

AE 신호를 이용한 HDD 슬라이더 공기베어링의 부상상태 측정

김재직 ^{*}(건국대 대학원 기계공학과), 정태건 (건국대학교 기계항공공학부)

Measurement of the Flying Characteristics of HDD Slider Air Bearing Using AE Signal

Jae Jic Kim and Tae Gun Jeong
(Department of Mechanical Engineering, Konkuk University)

ABSTRACT

The AE measurement is one of the most convenient methods for detecting contacts between slider and disk. The AE method has been widely used in the investigation of the tribology of sliding interfaces due to the convenience of using AE sensor. In this study, we examined the relationship between the AE signal and the flying height of a slider. We tried to know the influence of the disk velocity on the AE rms signal by using the AE measurement system. The experiment also gives the relationship between the take-off velocity and the disk surface state. To investigate the behavior of the slider further, the variances of the AE signal are analyzed. The results about a subambient pressure slider indicate that the increase in the magnitude of AE rms signal does not necessarily mean the slider/disk contacts.

Key Words Acoustic emission(AE), Flying height(부상높이), Take-off velocity(이륙속도), Air bearing(공기베어링)

1. 서론

하드디스크 드라이브에서 높은 기록 밀도를 얻기 위하여 슬라이더 헤드와 디스크 표면 사이의 간격을 아주 작게 해야 한다. 극히 낮은 슬라이더 부상높이(flying height)는 정상 작동속도 상태의 슬라이더와 디스크 표면과의 간헐적인 또는 연속적인 접촉의 원인이 되고, 슬라이더와 디스크 표면을 손상시키는 문제를 야기시키게 된다. 슬라이더와 디스크의 접촉으로 인해 발생된 이러한 문제는 디스크 표면의 안전성 및 내구성에 중대한 영향을 미치게 된다. 이와 더불어 디스크 위를 비행하고 있는 슬라이더의 안전성과 내구성 또한 헤드/디스크 관련 분야에 있어서 중요한 문제가 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 슬라이더와 디스크 사이의 상호 작용을 측정할 수 있는 고정밀도의 기술이 요구되고 있으며, 실제로 많은 측정기술이 개발되어 적용되었다.

최근 여러 산업현장에서 사용되고 있는 AE(acoustic emission)는 슬라이더와 디스크 사이의 물리적 현상을 측정하는데 많이 활용되고 있다. 이것은 AE 센서의 조작이 간편하고, 상당한 민감성을

보이기 때문이다. AE는 Kita 등[1]에 의해 헤드/디스크 접촉의 연구에 처음으로 사용되었다. 그들은 AE 트랜스듀서를 슬라이더의 서스펜션에 부착함으로써 초기 속도 증가에 따른 AE 증가, 감소 그리고 AE 주파수 스펙트럼의 변화를 연구하였다. MaMillan 등[2]은 AE를 이용해 슬라이더의 이륙속도(take-off velocity)를 연구하였으며, 이륙속도의 저속화는 슬라이더/디스크의 상호간섭을 최소화시켜준다고 하였다. Bhusban 등[3]은 슬라이더의 부상높이에 대한 표면거칠기의 영향을 연구하였다. Khurshudov 등[4]은 AE를 사용하여 슬라이더를 연구하였으며, 실험을 통해 AE rms 증가의 원인은 슬라이더/디스크의 접촉뿐만 아니라, 속도의 영향으로도 증가한다고 하였다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 계산된 슬라이더 부상높이의 데이터와 디스크 선속도에 따른 AE 신호 사이의 상관관계를 이끌어 내고자 하였다. 또한 슬라이더/디스크 사이에 발생하는 물리적 현상에 대한 한가지 설명 지표로서 AE rms 신호를 사용하고 하였으며, 모든 현상에 대한 적용의 타당성을 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 슬라이더 치수

본 실험에 사용된 슬라이더의 형상과 치수를 Fig 1과 Table. 1에 나타내었다. 슬라이더의 크기는 2.05mm×1.60mm 이다. 선수부분(leading edge)에 테이퍼(taper)가 있으며, 후미부분(trailing edge)에 깊이 1.60μm 의 이중 리세스(recess)가 있다. 기본 리세스는 3.90μm 이다. Fig 2는 실험장치와 구조물을 간략하게 보여주고 있다. AE 신호는 오실로스코프와 데이터 수집 보드를 통과한 후 Labview 프로그램을 이용해 수집된다. AE 센서는 서스펜션 홀더 부분에 부착되어 있으므로 디스크 위를 비행하고 있는 슬라이더의 움직임을 변화시키지 않는다.

