

대기압 저감에 따른 헤드/디스크 인터페이스의 트라이볼로지 특성 분석

Effect of Reduced Ambient Pressure on the Tribological Behavior of Head/Disk Interface

한동국, 박준우 (연세대학교 대학원), 김대은 (연세대학교 기계공학과)
Dong-Kuk Han, Joon-Woo Park (Graduate School of Yonsei Univ.),
Dae-Eun Kim (Yonsei Univ.)

ABSTRACT

Optimum tribological performance of the head/disk system is critical in maintaining reliable data processing in a hard disk drive. Particularly, as the flying height of the slider continues to decrease with increasing recording density, frictional interaction between the slider and the disk need to be better understood. In this work the effect of reduced ambient pressure on the tribological behavior of the head/disk interface is presented. It is found that surface damage of the components can be accelerated by reducing the ambient pressure. This method may be utilized to assess slider/disk compatibility of newly developed systems in short time.

Keywords : CSS test, hard disk drive, head/disk interface, stiction.

1. 서론

대표적인 자기저장 기록장치인 하드디스크는 헤드/슬라이더와 디스크와의 상대운동을 통하여 정보를 읽고 기록하는 장치이다. 현재 하드디스크의 저장 밀도는 매년 급격히 증가하고 있는 추세고 이러한 저장 밀도의 증가를 위해 슬라이더의 부상높이를 감소시켜 한정된 공간에 더 많은 데이터를 저장하려 하고 있다. 그러나 헤드/슬라이더와 디스크와의 간격이 급격히 줄어들어 따라 헤드/슬라이더가 디스크와 접촉할 확률은

점점 증가하고 있다.

자기 저장기술은 실제 데이터가 기록되는 자기매체와 자기저장 헤드의 상대 운동에 기반을 두고 있으므로 헤드/슬라이더의 부상높이가 낮아짐에 따라서 하드디스크의 내구성 및 신뢰성 평가가 중요한 문제로 대두되었다. 이러한 하드디스크의 내구성 및 신뢰성을 평가하기 위해 CSS test와 Drag test와 같은 여러 가지 평가 방법이 사용되고 있다.

본 연구에서는 헤드/디스크의 파손의 주원인으로 판단되는 drag와 partial contact

구간을 늘리기 위해 공기 압력을 낮추고 그 영향을 정량적으로 평가함으로써 내구성 실험기간을 단축하는 가속실험기법을 제시하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

디스크 상에서 슬라이더가 부상과 정지를 반복하게 되면서 두 물체간의 접촉에 의해 마찰력과 충격이 발생하는데 이러한 일련의 과정을 이용한 실험 방법을 CSS (contact-start-stop) test라 한다. CSS test에 따라 발생하는 신호를 분석하기 위해 상용장비인 CETR CSS tester를 사용하였다. 마찰력을 측정하기 위한 load beam의 민감도는 $2 \mu\text{m}/\text{gram}$ 이며 strain-gage의 출력은 $100 \text{ mV}/\text{gram}$ 으로 signal pre-amplifier를 통하여 나온다. strain-gage가 부착된 load beam의 공진 주파수는 3.2 kHz 이다. AE 신호를 측정하기 위한 센서는 strain-gage가 부착된 load beam의 윗면에 부착되어 있어 하드디스크로부터의 탄성파를 load beam을 통해 전달받아 감지할 수 있도록 설계되어 있다. CETR tester를 통해 인터페이스에서 발생하는 AE와 stiction/friction 신호를 받

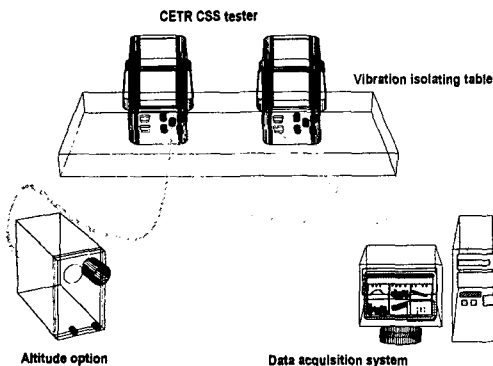


Fig. 1 Experimental setup

아 저장하였으며 부수 장치인 공압 조절 옵션을 통해 Fig. 1과 같은 조건에서 실험을 하였다.

