

Load/Unload 시 AE 와 전기저항을 이용한 슬라이더-디스크 충돌측정에 관한 연구

Measurement of the Slider-Disk Contact during Load/Unload process with AE and Electrical Resistance

김석환[†], 이용현¹, 임수철³, 박경수⁴, 박노철², 박영필¹

Seokhwan Kim, Yonghyun Lee, Soo-Cheol Lim, Kyoung-Su Park,
No-Cheol Park and Young-Pil Park

Abstract

In this paper, the measured electrical resistance method is proposed to analyze the ramp-tab contact during the load/unload (L/UL) process. Since this method supplies the voltage change due to the resistance change, we can easily and conveniently identify the ramp-tab contact from the acoustic emission (AE) signal. At first, we carefully deposit the conductive material on the surface of the conventional ramp by sputtering method. The ratio frequency (RF) magnetron co-sputtering system is applied to accomplish the deposited double-layers on the ramp surface. One layer is the stainless steel for the conductive layer and the other is the titanium layer for the cohesive function between the ramp surface and the stainless steel layer. In order to guarantee the stiffness and damping properties of the original ramp, the deposited conductive layer is intended to have very thin thickness. After integration the proposed ramp device into the L/UL system and networking the electrical resistance circuit, the L/UL performance is experimentally evaluated by comparing the measured electrical resistance signal and AE signal.

Key Words : Load/Unload, Slider-disk contact, AE and electrical resistance measurement

1. 서 론

하드디스크 드라이브는 디스크 회전시 디스크의 가장자리에서 슬라이더가 언로드하는 로드/언로드 기술을 적용한다. 로드/언로드 기술은 많은 장점으로 인해 대부분의 하드디스크에서 사용되지만, 로드/언로드시 하드디스크 드라이브의 성능을 저하시킬 수 있는 슬라이더와 디스크간의 충돌현상이 일어날 수 있다. 따라서, 슬라이더-디스크 충돌은 로드/언로드시 하드디스크 드라이브의 신뢰

도를 결정하는데 중요한 요인으로 슬라이더-디스크 충돌을 정확하게 분석하여 이 충돌을 방지하기 위해서는 슬라이더-디스크의 충돌 신호를 정확하게 측정할 수 있어야 한다. 지난 수년간 AE 신호를 이용한 측정방법이 슬라이더-디스크 충돌을 분석하는데 사용되었다[1,3-6]. 그러나 AE 신호를 이용한 측정방법은 슬라이더-디스크 충돌이외의 신호도 측정한다. 특히, 램프와 서스펜션 탭과의 충돌신호가 슬라이더-디스크 충돌신호와 합쳐져 나타나게 된다. 이와 같은 현상으로 인해 측정된 AE 신호로부터는 슬라이더-디스크만의 충돌신호를 구분하기가 어렵다. 따라서, 로드/언로드시 측정된 AE 신호로부터 슬라이더-디스크 충돌을 알 수 있는 효과적인 방법이 필요하다.

슬라이더-디스크 충돌을 분석에서 전기저항을 이용한 방법은 매우 효과적이다.[1-3], Jeong 와 Bogy[1]는 전기저항측정 방법을 적용하여 LDV 와 AE 신호를 이용한 측정방법과 비교하였다. Lim et

† 연세대학교 기계공학과
E-mail : rlwjs98@naver.com
TEL : (02)2123-4677

1. 연세대학교 기계공학과 대학원
2. 연세대학교 정보저장기연구센터
3. 삼성전기 OS 사업부
4. 삼성전자 스토리지 사업부

al[2]은 SMA 구동기와 자기-로드/언로드 시스템을 제안하고, 전기저항회로를 이용하여 슬라이더-디스크 충돌 신호를 분석하였다. 본 논문에서는 로드/언로드시 발생하는 충돌신호 중 슬라이더-디스크의 충돌신호를 구분하고, 로딩/언로딩 지점을 정확하게 확인하기 위하여 램프에 도전성 물질을 증착한 후 전기저항신호 측정방법을 채택하였다. 먼저 램프와 리프트탭이 접촉하였을 경우 전류가 흐를 수 있도록 램프의 표면에 티타늄과 스테인레스 스틸을 증착시켰다. 증착된 램프를 사용하여 로드/언로드 시스템을 구성하고 전기회로와 연결하여 로드/언로드시 AE 신호와 전기저항 신호를 측정하여 비교할 수 있게 하였다. 또한, 실험결과를 바탕으로 AE 신호의 주파수 분석을 통해 공기베어링 주파수를 구분해내고 슬라이더-디스크 충돌을 검증하였다.

