

# 음향 인텐시티를 이용한 하드 디스크 드라이브의 소음원 파악 및 음향파워 제어

( 현장개발사례: SAMSUNG HDD 'SPINPOINT V10200' )

\*강성우\*, 한윤식\*\*, 황태연\*\*, 손영\*\*, 구자춘\*\*\*

## Noise Source Identification and Acoustic Radiation Power Reduction of Hard Disk Drive Using Sound Intensity

\*Seong-Woo Kang\*, Yun-Sik Han\*\*, Tae-Yeon Hwang\*\*, Young Son\*\*, Ja-Choon Koo\*\*\*

### ABSTRACT

Sound intensity techniques and ODS(Operational Deflection Shape) techniques are applied to identify the acoustic noise source of a hard disk drive and its control system. The sound intensity is used to visualize the noise source locations, and the ODS information to visualize the vibration pattern and to obtain the dynamic characteristics of the noise sources. The measurement systems are customized to accurately measure the sound intensity and ODS distributions of HDD system in space domains as well as frequency domains. The measurement systems for the sound absorption and transmission loss of materials are also used to support the background data for the efficient noise control. Using the visual information of source locations and its dynamic characteristics, the partial noise barrier structure and optimum absorption are designed and its controlled sound power level is proved to be under 3.1Bel(Idle)/3.3Bel(Seek) which is the lowest level in the disk drive industry.

### 1. 서론

최근 HDD(Hard Disk Drive)의 고성능화는 고속회전을 수반하고 있으며 이로 인하여 구조적 측면에서 HDD 시스템 내에 많은 불안정 요인을 증가 시켰다. 이 중 하나가, 필수적으로 발생하게 되는 소음의 증가이다. HDD에 사용되는 스피들 모터의 회전속도가 이미 10000rpm의 고속 회전제품이 출시되고 있는 상황에서 소음 규제는 오히려 더욱 엄격해지고 있으나, 현재까지 HDD의 소음은 현장개발의 경험에 의존하는 성격이 강하였다. 또한, HDD에 대한 학계의 연구는 IEEE Magnetics Session과 관련된 전기전자 Engineer들에 의해 주도되어[1] 전문적인 Acoustics 입장에서의 접근은 거의 찾아보기 어렵다. 이러한 소음문제로 인해 고급화된 소비자의 요구를 충족시켜야 하는 컴퓨터 업체에서는 소음으로 인해 HDD의 OEM 납품을 거부하는 사례가 증가하고 있는 실정이다.

HDD의 소음은 일반기계구조물의 소음에

비하여 그 절대음압이 매우 낮은 편(약 20dBA-35dBA)이나 사용자가 HDD를 근접위치에서 사용하게 되고, 그 소음성분 역시 인간의 민감가청대역인 1-5kHz 성분들이 지배적이기 때문에 더욱 철저한 소음제어가 필요하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 세계시장을 주도하고 있는 대형 컴퓨터 업체들은 일반적으로 널리 사용되는 특정지점 원음장(Farfield)에서의 음압레벨(예. 1m 지점에서의 음압레벨)이 아닌 음원의 전체 음향방사파워를 규제기준으로 제시하고 있어 음향학적으로 '전방향 취약 음향 방사체; Globally Weak Sound Radiator' 구조설계 문제로 집약된다.

본 논문에서는 HDD의 소음 제어를 위하여, 음향 인텐시티 및 운행변형형상(ODS: Operational Deflection Shape) 측정에 의한 공간 및 주파수 영역에서의 Noise 및 Vibration의 Visualization을 통하여 소음원의 위치와 성격을 음향학적 입장에서 분석하고 이에 적절한 제어방법을 시도하여 얻은 현장개발사례를 보이고자 한다.

\* 정희원, 삼성종합기술원 Nano System Lab.

\*\* 삼성종합기술원 Nano System Lab.

\*\*\* Samsung Information Systems America

### 2. HDD의 기계적 구조 및 발생소음 성격

HDD의 구조는 일반적으로 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며, HDD에서의 소음은 디스크와 체결된 스피들 모터의 회전운동으로부터 시작된다. 이러한 원인으로부터 외부장으로 전파되는 소음은 스피들 모터로부터 직접 방사되는 소음(Direct Radiation)과 스피들 모터를 지지하는 베이스 및 커버 등의 기구적 구조물을 가진시켜 발생하는 Structure-Borne Noise 및 디스크의 회전에 의해 발생한 공기유동에 의한 소음이 내부 인클로저 공간의 음향모드 및 커버, 베이스 판구조와 연성되어 외부장으로 투과전달되는 Air-Borne Noise로 구성된다고 할 수 있다. Structure-Borne Noise는 HDD의 측면에 비해 상대적으로 넓은 방사면적을 갖는 베이스면과 커버면이 모터에 의해 가진되는 Bending Wave Vibration 성분과 밀접한 관계를 지니며, Air-Borne Noise 성분은 베이스면과 커버면의 두께가 관심있는 Bending Wave 및 Acoustic Wave의 파장보다 상대적으로 작으므로 Limp-Wall Transmission 성분이 주된 요소라고 할 수 있다. 이러한 Structure-Born Noise 및 Air-Borne Noise는 모터 회전속도, 발생 유동장 및 시스템의 기하학적 크기 및 형상과 따라 주파수별로 각기 다른 분포를 보이며, 이에 따라 소음원의 공간적 위치 역시 바뀌어 나가게 된다고 할 수 있다.

