

〈논 문〉

내충격성 향상을 위한 HDD Actuator의 거동 연구 Analysis of Shock Mechanism and Actuator Behavior of HDD

손진승* · 최성훈* · 이행수* · 홍민표*

Jin-Seung Sohn, Sung-Hoon Choa, Haeng-soo Lee and Min-Pyo Hong

(2001년 1월 22일 접수 ; 2001년 4월 21일 심사완료)

Key Words : Shock Mechanism (충격 메커니즘), Actuator (액추에이터), Shock Response Spectrum (충격 응답 스펙트럼), Hard Disk Drive (하드 디스크 드라이브)

ABSTRACT

The shock performance of hard disk drives has been a serious issue for portable computers and AV application HDD. Focusing on the motion of an actuator, we investigated non-operational shock mechanism and studied several parameters that affect the shock performance by experimental analysis. It was found that there are two important factors for the actuator to endure high shock level. One is a shock transmissibility and the other is a beating between the arm blade and the suspension. To generalize the shock transmissibility, the concept of shock response spectrum was introduced. The shock response spectrum of the actuator system was obtained experimentally and compared with that of an analytical single degree of freedom model. It was found that there was a good agreement. The first bending natural frequency of the arm blade was found to be the most important factor for the low shock transmissibility. By applying the shock response spectrum and avoiding the beating, we could design an actuator of high shock performance.

1. 서 론

최근 HDD(hard disk drive, 하드 디스크 드라이브)는 기록 밀도가 급격히 증가하여 연간 100 % 이상의 증가 추세를 나타내고 있으며 기록 및 재생 속도 또한 증가되고 있는 추세이다. 한편 충격에 대한 신뢰성의 요구도 계속 증가하고 있다. 충격 성능에 대한 요구가 증가하는 이유는 다음과 같다. 첫째로 컴퓨터가 점차로 휴대화되고 특히 HDD의 사용이 컴퓨터에서 가전용 Audio-Video 제품으로 확장되면서 충격 성능의 향상이 요구되고 있기 때문이다. 둘째는 기록 밀도가 증가되면서 디스크의 트랙 피치(track pitch)의 크기가 마이크로 단위 이하(sub-micron)에 도달함에 따라 기존에 HDD를 취급할 때 발생하였던 손상들이 이제는 트랙 피치의 크기보다 훨씬 크게 되어, 기존

의 HDD에서 발생하는 에러를 보상해주는 ECC(Error Correction Code)로도 보상이 불가능하게 되어 결국 기록 정보의 손실을 초래하기 때문이다. 셋째는 기록 밀도가 증가함에 따라 헤드와 디스크 사이의 간격, 즉 부상 높이가 감소하고 충격에 취약한 자기저항헤드 등을 사용함에 따라 외부에서의 약한 충격에도 헤드가 쉽게 손상되기 때문이다. 따라서, 충격 성능의 기준도 기존 11 ms의 반 sine 충격파일 경우 15 g 기준에서 최근에는 2 ms에서의 300 g 를 만족시키도록 변경되었다.

HDD에서 발생하는 충격의 현상은 헤드가 충격 하중을 받아 디스크 면으로부터 도약(jump) 한 후 다시 디스크와 충돌(head slap) 되면서 디스크 면에 손상을 초래하는 것으로 밝혀졌다.^(1,2) 한편 서스펜션(suspension)에 가해진 초기하중(preload)을 증가시키고 헤드-서스펜션의 등가 질량을 감소시킴에 따라 충격 성능이 개선된다는 연구가 있다.⁽³⁾ 기존의 충격현상의 연구는 주로 헤드의 충돌 현상 및 방지에 대한 연구로서 주로 헤드의 충돌을 방지하기 위한 헤드-서스펜션 어셈블리(HSA)의 거동 및 설계가 주로