2. 실험방법과 장치

2.1 실험방법론

2 개 이상의 고체표면 사이에서의 기계적인 충돌은 탄성응력파를 발생시키고 AE 신호는 기계적인 충돌의 세기와 비례적으로 측정된다[7,8]. 로드/언로드 과정에서도 슬라이더-디스크 충돌 등의 기계적인 충돌이 발생하기 때문에 AE 신호를 이용한 측정방법은 널리 사용되어 왔다. 그러나 빠른 언로드 속도나 긴급복귀에서와 같이 램프와 서스펜션, 리프트-탭 간의 갑작스런 충돌에서는 램프-탭과 슬라이더-디스크 충돌을 구별하기가 어렵다. 이러한 두 충돌을 효과적으로 판별하기 위해 전기저항측정 방법의 사용이 필요하다. 전기저항측정 방법은 두 개의 전도성 물질사이에서 접촉을 판별하는데 사용되고, 임의충돌 연구에 적용할 수 있다[1-4]. 본 연구에서는 전도성 물질로 증착된 램프와 전기저항회로를 이용하여 로드/언로드시 램프-탭간의 충돌신호를 판별할 수 있게 하였다. Fig. 1은 램프-탭 충돌 측정 시스템의 개념도이다. 서스펜션의 재질은 스테인레스 스틸로 전도성을 가지고 있다. 램프의 표면은 램프에 전도성을 부여하기 위해 도전성 물질을 램프의 표면에 증착한다. 서스펜션 리프트-탭과 도전성 물질로 증착된 램프는 외부 전기회로와 A, B를 통해 연결되고, A, B 사이에 일정한 인가전압이 적용된다. 리프트-탭이 디스크위, 즉 I 번 위치에 있을 경우, A와 B 사이의 전기저항은 무한대이고, 측정된 전압은 인가전압과 같게 된다. II 번 위치의 경우 리프트-탭은 램프의 표면에 위치하여 두 포인트 A, B는 연결되고, 측정 전압은 거의 0에 가깝게 된다.

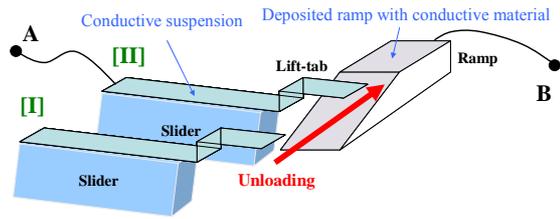


Fig.1 Schematic of the proposed ramp-tab contact measurement system

이런 원리로 리프트-탭과 증착된 램프는 전기저항회로의 스위치가 되어 로드/언로드시 램프-탭간의 충돌을 판별하여 슬라이더-디스크 충돌을 AE 신호로부터 램프-탭 충돌과 구별할 수 있다.

2.2 램프증착

램프에 전도성 물질을 증착시키기 위해서 스퍼터링 방식이 사용되었다. 스퍼터링 현상은 타겟으로부터 추출된 원자단위의 재료가 적절한 기판위에 얇은 막으로 형성되는 현상이다. 스퍼터링 과정은 압력조절이 가능한 진공챔버에서 방전된 상태로 진행된다. 타겟의 침식은 방전상태에서 생성된 반응-비반응 이온에 의한 입자충돌로 발생한다. Fig. 2는 교류 자전관 이원 스퍼터링 시스템의 개략도이다. 교류발생기는 13.56MHz로 작동하고, 자석을 이용하여 스퍼터링 속도를 조절한다. 진공 챔버에는 아르곤 가스가 사용되고 기판 위에 램프를 위치시킨다. 챔버는 폴리옥시메틸렌으로 만들어진 램프의 변형을 막기 위해 상온을 유지한다. 램프위의 증착을 위해 본 실험에서는 2 개의 타겟이 사용되었는데, 우선 99.97%의 티타늄이 200nm, 99.999%의 스테인리스 스틸이 1 μ m로 증착된다. 이는 스테인리스 스틸보다 접착력이 좋은 티타늄을 사용하여 스테인리스 스틸을 램프위에 잘 증착시키기 위해서이다. Fig. 3a와 3b는 원 램프와 증착된 램프를 나타낸 것이다.

