한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회논문집, pp. 39~45

HDD의 디스크 공진에 의한 소음 저감 연구

O 손진승*. 곽주영*. 조은형*. 고정석*. 이행수*. 홍민표*. 좌성훈*

A Study on HDD Acoustic Noise Improvement Caused By Disk Resonance

Jin Seung Sohn, Joo Young Kwak, Eun Hyung Cho, Jeong Seok Koh, Haeng Soo Lee, Min Pyo Hong and Sung Hoon Choa

ABSTRACT

As HDD moves into new emerging consumer markets, expectations on quietness, as well as performance, have increased. The acoustic noise of HDD seems to be closely related to excitation of the spindle motor system. Recently, as a simple approach to reduce disk vibration, thicker disk, which is 50 mil (1.27mm), starts to use in HDD industry. Noise spectrum of HDD with use of 50 mil disk shows the dominant peaks of 900 Hz, mainly caused by excitations of the disk due to air windage effect. In order to reduce noise at this specific frequency, squeeze air damping effect was investigated by extremely reducing the gap between the disk and the base platform.

1. 서 론

최근 하드 디스크 드라이브(Hard Disk Drive, HDD)의 경우, 기록밀도(recording density)에 있어서 매년 100%의 증가율을 보이고 있다. 이에 따라 디스크 상의 트랙의 폭도 점점 작아지고 있으며, 최근에는 트랙 밀도가 50 kTPI(track per inch)에 다다르고 있으며, 이 경우 트랙 폭(track pitch)은 0.5 μm 이하가 되며, 이에 따른 헤드 위치제어 정밀도는 0.05 μm 까지 요구되고 있다. 헤드의 위치제어 정밀도를 증가 시키기 위해서는 서보 제어 기능의 향상과 스핀들 회전축계의 진동 저감이 필요하다. 학계 및 산업계에서는 이에 대응하기 위해서 MEMS[1] 및 압전 소자[2]를 이용한 이단 구동기(dual stage actuator)의 개발을 수행 중이며 또한 한편으로는 유체베어링[3]의 개발도 병행하여 수행하고 있는 중이다. 그러나, 이러한 개발은 가격의 상승 및 신뢰성의 불안정 등으로 인하여 아직 여러 가지 문제점을 갖고 있다. 이에 대한 대안의 하나로서 디스크의 두께를 증가 시켜 디스크의 진동을 억제하는 방법에 제안되어 현재 사용 중에 있다. 즉, 디스크 진동의 영향을 최소화하기 위하여 기존의 40 mil (1 mm) 디스크의 두께를 50 mil (1.27 mm)로 증가 시켜 사용하고 있는 중이다. 또한 엑츄에이터의 설계를 최적화하여 서보 밴드 영역을 증가 시키고 고주파 성분의 진동을 감쇠하려는 연구[4]도 진행 중이다.

한편 이러한 스핀들 시스템의 진동 감소 문제 외에 소음의 감소 문제가 HDD 업계에서 중요한 현안으로 등장하고 있다. 즉, HDD 가 고속화 되고 가전 제품 및 AV 기기에 장착되는 사례가 늘어나면서 소음의 감소 문제가 점점 중요해지고 있다. HDD 에서 발생되는 소음은 일반기계 구조물의 소음에 비하여 그 절대 음압이 매우 낮은 편이지만 전술한 것처럼 점점 Desktop PC 에 국한되지 않고 게임기기나 VTR 에 내장되는 등 사용자의 일상생활에 파고 들고 있으며, 그 소음성분 역시 인간의 민감 가청 대역인 1-5 kHz 성분들이 지배적이기 때문에 더욱 철저한 소음제어가 필요하다고 할 수 있다[5]. 뿐만 아니라 세계시장을 주도하고 있는 대형 컴퓨터 업체들은 일반적으로 널리 사용되는 특정지점 원음장(farfield)에서의 음압 레벨이 아닌 음원의 전체 음향방사파워를 규제기준으로 제시하