* 삼성종합기술원

E-mail : sjs@samsung.co.kr

Tel : (031) 200-3213, Fax : (031) 200-3307

연구되었다. 즉, 초기 슬라이더의 기울기 각도 (tilting angle)에 대한 영향,⁽⁴⁾ 디스크의 강성 및 충격시의 충격시간에 대한 영향,⁽⁵⁾ 충격 전후의 디스크와 헤드의 상대속도 등의 영향⁽⁶⁾ 등이 실험적으로 고찰되었다. 한편 수치적 해석에 의하여 충격 현상을 연구하려는 접근도 진행 중이다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 액추에이터(actuator)의 거동에 주안점을 두어 충격 메커니즘의 해석을 시도하였으며 충격 성능을 지배하는 여러 인자들을 실험적으로 연구하였다. 이를 위하여 충격 응답 스펙트럼(shock response spectrum)⁽⁸⁾의 개념을 도입하여 충격 전달률(shock transmissibility)을 분석하였으며 충격 성능을 개선하기 위한 방안을 제안하였다.

2. 도약현상(Jumping)의 원인규명

Fig. 1은 HDD 액추에이터 어셈블리 (actuator assembly)의 개략적인 도식도이다. 액추에이터 어셈블리는 슬라이더(slidebar), 서스펜션(suspension), 암블레이드(arm blade), 그리고 피벗베어링(pivot bearing) 및 팬테일(fantail)로 이루어져 있다. 본 연구에서는 HDD가 외부로부터 충격을 받았을 때의 액추에이터 어셈블리의 운동을 규명하고 이 운동을 지배하는 요소가 무엇인가를 판단하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험 장치를 사용하여 액추에이터 암블레이드와 서스펜션, 슬라이더의 운동을 측정하였다. 이

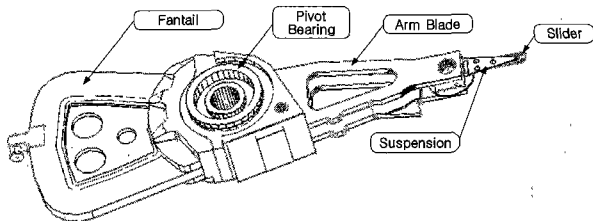


Fig. 1 HDD Actuator assembly

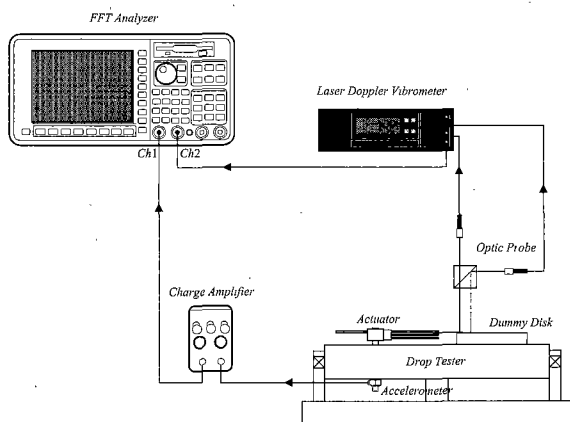


Fig. 2 Schematic configuration of experimental set-up

실험 장치는 하드디스크 드라이브 상의 다른 부품들의 영향을 배제하고 액추에이터의 거동만을 측정하기 위하여 충분히 높은 강성을 갖는 더미 디스크(dummy disk)와 베이스(base)를 사용하였다. 액추에이터에 HDD의 충격시험에 사용되는 반정현(half sine) 충격파를 가하기 위하여 베이스의 한 쪽 변을 힌지 고정하고 다른 한 변이 시험대 바닥에 돌출 시킨 충돌 돌기에 충돌되도록 설계하였다. 충격의 크기와 충격 시간은 베이스의 한 쪽 변이 충돌 돌기에 충돌하는 세기와 베이스와 충돌 돌기 사이의 패드(pad)의 두께로 조절한다. 본 연구에 사용된 서스펜션은 길이 14.5 mm의 Hutchinson TSA 3430 타입이며, 16 mN/mm의 강성과 2.2 kHz의 1차 굽힘 고유진동수를 갖는다. 한편 초기하중은 0.0294 N (3.0 gram)이었으며, 50 % pico-slider가 사용되었다.

