

STRUCTURAL MOBILITY 분석을 통한 하드 디스크 드라이브의 소음제어

(현장개발사례: SAMSUNG HDD 'SPINPOINT V20/P20 SERIES')

°강 성 우*, 한 윤 식**, 황 태 연**, 손 영**, 오 동 호*, Tho Pham***

Noise Control of Hard Disk Drive Using Structural Mobility Analysis

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

ABSTRACT

Structural acoustic modification method based on the structural mobility analysis is applied to reduce the structure-borne noise radiated from hard disk drive system. Sound intensity techniques and ODS(Operational Deflection Shape) techniques are also used in order to provide the structural acoustic information for the mobility modification. The sound intensity is for the acoustic visualization of the noise source locations, and the ODS is for the visualization of the vibration pattern and its dynamic characteristics of the noise sources. Using visualization information of sound and vibration, local structural input mobility is reduced in the frequency band of interest by designing asymmetrical wave-stringer structure in the wave-number domain as well as frequency domain. The overall sound pressure level is reduced by 4dB and its controlled sound power radiated from the disk drive is proved to under 2.8Bel in idle-spinning mode and 3.1Bel in random-seeking mode, which are the lowest noise levels in the hard disk drive industry.

1. 서론

최근 Digital Multimedia 분야가 급속히 발달하면서 이에 따른 대용량 동영상 미디어 저장을 위한 저장매체 역시 대용량화, 고속화 과정을 겪고 있다. 현재 사용되고 있는 저장매체는 트랜지스터 IC기술과 실리콘가공기술에 기초한 '반도체 칩,' 광기술과 정밀 회전기계 기술에 기초한 '광 디스크 드라이브(ODD: Optical Disk Drive),' 자기기술과 정밀 회전기계 기술에 기초한 '하드 디스크 드라이브(HDD: Hard Disk Drive)'가 주요매체로 볼 수 있으며, 각 기술분야가 그 용량과 속도에서 급속히 발전하고 있다. 기계공학자의 입장에서, 위 모든 기술들이 비록 근간을 이루는 기초물리 원리는 다르지만 모두 '정밀 가공/기계기술'에 기초하고 있음을 주목할 필요가 있다. 또한, 21세기 현재 현존하고 있는 저장매체 중 대용량 Digital Multimedia 데이터 저장 목적으로 볼 때, 가격대 저장을 입장에서 'HDD'매체가 단연 선두의 위치에 있으며, 이러한 현실적인 수요의

급속한 증가에 의해 HDD의 기술은 최근 수년간 가격은 오히려 떨어지면서 그 저장용량은 Disk당 수 Giga Byte에서 수십 Giga Byte로 몇 십배 증가하는 개발추이를 보이고 있다.[1] 또한 일반인의 상식과는 달리 반도체와 ODD의 경우에는 현재 Micro-scale 영역에서의 배선 및 저장밀도를 갖고 있는 반면, HDD의 경우에는 Nano-scale 영역의 저장밀도로 데이터를 저장하고 있는 상태로서 보다 난이도 높은 정밀 기계/가공기술을 요구하고 있다.

HDD 분야의 이러한 대용량화/고속화/저가화 과정에서 필수적으로 HDD 정밀기계 시스템 내에 많은 불안정 요소들이 발생하고 있다. 이 중 하나가 소음으로서, HDD의 회전속도가 이미 15000rpm의 고속 회전제품이 출시되고 있는 상황에서 PC업체들에 의한 HDD업체에 대한 소음 Specification은 오히려 더욱 엄격해지고 있다. 최근의 일부 PC 업체들은 소음성능을 HDD 납품업체를 선별하는 하나의 기준으로 삼는 등, HDD 업체간 소음성능 경쟁이 매우 치열한 상태이다. 최근의 한 대형 PC업체는 소음레벨 뿐만 아니라 'Sound Quality'제어까지 요구하고 있어 HDD 개발자들을 더욱 어렵게 하고 있다. 또한

* 정회원, 삼성종합기술원 MEMS Lab.

** 삼성종합기술원 MEMS Lab.

*** Samsung Information Systems America

최근에는 HDD가 PC뿐 아니라 Digital TV 등의 Home-Application 전자제품의 대용량 기록장치로까지 파급되고 있어 소음문제는 HDD 판매에 있어 매우 중요한 항목으로 등장하고 있다.