* 삼성종합기술원

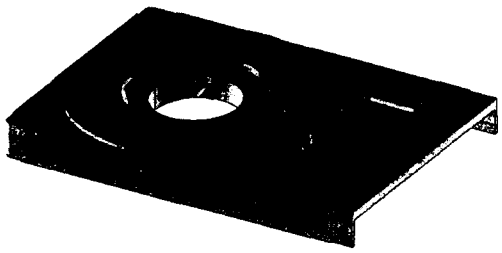


Fig. 1 Shape of 1 Platter HDD Base

고 있어 360 도 전방향을 고려한 종합적인 소음제어가 요구된다. HDD 에서 발생하는 소음을 주파수 대역에서 분석해 보면 그 주요 피크(peak) 들은 모터의 코깅력(cogging force)에 의한 주파수나 볼베어링의 결함 주파수, 특히 HDD 베이스(base) 플랫폼의 고유진동수 부근에 있는 볼베어링의 결함 주파수들이 큰 비중을 차지하고 있다. 이러한 종류의 소음들을 감소시키기 위해서 모터의 코깅력과 볼베어링의 결함에 의한 가진력을 줄이고 플랫폼의 고유진동수를 가진력으로 부터 회피 시키며 모빌리티를 변경하는 등의 소음 제어 기술이 주로 사용되었다. 그러나 이렇게 되면서 과거에는 크게 문제 되지 않았던 성분의 소음이 주 소음원으로 부각되기 시작했다. 최근에 채용되기 시작한 50 mil 디스크를 사용하는 드라이브에서 약 900 Hz 부근의 주파수에서 최대의 피크가 발생하여 그 원인을 찾아본 결과 이는 디스크가 회전하면서 발생한 공기 유동이 디스크의 고유진동모드를 가진하여 발생한 것임을 밝혀 내었다. 본 논문에서는 이 소음에 대한 대책으로 디스크 주변의 공기에 의한 공기 감쇄(air damping)효과를 이용하여 디스크의 고유진동모드를 억제할 수 있는 방안을 연구하였다. 공기 감쇄 효과는 디스크와 베이스 플랫폼 사이의 간극을 매우 작게 조절하여 얻을 수 있었는데 본 논문에서는 공기 감쇄 효과를 디스크에 줄 수 있는 베이스 플랫폼의 형상을 제안하고 이 형상에서 간극의 크기에 따라 디스크의 면진동이 어떻게 변화하는지를 연구하였다.

2. 1 장 전용 HDD (1 Platter HDD) 모델의 개요

본 연구에 사용된 하드 디스크 드라이브는 3.5 inch Hard Disk Drive 이며, 한 장만의 디스크를 장착할 수 있는 드라이브이다. 장 당 60GB 의 기록용량을 가지며 회전속도는 5400rpm 이다. 이 HDD 의 특징은 기존에 사용하였던 디스크 2 장 전용의 HDD 플랫폼을 변경하여 디스크 1 장 전용의 HDD 플랫폼으로 설계하였다. 디스크 1 장이 제거되면서 남는 공간을 최적화하여 궁극적으로는 진동, 소음 및 충격 성능을 향상시키려 하였다. 이를 위하여 베이스의 두께를 증가 시키고 형상을 최적화하여 베이스의 강성을 증가 시켰다. Fig. 1 에 베이스의 형상이 나타나 있다. 스핀들 모터는 Rotating-hub Type 이고 10 개의 볼을 가지는 볼 베어링을 사용하였고, Pole 및 Slot 의 수는 각각 8, 12 개이다. 디스크는 두께 50 mil 의 알루미늄 디스크를 사용하였다.

