

〈논 문〉

Cover의 구조변경을 통한 HDD의 소음 저감에 관한 연구

A Study on Noise Reduction of a HDD by Structural Modification of Cover

이성진* · 유성우** · 홍순교* · 이장무***

S. J. Lee, S. W. Yoo, S. K. Hong and J. M. Lee

(2000년 6월 7일 접수 ; 2000년 7월 26일 심사완료)

Key Words : Hard Disk Drive(하드디스크 드라이브), HDD, Cover(커버), Structural Modification(구조변경), Noise (소음), Vibration(진동)

ABSTRACT

An effective and new method of reducing the noise of a HDD by structural modification of cover was investigated in this study. The correlation between the noise characteristics of the HDD and the vibration characteristics of the cover, which is the main source of the HDD noise, is found from experiments. A theoretical analysis is performed to find the modification method of the cover, and this modification method is applied the real cover of the HDD. The modification reduces the vibration of the cover transferred from driving motor. The effect of the modification is verified through noise tests.

1. 서 론

각종 정보장치 및 멀티미디어 장치, 특히 개인용 컴퓨터 등의 발전에 의하여 소비자들은 더 큰 용량의, 더 빠른, 더 조용한 정보저장장치를 요구하고 있다. 이러한 정보저장장치 중에 가장 많이 사용되는 HDD(hard disk drive)의 경우, 제품의 성능뿐만 아니라 저소음 특성도 품질의 중요한 요소로 인식되고 있다. 이러한 소음 저감 요구를 충족시키기 위해서는 소음을 방사하는 부품의 진동 특성을 파악하고, 이 특성의 변경을 통한 소음의 저감이 요구된다. 이에 따라 Jia 등⁽¹⁾, Chen 등⁽²⁾과 Lee 등⁽³⁾은 HDD의 디스크와 스피들 시스템에 대한 진동 해석을 수행하였고 장건희 등⁽⁴⁾은 진동 해석 및 저감 기술에 대한 연구를 수행하였다. 또한 황태연 등⁽⁵⁾은 HDD의 방사소음과 투과소음을 제어할 수 있는 기법에 대한 연구를 수행하였다.

그러나 HDD에 있어서 스피들 모터 또는 디스크, 액추

에이터 등 각종 운동전달기구에서 발생하는 진동이 복합적으로 소음을 크게 유발시키는 경우가 있으나 기존의 많은 방법들이 단편적인 해결 방법으로 부분적인 부채추가 등 시행착오적으로 행해지고 있다.

본 연구에서는 디스크 드라이브의 소음 저감을 위해서 소음원 분석을 통해 주요 소음의 주파수특성 및 원인분석을 수행하였고, 소음의 주 방사원인 커버(cover)의 동특성을 파악하여 커버의 진동과 발생 소음과의 상관 관계를 확인하였다. 또한 커버의 동특성 변경이 진동과 소음에 미치는 영향을 파악하기 위해 단순 모델에 대한 이론적 해석을 수행하였고, 해석 결과를 바탕으로 하여 소음을 효과적으로 저감할 수 있는 새로운 구조 변경 방법을 제안하였다. 더욱이 HDD의 여러 가지 작동 모드에 대해 소음을 측정하여 해석 결과와 구조 변경의 타당성을 검증하였다.

2. 소음원 분석

HDD의 소음 특성을 분석하기 위해 동작상태에서 발생하는 음압을 Fig. 1과 같이 측정하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 2~4 kHz 대역에서 큰 소음이 존재한다.