본 논문에서는 음향 인텐시티 및 운행변형현상의 실험적 분석에 의한 Sound/Vibration의 Visualization 과정을 통하여 얻은 Structural Acoustics 정보를 이용하여, 적절한 Structural Input Mobility 설계에 의해 효과적인 소음제어결과를 얻어 양산제품개발에 성공한 현장개발사례를 보이고자 한다.

2. 음압 스펙트럼 분석

일반적으로 HDD 업계에서 사용되는 용어 입장에서, 전자회로를 담고 있는 PCB를 기준으로 PCB가 위를 바라보는 상태를 PCB-Up Position, 아래를 바라보는 상태를 PCB-Down Position라 한다. 개발을 시작한 Samsung SpinPoint V20/P20 Series Model들[2]의 경우 다양한 스피들 모터들에 대한 사전실험을 통하여 PCB-Down 방향으로 전파하는 소음레벨보다 PCB-Up 방향의 소음레벨이 3-4dB가량 높음을 알 수 있었다. Fig. 1은 다양한 Sample 실험을 통해 얻어진 전형적인 PCB-Up 음압 스펙트럼을 보여주고 있다.

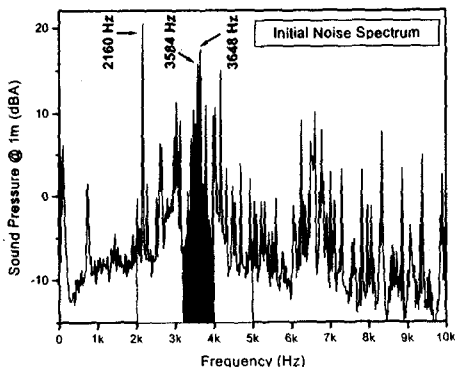


Fig. 1. Initial Sound Pressure Spectrum of Samsung Hard Disk Drive 'SpinPoint V20400.'

이와 같이 HDD 양방향의 음압레벨이 차이를 보이는 경우, 최종목적인 전체 음향파워 제어 입장에서 볼 때, PCB-Up 방향 소음을 제어하는 것이 동등한 양(ex. 3dB SPL 제어)의 음압레벨을 제어할 경우라도 그 기여도가 작은 PCB-Down 방향을 제어하는 것보다 훨씬 효과적임을 쉽게 추론할 수 있다.

Fig. 1에 볼 수 있듯이 전 주파수 대역 중 2-5kHz 대역의 소음이 지배적임(gray-color marked band)을 쉽게 파악할 수 있다. 또한 물리적인 원인들을 찾기 위하여는 Fig.1의 모든 Peak 성분들을 하나씩 분석할 필요가 있다. 이러한 성분분석을 하여본

결과, 아래의 세 주파수 성분들이 모든 HDD Sample에 대하여 공통적으로 강한 소음레벨을 보임을 파악하였다. 첫번째 주파수 성분 $f = 2160\text{Hz}$ 으로서 스피들 모터의 Pole과 Slot 수 및 회전주파수와 연계되어 발생하는 Switching Frequency이고, 두번째 주파수 $f = 3584\text{Hz}$ 으로 스피들 모터의 내부 볼 베어링의 결합주파수에 해당하며, 세번째 피크주파수 $f = 3643\text{Hz}$ 는 스피들 모터의 Inner-Race 결합주파수에 해당함을 확인하였다.

3. 음향 인텐시티 및 운행변형현상 분석

제 2 절에서 분석한 각 주파수 성분들에 대한 정밀한 구조음향해석을 위하여 음향 인텐시티 (Sound Intensity)[3,4] 및 운행변형현상 (ODS: Operational Deflection Shape)[5,6]을 실험적으로 측정하였다. Fig. 2는 HDD 근접음장에서 음향 인텐시티 실험을 보여주고 있다. 본 연구에서 사용한 음향 인텐시티 및 운행변형현상에 대한 실험방법 및 그 물리적 의미에 대하여는 저자들에게 의한 발표한 논문들[7-11]에 상세히 기술되어 있다.