슬라이더의 도약 현상(jump)이 일어날 때 2 채널의 레이저도플러 진동측정장치(laser doppler vibrometer)를 사용하여 암블레이드의 끝 단 및 서스펜션의 중간에서의 충격에 대한 응답과 암블레이드의 끝 단 및 슬라이더 중간 부분에서 충격에 대한 응답을 측정하여 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타냈다. Fig. 3에서 암블레이드의 끝 단과 서스펜션은 동일한 주파수에 위상 지연이 거의 없이 운동하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4에 표시된 원은 슬라이더가 도약하는 순간을 표시하는데 슬라이더가 암블레이드의 운동을 정확하게 반복적으로 따라가고 있음을 볼 수 있다. 즉, 암블레

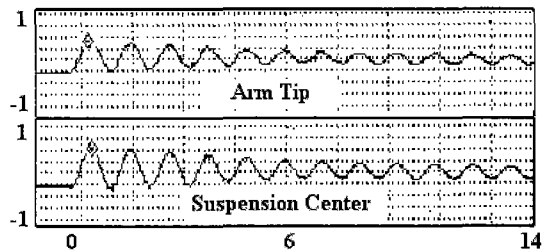


Fig. 3 Shock response of arm and suspension measured simultaneously

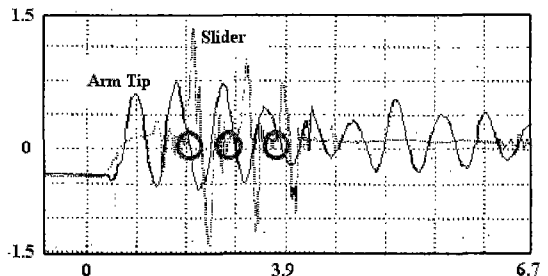


Fig. 4 Shock response of arm tip and slider measured simultaneously at the moment of jump

이드 끝단의 속도가 0이 되는 순간에 슬라이더가 도약하기 시작하는데 이는 암블레이드 끝단이 충격에 의하여 위쪽으로 최대 변형된 순간에 암블레이드가 슬라이더를 당기면서 슬라이더가 도약하는 것을 잘 나타내주고 있는 것이다. 한편 충격 시 슬라이더의 도약현상은 여러 번에 걸쳐 발생됨을 알 수 있다. 여기서 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나는 운동의 주기는 암블레이드의 1차 굽힘 모드의 주파수(864 Hz)이다. 위의 결과를 종합해 볼 때 슬라이더의 도약은 암블레이드의 거동에 의해 지배되고 있다는 것을 알 수 있다.

3. 충격 응답 스펙트럼과 액추에이터 충격 성능의 관계

앞의 결과에서 암블레이드의 운동이 서스펜션의 도약 현상을 지배하고 있음을 밝혀 냈고 암블레이드의 운동은 액추에이터의 피벗베어링(pivot bearing)으로 부터 전달되어진 것이므로 암블레이드 끝 단의 과도한 운동을 억제하여 슬라이더의 도약 현상을 방지하기 위하여서는 액추에이터의 피벗점에서 암블레이드의 끝 단으로 전달되어지는 충격을 줄여 주어야 한다. 충격의 전달을 줄여 주기 위하여 액추에이터의 충격에 의한 거동에 충격 응답 스펙트럼(shock response spectrum) 및 충격 전달률(shock transmissibility)의 개념을 적용할 수 있다면 액추에이터의 충격에 관련된 성능을 결정할 수 있는 여러 파라미터들을 단순화 시킬 수 있다. 충격 응답 스펙트럼은 1자유도계

