

# 하드디스크 슬라이더의 부상 특성과 AE신호의 관계

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

이상민, 문재택 (연세대학교 대학원), 김대은 (연세대학교 기계공학과)  
Sang-Min Lee, Jae-Taek Moon (Graduate School of Yonsei Univ.),  
Dae-Eun Kim (Yonsei Univ.)

### 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 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, friction

### 1. 서론

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 부상 시 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

로 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. 하드디스크 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 개발중이다.

본 연구에서는 부분적인 해석에 머물고

있는 acoustic emission과 tribology와의 연관성을 규명하기 위해서, 상용화된 CSS tester를 이용하여 다양한 슬라이더와 랜딩존에서 슬라이더 부상시 가속도, 정속구간의 디스크의 회전 속도 등을 조건으로 하여 AE 거동 특성을 이해하고자 하였다.

## 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 load beam을 통해 전달받아 감지할 수 있도록 설계되어 있다.



Fig. 1 CETR CSS tester

### 2.2 실험 시편

#### ① 헤드 슬라이더

본 실험에 사용된 헤드/슬라이더는 상용화된 50% 슬라이더(나노 슬라이더)이다. 공기 베어링의 형상은 비대칭의 두 레일이 있고 약 3  $\mu\text{m}$ 의 단차를 이루고 있는 negative pressure 슬라이더이다. 슬라이더의 크기는 2.0 mm $\times$ 1.6 mm이며 두께는 0.45 mm이다. 시뮬레이션 결과 슬라이더의 공기 압력 분포는 Fig. 2와 같다. 또한 슬라이더의 부상 높이는 30~40 nm 정도 되는 것을 알 수 있었다.

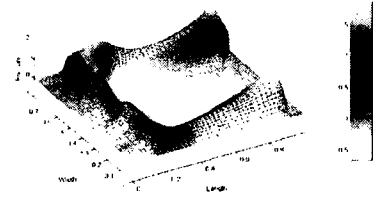


Fig. 2 Air pressure distribution of nano slider

#### ② 디스크 미디어

본 실험에 사용된 디스크 미디어는 LZT(Laser Zone Texture) disk의 일종이다. Bump의 형태는 'V' 형이며 bump 높이는 약 19 nm이고 범프 지름은 약 5.7  $\mu\text{m}$ 이며 범프의 최대 단차는 75 nm이다. 범프간의 간격은 track 방향으로 28  $\mu\text{m}$ , sector 방향으로 31  $\mu\text{m}$ 이다. 또한 AFM으로 data zone의 평균 거칠기를 측정한 값은 약 1.1 nm이다.

### 2.3 실험 방법

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 저장했다.

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 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.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 슬라이더 부상시 AE-rms신호와 FFT

Fig. 3은 60초 동안 디스크 회전속도를 0 rpm에서 5400 rpm으로 선형적으로 증가시켰을 때의 AE-rms 변화 양상을 나타낸 것이다.

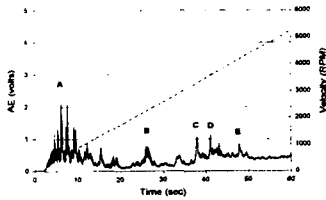


Fig. 3 AE-rms variation during slider take-off

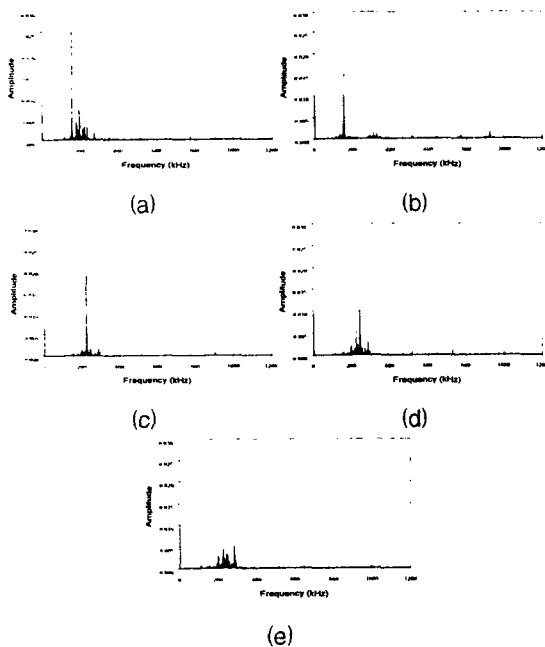


Fig. 4 Power spectra of AE-rms peaks during slider take-off : (a) peak A, (b) peak B, (c) peak C, (d) peak D, (e) peak E

