

## 헤드/디스크의 접촉으로 인한 표면파손 현상

정 구 현\* · 문 재 택\* · 이 정 규\* · 김 대 은\*\*

### Surface Failure Phenomenon Due to Head/Disk Contact

Koo-Hyun Chung, Jae-Taek Moon, Jung-Kyu Lee, and Dae-Eun Kim

**Key Words:** Head/Disk Interface(헤드/디스크 인터페이스), Surface Damage(표면 파손), Tribology(트라이볼로지)

#### Abstract

Hard disk drive(HDD) consists of a head/slider system which flies over the magnetic disk at an extremely low height. As the density of HDD increases the flying height of the head needs to be decreased. This increases the chance for contact between the slider and the disk. This paper addresses some key issues related to surface failure characteristics of HDD. It is shown that flying behavior of the slider during contact-start-stop cycle can be analyzed based on different regimes of air film lubrication, experimental methods for identifying the underlying mechanisms and improving the reliability of HDD are discussed.

#### 1. 서론

대표적인 정보저장기기 중 하나인 HDD의 저장 밀도는 HDI(head/disk interface) 특성과 밀접한 관계를 가진다. 최근에는 10nm 정도의 부상높이를 가지는 헤드 슬라이더가 상용화되고 있으며 현재의 추세를 볼 때 2004년에는 100 G/in<sup>2</sup>가 달성될 것으로 예상된다<sup>(1)</sup>. 그러나 부상높이가 낮아질수록 헤드와 디스크의 접촉이 발생할 확률이 증가하므로 안정된 부상을 위한 헤드/디스크 인터페이스 설계가 요구되는데, 헤드와 디스크의 물리적 접촉을 피하기 위해서는 극저 부상높이를 유지하며 큰 stiffness를 가질 수 있는 ABS(air-bearing surface) 설계, 원자단위의 거칠기를 가지는 ultra-smooth 디스크, 수 nm의 DLC coating 기술, sub-nanometer 수준의 lubricant 형성을 위한 연구 등이 요구된다<sup>(2)</sup>.

부상높이가 감소할수록 헤드/디스크 인터페이스에서 발생하는 트라이볼로지적 거동은 HDD의 내구성 및 신뢰성에 직접적인 영향을 미치므로, 이에 대한 연구가 중요하게 대두되고 있다. HDD에서 나타나는 파손 메커니즘은 abrasive, adhesive wear 등에 의한 것으로 알려져 있으며<sup>(3)</sup>, 발생하는 마멸기구를 파악하고 정량적으로 측정하기 위한 다양한 시도가 이루어져 왔다<sup>(4,5)</sup>. 또한, 발생하는 오염 및 마멸입자들은 헤드를 오염시켜 데이터의 손상을 유발하므로 이를 감소시키기 위한 연구가 진행되고 있다<sup>(6)</sup>. 특히 최근에는 슬라이더와 디스크의 접촉을 원천적으로 방지하기 위한 load/unload 기술이 제안되어 실용화되고 있다. 그러나, load/unload를 위한 ramp에서 나타나는 ramp wear, 디스크와의 상호작용에 의한 impact wear 등이 나타나고 있으며, ramp에서 발생하는 soft wear particle이 HDI에 미치는 영향에 대한 연구도 보고되고 있다<sup>(7)</sup>. 또한, HDI에서의 stiction, 마찰력 및 표면파손 현상은 온도 습도 압력 등과 같은 환경변화에 의한 영향을 많이 받으므로 이에 대한 연구도 수행되고 있다<sup>(8)</sup>.

본 연구에서는 헤드/디스크의 접촉으로 인하여

\* 회원, 연세대학교 대학원

\*\* 회원, 연세대학교 기계·전자공학부

발생하는 표면파손 현상에 관하여 고찰하고자 한다.