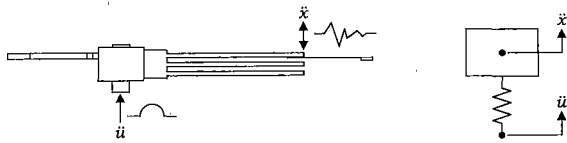


Fig. 5 Experimental model and theoretical model of actuator for shock response spectrum

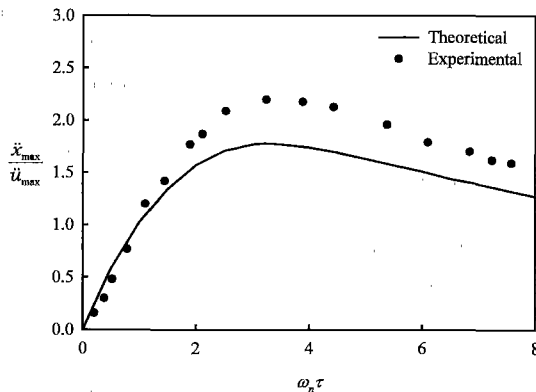


Fig. 6 Theoretical and experimental shock response spectrum of actuator

시스템의 최대 응답과 시스템의 고유진동수의 선도로 구성된다. 따라서 Fig. 5와 같이 액추에이터 암블레이드의 충격에 의한 굽힘 운동계를 단일 질량과 스프링으로 구성된 1자유도계로 가정하여 반정현파의 입력에 대한 이론적인 1자유도계의 충격 응답 스펙트럼과 실제 액추에이터 블레이드의 충격 응답 스펙트럼을 측정하여 두 스펙트럼을 비교함으로써 가정의 타당성을 검토하였다.

액추에이터 암블레이드의 충격 응답 스펙트럼을 구하기 위하여서는 가진 충격 신호의 지속시간을 조정하거나 암블레이드의 굽힘 고유진동수를 바꾸어 가면서 측정하여야 하는데 본 연구에서는 블레이드를 깎아 내어 두께를 줄여 고유진동수를 낮추어 가면서 측정하였다. 그 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 그림에서 세로축은 충격 입력의 최대 가속도 \ddot{u}_{max} 에 대한 암블레이드 끝단의 최대 가속도 \ddot{x}_{max} 의 비를 말한다. 즉 $\ddot{x}_{max} / \ddot{u}_{max}$ 는 충격의 정도를 의미하는 것으로 충격 전달률로 해석할 수 있겠다. 따라서 낮은 충격 전달률을 갖도록 액추에이터를 설계하는 것이 바람직하다. 한편 가로축은 충격 지속시간과 암블레이드의 일차 굽힘 고유진동수의 곱으로 이루어졌다. Fig. 6에서 보듯이 실험적으로 구한 충격 전달률은 이론적인 1자유도계 모델에 비하여 크기가 약간의 차이를 나타내지만 그 경향은 매우 유사함을 볼 수 있다. 이 결과는 액추에이터의 충격에 의한 거동이 1자유도계의 충격 응답 스펙트럼으로 표시될 수 있음을 의미하는 것이다.