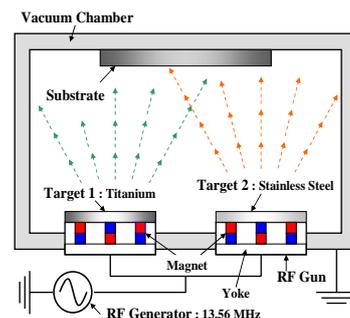


Fig.2 Schematic of RF magnetron co-sputtering system

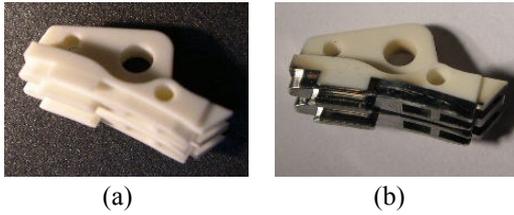


Fig. 3 Photographs of (a) original ramp and (b) deposited ramp

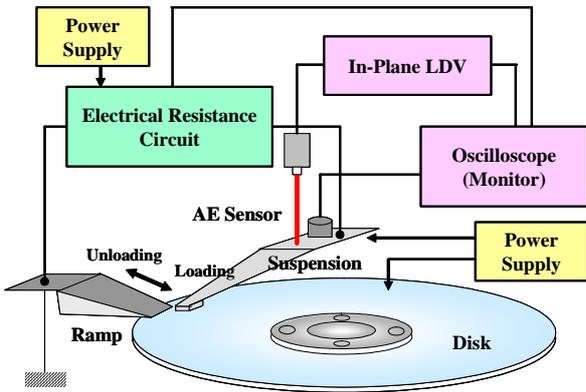


Fig. 4 Experimental setup for the proposed L/UL system

2.3 실험방법

Fig. 4는 하드디스크 드라이브의 로드/언로드 시스템에 램프장치와 전기저항 회로를 구성한 실험장치를 보여준다. 2.5 인치 하드디스크 드라이브는 회전속도가 5400rpm 인 것을 사용하였다. 두 개의 전원공급장치는 하드디스크의 로드/언로드 시스템과 전기저항 회로를 구동하는데 사용하였다. 인플레인 LDV는 슬라이더의 실제 속도를 확인하기 위하여 리프트-탭의 수평방향 속도를 측정하는데 사용되었다. 인플레인 LDV의 분해능은 0.025m/s/V 이고 서스펜션 리프트-탭의 속도는 피벗과 빔의 스팟 사이의 거리와 피벗과 서스펜션 리프트-탭과의 거리의 비를 이용하여 구할 수 있다. Fig. 5와 식(1)을 통해 리프트-탭의 수평속도는 계산된다.

$$\text{리프트-탭 수평속도} = \text{LDV 신호값} * b/a \quad (1)$$

a는 피벗과 빔 스팟과의 거리이고 b는 피벗과 리프트-탭과의 거리이다. AE 센서는 서스펜션 로드 빔에 접촉시킨다. 로드/언로드시 AE 신호와 전기저항 신호, 그리고 인플레인 LDV 신호는 오실로스코프를 통해 동시에 모니터 하였다.

전기저항회로는 실험용 전기 회로판에 구성하였다. 전기저항 회로는 Fig. 6에서 보는 바와 같이

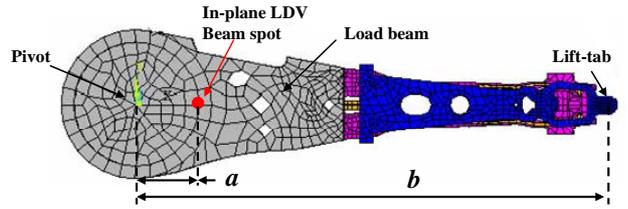


Fig. 5. Method of measuring the lateral velocity of the lift-tab

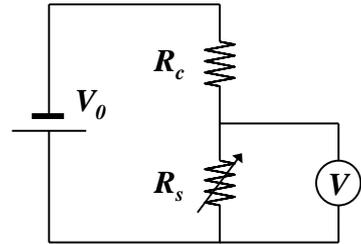


Fig. 6 Electrical resistance circuit

매우 간단하다. V_0 는 DC 전원공급장치에서 제공되는 인가전압으로 1V이다. R_s 는 램프와 리프트-탭 사이의 저항값이고, R_c 는 전기저항회로에서 10 kΩ로 고정된 저항값이다. 측정하는 전압 램프와 리프트-탭사이에서 계산할 수 있는 전압값 V 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V = \frac{R_s}{R_c + R_s} V_0 \quad (2)$$

