

AE 신호를 이용한 HDD 슬라이더 공기베어링의 부상상태 측정

김 재 직* · 정 태 건†

(2001년 1월 22일 접수, 2001년 6월 22일 심사완료)

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

Jae Jic Kim and Tae Gun Jeong

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Hard Disk Drive(하드디스크 드라이브), Flying Height(부상높이), Take-Off Velocity(이륙속도), Air Bearing(공기베어링)

Abstract

The AE measurement is one of the most convenient methods for detecting contacts between the slider and the disk. The AE method has been widely used in the investigation of the tribology of sliding interfaces due to its convenience. We examined the relationship between the AE signal and the flying height of a slider. We investigated the influence of the disk linear 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 conditions. To investigate the behavior of the slider further, the variances of the AE signals are analyzed. The experimental results indicate that the increase in the magnitude of the AE rms signal does not necessarily mean the slider/disk contacts.

1. 서 론

하드디스크 드라이브에서 높은 기록밀도를 얻기 위해서는 슬라이더 헤드와 디스크 표면 사이의 간격을 아주 작게 해야 한다. 특히 최근 많이 연구되고 있는 근접저장(proximity recording) 방식은 슬라이더를 디스크 표면거칠기의 범위까지 최대한 가깝게 함으로써 이루어질 수 있게 된다.⁽¹⁾ 최근 개발되는 대부분의 슬라이더는 헤드/디스크의 근접접촉을 적용하기 위해 25 nm 또는 이보다 낮은 비행높이에서 작동하도록 설계된다.⁽²⁾

헤드/디스크의 접촉을 허용하는 극히 낮은 슬라이더 부상높이는 정상 작동속도에서 슬라이더와 디스크 표면과의 간헐적인 또는 연속적인 접촉의 원인이 된다. 이 상황에서 슬라이더는 디스크 표

면의 안전성 및 내구성에 중대한 영향을 미치게 된다. 이와 더불어 디스크 위를 비행하고 있는 슬라이더의 안전성과 내구성 또한 헤드/디스크 인터페이스 분야에 있어서 중요한 문제가 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 슬라이더와 디스크 사이의 상호작용을 측정할 수 있는 고정밀도의 기술이 요구되고 있으며, 실제로 많은 측정기술이 개발되어 적용되었다.

슬라이더/디스크 사이의 상호작용을 측정하기 위해서 접촉저항(contact resistance), 정전용량센서(capacitance sensor), 압전센서, AE(acoustic emission), LDV(laser Doppler vibrometer) 등 많은 방법이 사용되고 있다. 압전센서는 슬라이더에 부착되므로 슬라이더의 거동에 영향을 미치게 되고, LDV는 빛이 반사되는 물체의 거동만을 감지할 수 있다는 단점이 있다.⁽³⁾ 압전센서를 사용하는 경우 슬라이더와 디스크 사이의 접촉으로 발생하는 응력이나 슬라이더 가속이 센서에서 감지할 수 있는 일정량이 되지 않으면 전기적 신호로 전환되지 못한다.⁽⁴⁾ 최근 여러 산업현장에서 널리 사용되고 있는 AE

* 건국대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 건국대학교 기계항공공학부

E-mail : tgjeong@konkuk.ac.kr

TEL : (02)450-3471 FAX : (02)447-5886

는 슬라이더/디스크 사이의 물리적 현상을 측정하는 데에도 많이 활용되고 있다. 이것은 AE 센서의 조각이 매우 간편하면서도 상당한 민감성을 보이기 때문이다.

AE는 Kita 등⁽⁵⁾에 의해 헤드/디스크 접촉의 연구에 처음으로 사용되었다. 그들은 AE 센서를 슬라이더의 서스펜션에 부착함으로써 초기 디스크 회전속도 증가에 따른 AE 신호의 증가 및 감소 그리고 AE 주파수 스펙트럼을 연구하였다. Benson 등⁽⁶⁾은 여러 슬라이더/디스크 조합에 대해 AE 실효값(root mean square) 신호와 주파수 스펙트럼을 연구하였다. 디스크 회전속도의 증가에 따라 AE 실효값 신호가 감소하는 결과를 얻었고 슬라이더 이륙과 착륙과정에서 동일한 주파수 스펙트럼을 얻었다. McMillan 등⁽⁷⁾은 AE를 이용해 슬라이더의 이륙속도(take-off velocity)를 연구하였으며, 이륙속도의 저속화는 슬라이더/디스크의 상호간섭을 최소화시켜 준다고 하였다. Suk 등⁽⁸⁾은 슬라이더의 운동이 디스크와의 간헐적 접촉에서 부상으로 전환되는 과도기적 상태에서 슬라이더의 부상높이와 공기베어링 주파수에 대한 표면거칠기의 영향을 연구하였다. 실험에 적용된 속도범위 내에서는 정상상태 비행높이에서 표면거칠기의 영향을 발견할 수 없었지만 착륙속도(landing velocity) 구간에서는 표면거칠기뿐만 아니라 돌출부의 영향을 볼 수 있었다. 이상민과 김대은⁽⁹⁾은 슬라이더 이륙 시 발생하는 AE를 통해서 슬라이더의 ABS(air bearing surface)와 레이저 범프의 영향을 고찰하였다. 특히 범프의 간격 및 밀도와 AE 최대 실효값 변화량과의 관계를 구했다.

Khurshudov 등^(10,11)은 AE와 접촉력 사이의 관계를 구하고자 하였으며, 특히 슬라이더가 미끄러짐 구간에서 정상상태 비행으로 전환되는 과도기구간의 연구를 위해 마찰과 AE 측정을 이용하였다. 그들은 실험을 통해 AE 실효값은 슬라이더/디스크의 접촉뿐만 아니라 속도의 영향을 받기 때문에 일정한 접촉력이 작용하거나 또는 접촉력이 감소할지라도 속도의 영향으로 증가할 수 있다고 하였다.