* 정회원, 삼성전자주식회사 중앙연구소
** 서울대학교, 대학원
*** 정회원, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

HDD의 동작 중에 발생하는 소음은 커버(cover) 등의 진동에 의해 발생하는 구조기인소음(structure-born noise)과 디스크(disk)의 회전에 의한 유체 소음인 공기기인소음(air-born noise)으로 구분할 수 있다. 전체 측정소음 성분 중 구조기인소음과 공기기인소음에 해당하는 성분을 분석하기 위하여 스피들-커버 결합나사(디스크를 구동하는 스피들 모터의 축과 커버를 연결하는 나사)를 제거하였을 경우와 디스크를 제거하였을 경우에 대한 소음을 측정하였다. 스피들-커버 결합나사를 제거하여 구조기인소음에 결정적인 역할을 하는 커버가 스피들 모터 축과 분리되면, 동작 시 스피들 모터에서 발생하는 진동이 직접적으로 커버에 전달되지 않는다. 따라서 구조기인소음의 감소로 인해 전체 소음이 3 dBA 이상 감소하였다. 또한 커버의 경계조건이 달라짐으로 인하여 커버의 동특성이 변화하고, 이에 따라 구조기인소음의 발생 주파수가 변할 것이다.

스피들-커버 결합나사를 체결하지 않았을 경우의 소음 측정 결과인 Fig. 2에서, 2~4 kHz 대역에서의 소음이 크

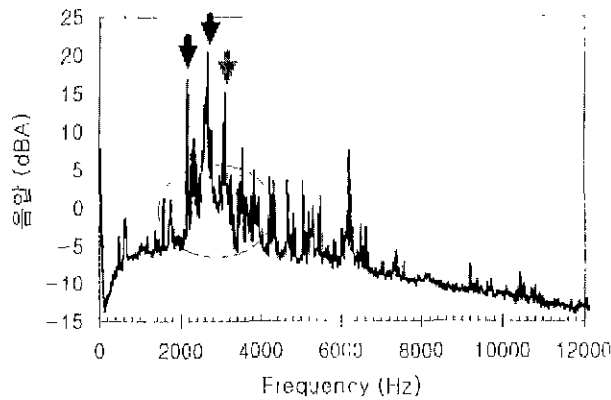


Fig. 1 Noise(sound pressure level) of the original HDD.

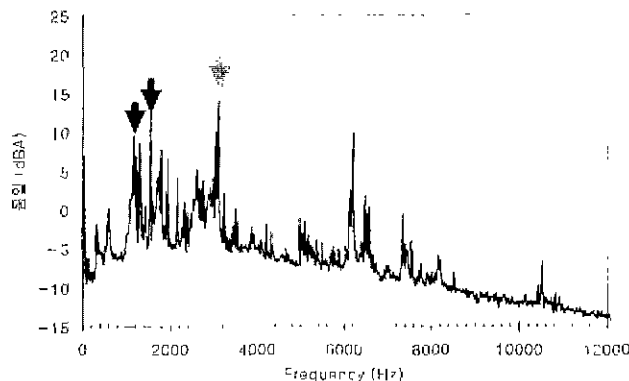


Fig. 2 Noise(sound pressure level) of the HDD of which the screw between the cover and the spindle motor is removed.

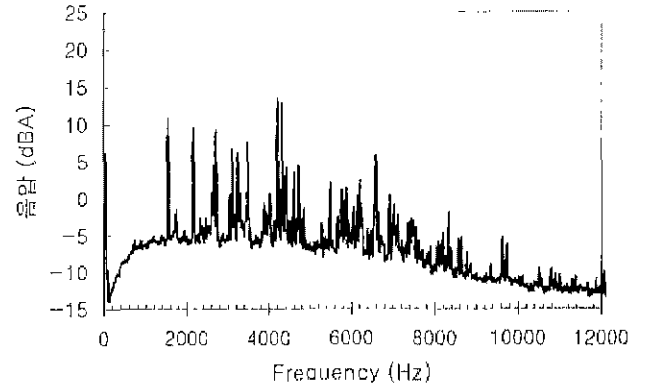


Fig. 3 Noise(sound pressure level) of the HDD of which the disk is removed.