만약 리프트-탭이 Fig. 1의 위치 I번과 같이 디스크 위에 위치한다면 회로가 열리게 되고, R_s 는 무한대의 값을 가지게 될 것이다. 이 경우에는 식(2)에 따라 V 가 1 volt의 값을 가지게 될 것이다. 그러나 만약 리프트-탭이 Fig. 1의 위치 II와 같이 램프에 접촉한다면 회로는 연결되고 R_s 의 값은 R_c 에 비해 매우 작기 때문에 0Ω 이 될 것이다. 실제 R_s 의 값은 램프의 표면 거칠기와 로드/언로드 속도, 서스펜션 진동 모드 등에 따라 변화하는 값이다. 또한, 슬라이더의 이동속도에 따라서 변동할 수 있다. 따라서, 전압값 V 는 로드/언로드 전체 과정에서 1 volt에서 0 volt 사이를 변동한다.

3. 실험결과 및 토의

실험은 로드/언로드 과정, 긴급복귀 과정의 3가지로 구성되었다. 로드 과정에서의 수평방향 속도는 1IPS(inch per second)로 고정하였다. 언로드시 충돌현상은 로드 과정에서보다 복잡하기 때문에 3, 6, 9, 12IPS의 4가지 수평방향 속도로 언로드 과정을 수행하였다.

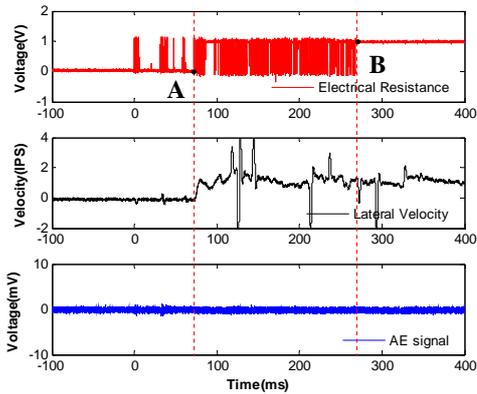
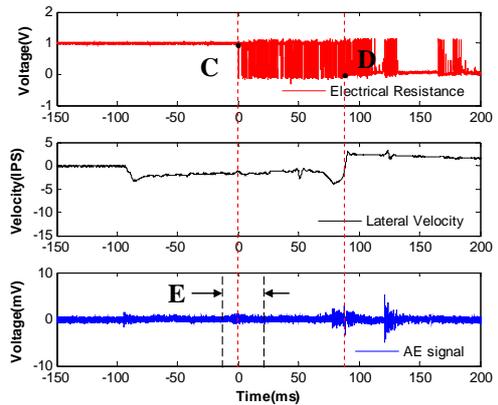
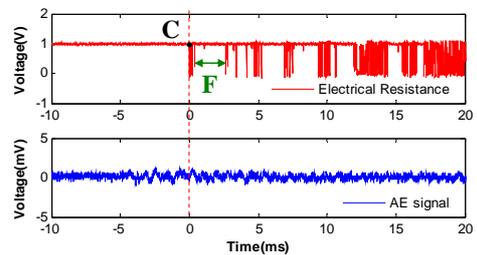


