

하드디스크 슬라이더의 부상 특성과 AE신호의 관계

이상민[†] · 문재택 · 김대은*

연세대학교 대학원 기계공학과, 연세대학교 기계전자공학부

Relationship between Take-off Behavior of Hard-disk Slider and AE Signal

Sang-Min Lee, Jae-Taek Moon and Dae-Eun Kim*

Graduate School of Yonsei University

* School of Electrical & Mechanical Eng., Yonsei University

Abstract – Acoustic emission(AE) signal has been widely utilized to monitor the interaction at the head/disk interface. In this work the relationship between the AE signal and the state of contact between the slider and the disk is presented. Results of the FFT(Fast Fourier Transform) analyses of the AE signal could be used to better understand the interfacial interaction. Also, it was found that wear particles affect the AE signal. Therefore, the signal can be used to monitor the wear particle presence at the interface.

Keywords – Acoustic emission(AE), CSS(contact-start-stop) test, drag test, head/disk interface.

1. 서 론

현재 상용화된 하드디스크의 저장 밀도를 증가시키기 위해, 헤드/디스크 인터페이스 간극의 감소로 인한 마찰, 마멸 및 신호 해석에 대한 연구 필요성이 증대되고 있다. 슬라이더의 tribological 거동은 슬라이더 부상시 마찰력과 AE(Acoustic Emission) 신호 감지로 해석할 수 있다[1]. 그러나 헤드와 디스크의 간격을 줄이고 저장 용량을 증가시키려는 추세에 따라 디스크와 슬라이더는 극저 마찰력을 갖도록 설계되고 부상 높이는 매우 작아지게 되었다. 이러한 근접 저장은 일반적인 스트레인 게이지 기술의 해상도에까지 영향을 주게 되었다[2]. 결과적으로 새롭고, 더욱 민감하며, 편리하고 간단한 기술인 AE가 HDI의 연구에 점차 사용되고 있다. 디스크 표면의 미세한 요철과 슬라이더의 ABS(Air Bearing Surface)가 접촉하면 슬라이더가 요동하게 되고, 그 신호는 AE센서에 의해서 쉽게 감지된다. 하드디스

크 연구에서 AE는 Kita *et al.*[3]에 의해 소개되어 헤드/슬라이더의 접촉 감지 및 contact force 측정에 널리 사용되어 왔다[4]. 그러나 현재까지 AE 신호에 대한 물리적 현상 규명이 분명하지 않고, 일관되고 체계적인 AE 신호 분석 기법이 확립되어 있지 않으며 연구 개발 중이다.

본 연구에서는 부분적인 해석에 머물고 있는 acoustic emission과 tribology와의 연관성을 규명하기 위해서, 상용화된 CSS tester를 이용하여 슬라이더 부상시 발생하는 AE-rms peak의 주파수 특성 분석과 이러한 peak가 발생하는 디스크 회전 속도에서의 drag 실험을 통해서 tribological 특성을 알아보았다.

2. 실험 방법

2-1. 실험 장치

본 실험에 사용한 실험 장치는 Fig. 1과 같은 상용화된 CETR CSS tester이다. AE 신호를 측정하기 위한 센서는 load beam의 윗면에 부착되어 있어서 헤드/디스크의 접촉에 의해 발생하는 고주파 진동 탄성파를

[†] 주저자 · 책임저자 : 이상민
E-mail : ismodern@unitel.co.kr

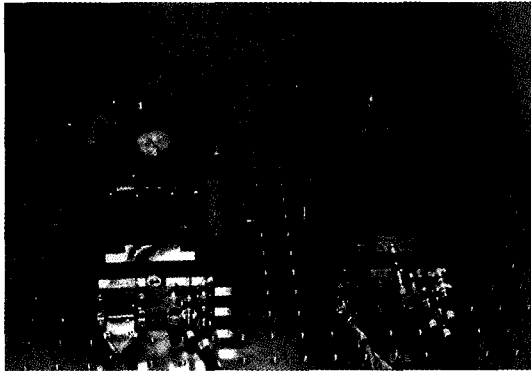


Fig. 1. CETR CSS tester.

load beam을 통해 전달받아 감지할 수 있도록 설계되어 있다. AE 센서는 슬라이더의 진동모드를 고려하여 200 kHz에서 5.5 MHz 대역의 탄성파를 감지할 수 있으며 signal pre-amplifier에서 60 db의 gain으로 증폭되며 200~1200 kHz 사이의 주파수가 band pass되어 평탄한 신호를 출력하게 된다. 증폭된 신호는 BNC 컨넥터를 통해서 오실로스코프 또는 스펙트럼 분석기로 연결하여 모니터링할 수 있다. 증폭된 신호의 rms 값은 DC 전압으로 전환되어 데이터 acquisition board로 저장될 수 있도록 증폭된다.

2-2. 실험 시편

① 헤드 슬라이더

본 실험에 사용된 헤드/슬라이더는 상용화된 50% 슬라이더(nano slider)이다. 공기 베어링의 형상은 비대칭의 두 레일이 있고 약 3 μm의 단차를 이루고 있는 negative pressure 슬라이더이다. 슬라이더의 크기는 2.0 mm×1.6 mm이며 두께는 0.45 mm이며 질량은 5.7 mg이다. 시뮬레이션 결과 슬라이더의 공기 압력 분포

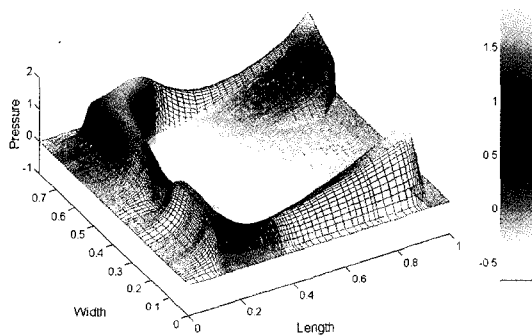


Fig. 2. Air pressure distribution of nano slider.

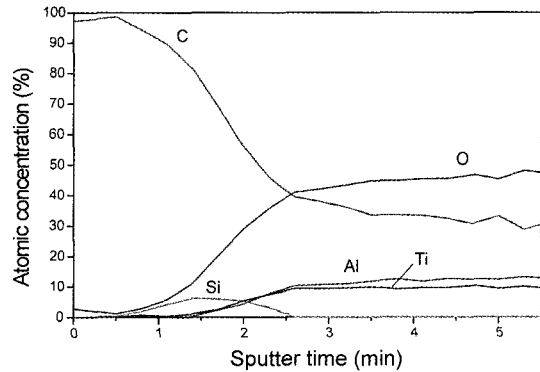


Fig. 3. AES depth profile for ABS of nano slider.

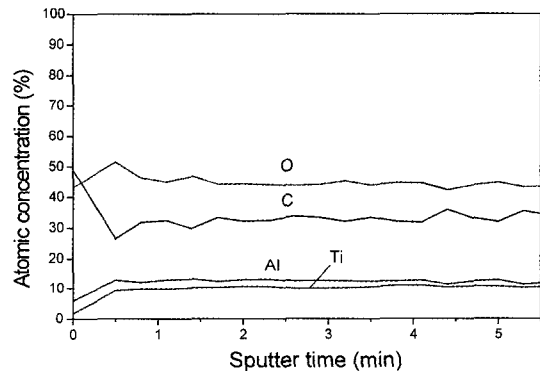


Fig. 4. AES depth profile for stepped surface of nano slider.

는 Fig. 2와 같고 슬라이더의 부상 높이는 30~40 nm 정도 되는 것을 알 수 있었다.

슬라이더의 AES(Auger Electron Spectroscopy) depth 성분 분석 결과 슬라이더의 주요 성분은 Al₂O₃-TiC이며 Fig. 3과 Fig. 4는 각각 공기 베어링 레일 면과 단차진 아래 부분의 depth profile을 나타낸다. 슬라이더의 ABS 표면에는 탄소성분이 많이 검출되며 이는 표면 보호를 위한 DLC 코팅층이다. DLC 코팅층과 그 하부층 경계에는 실리콘(Si)과 산소(O) 성분이 증착되어 나타나는 것을 알 수 있다. 반면에 슬라이더의 단차진 아래 부분은 DLC 코팅층이 발견되지 않는다.

Modal 해석 코드를 이용한 FEM(Finite Element Method)을 통해서 nano slider의 1차 및 2차 진동 mode에 해당하는 torsional mode와 bending mode의 고유 주파수와 mode 형태를 알아보고자 하였다. 본 해석에서 nano slider는 동일한 물성치의 1125(15×15×5)개 직육면체 고체 요소로 구성하였으며 슬라이더 표면의 공기 베어링 단차(약 3 μm)에 해당하는 부분은

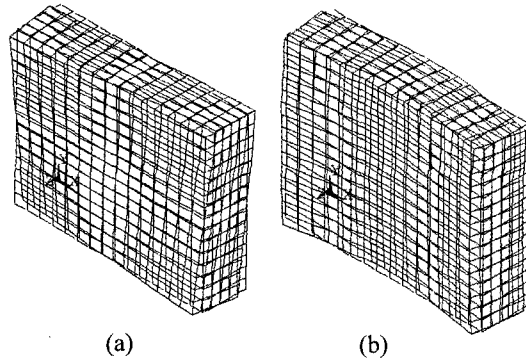


Fig. 5. Finite element modal analysis results for nano slider : (a) torsional mode, (b) bending mode.

슬라이더 두께(약 $450\ \mu\text{m}$)에 비해 매우 작으므로 생략하였다. FEM에 적용된 nano slider의 물성치는 Young's modulus $300\ \text{Gpa}$, 밀도 $4000\ \text{kg/m}^3$, Poisson's ratio 0.3 이다. Young's modulus는 nano indenter로 측정된 평균값이다.

