

# 시간-주파수 영역에서의 연성 충격 스펙트럼 분석을 통한 하드디스크 드라이브의 충격진동 제어

( 현장개발사례: SAMSUNG HDD 'SPINPOINT V40/P40 SERIES' )

한윤식\*\*, 강성우\*, 오동호\*, 황태연\*\*, 손영\*\*, Tho Pham\*\*\*

## Shock Vibration Control of Hard-Disk Drive

## Using Coupled Shock Spectrum Analysis in Time-Frequency Domain

Yun-Sik Han\*\*, Seong-Woo Kang\*, Dong-Ho Oh\*, Tae-Yeon Hwang\*\*, Young Son\*\*, Tho Pham\*\*\*

### ABSTRACT

A transient T-F(time-frequency) signal processing technique is applied to a tilt drop and a linear shock test rigs for identification of shock characteristics of hard disk drive (HDD). The T-F technique essentially tracks the shock characteristics of pivot point response as well as head slap and lift-off phenomena. From the T-F analysis result, the shock characteristic in HDD is modeled by the two degree of freedom coupled-dynamic system, which consists of actuator arm and suspension. As shock designing tool, the maximax shock response spectrum is employed for prediction of shock performance. Finally, the shock control technique is tested with newly designed actuator arm and suspension. Experimental head slap test result shows that the shock performance is much higher with the new shockproof designed model than the current model

### 1. 서론

최근 HDD(Hard Disk Drive)의 내충격 성능의 향상을 요구하는 경향이 크게 증대되고 있다. 이는 HDD에 가해지는 손상이 자주 현장 조립 라인이나 초기 테스트 과정, 그리고 컴퓨터 업체에서 PC에 조립하는 과정에서 일어나고 있기 때문이다. 이러한 작업중 주로 Metal to Metal 접촉에 의해 HDD가 받는 치명적인 충격입력은 대략 0.2-0.5ms 정도의 Short-duration 충격에 의해 일어나고 있다. 이때 가장 일상적으로 HDD가 손상을 입는 파괴 메커니즘은 헤드 슬랩(Head slap)과 관련되어 있으며[1], 이는 충격을 받은 서스펜션 끝단의 헤드가 디스크로부터 Lift-off하고 나서 디스크와 충돌하는 현상을 말한다. 헤드 슬랩에 의해 헤드 일부분에 Crack이 생길 수 있고, 헤드에서 떨어진 파편 조각은 Read & Write시에 HDD에 치명적인 오동작을 일으킬 수 있다. 따라서 대부분의 데스크탑용 HDD업체의 충격 스펙은 150~400G의 충격치와 0.5~2ms의 짧은 충격 Duration에서 견딜 수 있는 제품 개발을 위해 계속적으로 상향 조정 되고 있는 실정이다.

HDD의 충격 입력과 그 응답은 본질적으로 과도 특성을 가진다. 이러한 과도 신호를 효과적으로 다룰 수 있는 신호 처리 방법으로 시간-주파수 해석 방법을 사용하여 HDD 충격 특성을 규명하고자 한다. 본 논문에서는 HDD의 충격 제어를 위하여 먼저 헤드 슬랩 현상을 실험적으로 규명하고 시간-주파수 신호 처리 방법을 사용하여 충격시 HDD 특성을 파악하였고, 이를 통하여 단순화 시킨 연성된 모델을 구성하여 HDD 충격 제어 설계 도구로써 사용할 수 있도록 제안 하였다. 최종적으로 제안된 HDD 충격 제어 방법을 검증하기 위해서 현재 개발 중인 모델에 적용하였다.

