

HDD Actuator의 충격성능향상을 위한 동흡진기의 설계

이 행 수

Design of Dynamic Absorber to Improve Shock Performance of Actuator Arm in a Hard Disk Drive

Haeng Soo, Lee

ABSTRACT

HDD가 비동작중 외부충격을 받았을 경우에 대해 수치해석을 이용하여 HSA(head stack ass'y)의 거동과 헤드가 디스크 면에서 떨어지는 Lift-off level을 고찰하고, actuator의 arm blade(primary system)의 끝단에 보조의 구조물(auxiliary system)을 붙여 반사인파의 가속도입력에 의해 발생하는 HSA의 진폭을 감소시키고 내충격성능을 향상시키고자 한다. 보조 구조물의 형태와 재료는 arm blade의 공진과 연계한 공진주파수의 최적화과정에 의해 결정된다. 실제 제품의 취급에서 가장 쉽게 발생할 수 있는 0.5ms의 duration time으로부터 제품의 성능평가 요건인 2ms의 duration time까지의 반사인파의 입력에 대한 응답을 고찰한 결과 보조의 구조물을 가졌을 경우 주 시스템보다 훨씬 높은 충격에서 헤드의 lift-off이 발생되어 전체 시스템의 내충격성능을 향상시킴을 알 수 있다.

1. 서론

HDD는 대부분의 모든 컴퓨터에 필수 기억장치이며, 시장 규모도 다른 기억 장치에 비해 압도적으로 뛰어나다. 최근 운반가능한 응용장치들로 확대되어 가고있는 HDD는 특성상 과도한 외부진동과 충격에 노출되어 있고 특히 기존의 테스트 조건인 2ms의 duration을 가진 반사인파(half sine pulse)의 충격은 물론이고 취급시에 빈번히 발생하는 1.0ms이하의 짧은 duration을 가진 충격에 대한 내충격성이 요구되고 있어 종래의 하드 디스크 드라이브에 비하여 높은 내충격성과 부품들의 고신뢰성이 요구된다.

그림 1에 HDD단면을 도시하였는데 지금까지의 연구에서 헤드가 충격하중을 받아 디스크 면으로부터 lift-off이 된 후 다시 디스크와 충돌할 때(head slap) 디스크 면이 가장 큰 손상을 입는 것으로 알려져 있으며 수치해석과 실험적인 고찰을 통하여 이 head slap현상의 규명뿐 아니라 head slap현상을 방지하기 위한 노력을 기울여 오고 있다. 헤드가 lift-off된 후 디스크면과 어떤 각(tilting angle)을 이루어 부딪힐 때의 그 접촉 응력이 크게 증가하므로 limiter를 달아 헤드의 움직임을 제어

하고자 하였으며[1,2], 디스크의 강성, 충격시의 duration time, HSA의 유효질량의 영향[3], 충격전후의 디스크와 헤드의 상대속도등의 영향[4]을 실험적으로 고찰하였다. 최근 취급시의 HDD충격완화를 위하여 쿠션의 역할이 가능하도록 전체 HDD의 외부표면의 접촉 강성을 조절하고자 하는 노력도 진행되고 있다[5]. 본 연구에서는 동흡진기의 개념을 도입하여 actuator arm blade의 끝단에 보조의 구조물을 추가하여 arm blade의 충격에너지를 분산시킴으로서 내충격성능을 향상시킨다.

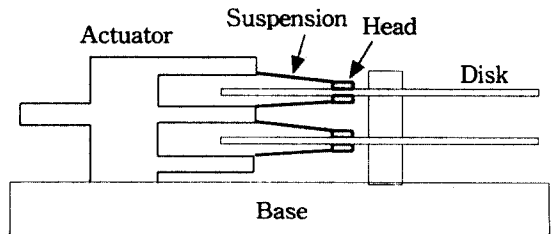


Fig. 1 Schematic of Hard Disk Drive

* 삼성전자 중앙연구소 광매카 lab

2. 동흡진기

기계 또는 진동계에 그림 2와 같이 보조의 스프링-감쇠-질량계를 이용하여 그 계의 진동을 제어하는 것이 가능하다[6].