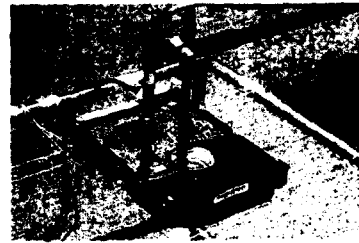


Fig. 2. Noise Source Identification by Experimental Sound Intensity Analysis of Disk Drive System.

우선 중요주파수대역으로 선정된 $f = 2\text{kHz}-5\text{kHz}$ 주파수대역에 걸쳐 적분한 음향 인텐시티를 측정 한 결과, Fig. 3과 같은 인텐시티 분포를 얻었다.

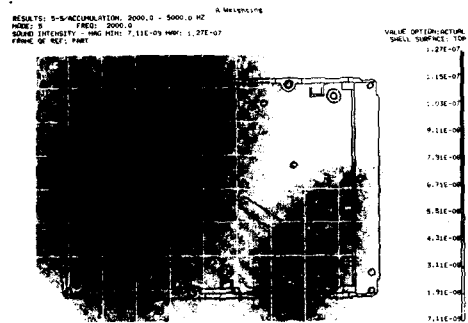


Fig. 3. Sound Intensity Distribution Map (Frequency Band $f = 2.0-5.0$ kHz in Fig. 1.)

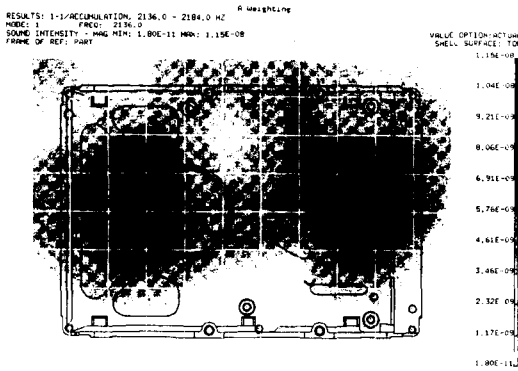


Fig. 4. Sound Intensity Distribution Map (Switching Frequency Component $f = 2160$ Hz Marked by the Left-Side Arrow in Fig. 1.)

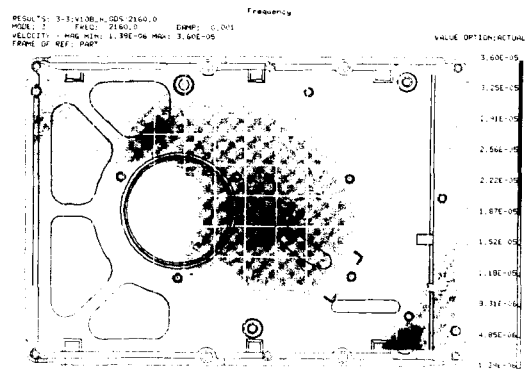


Fig. 7. Measured Operational Deflection Shape (Switching Frequency Component $f = 2160$ Hz Marked by the Left-Side Arrow in Fig. 1.)

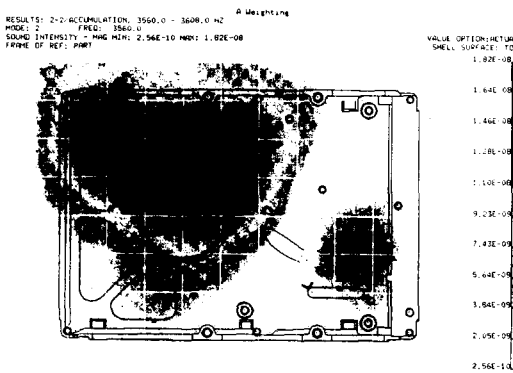


Fig. 5. Sound Intensity Distribution Map (Ball-Defect Frequency Component $f = 3584$ Hz Marked by the Middle Arrow in Fig. 1.)