### 2. HDD 연성된 충격 시스템 특성

HDD 충격 특성을 파악하기 위해서 Fig. 1과 같이 연성된 구조로 단순화하여 나타낼 수 있으며, 충격의 초기 전달은 주로 베이스/커버 구조를 거쳐서 액츄에이터와 디스크/스핀들 시스템으로 각각 전달된다고 볼 수 있다. 특히 액츄에이터의 피봇 베어링을 거쳐서 액츄에이터 아암과 서스펜션으로 연속적으로 전달되는 경로는 충격 현상과 가장 직접적인 경로로 파악된다. 추가적인 디스크/스핀들 구조를 거치는 경로 역시 무시할 수

\* 정희원, 삼성종합기술원 MEMS Lab.  
\*\* 삼성종합기술원 MEMS Lab.  
\*\*\* Samsung Information Systems America

없으나 상대적으로 그 중요성은 떨어진다고 할 수 있다. 최종적으로 서스펜션을 통과한 충격파는 디스크와의 상대 운동을 통하여 헤드 슬랩 현상이 발생한다.

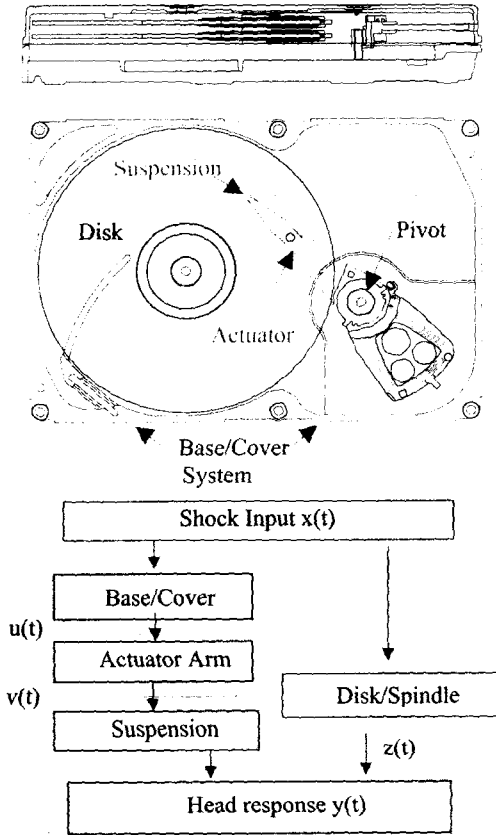


Fig. 1. Simplified coupled shock-system dynamics of HDD.

### 3. 충격 현상 규명

#### 3.1. 헤드 슬랩 측정 Set-Up

헤드와 디스크의 상대 운동을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 Tilt Drop 측정 장치를 구성하였다. 헤드와 디스크 상대 운동을 동시에 측정하기 위해서 두 대의 LDV(laser doppler vibrometer)를 서로 수직하게 설치하고 각각의 LDV 빔 초점을 매우 근접하게 위치시켜서 헤드와 디스크 간의 충격 거동을 동시에 살펴 볼 수 있었다. 또한 베이스 피봇 위치에서의 거동을 보기 위해서 Miniature 가속도계를 설치하여 측정하였고, 액츄에이터 아암에 입력으로 작용하는 신호로 사용하였다. Fig. 3은 위에서 기술한 Tilt Drop 테스트 장치로 측정된 베이스의 충격 입력/피봇점의 가속도 응답 신호와 LDV로 측정된

헤드와 디스크 두 점의 속도 신호를 보여 준다. 이때 충격 입력이 들어오는 점은 피봇점에서 가장 가까운 베이스와 바담면이 부딪치는 지점을 선정하였다. HDD가 90mm 높이에서 Tilt Drop될때 고무 시험편과 접촉하도록 하여 0.5ms 정도의 Duration이 나오도록 하였다

측정된 결과로부터 최초의 충격 입력후 전형적인 헤드의 Lift-off와 헤드 슬랩이 각각 1.4ms와 1.7ms에서 발생함을 알 수 있고, HDD 충격 현상과 관련된 중요한 시간 구간은 충격후 4ms 이내에 모두 일어난다는 것을 알 수 있다.