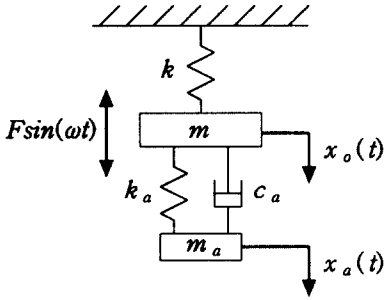


Fig. 2 Auxiliary Mass Damper

임의의 주파수 범위에 걸쳐 진동의 진폭을 제어하기 위해 주 시스템($m, k, \omega_o = \sqrt{k/m}$)에 스프링 강성 k_a , 감쇠 c_a 로서 보조 질량 m_a 를 연결하면 전체 시스템은 다음의 운동방정식으로 표현되는 2자유도계가 된다.

$$m\ddot{x}_o + kx_o + c_a(\dot{x}_o - \dot{x}_a) + k_a(x_o - x_a) = F\sin\omega t \quad (1)$$

$$m_a\ddot{x}_a + c_a(\dot{x}_a - \dot{x}_o) + k_a(x_a - x_o) = 0 \quad (2)$$

해를 $x_o(t) = X_o e^{j\omega t}$, $x_a(t) = X_a e^{j\omega t}$ 로 가정하여 위 식을 풀면 주 시스템의 해는 다음과 같다.

$$X_o = \frac{F/k}{1 - \frac{\omega^2}{k} \left[m + m_a \frac{(1 + 2\zeta\beta_a j)}{(1 - \beta_a^2) + 2\zeta\beta_a j} \right]} \quad (3)$$

여기서 $\beta_a = \omega / \omega_a$, $\omega_a = \sqrt{k_a / m_a}$ 이고 $\zeta = c_a / 2\sqrt{k_a m_a}$ 이다. 식 (3)에 주파수비 $a = \omega_a / \omega_o$, 질량비 $\mu = m_a / m$, 주 시스템의 정적 변위 $\delta_{st} = F/k$ 를 대입하여 정리하면 주 시스템의 진폭은 다음과 같다.

$$X_o / \delta_{st} = \left\{ \frac{(\alpha^2 - \beta^2)^2 + (2\zeta\alpha\beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \alpha^2 \beta^2 \mu]^2 + (2\zeta\alpha\beta)^2 (1 - \beta^2 - \beta^2 \mu)^2} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

식 (4)를 ω / ω_o 에 대해 계산해보면 감쇠 ζ 값에 관계없이 X_o / δ_{st} 가 일정한 두 지점을 지남을 알 수 있다. 이 두점에서의 크기를 같게 하는 방법으로 임의의 가진 주파수에 대해 X_o / δ_{st} 를 최소화시킬 수 있다. 식(4)에서 ζ^2 의 항의 계수와 ζ 에 무

관한 항의 비가 분자와 분모에서 같으면 감쇠에 상관없이 있다. 이것을 정리하면 다음과 같다.

$$\beta^4 \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) - \beta^2(1 + \alpha^2 + \alpha^2 \mu) + \alpha^2 = 0 \quad (5)$$

식 (5)로부터 X_o / δ_{st} 가 임의의 주파수 영역에 대해 최소화될 수 있는 보조 시스템의 최적주파수와 감쇠를 질량비를 이용하여 구할 수 있다.

$$\alpha_{optimum} = \frac{1}{1 + \mu}, \quad \zeta_{optimum} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (6)$$

3. Actuator Arm Blade의 충격거동해석

해석은 상용프로그램인 ANSYS를 사용하였고 HDD Actuator에서 하나의 arm blade와 suspension의 수치해석 모델은 그림 3과 같다.