그 결과 Fig. 5와 같이 나노 슬라이더의 1차 진동 mode인 torsional mode의 고유 주파수는 $636.8\ \text{kHz}$ 이고, 2차 진동 mode인 bending mode의 고유 주파수는 $837.9\ \text{kHz}$ 임을 알 수 있었다.

② 디스크 미디어

본 실험에 사용된 디스크 미디어는 랜딩존(landing zone)에서 슬라이더와의 접촉면적을 줄여 stiction을 작게 하기 위해서 랜딩존에 레이저를 이용하여 bump를 가공한 LZT(Laser Zone Texture) disk의 일종이며, AFM(Atomic Force Microscope)으로 랜딩존을 측정된 결과 Fig. 6과 같은 배열과 형상을 나타낸다.

랜딩존의 중앙은 디스크의 중심으로부터 약 $18.5\ \text{mm}$ 떨어져 있고 랜딩존 띠의 너비는 약 $3.2\ \text{mm}$ 이다. Bump의 형태는 'V' 형이며 bump 높이는 약 $19\ \text{nm}$ 이고 범프 지름은 약 $5.7\ \mu\text{m}$ 이며 범프의 최대 단차는 $75\ \text{nm}$ 이다. 범프간의 간격은 track 방향으로 $28\ \mu\text{m}$, sector 방향으로 $31\ \mu\text{m}$ 이다. 또한 AFM으로 data zone의 평균 거칠기를 측정된 값은 약 $1.1\ \text{nm}$ 이다.

디스크 미디어의 AES depth 성분 분석 결과는 Fig. 7과 같다. Sputtering시 디스크는 디스크의 깊이 방향으로 1분당 $100\ \text{\AA}$ 정도 침식된다. Sputtering 초기에 표면 윤활층에서 미량의 O, F 성분이 검출되고 그 하부의 DLC층에서 C 성분이 검출되며, 그 하부에는 Co, Pt, Ta, Cr, Mo, Ni, P 성분이 차례로 증착되어 나타난다.

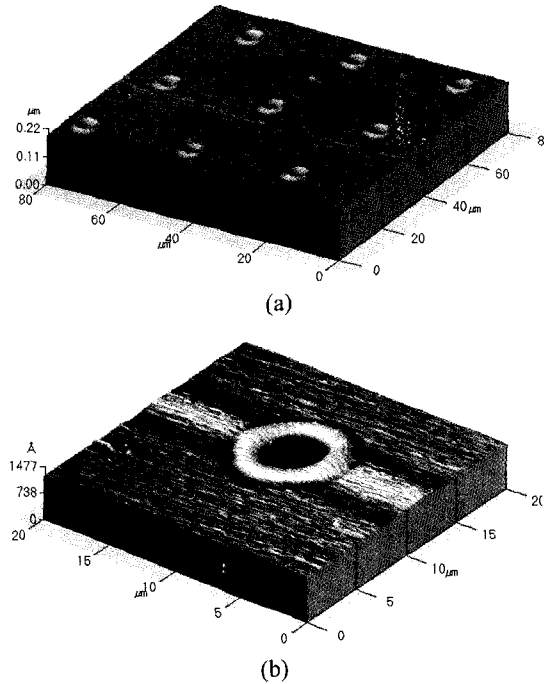


Fig. 6. AFM image of LZT disk : (a) $80\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$, (b) $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$.

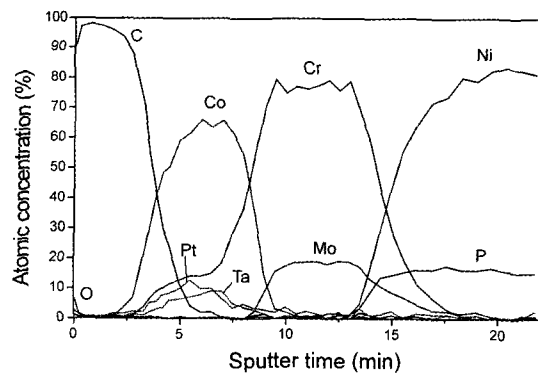


Fig. 7. AES depth profile for disk media.

2-3. 실험 방법

하드디스크 작동시 슬라이더의 부상 과정 중 발생되는 헤드/슬라이더와 디스크의 인터페이스에서의 tribological 특성을 알아보기 위한 실험을 CSS tester를 이용해서 실시하였다. 본 실험에 사용된 슬라이더는 상용화된 50% 슬라이더(나노 슬라이더)이고, 디스크 미디어는 랜딩존이 레이저 처리된 디스크 시편이다. 슬라이더의 서스펜션이 디스크에 가하는 초기하중은 $3.5\ \text{gf}$ 이며 이 값은 50% 슬라이더에 적용되는 일반적인

값이다. 실험 환경은 상온(23~25°C), 상습도(40~50% RH)와 Class 100의 청정도를 유지하였다. 그밖에 모든 실험은 외부 진동의 영향을 방지하기 위해서 방진 테이블 위에서 실시하였다.

CSS 실험은 초기 가속 시간 60초, 정속 시간 3초, 감속 시간 3초, 정지 시간 1초로 하였으며, 슬라이더는 디스크의 랜딩존에서 부상하고 다시 착륙하도록 하였다. 또한 정속 구간에서 디스크의 속도는 5400 rpm으로 일정하게 하였다. CSS 실험 중 AE-rms 신호와 friction 신호를 각각 실험 장치와 연결된 컴퓨터에 저장했으며, 이때 AE-rms의 저장률(sampling rate)은 2 kHz이고, friction의 저장률은 4 kHz로 지정하였다.

CSS 실험에서 초기 60초 가속 구간의 AE-rms 신호 중 peak가 발생하는 부분의 raw AE 신호를 디지털 오실로스코프에 25 MHz 저장률로 10 ms 구간을 저장하여 FFT 해석을 하였다. 이 과정에서 디지털 오실로스코프로 실시간 신호 해석을 하여 모니터링 할 수 있다. 이를 통해서 CSS 실험 중 주파수 특성의 변화를 실시간으로 감지하여 변화를 확인할 수 있도록 하였다. FFT 해석은 나노 슬라이더의 진동 모드를 고려하여 1.2 MHz 주파수 구간까지 계산하였다.

또한 슬라이더 부상시 AE-rms peak가 발생하는 디스크 회전 속도에서 drag 실험을 하여 헤드/슬라이더와 디스크의 tribological 특성을 연구하였다. AE-rms 신호에서 주요 peak가 발생하는 부분의 디스크 회전 속도는 450 rpm, 2200 rpm, 3200 rpm이며 이 세 부분의 디스크 회전 속도에서 20만회의 drag 실험을 각각 실시하였다. Drag 실험도 디스크 랜딩존의 가운데

에 슬라이더가 놓이도록 하였다. Drag 실험시 AE-rms 신호를 2 kHz의 저장률로 저장하였고, drag 실험이 진행되는 사이사이에 주파수 특성의 변화를 관찰하고 raw AE 신호를 저장하여 FFT 해석을 하였다. 실험 후 CSS 실험을 다시 실시하여 AE-rms 신호의 변화를 알아보았으며 슬라이더 표면의 파손 및 오염 정도를 광학현미경을 이용해 관찰하였다. Fig. 8은 전체적인 실험 장치의 구성을 나타낸 것이다.

대부분의 CSS 실험은 슬라이더 부상 초기 가속 시간을 0초부터 3~10초 사이에 실시한다. 본 실험에서는 슬라이더 부상시 발생하는 AE-rms peak의 감지를 용이하게 하기 위해서 부상 초기 가속 부분의 시간을 60초로 늘려서 실시했다. 이처럼 초기 가속 부분의 시간을 길게 해도 AE-rms peak는 디스크의 회전 속도에 관계[5]되므로 가속 시간이 짧을 경우와 AE-rms의 변화 양상은 거의 같다. Wang[6]도 이와 유사한 결과를 제시하였다. 이를 본 연구에 사용한 nano slider와 disk로 실험하여 Fig. 9에 나타내었다. 슬라이더 초기 가속 부분의 시간이 각각 5초, 20초, 60초일 때 가속 시간이 달라도 디스크 회전 속도에 따라 AE-rms의 크기가 변화한다.

본 연구에서는 슬라이더의 부상시 발생하는 AE-rms에 대한 연구를 중점적으로 하였다. 실제 하드디스크에서는 CSS 동작중에 슬라이더의 부상과 착륙이 모두 발생하지만 부상과 착륙 과정에서 발생하는 AE-rms와 raw AE의 주파수 특성이 유사[7]하므로 주로 부상시의 AE에 대한 연구를 수행하였다. Fig. 10은 실험에 사용한 nano slider와 disk 시편으로 CSS 실험에서

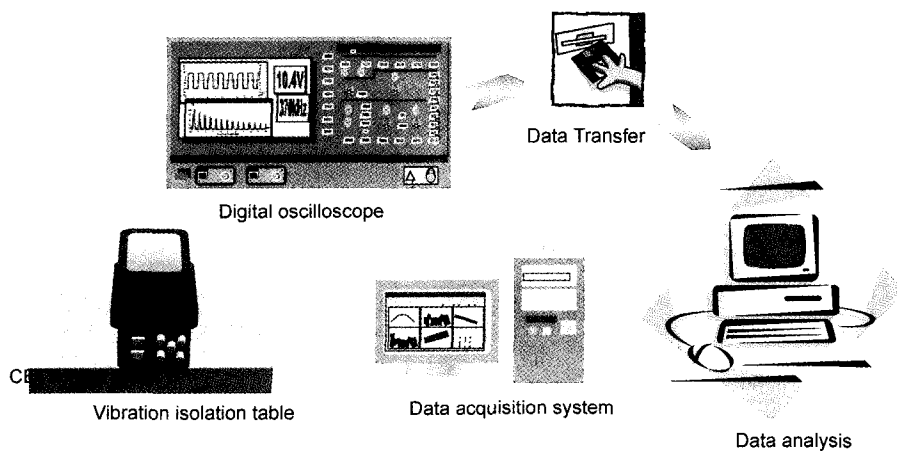


Fig. 8. Schematic diagram of the experimental setup.