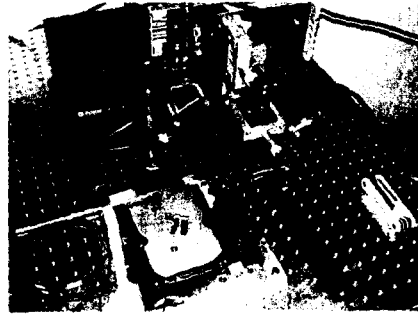


Fig. 2. Experiment set-up for tilt drop test.

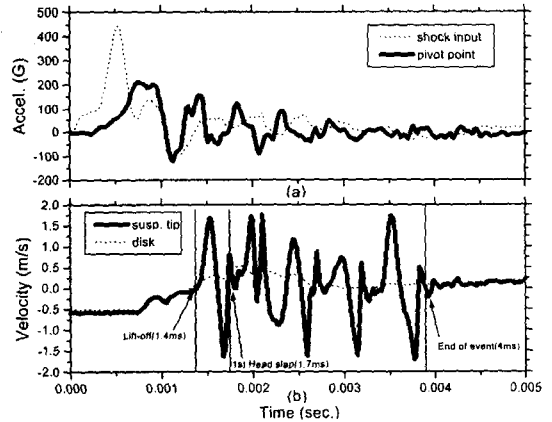


Fig. 3. (a) Shock input and base pivot point acceleration, and (b) suspension tip and disk velocity signal of the 90mm height tilt drop test for measuring lift-off & head slap.

#### 3.2. 시간-주파수 해석

충격 입력은 본질적으로 과도(transient) 특성을 가지며 그에 따른 응답 특성도 시간과 공간상에 국소화(Localize) 되어 전파되어 나아간다. 그러나 기존의 신호 처리 방법은 신호의 기본적인 특성이 이러한 시간과 공간에 따라 변하는

비정상(Nonstationary) 상태의 신호의 경우에 적용되지 못하므로 시간-주파수 영역에서 그 신호를 해석 하려는 기법이 있어 왔다[2]. 본 연구에서는 자기 위그너 분포 함수(Auto-Wigner distribution)를 사용하여 충격 신호의 과도 상태를 나타내고자 하였다.

충격 신호  $y(t)$  와 그의 힐버트 변환(Hilbert)된  $\bar{y}(t)$  신호의 Analytic 신호를  $p(t) = [y(t) + j\bar{y}(t)]/2$  라고 할 때 자기 위그너 분포함수는 다음과 같이 정의된다.

$$W_p(t, \omega) = W_{p, p^*}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} \bar{p}(t - \frac{\tau}{2}) p(t + \frac{\tau}{2}) d\tau \quad (1)$$

여기서  $\bar{p}(t)$  는  $p(t)$  의 Complex conjugate이다. 위그너 분포함수의 간섭 성분을 감소시키기 위해서 시간-주파수 영역에서 스무딩(Smoothing) 함수-2차원 가우시안함수(Gaussian)-와의 Convolution를 사용하였다[3,4].

Fig. 4는 90mm 높이에서 Tilt Drop후 측정된 베이스 피봇점의 충격 응답 신호를 시간-주파수 영역에서 해석한 그림이다. Fig. 4의 아래 그림은 측정된 과도 가속도 신호이고 왼쪽 위에 있는 그림은 파워 스펙트럼이다, 피봇점의 응답은 1ms부터 3ms사이에 약 2kHz 근방에 지배적인 운동이 일어남을 보여 주고 있으며, 이는 HDD 시스템이 Free 경계 조건에서 측정한 주파수 응답 함수의 피크 위치와 일치한다. Fig. 5는 Tilt Drop시 액츄에이터 아암에서 측정한 신호의 시간-주파수 해석 결과이고, 아암의 첫번째 굽힘(Bending) 고유진동수 (=1450Hz)가 지배적인 운동임을 보여준다. Fig. 6은 서스펜션의 끝단인 헤드 부분이 디스크와 Lift-off와 헤드 슬랩을 반복하면서 약 2kHz와 3.5kHz 대역에서 복잡한 운동을 하는 것을 보여준다. Fig. 7의 서스펜션에서 측정된 모빌리티 결과는 헤드가 디스크에 Loading/Unloading 되어 있는 상태에 따라서 각각 약 2kHz/3.5kHz 근방 성분이 지배적인 특성을 보여 준다. 즉 서스펜션의 충격 응답은 디스크와의 경계 조건이 서로 다른 Lift-off와 헤드 슬랩 현상에 의해 다소 복잡한 형태를 나타낸다. Fig. 8은 Tilt Drop시 디스크의 충격 응답을 보여준다. 이는 Fig.1에서 디스크/스핀들 시스템을 거쳐서 전파된 충격파의 경로로써 디스크의 운동이 주로 저주파수 영역에 집중되어 있음을 알 수 있고, 특히 1.5-4ms 근방에서 큰 운동을 나타낸다. 이는 서스펜션과 Lift-off/헤드 슬랩을 일으키는데 상호 작용을 하고 있는 것으로 판단된다.