Fig. 4는 Fig. 3에 표시한 A, B, C, D, E 부분에 대한 각각의 FFT 분석을 통해서 파워 스펙트럼을 구한 것이다. Peak A는 디스크의 회전 속도가 약 450 rpm이며 이에 대한 power spectrum에서는 100~300 kHz 대의 주파수 peak들이 발생한다. 이는 약 39 kHz인 조화 주파수에 가깝다. 이러한 주파수들은 공기 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. Peak B는 디스크 회전 속도 2200 rpm에 해당한다. 이에 대한 power spectrum은 153 kHz에서 뚜렷한 주파수 peak가 발생하며 이는 범프 배열에 의한 주파수 값인 145 kHz와 비슷한 값이다. Peak C, D, E는 각각 디스크 회전 속도가 3200 rpm, 3600 rpm, 4200 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 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 rpm에서 200000 cycle의 drag 실험을 실시하였다. Fig. 5는 실험 시작 후 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 가지며, 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.

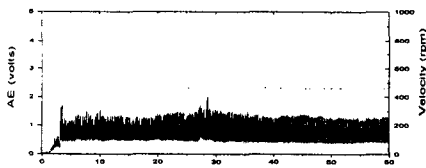


Fig. 5 AE-rms during acceleration up to terminal disk speed

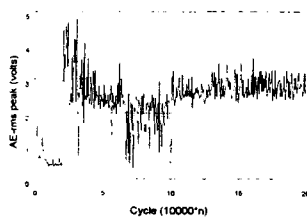


Fig. 6 AE peak variation during drag test(450 rpm)

Fig. 6은 450 rpm의 drag 실험을 진행하는 동안 AE-rms peak의 변화 양상을 나타낸 것이다. 약 25000 cycle의 미끄럼 거리에서 갑자기 AE-rms 신호가 커지며 그 변동폭도 커진다. 그 이후 미끄럼이 계속 진행되면서 AE-rms는 2.5~3.0 volt 사이의 값에서 비교적 일정하게 유지되는 현상을 나타

낸다. 이러한 현상은 미끄럼 초기에 헤드/슬라이더와 디스크 인터페이스에서 슬라이더의 불안정한 거동으로 인한 초기 마찰, 마멸이 발생되고, 여기서 발생된 마멸 입자에 의해 불안정한 거동이 지속되는 것으로 생각할 수 있다.

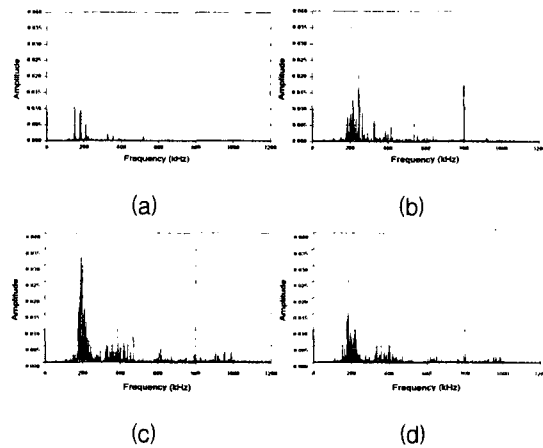


Fig. 7 Power spectra of AE signal during drag test : (a) 0 cycle, (b) 10000 cycle, (c) 100000 cycle, (d) 200000 cycle

Fig. 7은 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. 5에서 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. 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 마모되고, 이로 인해서 발생된 마멸 입자가 슬라이더 표면에 응착되어 슬라이더와 디스크의 접촉을 증가시키고, 슬라이더의 거동 특성을 더욱 악화시키는 것으로 생각할 수 있다.

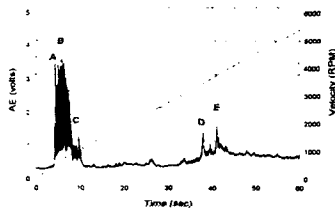


Fig. 8 AE-rms variation during slider take-off after drag test

Fig. 8은 450 rpm의 디스크 회전속도로 20만회 drag 실험 후에 60초 동안 디스크 회전속도를 0 rpm에서 5400 rpm으로 선형적으로 증가시켰을 때의 AE-rms 변화 양상을 나타낸 것이다. Fig. 3의 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 의미

한다. 후기 부분의 AE-rms peak는 실험전보다 peak의 크기가 커지고 peak의 개수는 조금 줄어들었다.