2.2 실험 시편

실험에 사용된 head/slider는 현재 HDD내에 장착되는 상용 제품으로 크기가 $2.0 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ 이며 서스펜션은 후지슨 850 타입으로 preload는 3.5 gf 이다. 이것은 공기압 저하 (Altitude test)의 경우와 그렇지 않은 경우의 실험의 시편으로 사용되었으며 ABS 중심의 recess는 $3 \mu\text{m}$ 이다.

디스크 미디어는 디스크가 정지시 head/slider가 놓여지는 위치인 landing zone이 laser로 가공된 LZT(laser zone textured) disk이다. 디스크의 landing zone의 bump 형상은 Fig. 2. 에서와 같이 bump간 거리는 $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 이며 불규칙하게 배열되어 있다.

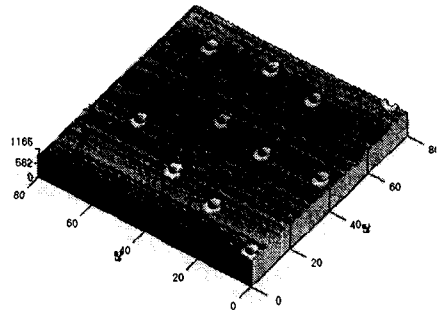


Fig. 2 Disk bump array ($80 \times 80 \mu\text{m}$)

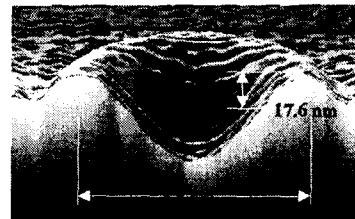


Fig. 3 3D bump shape

범프 형상은 Fig. 3에서와 같이 V type으로 그 높이는 평균 17.6 nm 정도이며 범프의 rim 반경은 4.5 μm 가량 된다.

2.3 실험조건 및 측정방법

고도에 따른 CSS 실험은 실제 하드디스크의 작동 상태를 구현하기 위해 Class 100의 청정도와 3.5 gf의 preload를 기본적으로 설정하였고 하드디스크의 헤드/슬라이더와 직접적으로 접촉하는 디스크의 landing zone에서 실시하였다. 동일한 디스크와 head/slider 각각 2개에 대하여 동일 test cycle로 한 쪽은 기압을 낮춘 상태로 다른 한 쪽은 기압을 낮추지 않고 실험을 동시에 실시하였다. CSS test의 가속-등속-감속-정지 cycle은 3-1-7-1초이며 2,000 cycle 간격으로 22,000 cycle까지 실험을 실시하였다.

실험 후 변화 지표로 실험 중에 head/disk interface에서 발생하는 AE 및 friction/stiction 값을 비교 관찰하였으며 이와 더불어 슬라이더 ABS의 trailing edge의 표면 거칠기 값과 head부의 recess의 변화를 AFM을 통해 측정하였다. 또한 disk bump의 높이 변화도 AFM을 통해 측정하여 변화 지표로 활용하였다. 측정 후 다시 실험을 하게될 경우 이전의 landing zone의 정확한 위치에 다시 놓여지기 어렵고 오염에 의한 영향이 있을 것으로 판단되어 각 실험 cycle은 동일 시편을 연속적으로 측정하는 것이 아니며 같은 종류의 head/slider로 CSS test를 하였다. Disk landing zone의 경우 head/slider에 비해 2배 이상의 큰 폭을 갖기 때문에 실험 전 후의 bump 마모량을 비교하기 위하여 슬라이더는 landing zone의 OD(Outer Diameter)방향에 최대한 가까이 한 상태로 실험하였다. Landing zone의 ID(Inner Diameter) 방향 1 mm 내의 bump는 실험전과 동일한 높이이므로 이를 실험 전의 마모가 안된 bump 높이로 설정하고 OD내 0.5~1.5 mm내

의 bump는 head/slider의 ABS와 접촉에 의한 마모가 일어난 부위로 보고 각각의 형상을 측정하여 CSS 경과에 따른 범프 마모 측정의 정량적인 수치를 비교하였다.

3. 실험결과

3.1 AE, friction 신호 변화

CSS 2,000회 간격의 실험에 따른 인터페이스에서의 AE 및 stiction/friction 변화를 분석하고 이를 통한 가속 효과를 정량적인 수치로 비교해보았다.