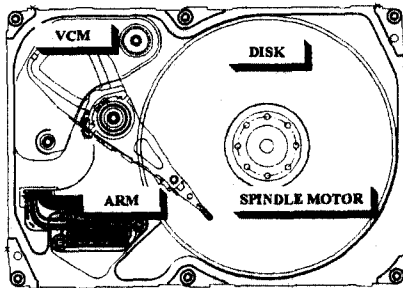


Fig. 1. Simplified Mechanical Structure of HDD

### 3. 음향 측정 시스템 구축

#### 3.1. 음향 방사파워 측정 Set-Up

전술한 바와 같이 HDD 업계에서 사용되고 있는 소음의 규격은 음향파워이며, 음향학분야에서 보편적으로 사용하고 있는 dB의 단위보다는 Bel의 단위를 사용하고 있다. 쉽게 환산할 수 있듯이 Bel단위는 dB단위의 10배를 의미하므로 음향파워 0.3Bel의 저감이란 음향파워 3dB의 저감을 의미하고, 이는 자유공간의 경우 음원을 둘러싼 360도 모든 방향에서의 음압레벨이 3dB씩 모두 저감됨(1/2의 음향에너지 저감)을 의미하므로 HDD와 같은 실제 음원의 경우, 360도 전체 방향, 모든 지점에서 3dB씩 음압을 저감시켜야 0.3Bel의 음향파워 저감을 달성할 수 있음을 의미한다. 즉, 음압레벨이 매우 낮은 HDD 시스템 실제상황에서

0.2Bel이나 0.3Bel의 음향파워 저감이 얼마나 어려운 일인가는 쉽게 상상이 갈 수 있을 것이다.

논리적인 소음제어에 앞서서 HDD의 음향파워 특성을 정확히 분석하고 개발제품의 소음성능을 OEM 및 Market에 제출하기 위하여는 우선적으로 신뢰할만한 음향파워 측정 Set-up을 갖추는 것이 필요하였다.(Fig. 2)



Fig. 2. Hemi-Spherical Sound Power Measurement Set-Up in Semi-anechoic Chamber of SISA(Samsung Information Systems America), San Jose, California.

Table 1. Geometrical Configuration of 10 Microphones for Sound Power Measurement

Position	Surface Microphone Coordinate					
	X(m)	Y(m)	Z(m)	r(m)	phi (°)	theta (°)
Surface Mic. 1	0.30	0.44	0.11	0.90	77.10	80.50
Surface Mic. 2	0.39	-0.30	0.10	0.90	78.50	37.20
Surface Mic. 3	0.39	0.28	0.16	0.90	71.30	34.90
Surface Mic. 4	0.08	0.45	0.21	0.90	65.80	73.90
Surface Mic. 5	-0.42	0.16	0.23	0.90	63.30	158.30
Surface Mic. 6	-0.42	-0.20	0.19	0.90	67.70	153.80
Surface Mic. 7	-0.13	-0.33	0.36	0.90	44.80	111.70
Surface Mic. 8	0.37	-0.04	0.34	0.90	47.90	4.57
Surface Mic. 9	-0.13	0.25	0.42	0.90	33.90	155.20
Surface Mic. 10	0.05	-0.05	0.50	0.90	8.10	45.00

HDD의 Sound Pressure Spectrum 분석결과 1kHz 이상의 고주파수 소음이 주요성분이었으며, 이러한 소음특성과 건물 내 제한된 공간 및 시설투자비를 고려하여 2m\*2m\*2m 내부체적을 갖는 반무향실을 제작하였다. 흡음Wedge 역시 저주파수까지 성능이 우수한 고가의 Glass Wedge를 사용하기 보다는 저가의 중고 Sponge Wedge를 사용하였다. 또한 공간의 제약으로 인해 반무향실을 설치, 10개의 Microphone을 사용하여 반무향실법을 사용하였다. 이 경우, 공간상의 제약으로 인하여 ISO 3745에서 규격화되어, 있듯이 음원으로부터 1m 이상의 위치에 Microphone을 설치할 수 없어 0.5m 반구상에 Microphone을 위치하였으며(Table 1), 이는 관심 최소주파수를 1kHz로 보았을 때, 1kHz의 파장이 34cm정도이므로 최소 한 파장 이상의 위치에 Microphone을 위치시켜 Far-field 조건을

만족시킨다는 음향학적 원리에 기초하였다. 측정은 A-Weighted 1/3-Octave Band 분석을 통하여 상한주파수 20kHz까지 측정하였다. 또한 암소음은 약 12dBA이며, 6dB정도의 SN비를 고려할 때 18dBA정도까지는 측정 가능하다고 볼 수 있다.

### 3.2. 음향인텐시티 측정 Set-Up

잘 알려진 바와 같이 음향 인텐시티는 임의의 위치에서 단위면적을 통과하는 음향에너지의 시간당 변화율로서 음압과 입자속도의 곱으로 나타나는 벡터량으로 정의된다[2]. 본 연구에서는 HDD 근접장에서의 음향 인텐시티 측정에 의하여 음파의 전파형태를 가시화함으로써, 음원의 위치 파악, 음향 에너지의 전파형태를 파악하고자 하였다. 또한 진술한 바와 같이 360도 전 방향으로 전파되는 총 음향파위세어가 최종 목적이기 때문에 음향인텐시티의 벡터 성분을 분석함으로써 음파의 진행방향(Directivity)를 파악하여 지향성 정보를 얻고자 하였다.