게 감소하는 반면 2 kHz 미만의 소음이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 커버의 경계조건이 달라짐으로 인하여 커버의 주요 고유모드들의 고유진동수 대역이 낮아졌기 때문이다. 그러나 3.1 kHz 대역의 소음은 여전히 그대로 남아있으며, 이는 커버의 구조진동에 의한 소음이 아닌 공기기인소음이기 때문이라고 추정할 수 있다.

디스크를 제거하는 경우에는 디스크의 회전에 의해 발생하는 공기기인소음이 크게 감소하게 된다. 소음 측정 결과인 Fig. 3에서 공기기인소음이라 추정되었던 3.1 kHz 대역의 소음이 상당히 감소함을 알 수 있다. 또한 전체 음압도 약 3 dBA 감소하였다. 그리고 1.5~4.5 kHz 대역에서 15 dBA 이하의 여러 주파수의 소음이 분포하는데, 이는 디스크가 제거됨에 따라 공기기인 구조가진 특성이 변화하였기 때문으로 생각된다.

3. HDD의 진동 특성 파악

HDD 작동 중 소음신호와 커버의 진동신호를 측정된 결과, Fig. 4와 같이 2.2 kHz와 2.7 kHz 부근의 소음 레벨이 크고 그 주파수에서 커버의 진동 레벨도 크다는 것을 알 수 있었다. 이 주파수 대역에서는 스피들 모터의 가진력에 의한 구조진동으로 인하여 소음이 방사되므로, 작동 중 소음레벨의 저감을 위해서는 가진력의 크기를 줄이거나 가진력 전달 경로의 특성을 변경하거나, 구조의 동특성을 변경하여 소음 방사 부분의 진동레벨을 줄여야 한다. 그러나 모터에서 발생하는 가진력을 줄이기는 어렵기 때문에 가진력 전달 경로의 특성을 변경하거나 구조의 동특성 변경을 통한 소음 저감이 필요하다.

구조기인소음의 주된 방사원인 커버의 진동 특성을 파악하기 위해 HDD 완제품의 커버에 대해 실험모드해석(modal testing)을 수행하였다. 완전 자유단 상태의 HDD를

impulse 가진하고 초소형 가속도계를 사용해 응답을 측정하였다. 측정 결과 Fig. 5와 같은 주파수응답함수의 평균치를 구할 수 있었다. 주파수응답함수의 평균치는 모든 측정점에서의 주파수응답함수를 평균한 값으로써 특정 가진점에 대한 평균적인 진동 응답을 나타낸다. Fig. 5에서 2.2 kHz와 2.7 kHz 부근에서 커버의 진동모드가 존재하므로 이 진동모드가 가진되어 구조기인소음이 발생한다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 모드해석(modal analysis)을 통해 구한 커버의 모드형상의 예이다.

구조기인소음의 저감을 위해서는 이 모드들의 응답레벨을 줄이거나 가진력이 작은 대역으로 고유진동수를 이동시키는 구조변경이 효과적이다. 그러나 가진력의 분포를 알지 못한다면 응답레벨을 줄일 수 있는 구조변경이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 커버의 진동 응답레벨을 감소시켜 소음을 저감할 수 있는 방법을 제시한다.

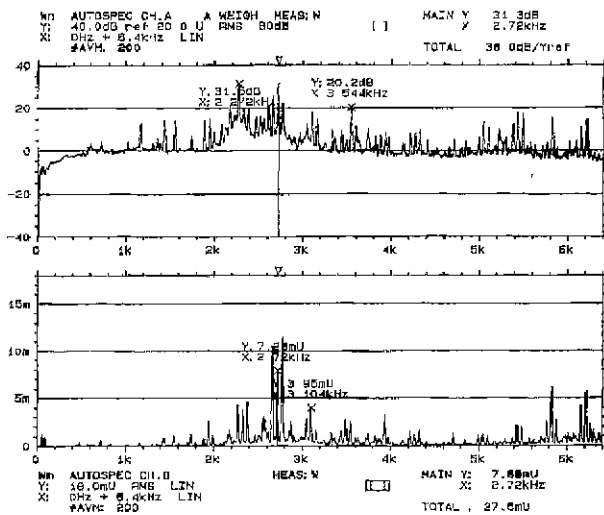


Fig. 4 Noise of the HDD(upper) and vibration of the cover(lower) in operating condition.