한편 실험적 결과와 이론적 결과와의 차이는 다음과 같

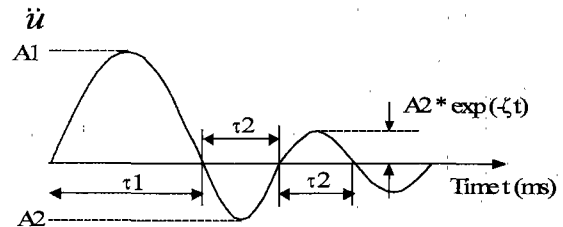


Fig. 7 An example of real input for numerical simulation

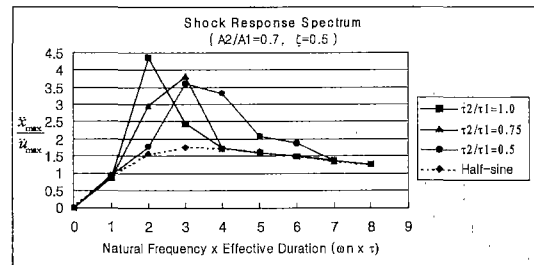


Fig. 8 The effect of duration time ratio on shock transmissibility

은 설명으로 이해할 수 있다. 충격 실험 장치를 통하여 액추에이터에 전달되는 충격입력의 형태는 이상적인 반정현파가 아니라 Fig. 7과 같이 반정현파 이후에 발생하는 약간의 잔류진동이 포함되어진다. Fig. 7은 실제 충격입력의 형태를 정형화시킨 하나의 예로서 세가지 무차원 파라미터들 - 진폭비(A_2/A_1), 지속 시간비(τ_1/τ_2), 감쇠(ζ)로 그 형태를 나타낼 수 있다.

각 파라미터들이 충격성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단순화된 1자유도계 모델에 대해 충격 응답을 계산하였다. 여기서 유효 지속시간은 $t=2\tau_1/\pi$ 로 계산된다. Fig. 8은 진폭비와 감쇠를 고정한 후 지속 시간비를 변화시켜 가며 구한 충격 응답 스펙트럼으로서 지속 시간비의 변화에 따라 충격전달률이 반정현파의 충격만 작용하는 경우에 비하여 최고 3배까지 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 지속시간 비에 따라 충격 응답 스펙트럼에 영향을 미치는 영역이 변화하는데, 특히 τ_1/τ_2 가 0.75이상인 경우 $\omega_n\tau$ 의 값이 4 이내에서만 충격전달률에 큰 영향이 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 지속시간 비와 감쇠를 고정한 후 진폭비를 변화시켜 가며 구한 충격 응답 스펙트럼으로서 진폭비가 증가함에 따라 스펙트럼의 형태는 반정현파 입력에서와 같고 충격전달률만 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 충격 전달률이 차이가 나타나는 이유는 액추에이터의 실제계와 단순화된 1자유도계 모델의 차이도 있을 수 있지만, 1자유도계의 이론적 결과는 반정현파의 입력 이후에는 부가적인 입력이 없는 이상적인 반정현파의 입력에 대한 결과이고, 실제 계에 대한 실험 결과는 간이적인 충격 실험 장치에서 발생하는 잔류 진동에 의해 반정현파 이후의 잔류파가 입력되는 현상 등에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

위의 실험에서 액추에이터의 충격에 의한 거동이 1자유도계의 충격 응답 스펙트럼을 따라간다는 것이 확인되었다. 따라서 액추에이터의 충격 성능을 결정하는 가장 중요한 파라미터는 액추에이터의 일차 굽힘 고유 진동수이고 이 고유 진동수에 의해 슬라이더가 도약 하기 시작하는 충격 입력의 크기가 결정된다는 가정을 할 수 있게 된다. 이