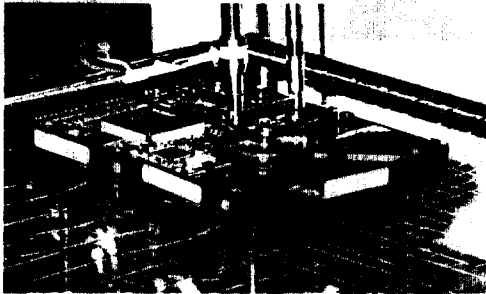


Fig. 3. Sound Intensity Measurement of HDD

일반적으로 음향인텐시티는 두 개의 마이크로폰을 이용하여 측정하게 되며 본 연구에서는 상업화된 인텐시티 프로우브(B&K 3545)를 사용하여 측정하였다. 현재 HDD의 소음이 10kHz까지 분석할 필요가 있으므로 1/4" 마이크로폰과 6mm 스페이서를 측정하였다. Fig. 3은 HDD표면의 음향 인텐시티 측정장면을 보여주고 있으며, HDD표면으로부터 3cm 상단의 표면에 대하여 11\*8지점에 대하여 공간상에 이리어싱(Aliasing)을 고려하여 1.5cm 간격으로 측정하였다.

음향인텐시티 전용 측정분석기가 없었기 때문에 일반 신호분석기(HP 35670A)을 이용하여 두 마이크로폰 신호 사이의 Cross-spectrum을 우선 받은 후, 인텐시티의 수학적 정의[2]에 따라 신호분석기에 함수 Coding하여 Active Intensity가 매 측정Grid에서 GPIB Interface를 통하여 Notebook PC로 직접 전송될 수 있도록 시스템을 꾸몄다. PC로 전송된 각 측정지점에서의 인텐시티 데이터를 I-

DEAS/TDAS 소프트웨어의 Post-processor에 넘겨 주파수별 Intensity Map을 HDD도면과 Overlap시켜 얻을 수 있도록 하였다.

또한 개발현장에서 매 모델개발 때마다 분석해야 할 개발 모델이 종류별로 그 절대량이 많기 때문에 일일이 수동으로 측정하는 방법으로는 엄청난 실험량을 제한된 시간 내에 측정하고 분석할 수가 없다. 이러한 제한된 개발시간의 이유로, 수직좌표계에 두 개의 Stepping Motor를 설치 한 후, HDD 표면상에 측정 위치별로 Intensity Probe 끝단이 움직일 수 있도록 반자동 제어회로를 꾸미어 Intensity Probe의 위치제어를 할 수 있도록 하였다.

### 3.3. ODS(운동변형형상) 측정 Set-Up

HDD 표면으로부터 발생하는 소음성분에 대한 정확한 파악을 위하여는 HDD 운행 중의 진동거동에 대한 측정이 필요하다. 이 경우, HDD 구조물의 모드 해석만으로는 방사소음과 직접적인 상관성을 얻기 어려우며, 실제 구조음향 방사현상은 운행 중의 진동패턴에 의해 결정지어지게 된다. 이러한 진동패턴은 가진원(Motor)의 업체별 특성과 입력 Force의 특성등에 따라 달라지며 이러한 정보를 반영하여 소음설계를 하여야 함은 자명하다 할 것이다. 또한, 이러한 구조적 진동특성이 음파방사면의 음향 임피던스(Acoustic Impedance) 특성과 연계되어 음향 방사 효율(Acoustic Radiation Efficiency)을 결정하게 되므로 소음저감을 위하여는 음향 방사 효율 입장을 고려하여 방사면의 진동패턴 변경이나 음향 임피던스 분포를 변경하는 방법으로 접근하여야 할 수 있다. 그러나 음향학적 입장에서 간과하여서는 안될 사항은, 이러한 진동 패턴 및 특성이 그대로 음향방사로 이루어지는 것이 아니라 방사면의 수직방사 속도 성분에 의한 음파들이 전파공간의 음향전달함수(즉, Acoustic Green's Function)를 통하여 표면전체에 대하여 선형중첩(즉, Surface Integral)되어 나타나므로[3] 진동해석 결과를 그대로 소음방사패턴으로 파악해서는 안된다는 사실이다. 예를 들어, 진동레벨이 높더라도 비효과적으로 (음향방사 효율 낮음) 소음을 방사시키는 진동패턴이 있는가 하면, 비록 진동레벨이 작더라도 효과적인 소음방사(음향방사 효율이 높음)를 이루는 진동패턴이 있을 수 있다. 저자들의 의견으로는 지금까지 많은 진동제어 엔지니어들에 의해 진동제어가 곧 소음제어라는 단순한 논리에 의해 HDD 개발현장에서 수년간 많은 개발이 이루어지고 있었으며, 이러한 논리의 오류로 인해 만족할 만한 소음제어를 이루지 못한 핵심적인 이유가 바로 이점으로 파악되어진다.

전술한 운행 중의 진동정보는 ODS(Operational Deflection Shape)[4] 측정으로부터 얻어질 수 있으며, 이는 그림 4와 같이 두 개의 진동센서와 2 채널 FFT Analyzer를 이용하면 측정이 가능하다. 이러한 ODS의 측정결과는 절대 변위로 구성되어 있으므로 구조물의 실제 운행 중의 거동을 가시화(Visualization)하는데 효과적이라고 할 수 있다. 또한 전술한 음향 인텐시티 Map과 ODS Map을 연계분석할 경우 HDD 방사소음 성분 및 형태에 대한 좀 더 명확한 정보를 얻어낼 수 있다고 볼 수 있다.