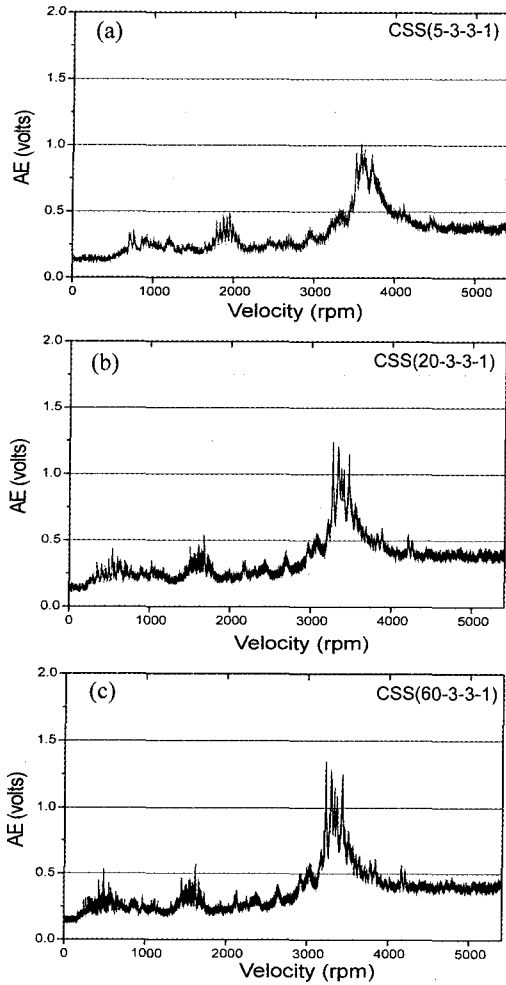


Fig. 9. AE-rms for different acceleration times : (a) 5 sec., (b) 20 sec., (c) 60 sec.

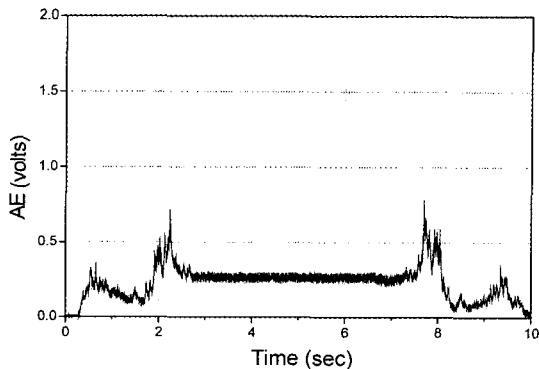


Fig. 10. AE-rms signal versus time during contact start/stop cycle 3-3-3-1 (maximum disk rotational speed : 5400 rpm).

발생하는 AE-rms의 변화 양상을 나타낸 것이다. CSS 주기는 가속 3초, 정속(5400 rpm) 3초, 감속 3초, 정지 1초이다. 가속 구간과 감속 구간의 AE 신호가 대칭형인 것을 알 수 있다. 또한 정속 구간에서는 슬라이더의 부상이 일어나고 슬라이더와 디스크의 접촉이 거의 발생하지 않으므로 마찰, 마멸 특성에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 그러나 정속 구간에서 다양한 범프 형상과 간격의 디스크 시편에 대한 슬라이더의 부상 특성을 알아보기 위한 실험을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 슬라이더 부상시 AE-rms신호와 FFT

디스크 가속시 슬라이더의 부상 과정에서 헤드/슬라이더와 디스크 인터페이스의 변화로 발생하는 AE-rms peak들은 초기, 중간, 후기 부분으로 나눌 수 있으며, Fig. 11은 60초 동안 디스크 회전속도를 0 rpm에서 5400 rpm으로 선형적으로 증가시켰을 때의 AE-rms 변화 양상을 나타낸 것이다. 초기 부분에서는 여러 개의 peak들이 발생하며 peak들의 크기가 커지다가 다시 작아지는 분포를 보인다. 또한 최대 peak에 도달하기 전의 peak들이 그 이후의 peak들 보다 다소 촘촘한 분포를 나타낸다. 이 부분의 디스크 회전 속도는 0~1700 rpm대이다. 초기 부분 최대 AE-rms peak가 발생하는 디스크 회전 속도는 약 450 rpm이며 크기는 약 2.3 volt이다. 중간 부분의 AE-rms peak들은 개수가 작고, 디스크 회전속도 2000~2500 rpm대에 분포한다. 이 부분의 AE-rms 최대 peak는 2200 rpm 정도에 있으며 크기는 약 0.8 volt이다. 후기 부분에는 크게 3~4부분의 AE-rms peak들이 관찰되며 peak들간의 간

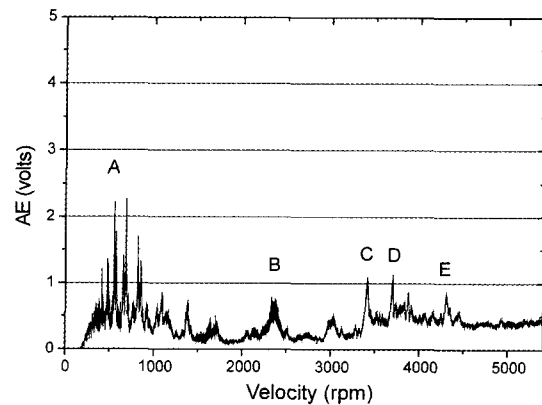


Fig. 11. AE-rms variation during slider take-off.

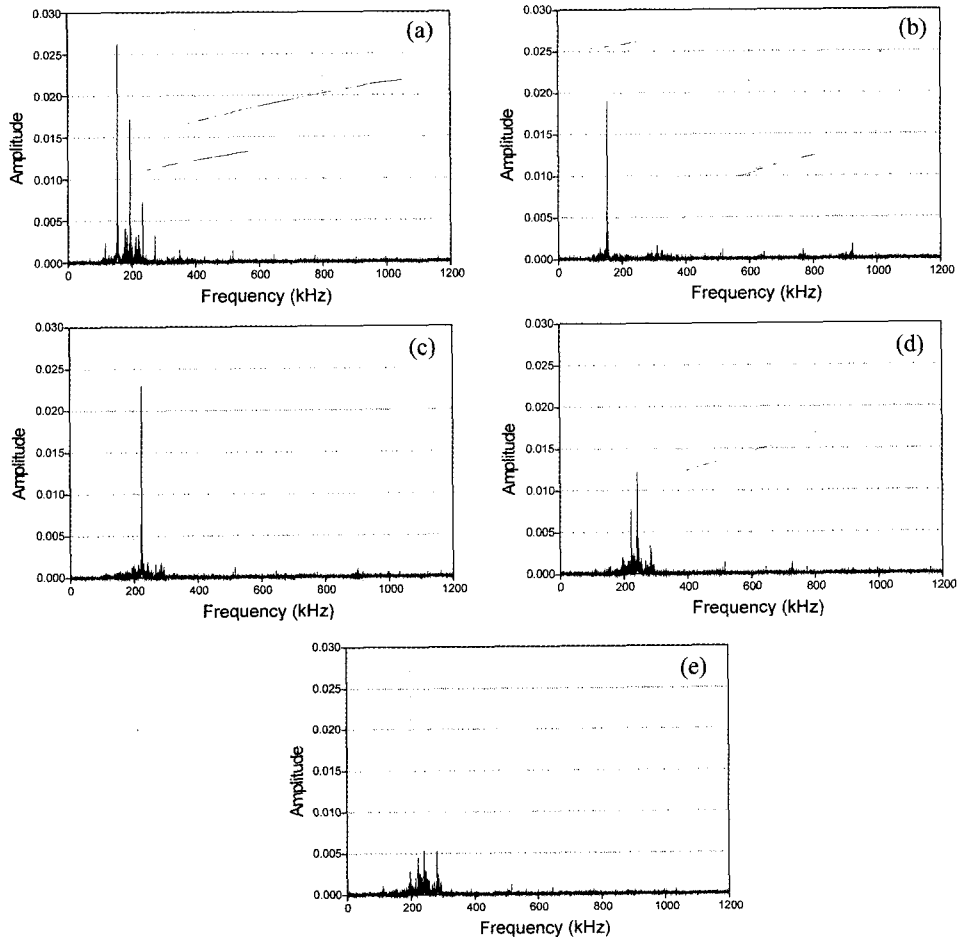


Fig. 12. Power spectra of AE-rms peaks during slider take-off : (a) peak A, (b) peak B, (c) peak C, (d) peak D, (e) peak E.

적이 초기 부분의 peak들 보다는 덜 촘촘한 것을 알 수 있다. 2800~4300 rpm대의 디스크 회전속도에서 peak들이 분포하며 이 부분 최대 peak는 약 3200 rpm에서 발생하며 그 크기는 약 1.15 volt이다.