본 연구에서는 AE 측정법을 이용하여 슬라이더 공기베어링의 부상상태를 알고자 하였다. 여러 디스크 반경구간에서 AE 실효값 또는 AE 원신호(raw signal)를 측정하였으며, 이러한 신호의 발생 원인을 규명하고자 하였다. 또한 슬라이더/디스크 사이에서 발생하는 물리적 현상에 대한 설명 지표로서 AE 실효값 신호를 사용하는 데 대한 타당성을 검토하였다.

2. 실험

2.1 슬라이더 형상

본 실험에서 사용된 슬라이더의 형상과 치수를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 슬라이더의 크기는 2.05×1.60 mm 이다. 전방부분(leading edge)에 테이퍼가 있으며, 후방부분(trailing edge)에 깊이 1.60 μm 의 이중 리세스(recess)가 있다. 기본 리세스는 3.90 μm 이다.

2.2 실험장치

실험장치는 회전속도를 정밀하게 제어할 수 있는 스피ن스탠드(spindle stand), 서스펜션을 장착하고 AE 센서를 부착할 수 있도록 제작한 서스펜션 홀더, AE 센서를 중심으로 하는 입력부, 센서에 의해 검출된 미약한 신호를 증폭시키는 증폭부, 그리고 각종 신호처리를 행하는 신호처리부로 구성된다.

Fig. 2와 3은 실험장치와 구조물을 간략하게 보

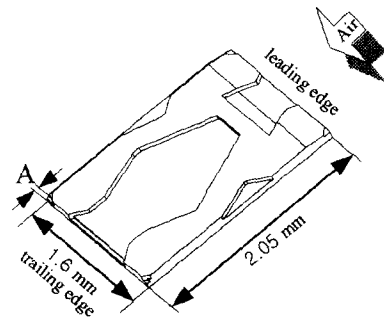


Fig. 1 Schematic of subambient pressure slider

Table 1 Dimensions of slider

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

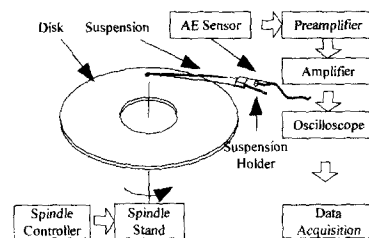


Fig. 2 Schematic of the experimental set-up

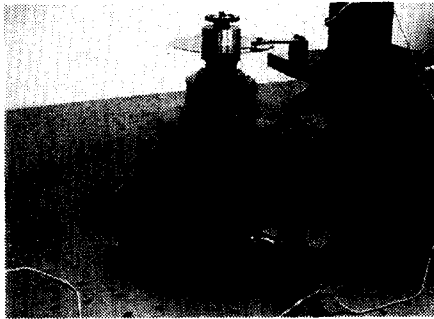


Fig. 3 Spin stand and suspension holder

여주고 있다. 스피ن스탠드의 주축모터(spindle motor) 제어기는 랩뷰(Labview) 프로그램을 이용하여 구동된다. AE 신호는 디지털 오실로스코프와 데이터 수집보드를 통과한 후 랩뷰 프로그램을 이용해 수집된다. AE 센서는 서스펜션 홀더 부분에 부착되어 있으므로 디스크 위를 비행하고 있는 슬라이더의 움직임을 변화시키지 않는다.

AE 센서는 재료 내부에서 전달되어 오는 고주파 진동을 전기적 신호로 변환시키는 변환자로 압전소자를 사용한다. 센서는 주파수 특성에 따라 공진형(resonant type)과, 광대역형(wide band type)으로 나뉘어 진다. 본 실험에서는 넓은 주파수 범위 내에서 균일한 감도를 나타내는 광대역 센서(PAC PICO)를 사용하였다.

본 실험에서는 AE 신호를 증폭하기 위해 전증폭기(PAC 1220A)와 100~300 kHz 안의 주파수 성분만을 통과시키는 대역필터(band pass filter)가 내장되어 있는 주증폭기(PAC AE1A)를 사용하고 데이터 수집보드로는 NI Lab PC+ 보드를 사용했다.

2.3 실험 절차 및 방법

슬라이더의 정상상태 비행 시 여섯 지점의 디스크 반경위치에 대하여 AE 실효값 신호를 측정했다. 본 실험에서는 슬라이더의 정상상태 비행 시 AE 신호를 측정하므로 디스크 선속도의 저속 구간에서 슬라이더와 디스크의 과도한 접촉이 일어나 슬라이더/디스크 손상을 초래하게 된다. 이 점을 고려하고 또 디스크 표면상태의 영향을 평가하기 위해 실험을 1, 2차로 나누어 실시했다. 2차 실험은 1차 실험보다 저속구간에 중점을 두어 슬라이더/디스크 손상이 날 때까지 실험하였다.

1차 실험은 600~7800 rpm의 주축 회전속도 범위 내에서 300 rpm 간격으로 행해졌다. 측정이 실시된 여섯 지점의 디스크 반경위치는 각각 28.9, 31.4, 33.9, 36.4, 38.9, 41.4 mm이다. 각 실험에서 초당 1000개의 샘플링 비율로 3000개의 AE 실효값 데

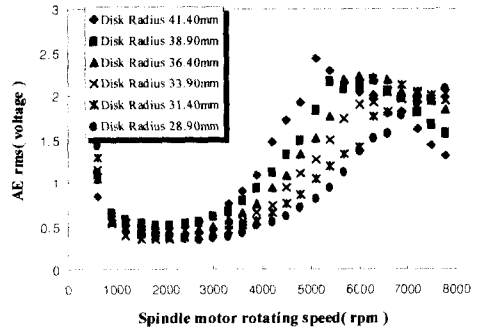


Fig. 4 AE rms signal vs. spindle motor speed

이터를 획득하였다. 초당 2000개 또는 그 이상의 샘플링 비율로 수집된 데이터와 오실로스코프를 통한 몇 번의 비교 반복 실험이 실행되었으며, 샘플링 비율이 1000개 일 때의 결과가 그 이상일 때와 별다른 차이를 보이지 않았기 때문에 1000개의 샘플링 비율을 선택했다. AE 신호는 증폭부에서 101 dB의 이득으로 증폭된다.