Fig.7 Result of the loading process

간급복귀는 슬라이더가 디스크위에 있으면서 전원 공급이 끊어져 램프로 회귀하는 과정이므로 수평 방향 속도를 제어하기 힘들다[11]. 각각의 실험 결과는 Fig. 7~12 에서 보이는 바와 같이 전기저항 신호, 수평방향 속도 그리고 AE 신호의 결과값이다. Fig. 7 은 로드 과정의 결과를 보여주고 있다. 로드 과정은 A 지점에서 시작하여 B 지점에서 끝난다. 리프트-탭이 램프 위에 머물러 있는 경우에는 전기저항회로가 닫혀있으므로 전기저항신호는 0 이다. 로드 과정이 끝나게 되면 리프트-탭과 램프는 분리되고 회로가 개방되어 전기저항신호는 1volt 가 된다. 이에 비해서 A 에서 B 사이의 영역에서 로드 과정 중에는 전기저항신호가 0 에서 1volt 로 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 리프트-탭이 반복적으로 증착된 램프 표면과 충돌하기 때문이다. 이것은 증착된 램프의 표면의 거칠기와 서스펜션과 리프트-탭의 고유진동모드 등에 의해 유발된다고 예상할 수 있다. 이 속도는 매우 느리고 AE 신호에서도 충돌신호를 찾을 수 없으므로 리프트-탭과 램프 사이의 충돌과 슬라이더-디스크 충돌은 발생하지 않는다고 할 수 있다. Fig. 8a 는 3IPS 의 속도로 언로드한 결과를 보여준다. 이 언로드 과정은 C 지점에서 시작 하여 D 지점에서 끝난다. 리프트-탭이 디스크 위에 머물러 있는 경우에 전기회로가 개방되어 있기 때문에 전기저항 신호는 1volt 를 유지하지만, 언로드 과정이 진행되어 램프와 리프트-탭이 접촉하게 되면 전기 회로는 연결되어 전기저항신호는 0volt 의 값을 가진다. 이 경우 C 지점에서 램프-탭 충돌이 일어난다. 전기저항신호는 C 지점과 D 지점에서 언로드시 리프트-탭이 램프 위를 움직일 때, 0 에서 1volt 의 값 사이에서 변동한다. 전기저항신호의 변동이 있는 것은 램프의 표면거칠기와 서스펜션의 고유진동에 의해 램프와 리프트-탭의 접촉이



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Result of the unloading process at 3 IPS velocity (b) Magnification of region E

불안정하여 R_s 값이 달라짐으로 인한 것이다. 이번 하드디스크 시스템에서는 AE 신호가 2mV 이상인 경우에 슬라이더와 디스크 사이에 충돌이 있다고 예측할 수 있다[5]. 주파수분석을 통해 2mV 이상인 경우에 슬라이더-디스크 충돌로 간주한 것이다. 따라서, AE 신호가 2mV 이상으로 측정되지 않으면 슬라이더-디스크의 충돌은 일어나지 않았다고 할 수 있다. 3IPS 인 경우에는 AE 신호가 2mV 를 넘는 경우가 없었다. 이것은 실제 하드디스크 시스템이 3IPS 의 언로드 조건에서는 안정하다는 것을 의미한다. Fig. 8b 는 Fig. 8a 의 E 영역을 표현하고 있다. 이 그림에서 F 영역은 초기 충돌 신호인 첫 램프-탭 충돌에서 다음 램프-탭 충돌 사이에 충돌신호가 없는 영역이다. 이 영역은 리프트-탭이 첫 램프-탭 충돌로 인해 점프하여 발생한 것이다. 이 때, 회로는 개방되고 전기저항 신호는 1volt 가 된다. 만약 AE 신호가 나타난다면 이 영역에서 슬라이더-디스크 충격이 발생한 것이다.

Fig. 9a 는 6IPS 의 속도로 언로드한 결과를 보여주고, Fig. 9b 는 영역 E 를 확대한 것이다. C 지점에서 언로드 과정이 시작되고, D 지점에서 끝난다. 전기저항신호의 분석은 위에서 말한 3IPS 의 결과와 같다. 이 경우 AE 신호가 기준점 이상으로 측정된다는 것은 슬라이더-디스크 간의 충돌이 일

어났다는 것을 의미한다. 특히, Fig. 9b의 E'지점에서 전기저항신호는 1volt이며 이것은 리프트-탭이 램프로부터 분리되어 램프-탭 충돌에 의한 충격은 전달되지 않는다는 것을 의미한다. 따라서, 이 경우의 AE 신호는 오로지 슬라이더-디스크 충돌에 의한 것으로 볼 수 있다. Fig. 9b의 전기저항신호 그래프에서 전압이 0volt 혹은 1volt가 아닌 중간값을 갖는 경우는 램프의 거칠기와 서스펜션의 진동 모드 등에 의해서 램프와 서스펜션사이의 저항값이 변하여 발생하는 것으로 슬라이더-디스크 충돌과는 무관하다. Fig. 10~12는 각각 9IPS, 12IPS, 긴급복귀에 의한 결과를 보여준다. 인플레인 LDV 신호에서 언로드 속도는 9IPS와 12IPS로 측정되었고, 긴급복귀의 수평방향 속도는 23IPS로 측정되었다. 모든 경우에 AE 신호는 기준값 이상으로 측정되어 슬라이더-디스크 충돌이 발생했다는 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 10b~12b의 E'지점에서 AE 신호가 기준점을 상회하는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 리프트-탭이 램프와 분리되어 있기 때문에 AE 신호는 슬라이더-디스크 충돌에 의한 것이다. 앞서의 결과를 기초로 했을 때, AE 신호와 전기저항신호를 비교하여 슬라이더-디스크 충돌을 구분할 수 있다.