디스크 회전속도의 증가에 따른 슬라이더 부상시 발생하는 AE-rms peak들에 대한 power spectrum을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11의 AE-rms peak에 표시한 A, B, C, D, E 부분에 대한 각각의 FFT 분석을 통해서 파워 스펙트럼을 구하였다. AE-rms peak A는 디스크의 회전 속도가 약 450 rpm이며 이에 대한 power spectrum은 100~300 kHz대의 주파수 peak들이 발생하며, 155.4 kHz, 195 kHz, 234 kHz 등의 주파수 peak들이 나타난다. 이 주파수들은 약 39 kHz 간격으로 조화 주파수에 가깝다. 이러한 주파수들은 공

기 베어링 형성 과정 중에 공기 입자들에 의해 발생하는 공진, 또는 슬라이더와 디스크의 접촉으로 발생하는 것으로 생각된다. 한편 이론적 계산에 의한 범프 배열에 의한 주파수는 약 30 kHz이지만 실제 관찰되지 않았다. 이는 초기 부상시 슬라이더의 불안정한 거동으로 인해서 슬라이더와 원주간의 범프가 모두 접촉하지 않기 때문으로 판단된다. 중간 부분의 AE-rms peak에 해당하는 peak B는 디스크 회전 속도가 약 2200 rpm이며 이에 대한 power spectrum은 153 kHz에서 뚜렷한 주파수 peak가 발생하며 이는 범프 배열에 의한 주파수 값인 145 kHz와 비슷한 값이다. 그밖에 309 kHz와 924 kHz에서도 미소한 주파수 peak가 발생한다. 후기 부분의 AE-rms peak인 C, D, E는 각각 디스크 회전 속도가 3200 rpm, 3600 rpm, 4200

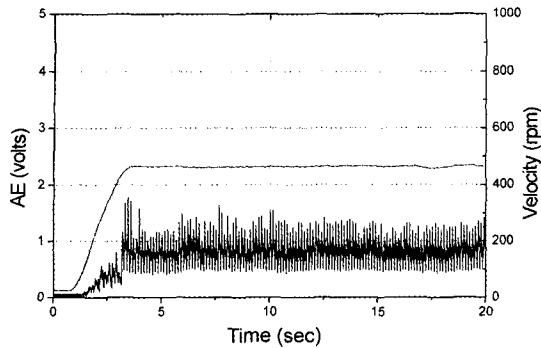


Fig. 13. AE-rms under acceleration to terminal disk speed (450 rpm).

rpm 대이며 주파수 peak는 각각 226 kHz, 243 kHz, 280 kHz로 범프 배열에 의한 주파수 값인 211 kHz, 238 kHz, 277 kHz에 가까운 값이며 디스크 회전 속도가 빨라짐에 따라 주파수 peak의 주파수가 커지고 그 크기가 0.023, 0.0125, 0.0055로 점차 작아진다. 이는 디스크 회전 속도가 증가함에 따라 공기 베어링 효과가 커지고, 슬라이더 부상이 완전히 이루어지는 단계에서 pitch가 커지므로 슬라이더의 trailing edge 부분이 디스크와 접촉하면서 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 또한 이 부분의 power spectrum의 주파수 peak의 크기가 디스크 회전 속도가 증가함에 따라 줄어드는 것은 고속으로 갈수록 공기 베어링 효과가 커지기 때문에 슬라이더와 디스크의 접촉시 접촉력이 작아지기 때문이다.

3-2. 450 rpm 디스크 회전속도에서의 Drag test

슬라이더 부상시 초기 부분의 AE-rms peak에 해당하는 450 rpm에서의 헤드/슬라이더와 디스크간의 상호 작용으로 인한 tribological 특성을 알아보기 위해서 450 rpm에서 200000 cycle의 drag 실험을 실시하였다. Fig. 13은 실험 시작시 3초의 가속 시간동안 450 rpm에 도달할 때의 AE-rms 신호 양상을 나타낸 것이다. 450 rpm의 정속 구간에서 약 0.5~1.8 volt 사이의 AE-rms 변동폭을 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 14에서와 같이 미끄럼 거리가 증가할수록 AE-rms의 변동폭은 서서히 증가해서 150000 cycle 근처에서 약 0.5~3.2 volt 사이로 가장 커지다가 200000 cycle에서는 약 0.5~2.85 volt로 조금 작아진다. Fig. 15는 450 rpm의 drag 실험을 진행하는 동안 AE-rms peak의 변화 양상을 나타낸 것이다. 약 25000 cycle의 미끄럼 거리에서 갑자기 AE-rms 신호가 커지며 그 변화폭도 커진다.

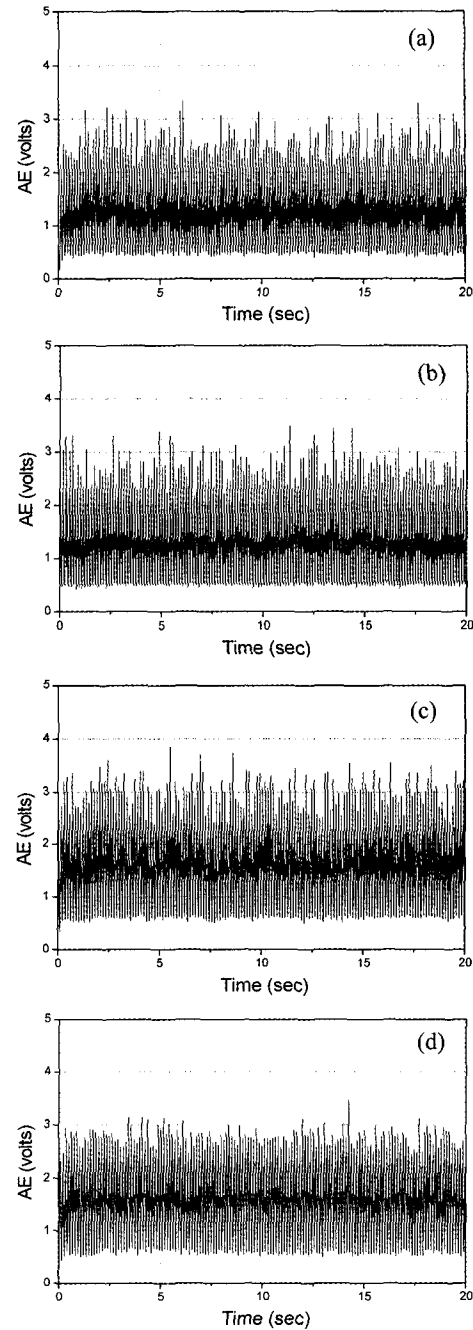


Fig. 14. AE-rms variation with respect to drag cycle : (a) 50000 cycle, (b) 100000 cycle, (c) 150000 cycle, (d) 200000 cycle.

그 이후 미끄럼이 계속 진행되면서 AE-rms는 2.5~3.0 volt 사이의 값에서 비교적 일정하게 유지되는 현상을 나타낸다. 이러한 현상은 미끄럼 초기에 헤드/슬

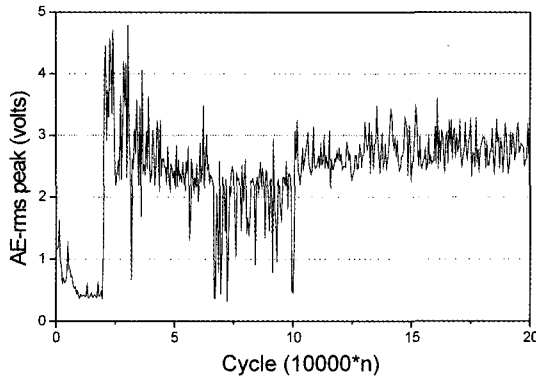


Fig. 15. AE peak variation during drag test.

라이더와 디스크 인터페이스에서 슬라이더의 불안정한 거동으로 인한 초기 마찰, 마멸이 발생되고, 여기서 발생된 마멸 입자에 의해 불안정한 거동이 지속되는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 16은 450 rpm 정속 미끄럼 거리 증가에 따른 power spectrum 변화 양상을 나타낸 것이다. 실험 초기에는 150~200 kHz대의 주파수 peak들이 발생한다. 미끄럼이 진행됨에 따라 200~1000 kHz 주파수 대역에 걸쳐 주파수 peak들이 넓게 분포하게 되며, 그 크기도 커진다. 초기 10000 cycle에서 초기에 없었던 800 kHz대의 주파수 peak가 발생하며, 200 kHz대의 주파수 peak들의 크기가 커지고 peak의 수도 증가한다. 미끄럼이 증가해서 100000 cycle에서는 200 kHz대와 800 kHz의 주파수 peak가 더욱 커지며, 400 kHz와 600 kHz의 주파수 peak들도 발생한다. 이러한 현상들은 Fig. 14에서 확인했듯이 미끄럼이 진행될수록 AE-rms 변동폭이 커지는 것과 관련된다. 특히 200 kHz대의 주파수 peak의 크기 변화는 AE-rms의 변동폭의 변화의 추세와 비교적 잘 일치한다. 즉, 200 kHz대의 주파수 peak의 크기가 커질수록 AE-rms의 변동폭도 커진다고 할 수 있다. 또한 미끄럼 초기부터 존재하는 200 kHz대의 주파수는 경계윤활 상태의 접촉에서 발생하는 주파수로 추측된다. 200000 cycle의 미끄럼이 진행되면 600 kHz대와 800 kHz대의 주파수 peak들이 더욱 명확히 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 주파수들은 슬라이더의 1차, 2차 진동 mode와 비교적 잘 일치한다. 결과적으로 450 rpm에서 접촉 미끄럼 거리가 증가하면 FFT 해석상의 주파수 peak의 발생 대역이 넓게 분포되고 그 개수와 크기도 증가한다. 이는 미끄럼이 진행되면서 슬라이더와 디스크 표면이 마모

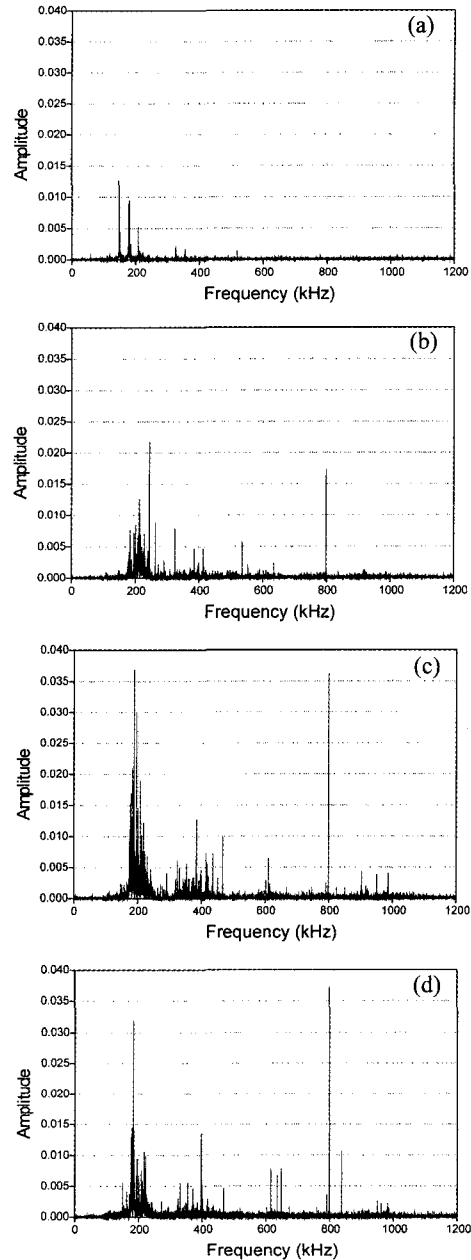


Fig. 16. Power spectra of AE signal during drag test : (a) 0 cycle, (b) 10000 cycle, (c) 100000 cycle, (d) 200000 cycle.