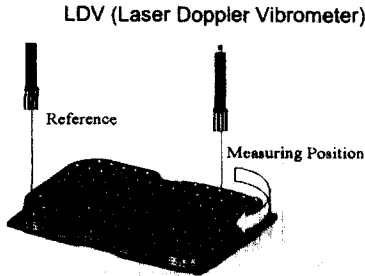


Fig. 4. ODS Measurement of HDD

본 연구에서는 Accelerometer의 Mass 효과를 최소화하고자 하나의 기준 Accelerometer를 HDD 측면에 부착한 후, 하나의 LDV (Laser Doppler Vibrometer)를 측정표면 위치별로 옮겨가면서 그 전달함수를 측정하였다. 관심있는 주파수영역에서의 Bending Wave 파장을 고려하여 1cm간격으로 10\*15지점에 대하여 Scanning을 하였고 기준 Accelerometer에서의 Auto-spectrum과 각 측정 위치사이의 Transfer Function Data를 Notebook PC로 전송시켜 Sound Intensity Post-processing에 사용하였던 I-DEAS/TDAS 소프트웨어의 Post-processor에 넘겨 주파수별 ODS Map을 HDD도면과 Overlap시켜 얻을 수 있도록 하였다.

### 3.4. 흡음률 및 차음률 측정 Set-Up

흡음재의 흡음률은 Two-Microphone Method[5]에 기초한 실험장치를 자체적으로 설계하여 제작하였다.

측정주파수 영역은 현재의 HDD 스펙트럼을 고려하여 8kHz까지 측정 가능하도록 설계하였고, 신속한 측정을 위하여 백색잡음의 Random Excitation 신호를 이용하여 측정하였다. 상용 Impedance Tube(B&K 4206)의 경우 측정 가능한 상한주파수가 6.4kHz에 국한되기 때문에, 상한주파수를 8kHz까지

올릴 수 있도록 측정시스템을 자체 설계/제작하였으며, Two-Microphone Method 이론[5]을 상용 신호분석기(HP 35670A)에 함수 Coding하여 PC로 Data를 넘긴 후 신호처리하지 않고 직접 FFT Analyzer 화면상에서 신속한 측정이 가능하도록 하였고, 하나의 시편에 대하여 최종적으로 약 1분만에 흡음률측정이 가능하였다.

설계한 측정장치는 총길이 50cm, 높이와 폭 15cm의 소형측정장치로서, 재료비 및 가공비까지 합하여 총 120만원에 제작한 저가의 측정장치이나 그 측정정밀도는 측정주파수 상한선 및 Two-Microphone 기법의 Bias Error면에서 우수한 성능을 보임을 확인하였고, 이러한 시스템의 측정오차특성에 대한 분석을 모두 마친 후 실제 HDD개발에 필요한 각종 흡음재 분석을 착수하였다.

차음재의 차음투과손실 측정은 상용 Impedance Tube(B&K 4206)를 변형하여 시편을 통과한 투과음 측정이 가능하도록 한 측정장치를 이용하였다.

Fig. 5 는 두께 2mm의 발포흡음재가 단일 Layer일 경우(2mm)와 이중 Layer일 경우(즉, 4mm)에 대한 주파수별 흡음률 측정결과를 보여주고 있다. 단일 Layer의 경우에 비해 이중 Layer일 경우 저주파수 흡음성능이 대폭 향상됨을 볼 수 있으며 이는 잘 알려진 적층에 따른 흡음성능 향상이론[6]과 일치하고 있다. 그러나 HDD에 사용 가능한 4mm의 한정된 두께효과에 의하여 전주파수 대역에서 흡음률이 0.6을 넘지는 못하고 있음을 볼 수 있다.

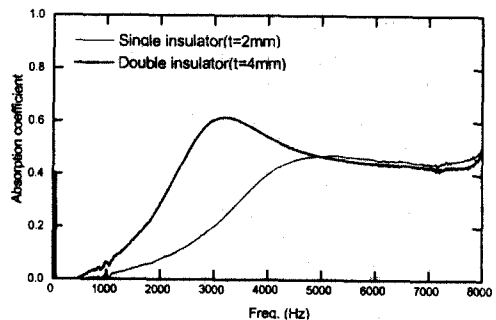


Fig. 5 Random Excitation 신호와 자체설계한 흡음률 측정시스템에 의해 측정된 HDD 흡음재의 흡음률 측정결과 예

Fig. 6 는 HDD의 구조물에 사용될 수 있는 금속 재질의 주파수별 투과손실을 측정한 결과를 나타낸다. 측정금속으로는 각각의 밀도가 다른 알루미늄, 스테인레스 스틸, 황동을 선정하였다.

Fig. 6 으로부터 알 수 있듯이 전형적인 음향 질량의 법칙(Acoustical Mass Law)[3]를 따르고 있음을 확인할 수 있으며, 금속 재질의 차음 효과는 고주파수 영역에서 그리고 밀도가 높은 재질일수록 더욱 효과적임을 알 수 있다. 황동과 스테인레스 스틸의 차음성능은 거의 유사함을 보이며, 가격적인 측면에서 황동이 스테인레스 스틸보다 약간 더 고가인 점을 감안하여 지금의 알루미늄 금형설계구조에 스테인레스 스틸을 효과적으로 부분차음에 사용하고자 하였다.

