

# HDD 소음 저감을 위한 음향/진동 분석

## Vibro-acoustic analysis for the reduction of HDD noise

정철호<sup>†</sup>, 김성일\*, 이정권\*, 홍어진\*\*, 김우성\*\*, 이호성\*\*

Cheol-Ho Jeong<sup>†</sup>, Sung-Il Kim\*, Jeong-Guon Ih\*, Eo-Jin Hong\*\*, Woo-Sung Kim\*\*, Ho-Seong Lee\*\*,

**Key Words** : HDD, noise reduction, vibro-acoustic analysis

### ABSTRACT

최근 저소음형 fan 의 도입과 컴퓨터 케이스의 설계 변경 등으로 컴퓨터 소음이 저감되어, HDD 나 CD/DVD-ROM 등에서 발생하는 협대역 소음들이 문제가 되기도 한다. 특히 HDD 의 소음은 회전 속도의 증가와 휴대용 컴퓨터나 외장 HDD 와 같이 사용자에게 근접한 환경에서 사용되는 빈도가 높아짐에 따라 소음제어에 대한 관심이 증가되고 있다. 본 연구에서는 HDD 소음 분석 및 제어에 적합한 방법론 정립을 위한 음향/진동 분석이 수행되었다. 먼저 음압과 음향 파워, 진동속도를 측정하여 각 면의 기여도와 문제가 되는 주파수 대역을 선정하여 그 원인이 무엇인지를 실험적으로 찾아내고, 소음저감을 방안을 제시하였다. 이러한 개선 방안들은 실험적인 방법으로 검증되었으며, 음향 진동 분석을 통한 소음원 파악 및 적절한 개선 방향의 설정은 향후 HDD 설계시 유용한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

## 1. 서론

기존의 컴퓨터 본체의 소음제어 기법은 주로 fan noise 를 저감 시키는 데에 노력이 집중되었다. 그러나, 근래에는 저소음형 fan 의 도입과 컴퓨터 케이스의 설계 변경 등으로, 전체적으로 소음이 줄어들어 기존에 문제가 되지 않던 HDD 나 CD/DVD-ROM 등에서 발생하는 소음들이 문제가 되기도 한다. 특히 HDD 의 회전 속도의 증가와 휴대용 컴퓨터나 외장 HDD 와 같이 사용자에게 근접한 환경에서 사용되는 빈도가 높아짐에 따라 소음제어에 대한 관심이 증가하고 있다. HDD 의 경우 빠른 데이터 처리를 위해 회전속도가 빨라질수록 회전체에서 편심된 질량 (Eccentric mass)으로 인하여 진동이 심하게 발생하게 되고, 소음이 증가하게 된다. 여러 연구자들의 노력으로 현재 HDD 의 소음 수준은 음향 파워 레벨 (Sound power level; PWL)로 25~27 dBA 정도로 매우 낮은 수준이다. HDD 의 idle 소음의 소음원으로는 스피들 모터 (spindle motor)에서 직접 발생 되어 방사되는 소음, 스피들 모터가 동작하면서 발생하는 회전 진동에 의하여 HDD 전체 구조가 진동하여

발생하는 구조 기인 소음 (structure-borne noise), 그리고 디스크 회전에 의한 윈드 노이즈 (wind noise)가 대표적인 것으로 알려져 있다 [1]. 이외에 비공진 투과 소음 등이 발생할 수 있지만 HDD 전체 소음에 대한 기여도는 매우 작다.

본 연구의 목적은 HDD 의 음향 특성 분석에 대한 체계적인 방법론 (methodology)를 정립하고, 소음 저감 가능한 부분에 대한 소음제어 기법을 적용하는 것이다.

## 2. HDD 주요 소음 특성 파악/소음 제어 방법론

### 2.1 음압 스펙트럼 분석

음압 스펙트럼은 수음자에게 들리는 소음 성분을 알아내는 간단한 방법으로 1 m 혹은 0.5 m 에서 측정하는 것이 일반적이며, HDD PCB side up 또는 down 상태로 측정한다. 그림 1 은 무향실에서 PCB side down 상태로 cover 면으로부터 20 cm 떨어진 곳으로부터 측정한 음압 스펙트럼이다.