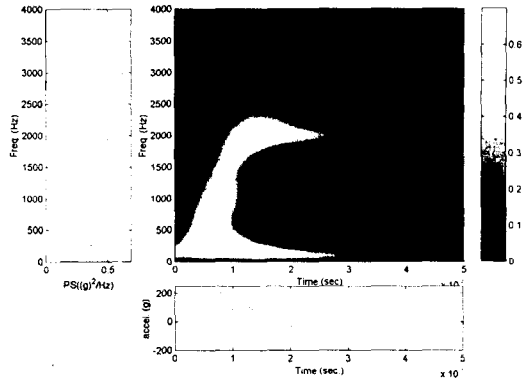


Fig. 4. T-F distribution of acceleration signal of pivot point during 90mm height tilt drop test.

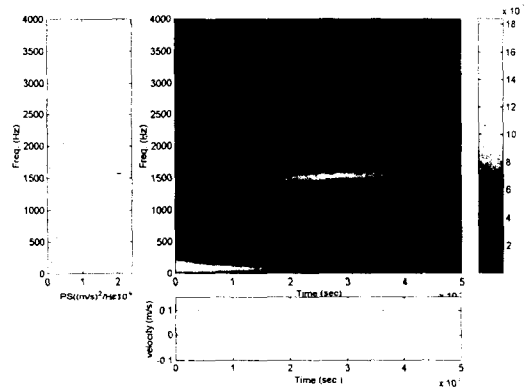


Fig. 5. T-F distribution of velocity signal of actuator arm during 90mm height tilt drop test.

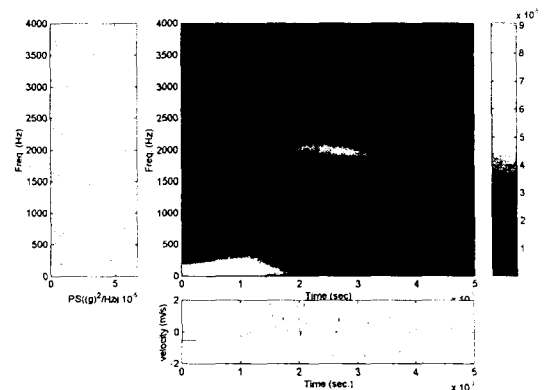


Fig. 6. T-F distribution of velocity signal of suspension tip during 90mm height tilt drop test.

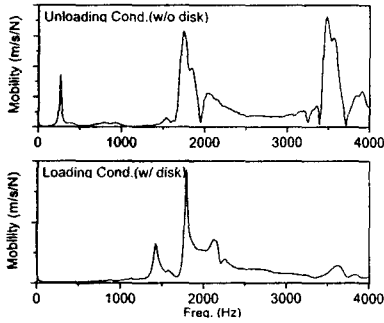


Fig. 7. Mobility frequency response function of coupled actuator arm/suspension system (excitation point: arm, response point: suspension tip)