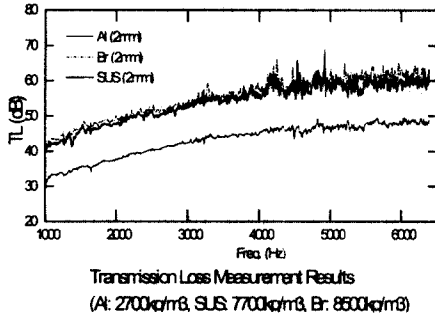


Fig. 6 두께2mm 차음재의 투과손실 측정결과 (알루미늄(Al), 황동(Br), 스테인레스 스틸(SUS))

#### 4. 개발사례: Samsung 'Spinpoint V10200'

##### 4.1. 'Spinpoint V10200' 모델 개요

3.5인치 Disk Drive로서, Data 저장용량은 1-Disk 제품인 경우 10.2GB(기가바이트), 2-Disk 제품인 경우 15.3GB, 20.4 GB을 가지며, 스피들 회전속도 5400rpm, 평균 Data Seek Time 8.5ms의 성능을 갖춘 HDD로서, 1999년 7월 개발에 착수하여 1999년 11월 개발 완료, 1999년 12월에 양산되어 2000년 4월 현재 시장에 출시/판매되고 있는 모델이다[7]. 동종 HDD 중 세계 최저소음성능을 보이는 모델로서, IBM, Seagate, Quantum, Maxtor 등 해외유수의 업체와의 경쟁에서 국내업체 제품으로서 기술우위의 소음성능을 확보한 제품이다.

##### 4.2. 소음스펙트럼

Fig. 7는 개발착수시점에서 개발 Prototype HDD Model로부터 방사되는 소음 스펙트럼 형태를 보여주고 있다. 측정은 무향실에서 HDD Cover면에 수직인 방향으로 원거리 1m 지점에서 측정하였다. 기본적인 Spectrum 기준을 잡기 위하여 HDD를 기준으로 수직축을 따라 Cover, Base 양방향에서 측정하여 상대적인 음압비교를 하여 본 결과 Cover 방향으로의 소음이 전반적으로 Base 방향보다 약

3dB 높게 평가되었다. 이 같은 경향은 모든 HDD 구조물의 특성이라기보다는 HDD의 기계구조물 성격상 모델별로 그 경향이 다르다고 볼 수 있다. 이러한 입장에서 SpinPoint V10200 모델의 경우, HDD Cover 방향으로의 소음방사현상을 집중적으로 분석하였다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 약 1.8kHz로부터 3kHz까지의 주파수대역에 음향에너지가 집중분포하고 있으며, 광대역에 걸쳐 대부분의 소음 성분들이 스펙트럼선상에서 강한 피크 형태로 나타남을 볼 수 있다. 이러한 강한 피크 성분들은 소음발생의 근본적인 원인을 제공하는 스피들 모터가 회전시 발생시키는 진동 주파수 성분들과 깊은 관련이 있다.

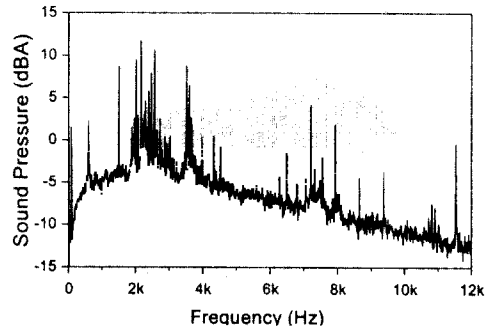


Fig. 7. Sound Pressure Spectrum of SpinPoint V10200

볼 베어링을 사용하는 소형 브러쉬리스 (Brushless) DC 모터의 경우, 스피들 모터에서 발생할 수 있는 가진 성분으로는, 회전자와 고정자 사이에 발생하는 불평형 반경 방향 자기력(Unbalanced Radial Magnetic Force), 코깅 토크(Cogging Torque), 그리고, 토크 리플(Torque Ripple) 등의 전자기적인 가진력과 디스크 체결 시에 잔류하는 질량 불평형 또는 정렬 불량에 의한 디스크 회전체의 주기적 가진력과 볼 베어링 구조물들의 결합에 의한 가진력 등을 들 수 있다. 스피들 모터가 발생시키는 코깅 토크(Cogging Torque)는 자기 저항의 변화가 회전각에 대하여 변동하는 일종의 자기 흡인력의 변화라 할 수 있으며 그 주파수는 모터의 Pole 수와 Slot 수의 최소공배수와 회전주파수와의 곱의 정수배 성분으로 나타난다. 본 개발 모델의 스피들 모터는 8 pole, 12 slot을 갖고 있으며 5400rpm(90Hz)으로 구동되고 있기 때문에 2160Hz, 4320Hz, 6480Hz,...의 코깅 토크 주파수들을 갖는다. Fig. 7에서 보면 첫번째 코깅 토크 주파수 성분(2160Hz)의 진동이 구조물을 통해 발생시킨 성분이 전체 음압에서 가장 큰 Level을 보임을 알 수 있다. 또 한가지 소음 스펙트럼 형성에 큰 영향을

끼치는 요인은 스핀들 모터 내부의 볼 베어링들의 결합에 의한 가진 주파수 성분들로서 이 성분들을 일정한 Harmonics를 형성하지 않고 전 대역에 걸쳐 고루 분포하는 Peak 성분들과 깊은 관련이 있다. 이 성분들 중 본 개발모델의 경우 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 두번째로 강한 피크를 보이는 2568Hz 및 근처의 Peak 성분들은 볼 베어링들의 가진 주파수와 상관성이 있는 성분들이다. 또한 소음스펙트럼의 저변에 깔려있는 스펙트럼 패턴은 A-weighting Curve와 구조물의 Structural Modes 및 내부 유동소음의 영향으로 볼 수 있다.