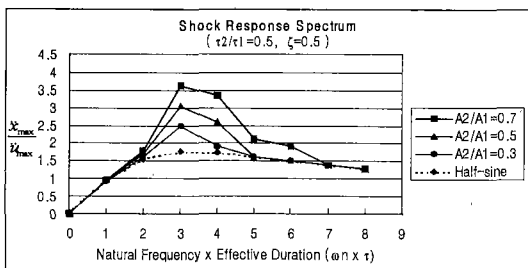


Fig. 9 The effect of amplitude ratio on shock transmissibility

러한 가정이 액추에이터 어셈블리 전체에도 적용되는지를 확인하기 위하여 암블레이드의 일차 굽힘 고유진동수가 각기 다른 여러 종류의 액추에이터를 제작한 후, 서스펜션 및 슬라이더를 부착하여 각 액추에이터 어셈블리의 충격 전달률과 슬라이더가 디스크와 분리되는 도약현상을 일으키는 입력의 크기를 측정하였다. 그러나 도약 현상은 매우 짧은 시간 동안 미세한 변위로 일어나므로 그 측정이 쉽지 않다. 이 현상을 측정하는 방법으로는 고속 카메라를 사용하여 동작을 분석하는 방법과 디스크와 슬라이더를 전기회로의 스위치 역할을 하게 하여 스위치의 On/Off 상태를 관찰하는 방법, 그리고 레이저도플러 진동측정장치를 사용하여 디스크와 슬라이더의 상대 운동을 측정하는 방법이 있다. 이 세 가지 방법을 모두 시도해 본 결과 레이저도플러 진동측정장치를 사용하는 방법이 신뢰도와 간편성에 있어서 가장 우수하였으므로 이 방법을 사용하여 실험하였다. 측정을 위하여 앞의 실험에서 사용한 Fig. 2와 같은 구성의 실험 장치를 사용하였다. 두 채널의 레이저도플러 진동측정장치를 사용하였는데 한 채널은 슬라이더의 근방의 디스크에 초점을 맞추고 다른 한 채널은 슬라이더의 중앙에 초점을 맞추어 슬라이더에서 발생하는 속도의 신호에서 디스크에서 발생하는 속도의 신호를 빼 주면 슬라이더의 도약이 발생할 경우에 다음 Fig. 10과 같은 전형적인 신호가 발생하므로 이 신호의 발생 유무로 슬라이더의 도약을 확인하였다.

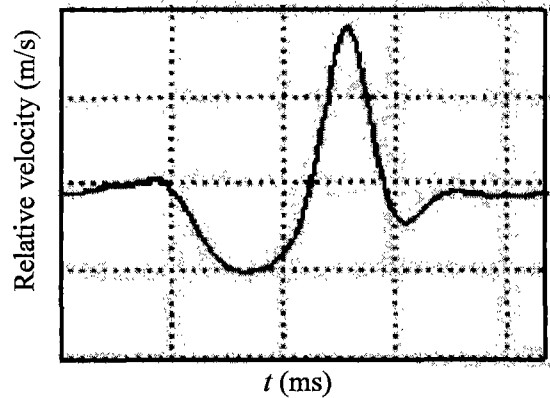


Fig. 10 Relative velocity signal of actuator at the moment of jumping

Table 1 First bending natural frequencies of samples of arm blades

Actuator Type	A	B	C	D	E
Freq. (Hz)	751	864	1392	1792	2656

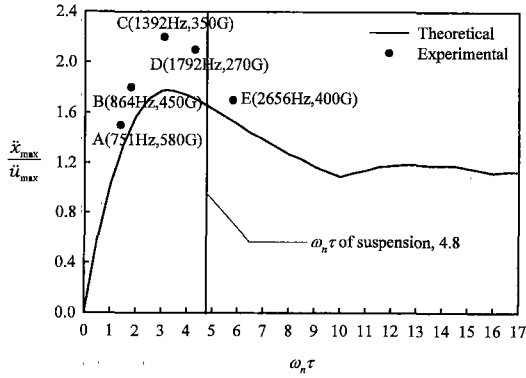


Fig. 11 Shock response spectrum of actuators for 0.5ms half-sine shock input (effective duration of half sine shock pulse = duration $\times 2/\pi$)

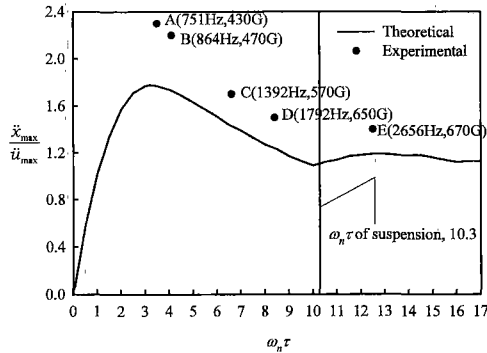


Fig. 12 Shock response spectrum of actuators for 1.0ms half-sine shock input (effective duration of half sine shock pulse = duration $\times 2/\pi$)