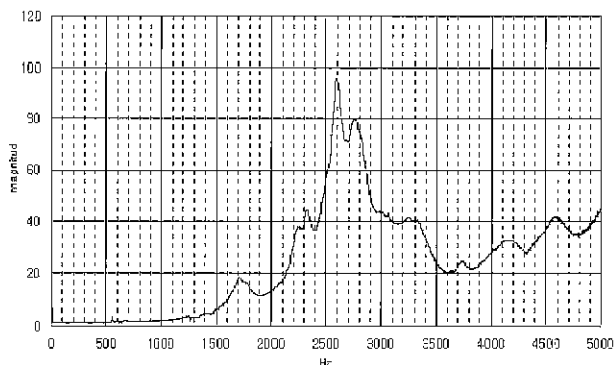


Fig. 5 Averaged values of the frequency response function of the cover.

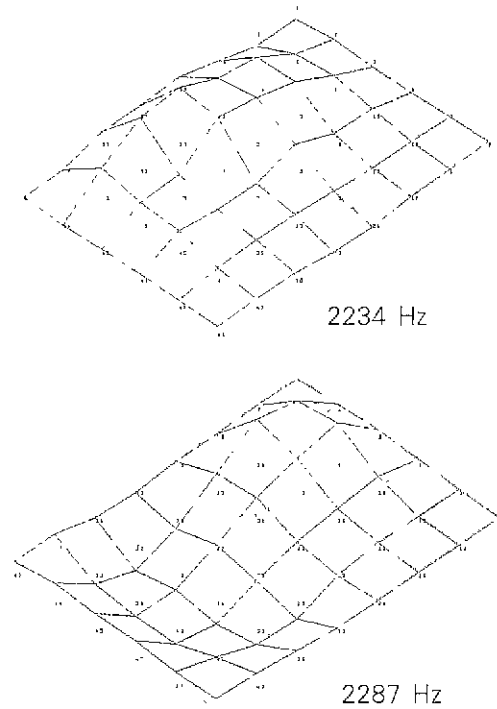


Fig. 6 Examples of the mode shape of the cover

4. 단순모델의 해석을 통한 구조변경의 효과 파악

HDD의 구조기인 소음은 스피들 모터와 디스크의 회전에 의해 발생하는 가진력이 스피들 모터 축을 통해 커버에 전달되고 이로인한 커버의 진동에 의해 발생한다. 따라서 본 논문에서는 구조기인소음을 저감하기 위해 가진력 전달 경로의 특성을 변경하여 커버로 전달되는 가진력을 줄일 수 있는 방법을 제시한다. 스피들 모터 축과 커버의 결합 부분이 가진력의 전달 경로가 되기 때문에 이 부분의 강성과 감쇠를 변경하여 전달되는 가진력을 줄일 수 있다.

가진력 전달 경로의 강성과 감쇠 특성에 따른 진동 계의 응답 특성을 알아 보기 위해 1 자유도계의 단순모델을 구성하여 해석하였다. Fig. 7은 이 해석에서 사용된 모델을 나타낸다. 이 모델에서 커버를 1 자유도계로 모델링하였고 커버와 스피들 모터 축의 결합 부분에 존재하는 강성과 감쇠(k_s 와 c_s)를 Fig. 7의 'support' 부분과 같이 고려하였다. 그리고 가진변위 x_s 에 대한 응답 x 와 가진력을 계산하였다. 가진원으로써 가진력을 사용하지 않고 가진변위를 사용한 것은 실제 HDD의 경우 스피들 모터에 의한 가진변위가 무한히 커질 수 없고 특정한 양 이하로 결정되며, 이러한 제한된 가진변위에 대한 응답 특성을 해석하는 것

이 실제 문제에 가깝기 때문이다.