측정된 음압 스펙트럼을 디스크 회전 속도인 120 Hz 와 그 고조파 성분, 그리고 500 Hz, 900 Hz, 2500 Hz 부근에서 대역폭을 가지는 성분들을 관찰할 수 있으며, 특히 2880 Hz 는 잘 알려진 Cogging torque frequency [1]로 모터의 회전속도와 특성을 나타낸다. 그러므로 이러한 소음 성분들은 스피들 모터를 교체 및 변경하여 제어할 수 있다.

<sup>†</sup> 책임저자: KAIST 기계공학과 NoViC  
E-mail : chjeong@kaist.ac.kr  
Tel : (042) 869-3075, Fax : (042) 869-8220

\* KAIST 기계공학과 NoViC

\*\* 삼성전자 반도체총괄 스토리지 사업부

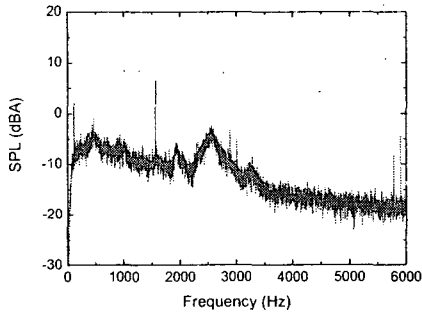


그림 1. 음압 스펙트럼 (PCB side down, 20 cm).

### 2.2 음향 파워 레벨 스펙트럼 분석

소음원의 음향 파워를 측정하는 방법으로 여러가지 방법들이 제안되어 있지만, HDD 에 대해서는 음향 인텐시티 기법을 적용하였다. 음향 인텐시티 기법을 이용하면 음향 파워 뿐만 아니라 각면에 대한 기여도를 알아 낼 수 있기 때문이다. 일반적으로 음향 인텐시티 기법은 많은 측정 시간과 노력을 요구하지만, 현 대상체의 경우에는 다른 기계구조물에 비교하여 크기가 작기 때문에 음향 인텐시티 기법을 적용하기가 상대적으로 용이하다. 음향 인텐시티를 이용하여 측정된 음향 파워는 그림 2 와 같으며, 400~500 Hz 대역과 1250 Hz 이상의 대역에서 음향 파워가 크게 나타난다. 그러므로 향후 소음 저감은 400~500 Hz 와 1250 Hz 이상의 대역에 초점을 맞춰야 한다. 각 면의 기여도는 그림 3 과 같이 cover 와 PCB side 쪽으로 약 40%의 기여도를 가지며, 나머지 면들의 기여도는 5%정도로 무시할 만 하다. 그러므로 소음제어는 cover 면이나 PCB 쪽에 적용되어야 하며, PCB side 보다는 cover 의 변경이 상대적으로 용이하다. 음향 파워가 상대적으로 큰 400 Hz 옥타브 밴드의 인텐시티 분포는 그림 4 와 같으며 대부분 디스크 위에서 큰 인텐시티가 방사된다.

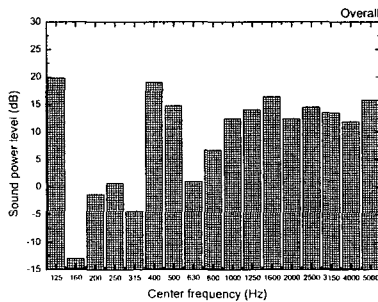


그림 2. HDD 음향 파워 스펙트럼.

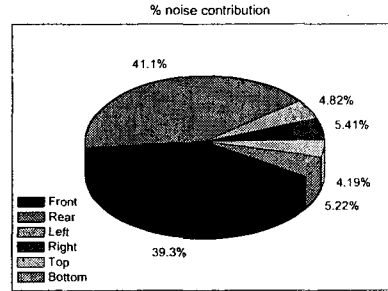


그림 3. 각 면의 기여도.

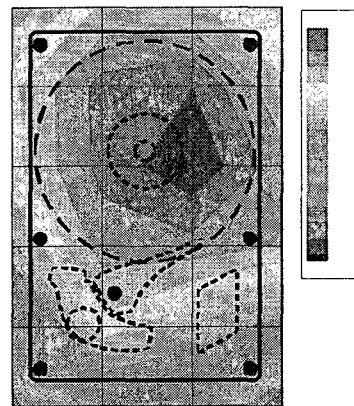


그림 4. 음향 인텐시티 레벨 분포(400 Hz oct. band).