3. 소음 현상

고내충격, 저진동, 저소음을 목표로 설계된 새로운 플랫폼에 두께가 50 mil(1.27mm)인 디스크와 8 Pole 12 Slot, 5400 rpm 의 회전수를 갖는 볼베어링 스핀들 모터를 체결하여 구성한 3.5" 드라이브의 소음을 측정하였다. Fig. 2 는 HDD 의 상면 50cm 의 높이에서 측정한 소음의 스펙트럼이다. Fig. 2 에 나타난 피크들은 Pole 과 Slot 의 수와 회전속도에 의해 결정되는 Cogging 주파수인 2160 Hz 나 볼베어링의 결함 주파수들이 플랫폼의 공진 점들과 만나서 만들어진 3~5 kHz 주변의 것들이 대부분이며 [6] 900 Hz 의 피크가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 그런데 소음의 특성상 전체의 소음 레벨을 줄이기 위하여서는 가장 큰 피크를 줄이지 않으면 여러 주파수에 산재 되어 있는 피크를 줄이더라도 소음이 줄어들지 않으므로 900 Hz 의 소음에 관심을 갖을 필요가 있다. 과거 40 mil 디스크를 사용한 드라이브에서는 주로 Cogging 에 의한 소음이 가장 큰 기여를 하는 소음 성분으로 나타나서, 소음을 줄이기 위해서 스핀들 모터의 Cogging Force 를 줄이고 드라이브의 고유진동수를 이 Cogging 주파수에서 벗어나도록 설계하는 노력들이 이루어져 왔으며, 1 kHz 이하의 소음은 상대적으로 순위가 낮으므로 주요 소음 주파수로서의 관심에서 벗어나 있었다. 다음의 Fig. 3 은 40 mil 디스크를 사용하는 드라이브의 소음 스펙트럼으로 1 kHz 이하에 Peak 존재하지만 가장 높은 성분은 아닐 뿐 아니라 그 주파수도 720 Hz 정도로 50 mil 디스크를 사용하는 드라이브에서 나타나는 소음의 양상과는 다름을 알 수 있다.

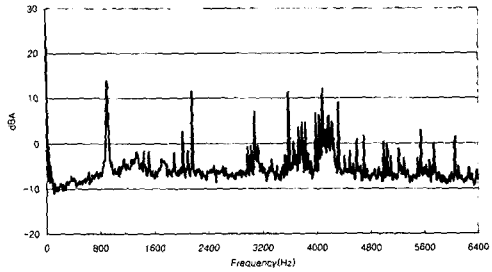


Fig. 2 Noise Spectrum of HDD with 50 mil Disk

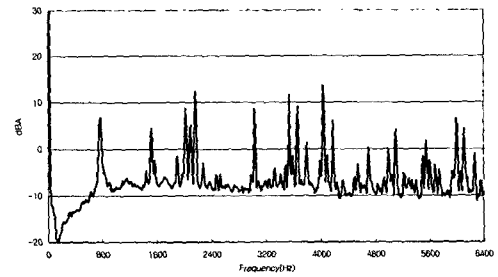


Fig. 3 Noise Spectrum of HDD with 40 mil Disk

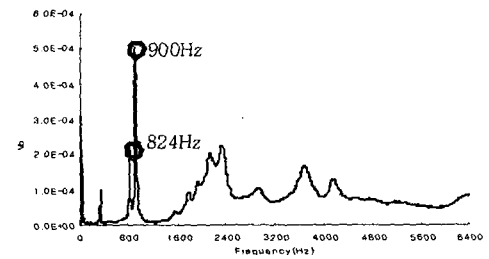


Fig. 4 Frequency Response Spectrum of HDD with 50 mil Disk Measured on the Cover

4. 900Hz 소음의 원인 규명

50 mil 디스크를 사용할 경우 900 Hz 부근에서 발생하는 소음의 원인을 규명하기 위하여 HDD 의 정지 상태의 고유진동수와 그 모드 및 운행변형형상(ODS: Operational Deflection Shape)을 측정하였다. 이 측정에는 Polytek 사의 스캐닝 레이져 바이브로미터(Scanning Laser Vibrometer) OFV-056 을 사용하였다. Fig. 4 는 Cover 에 80 개소의 측정점을 설정하고 이 점들에서의 모터 주파수응답스펙트럼을 평균한 그림으로 큰 피크의 소음이 발생하는 900 Hz 에 게의 공진이 존재함을 알 수 있다. 이 때의 고유진동모드를 Fig. 5 에, 그 바로 아래의