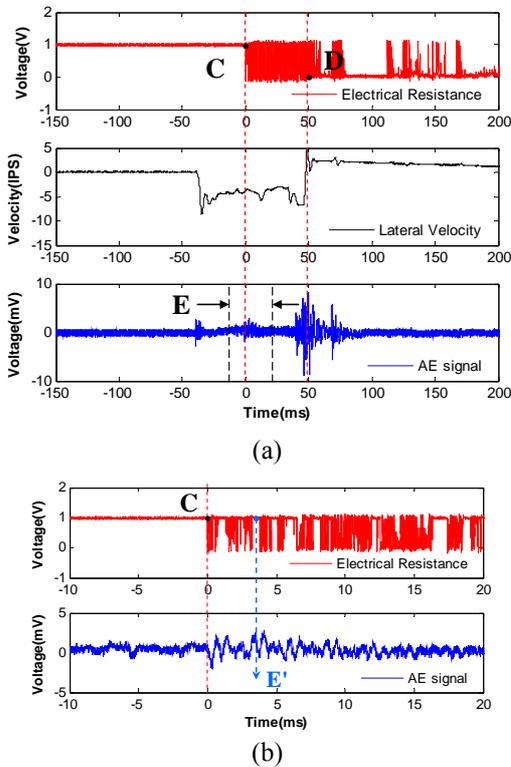


Fig.9 (a) Result of the unloading process at 6 IPS velocity (b) Magnification of region E

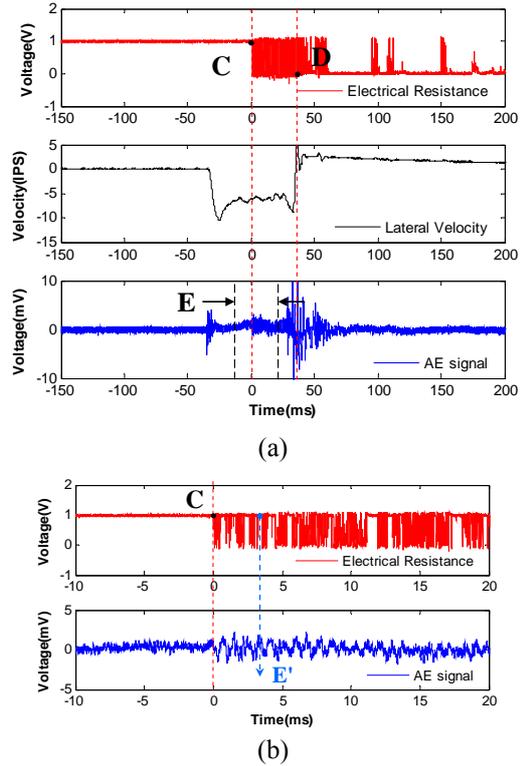


Fig. 10 (a) Result of the unloading process at 9 IPS velocity (b) Magnification of region E