### 2.3 표면 진동 속도 측정

HDD 표면의 진동속도는 Laser Doppler vibrometer 를 이용하여 cover 에서 약 1.5 cm 간격으로 측정하였다. 측정된 진동 스펙트럼과 음압 및 음향 파워 스펙트럼을 비교하여 구조기인 소음의 주파수 대역을 파악할 수 있다. 또한 주파수 밴드 별 cover 의 진동 분포를 관찰하여 진동 저감이 필요한 부분에 대한 정보도 알아 낼 수 있다. 전반적으로 측정된 진동량은 그림 5 와 같이 120 Hz 와 그 고조파 성분들, 그리고 500 Hz, 1 kHz 에서 피크가 나타나며, 이는 커버의 모드로 예상된다.

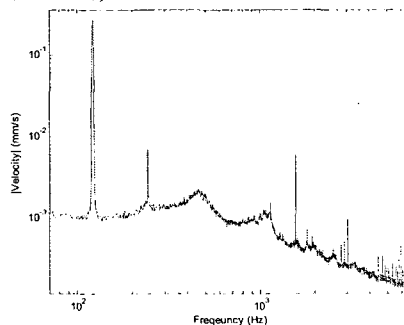


그림 5. cover 에서의 표면 속도.

2.4 모드 해석

Cover 는 HDD 의 주요 방사체이며, 앞서 측정된 표면속도에서 나타난 대역폭을 가지는 피크의 원인을 조사하기 위하여 cover 에 대한 모드 해석을 수행하였다. 모드의 주파수와 damping 은 표 1 과 같으며, 그림 5 에서 나타난 500 Hz 와 1000 Hz 근처의 피크들은 2 번, 4 번 모드에 대응함을 알 수 있으며, 이들에 대한 진동/소음 제어는 cover 의 변경을 통하여 가능하다.

표 1. 측정된 모드 변수.

	Frequency (Hz)	Damping (%)
1	331.24	3.76
2	539.81	14.70
3	902.85	2.42
4	1146.08	14.33

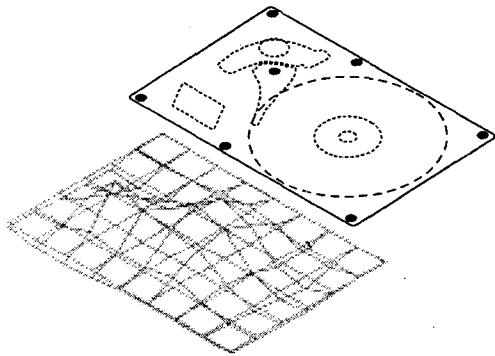


그림 6. 모드 형상 (mode 2, 540 Hz).

2.5 스피들-디스크 동특성 조사

스피들 모터는 7200 rpm 으로 디스크와 회전하는 가장 큰 소음/진동원이며 디스크-스피들 시스템에서 나타나는 가장 주요한 현상은 rocking 으로, 일반적으로 2500 Hz 부근에서 큰 소음과 진동을 유발한다고 알려져 있다. 그림 1 의 음압 스펙트럼에서 발견된 2530 Hz 에서의 피크는 rocking 모드와 연관이 있을 것으로 예상되어 HDD 의 스피들-디스크 동특성을 측정하는 실험을 수행 하였다. 표 2 는 스피들-디스크 동특성으로 각각 정지상태와 회전하고 있는 상태의 피크 주파수이다. 회전시의 rocking 주파수는 실험적으로 2511 Hz 이며 이는 음압 스펙트럼의 2500 Hz 대역과 일치하므로 이 대역은 스피들-디스크의 회전에 의한 성분으로 결론 지을 수 있다.

표 2. HDD 스피들 동특성 실험 결과.