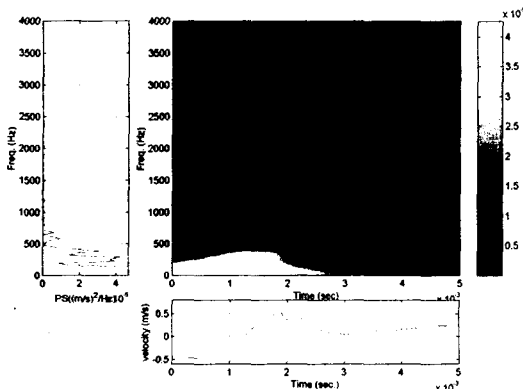


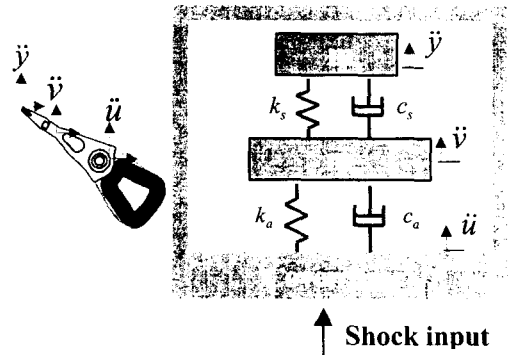
Fig. 8. T-F distribution of velocity signal of disk during 90mm height tilt drop test.

#### 4. 충격진동 제어

##### 4.1. 연성된 충격 시스템 모델링

연성된 충격 시스템 모델링을 위하여 Fig. 9와 같이 베이스 피봇점을 통한 충격 입력과 액츄에이터 아암과 서스펜션으로 서로 연성되어 있는 단순한 형태의 2자유도 시스템으로 구성하였다. 최종적인 결과는 서스펜션 끝단의 Maximax 충격 스펙트럼(Shock spectrum)[5,6]를 통해 충격 진동 제어 효과를 살펴보았다. 액츄에이터 아암과 서스펜션의 자유도는 시간-주파수 해석 방법에서 알아낸 가장 지배적인 충격 응답 모드인 첫번째 굽힘 고유 진동수만을 고려하였다. 이때 첫번째 굽힘 모드와 관련된 아암의 모달 매개 변수를 규명하기 위해서 모빌리티를 측정하고, 1-자유도 모델링으로 커브 피팅하여 질량( $m_a = 0.5g$ ), 강성( $k_a = 4.81E4N/m$ ), 감쇠( $c_a = 148Ns/m$ )를 구하였다. 서스펜션의 모달 매개 변수는 서스펜션 단품의 굽힘 고유 진동수( $\omega_s = 2200Hz$ )를 측정하고 질량은 실제 무게( $m_s = 15mg$ )를

사용하였고, 강성은 이 두 변수를 이용하여  $k_s =$



2.87E3 N/m 으로 계산하였다.

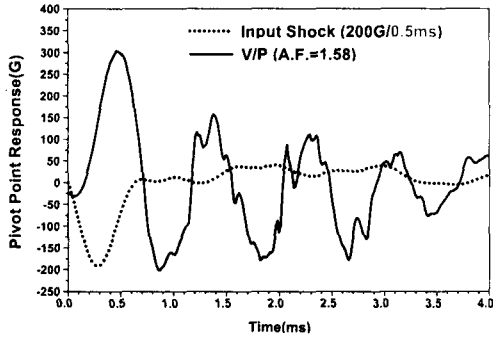
Fig. 9. Two degree of freedom dynamic modeling of coupled shock-system.

##### 4.2. Maximax 충격 스펙트럼

충격 설계 도구로서 현재 HDD 충격 특성을 예측할 수 있도록 Maximax 충격 스펙트럼을 사용하였다. Fig. 10과 11은 각각 200G/0.5와 350G/2ms 충격 실험에서 실험적으로 측정된 베이스 충격 입력신호와 피봇점에서의 충격 응답 신호를 나타낸다. 결국 Fig. 9에 나타난 충격 모델에 실제 베이스 피봇점에서 측정된 충격 가속도 신호를 2자유도 Undamped 시스템의 입력으로 하고 충격 시스템의 Maximax 충격 스펙트럼을 계산하였다.