2차 실험은 1차 실험과 동일한 300 rpm 간격으로 주축 회전속도 240~7800 rpm 사이에서 실행되었다.

1, 2차 실험결과를 바탕으로 선속도 구간별 AE 실효값 신호의 발생원인을 분석하였다. 고속구간에서 측정된 AE 실효값 특성의 분석을 위해 1, 2차 실험을 행한 후 주축 베어링에 관한 실험을 실시했다. 주축 볼베어링으로부터 발생하는 AE 신호의 전달경로에 대한 실험을 실행함으로써 슬라이더/디스크 사이의 상호작용에 의해 발생하는 AE 신호에 대한 주축 볼베어링의 영향을 파악할 수 있었다.

3. 실험결과 및 토의

주축 회전속도에 대한 AE 신호를 서로 다른 디스크 반경에 대해 측정하여 슬라이더의 부상상태를 규명하고자 하였다. 그리고 AE 신호의 발생원인을 밝히고 각 구간별로 AE 신호의 특성을 분석하였다.

3.1 주축 회전속도와 AE 신호

Fig. 4는 여섯 지점의 디스크 반경위치에서 측정된 AE 실효값 신호를 주축 회전속도에 대해서 표시한 것이다. AE 실효값 신호는 1차 실험을 통해 슬라이더의 정상 비행상태에서 측정되었다. Fig. 4는 여섯 지점의 반경위치에 대하여 모든 AE 실효값 신호가 500 rpm 근처에서 급격히 감소하는 것을 보여주고 있다. 500~3000 rpm 에서 AE 실효값

신호는 낮게 형성되고 있으며, 점차 증가하여 최대값을 나타낸 후 다시 감소하고 있다. 디스크 반경위치가 외경에서 내경으로 이동함에 따라 AE 실효값 신호의 최대값이 좌측에서 우측으로 이동하는 형태를 보여주고 있으며, 반경위치마다 서로 다른 주축 회전속도에서 최대 AE 실효값이 발생하고 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 주축 회전속도에 대한 AE 실효값 신호를 디스크 선속도에 대하여 도시한 것이다. Fig. 5에서는 Fig. 4와 달리 각기 다른 디스크 반경위치에 대한 AE 실효값 신호가 거의 일치하여 같은 형태로 나타나고 있다. 이는 AE 신호의 실효값을 주축 회전속도에 대해 도시하였을 때 명확하게 드러났던 Fig. 4의 AE 신호의 최대실효값 이동현상이 단순히 디스크 반경위치에 따른 트랙(track) 특성 때문이 아니라, 디스크 반경위치의 차이로 인해 발생하는 선속도 변화와 밀접한 연관성이 있음을 나타낸다.

일반적으로 주축모터의 회전속도가 증가함에 따라 슬라이더의 부상높이가 증가하게 되며, 부상높이의 증가로 인해 AE 신호는 감소하는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 실험에서는 디스크 선속도가 증가함에 따라 AE 실효값 신호가 증가한 후 감소하는 것으로 나타났다.

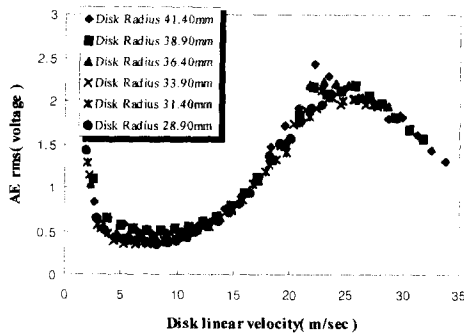


Fig. 5 AE rms signal vs. disk linear velocity

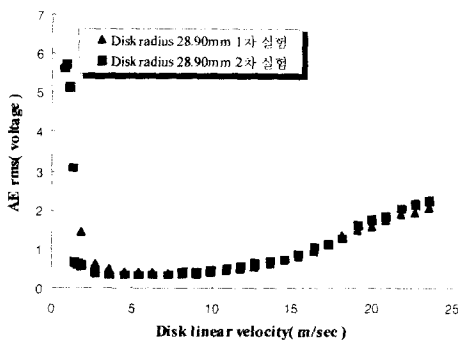


Fig. 6 AE rms signal vs. disk linear velocity

3.2 디스크 표면상태와 슬라이더 이륙속도

슬라이더 이륙속도(take-off velocity)의 정의는 AE 실효값 신호가 잡음상태와 비슷한 최저상태에 이르렀을 때라고 한다면, 지금까지의 실험을 통하여 디스크 선속도 2.90 m/sec 근처에서 슬라이더의 이륙속도가 발생하는 것을 알 수 있다. 3.1절의 실험을 수행하는 동안 수십만 번의 회전을 거쳐 정상적인 표면상태에 도달한 디스크를 이용하여 표면상태의 영향을 알아보는 실험을 하였다.