Condition / Mode	Stationary	Rotating (7200 RPM)
1	320 Hz	848 Hz
2	910 Hz	1330 Hz
3	1070 Hz	1446 Hz
4	1785 Hz	2160 Hz
5	2500 Hz	2511 Hz

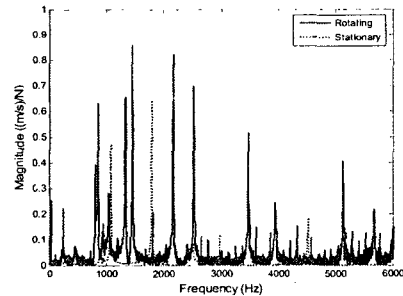


그림 7. 정지시와 회전시의 주파수 응답 함수.

2.6 음향 테스트

음향 테스트는 HDD 내부 공명 주파수를 찾아내기 위한 것으로, speaker 를 PCB side 에 연결하고 rigid 조건을 만들기 위하여 두꺼운 아크릴로 뚜껑을 제작한 후 마이크로폰을 이용하여 FRF 를 측정하였다. 그림 8 은 음향 테스트의 실험사진과 그 FRF 이며, 결과는 표 3 에 정리하였다. 측정된 음향 모드는 모두 1kHz 이상의 고주파수 대역으로 음향 파워 레벨이 큰 주파수 대역과 일치하지 않으므로 HDD 소음에 대한 영향은 크지 않다고 파악되었다.

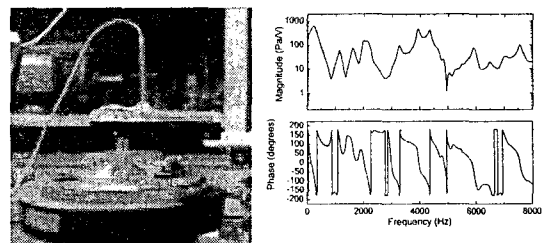


그림 8. 음향 실험. (a) 실험사진, (b) FRF.

표 3. 측정된 음향 모드

Acoustic modes	Frequency (Hz)
1	1100
2	2040
3	3300
4	3900
5	4300

### 2.7 HDD 소음 분석 결론

HDD 소음을 분석한 결과, 크게 두가지 원인을 찾을 수 있다. 첫째는 스피들 모터의 회전 속도와 그 고조파 성분들, 그리고 스피들/디스크 구조 모드이며, 저감을 위하여 저 진동/소음 스피들 모터로 변경하는 것이 바람직하다. 모터를 제외한 다른 원인은 대부분 커버의 모드이며, 이는 커버의 구조 변경을 통하여 제어할 수 있다. 표 4 는 HDD 소음의 주파수와 그 원인을 정리한 표이다.

표 4. HDD 소음의 주요 주파수와 그 원인.

Frequency (Hz)	Spindle & Disc	Cover mode	Note
120	☑		Dominant
400~600	○	☑	Wide band
900		○	Negligible
1560	☑		Dominant, but depending on the sample
2300~2900	☑	○	Dominant
5000~6000			Depending on the sample

### 3. 개선 대책

앞서 파악된 구조기인 소음을 저감시키는 일반적인 방법은 진동면의 진동 속도를 저감시키는 방법, 방사 효율 저감, 그리고 cover 의 음향 전달 손실을 증가시키는 방법이 있다 [2]. 이러한 방법들은 가장 문제가 되는 주파수 대역에 중점적으로 적용되어야 하며, 다음 4 가지 대책 방향이 제안되었다.

#### 3.1 전달 모빌리티를 이용한 최적 체결점 선정

Idle 상태에서 HDD 의 소음/진동원은 스피들 모터의 회전이다. 스피들 축과 디스크가 맞물려 회전하게 되면 모멘트와 힘이 base 구조를 따라 전달되고, 커버와 볼트 체결되는 부분을 따라서 진동이 전달되어 커버 표면의 진동장을 형성한다. 그러므로 커버와 HDD base 의 체결 위치에 따라서, 커버 표면의 진동 분포가 달라질 수 있다. 그러므로 본 실험은 스피들 모터를 임팩트 해머로 가진하고 커버와 체결할 수 있는 지점의 속도와의 전달 모빌리티를 측정하는 것이다. 이러한 전달 손

실이 작을수록 cover 로의 진동 전달이 줄어드는 것이므로, 가능한 체결부 중 가장 작은 전달 손실을 가지는 위치로 체결부가 변경되는 것이 바람직하다. 스피들 축과 그림 9 에서 표시된 점들 사이의 전달함수들이 실험적으로 측정되었으며, 그 결과 중 체결점 14 번과 15 번, 21 번과 22 번의 전달함수는 그림 10, 11 과 같으며 14 번과 22 번으로 체결점을 변경하는 것이 표면 진동량을 줄일 수 있다.