되고, 이로 인해서 발생된 마멸 입자가 슬라이더 표면에 응착되어 슬라이더와 디스크의 접촉을 증가시키고, 슬라이더의 거동 특성을 더욱 악화시키는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 17은 450 rpm의 디스크 회전속도로 20만회

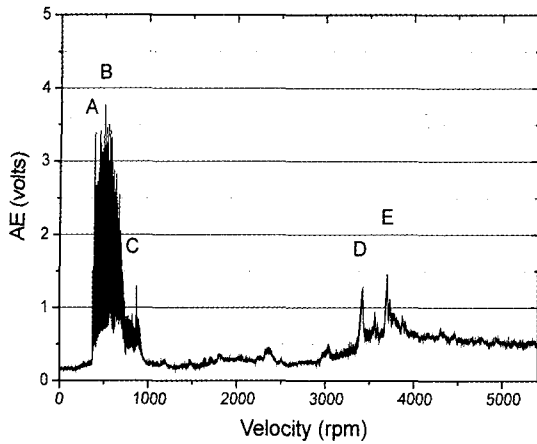


Fig. 17. AE-rms variation during slider take-off after drag test.

drag 실험 후에 60초 동안 디스크 회전속도를 0 rpm 에서 5400 rpm으로 선형적으로 증가시켰을 때의 AE-rms 변화 양상을 나타낸 것이다. Fig. 11의 실험전의 AE-rms 변화와 비교해보면 부상 초기 부분의 AE-rms peak의 크기가 커졌으며 peak간의 간격이 좀더 줄어들고 개수가 많아진 것을 알 수 있다. 중간 부분의 AE-rms peak는 실험 후 크기가 작아졌다. 이는 중간 부분의 접촉이 작아진 것을 의미한다. 후기 부분의 AE-rms peak는 실험전보다 peak의 크기가 커지고 peak의 개수는 조금 줄어들었다.

또한 Fig. 17의 주요 AE-rms peak 발생 부분의 FFT 해석 결과를 나타낸 것이 Fig. 18이다. 초기 부분의 AE-rms peak에 해당하는 peak A는 Fig. 16에서의 drag 실험 후의 FFT 해석과 유사한 결과가 나타

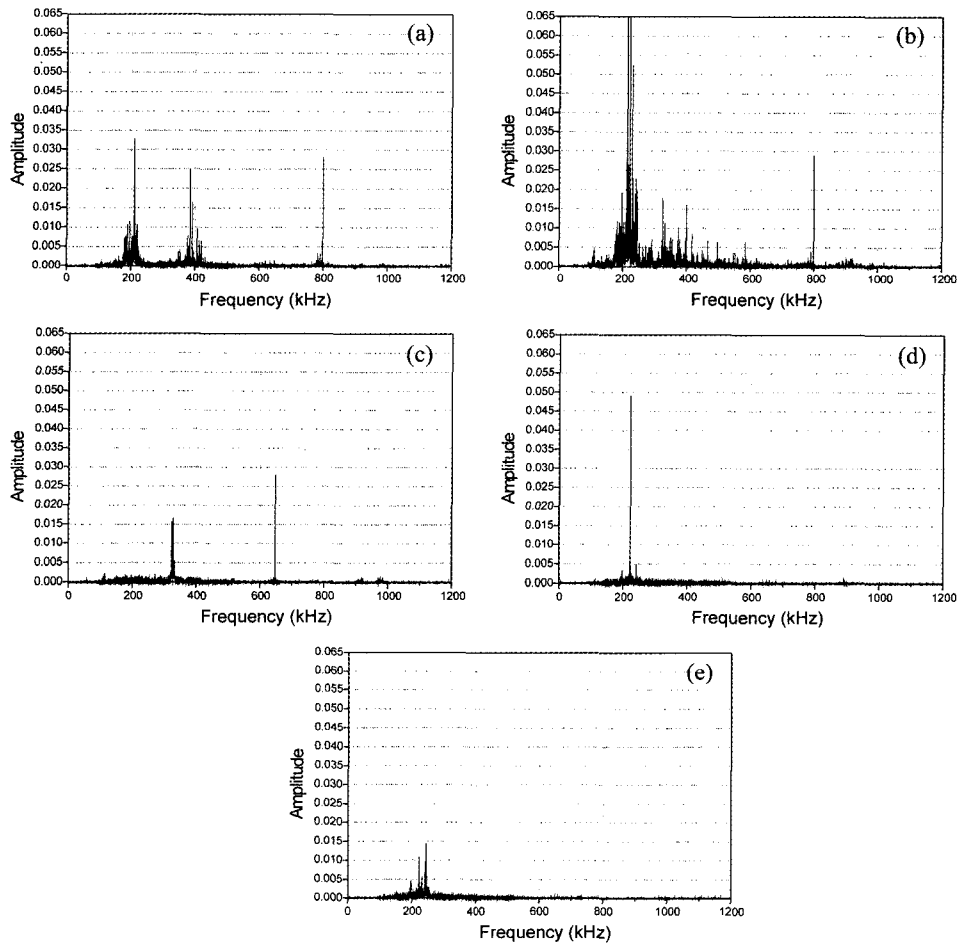


Fig. 18. Power spectra of AE-rms peaks during slider take-off : (a) peak A, (b) peak B, (c) peak C, (d) peak D, (e) peak E.

난다. 이는 정속에서의 FFT 해석과 가속중의 FFT 해석이 비슷함을 의미한다. 초기 부분의 최대 AE-rms peak인 peak B 부분은 주파수 peak(200 kHz)도 가장 크며 전체 주파수 대역에 걸쳐서 주파수 peak의 개수가 많아진 것을 알 수 있다. 초기 부분 마지막 부분인 peak C에서는 320 kHz와 650 kHz대에서 주파수 peak가 발생한다. 후기 부분의 AE-rms peak인 peak D, peak E는 실험전과 비교했을 때 주파수 peak의 주파수는 유사하고 그 크기는 커진 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 19는 실험 후 슬라이더 표면의 광학현미경 관찰 결과이다. 슬라이더 leading edge의 경사진 부분에 금속성의 마멸 입자가 관찰된다. 입자의 크기가 비교적 크고, 이는 슬라이더의 불안정한 거동에 의해 디스크와 슬라이더의 표면에서 분리되어 발생된 것으로 보이며 이러한 미소 입자들이 슬라이더의 거동 특성에 영향을 주었음을 알 수 있다. 또한 슬라이더 leading edge의 경사진 부분의 마멸 입자에 대한 AES 성분 분석 결과는 Fig. 5.20에 제시하였다. 검출되는 성분 중에서 Al, O, Ti, C는 슬라이더 성분이고 F, C, Ni, P는 디스크 성분이다. F는 디스크 표면의 윤활제에 사용되는 주요 원소이고 C는 슬라이더와 디스크 표면의 보호층 성분이다. 또한 Ni, P는 디스크의 Al substrate

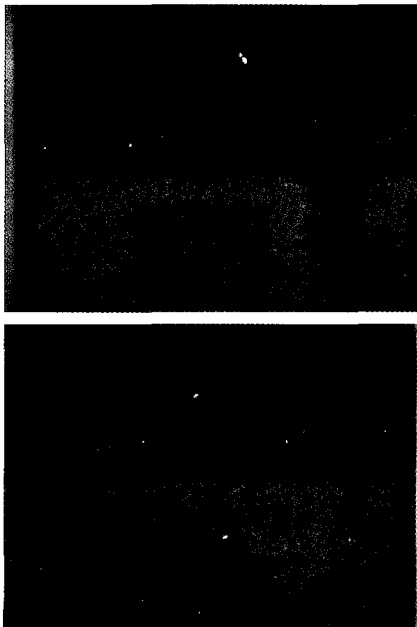
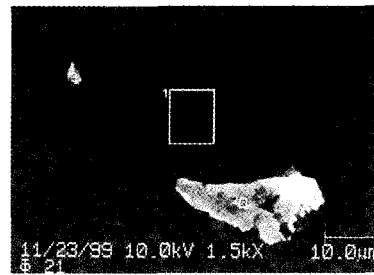


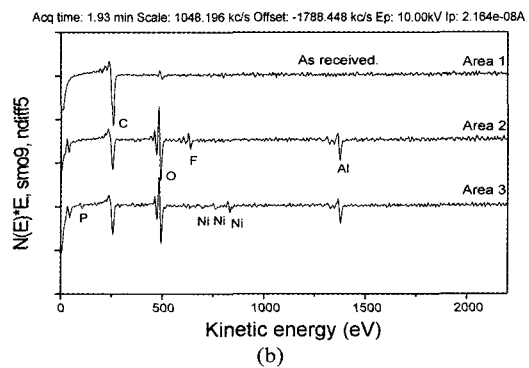
Fig. 19. Contamination of slider surface(leading zone) after 200000 cycle drag test at 450 rpm.