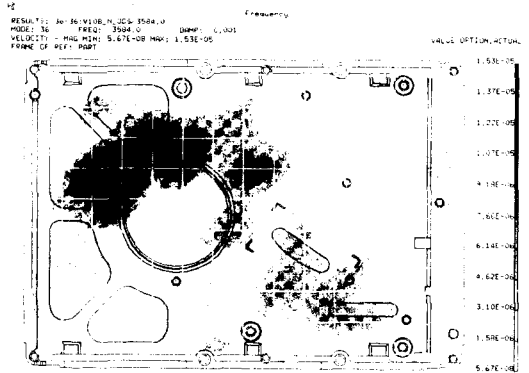


Fig. 8. Measured Operational Deflection Shape (Ball-Defect Frequency Component $f = 3584$ Hz Marked by the Middle Arrow in Fig. 1.)

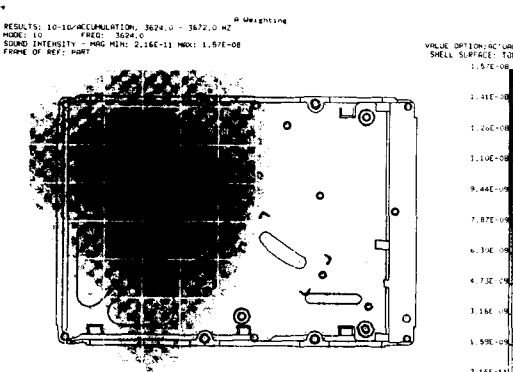


Fig. 6. Sound Intensity Distribution Map (Inner-Race Defect Frequency Component $f = 3648$ Hz Marked by the Right-Side Arrow in Fig. 1.)

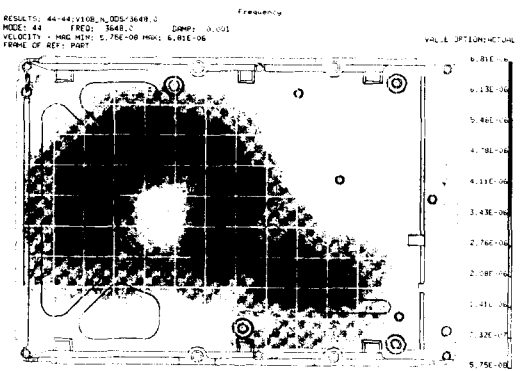


Fig. 9. Measured Operational Deflection Shape (Inner-Race Defect Frequency Component $f = 3648$ Hz Marked by the Right-Side Arrow in Fig. 1.)

Fig. 3의 결과에서 알 수 있듯이 전체적인 소음원이 스피들 모터의 좌측 상단부와 HDD의 Base 구조물과의 체결부분을 중심으로 공간적으로 형성되어 있음을 볼 수 있다.

좀 더 상세한 정보를 위하여 전술한 세가지 중요 피크 주파수들($f = 2160\text{Hz}, 3584\text{Hz}, 3643\text{Hz}$)에서의 음향 인텐시티 분포를 구한 결과 Figs. 4-6과 같은 실험결과를 얻을 수 있었다. 또한, 동일한 주파수 성분들에 대하여 LDV(Laser Doppler Vibrometer) 측정을 통하여 얻은 운행변형형상 분포는 Figs. 8-10과 같다. 첫번째 Switching 주파수(2160Hz)의 경우, HDD의 중앙부에 발생된 Vibration Pattern과 HDD Base에 밀착하여 부착된 PCB기판과의 상호작용에 의해 PCB 기판 우측에 주된 소음원이 형성됨을 볼 수 있다. 실제 HDD 제품이 있어 이러한 소음패턴은 구조설계상의 제약조건으로 인해 그 제어에 쉽지 않다. 반면, 볼 베어링 결합주파수(3584Hz)와 Inner-Race 결합주파수(3648Hz)의 경우, 그 음향인텐시티(Figs. 5-6) 및 운행변형형상(Figs. 8-9)이 유사함을 볼 수 있다.

위 두 주파수 성분들은 스피들 모터와 HDD Base를 연결하고 있는 세 나사 체결부 중 좌측상단의 나사부분을 통하여, 스피들 모터의 진동파워가 강하게 입력되어 진동파가 전파된 것으로 볼 수 있다. 이러한 진동파의 공간분포에 의해 Figs. 5-6과 같은 근접음장에서 음향 인텐시티 방사패턴이 형성된 것으로 볼 수 있다.