실험은 1차, 2차로 나누어 수행되었으며, 슬라이더의 정상상태 비행 시 서로 다른 디스크 반경위치에

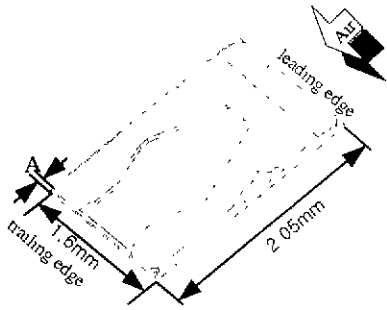


Fig 1 Schematic of subambient pressure

Table 1 Slider dimensions

Taper	0.25mm
Recess	3.9mm
Taper Height	3.5μm
Length (A)	0.03mm
Depth (A)	1.6μm

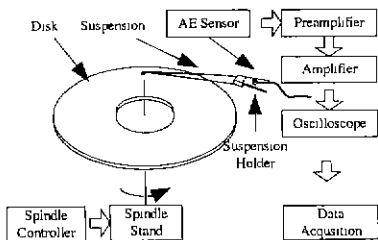


Fig 2 Schematic of the experimental set-up

대하여 AE rms 신호가 측정된다. 1차 실험은 600~7800rpm 의 스피들 회전속도 범위 내에서 300 rpm 의 간격으로 행해졌다. 2차 실험은 동일한 간격으로 240~7800rpm 사이에서 수행되었다. 측정이 실시된 6곳의 디스크 반경위치는 각각 28.90, 31.40, 33.90, 36.40, 38.90, 41.40mm 이다. 각 실험에서 초당 1000개의 샘플링 비율로 3000개의 데이터를 획득하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 스피들 모터 회전속도와 AE 신호

Fig 3은 스피들 모터의 회전속도를 변화시키면서 6곳의 디스크 반경위치에서 측정된 AE rms 신호를 나타내고 있다. 스피들 모터의 회전속도는 600~7800rpm 범위 내에서 300rpm 간격으로 증가 감소되었으며 AE rms 는 슬라이더의 정상 비행상태에서 측정되었다. Fig 3은 6곳의 반경위치에 대하여 모든 AE rms 신호가 500rpm 근처에서 급격히 감소하는 것을 보여준다. 500~3000rpm 에서 AE rms 신호는 낮게 형성되고 있으며, 점차 증가하여 최대값을 나타낸 후 다시 감소하고 있다. 서로 다른 디스크 반경위치에 대해서 AE rms 신호의 최대값이 좌측에서 우측으로 이동하는 형태를 보여주고 있으며, AE

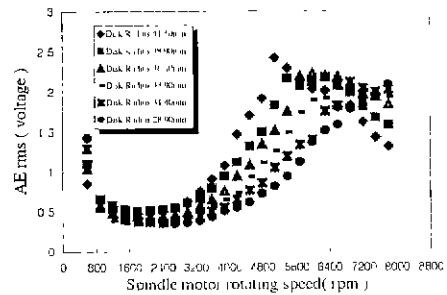


Fig 3 AE rms signals vs spindle motor rpm

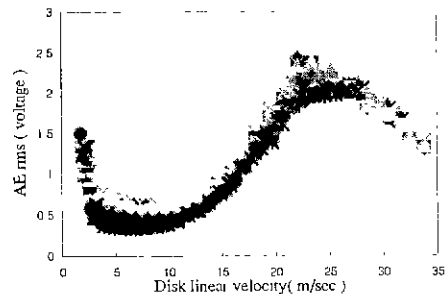


Fig 4 AE rms signals vs. disk linear velocity

rms 신호의 최대값이 각 반경위치마다 서로 다른 스핀들 회전속도에서 발생하고 있다

Fig 4의 그래프는 Fig 3의 회전속도에 대한 AE rms 를 디스크 선속도에 대하여 도시한 것이다 Fig 4에서는 Fig 3과 달리 각기 다른 디스크 반경위치에 대한 AE rms 신호가 거의 일치하여 같은 형태로 나타나고 있다 이는 AE rms 신호를 스핀들 모터 회전속도에 대해 도시하였을 때 명확하게 드러났던 Fig 3의 AE rms 최대값 이동현상이 단순히 디스크 반경위치에 따른 디스크 트랙(track) 특성차이 때문이 아니라, 반경위치의 차이로 인해 발생하는 선속도와 밀접한 연관성이 있음을 나타낸다