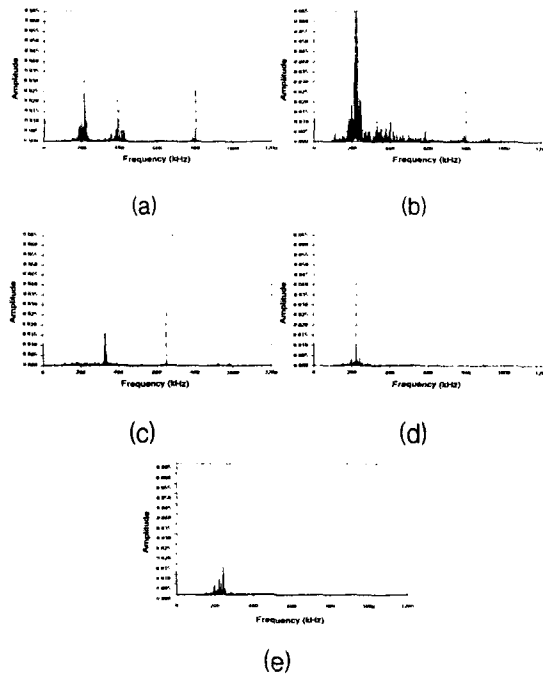


Fig. 9 Power spectra of AE-rms peaks during slider take-off : (a) peak A, (b) peak B, (c) peak C, (d) peak D, (e) peak E

Fig. 9는 Fig. 8의 주요 AE-rms peak 발생 부분의 FFT 해석 결과를 나타낸 것이다. 초기 부분의 AE-rms peak에 해당하는 peak A는 Fig. 7에서의 drag 실험 후의 FFT 해석과 유사한 결과가 나타난다. 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. Peak C에서는 320 kHz와 650 kHz대에서 주파수 peak가 발생하고, peak D, peak E는 실험전과 비교했을 때 주파수 peak의 주파수는 유사하고 그 크기는 커진 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 실험 후 슬라이더 표면의 광학 현미경 관찰 결과이다. 슬라이더 leading edge의 경사진 부분에 금속성의 마멸 입자가 관찰된다. 입자의 크기가 비교적 크며 이는 슬라이더의 불안정한 거동에 의해 디스크와 슬라이더의 표면에서 분리되어 발생된 것으로 보이며 이러한 미소 입자들이 슬라이더의 거동 특성에 영향을 주었음을 알 수 있다.



Fig. 10 Contamination of slider surface after 200000 cycle drag test at 450 rpm

### 3.3 2200 rpm 디스크 회전속도에서의 Drag test

슬라이더 부상시 중간 부분의 AE-rms peak에 속하는 2200 rpm에서 200000 cycle의 drag 실험을 실시하였다. Fig. 11은 60초 동안 0에서 5400 rpm으로 선형적으로 디스크 회전 속도를 증가시킬 때 AE-rms의 변화 양상을 나타낸 것이다.

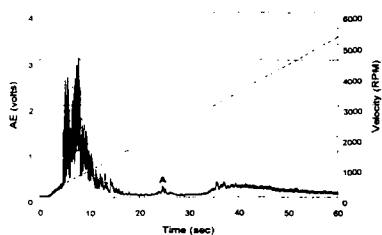


Fig. 11 AE-rms variation during slider take-off

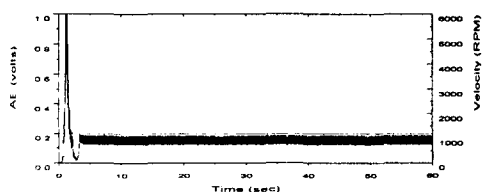


Fig. 12 AE-rms under acceleration to terminal disk speed (2200 rpm)

Fig. 12는 2200 rpm drag 실험 시작 후 3초간 2200 rpm의 정속에 이를 때의 AE-rms 변화를 나타낸 것으로서, 미끄럼 거리가 증가해도 AE-rms 상의 변화는 거의 없으나 약간 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13에서는 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. 실험 결과, 2200 rpm 200000 cycle의 drag 실험 후 60초, 5400 rpm 가속시 AE-rms 변화 양상도 실험 전과 거의 동일하였다.

