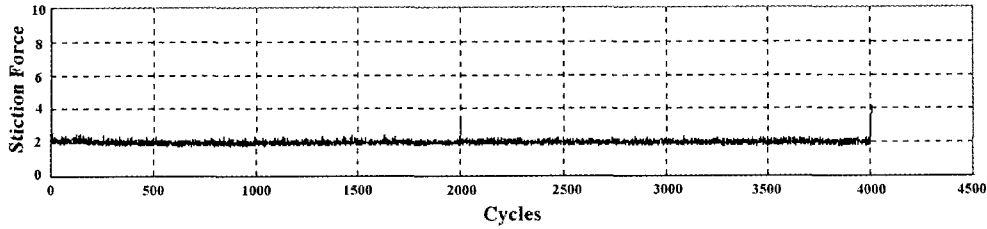


Fig. 9. Fly stiction value as a function of CSS cycles for a padder slider.

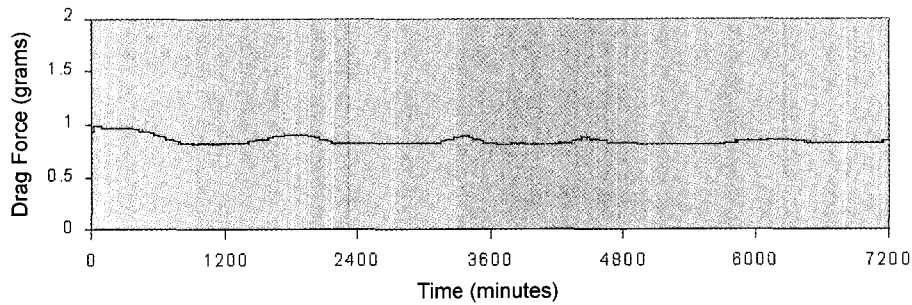


Fig. 10. Stiction force variation as a function of CSS cycles during drag test.

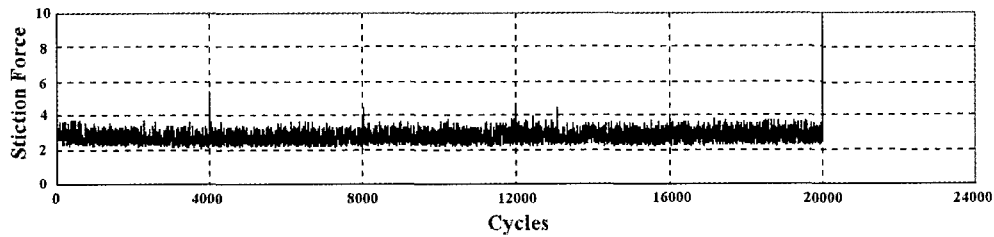


Fig. 11. Stiction force variation tested with a thin carbon overcoat disk as a function of CSS cycles.

문제가 없는 것으로 사료된다.

한편 패드 슬라이더 사용 시 디스크와의 트라이볼로지 특성도 반드시 고려해야 된다. 고려해야 될 항목으로는 디스크의 보호막의 특성, 윤활막 및 표면조도 등이 있다. 가령 Yamamoto 등[5]에 의하면 패드 슬라이더를 사용하였을 때, 디스크 표면조도가 크면 stiction이 감소하는 반면 마모는 약간 증가하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 디스크의 특성도 패드 슬라이더의 트라이볼로지 성능에 많은 영향을 미치고 있다. 특히 슬라이더와 디스크 사이의 마모 성능과 직접적인 관계가 있는 디스크의 카본 보호막의 특성이 매우 중요하다고 하겠다. 기록 밀도 향상 측면에서 보면 카본 보호막의 두께를 감소시키는 것은 부상 높이를 감소시키는 효과와 동일하다. 그러나 카본 보호막이 얇을 수록 마모

및 마찰의 증가가 예측됨으로 유의해야 된다. Fig. 11은 디스크 보호막인 카본 오버코트 층의 두께가 40 \AA 인 디스크 샘플을 패드 슬라이더를 사용하여 20 K cycle CSS 실험한 결과이다. 이전 실험에 사용하였던 모든 디스크의 카본 오버코트 층의 두께는 50 \AA 이었다. 실험 결과 마찰계수가 기존의 50 \AA 카본 오버코트를 사용한 디스크보다 높았으면 특히 20 K cycle 실험 후 측정된 마찰계수가 특히 높았다. 따라서 40 \AA 두께 이하의 카본 오버코트를 사용한 디스크는 현재의 패드 슬라이더에는 부적절한 것으로 판단된다. 이는 CSS 실험 중에 디스크의 점진적인 마모가 발생할 수 있음을 의미한다. 윤활막의 특성 또한 패드 슬라이더 사용 시 고려되어야 될 중요한 요소이다. Table 2를 보면 패드 슬라이더용 디스크의 윤활막이 일반 디스크의 윤활막

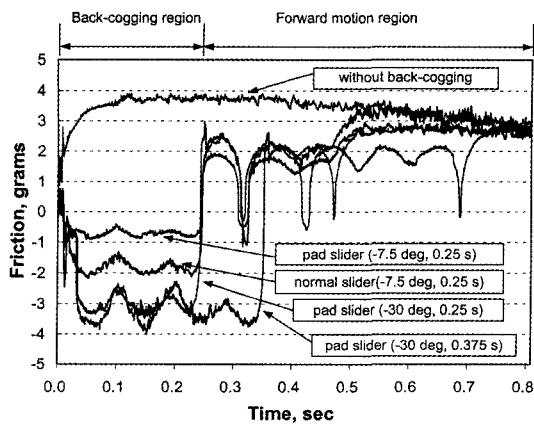


Fig. 12. Effect of motor back-cogging on stiction force.