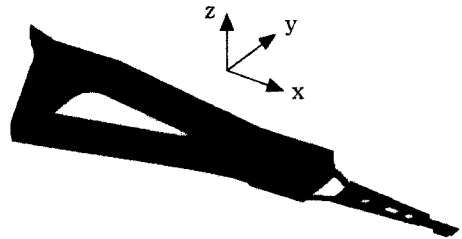


Fig. 3 Finite Element Model of HSA

충격해석을 위하여 arm blade의 피봇쪽 끝단을 구속하였으며 헤드에 gram load가 작용하여 디스크면에 붙어 있는 것으로 가정하여 헤드 밑면의 z-방향 변위를 구속하였다. 시간에 따른 충격 response의 변화는 구속된 헤드 밑면의 반발력 (Reaction Force)의 변화로 예측이 가능하다. 만약 헤드에 가해지는 gram load를 3.0gf로 가정하였을 때 충격이 가해지는 동안의 어느순간 반발력이 3.0gf보다 더 커지면 그 때 헤드의 lift-off이 발생하여 헤드 슬랩이 시작됨을 알 수 있다.

앞 절에서 도입한 동흡진기의 적용을 위하여 그림 4와 같이 보조의 구조물을 arm blade의 끝단에 부착시킨다.

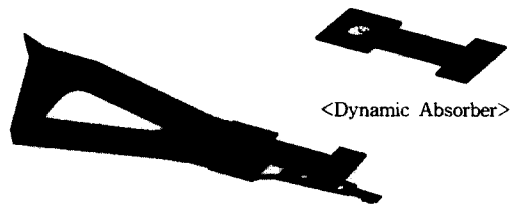


Fig. 4 HSA Model with Dynamic Absorber

동흡진기의 재료는 steel이며 그 적용의 효과를 두꺼운 arm blade와 얇은 arm blade 각각의 경우에 대해 살펴본다.

3-1. Thick Arm Blade

Blade의 두께는 1.8mm이며 blade의 끝단에서의 유효질량 m_{eff} 는 0.28g, 1차 굽힘 공진주파수는 1865Hz이다. 서스펜션의 1차 굽힘 공진주파수는 2300Hz이다. 동흡진기를 부착하지 않은 blade단품에 최대값이 300G인 반사인파가 작용할 때 시간의 변화에 따른 반발력의 변화를 여러 duration time τ 에 대하여 그림 5 ~ 7에 나타내었다.