Fig. 5 Natural Mode of HDD with 50 mil Disk at 900 Hz

Fig. 6 Natural Mode of HDD with 50 mil Disk at 824 Hz

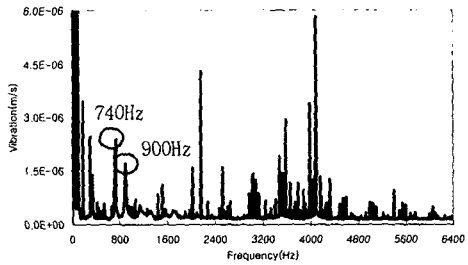


Fig. 7 Vibration Spectrum of HDD with 50 mil Disk Measured on the Cover

주파수에 나타난 824 Hz 의 고유진동모드를 Fig. 6 에 나타냈다. 고유진동수와 그 모드를 찾기 위한 가진 방법으로는 일반적으로 사용되는 Impact Hammer 에 의한 충격 가진이나 Electromagnetic 형의 가진기에 의한 가진이 아닌 모터의 세 극중, 두 극에 가진 신호를 인가하여 모터 자체를 가진기로 사용하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 실제 HDD 가 작동 중에 가진 되는 현상과 유사한 가진이 일어나므로 현상을 규명하는데 유리하다. 운행변형형상을 구하기 위해 HDD 를 5400 rpm 으로 공회전시킨 상태에서 80 개의 측정점에서의 진동 스펙트럼을 구하여 그 값들을 평균해 나타낸 것이 Fig. 7 이다. 역시 900 Hz 에 피크가 존재하며 이 피크에 해당하는 운행변형형상과 바로 아래의 피크 주파수인 740 Hz 에서의 운행변형형상을 각각 Fig. 8 과 Fig. 9 에 나타냈다.

Fig. 8 ODS of HDD with 50 mil Disk at 900 Hz

Fig. 9 ODS of HDD with 50 mil Disk at 740 Hz

Fig. 5 와 Fig. 8 의 900Hz 의 고유진동모드와 운행변형형상의 측정 결과 및 Fig. 6 과 Fig. 9 의 824 Hz 의 고유진동 모드와 740 Hz 의 운행변형형상을 관찰하여 보면 각각의 고유진동모드와 운행변형형상이 거의 유사함을 알 수 있다. 여기서 900 Hz 의 모드는 HDD 가 구동 되면서 동일한 주파수에서 고유진동모드와 같은 형태의 운동을 하며, 정지상태에서 824 Hz 의 고유진동모드는 HDD 가 구동되면서 740 Hz 로 주파수가 변경되어 824 Hz 의 고유진동모드와 같은 형태의 운동을 하고 있음을 알 수 있다. 이는 회전에 의해 고유진동수가 변화하는 디스크 스핀들 시스템의 영향에 의한 것으로 생각되므로 이를 확인하기 위하여 HDD 내부의 디스크를 제거하고 다시 주파수응답스펙트럼을 구하여 Fig. 10 에 나타냈다.

디스크가 제거되지 않았을 정지 상태에서 존재하던 824 Hz 와 900 Hz 부근의 피크가 완전히 없어졌으며 이 결과로 보아 소음의 스펙트럼에서 문제를 일으키는 900 Hz 부근의 진동은 디스크의 진동에 의한 것임을 알 수 있다. 다시 디스크의 진동 현상을 확인하기 위하여 스핀들 모터를 정지상태에서 6,000 rpm 까지 1,000 rpm 간격으로 회전수를 높여 가며 50 mil 디스크의 고유진동수를 측정하였다. 그 측정 결과를 Fig. 11 에 나타내고 회전수가 변하 면서 이동한 피크들을 직선으로 연결하여 번호를 부여하였다. 이 직선으로 연결된 피크들은 기존의연구 결과[7]에서 알려진 바와 같이 Fig. 11 의 표에 나타낸 형태의 디스크 스핀들 시