의 윗부분인 NiP층에서 검출되는 성분이다. NiP층의 검출은 디스크의 자성층 아랫부분까지 파손된 것을 의미한다. 즉, 슬라이더 부상시 저속 구간의 AE-rms peak가 발생하는 디스크 회전 속도의 drag 실험에서 헤드/슬라이더와 디스크의 불안정한 미끄럼 접촉으로 인해서 슬라이더와 디스크 양쪽에서 마멸이 발생하며 저장 매체의 치명적인 손상이 발생하는 것을 알 수 있다.

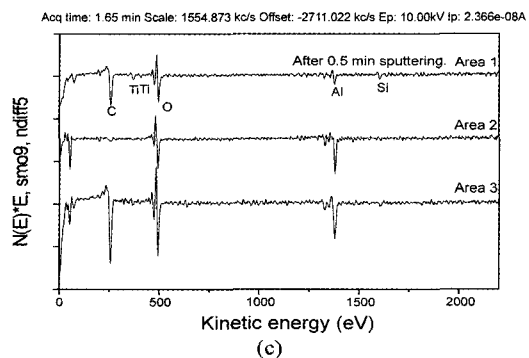
3-3. 2200 rpm 디스크 회전속도에서의 Drag test



(a)



(b)



(c)

Fig. 20. AES analysis of wear particles observed on slider after 200000 cycle drag test at 450 rpm : (a) SEM micrograph, (b) AES analysis(as reserved), (c) AES analysis(after 0.5 minute sputtering)

슬라이더 부상시 중간 부분의 AE-rms peak에 속하는 2200 rpm에서의 헤드/슬라이더와 디스크간의 상호작용으로 인한 tribological 특성을 알아보기 위해서 2200 rpm에서 200000 cycle의 drag 실험을 실시하였다. Fig. 5.21은 60초 동안 0에서 5400 rpm으로 선형적으로

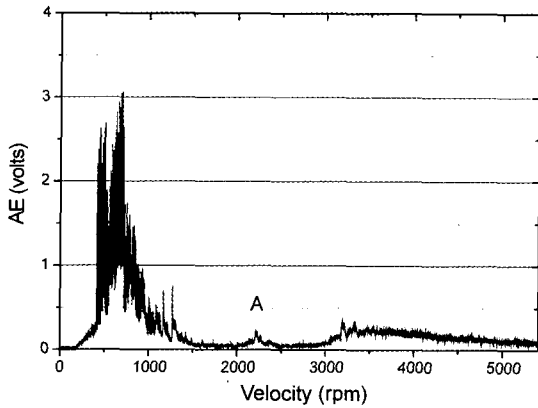


Fig. 21. AE-rms variation during slider take-off.

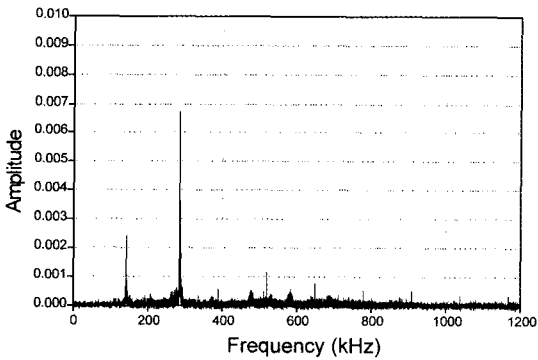


Fig. 22. Power spectrum of AE-rms peak A during slider take-off.

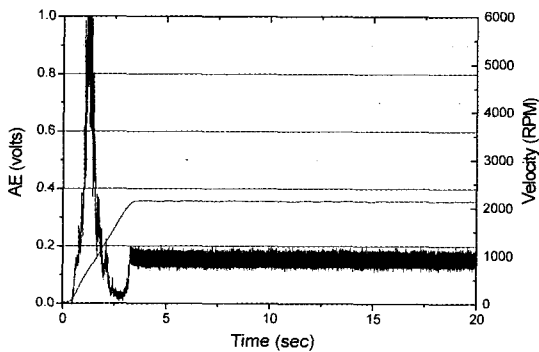


Fig. 23. AE-rms under acceleration to terminal disk speed (2200 rpm).

로 디스크 회전 속도를 증가시킬 때 AE-rms의 변화 양상을 나타낸 것이다. 중간 부분 AE-rms peak에 해당하는 peak A에서의 power spectrum을 Fig. 5.22에 나타내었다. 142 kHz와 285 kHz에서 주파수 peak가

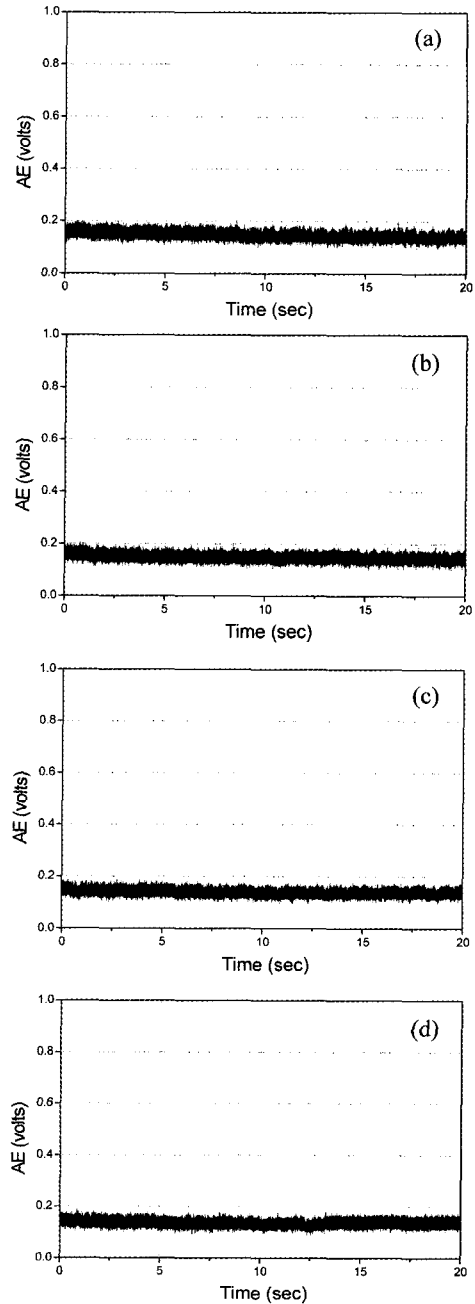


Fig. 24. AE-rms variation with respect to drag cycle : (a) 50000 cycle, (b) 100000 cycle, (c) 150000 cycle, (d) 200000 cycle.

발생하며 400~700 kHz 대에서도 미세한 주파수 peak 들을 발견할 수 있다.

Fig. 5.23은 2200 rpm drag 실험 시작시 3초간 2200 rpm의 정속에 이를 때의 AE-rms 변화를 나타낸 것이다. 정속 구간에서는 0.1~0.2 volt 사이의 AE-rms 값의 변화를 관찰할 수 있으며, Fig. 5.24, Fig. 5.25 에서와 같이 미끄럼 거리가 증가해도 AE-rms 상의 변화는 거의 없으나 약간 감소하는 것을 알 수 있다.

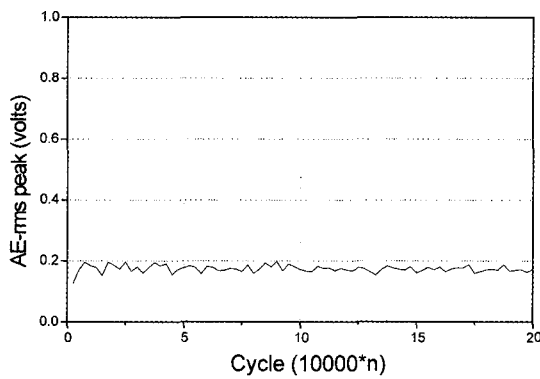


Fig. 25. AE peak variation during drag test.

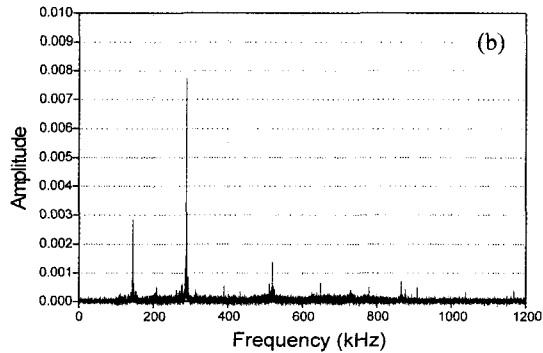
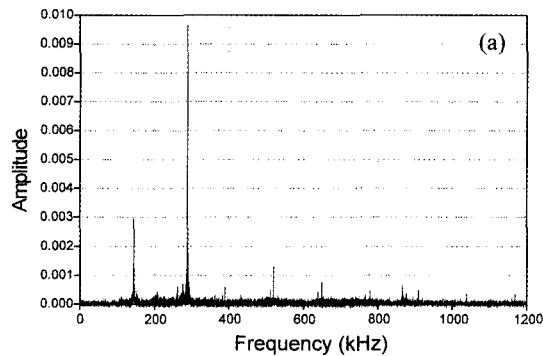


Fig. 26. Power spectra of AE signal during drag test : (a) 10000 cycle, (b) 200000 cycle.

Fig. 5.26에서는 drag 실험 진행중 미끄럼 거리 증가에 따른 FFT 해석 결과이다: 2200 rpm에서 미끄럼 거리가 증가해도 power spectrum은 거의 일정한 주파수 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 5.27에서와 같이 2200 rpm 200000 cycle의 drag 실험 후 60초, 5400 rpm 가속시 AE-rms 변화 양상도 실험 전과 거의 동일한 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5.28에서 중간 부분 peak A의 주파수 특성도 실험전과 거의 동일 하나 870 kHz대에 미세한 주파수 peak들이 새로이 생성된 것을 관찰할 수 있다.