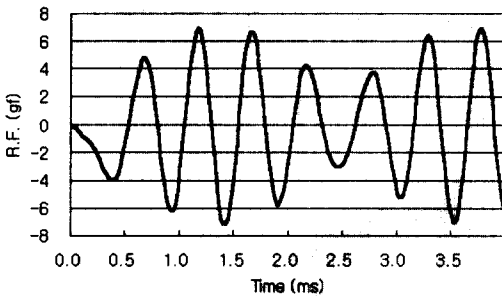


Fig. 5 Reaction Force of Head for $\tau = 0.5\text{ms}$

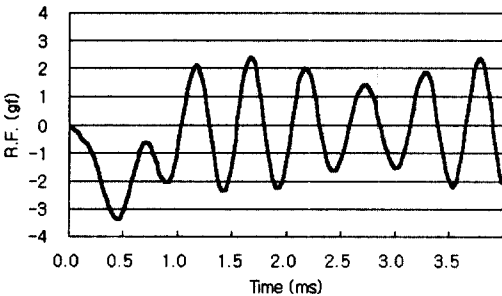


Fig. 6 Reaction Force of Head for $\tau = 1.0\text{ms}$

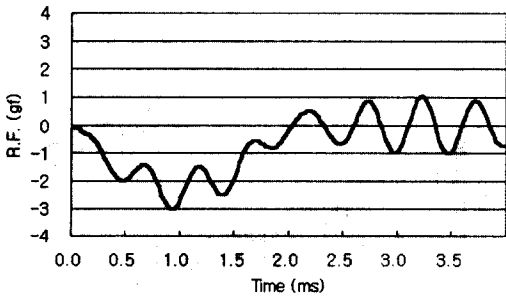


Fig. 7 Reaction Force of Head for $\tau = 2.0\text{ms}$

$\tau = 2.0\text{ms}$ 인 경우 최대반발력이 3.0gf를 넘지않아 lift-off이 발생하지 않으나 이보다 짧은 duration의 충격이 작용한 때에는 충격하중이 작용하는 동안 lift-off이 발생하게 된다. 특히 $\tau = 0.5\text{ms}$ 의 경우 arm blade의 공진주파수와 서스펜션의 공진주파수와와의 간섭에 의한 맥놀이현상으로 인하여 duration이 끝난 이후 반발력이 심하게 증가함을 알 수 있다. 즉 주어진 300G보다 훨씬 낮은 충격에서 head slap현상이 발생됨을 예측할 수 있다.

그림 4의 형태를 가진 동흡진기의 최적설계치는 식 (6)으로부터 다음과 같이 계산되어진다.

$$\mu = \frac{m_a}{m} = 0.14, \quad f_a = \frac{\omega_a}{2\pi} = \frac{\omega}{2\pi} \frac{1}{1+\mu} = 1631\text{Hz}$$

300G의 반사인파 충격하중이 작용할 때 duration time에 따른 최대 반발력의 변화를 동흡진기를 부착하였을 경우와 그렇지 않았을 경우에 대해 그림 8에 나타내었다.

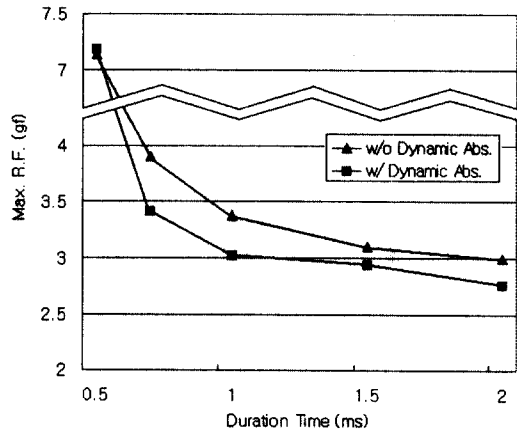


Fig. 8 Maximum Reaction Force Distribution for Various Duration Time (Thick Arm)

동흡진기를 부착하였을 경우 최대 반발력이 거의 모든 duration time에 대하여 크게 줄어들어 내충격성능이 향상되었음을 알 수 있다. $\tau = 0.5\text{ms}$ 인 경우에는 심한 맥놀이 현상으로 인하여 동흡진기의 효과가 보이지 않았다.

3-2. Thin Arm Blade

3-1절에서와 같은 동흡진기의 적용을 arm blade의 두께가 얇아 주파수가 낮은 경우에도 수행해 보았다. 두께는 1.2mm이며 blade의 끝단에서의 유효질량 m_{eff} 는 0.21g, 1차 굽힘 공진주파수는

1228Hz이다. 동흡진기의 최적 공진주파수를 식 (6) 으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu = \frac{m_a}{m} = 0.08, \quad f_a = \frac{\omega_a}{2\pi} = \frac{\omega}{2\pi} \frac{1}{1+\mu} = 1066\text{Hz}$$

설계된 동흡진기를 arm blade의 끝단에 부착하였을 때 전체 시스템의 공진모드는 1차 굽힘 834Hz(in phase), 2차 굽힘 1397Hz(out-of phase)로 바뀌게 된다. 그림 9에 300G의 충격하중이 작용할 때 최대 반발력의 duration time에 따른 변화를 나타내었다.

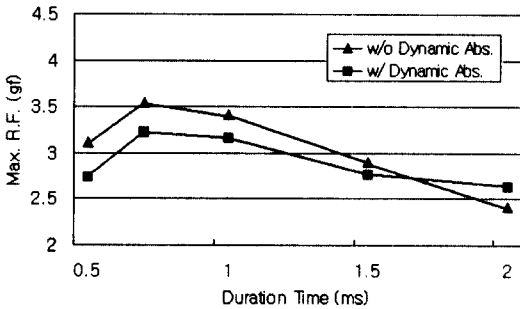


Fig. 9 Maximum Reaction Force Distribution for Various Duration Time (Thin Arm)

두꺼운 arm blade에서와 마찬가지로 동흡진기를 부착함으로써 시스템의 내충격성능이 향상되었음을 알 수 있다.