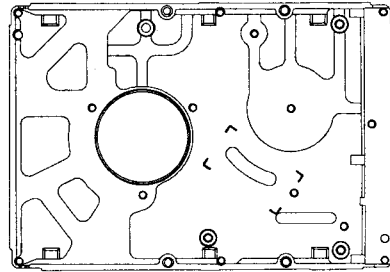
4. Structural Input Mobility 설계

잘 알려진 바와 같이 일반적으로 구조물로의 입력되는 진동입력 파워는 입력되는 힘의 제공과 구동입력 임피던스의 역수(즉, 입력 모빌리티; 속도/힘)에 비례한다.[12] 본 연구의 경우, 2-3절에서와 같이 구조음향분석을 통해 국부적인 지점에서의 진동입력파워량 자체를 줄임으로써 소음을 줄일 수 있는 논리가 성립하여, 특정부분에서의 입력 모빌리티를 제어할 수 있는 구조물 설계를 시도하게 되었다. Fig. 10은 모빌리티 개념에 의해 설계되어 양산까지 성공한 최종 HDD 설계구조를 보여주고 있다.

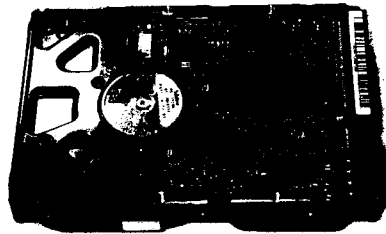
기본적으로, 대칭구조 형태로 인한 특정 주파수 하모닉 성분 소음발생을 원천적으로 방지하기 위하여 비대칭구조 설계방식을 채택하였다. 또한 입력 모빌리티의 절대레벨을 줄이기 위하여 구조물의 두께를 조절하였고, 구조물로의 입력 모빌리티 최대가 되는 주파수를, 스피들 모터의 가진주파수와 이격시키기 위하여 고주파수 대역으로 주파수 이동시킬 수 있는 상하 Wave-Stringer 형태의 구조물 설계를 시도하였다.

Fig. 12는 Fig.11의 모빌리티 구조설계 전후의 좌측상단 체결나사부 지점에서의 입력 모빌리티

측정결과를 보여주고 있다. 제어주파수 대역인 2-5kHz에서 입력 모빌리티가 2-10배 가량 감소함을 볼 수 있으며, 모빌리티 Peak를 보이던 주파수(3968Hz) 역시 3808Hz로 약 160Hz 가량 고주파수로 이동하였음을 볼 수 있다.



(a) Two-Dimensional Front View



(b) Three-Dimensional Side View

Fig. 10. Geometrical Configuration of the Local Wave-Stringer Design for Noise Control of Samsung Hard Disk Drive 'SpinPoint V20400/P20 Series.'

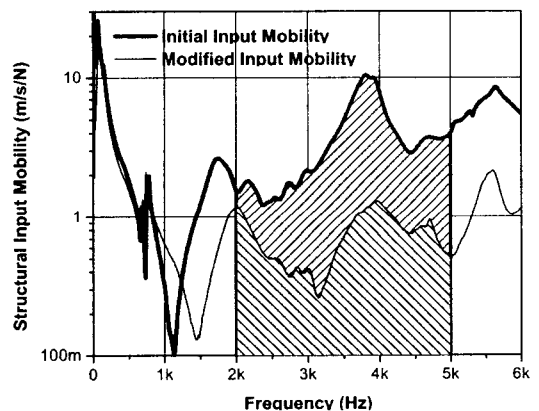


Fig. 11. Structural Input Mobility Function Measured at the Left-Side Screw Position that Shows Locally Reacting Sound/Vibration Patterns on the Base Structure as Illustrated in Figs. 3-9.

5. 소음제어 결과

Fig. 10과 Fig. 11은 모빌리티 개념에 기초한 구조설계(Fig. 10) 전, 후의 음압 스펙트럼을 각각 보여주고 있다. 예상한 바와 같이, 소음원의 성격상 현재의 모빌리티 변형설계로 크게 영향을 받을 수 없는 첫번째 소음원 주파수 2160Hz의 경우에는 큰 변화가 없으나, 3584Hz와 3648Hz를 포함하는 2-5kHz 대역의 소음이 상당부분 감소되었음을 볼 수 있으며, 전체 음압레벨로 약 4dB의 소음제어 효과를 볼 수 있었다.