이 모델에 대한 운동방정식은 식 (1)과 같고 가진변위에 대한 전달함수는 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 식 (2)에서 X 와 X_s 는 각각 x 와 x_s 의 진폭이다.

$$m\ddot{x} + (c + c_s)\dot{x} + (k + k_s)x = c_s\dot{x}_s + k_s x_s \quad (1)$$

$$\frac{X}{X_s} = \frac{k_s + j\omega c_s}{k + k_s - \omega^2 m + j\omega(c + c_s)} \quad (2)$$

가진변위 x_s 가 가해질 때 가진점에 작용하는 가진력 f 는 Fig. 7의 support 부분의 힘 평형을 고려하여 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 따라서 가진력 f 의 크기인 F 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고, 식 (2)와 식 (4)에서 가진력과 가진변위의 비를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$f(t) = c_s(\dot{x}_s - \dot{x}) + k_s(x_s - x) \quad (3)$$

$$F = (k_s + j\omega c_s)(X_s - X) \quad (4)$$

$$\frac{F}{X_s} = \frac{(k - \omega^2 m + j\omega c)(k_s + j\omega c_s)}{k + k_s - \omega^2 m + j\omega(c + c_s)} \quad (5)$$

식 (2)와 식 (5)를 여러가지의 k_s 에 대해 해석한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다. 이 때 c_s 의 값은

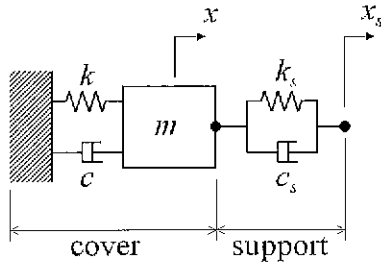


Fig. 7 Simplified theoretical model of 1 degree-of-freedom.

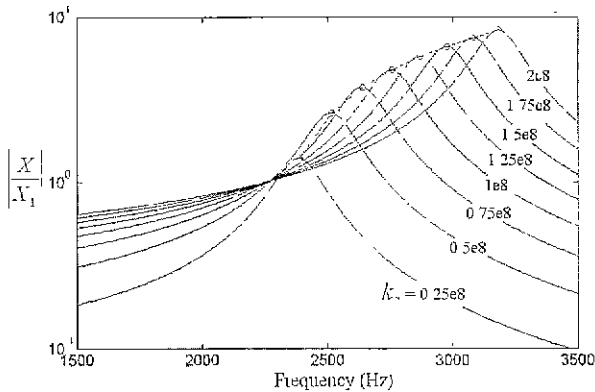


Fig. 8 Transfer functions of the theoretical model with various k_s .

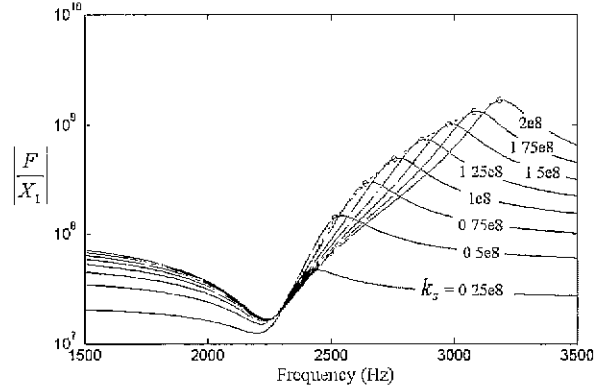


Fig. 9 Ratios of the exciting force to the exciting displacement with various k_s .