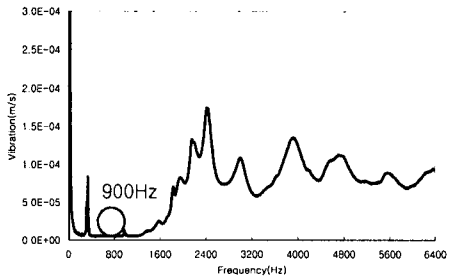
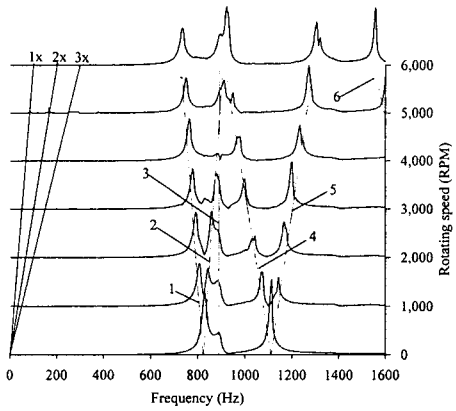


Fig. 10 Frequency Response Spectrum of HDD without Disk Measured on the Cover



No.	Interpretation
1 / 2	rocking backward / forward
3	disk (0,0)
4 / 5	disk (1,0) backward / forward
6	disk (2,0) backward

Fig. 11 Waterfall Plot with 50 mil Disk

스템의 진동 Rocking 모드가 회전수가 증가하면서 전진 성분과 후진 성분으로 분리되어 5400 rpm 에서 후진 성분은 740 Hz 로 이동하고 전진성분은 900 Hz 로 이동했음을 볼 수 있다. 5400 rmp 에서 900 Hz 의 고유진동수를 갖는 이 Rocking 모드의 전진성분은 회전속도와 상관 없이 900 Hz 를 유지하는 절직경과 절원이 없는 디스크 (0,0) 모드와 만나고 있다. 이 그림에서 나타난 주파수들과 앞의 고유진동모드와 운행변형형상을 나타내는 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 8, Fig. 9 의 형태의 진동을 유발하는 주파수와의 상관 관계로 유추하면 Fig. 5 와 Fig. 8 은 디스크의(0,0) 모드가, Fig. 6 과 Fig. 9 는 스핀들 디스크 시스템의 Rocking 모드가 커버에 영향을

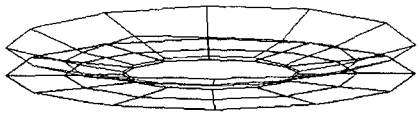


Fig. 12 900 Hz Natural Mode of Disk

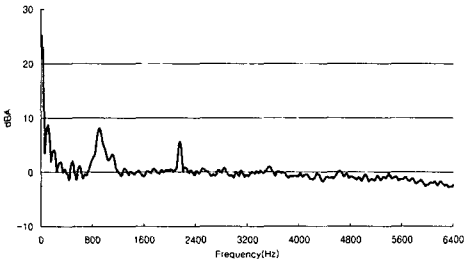
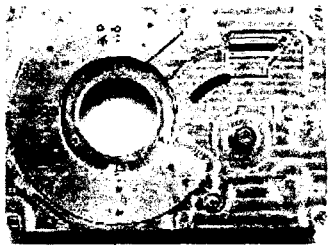


Fig. 13 Noise Spectrum of HDD with 50 mil Disk Using FDB Spindle Motor

주어 나타난 형상임을 알 수 있다. 900 Hz 의 진동 모드는 Rocking 모드이거나 디스크 (0,0) 모드인데 Fig. 8 의 900 Hz 에서의 커버의 운행변형형상이 디스크의 (0,0) 모드와 유사한 형태를 보이므로 900 Hz 의 소음에 영향을 주는 진동 모드는 Fig. 12 와 같은 형태의 디스크 (0,0) 모드임을 알 수 있다. 만약 이 모드가 Rocking 모드였다면 커버의 운행변형형상이 Fig. 9 와 유사하게 나타났을 것이다