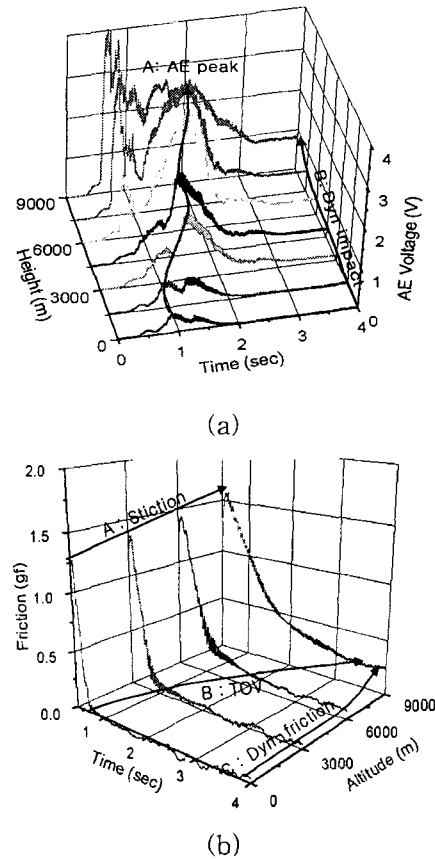


Fig. 4 AE and friction signal w.r.t altitude

Fig. 4는 기압 변화에 따른 AE와 friction 신호의 변화를 나타낸 것으로 신호의 명확한 구분을 위해 smoothing 처리하여 나타내었다. AE

파형을 삼각형으로 보고 peak 변화를 나타내었다. AE 신호 상 peak를 중심으로 대칭을 이루는 신호양상이 고도 6000 m 이상에서는 그 형상이 달라지는 것을 볼 수 있다. AE 신호가 7000 m 이상에서는 5400 rpm의 정속 구간에서의 신호 발생량이 급격히 증가하므로 충분한 부상이 이루어지지 않는 것으로 판단된다. 한편 Friction 신호에서는 큰 변화를 보이지 않으니 고도에 따른 변화 양상은 비슷한 것으로 관찰되었다. Stiction은 선형적인 증가를 보인다. 그리고 고도 6000 m 이상에서는 부상 속도(TOV)가 크게 증가하며 고도 9000 m에서는 최대 속도에서도 불완전한 부상에 따른 partial contact를 할 가능성이 높다. 따라서 6000 m 고도가 가속 실험 효과가 비교적 높으며 기존의 mechanism을 크게 변화시키지 않는 지점으로 예상된다.

일반 대기압에서 실시한 실험에서의 AE peak 값은 대략 1volt를 유지하는데 비해 6000 m 고도의 실험에서의 AE peak 값은 2배 가량 높은 2volt 정도로 나타난다. 한편 stiction은 일반 대기압에서는 1.3 gf 수준을, 고도 6000 m 공기압에서는 1.5 gf를 유지하는 것을 볼 수 있다. 이는 파손 기준 8 gf에 비해 낮은 값이다. Fig. 4에서 일정 고도까지 높였을 때의 AE 신호와 stiction 신호의 양상이 일반 대기압에서의 그것과 유사하다고 볼 수 있으며 이를 통해 고도를 높였을 때의 메커니즘이 일반 대기압에서의 메커니즘을 유지하고 있다고 볼 수 있다. 그리고 상호간의 interaction의 정도를 알려주는 AE나 friction 모두 1.5~2배를 유지하므로 접촉에 의한 표면에서의 변화는 일반 대기압에서 보다 가속될 것이다.