영으로 하였고 m, c, k 는 각각 1 kg, 1200 kg/s, 2108 kg/s²를 사용하였다. 일정한 가진변위를 가했을 때 결합부분의 강성에 해당하는 k_s 가 작아지면 응답이 작아지고, 이는 가진력이 작아지기 때문이라는 것을 이 그림들에서 알 수 있다. 실제의 계에서도 가진변위가 제한되기 때문에 결합강성이 작아지는 경우 전달되는 가진력의 크기가 감소할 것이다. 따라서 결합강성을 감소시킴으로 인해 진동 응답의 저감을 예상할 수 있다.

결합부분의 감쇠에 해당하는 c_s 의 영향을 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었는데, 여러가지 c_s 를 적용하였을 때 고유진동수 부근의 최대값들을 도시하였다. 이 그림들에서 c_s 가 커지면 가진력과 응답이 작아지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 감쇠 c_s 가 커지면 반력은 증가하는 경향이 있으나, 이 경우에는 감쇠의 추가에 의해 계의 응답 X 가 감소하기 때문에 식 (4)에서 알 수 있듯이 반력으로 작용하는 가진력이 작아지게 된다.

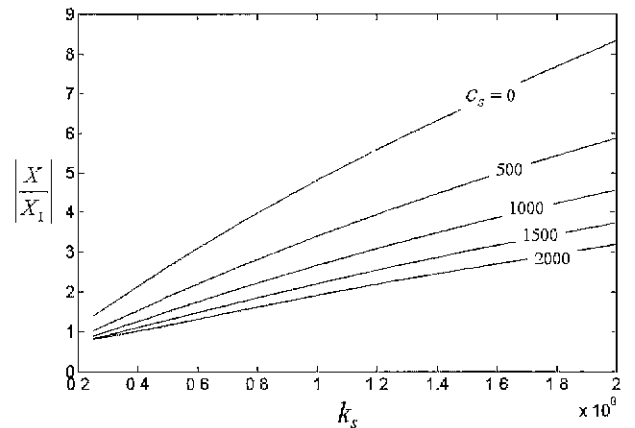


Fig. 10 Maximum values of the transfer functions with various c_s .

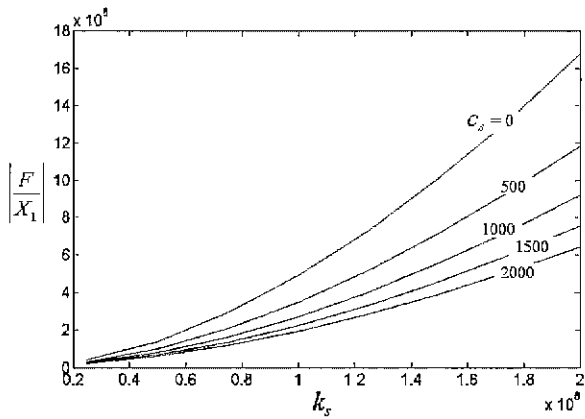


Fig. 11 Maximum values of the ratios of the exciting force to the exciting displacement with various c_s .

이상의 해석 결과에서 가진경로인 스피들 모터 축과 커버의 결합부분에 대한 강성을 줄이고 감쇠를 크게 함으로써 커버의 진동과 구조기인소음을 저감할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 커버의 구조 변경과 검증 시험

5.1 커버의 구조 변경

원래의 HDD에 사용되는 커버는 재질이 알루미늄이고 Fig. 12(a)와 같이 커버가 스피들 모터 축에 직접 연결되

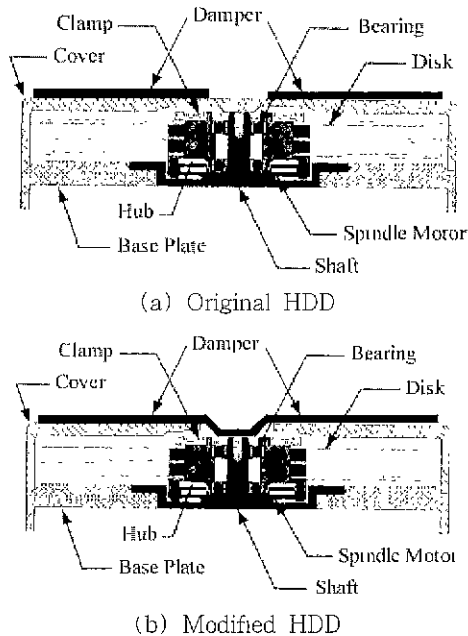


Fig. 12 Detailed drawing of the original and the

modified HDD.