## 2. HDI system의 마찰특성

CSS(Contact-Start-Stop)을 경험하는 헤드 슬라이더는 공기베어링에 의하여 Fig. 1과 같은 stribek curve 형태의 마찰/윤활 특성을 나타낸다. 디스크가 회전을 시작하는 순간에는 수 nm 이하의 표면거칠기를 가지는 슬라이더와 디스크 표면 위에 존재하는 liquid lubricant에 의한 meniscus effect 등에 의하여 높은 마찰력, 즉 stiction force를 나타낸다. HDI에서 발생하는 stiction force는 슬라이더와 디스크의 파손에 직접적인 영향을 미치므로 감소시켜야 하는데, 일반적으로 접촉압력 및 면적, film의 두께 등의 영향을 크게 받으므로<sup>(9)</sup> 디스크의 랜딩존에 laser bump를 형성하거나, 최근에는 슬라이더의 표면 위에 패드를 형성하여 높은 stiction force를 방지하고 있으며, suspension에 의한 예압(preload)을 감소시키는 방법 등이 제안되고 있다.

디스크가 가속됨에 따라 공기베어링에 의하여 HL(hydrodynamic lubrication)이 형성되며, 이에 따라 슬라이더는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 디스크와 완전접촉상태(full contact regime)에서 부분 접촉상태(partial contact regime)를 거쳐 부상하게 된다. 그러므로 HDL이 형성되기 전까지의 마찰/마멸 특성은 미끄럼 운동을 일으키는 슬라이더와 디스크의 재료 물성치, 접촉하는 요철간의 상호작용, 윤활제의 특성 등에 의하여 결정되며, HL이 형성된 후의 특성은 슬라이더의 ABS(air-bearing surface) 형상에 따른 부상 안정성, 환경에 따른 fluid film의 특성 등에 의하여 영향을 받는다<sup>(10)</sup>. 일반적으로 HDI에서 나타나는 표면 파손 및 마멸 현상은 burnishing effect로써 매우 작은 값을 가지는 것으로 알려져 있으며<sup>(4)</sup>, HL이 형성되기 전에 지배적으로 나타난다. 그러나 충격 등과 같은 외란에 의하여 부상 후에도 파손이 발생할 수 있을 뿐만 아니라 발생하는 마멸입자에 의하여 헤드의 파손이 유발될 수 있으므로 슬라이더는 안정된 부상높이를 가져야 할뿐만 아니라 빠른 부상특성, 외란 등에 대한 강건성을 나타내야 한다. 이를 위하여 슬라이더는 계속 소형화되어 현재 femto slider에 대한 연구도 수행되고 있

으며, 높은 강성을 가지며, negative pressure를 적용하여 설계되고 있다<sup>(1,2)</sup>.

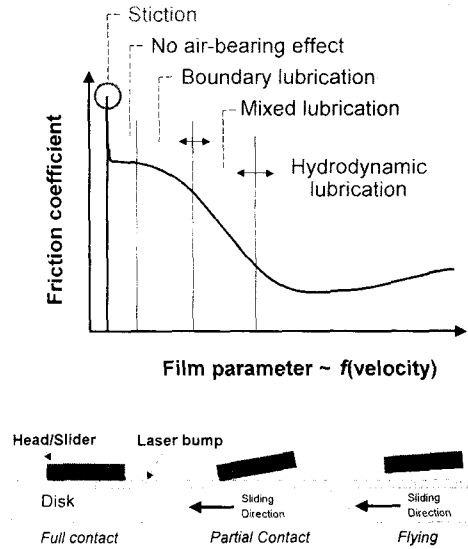


Fig. 1 Typical Stribeck Diagram of HDI

일반적으로 헤드 슬라이더와 디스크의 접촉을 파악하기 위해서 AE(acoustic emission) 센서가 이용되고 있다. Fig. 2는 슬라이더 부상 구간에서 pico-slider에 대한 전형적인 AE 신호를 나타낸다. AE 신호는 슬라이더의 공진 모드, 디스크의 랜딩존에 위치하는 laser bump의 크기 및 배열 등이 반영되는 것으로 알려져 있으며<sup>(11)</sup>, 이로부터 접촉력(contact force)를 계산하기 위한 시도 등이 이루어지고 있다<sup>(12)</sup>. 그러나 현재까지 AE 신호의 물리적 현상 분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 그밖에 HDI의 동특성을 파악하기 위해서 LDV (laser doppler vibrometer)가 이용되고 있다.