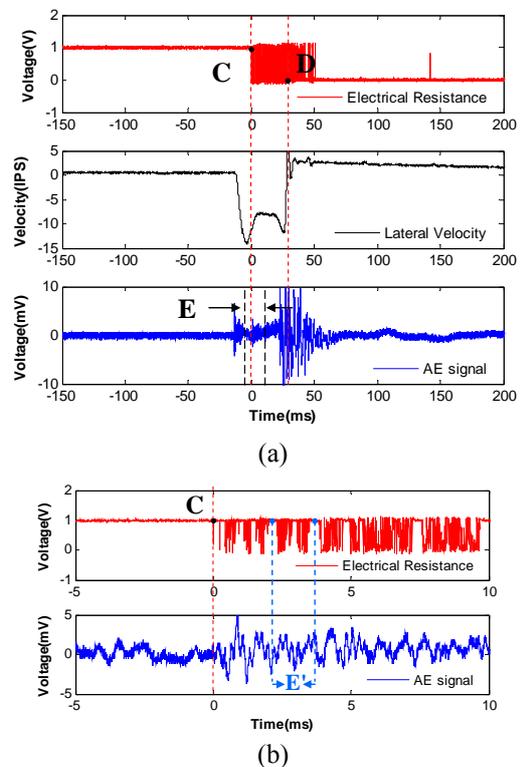
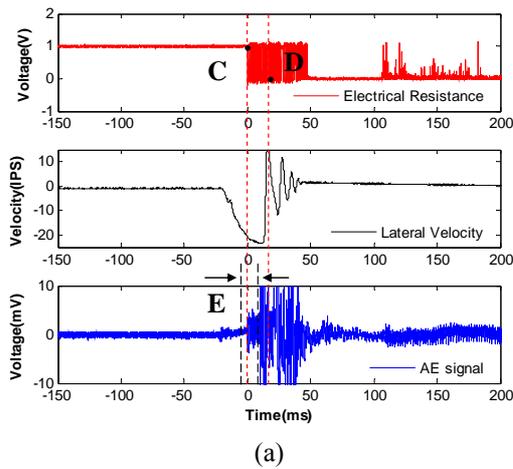
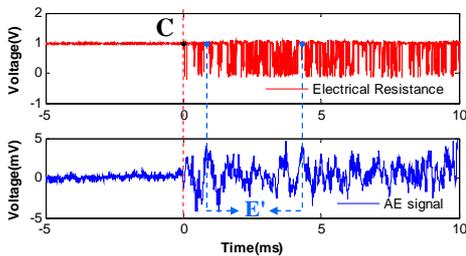


Fig.11 (a) Result of the unloading process at 12 IPS velocity (b) Magnification of region E



(a)



(b)

Fig.12 (a)Result of the unloading process at emergency parking condition (b) Magnification of region E

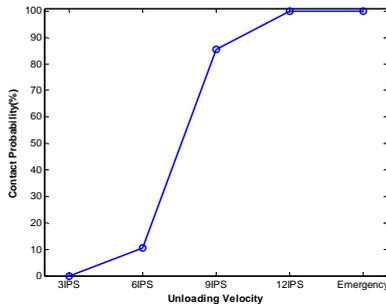
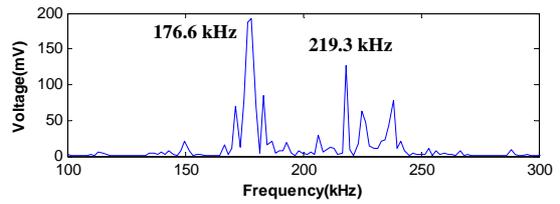


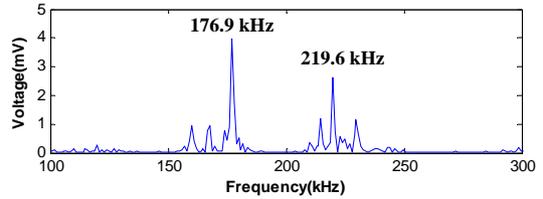
Fig.13 Contact probability for various lateral unloading velocities

Fig.13 은 슬라이더-디스크 충돌이 일어나는 횟수와 수평방향 언로드 속도와의 함수관계이다. 각각의 속도에 대해서 100 회의 언로드 실험을 수행하였다. 슬라이더-디스크 충돌 횟수가 6IPS 이상에서 급격하게 늘어나는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 2.5inch 하드디스크의 언로드 속도는 6IPS 이하로 디자인하여야 함을 알 수 있다

실험에서 측정된 슬라이더-디스크 충돌을 증명하기 위해 주파수 분석이 사용된다. AE 주파수 분석은 슬라이더-디스크 충돌신호를 연구하는데 효과적이라고 알려져 있다. 즉, AE 신호의 주파수



(a)



(b)

Fig. 14 FFT of AE measurement for (a) designed contact condition on disk and (b) a case of the slider-disk contact during the unloading process