### 4.3. 음향 인텐시티 분포

전술한 음향 인텐시티 측정 시스템을 이용하여, 음파의 전파형태를 가시화하고 각 주파수별 소음원의 발생위치를 분석하고자, HDD의 Cover면과 Base표면에 대하여 Scanning하여 가면서 HDD 구동상태에서 근접장 방사음향 인텐시티를 3차원 측정하였다.

모터위치를 나타내며, 우측 원형 지점은 HDD의 Actuator를 고정하는 Pivot Bearing Screw 위치를 나타낸다. 인텐시티 Map에서 진동원으로 볼 수 있는 스핀들 위치 중심에서 벗어난 등근 원 형태로 인텐시티가 방사되고 있음을 볼 수 있다.

효과적인 소음제어를 하기 위해서는 주파수별로 소음원의 위치를 각각 정확한 분석할 필요가 있다 할 수 있다. Fig. 9는 가장 강한 음파성분인 코깅 주파수 성분 2160Hz의 인텐시티 분포를 보여주고 있다. 이 주파수 성분이 발생하는 소음원의 위치는 스핀들 모터로부터는 거리가 먼 우측 Pivot Bearing 위치 상단부분에서 강한 음향방사가 이루어짐을 알 수 있다. 또한, Fig.10은 두번째로 강한 음파성분인 2568Hz의 볼 베어링 결합 가진으로 인한 성분에 대한 인텐시티 분포를 보여주고 있다. 소음원의 위치가 Pivot Bearing 위치와 모터 사이로 이동하여 있음을 볼 수 있다. 위 중요 주파수 성분들에 대한 인텐시티 분포에서 또 한가지 주목할 사항은 주요 소음원 위치로부터 음파의 전파방향이 방사표면의

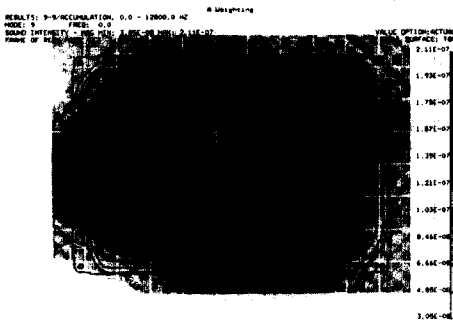


Fig. 8. Sound Intensity Distribution Map

(Whole Frequency Band:  $f = 10\text{Hz}-10\text{kHz}$ )

Fig. 8은 관심주파수 대역 전체에 걸친 10Hz - 10kHz까지의 음향 인텐시티 벡터를 벡터합한 전주파수대역에 대한 음향 인텐시티 분포를 나타내는 Contour Map과 Vector Map을 보여주고 있다. Fig. 8에서 좌측 원형 지점은 스핀들

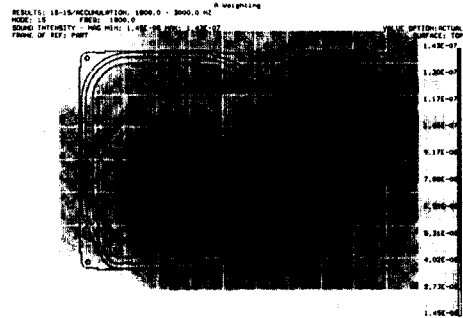


Fig. 9. Sound Intensity Distribution Map

(Cogging-Torque Frequency  $f = 2160\text{Hz}$ )

수직방향보다는 양쪽 방향으로 약 45도의 지향성을 갖고 전파하고 있다는 사실이다. 이는 효과적인 음향파워 제어를 위하여는 HDD로부터의 지향성제어도 고려하여야 함을 의미한다.

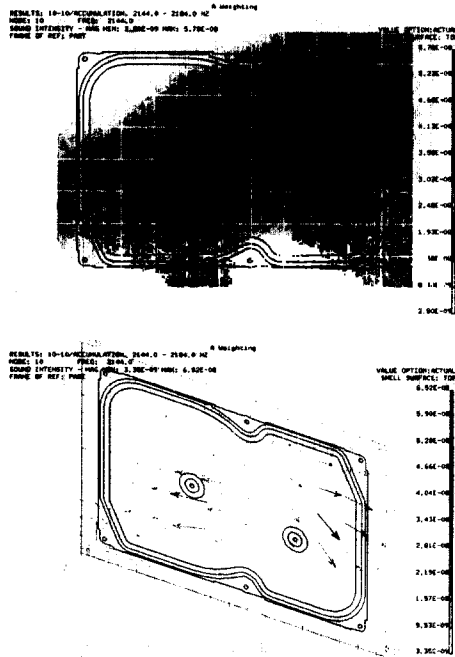


Fig. 10. Sound Intensity Distribution Map  
(Ball-Bearing Defect Frequency  $f = 2568\text{Hz}$ )

#### 4.4. ODS 분포

인텐시티 분포로부터 주파수별 소음원의 공간적 위치를 파악함과 동시에, 소음원의 동적거동을 파악하기 위하여 전술한 ODS 측정을 수행하였다. Fig. 11은 코깅 주파수 성분 2160Hz에 대한 공간상의 ODS 분포 Map을 보여주고 있다.

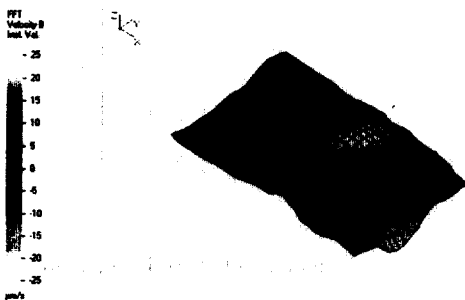


Fig. 11. ODS (Operational Deflection Shape) Map  
(Cogging-Torque Frequency  $f = 2160\text{Hz}$ )

Fig. 11에서 볼 수 있듯이 대략 HDD 중심선을 기준으로 좌우측으로 각각 유사한 진동폭을 가지고 서로 반대위상으로 진동하는 패턴임을 알 수 있다.