3.2 디스크 표면 상태와 슬라이더 이륙속도

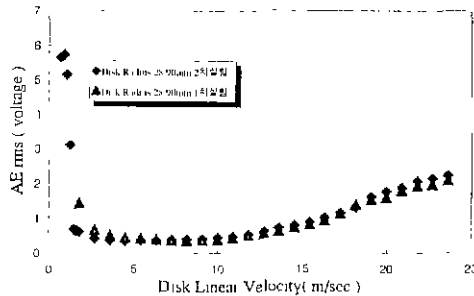


Fig 5 AE rms signals vs disk linear velocity

슬라이더 이륙속도(take-off velocity)의 정의를 AE rms 신호가 잡음(noise)상태와 비슷한 최저상태에 이르렀을 때라고 한다면, 지금까지의 실험을 통하여 디스크 선속도 290m/sec 근처에서 슬라이더의 이륙속도가 발생하는 것을 알 수 있다 Fig 5의 1차 실험은 31의 실험방법과 동일하며, 31에서의 실험을 수행하는 동안 디스크는 이미 수만번의 회전을 거친 상태이다 디스크 표면 상태에 대한 AE rms 신호를 도시한 Fig 5의 1차 실험 데이터는 실험초기의 AE rms 신호를 나타낸 Fig 3의 디스크 반경 2890mm AE rms 신호와 비교해볼 때 커다란 차이점을 나타내지 않는다 결론적으로 600~7800rpm 의 속도 범위 내에서는 슬라이더/디스크의 접촉이 발생하지 않으며, 슬라이더는 안정된 정상상태 비행에 충분한 비행 높이를 갖기 때문에 일정한 AE rms 신호가 발생된다 2차 실험은 240rpm~7800rpm 의 스핀들 모터 회전속도 범위에서 실행되었으며, 선속도 182m/sec 부근에서 1차 실험보다 낮은 AE rms 신호를 나타낸다 이러한 원인은 저속구간에서 슬라이더 비행에 충분치 않은 공기베어링이 작용함으로써 슬라이더/디스크 사이에서 간헐적인 접촉이 발생하기 때문이다 슬라이더/디스크의 접촉은 디스크

표면의 돌출부를 제거하는 버니싱(burnishing) 효과를 발생시켰으며, 결국 접촉에 의한 버니싱 효과는 슬라이더 이륙속도의 저속화를 야기시켰다 이륙속도의 저속화는 슬라이더의 접촉거리(contact sliding distance)를 감소시킴으로써 직접적인 슬라이더/디스크의 상호간섭을 최소화시켜준다[2]. Bhusan 등[3]의 연구에서도 표면이 매끄러울수록 착륙속도(landing speed)는 줄어들지만, 실험을 위해 가동된 속도에서는 여러 가지 표면 거칠기에 대한 공기베어링 또는 정상상태 비행높이에서 눈에 띄는 차이점을 발견할 수 없다고 하였다

3.3 AE 원신호

Fig 6은 증폭기의 내장필터가 100~300kHz 인 점을 고려하여 디스크 반경 2890mm에서 0.0025초 동안 2500개의 AE 원신호(raw signal)를 구한 것이다