장시간 soak 후의 정마찰력을 long-term stiction이라고 하며 디스크의 윤활제가 meniscus 막을 형성하여 마찰력을 증가시키

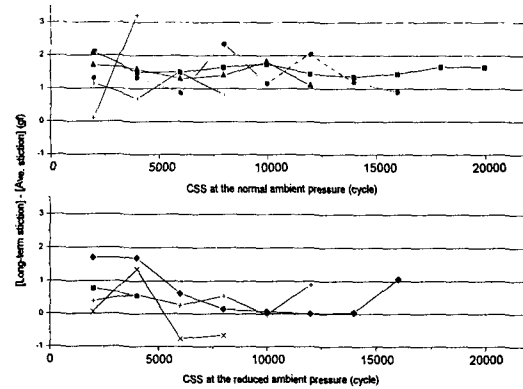


Fig. 5 Long-term stiction

는 것으로 알려져 있다. Fig. 5는 장시간 soak후의 stiction 값과 soak하기 전 2000 cycle 동안의 stiction 평균값의 차를 일반 대기압에서와 고도 6000 m에서 나타낸 그래프이다. 압력을 저하시킨 상태의 실험에서는 그 차이가 별로 크지 않은 것으로 보아 장시간 soak에 의한 영향이 뚜렷하지 않음을 확인할 수 있다. 일반 대기압에서는 그 차이가 1.5 gf 정도이므로 soak 후의 stiction이 평균값보다 1.5 gf 정도 높게 나오지만 압력을 낮추었을 경우 CSS 8000회 이후로는 그 영향이 현저히 감소하는 것으로 나타난다. 이는 압력의 감소로 인한 상호 마찰 증가에 따른 윤활제의 감소와 debris와의 혼합 등에 의한 윤활제의 질적인 변화를 의미한다고 여겨진다.

3.2 슬라이더 ABS 표면 변화

CSS 주기가 증가하면 상호 접촉에 의한 마모가 발생할 것이고 이에 따라 슬라이더 표면은 이물질의 영향을 받게 될 것이며 표면의 topography 변화를 수반 할 것이다. 따라서 슬라이더 표면에 대해 image, 거칠기, head 변화를 관찰하였다.

① 슬라이더 표면 이미지 분석

Fig. 6은 일반 대기압에서 CSS 4000회 후의 슬라이더를 광학현미경으로 관찰한 것이다. 이 경우 leading edge 부위에 contamination이 쌓인 것을 볼 수 있다. 이와 달리 Fig. 7의 공기 압력 저하 상태의 CSS 실험 결과에서는 표면에 contamination이 거의 관찰되지 않는다. 디스크 인터페이스에서 발생 가능한 이물질은 디스크로부터 온 윤활제와 두 물질의 상호 마멸에 의해 발생하는 debris가 섞인 것이라 할 수 있다. 초기에 윤활제가 슬라이더의 표면에 전위되었다가 degradation 되는 것인지를 확인하기 위해 실험 후의 ABS의 거칠기를 측정하였다.

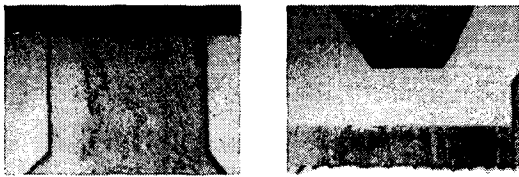


Fig. 6 Optical micrograph of slider at normal ambient pressure after 4000 cycle CSS

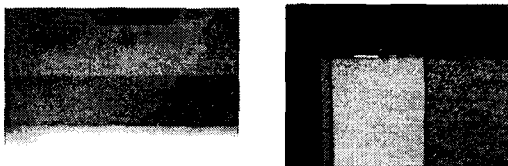


Fig. 7 Optical micrograph of slider at reduced ambient pressure after 4000 cycle CSS

② ABS 거칠기 변화

두 표면이 접촉을 하게 될 경우 요철의 마모에 의해 거칠기 값이 낮아질 것으로 예상되지만 앞서의 분석에서와 같이 윤활제와 같은 이물질이 슬라이더 표면으로 pick-up된다면 거칠기 측정값에도 영향을 줄 것이다. Long-term stiction의 경우 고도를 높여

실험한 경우 낮게 측정되었다. 이러한 현상은 저압 상태에서는 디스크 표면의 윤활제가 슬라이더 표면과의 meniscus 막을 충분히 형성시키지 못하기 때문이며, 따라서 슬라이더에 trap되는 양도 작다. Fig. 8은 일반 대기압과 고도 6000 m에 해당하는 공기 압력에서의 실험에서 2000회 간격으로 슬라이더 표면 거칠기 rms(root mean square) 값을 측정하여 평균을 낸 그래프이다.