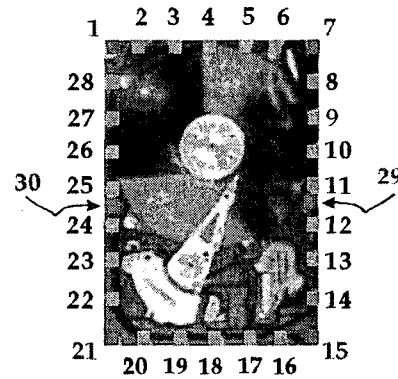


그림 9. 전달 함수를 측정 한 체결가능점.

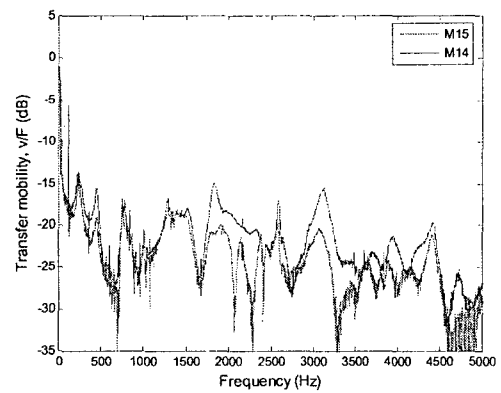


그림 10. 14 번과 15 번의 전달함수.

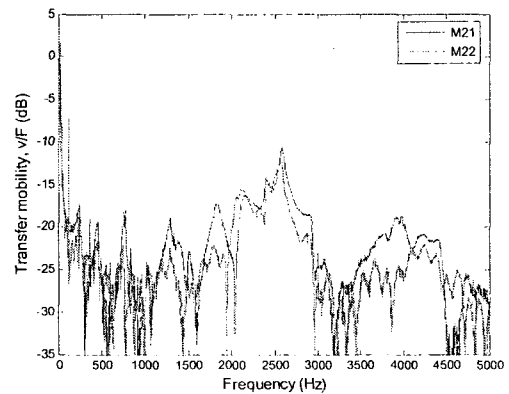


그림 11. 21 번과 22 번의 전달함수.

체결점을 14 번과 22 번으로 바꾸어 cover 에서의 진동량을 측정된 결과는 그림 12 와 같다. 측정된 진동량을 바탕으로 진동체의 방사 파워를 산정하는 식(1)을 이용하여 방사 파워를 계산하였다:

$$\Pi = \rho c S \sigma \langle v^2 \rangle \quad (1)$$

여기서  $\Pi$ 는 방사 파워,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $c$ 는 소리의 속도,  $S$ 는 방사체의 면적,  $\sigma$ 는 방사 효율,  $\langle v^2 \rangle$ 은 공간 평균된 방사표면 속도이다. 이때 cover 의 방사 효율  $\sigma$ 는 baffled rectangular panel 의 평균 방사 효율 (그림 13)을 이용하여 계산하였으며, 그 결과 같이 방사 파워는 그림 14 와 같이 0.5 dB 감소하였다.

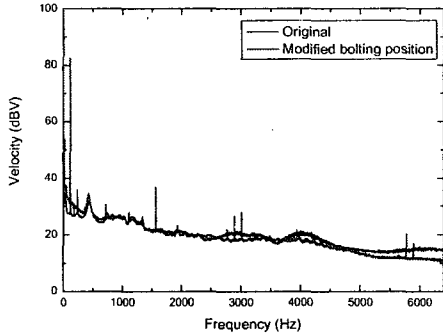


그림 12. 체결부 변경전과 변경후의 진동속도.

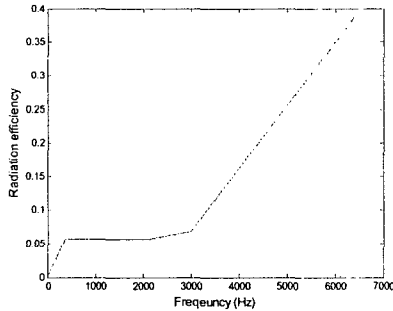


그림 13. HDD cover 의 이론적 방사 효율.