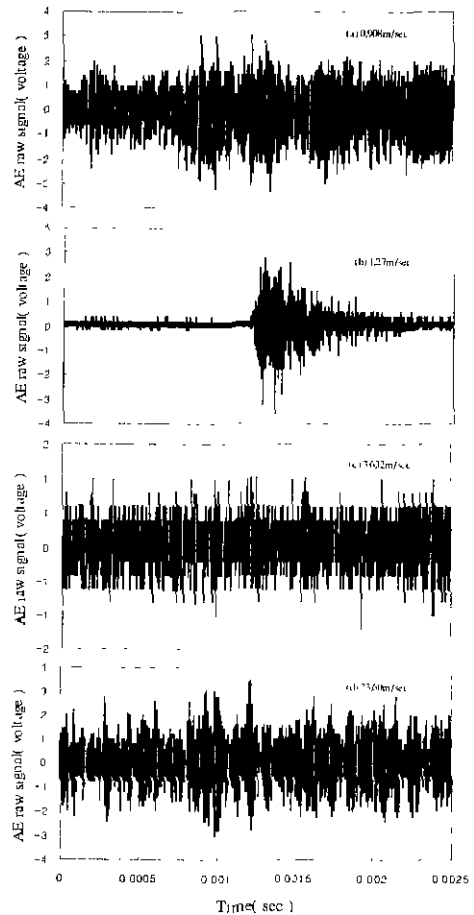


Fig 6 AE raw signal at various disk linear velocity

다 선속도 0.908m/sec, 1.27m/sec 에서는 증폭기의 이득값을 각각 40dB, 20dB 씩 낮추었다 Fig.6(a)는 슬라이더/디스크의 연속적인 접촉으로 인해 발생하는 AE 신호의 중첩현상을 나타내고 있으며, Fig 6(b)의 전형적인 AE 형태는 선속도 1.27m/sec 에서 슬라이더의 간헐적인 접촉을 나타내고 있다. Fig 6(c)는 낮고 일정한 신호를 나타냄으로써 정상상태의 슬라이더의 비행을 나타낸다 Fig 6(d)는 슬라이더/디스크의 연속적인 접촉 시 발생한 AE 신호의 중첩된 형태와는 다른 형태를 보여준다.

3.4 AE rms 신호의 분산

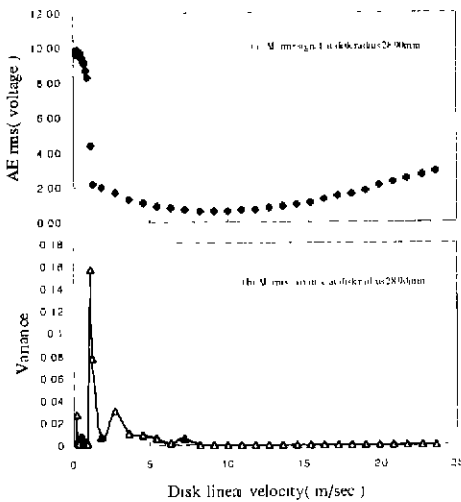


Fig 7 Relationship between AE rms and AE variance at disk radius 28.90mm

본 실험은 스피들 모터 속도 60~7800rpm 에서 행해졌으며, Fig 7(a)는 AE rms 신호의 최대값이 상당히 낮은 저속구간에서 발생함을 나타낸다 그리고, 60~300rpm(0.182~0.908m/sec)의 스피들 회전속도에서는 AE rms 신호가 크고 일정하게 나타나므로, AE 원신호의 결과와 마찬가지로 슬라이더와 디스크의 연속적인 접촉이 일어남을 알 수 있다 연속적인 슬라이더/디스크의 접촉은 일정한 크기의 AE rms 신호를 발생시킴으로써 분산(variance)을 낮게 형성시켰다 최대 AE rms로부터 슬라이더의 이륙속도 까지의 속도 구간에서는 AE rms 신호의 기울기가 가파르게 형성되므로 짧은 속도 구간에서 빠르게 부상이 이루어짐을 알 수 있다 또한, 슬라이더 이륙속도 이전 구간에서는 슬라이더의 정상상태 비행에 충분한 공기베어링이 작용하지 않기 때문에 슬라이더/디스크의 간헐적인 접촉이 발생하게 된다

간헐적인 접촉은 Fig 6의 (b)와 같은 크고 불규칙적인 AE 파열신호(burst signal)를 발생시킴으로써, Fig 7(b)의 저속구간에서 큰 분산의 원인이 되었다 이륙속도이후 속도구간에서는 슬라이더의 안정된 비행으로 AE rms 신호 및 분산 모두 작은 수치를 나타내고 있다 선속도 10m/sec 이상의, AE rms 신호가 증가하는 속도구간에서 AE rms 분산도 낮게 나타나고 있다 AE rms 가 증가하는 속도구간에서는 슬라이더의 이륙속도 구간에서와 같은 급격한 분산값의 증가를 나타내지 않는다 따라서 이 속도 구간에서는 슬라이더/디스크의 접촉과 같은 불안정한 슬라이더 운동이 일어나지 않는다고 할 수 있다