현재 충격 요소 설계의 목적은 서스펜션의 굽힘 고유 모드가 각각 2200Hz와 3200Hz에 있을 때 아암의 굽힘 고유 모드가 어느 방향으로 선정되어야 하는 가를 알기 위함이다. Fig. 12과 13은 아암의 고유 진동수를 800Hz에서 3500Hz까지 변화시켰을 때 최종적인 Maximax 충격 스펙트럼이다. 이 그림으로부터 현재 1500Hz 근방에 있는 아암의 굽힘 모드를 좀 더 높이는 방향으로 설계하는 것이 충격 응답이 작아짐을 알 수 있고, 서스펜션의 굽힘 모드가 2200Hz보다 3200Hz로 올라가는 것이 내충격 성능이 높아짐을 예측할 수 있다. 시뮬레이션에서 아암과 서스펜션의 질량은 고정 시키고, 강성을 변화시켜서 굽힘 모드가 변화하도록 하였으며, 이는 현실적으로 설계 변경시 주로 강성 변화 효과가 더 지배적인 것에 기인하였다. 최종적으로 충격 설계 도구의 효용성을 검증하기 위해서 실제로 ANSYS 모델링을 통해 미리 확인한 1700Hz 굽힘 모드를 가진 아암을 설계하여 샘플 제작을 하였다. Table 1과 2는 최종적인 검증을 위해 제작한 샘플로 헤드 슬랩 시험을 한 결과로서 현재 양산 중인 HDD(아암:1.5kHz, 서스펜션:2.2kHz)에

비해 새로 내충격 설계된 HDD(아암:1.7kHz, 서스펜션:3.2kHz)가 Fig. 14과 15의 충격 시험기를 사용하여 0.5ms과 2ms Linear 충격 시험 결과 더 높은 레벨에서도 충격에 견딜 수 있다는 것을 보여 준다. Tilt Drop 시험에서도 현재 스펙인 90mm 높이에서 떨어뜨렸을 때 헤드 슬랩 자국이 나타나지 않았다. 참고로 Fig. 16는 헤드 슬랩에 의해 디스크가 얼마나 손상 되었는가를 내부적으로 판별하기 위한 자료이다.



(A.F.: Amplification Factor or Magnification Factor defined as the ratio of output peak to input peak)

Fig. 10. Shock response of the pivot point in the base for 200G/0.5ms shock input.

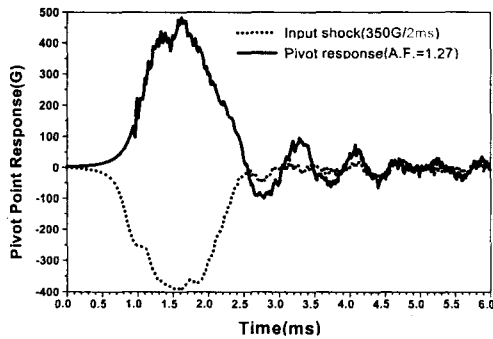


Fig. 11. Shock response of the pivot point in the base for 350G/2ms shock input.

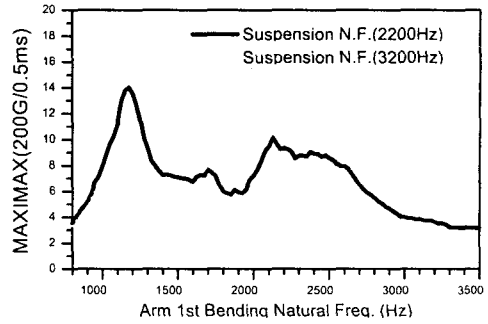


Fig. 12. Maximax response spectra of coupled system by changing the arm 1<sup>st</sup> bending natural frequency using the measured pivot signal(200G/0.5ms).