실험을 위하여 제작한 액추에이터의 종류를 Table 1에 정리하였다. 고유진동수가 다른 다섯 종류의 액추에이터에 대하여 입력 반정현파의 지속 시간을 0.5 ms와 1.0 ms의 두 종류로 설정하여 각 종류의 액추에이터에 대한 충격 전달률의 크기와 도약이 발생하기 시작하는 입력 가속도 값을 구하여 Fig. 11과 Fig. 12에 나타냈다. 여기서 괄호 안의 숫자는 각 암블레이드의 일차 굽힘 고유진동수와 도약이 발생하기 시작하는 충격 입력 가속도의 크기를 표시한다. 전술한 바와 같이 액추에이터의 충격 전달률은 약간의 크기 차이는 있지만 1 자유도계의 이론적 충격 응답 스펙트럼의 경향과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 슬라이더의 도약이 발생하는 충격 가속도의 크기와 충격 전달률은 서로 상호 관련이 있음을 알 수 있는데, 충격 전달률이 높으면, 도약이 발생하는 충격 가속도의 크기가 감소함을 알 수 있다. 즉, 충격 전달률이 커서 액추에이터에 충격이 더 많이 전달되게 되면, 적은 충격 가속도에도 슬라이더가 도약을 한다는 것을 의미한다. 이 결과는 액추에이터

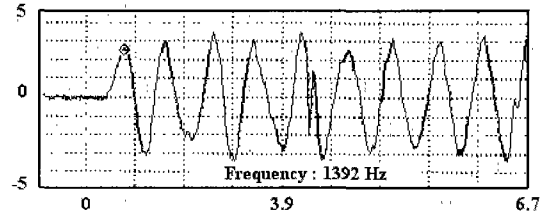


Fig. 13 Motion of suspension without beating (suspension: 2200Hz, blade: 1392Hz)

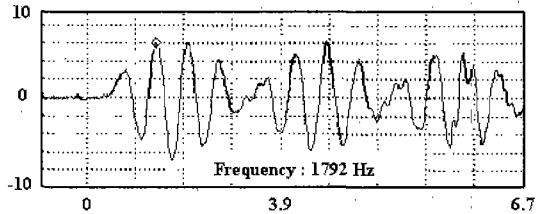


Fig. 14 Motion of suspension with beating (suspension: 2200Hz, blade: 1792Hz)

의 충격 전달률은 슬라이더의 도약현상을 지배하는 요소이며, 암블레이드의 일차 굽힘 고유 진동수에 의하여 결정된다는 것을 의미한다. 따라서 암블레이드의 일차 굽힘 고유 진동수에 의해 슬라이더가 도약하기 시작하는 충격 입력의 크기가 결정된다는 앞에서의 가정을 증명하는 것이다.

4. 맥놀이의 영향

그러나, 특이하게 Fig. 11에서 0.5 ms의 충격 입력에 대한 결과에서 “D”형 액추에이터에서는 충격 전달률이 “C”형 액추에이터에 비해 작지만 도약이 발생하는 충격 입력의 크기(270 G)가 “C”형 액추에이터의 충격 입력(350 G)에 비하여 오히려 줄어 들었음을 볼 수 있다. “E”형을 “B”형과 비교할 때에도 그 정도는 미약하지만 역시 이러한 경향이 나타난다. 여기에 사용된 서스펜션은 일차 굽힘 고유진동수가 2200 Hz인데 이러한 경향이 나타나는 액추에이터의 특징을 보면 암블레이드의 일차 굽힘 고유진동수가 서스펜션의 고유 진동수의 근처에 와 있다는 것을 알 수 있다. 이 현상을 확인하기 위하여 블레이드의 일차 굽힘 고유진동수가 서스펜션의 고유 진동수에서 비교적 멀리 떨어져 있는 “C”형(1392 Hz)과 블레이드의 일차 굽힘 고유진동수가 서스펜션의 고유 진동수와 비교적 가까이 있는 “D”형 액추에이터(1792 Hz)에 대하여 역시 Fig. 2의 실험 장치에서 동일한 충격 입력을 주고 레이저도플러 진동 측정장치의 초점을 서스펜션의 중심에 맞춘 상태에서 진동을 측정하였다. Fig. 13은 두 고유 진동수가 비교적 멀리 있을 경우의 측정 결과이고, Fig. 14는 두 고유진동수가 비교적 가까이 있는 경우이다. 충격 입력이 동일함에도 불구하고