2200 rpm, 200000 cycle drag 실험후 슬라이더 표면의 광학현미경 관찰 결과를 Fig. 5.29에 나타내었다. 슬라이더 표면 전체적으로 마멸 입자는 발견되지 않았다.

3-4. 3200 rpm 디스크 회전속도에서의 Drag test
슬라이더 부상시 후기 부분의 AE-rms peak에 해당

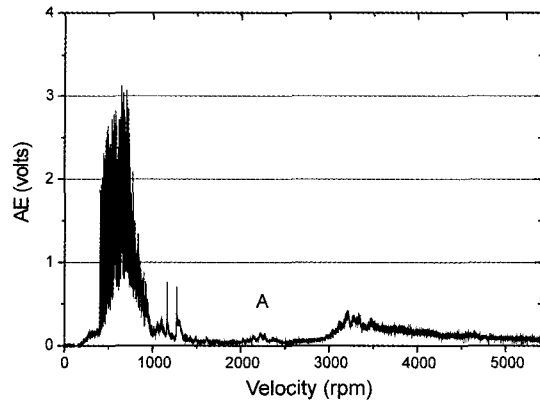


Fig. 27. AE-rms variation during slider take-off after drag test.

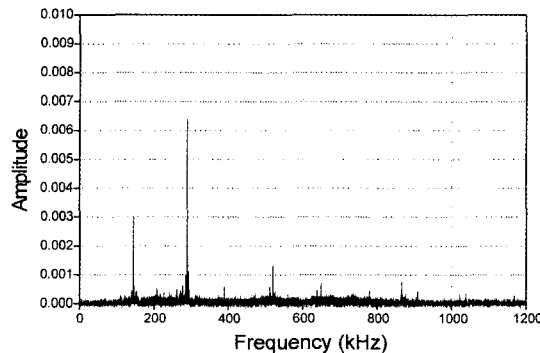


Fig. 28. Power spectra of AE-rms peak A during slider take-off.

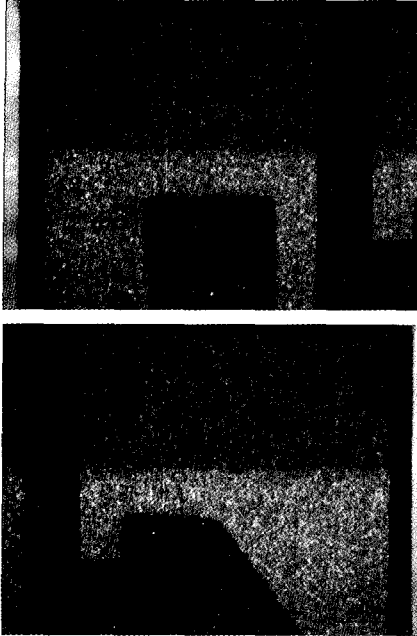


Fig. 29. Contamination of slider surface(leading zone) after 200000 cycle drag test at 2200 rpm.

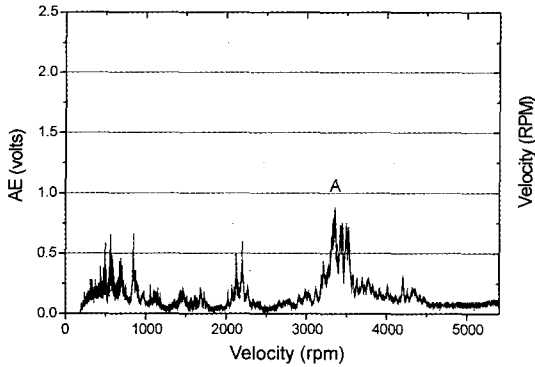


Fig. 30. AE-rms variation during slider take-off.

하는 3200 rpm에서의 헤드/슬라이더와 디스크간의 상호 작용으로 인한 tribological 특성을 알아보기 위해서 3200 rpm에서 200000 cycle의 drag 실험을 하였다. Fig. 5.30은 60초의 디스크 회전 가속 시간 동안 0 rpm에서 5400 rpm으로 디스크 회전 속도가 증가할 때의 AE-rms 변화 양상을 나타내었다. 또한 peak A에서의 FFT 해석 결과를 Fig. 5.31에 나타내었다. AE-rms peak A에서의 power spectrum은 217 kHz의 주파수 peak가 발생하는 것을 알 수 있으며 랜딩존의 레이저 범프 배열에 의한 주파수인 211 kHz와 비슷한 값이다.

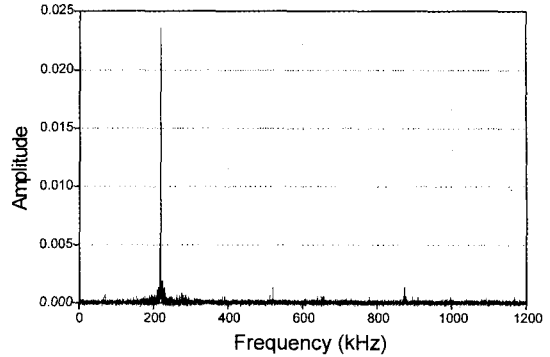


Fig. 31. Power spectrum of AE-rms peak A during slider take-off.

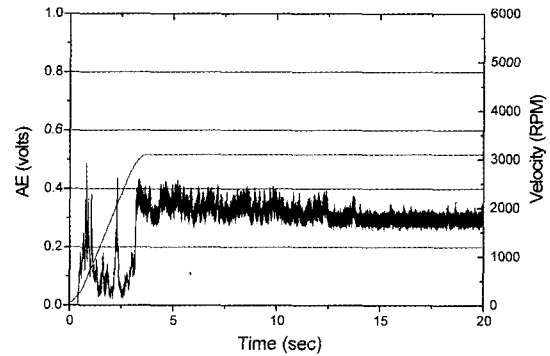


Fig. 32. AE-rms under acceleration to terminal disk speed (3200 rpm).

그 이외에도 650 kHz와 870 kHz대의 미세한 주파수 peak들이 나타난다.

Fig. 5. 32는 3200 rpm drag 실험 시작시 3초간 3200 rpm의 정속에 이를 때의 AE-rms 변화를 나타낸 것이다. 초기 3초간의 가속이 끝나는 부분의 AE-rms는 그 이후로도 계속 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 미끄럼 초기의 3200 rpm의 일정한 정속 구간에서 AE-rms는 0.26~0.32 volt 사이의 변동폭이 일정하게 유지된다. Fig. 5.33와 Fig. 5.34에서 나타난 바와 같이 미끄럼이 계속 진행되어도 AE-rms는 거의 일정하게 유지된다. 또한 drag 실험이 계속 진행되는 동안 미끄럼 거리가 증가해도 Fig. 5.35에서와 같이 power spectrum peak의 주파수와 크기는 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. Drag 실험후 60초, 5400 rpm 가속시 AE-rms의 변화 양상을 Fig. 5.36에 나타내었다. 실험 전의 AE-rms 변화 양상과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5.37에서 후기 부분 peak A에서의 power spectrum도 실험 전과 거의

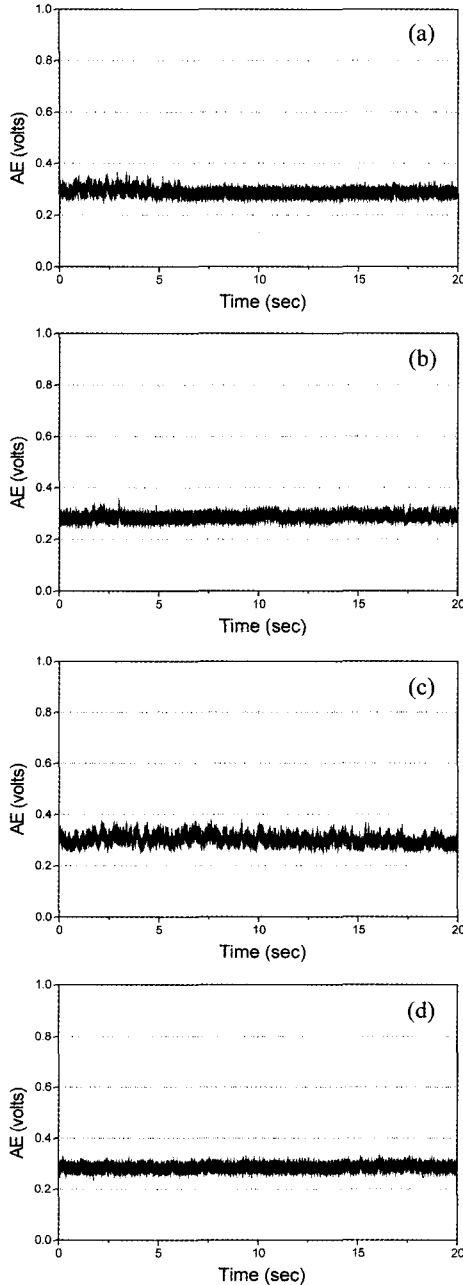


Fig. 33. AE-rms variation with respect to drag cycle : (a) 50000 cycle, (b) 100000 cycle, (c) 150000 cycle, (d) 200000 cycle.

같은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5. 38은 실험 후 슬라이더 표면의 광학 현미경 관찰 결과를 나타내었다. 슬라이더 표면 전체적으로 마멸 입자는 관찰되지 않았다.

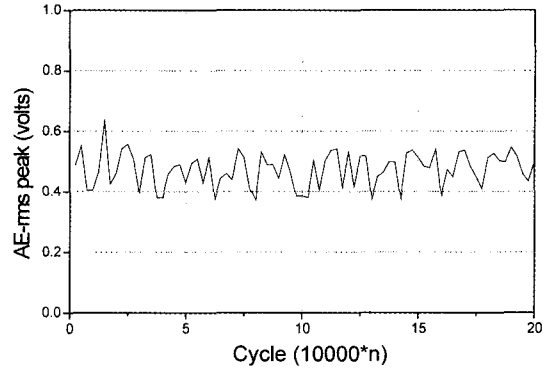


Fig. 34. AE peak variation during drag test.