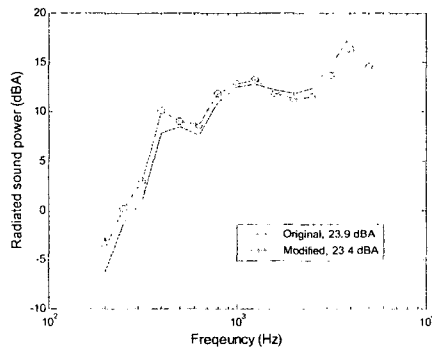


그림 14. HDD 음향 파워 비교.

—, 변경전; —◆—, 체결부 위치 변경.

### 3.2 볼트 체결부의 조인트 댄핑

현재 볼트 체결부는 그림 15(a)와 같이 damping material 이 부착되지 않은 상태로, 그림 15(b)와 같이 damping material 을 추가하여 그 진동 전달을 저감시키려 하였다. 그 결과 1600 Hz 이상의 주파수 대역에서 진동 및 소음이 저감되어 약 0.5 dB 정도의 음향 파워가 저감되었다.

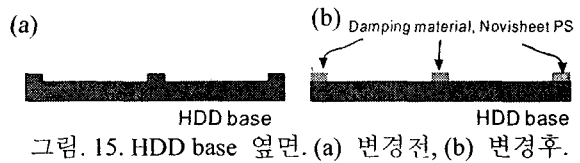


그림 15. HDD base 옆면. (a) 변경전, (b) 변경후.

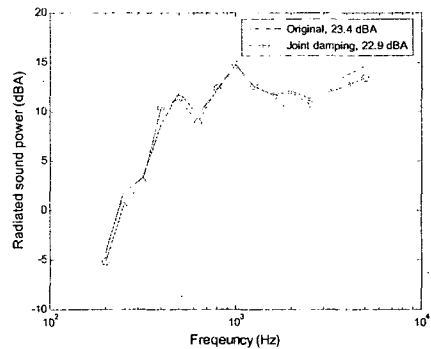


그림 16. HDD 음향 파워 비교.

—, 변경전; —◆—, joint damping.

### 3.3 제진재 부착

Cover 표면에 제진재를 부착하는 방법은 이미 HDD 소음제어에 많이 적용되었던 방법으로 cover 전면에서 제진재를 부착한 경우 그림 17 과 같이 약 0.6 dB 저감 효과가 있는 것을 실험적으로 확인하였다.

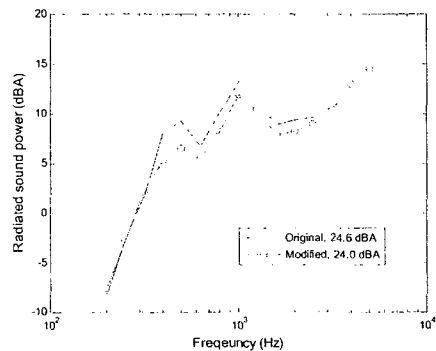


그림 17. HDD 음향 파워 비교.

—, 변경전; —◆—, damping patch.

### 3.4 Cover의 재질 및 두께 변화

기존의 커버 재질은 SUS304 (0.4t) + Adhesive (0.1t) + SUS430 (0.5t) 로 무게는 149g 이다. 변경된 커버는 남양 NOVITECH (주)의 Bondal 이라는 제품 (Steel (0.5t) + Adhesive (0.05t) + Steel (0.5t))으로 두께는 1.05 mm 이며 무게는 117g 이었다. 음향 투과 손실은 두께가 아니라 면밀도에 비례하여 커지기 때문에, cover 를 변경한 경우 음향 파워가 커질 것으로 예상되었지만, 무게에 따라서 어느 정도 음향 파워가 변화하는 지를 알아보기 위하여 cover 를 변경하였다. 음향 투과 손실의 무게 법칙 (mass law)을 적용하면 cover 쪽으로 투과되는 파워는  $2.1 \text{ dB} (=20 \times \log(147/117))$  증가하며, 이는 계산된 음향 파워의 증가분 (그림 18)과 약 0.7 dB 차이다. 이는 무게 법칙은 무한판에 대한 이론이므로 유한판에 대한 결과와는 차이가 있으며, 그림 19 는 유한판과 무한판의 음향 투과손실로 유한판 [3]의 경우 그 기울기가 작으므로 유한판을 해석한 음향 파워 증가분 (1.4 dB)이 무한판 음향 파워 증가분 (2.1 dB)보다 작은 것을 설명할 수 있다