대량 생산을 위하여는 위와 같은 하나의 HDD에 대한 소음검증 외에, 다양한 스피들 모터 및 각 HDD 부품들의 공차까지 허용하면서 소음감소가 이루어지는지를 반드시 확인할 필요가 있다. 그 이유는, 상당부분 많은 경우에 있어서 한두 대의 HDD에 대하여는 상당한 소음감소 효과를 보이지만 각 부품들의 Parameter Variation이 존재하는 다량의 Sample들에 대하여는 평균적으로 큰 효과를 보지

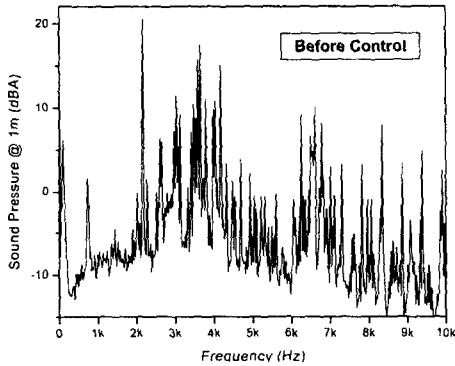


Fig. 12. Initial Sound Pressure Spectrum before Applying Wave-Stringer Design on the Base Structure of Disk Drive System.

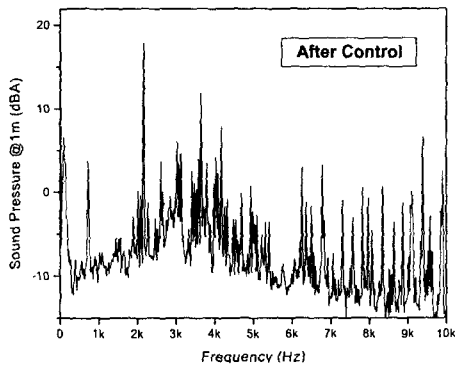


Fig. 13. Sound Pressure Spectrum after Applying Wave-Stringer Design on the Base Structure of Disk Drive System. (Overall SPL Reduction: 4dB.)



Fig. 14. Hemi-Sphere Sound Power Measurement System Using Ten Microphones in Semi-Anechoic Chamber.

못하는 경우가 발생하기 때문이다. 전술한 목적을 위하여 Fig. 14와 같은 10개의 마이크로폰을 사용하여 반무향실법(Semi-Anechoic Chamber Method: ISO 3745, ISO 7779, ANSI 12.35)에 의해 다수의 HDD Sample을 대상으로 음향파위를 측정하였다. 음향파위 실험구성은 저자들에 의한 참고문헌[9]에 상술되어 있다. Table 1과 2는 20 Sample에 대하여 측정된 제어 전, 후의 음향파위레벨을 각각 보여주고 있다.

Idle Noise/ Random Seek Noise	Average Value	Standard Deviation	Typical Value
1-Disk System (20 Samples)	3.00/3.12	0.14/0.12	3.09/3.19
2-Disk System (20 Samples)	3.05/3.17	0.14/0.13	3.14/3.25

Table 1. Measured Sound Power Levels of 'SpindPoint V20400' Disk Drive of which Rotation Speed is 5400rpm 'before Control.' (Unit: Bel)

Idle Noise/ Random Seek Noise	Average Value	Standard Deviation	Typical Value
1-Disk System (20 Samples)	2.70/2.95	0.09/0.05	2.75/2.97
2-Disk System (20 Samples)	2.79/3.04	0.09/0.06	2.83/3.07

Table 2. Measured Sound Power Levels of 'SpindPoint V20400' Disk Drive of which Rotation Speed is 5400rpm 'after Control.' (Unit: Bel)