이러한 공간상의 ODS 패턴과 Fig. 9의 음향 인텐시티 Map과 비교하여 볼 때, 전반적으로 유사한 패턴을 취하고 있는 듯이 보이나, 우측 진동패턴이 좌측 진동패턴보다 효과적으로 음향방사를 일으키고 있음을 알 수 있다. 좌측진동 패턴을 자세히 보면 Positive Vibration 패턴 속에 모터를 중심으로 국부적으로 원형 Negative Vibration 패턴을 보이고 있으며, 이러한 진동패턴은 음향학적으로 Hydrodynamic Short-Circuit[8] 원리에 의해 비록 그 진동 Amplitude가 크더라도 음향방사효율이 떨어지는 진동형태라고 할 수 있다. 즉, ODS Map에서 좌측의 모터를 중심으로 강하게 진동하고 있는 패턴은 음향 인텐시티 Map에서 볼 때 우측 진동패턴에 의해 방사된 음파에 의해 거의 상쇄되어 인텐시티의 벡터방향이 바뀌지 않고 있음을 볼 수 있다. 이러한 경우 모터축를 중심으로 하는 국부진동 Damping을 가할 경우 진동제어면에서 이득을 볼 수 있으나 소음제어면에서는 거의 효과가 없다고 할 수 있다. 이 같은 예에서 알 수 있듯이 진동제어 자체가 반드시 소음제어를 의미하는 것이 아니며 구조물로부터 음향방사가 이루어지는 음향학적 원리를 간과해서는 안 됨을 다시 한번 음미할 필요가 있다. 또한 Fig. 9의 음향인텐시티 벡터 방향이 서로 바뀌는 위치가 Fig. 11의 우측진동 Antinode 근처임을 볼 수 있으며 이 원리가 바로 잘 알려진 음향인텐시티에 의한 초음원 탐지의 기본원리라 할 수 있다.

#### 5. 소음제어

우선적으로 소음 스펙트럼으로부터 제어하고자 중요주파수 성분들에 10위까지 Ranking을 하여 각 주파수별로 각기 분석을 하였다. 그 다음, 음향 인텐시티와 ODS 측정결과를 각 주파수별로 모두 분석한 후, 구조물 재질의 차음성능 측정결과를 함께 고려하여 효과적으로 소음방사효율을 떨어뜨리는 'Weak Sound Radiator' 구조물이 될 수 있도록 HDD Cover에 Fig. 12와 같이 '9'자 형상의 두께 1mm, 스테인레스 스틸 Partial Noise Barrier를 설계하였다. 이러한 부분구조물 설계시 특히 신중을 기한 부분은 설계 후 구조 진동모우드 변화를 살펴 Partial Barrier 삽입 후 원치 않은 다른 가진주파수가 오히려 크게 발생할 수 있는 가능성을 상세히 검토할 필요가 있었다. 또한 소음제어를 효과적으로 하기 위하여, 전면에 걸친 Barrier 형상보다는 가장 필요로 하는 부분에 필요한 형태로 부분적으로 구조물을 보강하여 전체적으로 효과를 극대화시킬 수 있도록 하였다. 한가지 극단적인 Case Check로서 전면에 걸쳐 현재 Barrier와 동일 재질, 동일 두께의 Barrier를 사용할

경우, 소음스펙트럼의 주파수별 우월순위만 약간씩 변할 뿐 전체적으로 약 1dB이내의 저감 효과밖에 보이지 못함을 확인하였다.

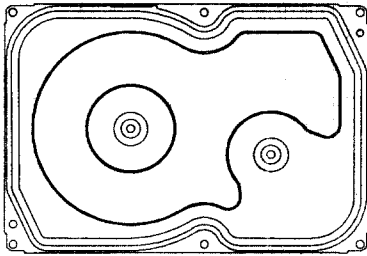


Fig. 12. '9'-Shape Partial Noise Barrier for the Acoustic Noise Control of HDD

또한, HDD Base 방향에서도 각 주파수별 음압 Ranking을 기초로 각 주파수별로 음향 인텐시티 분포와 ODS 분포를 분석하였다. 이러한 결과를 토대로 HDD의 PCB기판 아래 영역에 대하여 약 4mm 두께의 활용가능한 공간에 최적의 흡음재를 부분적으로 사용하고, 3.4절에서와 같은 흡음률 측정장치를 이용하여 다양한 재질을 입수하여 흡음특성을 분석하여 Database화 한 후, 본 HDD모델의 소음스펙트럼의 중요주파수 대역에서 흡음률이 가장 높은 흡음재를 선정하여 부착하였다. 이러한 흡음기술에 의해 전체 약 1dB정도의 소음저감을 볼 수 있었다. 그러나 HDD 구조물의 특성상 흡음재 사용이 가능한 공간이 너무 작은 현실적인 제약을 감수할 수밖에 없었다.

Fig. 13은 주파수특성에 맞추어 선정된 흡음재와 Fig.12의 Partial Noise Barrier를 설계/ 적용 전, 후의 Sound Pressure Spectrum 변화를 보여주고 있다. 초기의 설계 주파수대역인 1.8kHz-3kHz대역의 소음 Spectrum 성분들이 크게 떨어졌으며, 1m 전방에서의 전체 음압레벨이 1m 28dBA에서 20dBA로 8dBA의 저감을 달성할 수 있었다.