보다 두꺼움을 알 수 있다. 일반적으로 패드 슬라이더용 디스크의 윤활막은 일반 디스크의 윤활막 보다 두꺼워야 된다고 알려져 있다[10]. 이는 패드 슬라이더와 디스크 사이의 마모를 줄이기 위한 하나의 방법이다. 특히 패드 슬라이더를 설계하는 경우 패드의 위치 등이 매우 중요한 고려 대상이다.

Fig. 12는 모터가 back-cogging 하는 동안 패드가 없는 슬라이더와 패드 슬라이더의 초기 0.8초 동안 디스크와의 마찰력을 나타낸 것이다. 그림에서 모터가 역방향으로 회전하는 back-cogging은 0.25초 동안 행하여졌으며 그 후 0.8초까지는 정방향으로 회전하였다. 한편, 그림에서(-7.5 deg, 0.25 sec)는 back-cogging 속도가 저속, (-30 deg, 0.25 sec)는 고속인 경우를 말한다. 모터가 역방향으로 회전 시, 즉 back-cogging하는 동안에는 음의 마찰력을, 방향이 바뀌어 정방향으로 회전하는 동안에는 양의 마찰력을 나타낸다. 그리고 회전 방향이 바뀌는 지점에서는 작은 피크가 생긴다. 모터가 back-cogging하는 동안의 마찰력은 cogging 속도에 비례하여 커지게 된다. 패드 슬라이더는 패드가 없는 슬라이더에 비해 같은 조건에서 낮은 마찰력 값을 나타내는데, 이것은 패드 슬라이더가 디스크와의 접촉면적이 작기 때문에 발생하는 현상이라고 생각된다. 모터가 back-cogging이 끝나고 정상적인 동작을 시작하는 지점에서는 back-cogging이 없는 경우와 경향이 비슷한 마찰력 특성을 보이고 있다. 실제 HDD에서 사용되는 모터의 back-cogging 속도는 본 실험에서 행해진 속도보다 작음으로 back-cogging의 영향이 패드 슬라이더의 초기 마찰 거동에 영향은 미미하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

1. 하드 디스크 드라이브에 있어서 패드 슬라이더는 18 nm 이하의 부상 높이를 달성하기 위한 매우 유용한 방법이다.

2. 6 종류의 CSS 실험 결과 패드 슬라이더에서 발생하는 슬라이더/디스크 인터페이스 문제는 거의 없었다. 패드 슬라이더는 일반 슬라이더에 비하여 부상 시간이 긴 단점이 있으나 마찰력은 낮았다. 마모를 가속할 수 있는 실험인 고온/저속 CSS 실험과 drag 실험 결과 패드의 마모도 무시할만하다.

3. 패드 슬라이더를 사용할 경우 디스크 표면의 트라이볼로지 특성도 반드시 고려해야 된다. 가령 디스크 카본 보호막의 두께가 너무 얇을 경우 마찰 및 마모가 증가할 수 있다.

4. 여러 가지 해결되어야 될 문제가 있으나 패드 슬라이더를 실질적으로 사용하는 것은 가능하리라 기대된다.

참고문헌

1. Sato, A., Ajike, K., Yanagisawa, M. and Tsukamoto, Y., "Head-Disk Interface Design for In-Contact Recording using Wet Systems," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No.5, pp.3163-3165, 1997.
2. Gao, C., Tian, X. and Bhushan, B., "A Meniscus Model for Optimization of Texturing and Liquid Lubrication of Magnetic Thin-Film Rigid Disks," STLE Tribology Trans., Vol. 38, No. 2, pp.201-212, 1995.
3. Kasamatsu, Y., Yamamoto, T., Yoneoka, S., and Mizoshita, Y., "Stiction Free Slider for the Smooth Surface Disk," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 31, No. 6, pp. 2961-2963, 1995.
4. Aronoff, M., I., and McNeil, M., "Textured Air Bearing Surface," US Patent No. 5,079,657, 1992.
5. Yamamoto, T., Yoneoka, S., and Kasamatsu, Y., "Stiction Free Slider for Lightly Textured Disks," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 4, pp. 1753-1755, 1998.
6. Fu, T., C., and Suzuki, S., "Low Stiction/Low Glide Height Head-Disk Interface for High Performance Disk Drives," J. Applied Physics, Vol. 85, pp. 5600-5605, 1999.
7. Hu, Y., "Wear Characteristics of Padded Air Bearing Sliders During a Contact Take-off Process," J. of Tribology, Vol. 122, pp. 628-632, 2000.
8. Gui, J and Marchon, B., "Fly/Stiction: Mechanical Instability of a Head-Disk Interface," IEEE Trans. on

- Magnetics, Vol. 34, No. 4, pp. 1804-1806, 1998.
9. Yao, W., Kuo, D., Ku, R. and Marchon, B., "Head-Disk Dynamics of Low Resonance Laser Textures A Spectrogram Analysis," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 34, No. 4, pp. 1699-1701, 1998.
 10. Gui, J., Tang, H., Wang, P., Rauch, G., Boutaghoui, Z., Hanchi, J., Pitchford, T., and Segar, P., "Slip Sliding Away: A Novel Head-Disk Interface and Its Tribology," *J. Applied Physics*, Vol. 87, No. 9, pp. 5383-5388, 2000.