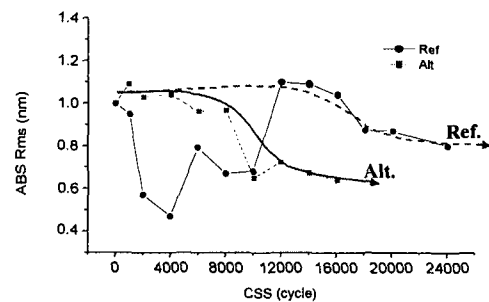


Fig. 8 Rms surface roughness of sliders

일반 대기압에서의 경우 2000 cycle에 0.6 nm 이하로 급격한 거칠기의 저하를 보이며 그 상태를 유지하다가 12000회 이후에서 처음과 같은 1 nm 정도의 거칠기를 유지하다가 거칠기가 감소하였다. 반면 압력을 저하시킨 경우의 실험에서는 거칠기가 1 nm 수준을 유지하다가 10000회 전 후에서 0.6 nm 수준으로 낮아지는 것을 확인하였다. 기존 연구에 따르면[2] 디스크 상에 흡수된 윤활제 외에 free-lubricant가 있는 경우 헤드 마모는 지연되며 윤활제 두께가 감소한다고 한다. 반면 free-lubricant가 없는 경우 헤드 마모는 바로 시작되며 윤활제의 두께 감소량은 비교적 적다고 한다.

일반 대기 실험에 있어 슬라이더의 표면 거칠기가 낮은 값을 보이는 것이 윤활제의 영향이라면 대기압을 저하시킨 경우의 CSS 실험은 시간과 거칠기 변화양상에 따라 약 2배의 가속 효과가 있다고 할 수 있다.

③ Head recess 변화

실험에 사용한 슬라이더는 헤드 형상은 Fig. 9와 같다.

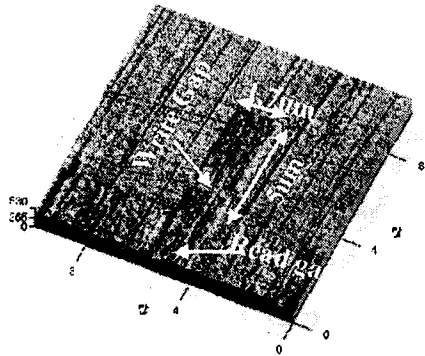


Fig. 9 AFM topography of head

깊이 방향으로 5 nm의 recess가 된 폭은 $1.7 \mu\text{m}$, 길이 $5 \mu\text{m}$ write gap과 MR gap의 CSS 주기에 따른 변화를 측정하였다. 이 경우 일반 대기압에서의 실험과 압력을 낮춘 상태에서의 결과는 앞서 표면의 광학 현미경 측정이나 거칠기 측정에서와 같이 이물질의 쌓이고 마모되는 양상과 속도의 차이가 현저함을 알 수 있었다. CSS주기에 따라 head를 관찰한 결과 일반 대기압에서의 실험보다 고도를 6000 m로 한 경우가 이물질이 쌓이고 마모되는 정도가 2.5배 가량 빠른 것을 확인할 수 있다. 이물질의 변화 시기는 ABS 거칠기 변화와도 연관성을 갖는다. 일반 대기압에서의 실험은 헤드 recess에 쌓였던 이물질이 줄어드는 시기는 ABS 거칠기가 원래의 거칠기 값으로 변하는 12000회 이후에 발생하며 대기압을 줄인 실험의 경우 8000회 이후에 헤드 recess에 쌓였던 이물질이 제거되는 것을 관찰할 수 있다. 이와 같은 현상은 헤드 주변으로 쌓인 윤활제 등의 물질이 지속적인 접촉에 의해 degradation 되고 슬라이더의 마모로 이어

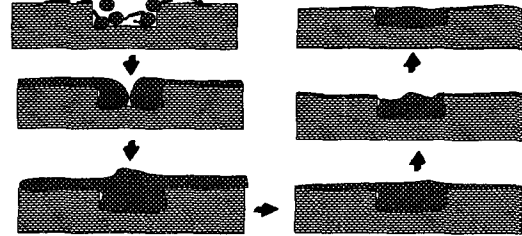


Fig. 10 Schematic of head contamination and wear

지는 것이다. 이러한 현상을 Fig. 10에 도식적으로 나타내었다. 대기압을 줄인 실험의 경우 표면 거칠기의 변화 속도와 같이 시간도 짧고 2배 이상 빨리 진행되는 것을 확인하였다.

3.3 CSS 주기에 따른 디스크 범프 변화

슬라이더뿐만 아니라 디스크 landing zone의 범프 역시 마모를 겪는다. 따라서 디스크 범프 높이의 변화를 측정하면 일반 대기압에서의 실험과 압력을 낮춘 상태에서의 실험에 의한 마모를 정량적으로 비교할 수 있을 것이다. Fig. 11은 일반 대기압에서의 실험 중 24000회의 CSS를 거친 디스크 범프를, Fig. 12는 대기압을 낮춘 실험에서 16000회 CSS를 한 디스크의 범프 높이를 반경방향으로 측정한 것이다.