2200 rpm, 200000 cycle drag 실험 후 슬라이더 표면의 광학현미경 관찰 결과, 슬라이더 표면 전체적으로 마멸 입자는 발견되지 않았다.

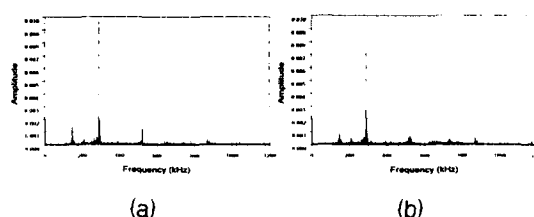


Fig. 13 Power spectra of AE signal during drag test : (a) 10000 cycle, (b) 200000 cycle

### 5.1.4 3200 rpm 디스크 회전속도에서의 Drag test

슬라이더 부상시 후기 부분의 AE-rms peak에 해당하는 3200 rpm에서 200000 cycle의 drag 실험을 하였다. Fig. 14는 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. 15에 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. 따라서 3200 rpm에서의 AE peak는 범프와의 접촉에 의해 발생하는 것으로 보인다.

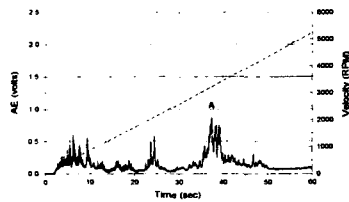


Fig. 14 AE-rms variation during slider take-off

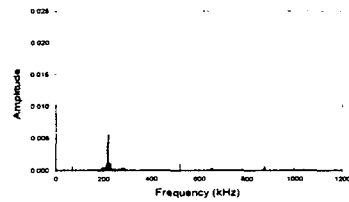


Fig. 15 Power spectrum of AE-rms peak A during slider take-off

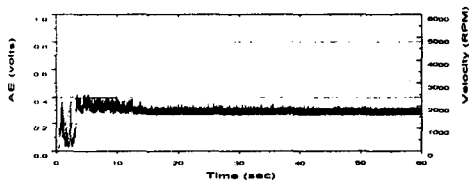


Fig. 16 AE-rms under acceleration to terminal disk speed (3200 rpm)

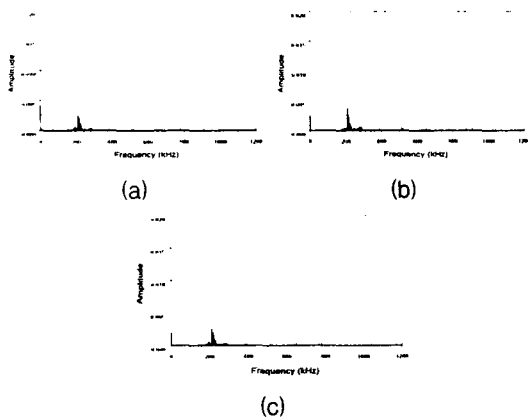


Fig. 17 Power spectra of AE signal during drag test : (a) 0 cycle, (b) 10000 cycle, (c) 100000 cycle

Fig. 16은 3200 rpm drag 실험 시작 후 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. 또한 drag 실험이 계속 진행되는 동안 미끄럼 거리가 증가해도 power spectrum peak의 주파수와 크기는 거의 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. Drag 실험 후 5400 rpm으로 가속시 AE-rms의 변화 양상은 실험 전의 AE-rms 변화 양상 (Fig. 14)과 거의 일치하였다. 또한 후기 부분 peak A에서의 power spectrum도 실험 전과 거의 같은 것을 확인하였다.

Drag 실험이 계속 진행되는 동안 미끄럼 거리가 증가해도 Fig. 17에서와 같이 power spectrum peak의 주파수와 크기는 거의 일정하게 유지되었다. 실험 후 슬라이더 표면의 광학 현미경 관찰 결과, 전체적으로 마멸 입자는 관찰되지 않았다.

#### 4. 결론

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. 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.

4. 슬라이더 부상 후기의 AE peak는 범프의 간격에 의한 주파수와 관계가 있다.

## 후기

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

## 5. 참고 문헌

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.