다음으로 이 모드의 가진원을 찾아 보았다. HDD 의 경우 가진원으로 모터에서 발생하는 코깅 토크나 볼베어링에서 발생하는 결함주파수 및 디스크가 회전하면서 발생하는 유체의 유동에 의한 가진을 들 수 있다. 문제의 주파수가 코깅 주파수와는 멀리 떨어져 있으므로 가진원은 볼베어링에 의한 가진이나 유체의 유동에 의한 가진인데, 이 중 어떤 것이 문제를 유발하는 가진원인지를 확인하기 위하여 볼베어링에 의한 가진이 없는 유체동압베어링(FDB)를 사용하는 스핀들 모터를 HDD 에 장착하여 소음을 측정해 보았다. 그 결과 Fig. 13 에서 볼 수 있는 바와 같이 유체동압베어링 스핀들 모터를 사용해도 900 Hz 부근의 소음 피크가 살아 있다. 이 결과로 보아 900 Hz 의 디스크 진동은 HDD 내부의 유동에 의해 발생한 것임을 알 수 있다.

이상의 실험 결과와 그에 대한 고찰에서 900 Hz 소음은 HDD 내부 공기의 유동이 디스크를 가진하여 디스크가 가지고 있는 절직경과 절원이 없는 디스크의 (0,0) 모드를 발생시키고 그 진동이



(a) Base Platform

(b) C-Shaped Spacer

Fig. 14 Base Platform with C-shaped Spacer

외부로 전달되어 소음으로 나타난 것임을 알 수 있다.

5. 디스크의 공진 소음에 대한 대책

900 Hz 부근의 소음이 디스크의 고유진동 모드에 의한 소음이므로 이를 저감하기 위하여서는 디스크의 고유진동 모드를 억제하여야 한다. 디스크의 진동은 소음 뿐만 아니라 HDD 에서 헤드가 디스크 트랙 위의 자료를 읽고 쓸 때 발생하는 오작동인 트랙비정렬(TMR: track misregistration)을 유발시켜 HDD 저장 용량과 관련된 트랙 밀도를 제한하는 중요한 요소가 되므로 디스크의 진동을 줄이기 위한 많은 연구들이 진행되어왔다. 그 방법 중의 하나로 공기의 Squeeze Film Damping 효과에 의해 디스크 공진을 억제하는 방법[8]이 있는데 본 연구에서는 이 원리를 적용하여 디스크의 진동을 줄이고 이에 의해 소음을 저감 시키는 시도를 하였다. 공기의 Squeeze Film Damping 효과를 얻기 위하여 베이스의 디스크 대향면을 Fig. 14(a)와 같이 "C"자 형으로 올려 디스크와의 간극을 줄일 수 있도록 하였다. 간극의 크기에 따라 Squeeze Film Damping 효과가 달라지므로 간극의 크기와

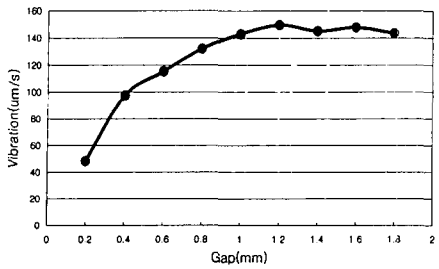
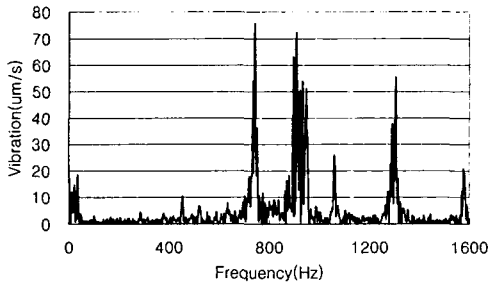
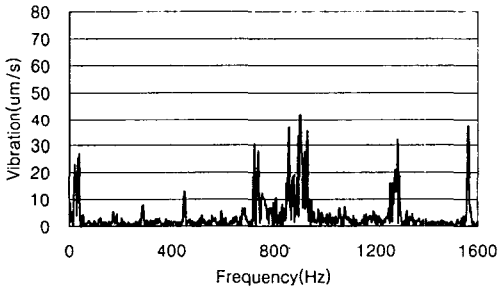