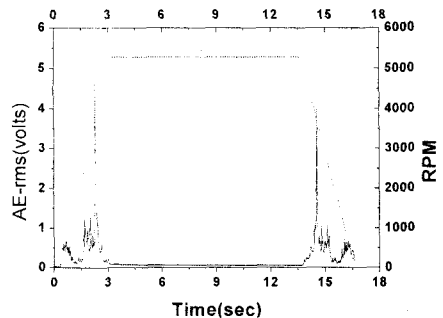


Fig. 2 Typical AE profile during 1 CSS cycle

### 3. HDI의 표면파손 현상

#### 3.1 슬라이더/디스크의 코팅 및 윤활층

일반적으로 슬라이더와 디스크의 표면이 부식되거나 마멸되는 것을 방지하기 위하여 DLC (diamond like carbon) coating을 하고 있으며 저장 밀도가 높아짐에 따라 원하는 magnetic spacing을 얻기 위해 그 두께가 작아져야 한다. 이에 따라 현재 슬라이더 및 디스크의 carbon 코팅층은 수 nm에 이르고 있는 실정이다. 디스크의 DLC 코팅 방법으로 magnetron sputtering이 이용되고 있으며, 슬라이더의 경우에는 Ion-beam deposition이나 plasma vapor deposition 방법을 이용하고 있다<sup>(13)</sup>. Carbon 코팅층의 물성치는 슬라이더 및 디스크의 내구성에 큰 영향을 미치므로 수소 함유량 조절하거나 sp<sup>3</sup> bonding 등을 형성하여 경도 등과 같은 기계적 물성치를 향상시키거나 표면 특성을 개선시키고 있다. 최근에는 수소를 원천적으로 배제하며, sp<sup>3</sup> bonding 비율을 높일 수 있는 cathodic arc coating 방법이 제안되고 있다<sup>(14)</sup>.

디스크의 표면 위에 존재하는 윤활제는 일반적으로 PFPE(perfluoropolyether)를 이용하고 있는데, 이는 meniscus force를 증가시켜 높은 stiction, fly stiction을 유발하나, 슬라이더와 디스크의 내구성을 향상시킬 수 있다. 윤활제의 거동은 HDI의 내구성에 직접적인 영향을 미치므로 슬라이더 부상 중 발생하는 윤활제의 보급정도<sup>(15)</sup> 및 diffusion 현상<sup>(16)</sup>, end group 및 첨가제에 따른 거동 연구<sup>(17)</sup> 등이 이루어지고 있다. 또한, 슬라이더 부상 중 디스크의 윤활제가 슬라이더에 부착되어 상대적으로 높은 stiction force를 유발하는 fly stiction현상은 파손을 유발하는 큰 이유 중 하나이므로 이에 대한 연구도 진행되고 있다. 최근에는 저장밀도의 향상에 따라 sub-nm의 윤활제를 균일하게 분포시키기 위한 시도가 이루어지고 있다.

#### 3.2 표면 파손 기구 및 입자 거동

슬라이더와 디스크의 접촉으로 인한 표면 파손 및 마멸, 오염 입자의 생성 등은 매우 미세한 수준이며, 앞에서 언급한 바와 같이 CSS를 경험하는 HDI system의 경우 대부분의 파손은 슬라이더 부상 중 HL이 형성되기 전에 나타난다. 그러나 디스크는 수천 rpm의 고속으로 회전하게 되므로 부상 중에도 충격 등과 같은 외란에 의해서 큰

파손이 발생할 수 있으며, fly stiction 등에 의하여 파손이 가속되기도 한다. 또한 디스크의 요철 (asperity)와의 접촉에 의한 TA(thermal asperity)는 데이터의 손실을 유발한다. 그러므로 glass disk 등을 이용하여 보다 낮은 표면거칠기를 가지는 ultra-smooth disk를 이용하여 glide height를 감소시키기 위한 연구가 진행되고 있다.