Fig. 6의 1차 실험은 3.1절에서의 실험방법과 동일하게 실시된 결과이다. 이 결과는 Fig. 4의 디스크 반경 28.9 mm에서의 AE 실효값 신호와 비교할 때 큰 차이를 나타내지 않는다. 그 이유는 600~7800 rpm의 속도 범위 내에서는 안정된 정상상태 비행에 충분한 부상높이를 갖기 때문에 수십만 번의 디스크 회전에도 불구하고 표면상태가 거의 변화하지 않아 계속 일정한 수준의 AE 실효값 신호가 발생되기 때문으로 판단된다.

2차 실험은 240~7800 rpm의 주축 회전속도 범위에서 수행되었으며, 선속도 1.82 m/sec 부근에서 1차 실험보다 낮은 AE 실효값 신호를 나타내고 있다. 그 이유는 저속구간에서 슬라이더 비행에 충분한 공기베어링이 작용하지 못한 결과 슬라이더/디스크 사이에서 간헐적인 접촉이 발생하기 때문이다. 슬라이더/디스크의 간헐적인 접촉은 디스크 표면에 존재하는 미세한 돌출부(asperity)를 제거하는 버니싱(burnishing) 효과를 발생시켰으며, 접촉에 의한 버니싱 효과는 슬라이더 이륙속도를 낮추는 결과를 낳게 되었다. 이륙속도의 차이는 슬라이더/디스크의 트라이볼로지 성능에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 이륙속도의 저속화는 슬라이더의 접촉거리를 단축시킴으로써 직접적인 슬라이더/디스크의 상호 간섭을 감소시켜준다.⁽⁵⁾

3.3 고속영역의 부상상태 분석

3.1절을 통하여 디스크 선속도의 고속구간에서 AE 실효값 신호가 증가하다가 다시 감소하는 것을 볼 수 있었다. 일반적으로는 선속도가 증가하면 부상높이가 증가하고 그에 따라 AE 실효값은 감소하는 것으로 알려져 있다. 실제로 여러 슬라이더/디스크 조합에 대해 동일한 조건에서 같은 실험을 실시해 본 결과 경우에 따라 AE 실효값이 단조감소하기도 했고 증가하다가 감소하기도 했다. 이와 같은 결과를 규명하기 위해 특히 AE 신호의 증가가 슬라이더/디스크의 접촉에 의한 것인지를 판명하기 위해 AE 원신호(raw signal) 측정, AE 원신호의 주파수 분석, AE 실효값의 분산해석 등을 수행하였다.

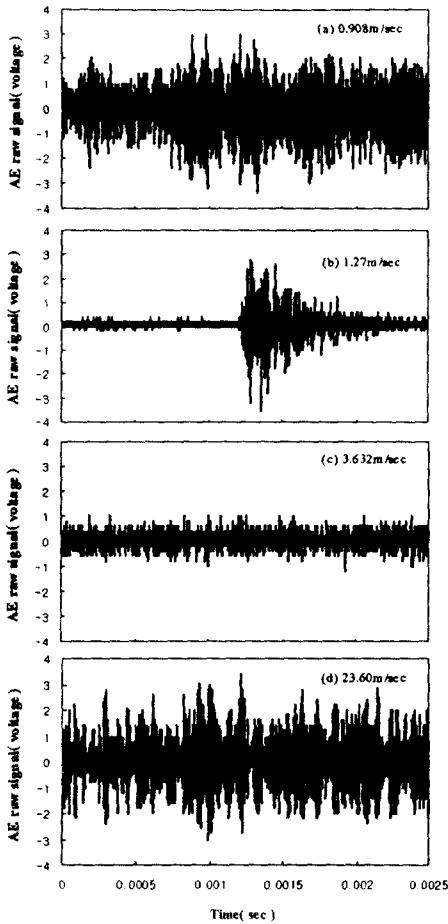


Fig. 7 AE raw signal for various disk linear velocities

3.3.1 AE 원신호

Fig. 7은 증폭기의 내장필터가 100~300 kHz 인 점을 고려하여 1 μ s 간격으로 AE 원신호를 측정 한 것이다. Fig. 7(a), (b)는 증폭기의 이득값을 각각 40 dB, 20 dB 씩 낮게 한 결과이다. Fig. 7(a)는 슬라이더/디스크의 연속적인 접촉으로 인해 중첩된 AE 신호를 보여주고 있다. Fig. 7(b)의 전형적인 AE 파워 열신호(burst signal)는 선속도 1.27 m/sec 에서 간헐적인 접촉이 발생하고 있음을 나타낸다. 슬라이더 부상 직전의 과도기적 속도구간에서는 부상에 충분한 공기베어링이 작용하지 않기 때문이다. Fig. 7(c)의 낮고 일정한 잡음수준의 신호는 안정된 정상상태의 슬라이더 부상을 나타낸다. Fig. 7(d)에서도 Fig. 7(a)와 같이 중첩된 형태의 AE 신호를 나타내고 있으나 이러한 신호의 중첩이 슬라이더/디스크의 접촉에 의한 것인지 아니면 다른 원인에 의한 것인지는 아직 불분명하다.

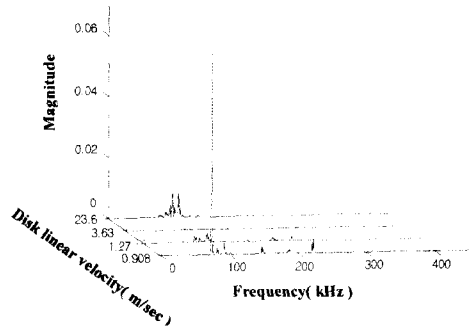


Fig. 8 Power spectrum of AE raw signal for various disk linear velocities

3.3.2 AE 원신호의 주파수 분석

Fig. 8의 그래프는 Fig. 7의 AE 원신호에 대한 파워 스펙트럼(power spectrum)이다. 디스크 선속도 0.908 m/sec 의 경우를 보면 특정 주파수(78, 89, 98, 157, 194, 225 kHz)에서만 신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. 선속도 1.27 m/sec 의 파워 스펙트럼에서도 크기는 작지만 선속도 0.908 m/sec 에서와 거의 일치하는 주파수에서 신호가 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 두 그래프에서 거의 비슷한 주파수의 신호가 발생하는 이유는 두 경우에 대해 AE 발생 메커니즘이 동일하기 때문이다. 선속도 0.908 m/sec 에서는 슬라이더의 연속적인 접촉이 발생하며, 선속도 1.27 m/sec 에서는 간헐적인 접촉이 발생함으로써, 슬라이더와 디스크의 접촉이라는 공통된 물리적 현상에 영향을 받고 있다.