3-5. 고찰

본 실험을 통해서 CSS 실험에서 슬라이더가 가속될 때의 거동 특성과 drag 실험에서 정속에서의 거동 특성에 대한 비교를 할 수 있다. 즉 기존의 CSS 실험과 drag 실험의 상호연관성을 알아보는 실험에서 문제가 될 수 있는 사항이 두 실험의 마찰 및 마멸 메커니즘이 다를 수 있다는 점이였다. 이러한 근본적인 문제로 인해서 drag 실험을 이용한 가속 마모 실험의 신뢰도가 떨어졌으며 선호되지 않았었다. 그러나 본 실험에서 특정한 디스크 속도에서의 가속 상태 및 정속 상태의 AE 신호를 이용한 FFT 해석 결과 동일한 주파수 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이러한 사실은 헤드/슬라이더와 디스크의 인터페이스에서 특정한 속도에서는 그것에 좌우되는 슬라이더의 거동 특성이 발생된다는 것을 의미한다. 그러므로 일정한 속도에서의 drag 실험시 슬라이더의 거동은 CSS 실험에서의 슬라이더 거동 중의 일부임을 의미한다고 할 수 있다. 또한 본 실험을 통해서 알 수 있었듯이 부상 후기 부분에서 발생하는 AE-rms peak의 영향으로 인한 헤드/슬라이더와 디스크의 tribological 특성은 거의 변화가 없으므로 저속에서의 drag 실험에 의한 가속 마모 실험은 CSS 실험에서의 마모 양상과 유사하다고 할 수 있다.

본 실험에서 슬라이더 부상시 저속 구간에서 발생하는 AE-rms peak에서의 drag 실험에서 미끄럼 거리가 증가할수록 power spectrum의 주파수 특성이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 저속 drag 실험 후 슬라이더 표면의 마멸 입자를 확인할 수 있었다. 마멸 입자는 슬라이더의 leading edge 부분에 흩어져 있었으며 마멸 입자의 크기도 비교적 다양했

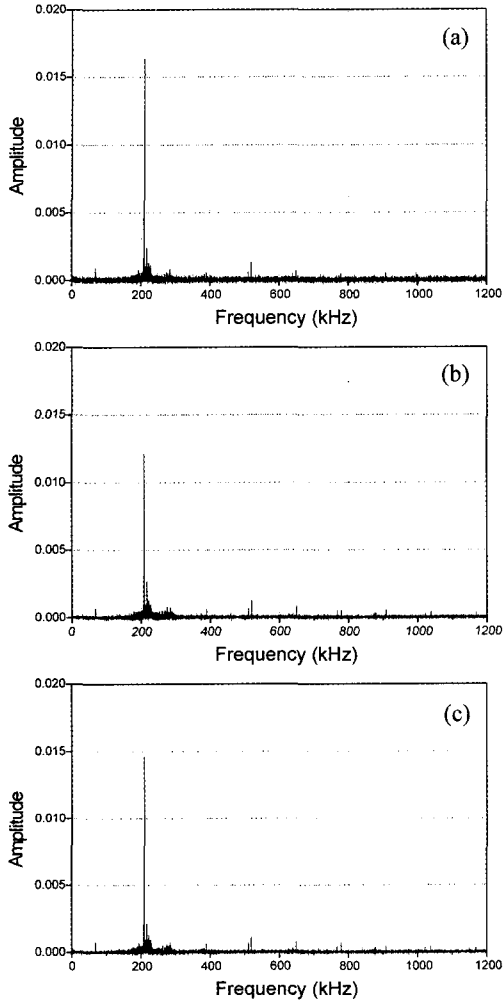


Fig. 35. Power spectra of AE signal during drag test : (a) 0 cycle, (b) 100000 cycle, (c) 200000 cycle.

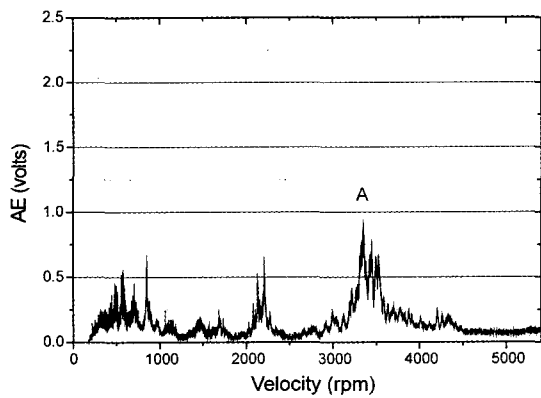


Fig. 36. AE-rms variation during slider take-off after drag test.

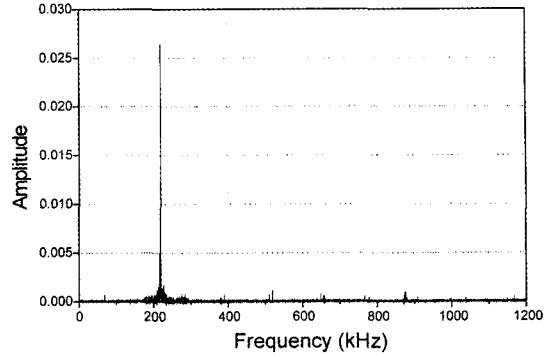


Fig. 37. Power spectra of AE-rms peak A during slider take-off.

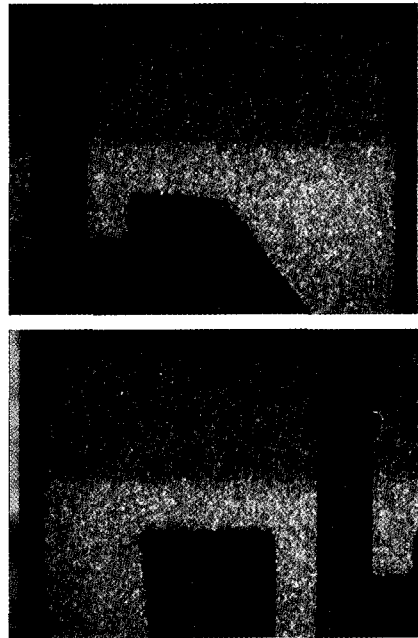


Fig. 38. Contamination of slider surface(leading zone) after 200000 cycle drag test at 3200 rpm.

다. 이러한 결과들을 통해서 슬라이더 표면의 마멸 입자는 슬라이더의 거동을 더욱 불안정하게 하는 것을 알 수 있으며 헤드/슬라이더와 디스크의 인터페이스에서의 tribological 특성이 악화되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 AE 신호와 FFT를 이용한 헤드/디스크 인터페이스에서의 tribological 특성 평가 기법 개발의 가능성을 확인했으며 더 나아가 다양한 접촉과 미끄럼이 발생하는 접촉부에서의 마찰 및 마멸 현상 연구에도 활용할 수 있을 것으로 생각한다.

4. 결 론

하드디스크의 슬라이더 부상시 AE 신호를 분석해본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가속 및 정속 상태에서의 AE peak를 FFT 분석한 결과, 슬라이더의 거동 특성은 가속도에 상관없이 특정 속도에서는 일정함을 확인하였다.
2. 디스크 회전속도가 낮을 때에만 마멸입자가 발생하는 것으로 보아 마멸은 부상 초기에 일어남을 알 수 있고, 이 마멸 입자에 의해 AE 신호의 주파수 특성이 바뀔 수 있다.
3. 슬라이더 부상시 저속 구간의 AE-rms peak가 발생하는 디스크 회전 속도의 drag 실험에서 헤드/슬라이더와 디스크의 불안정한 미끄럼 접촉으로 인해서 슬라이더와 디스크 양쪽에서 마멸이 발생하며, 디스크의 자성층 하부까지 마멸되어 저장 매체의 치명적인 손상이 발생하는 것을 알 수 있다.
4. 광학현미경 관찰 결과, 슬라이더 부상 후기에는 마멸이 일어나지 않았으나 AE peak가 발생하였다. 따라서 모든 AE peak가 슬라이더와 디스크간의 충돌로 발생하는 것은 아님을 알 수 있다.
5. 슬라이더 부상 후기의 AE peak는 범프의 간격에 의한 주파수와 관계가 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센

터(과제번호: 2000G0201)와 삼성종합기술원의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. V. Sharma and F. E. Talke, "Tribological Investigations of Tri-Pad Sliders," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 32, pp. 3651-3653, 1996.
2. H. Kohira, H. Tanaka, H. Tokisue, and M. Matsumoto, "Friction Force of Negative Pressure Sliders for Proximity Recording," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 33, No. 5, pp. 3157-3159, 1997.
3. T. Kita, K. Kogure, Y. Mitsuya, and T. Nakanishi, "New Method of Detecting Contact between Floating Head and Disk," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 15, pp. 837-875, 1980.
4. R. V. Williams, 1980, *Acoustic Emission*, Adam Hilger Ltd, pp. 2-3.
5. T. Y. F. Liew, M. C. Chai, S. Weerasooriya, and T. S. Low, "Head-Disk Interaction of Proximity Sliders Studied by the Acoustic Emission Probe, the Dynamic Flying Height Tester, and the Laser Doppler Vibrometer," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 33, No. 5, pp. 3175-3177, 1997.
6. S. Wang, K. V. Viswanathan, and H. L. Liu, "Acoustic Emission of Laser Textured Disks Influenced by Bump Excitation," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 34, No. 4, pp. 1813-1815, 1998.
7. T. C. McMillan, R. C. Swain, and F. E. Talke, "Investigation of Slider Take-off Velocity Using the Acoustic Emission Frequency Spectrum," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 31, No. 6, pp. 2973-2975, 1995.