위와 같이 설계된 Partial Noise Barrier를 금형으로 다수 제작한 후 2-Disk, 20.4GB 모델 20대, 1-Disk, 10.2GB 모델 20대에 적용, 음향파워측정을 한 결과 Table 2와 같은 결과를 얻었다. HDD가 공회전 할 때 발생하는 Idling Sound Power Level과 Data를 Seeking할 때 발생하는 Random Seeking Sound Power Level의 대표값이 각각 3.1Bel/3.3Bel 이하의 매우 낮은 소음성능을 보이고 있음을 알 수 있다. HDD 업계에서 선진경쟁업체인 IBM, Seagate, Quantum, Maxtor 제품들의 소음 성능과 비교하여 볼

때, 이들 제품들의 Idling Sound Power Level/Random Seeking Sound Power Level이 각각 3.2Bel-3.6Bel/3.8Bel-4.3Bel정도로서, Idle Noise와 Seek Noise 두 부문 모두에서 SpinPoint V10200모델이 업계 선두에 있음을 알 수 있으며, 특히 Seek Noise 부문에서는 HDD 선진경쟁업체 제품보다 최소 0.5Bel 낮은 훨씬 앞선 소음성능을 보임을 알 수 있다.

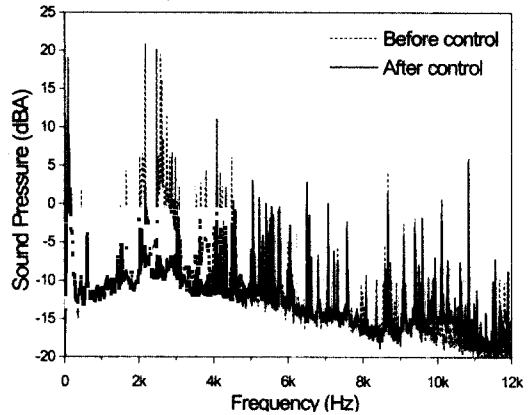


Fig. 13. Sound Pressure Spectra Measured at 1m before Noise Control and after Noise Control (SPL before control: 28dBA, SPL after control: 20dBA)

Table. 2 Measured Sound Power Level of Spinpoint V10200 Model Using Optimum Absorbing Material and Acoustic Noise Control Barrier

Sound Power Level (Bel) Idle Noise/ Random Seek Noise	Average Value	Standard Deviation	Typical Value
1-Disk System (20 Samples)	2.96/3.20	0.08/0.53	3.01/3.23
2-Disk System (20 Samples)	3.03/3.25	0.09/0.61	3.09/3.29



## 6. 결 론

HDD로부터 방사되는 소음의 정확한 분석을 위하여 음압스펙트럼 및 음향파워, 음향인텐시티, 운행변형형상(ODS)을 정밀하게 측정할 수 있는 측정장치를 제작하였고, 이러한 일련의 실험적 방법을 통하여 HDD의 소음/진동을 효과적으로 가시화하였다. 이러한 실험적 가시화를 통하여 소음원에 대한 정보를 주파수 영역 및 공간영역에서 체계적으로 파악하고자 하였다. 위와 같은 다양한 분석결과들과 흡음률, 차음률의 정밀측정에 의한 분석결과를 실제 HDD 제품개발에 적용하여 Idle Noise Power 3.1 Bel, Random Seek Noise Power 3.3Bel의 업계 최저소음을 달성한 제품개발 사례를 보였다.

본 연구에서 수행한 실험적 분석기법들을 더욱 정교하게 활용하여 가면서 현재 연속적으로 HDD 제품개발을 하고 있으며, HDD 소음,진동의 근본원인을 제공하고 있는 스피들 모터로부터 발생하는 진동 및 소음을 제어하는 연구도 현재 함께 병행 중이다[9].

## 감사의 글

연구비를 지원해 주신 삼성전자 스토리지 사업부 관계자 여러분과, 실제 제품개발에 필요한 각종 정보 및 기술적 조언을 아끼지 않은 SpinPoint V10200 모델 개발팀장 Tho Pham 및 SISA의 많은 동료 Engineer들과, Prototype 제작을 도와준 Wilson Long에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] N. Schirle and D K Lieu, "History and Trends in the Development of Motorized Spindles for Hard Disk Drives," IEEE Transactions on Magnetics, 32(3), 1996, pp. 1703-1708.
- [2] F. J. Fahy, *Sound Intensity*, Second Edition, 1995, E&FN Spon
- [3] A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, Second Ed., 1991, Acoustical Society of America.
- [4] O. Dossing, "Structural Stroboscopy - Measurement of Operational Deflection Shapes," B & K, 1988, pp.18-26.
- [5] A. F. Seybert, "Two-sensor methods for the measurement of sound intensity and acoustic properties in ducts," Journal of the Acoustical Society of America., 83(6), June, 1988, pp.2233-2239.
- [6] U. Ingard, *Sound Absorption Technology*, 1994, Chap. 3,4.
- [7] [Http://www.samsung-storage.com/](http://www.samsung-storage.com/)
- [8] L. Cremer, M. Heckle, and E. Ungar, *Structure-Borne Sound*, Second Ed., 1988. Springer-Verlag.
- [9] 황태연, 손영, 한윤식, 강성우, "하드디스크 드라이브에 있어서 스피들 모터의 구조적 가진에 따른 시스템의 소음특성에 관한 연구", 소음진동공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, 2000.