3.5 수치계산 결과

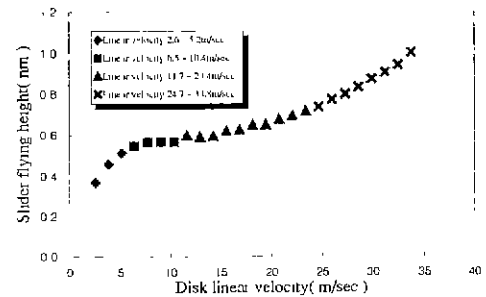


Fig 8 Flying height calculated from numerical analysis

Table 2 Computation parameters

Slider Properties		
Length(mm)		2.05
Width(mm)		1.6
Recess(μm)		3.9
Crown(nm)		0
Camber(nm)		0
Twist(nm)		0
Radial Position(mm)		41.41
Skew Angle(degree)		0
Tape	Length(mm)	0.25
	Angle(mrad)	14
Flying Attitude		
Initial Flying Attitude	Flying Attitude(mm)	75
	Pitch(μrad)	100
	Roll(μrad)	0
Loading condition	Loading Force(g)	3
	Pitch Offset(mm)	0
	Roll Offset(mm)	0
Solution Conditions		
Ambient Pressure(Pa)		101400
Mean Free Path(m)		3.500E-10
Viscosity(Ns/m ²)		1.806E-05
Max Residual		1.000E-07
Numerical Scheme		P-Law
Slip Model		Fuku-Kaneko

Fig 8은 수치해석을 이용한 슬라이더의 부상높이 계산결과를 나타낸다. 선속도 0~5m/sec 구간에서 가파른 상승곡선을 나타내고 있다. 5~10m/sec 구간에서는 거의 일정한 슬라이더 비행높이를 유지하며, 10~33 82m/sec 에서는 2차의 상승곡선을 그리고 있다. 0~5m/sec 의 급격한 상승곡선은 슬라이더 비행에 충분치 않은 공기베어링 상태에서 슬라이더의 부상상태로 전환되는 과도기적 상태를 나타내고 있다. 일정한 비행높이를 보이는 5~10m/sec 구간은 슬라이더 부상 이후 안정기로 들어서는 구간이다. Fig 8은 디스크 선속도 전구간에서 슬라이더 비행높이가 상승하는 형태를 보여주므로, 시뮬레이션 상에서는 슬라이더의 부상 이후 접촉이 전혀 발생하지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과와 AE rms 분산실험의 결과 그리고 표면상태와 부상속도의 관계실험의 결과를 고려할 때 AE rms 의 상승은 단순히 슬라이더/디스크의 접촉결과로 발생하는 것이 아니라는 것을 알 수 있다.

4. 결론

디스크 표면상태와 이륙속도와의 관계를 구하기 위한 실험결과를 보면 선속도의 고속구간에서 디스크의 사용상태에 상관없이, 일정한 크기의 AE rms 신호를 나타냈다. 슬라이더의 이륙속도 구간은 좁은 선속도 구간에서 발생하며, 간헐적인 슬라이더/디스크 접촉은 높은 AE rms 분산을 나타내었다. 또한, AE rms 분산실험을 통해 AE rms 신호가 증가하는 속도 구간에서 분산 값이 매우 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 슬라이더/디스크의 접촉과 같이 슬라이더에 커다란 영향을 미치는 물리적 현상이 발생하지 않음을 의미한다. 수치계산을 이용한 슬라이더 비행높이 결과는 선속도 전구간에 걸쳐 지속적인 상승을 나타내었다.

이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 디스크 선속도의 저속구간에서 슬라이더와 디스크사이의 상호작용을 파악하였으며, AE 신호의 유용성을 확인할 수 있었다. 하지만 고속구간에서 AE rms 신호의 증가는 반드시 슬라이더/디스크의 접촉을 의미하는 것은 아니며, 고속구간에서 AE rms 신호의 사용은 적합하지 않다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1 T Kita, K Kogure, Y. Mitsuya, and T Nakanishi, "New method of detecting contact between floating-head and disk," IEEE Transactions on Magnetics, Vol Mag-16, No 5, pp 873 - 875, 1980
- 2 T C McMillan, R. C Swin, and F. E Talke, "Investigation of slider take-off velocity using the

acoustic emission frequency spectrum." IEEE Transactions on Magnetics, Vol 31, No. 6, pp 2973 - 2975, 1995.

- 3 M Suk, B Bhushan, and D B. Bogy, "Role of disk surface roughness on slider flying height and air-bearing frequency," IEEE Transactions on Magnetics, Vol 26, No 5, pp 2493 -2495, 1990.
- 4 A G. Khurshudov and F E Talke. "Investigation of proximity recording sliders using acoustic emission." International conference on micromechatronics for information and precision equipment, pp 439 - 442, 1997
- 5 R C Benson, R Sundaram, and F E. Talke, "A study of acoustic emission from the slider/disk interface in a 5.25inch hard disk drive," STLE, pp 87 - 93, 1988