측정결과와의 평균값을 기준으로 smoothing 한 값의 최저 값을 뺀 경우 일반 대기압 실험에선 1.2 nm이며 대기압을 낮춘 경우도 이와 유사한 값을 보였다. 실험의 CSS 횟수로 비교하면 대기압을 낮춘 경우 범프 마모의 진전이 빨랐다고 볼 수 있다. 실험하지 않은 디스크 범프 높이의 평균값인 17 nm에 비해 일반 대기압에서의 실험에선 범프 높이의 평균은 13.6 nm이며 기압을 줄인 상태의 실험에선 12.9 nm로 평균이 나왔

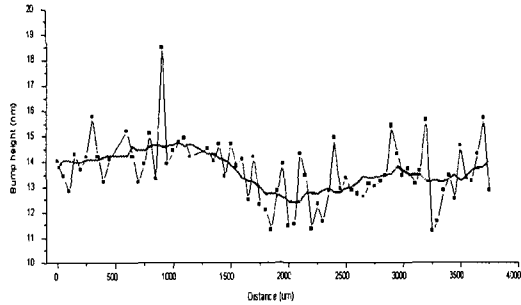


Fig. 11 Bump height after 24000 CSS test at normal ambient pressure

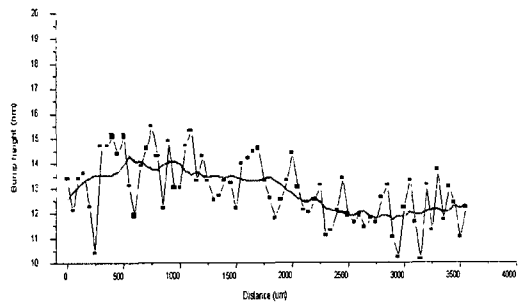


Fig. 12 Bump height after 16000 CSS test at reduced ambient pressure

다. 따라서 고도를 높여 CSS 실험을 했을 때가 범프 높이가 더 많이 줄어들었다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

대기압을 낮춘 실험을 일반 CSS 실험의 가속 실험 효과가 있음을 다각도의 분석과 검증을 걸쳤으며 그에 따른 현상을 분석하였다

1. 시뮬레이션과 신호를 실험식에 적용하여 가속 효과를 최대화할 수 있는 대기압 조건이 고도 6000 m 수준임을 도출하였다.
2. 일반 대기압의 CSS 실험에 대해 슬라이더 표면 측정과 범프 마모를 비교하여 2배의 가속 효과가 있음을 확인하였다.

3. 대기 압력을 저하시키면 윤활제가 인터페이스에 미치는 영향이 달라진다. 윤활제는 CSS 10000 회를 전후로 변화를 보이는 것으로 관측되며 그 원인이 contact force의 증가에 따른 윤활제의 degradation인지 대기압 저하에 따른 윤활제의 물성치 변화가 요인인지는 분명하지 않다. 그러나 10000 회 이상 CSS 주기가 증가하면 표면의 측정 결과 비교에 있어 확인했던 차이는 사라진다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(과제번호: 97K3-0907-02-02-1)와 삼성중합기술원의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

5. 참고문헌

- [1] Y. Liu, C. L. Jiaa and A. Eltoukhy, "Acoustic Emission Study of Lubricant Effect on Proximity Contact Recording", IEEE Trans. on Magn., Vol. 33, No. 5, pp. 3160-3162, 1997.
- [2] M. Ishii, and Y. KawaKubo, "Simultaneous Measurement of Pin Wear and Change in Lubricant Thickness on Thin-Film Magnetic Disks", IEEE Trans. on Magn., Vol. 33, No. 33, pp. 4560-4565, 1997.
- [3] M. Matsumoto, A. Iida, and T. Hamaguchi, "Measurement of Slider/Disk Collision Forces Using Acoustic Emission Source Wave Analysis", ASME, Tribology Trans., Vol. 36, No. 4, pp. 736-740, 1993.
- [4] A. G. Khurshudov, and F. E. Talke, "A Study of Subambient Pressure Tri-Pad Sliders Using Acoustic Emission", ASME J. of Tribology, Vol. 120, pp. 54-59, 1998.