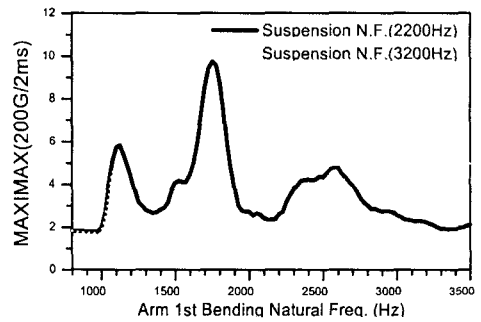


Fig. 13. Maximax response spectra of coupled system by changing the arm 1<sup>st</sup> bending natural frequency using the measured pivot signal(350G/2ms).

Table 1. Experimental verification of shock performance by threshold of head slap (0.5ms linear shock)

Level(G)	70	90	110	130	150	170	190	215
Current	L	M	M	M	M	M	M	M
New	0	0	L	L	M	M	M	M

- Current Configuration: Suspension(2.2kHz), Arm(1.5kHz)  
 - New Configuration: Suspension(3.2kHz), Arm(1.7kHz)  
 - L: Light Mark, M: Medium Mark, H: Heavy Mark.

Table 2. Experimental verification of shock performance by threshold of head slap (2ms linear shock)

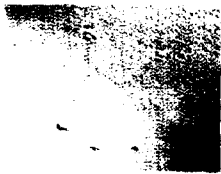
Level(G)	200	250	300	350	400
Current	L	M	M	M	M
New	0	0	L	M	M



Fig. 14 Experimental set-up of 0.5ms electromagnetic linear shock test



Fig. 15. Experimental set-up of 2ms linear drop shock test



(a) Light head slap mark



mark

(b) Medium head slap



(c) Heavy head slap mark

Fig. 16. Reference mark for severity of mechanical head slap.

## 5. 결 론

HDD의 충격 특성을 규명하기 위하여 먼저 파괴 메커니즘과 직접적으로 관련된 헤드 슬랩 현상을 실험적으로 측정하였다. 과도 특성을 가진 충격 신호를 효과적으로 처리하기 위하여 시간-주파수 해석 방법을 사용하였고, 이를 통해 충격시 HDD 특성을 액츄에이터 아암과 서스펜션의 1차 유도 급힘 모드로 단순화 시킨 연성된 모델을 구성할 수 있었다.

최종적으로 현장에서 HDD 충격 제어 설계 도구로써 효과적으로 사용할 수 있도록 Maximax 충격 스펙트럼을 제안하였고, 본 충격 제어 방법을 개발 중인 모델에 적용하여, 기존 모델에 비해 내 충격 성능이 2배 증가한 성능을 보여 주었다.

## 감사의 글

연구비를 지원해 주신 삼성전자 스토리지 사업부 관계자 여러분과, 실제 제품개발에 필요한 각종 기술정보, 도면작성 및 다양한 실험을 도와준 SISA의 많은 동료 Engineer들에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] N. Ishimaru, "Experimental studies of a head/disk interface subjected to impulsive excitation during nonoperation," *J. of Tribology*, vol. 118, Oct. 1996, pp.807-812.
- [2] S. Qian, and D. Chen, *Joint Time-Frequency Analysis*, Prentice Hall, 1996.
- [3] Y.S., Han, and C.W. Lee, "Use of Directional Wigner Distribution for Order Analysis in Rotating/Reciprocating Machines," *Mechanical Systems and Signal Processing*,13(5), pp.723-737, 1999
- [4] Y. S. Han, S. W. Kang, D. H. Oh, T. Y. Hwang, Y. Son, and J. C. Koo, "Identification of Shock Characteristics in Hard Disk Drive by using Time-Frequency Signal Processing Technique," *Asia-Pacific Magnetic Recording Conference*, 2000
- [5] S. Goyal, J.M. Papadopoulos, and P. A. Sullivan, "Shock protection of portable electronic products: shock response spectrum, damage boundary approach, and beyond," *Shock and vibration*, vol. 4, No.3, 1997, pp.169-191.
- [6] C. M. Harris, *Shock Vibration Handbook*, McGRAW-HILL, Third Edition, 1987.