어 있으며, 커버의 진동을 저감하기 위해 스테인리스 스틸 (stainless steel)로 만들어진 댐퍼를 커버의 윗면에 접착하여 사용하였다. 본 논문에서는 스피들 모터 축과 커버 사이의 결합강성을 줄이기 위해 Fig. 12(b)와 같이 커버에 구멍을 뚫고 스피들 모터 축이 댐퍼에 결합되게 하여 스피들 모터에서 발생하는 진동이 커버에 직접 전달되지 않고 댐퍼를 거쳐 간접적으로 전달되도록 하였다.

댐퍼는 커버에 비해 강성이 상당히 작고 감쇠는 크기 때문에, 이 구조변경 방법은 4장의 이론적 해석 결과에서 알 수 있듯이 커버에서 발생하는 구조기인소음을 저감하는데 효과적일 것이다.

5.2 구조 변경 효과에 대한 검증 시험

구조 변경의 효과를 검증하기 위해, 원래의 HDD와 변경된 HDD의 소음을 커버상면 1m 위치에서 HDD의 작동 상태에 따라 idle, read/write, random seek의 세가지 모드에 대하여 측정하였다. 또한 HDD내에 들어가는 디스크의 갯수가 2장일 때와 3장일 때에 대해서도 측정하였다. 소음 측정 결과인 Table 1에서 알 수 있듯이, idle 상태에서는 3~4 dBA, read/write의 경우에는 2~3 dBA, random seek의 경우에는 1~2 dBA의 소음이 저감 되었다. HDD의 데이터를 읽거나 쓸 때, 스피들 모터 외에 VCM도 HDD 진동의 가진원 역할을 하므로 read/write와 random seek의 경우에 idle 상태보다 소음 저감도가 작은 것으로 생각된다. 이 소음 저감도는 HDD의 샘플에 따라 달라지는데, 원래 소음이 큰 HDD를 이용하여 실험을 수행하면 Table 1에 나타난 것보다 큰 소음 저감도를 얻을 수 있다.

Fig. 13~Fig. 15는 측정된 소음신호를 주파수 분석한 결과이다. 어떠한 작동 모드에서도 2k~4kHz 대역의 소음이 크게 감소하였으며, 이 주파수 대역의 소음은 사람이 잘 인식할 수 있는 대역이기 때문에 사람이 느끼는 체감소음의 측면에서 더욱 유리할 것이다.

Table 1 Total sound pressure levels of the original and the modified HDD.(distance of measurement : 1 m)

Num. of disk	HDD	Idle mode (dBA)	Read/write mode (dBA)	Random seek mode (dBA)
2	Original	24.5	27.3	31.5
	Modified	20.7	24.6	29.9
3	Original	25.3	27.5	31.8
	Modified	22.7	25.5	30.6

6. 결 론

본 연구에서는 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) HDD에서 발생하는 주요 소음인 구조기인소음 중에서 HDD 내의 디스크를 구동하는 스피들 모터로부터 커버로 전달된 진동에 의해 발생하는 성분이 중요하다는 것을 실험을 통해 확인하였다

(2) 단순 모델의 이론적 해석을 통해 커버의 진동을 줄일 수 있는 파라미터들을 도출하였다. 파라미터로서 스피들 모터 축과 커버와의 결합 강성 및 감쇠가 도출되었고, 결합 부분의 강성이 작고 감쇠가 클수록 커버의 진동 저감에 유리하다는 것을 알 수 있었다.