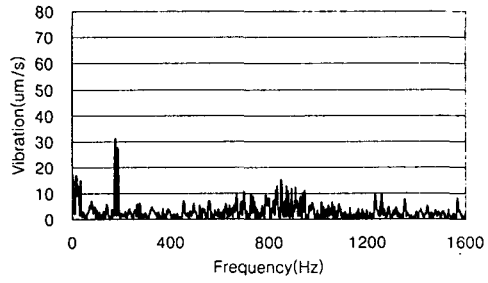
Fig. 15 Disk Surface Vibration at 5,400 rpm with Varying the Gap between Disk and Base



(a) 1.8 mm Gap

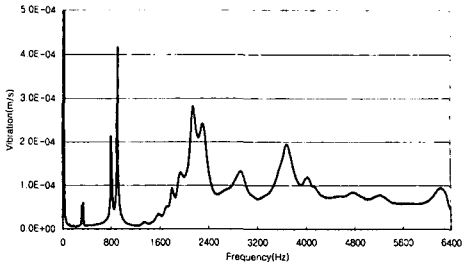


(b) 0.6 mm Gap

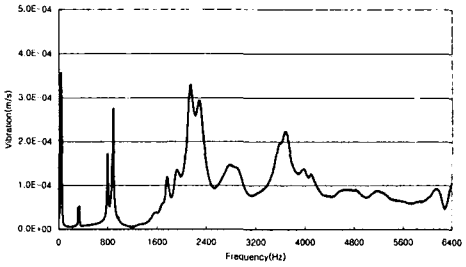


(c) 0.2 mm Gap

Fig. 16 Spectrum of Disk Surface Vibration with Varying Gap

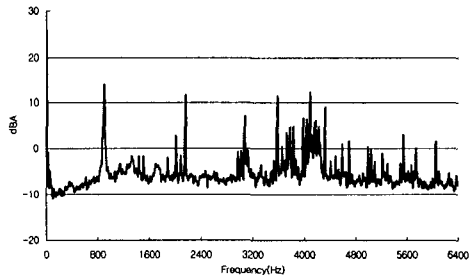


(a) Large Gap

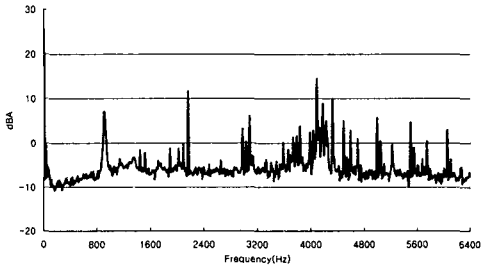


(b) 0.6 mm Gap

Fig. 17 Frequency Response Spectrum of HDD



(a) Large Gap



(b) 0.6 mm Gap

Fig. 18 Noise Spectrum of HDD

디스크의 진동량과의 관계를 알아내기 위하여 Fig. 14(b)와 같은 형상의 간극 조절용 스페이서(spacer)를 여러 두께로 제작하여 간극을 0.2 mm 에서 1.8 mm 까지 0.2 mm 간격으로 바꾸어 가며 회전속도 5,400 rmp 에 대하여 디스크의 면진동을 측정하였다. 디스크의 고유 모드가 본 실험의 주 관심 대상이므로 평균법[9]을 이용하여 디스크 회전수 및 그 배수 성분은 제거하였다.