3-3. Thin Arm + Thick Arm에서의 동흡진기

3-1과 3-2에서의 동흡진기는 각각의 시스템에 맞게 최적의 주파수를 갖도록 설계되어 있다. 이러한 설계의 검증을 위하여 3-1절의 두꺼운 arm blade에 3-2절의 얇은 arm blade에 적용한 동흡진기를 사용하여 충격응답을 살펴보고자 한다. 전체 시스템의 공진모드는 1차 굽힘 726Hz(in phase), 2차 굽힘 1893Hz(out-of phase)로 바뀌게 된다.

그림 10에 300G의 충격하중이 작용할 때 최대 반발력을 나타내었다. 1.0ms를 포함하여 그보다 짧은 duration time의 충격에 대해서는 동흡진기의 효과가 나타나 내충격성능이 크게 향상되었으나 1.5ms이상의 duration time의 충격에 대해서는 오히려 동흡진기의 사용이 최대반발력을 증가시켜 내충격성능을 저하시키는 결과를 초래하였다. 이에 따라 동흡진기의 설계는 적용되는 주 시스템의 특성에 맞게 최적화되어야 전체 시스템의 성능이 개선된다는 것을 알 수 있다.

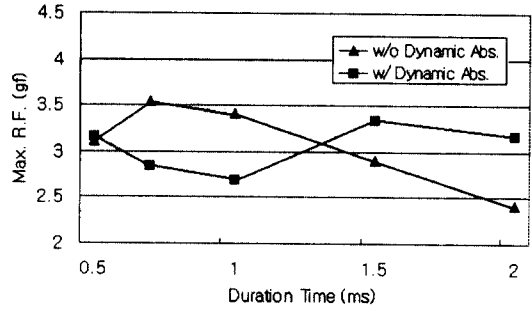


Fig. 10 Maximum Reaction Force Distribution for Thin Arm & Thin Arm with Dynamic Absorber in Thick Arm

4. 결론

HDD Actuator의 내충격성능 향상을 위하여 동흡진기의 개념을 도입하였다. 수치해석을 통하여 충격거동을 관찰하고 충격하중에 대한 헤드 밀면에서의 반발력을 계산함으로써 HSA(head stack ass'y)의 내충격성능을 살펴보았다. Arm blade와 서스펜션의 굽힘공진주파수가 가까이 있는 경우 짧은 duration time의 충격이 작용할 때 맥놀이현상으로 인하여 아주 낮은 충격에서 lift-off이 발생한다. 주 시스템인 arm blade의 특성에 맞추어 동흡진기를 설계하였고 동흡진기를 부착하였을 경우 actuator의 내충격성능이 향상되었다.

5. 참고문헌

- [1] T. Kouhei et al., "A Study of Head-Disk Interface Shock Resistance," IEEE Trans. on Mag., Vol. 31, pp. 3006-3008, 1995
- [2] M. Tokuyama et al., "Development of Shock Proof Suspension," IEEE Trans. on Mag., Vol. 35, pp. 2484-2486, 1999
- [3] N. Ishimaru, "Experimental Studies of a Head/Disk Interface Subjected to Impulsive Excitation During Nonoperation," J. of Tribology, Vol. 118, pp. 807-812, 1996
- [4] A. Miller and D. Bogy, "Effects of Shock on the Head-Disk Interface," IEEE Trans. on Mag., Vol. 32, pp. 3717-3719, 1996
- [5] J. Edwards, "Finite Element Analysis of the Shock Response and Head Slap Behavior of a Hard Disk Drive," IEEE Trans. on Mag., Vol. 35, pp. 863-867, 1999
- [6] C. Harris, "Shock and Vibration Handbook," 4th Ed., McGraw-Hill, New York