AE 실효값 신호가 가장 낮게 발생되는 디스크 선속도 3.63 m/sec 구역에서 계산된 파워 스펙트럼은 그래프와 같이 매우 작아 거의 보이지 않는다. 속도를 증가시키기에 따라 디스크 선속도 23.6 m/sec 의 주파수 성분은 100 kHz 주위에 집중된 형태로 다시 증가함을 볼 수 있다.

선속도 23.6 m/sec 의 100 kHz 에 집중된 주파수 성분(92, 101 kHz)은 슬라이더/디스크의 접촉으로 발생된 선속도 0.908 과 1.27 m/sec 에 대한 결과와는 다르다. 특히 고체접촉에 기인하는 150 kHz 이상의 신호가 나타나지 않는다. 이러한 결과로부터 디스크 선속도의 고속영역에서의 AE 실효값 신호의 증가는 슬라이더/디스크의 접촉이 아닌 다른 원인에 의한 것임을 알 수 있다.

3.3.3 AE 실효값 신호의 분산

본 실험은 디스크 반경 28.9 mm, 주축 회전속도 60~7800 rpm 에서 행해졌으며, Fig. 9(a)를 보면 AE 실효값 신호의 최대값이 아주 낮은 저속구간에서

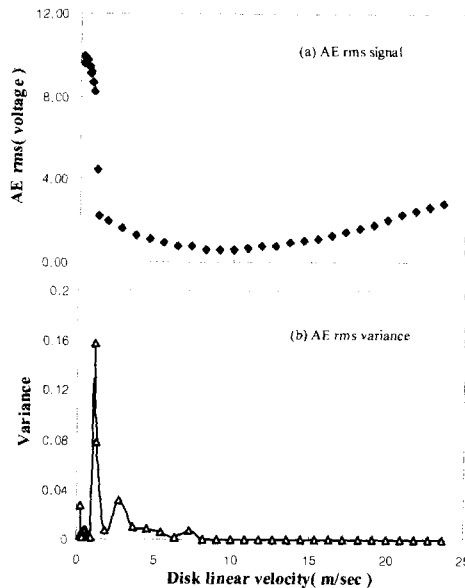


Fig. 9 Relationship between AE rms and AE variance at disk radius 28.9 mm

발생됨을 알 수 있다. 그러나 60~300 rpm(선속도 0.182~0.908 m/sec)의 저속구간에서는 AE 실효값 신호의 크기는 크지만 균일하게 나타남을 Fig. 9(b)의 낮은 분산값을 통해 알 수 있다. AE 원신호의 결과와 마찬가지로 이 저속구간에서는 슬라이더와 디스크의 연속적인 접촉이 일어남을 알 수 있다.

최대 AE 실효값 신호로부터 슬라이더 이륙속도까지의 속도구간에서는 AE 실효값 신호가 가파르게 감소하므로 짧은 속도구간에서 빠르게 부상이 이루어짐을 알 수 있다. 간헐적인 접촉은 Fig. 7(b)와 같은 불규칙적인 파열신호를 발생시키기 때문에 Fig. 9(b)에서와 같이 AE 실효값 신호의 분산값이 이 구간에서 매우 크게 나타나게 된다.

이륙속도 이후의 속도구간에서는 슬라이더의 안정된 비행으로 AE 실효값 신호 및 그 분산값 모두 낮은 수치를 나타내고 있다. 디스크 선속도 10 m/sec 이상에서는 AE 실효값 신호가 증가하고 있는데 이 속도구간에서도 분산값은 낮게 나타나고 있다. 따라서, 이 속도구간에서는 슬라이더/디스크의 접촉과 같은 불안정한 슬라이더 운동이 일어나지 않고 다른 안정적인 이유로 AE 실효값이 증가한다고 볼 수 있다. 현재 예측할 수 있는 이유는 주축 볼베어링에서 발생하는 AE의 전파 또는 정상부상상태의 공기베어링에서 슬라이더에 가해지는 충격력 등을 들 수 있다. 우선 실험에 의해 규명할 수 있는 주축 볼베어링의 영향에 대해 다음 절에서 다룬다.

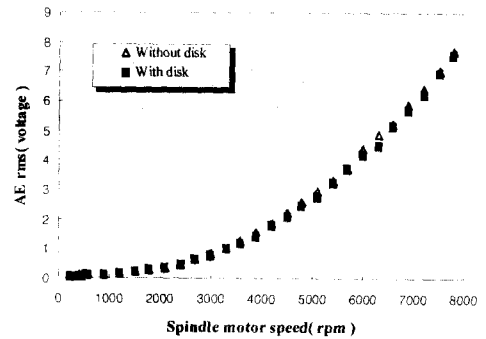


Fig. 10 AE rms signal from spindle ball bearing

3.4 주축 볼베어링의 영향

주축 회전속도와 AE 신호의 관계를 통해 주축 모터의 고속회전 시 AE 실효값 신호가 증가함을 볼 수 있었다. 그러나 3.3절에서 고속영역의 부상 상태 분석을 통해 저속구간에서는 연속적인 또는 간헐적인 접촉이 발생하는 반면 고속구간에서는 슬라이더/디스크 접촉이 일어나지 않는다는 것을 알 수 있었다. 본 실험은 주축 볼베어링이 서스펜션 홀더에서 측정되는 AE 신호에 미치는 영향을 파악하기 위해 실행되었다.