Fig. 3은 슬라이더 ABS에 형성되어 있는 마멸 입자들을 나타내는 것으로써 단차를 가지는 표면 형상에 따라 마멸입자들이 축적되고 있는 것을 나타낸다. 또한 Fig. 4는 AFM(atomic force microscopy)를 이용하여 헤드가 오염된 것을 측정 한 것이다. 즉, 슬라이더와 디스크의 접촉으로 인하여 디스크 표면의 윤활제가 슬라이더에 묻게 될 경우 높은 stiction을 유발하여 파손을 가속시킨다. 또한 상대적으로 큰 접촉압력을 받게되는 bump에서 발생하는 마멸입자들은 윤활제와 함께 슬라이더의 단차에 따라 축적되거나 MR/GMR 헤드를 오염시켜 작동을 방지하게 된다. 이와 같은 bump의 마멸량을 정량적으로 측정하기 위한 노력이 이루어졌으나<sup>(4)</sup> bump의 높이가 감소함에 따라 현재 정량적인 측정은 매우 어려운 실정이다. 또한 HDD 내에서 발생하는 입자정도가 헤드의 작동에 미치는 영향을 평가하기 위한 연구가 진행되고 있으며 micro-groove 등을 이용하여 헤드를 보호하기 위한 기술 등이 제안되었다<sup>(6,18)</sup>.

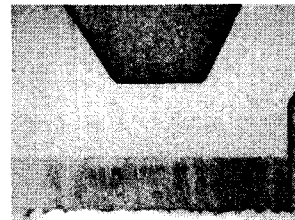


Fig. 3 Wear Particle accumulation

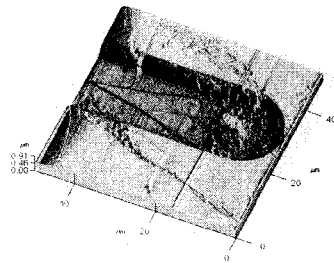


Fig. 4 Head contamination

현재 제시되고 있는 load/unload의 경우에 발생하는 표면파손은 ramp에서 발생하는 ramp wear와 슬라이더와 디스크의 상호작용에 의한 impact wear 등으로 알려져 있다.

### 3.3 표면 파손 저감 방안

앞에서 언급한 바와 같이 헤드/디스크의 접촉으로 인한 표면파손 현상에 지배적인 영향을 미치는 것은 슬라이더가 부상하기 전에는 서스펜션에 의한 예압, 슬라이더와 bump의 상호작용, 코팅 표면의 물리적 특성 등에 의해 결정되고, 슬라이더 부상 후에는 공기 베어링의 안정성, 디스크의 미세 요철 크기 분포 및 flatness 등이다.

슬라이더 부상전의 표면파손을 감소시키기 위해서는 보다 안정된 표면특성을 나타내는 DLC 코팅층의 형성 및 디스크 윤활제의 결합이 요구되며, stiction force 저감을 위한 laser bump의 형상 및 분포 및 슬라이더의 최적 패드 형상 설계 등이 선행되어야 한다. 슬라이더 부상 후 충격 등에 의한 파손을 감소시키기 위해서는 안정적인 HGA(Head Gimbal Assembly) 설계, negative pressure, suction force 등을 이용한 극저 부상높이 및 높은 공기베어링 강성을 위한 ABS 설계, 보다 낮은 glide height를 얻을 수 있는 ultra-smooth 디스크의 적용이 요구된다. 또한, 디스크 표면 위에 존재하는 윤활제의 거동은 HDD의 내구성에 중요한 영향을 미치므로, DLC 코팅층과 결합되어 있는 윤활제의 영향(bonded lubricant)과 움직일 수 있는 윤활제(mobile lubricant)의 거동 및 첨가제 등에 대한 고려가 필요하다.

미세 입자에 의한 정전기력 등에 의한 MR/GMR 헤드의 파손을 방지하기 위해서는 기존 연구에서 제시된 바와 같이 디스크 유동과 필터를 적절히 설계하여 HDI로 입자가 삽입되는 것을 방지하거나 micro-groove 등을 이용하여 HDI에서 발생한 입자들이 헤드로 유입되는 것을 막는 방법이 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 HDD의 헤드 슬라이더/디스크 인터페이스에서 발생하는 트라이볼로지적 거동을 알아보았다. HDI에서 발생하는 표면파손은 슬라이더와 디스크의 상호작용, 공기베어링에 의한