하고 Fig. 14에서의 진동의 최대 크기가 Fig. 13의 진동의 최대 크기의 약 2배가 됨을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 14에서 볼 수 있는 바와 같이 블레이드와 서스펜션의 고유 진동수가 서로 가까이 있음으로 인하여 맥놀이 현상이 발생하기 때문이다.

그러나, Fig. 12와 같이 1.0 ms의 충격 입력에 대해서는 두 고유 진동수가 가까이 있더라도 도약이 발생하기 시작하는 충격 입력의 크기가 작아지지 않는다. 그것은 0.5 ms의 반정현과는 주파수 영역에서 3000 Hz 이하의 주파수 성분을 갖기 때문에 2200 Hz의 서스펜션을 충분히 가진 하지만 1.0 ms의 반정현과는 주파수 영역에서 약 1500 Hz 이하의 성분만을 가진 하므로 서스펜션을 가진 하지 않기 때문이다. 따라서, 액추에이터의 진동 전달률이 낮더라도 고유 진동수가 서스펜션의 고유 진동수의 근처에 있으면 맥놀이에 의해 낮은 충격 입력에 의해서도 도약이 발생할 수 있다는 사실을 알 수 있다.

5. 결론

위의 연구를 통하여 슬라이더의 도약 현상은 액추에이터 암블레이드의 거동에 의해 지배되며, 슬라이더의 충격 입력에 의한 도약이 발생하는 충격 입력의 크기는 액추에이터의 충격 전달률에 의하여 결정됨을 확인하였다. 또한 블레이드의 충격 전달률은 1자유도계의 충격 응답 스펙트럼의 경향과 일치하며, 암블레이드의 일차 굽힘 고유진동수를 조절함으로써 충격 전달률을 조절할 수 있음을 알 수 있었다. 서스펜션이 충격에 의하여 가진 될 때 암블레이드의 일차 굽힘 고유진동수와 서스펜션의 일차 굽힘 고유진동수가 유사해지면 맥놀이 현상에 의해 서스펜션의 진동이 증폭되고 이에 따라 슬라이더의 도약이 낮은 충격 입력에

의해서도 쉽게 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Marek, K., Carlson, P. and Resh, R., 1995, "Why Head Suspensions Need Shock Treatment," Data Storage, July/August, Vol. 2, pp. 51~56.
- (2) Kouhei, T., Yamada, T. and Aruga, K., 1995, "A Study of Head-Disk Interface Shock Resistance," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 31, pp. 3006~3008.
- (3) Ishimura, N., 1993, "Experimental Studies of Head-Disk Interface on Shock-Proof Performance," JSME Trans., No. 930-61, pp. 13~16.
- (4) Tokuyama, M., Katou, Y., Shimizu, J., Hirose, S., Kojima, Y. and Nishida, J., 1999, "Development of Shock Proof Suspension," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 2484~2486.
- (5) Ishimaru, N., 1996, "Experimental Studies of a Head/Disk Interface Subjected to Impulsive Excitation During Nonoperation," Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 807~812.
- (6) Miller A. and Bogy, D., 1996, "Effects of Shock on Head-Disk Interface," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, pp. 3717~3719.
- (7) Edward, J., 1999, "Finite Element Analysis of the Shock Response and Head Slap Behavior of a Hard Disk Drive," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, pp. 863~867.
- (8) Harris, C., 1995, "Shock and Vibration Handbook", 4th ed., McGraw-Hill, New York.