Fig. 10은 주축 볼베어링에서 발생하는 AE 실효값 신호를 나타내고 있으며 각 그래프는 주축에 헤드/디스크 어셈블리가 설치되어 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 측정된 것이다. 주축 볼베어링에서 발생하는 AE 실효값 신호의 측정을 위해 AE 센서는 주축에 가장 가까운 위치에 부착되었다. 주축 볼베어링에서 발생하는 AE 실효값 신호가 크기 때문에 주증폭기의 이득값을 12 dB 만큼 낮추었다. 주축 볼베어링에서 발생하는 AE 실효값 신호는 Fig. 10에서 보는 것처럼 회전속도 구간간에 걸쳐 2차 곡선의 형태로 증가하고 있다.

이와 같이 주축에서 발생된 AE 신호가 앞 절의 실험에서 관측된 고속영역에서의 AE 실효값 증가의 원인인지를 판명하기 위해 주축 AE 신호의 전파 예상경로를 두 가지로 설정하여 전달 여부를 파악하였다.

두 가지 예상경로는 다음과 같으며, Fig. 11에 도시되었다.

1 차 경로: 주축 볼베어링 → 디스크 → 공기베어링 → 슬라이더 → AE 센서

2 차 경로: 주축 볼베어링 → 바닥 → 삼축 스테이지 → AE 센서

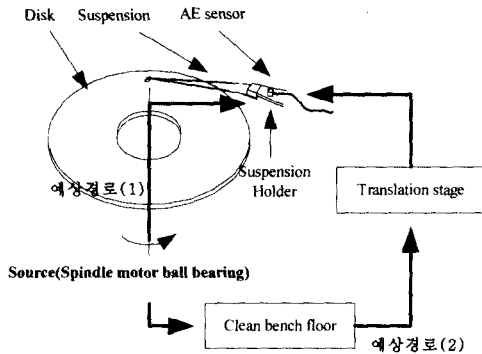


Fig. 11 Propagation paths of AE signal from the spindle ball bearing to the sensor

3.4.1 1차 예상경로 분석

1차 예상경로를 통한 전파를 판명하기 위해 서스펜션/디스크 접촉실험을 실시했다. 본 실험은 주축 볼베어링에서 발생한 AE 신호가 저속과 고속의 디스크 선속도에서 슬라이더/디스크 사이의 공기베어링을 통해 전파될 수 있는지를 확인하기 위한 것이다. 공기베어링 간격이 없는 상태에서 AE 신호가 어떻게 전파되는지를 알아보기 위해 슬라이더를 제거하여 서스펜션과 디스크 사이를 점접촉 상태로 만든 후 AE 측정을 실시했다.

Fig. 12는 디스크와 서스펜션 사이의 점접촉에 대한 AE 실효값 신호를 나타내고 있으며, 앞 절에서의 실험과는 다른 형태를 보여주고 있다. 선속도 0.73~3.63 m/sec 구간에서 AE 실효값 신호는 급격한 증가를 보이고 있다. 3.63~18.15 m/sec의 구간에서는 완만히 증가하는 AE 실효값을 나타내고 있으며, 이후 고속구간에서 다소 감소하고 있다. 고속구간의 AE 실효값 신호의 감소는 고속회전으로 인해 서스펜션이 약간 부상하기 때문인 것으로 판단된다.

서스펜션/디스크의 순수접촉 결과를 볼 때 3.1 절에서 나타난 고속영역에서의 AE 실효값 증가는 주축 볼베어링에서 발생한 AE 신호의 전파에 기인한 것이 아니라는 것을 알 수 있다. 또 Fig. 10에서 주축 볼베어링으로부터 발생하는 AE 실효값은 2차 곡선 형태로 증가하는데 반해 Fig. 12의 AE 실효값 신호는 전혀 다른 형태의 증감을 보여주고 있으므로 1차 예상경로로는 AE 신호가 전파되지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.4.2 2차 예상경로 분석

Fig. 13은 예상경로 2의 각 지점에서 AE 실효값 신호를 측정된 데이터를 보여주고 있다. 예상경로

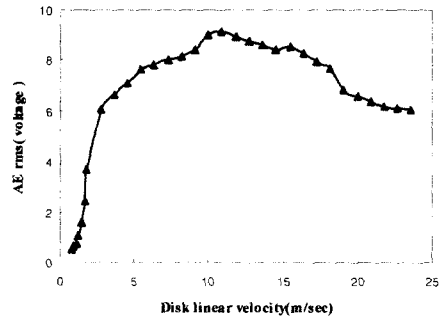


Fig. 12 Point contact between the suspension and the disk

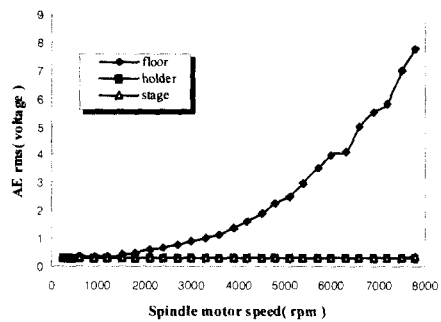


Fig. 13 AE rms signal at several places

2는 클린 벤치(clean bench) 바닥, 삼축 스테이지 그리고 서스펜션 홀더로 구성된다. 예상경로 2의 분석을 위해서는 슬라이더/디스크 인터페이스의 영향을 근본적으로 제거해야 하므로 서스펜션을 떼어내고 실험했다.