전술한 모빌리티 구조설계에 의하여, 공회전 중인 Idle-Spinning Mode에서 0.26-0.31Bel 수준의 소음감소, 무작위로 Data를 Read하는 Random-Seeking Mode에서 0.13-0.17Bel의 음향파워감소 효과를 볼 수 있었다. 또한, 제품양산 입장에서 중요한 소음레벨의 표준편차 역시, 0.05-0.07Bel 가량 감소함을 알 수 있다. 이는 HDD 구조물이 소음설계면에서 생산공차 등의 변수 변화에 대하여 둔감한, 즉 보다 안정적인 구조설계가 이루어졌음을 의미한다고 볼 수 있다. 전체적으로 볼 때, Idle-Spinning Mode에서 평균 2.8Bel, Random-Seeking Mode에서 평균 3.1Bel 이하의 소음성능을 보이고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 음향 인텐시티 및 운행변형형상 등 일련의 실험적 소음/진동 가시화 (Sound/Vibration Visualization) 분석을 통하여 얻은 HDD의 구조소음 (Structure-Borne Noise)정보에 기초하여, Structural Input Mobility 설계개념 도입으로 얻은 실제제품에서의 소음제어 사례를 보였다.

음향학적으로 볼 때, 구조물로 입력되는 진동 입력 파워(Vibration Input Power)와 구조물로부터 방사되는 음향 방사 파워(Acoustic Radiation Power) 사이에 단순한 비례관계가 일반적으로 성립하지 않으나[12], 철저한 사전분석을 통한 결과 특수한 경우에 한하여 진동 입력 파워와 직접적인 관계가 있는 국부적인 Structural Input Mobility가 구조소음에 의한 음향 방사 파워 제어에 효과적일 수 있음을 보였다. 이러한 체계적인 음향분석 및 제어 과정을 통하여 얻은 양산 HDD의 음향파워레벨은 Idle-Spinning Mode에서 평균 2.8Bel, Random-Seeking Mode에서 평균 3.1Bel 이하의 소음성능을 보이고 있으며, 이는 HDD 업계에서 최저소음수준에 해당한다.

향후에는, PC 및 HDD 업계에서 최근 서서히 거론되고 있는 음질(Sound Quality)까지 고려하여, 'Sound Quality'에 대한 정밀분석 방법론 및 그 제어방법론 등에 대한, 좀 더 진보된 형태의 소음제어에 대한 연구를 계속 진행할 계획이다.

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] M. Miura, "HDD의 최신기술동향," 전자재료, 2001. 1월호, pp. 18-23. (일어판)
- [2] http://samsungelectronics.com/hdd/hdd_index.html.
- [3] F. J. Fahy, *Sound Intensity*, Second Edition, 1995, E&FN Spon
- [4] A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, Second Ed., 1991, Acoustical Society of America.
- [5] M. H. Richardson, "Is It a Mode Shape, or an Operating deflection Shape?," *Sound and Vibration Magazine 30th Anniversary Issue*, March 1997.
- [6] Ole Dossing, "Structural Stroboscopy - Measurement of Operational Deflection Shapes," *Sound and Vibration*, August 1988.
- [7] S.-W. Kang, Y.-S. Han, T.-Y. Hwang, Y. Son, and J.-C. Koo, "Noise Source Identification of Hard Disk Drive Using Sound Intensity and its Control," *Asia-Pacific Magnetic Recording Conference*, November, 2000.
- [8] Y. Son, T.-Y. Hwang, S.-W. Kang, Y.-S. Han, and J.-C. Koo, "The Acoustic Noise Characteristics of HDD due to the Structural Excitation of Spindle Motor," *Asia-Pacific Magnetic Recording Conference*, November, 2000.
- [9] 강성우, 한윤식, 황태연, 손영, 구자춘, "음향 인텐시티를 이용한 하드 디스크 드라이브의 소음원 파악 및 음향파워 제어", 소음진동공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, 2000.
- [10] 손영, 황태연, 강성우, 한윤식, 구자춘, "하드 디스크 드라이브에 있어서 스피들 모터의 구조적 가진에 따른 시스템의 소음특성에 관한 연구", 소음진동공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, 2000.
- [11] 황태연, 강성우, 한윤식, 손영, 전정일, "고속 HDD의 소음 제어-소특집: 정보저장장치에서의 소음, 진동", 소음진동공학회지 제9권 제4호, 1999, pp. 660-668.
- [12] L. Cremer, M. Heckle, and E. Ungar, *Structure-Borne Sound*, Second Ed., 1988. Springer-Verlag.