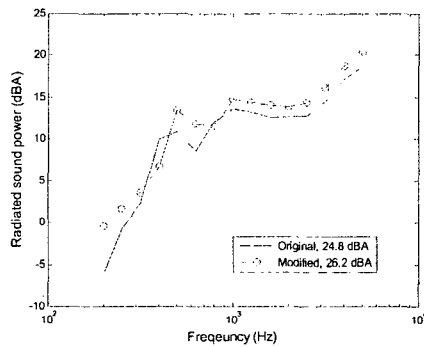


그림 18. HDD 음향 파워 비교.  
 —, 변경전; —□—, 변경된 cover.

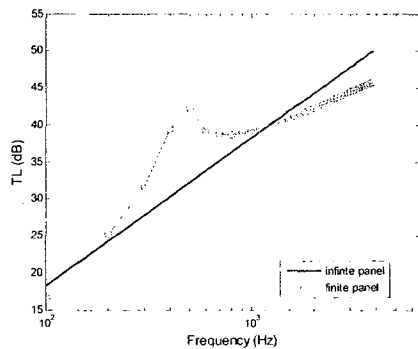


그림 19. 음향 투과 손실.  
 —, 무한판; —□—, 유한판.

### 4. 결론

HDD 소음을 발생시키는 소음원은 구조 기인 소음이 지배적이며, 그 원인은 스핀들 모터의 진동과 HDD 구조 및 커버의 모드이다. 120 Hz 는 디스크의 회전 주파수에 해당하므로 원인은 스핀들 모터이다. 500 Hz 대역의 피크는 커버의 모드와 120 Hz 의 4 배 성분인 480 Hz 의 가진력의 중첩에 의한 진동 및 소음으로 파악된다. 2500 Hz 대역은 커버의 모드와 스핀들-디스크 시스템의 rocking 모드가 중첩되며, 2880 Hz 의 코깅 토크 주파수도 나타난다. 전체적으로 소음 성분은 1000 Hz 이상으로 고주파수 저감 대책이 필수적이며, 이에 대한 대책 방향으로는 다음과 같다.

- 1) 최적 볼트 체결부의 선정
- 2) 볼트 체결부의 조인트 댄핑 부가
- 3) Cover 에 제진재 부착
- 4) Cover 의 재질 및 두께 변화

전달 모빌리티의 측정을 기반으로 두곳의 체결점을 이동시킨 경우, 측정된 cover 표면 속도는 1600 Hz 이상의 고주파수 대역에서 저감되며, 음향 파워는 현 소음수준에서 0.5 dB 저감 가능하다. 조인트 댄핑을 부가한 경우에는 주로 2000 Hz 이상의 비틀림 진동의 저감에 효과적이며 현 소음수준보다 0.5 dB 정도의 저감 효과가 있는 것으로 조사되었다. Cover 에 제진재를 부착한 경우 제진재의 주파수 특성 및 감쇠 인자에 따라서 달라지지만, 0.6 dB 정도의 효과가 있는 것을 확인하였다. 음향 투과의 관점에서는 cover 의 면밀도가 높을수록 음향파워가 감소하며, 유한판 이론을 적용한 결과와 비교하였다. 이러한 방법론은 향후 HDD 의 설계 및 변경시 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 BK21 Project 및 삼성전자의 “하드디스크 소음 저감을 위한 음향/진동 분석” 과제에서 일부 지원 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) 강성우, 한윤식, 황태연, 손영, 구자춘, “음향 인텐시티를 이용한 하드 디스크 드라이브의 소음원 파악 및 음향 파워 제어,” 한국소음진동공학회 학술대회논문집, pp. 1540~1548, 2000.
- (2) Anon., *소음제어기술: 음향학의 기본 개념 및 응용 사례*, (2005).
- (3) F. Fahy, *Sound Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response*, (Academic press, 1985).