클린 벤치의 바닥에서 측정된 AE 신호는 Fig. 10의 형상과 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 삼축 스테이지와 서스펜션 홀더 부분에서는 거의 잡음 수준에 가까운 낮은 데이터 수치를 보여주고 있다. 위의 결과를 통해 알 수 있듯이, 주축 볼베어링에서 발생한 AE 신호는 바닥까지는 전파되지만, 삼축 스테이지를 통과하는 과정에서 거의 소멸된다. 결과적으로 주축 볼베어링에서 발생한 AE 신호는 2차 예상경로로도 전파될 수 없음을 알 수 있다.

1, 2차 예상경로 분석 결과, 주축 볼베어링에서 발생한 AE는 서스펜션 홀더에 부착된 AE 센서까지 어느 경로로도 전달되지 않음을 알 수 있었다. 따라서 앞 절에서의 실험에서 관측된 고속구간의 AE 실효값 증가는 주축 볼베어링의 영향에 의한 것이 아니라 다른 원인에 의한 것이라는 결론을 내릴 수 있다.

실험결과를 종합해 보면 고속구간에서의 AE 실효값 증가 원인으로 생각해 볼 수 있는 것은 공기베어링 자체에서 발생하는 충격력이 슬라이더를

가진하는 현상이다. 이 가능성은 어떤 슬라이더/디스크 조합에서는 고속구간의 AE 실효값 증가가 발생하지 않았던 것에 착안해서 제기되었다. 디스크 마다 표면상태가 다르고 특히 클램핑 상태도 다르기 때문에 어떤 경우에는 디스크의 굴곡이 상대적으로 클 수도 있는데 이 경우에 디스크의 굴곡이 공기베어링에 미치는 영향은 고속으로 갈수록 커지게 된다. 공기베어링의 합력을 측정할 방법이 없어 이 현상을 실험적으로는 규명하기가 어렵기 때문에 수치계산을 통해 그 영향을 평가했으며 다음 절에서 그 결과에 대해 기술한다.

3.5 공기베어링의 영향

고속영역에서의 AE 실효값 신호의 증가를 설명할 수 있는 또 하나의 가능성은 공기베어링을 통해 슬라이더에 가해지는 충격력이다. 이 가능성은 고속영역에서 AE 실효값이 증가하다가 다시 감소하는 실험결과로부터 제기되었다. 디스크 굴곡의 영향은 디스크 선속도에 비례해서 증가되지만 슬라이더의 부상높이는 디스크 선속도에 비례해서 계속 높아지므로 일정 선속도 이상에서는 디스크 굴곡의 영향이 부상높이 상승에 의해 상쇄되어 오히려 작아지게 된다고 예측할 수 있다.

위와 같은 추론을 입증하기 위해 기존의 슬라이더 공기베어링 해석기⁽¹²⁾를 이용하여 디스크의 운동을 나타낼 수 있는 여러 조건에 대한 슬라이더의 거동을 수치계산했다. 여기서의 계산은 주어진 디스크 윤곽을 따라가며 공기베어링 계산을 하는 동적 시뮬레이션을 기반으로 한다.

디스크 표면의 굴곡, 디스크의 진동, 주축의 진동 등은 모두 슬라이더 공기베어링에 영향을 줄 수 있는 인자들이다. 디스크 표면 굴곡은 디스크 제작 시에 생긴 것과 디스크를 클램핑시킬 때 생긴 것으로 구성되는데 각 디스크마다 그 형상과 크기가 다르다. 디스크의 진동은 회전속도가 높아짐에 따라 그 진폭이 선형적으로 증가하고 특히 위험속도 이상에서는 플러터 효과에 따라 비선형적으로 급격히 증가한다. 특히 주축 회전속도와 디스크의 고유진동수가 일치하면 공진 현상에 의해 큰 진폭의 운동이 발생하게 된다. 이 디스크 진동은 주로 주축 볼베어링의 볼과 내, 외륜에 의해 가진된다. 위와 같은 인자들을 각각 자세히 분석하는 것은 본 연구의 범위를 벗어나므로 수치해석에서는 디스크 표면의 굴곡을 사인함수로 단순화시켜 표현함으로써 이와 같은 인자들의 영향을 조사했다.

여러 종류의 디스크 굴곡에 대한 슬라이더의

부상높이와 슬라이더 공기베어링 합력(resultant)의 변동 등을 계산함으로써 디스크 선속도가 슬라이더에 미치는 영향을 구했다. 슬라이더의 운동을 가진시켜 AE 신호를 발생시키는 현상을 설명하기 위해서는 공기베어링의 합력의 크기보다는 이 공기베어링 합력의 변동량이 중요하다.

디스크 굴곡의 진폭은 40 nm에서 200 nm까지 변화시켰고 선속도의 종방향에 대한 굴곡의 파장은 1 mm에서 18 mm까지 변화시켰다. 선속도의 횡방향에 대한 굴곡의 파장은 2 mm로 고정시키고 시뮬레이션을 수행했다. 이 수치들은 현재 보유중인 시뮬레이터가 정상상태의 공기베어링을 해석하기 위한 것이므로 안정적인 결과를 낼 수 있는 값을 중심으로 선정했다. 예를 들어 아주 급격한 디스크 굴곡의 변화는 수치해석 상으로 슬라이더와 디스크 사이의 접촉을 야기시켜 시뮬레이션을 불가능하게 한다.

공기베어링의 영향에 대한 수치해석 결과를 Fig. 14를 통해 종합적으로 설명할 수 있다. 모든 경우에 대해 공기베어링 합력의 변동진폭이 증가하다가 감소하는 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 고속영역에서 AE 실효값 신호가 증가하다가 다시 감소하는 결과를 보여준 실험결과와 잘 대응된다고 볼 수 있다.