다음의 Fig. 15 는 그 실험 결과이다. 간극이 작아질수록 디스크의 면진동이 작아짐을 알 수 있다. 간극이 1.2 mm 이상인 경우에는 면진동의 저감 효과가 거의 나타나지 않고 간극이 1.0 mm 이하일 경우에 간극이 줄어들면서 면진동 저감 효과가 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 16 의 (a), (b), (c)는 간극의 크기가 1.8 mm, 0.6 mm, 0.2 mm 일 경우의 디스크 면진동의 스펙트럼이다. 디스크 고유진동 성분의 피크들이 간극이 작아짐에 따라서 급격히 줄어들고 있는데 작은 간극에 의한 Squeeze Film Damping 효과가 디스크의 공진을 억제하고 있음을 알 수 있다. 본 결과에 의하면 간극을 가능한 한 작게 해주는 것이 유리하지만 간극이 지나치게 작아질 경우에는 생산 시에 디스크 면이 베이스에 접촉할 가능성이 높아지므로 양산 적용이 가능하고 공진 억제 효과도 충분히 나타날 수 있는 0.6 mm 의 간극을 선정하여 드라이브를 구성하였다. 이와 같이 0.6 mm 의 간극을 갖는 완전히 조립된 상태의 드라이브에 대하여 Cover 에서의 모터 가진에 대한 주파수응답스펙트럼과 소음을 측정하여 미소 간극 설계를 하지 않은 주파수응답스펙트럼 및 소음과 비교하여 Fig.17 의 (a), (b)와 Fig.18 의 (a), (b)에 각각 나타냈다. 문제의 900 Hz 진동과 소음이 크게 줄어들었음을 볼 수 있다. 특히 900 Hz 의 소음은 약 6 dBA 가 감소하여 가장 기여도가 높은 소음에서 순위가 낮은 소음으로 변경되었다. 또한 이와 같이 디스크 진동 모드를 억제 시키면 디스크의 면진동이 크게 감소되어 기록밀도 향상에도 도움이 될 수 있다.

6. 결 론

고내충격, 저진동, 저소음을 목표로 설계된 새로운 HDD 의 900 Hz 부근의 주파수에서 발생하는 최대 피크의 소음은 디스크가 회전하면서 발생한 공기 유동이 디스크의 고유진동모드를 가진 하여 발생한 것임을 밝혀 내었다. 이 소음에 대한 대책으로 디스크 주변의 공기에 의한 Squeeze Film Damping 효과를 이용하여 디스크의 고유진동모드를 억제할 수 있는 방안으로 디스크와 베이스 플랫폼 사이의 간극을 매우 작게 조절할 수 있는 구조를 적용하였다. 간극이 작아짐에 따라 디스크의 면진동은 급격히 감소하며 900 Hz 부근의 디스크의 공진소음도 6 dB 가량 감소되는 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

[1] D. A. Horsley, M. B. Cohn, A. Singh, R. Horowitz and A. P. Pisano, "Design and Fabrication of an Angular Microactuator for Magnetic Disk Drives," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.7, No.2, pp. 141-148, 1998

[2] Y. Soeno, S. Ichikawa, T. Tsuna, Y. Sato, and I. Sato, Piezoelectric piggy-back microactuator for hard disk drive, *IEEE Trans. on Magnetics.*, Vol.35, No.2, 1999.

[3] 손영, 황태연, 한윤식, 강성우, Frank Morris, " 고성능 하드 디스크 드라이브 개발을 위한 유체베어링 스핀들 모터의 특성분석," 한국소음진동공학회 2001 년도 춘계학술대회논문집, pp. 930-935

[4] J. Heath, "Simple Approach to improved Actuator bandwidth," *Data Storage*, Sep. 2000, pp. 48-60.

[5] L. Jiang, P. Macioce, "Optimizing Hard Drive Noise Control/Performance Tradeoffs," *Data Storage*, Jan. 2001, pp. 24-27

[6] 강성우, 한윤식, 황태연, 손영, 오동호, Tho Pham, "Structural Mobility 분석을 통한 하드 디스크 드라이브의 소음제어" 한국소음진동공학회 2001 년도 춘계학술대회논문집, pp.1111-1116

[7] 김철순, "HDD 디스크-스핀들 시스템의 동특성 해석" 대한기계학회 2000 년도 동력학 및 제어부문 하계 학술대회 논문집, pp. 190-195

[8] S. Deeyiengyang, K. Ono "Suppression of Resonance Amplitude of Disk Vibrations by Squeeze Air Bearing Plate" *IEEE Trans on Magnetics*, Vol.37, no.2, March 2001, pp.820-825

[9] G. Bouchard, L. Lau and F. E. Talke, "An Investigation of Non-repeatable Spindle Runout," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 23, No. 5, 1987, pp. 3687-3689.