효과 등에 의하여 좌우되며 이와 같은 현상은 부상높이가 감소함에 따라 HDD 자체의 신뢰성에 영향을 미치게 되므로 슬라이더와 디스크의 코팅층에 물성치, 표면 특성 등을 고려한 설계가 요구된다. 또한 마멸 및 오염입자의 거동을 고려해 볼 때 head로 유입되는 입자들을 방지할 수 있는 기술이 요구된다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 지정 연세대학교 정보저장기기 연구센터(과제번호: 2001G0201)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) A. K. Menon, 2000, "Interface Tribology for 100 Gb/in<sup>2</sup>", Tribology International Vol. 33, pp. 299~308.
- (2) D. B. Bogy, Q-H Zeng, and H. Zhu, 2000 "Head-Disk Interface for 100 Gbit/in<sup>2</sup>", International Tribology Conference, Nagasaki, Japan, pp. 86.
- (3) K. H. Chung, S. C. Lee, and D. E. Kim, 1998, "Assessment of Surface Damage Mechanisms of Head/Disk Interface Using CSS and Drag Test", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, pp. 1714~1716.
- (4) K. H. Chung, D. K. Han, J. W. Park, S. C. Lee, and D. E. Kim, 2001, "Feasible Method for Accelerated Testing of HDI Tribological Behavior", Journal of Information Storage and Processing Systems in press.
- (5) A. R. Machcha, M. H. Azarian, and F. E. Talke, 1996, "An Investigation of Nano-Wear During Contact Recording", Wear, Vol. 197, pp. 211~220.
- (6) D. E. Kim, J. W. Park, D. K. Han, Y. S. Park, K. H. Chung, and N. Y. Park, 2001 "Strategies for Improvement of Tribological Characteristics at the Head/Disk Interface", IEEE Transactions on Magnetics in press.
- (7) X. Junguo, H. Tokisue, and Y. Kawakubo,

- 2000, "Study on Soft-Particle Intrusion in a Head/Disk Interface of Load/Unload Drives", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, pp. 2745 ~2747.
- (8) 이 상 민, 김 대 은, 2000, "레이저 범프와 대기압 변화에 대한 하드디스크 슬라이더의 부상 특성", 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제 10호, pp. 2646~2653.
- (9) J. Gui and B. Marchon, 1995, "A Stiction Model for Head/Disk Interface of a Rigid Disk Drive", J. of Applied Physics, Vol. 78, No. 6, pp. 4206~4217.
- (10) 이성창, 정구현, 김대은, 1999, "헤드/디스크 시스템의 동마찰 및 정마찰 특성," 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제2호, pp. 172 ~ 179.
- (11) T. C. McMillan and F. E. Talke, 1999, "An Investigation for the Take-Off Behavior of Proximity Recording Sliders Using Acoustic Emission and Phase Demodulated Interferometry", Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 581~586.
- (12) B. Knigge and F. E. Talke, 2000, "Contact force measurement using Acoustic Emission Analysis and System Identification Methods", Tribology International, Vol. 33, pp. 639~646.
- (13) T. Yamamoto, T. Toyoguchi, F. Honda, 2000, "Ultrathin Amorphous C:H Overcoats by pCVD on thin Film Media". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, pp. 115~119.
- (14) S. Anders, J. Diaz, J. W. AgerIII, R. Y. Lo, and D. B. Bogy, 1997, "Thermal Asperity of Amorphous Hard Carbon Films Produced by Cathodic Arc Deposition", Applied Physics Letter. Vol. 73, No. 23, pp. 3367~3369.
- (15) X. Ma, J. Gui, B. Marchon, M. S. Jhon, C. L. Bauer, and G. C. Rauch, 1999, "Lubricant Replenishment on Carbon Coated Discs", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, pp. 2454~2456.
- (16) M. S. Jhon, D. M. Philips, S. J. Vinay, C. T. Messer, 1999, "The Dynamic Behavior of Thin-Film Lubricants", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, pp. 2334~2337.
- (17) C. M. Mate, P. H. Kasai, G. W. Tyndall, C. H. Lee, V. Raman, D. J. Pocker, and R. J. Waltman, 1998, "Investigation of Phosphazene Additive for Magnetic Recording Lubrication", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, pp. 1744~1746.
- (18) K. H. Cha, K. H. Chung, and D. E. Kim, 1999, "Effect of Slider Load on the Wear Debris Contamination Tendency of Head/Slider", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, pp. 2355~2357.