(3) 그 결과를 실제 HDD에 적용하여 커버의 구조변경을 수행하였고, 실험을 통해 idle 모드에서 3~4 dBA의 소음 저감을 확인하여 이 구조 변경 방법의 효과를 검증하였다.

참 고 문 헌

- (1) Jia, H. S., Chun, S. B. and Lee, C. W., 1997, "Evaluation of the Longitudinal Coupled Vibrations in Rotating, Flexible Disks/Spindle Systems", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 208, No. 2, pp. 175~187.
- (2) Chen, J. S. and Bogy, D. B., "Natural Frequencies and Stability of a Flexible Spinning Disk-Stationary Load System with Rigid-Body Tilting", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 60, pp. 470~477.
- (3) Lee, C. W. and Chun, S. B., 1998, "Vibration Analysis of a Rotor with Multiple Flexible Disks Using Assumed Modes Method", *ASME J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 120.
- (4) 장건희, 한재혁, 김동균, 1999, "HDD스핀들 시스템의 진동 해석 및 저감 설계 기술", *한국소음진동공학회지*, 제 9권, 제 4호, pp. 652~659.
- (5) 황테연, 강성우, 한윤식, 손영, 전정일, 1999, "고속 HDD의 소음 제어", *한국소음진동공학회지*, 제 9권, 제 4호, pp. 660~668.

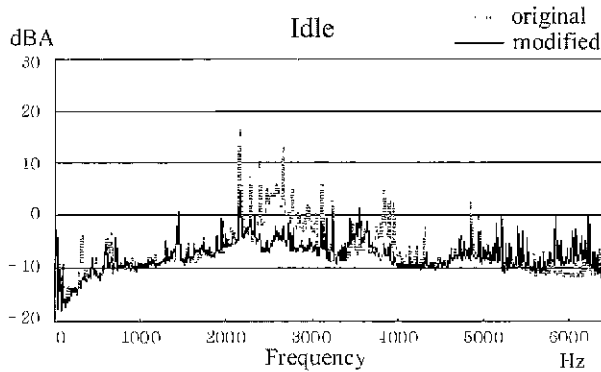


Fig. 13 Noise(SPL) of the HDD in 'idle' mode.

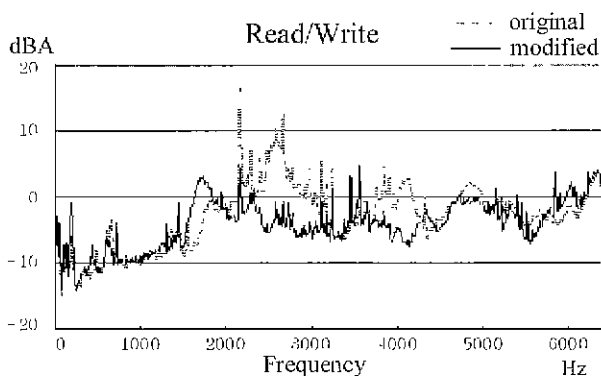


Fig. 14 Noise(SPL) of the HDD in 'read/write' mode

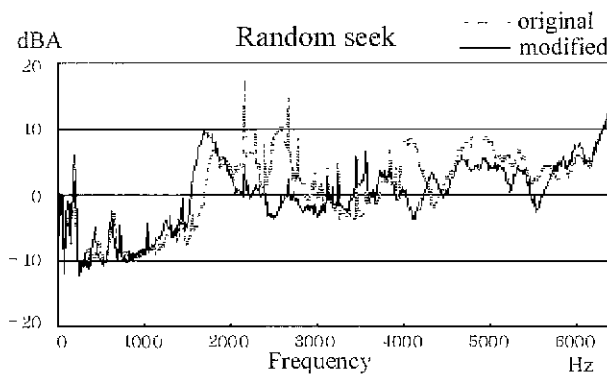


Fig. 15 Noise(SPL) of the HDD in 'random seek' mode