스펙트럼을 통해 슬라이더에 의한 공기베어링 주파수와 슬라이더 바디주파수가 측정된다면, 이를 슬라이더-디스크 충돌로 간주할 수 있다. 본 연구에서는 AE 신호의 주파수 스펙트럼에서 고주파영역이 존재하는 슬라이더 바디주파수가 측정되지 않는다. 따라서, 공기베어링 주파수를 통해 슬라이더-디스크 충돌을 규명한다. 실제 시스템에서 공기베어링 주파수를 측정하기 위해서는 디스크에 흡집을 내어 충돌조건을 만든 상황에서 가능하다. 슬라이더가 흡집이 난 부분을 지나게 되면 슬라이더는 공기베어링에 의해 진동하게 된다. 이 경우 슬라이더와 디스크는 충돌하게 되고 이때 측정된 AE 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)하면 공기베어링 주파수를 구할 수 있다. Fig.14a 는 위의 조건에서의 AE 주파수 스펙트럼을 보여준다. 176.6 kHz 와 219.3 kHz 의 주파수에서 공진을 볼 수 있다. Fig. 9~12 에서 언로드시 슬라이더-디스크 충돌로 야기된 threshold 이상의 AE 신호(2mV)를 얻었을 경우, AE 스펙트럼은 Fig. 14b 에서 볼 수 있듯이 176.9 kHz 와 219.6 kHz 의 주파수에서 큰 공진을 하고 있다.

두 AE 스펙트럼은 매우 흡사하며, 이것은 앞서 수행한 실험에서 기준값 이상의 AE 신호가 슬라이더-디스크 충돌을 의미한다는 것을 분명하게 보여준다. Fig.14 a, b 의 AE 신호의 power 의 크기차이는 Fig.14a 는 임의로 충돌조건을 만든 상태에서 실험결과이고, 따라서 Load/Unload 시 발생한 충돌인 Fig.14b 에서의 결과보다 더 큰 충격이 발생하여 power 의 크기가 커짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 램프와 리프트-탭간의 충돌을 찾기 위하여 전기저항측정 방법을 제안하고, 로드/언로드 실험을 통해 AE 신호와 전기저항신호를 비교함으로써 평가하였다. 한가지 로드 속도와 네 가지 언로드 속도는 목적인 하드디스크의 로드/언로드 현상을 고려한 것이다. 긴급복귀 조건은 드라이브의 로드/언로드 시스템을 평가하기 위해 고려하였다. 램프와 리프트-탭 충돌을 찾기 위한 전기저항측정방법은 매우 효과적이고 AE 신호가 가진 단점을 보완할 수 있음을 증명하였다. 향후, 좀더 효과적인 증착 방법이 적용되어 램프 표면에 전도성을 갖게 하여 좀더 향상된 전기저항 신호를 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 Center for Information Storage Device (CISD) 연세대학교와 삼성전자의 지원을 받아 수행하였다.

참고문헌

[1] Jeong TG, Bogy DB, 1991 "Measurement of slider-disk contacts during dynamic load-unload", IEEE Trans Magn 27: pp.5073-5075

[2] Lim SC, Park JS, Choi SB, Park YP, 2001 "Non-contact start/stop motion control of HDD suspension using shape memory alloy actuators", Smart Materials and Structures 10: pp.1069-1077

[3] Sheng G, Chen Q, Hua W, Liu B, 2001 "An Experimental Study of Dimple Separation and Head-Disk Impacts of Negative Pressure Slider in Unload Process", IEEE Trans Magn 37(4): pp.1859-1862

[4] Tanaka H, Kohira H, Matsumoto M, 2001, "Effect of Air-Bearing Design on Slider Dynamics During Unloading Process", IEEE Trans Magn 37(4): pp.1818-1820

[5] Weissner S, Talke FE, 2000 "Load/unload measurements using laser Doppler vibrometry and acoustic emission", Tribology International 33: pp.367-372

[6] Levi PG, Talke FE, 1992 "Load/Unload Investigations On A Rotary Actuator Disk Drive", IEEE Trans Magn 28(5): pp.2877-2879

[7] Bhushan B, Wu Y, Tambe NS, 2003 "Sliding Contact Energy Measurement Using a Calibrated Acoustic Emission Transducer", IEEE Trans Magn 39(2): pp.881-887

[8] Beattie AG, 1974 "The measurement of the energy in AE", Rev Sci Instrum 45:pp.352-360

[9] Sparvieri N, Fiorello AM, Fiorani D, Testa AM, 1994 "Growth and magnetic characterization of YBCO films", Italian Physical Society 16(12): pp.1987-1991

[10] Battaglia G et al., 2004 "RF magnetron co-sputtering deposition of Cu-based nanocomposite silica films for optical applications", J Non-Crystalline Solids 345-346: pp.689-693

[11] Albrecht TR, Sai F, 1999 "Load/Unload Technology for Disk Drives", IEEE Trans Magn 35(2): pp.857-862