공기베어링 합력의 변동진폭의 크기는 디스크 굴곡의 진폭과 파장에 의해 결정되고 변동진폭의 최대값이 나타나는 선속도는 디스크 굴곡의 파장에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. Fig. 14를 보면 디스크 굴곡의 진폭이 커짐에 따라 그리고 파장이 짧아짐에 따라 공기베어링 합력의 변동진폭이 커진다. 또 디스크 굴곡의 파장이 짧아질수록 최대 변동진폭에 대응하는 선속도가 낮아진다.

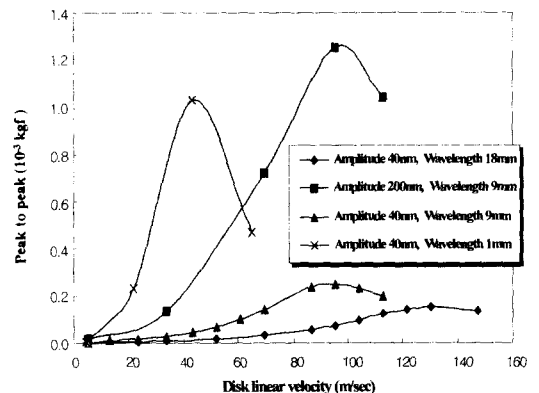


Fig. 14 Fluctuation of air bearing force for various disk waviness conditions

4. 결론

본 연구에서는 AE 측정법을 이용하여 슬라이더 공기베어링의 부상상태를 알고자 하였으며, 다양한 디스크 선속도 구간에서 AE 실효값 신호 또는 AE 원신호를 측정하였다. 실험을 통해 고속구간의 AE 실효값 증가의 원인이 슬라이더/디스크 접촉과 주축 불베어링이 영향이 아님을 알 수 있었다. 본 연구에서의 실험결과를 종합적으로 분석하여 그 원인으로 고속에서 발생하는 공기베어링 충격력을 제안할 수 있었으며 수치계산을 통해 그 영향을 확인했다. 본 연구에서는 실험과 수치해석 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 결론을 내리게 되었다.

- (1) 고속구간에서의 AE 실효값 신호의 증가는 슬라이더/디스크의 접촉에 기인한 것이 아니고 디스크의 진동에 따라 발생하는 공기베어링의 영향 때문이다.
- (2) 주축 불베어링에서 발생하는 AE 신호는 서스펜션 홀더에 부착되어있는 AE 센서까지 전파되지 못하기 때문에 고속구간의 AE 실효값 증가에 영향을 미치지 않는다.
- (3) 공기베어링 합력의 변동진폭의 크기는 디스크 굴곡의 진폭 및 파장에 의해 결정되고 최대 변동진폭에 대응하는 디스크 선속도는 디스크 굴곡의 파장에 의해 결정된다.

후 기

이 논문은 1999 학년도 건국대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

참고문헌

(1) Liew, T. Y. F., Chai, M. C., Weerasooriya, S., and Low, T. S., 1997, "Head-Disk Interaction of Proximity Sliders Studied by the Acoustic Emission Probe, the Dynamic Flying Height Testers, and the Laser Doppler Vibrometer," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 3175~3177.

(2) Liu, Y., Jiaa, C. L., and Eltoukhy, A., 1997, "Acoustic Emission Study of Lubricant Effect on Proximity Contact Recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 3160~3162.

(3) Jeong, T. G. and Bogy, D. B., 1989, "Natural Frequencies of Sliders and Transducers Used to Detect Slider-Disk contacts," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, No. 5, pp. 3725~3727.

(4) Kishigami, J., Ohkubo, T., and Koshimoto, Y., 1990, "An Experimental Investigation of Contact Characteristics Between a Slider and Medium Using the Electrical Resistance Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, No. 5, pp. 2205~2207.

(5) Kita, T., Kogure, K., Mitsuya, Y., and Nakanishi, T., 1980, "New Method of Detecting Contact Between Floating-Head and Disk," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 16, No. 5, pp. 873~875.

(6) Benson, R. C., Sundaram, R., and Talke, F. E., 1988, "A Study of Acoustic Emission from the Slider/Disk Interface in a 5 1/4 Inch Hard Drive," *Tribology and Mechanics of Magnetics Storage System, ASLE special publication*, Vol. 5, pp. 87~93.

(7) McMillan, T. C., Swin, R. C., and Talke, F. E., 1995, "Investigation of Slider Take-Off Velocity Using the Acoustic Emission Frequency Spectrum," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 31, pp. 2973~2975.

(8) Suk, M., Bhushan, B., and Bogy, D. B., 1990, "Role of Disk Surface Roughness on Slider Flying Height and Air-Bearing Frequency," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, pp. 2493~2495.

(9) 이상민, 김대은, 2000, "레이저 범프와 대기압 변화에 대한 하드디스크 슬라이더의 부상 특성," *대한기계학회논문집(A)*, 제 24 권, 제 10 호, pp. 2646~2653.

(10) Khurshudov, A. G. and Talke, F. E., 1998, "A Study of Subambient Pressure Tri-Pad Sliders Using Acoustic Emission," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 120, pp. 54~59.

(11) Khurshudov, A. G. and Talke, F. E., 1997, "Investigation of Proximity Recording Sliders Using Acoustic Emission," *Proceedings of the International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment*, pp. 439~442.

(12) 김정주, 박노열, 강태식, 정태건, 2001, "공기베어링 효과를 고려한 HDD 서스펜션 시스템의 트래킹 특성 동특성," *대한기계학회논문집(A)*, 제 25 권, 제 2 호, pp. 198~205.