

하드디스크 드라이브에 있어서 스피들모터의 구조적 가진에 따른 시스템의 소음 특성에 관한 연구

°손 영*, 황 태연*, 강 성우**, 한 윤식*, 구 자춘***

A Study On The Acoustic Noise Characteristics Of Hard Disk Drive Due To The Structural Excitation Of Spindle Motor

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

ABSTRACT

HDD structure is excited by the dynamic motion of disk-spindle motor components. Those excitations which are generated at stator and magnet rotor, at bearings and from disk dynamics, are transmitted through motor spindle and flange to HDD cover and base. The operational deflection shape measurement can show the structural excitation patterns at the most influent frequency on the acoustic noise level. One of those components is the axial excitation along spindle, and the other is the local orbital excitation at contact area of motor flange and base. To make a reduction of those structural transmission excitations, the structure of spindle motor is modified to the direction of reinforcement at transmission path without change of bearings, magnet and coil. Some excitation of spindle motor component carrying out essential function is unavoidable. So it is the efficient way of HDD noise improvement to control the structural transmission of excitation.

1. 서론

최근의 HDD(Hard Disk Drive, 하드 디스크 드라이브)는 기록 용량, 기록/재생 속도 등의 저장기기로서의 성능 향상과 더불어 충격 성능, 소음 성능 등의 제품의 신뢰성 측면에서도 더욱 고 성능을 요구하고 있다. 더욱이 HDD의 응용 분야가 PC(Personal Computer)에서 가전제품으로 확장됨에 따라 저소음 HDD에 대한 요구는 제품개발에 있어서 필수적인 연구분야가 되고 있다.

일반적으로 HDD에 있어서의 소음특성은 크게 3가지로 분리해서 생각할 수 있는데, 스피들 모터에서 직접 전파되는 스피들 모터 자체의 소음 특성과 디스크가 조립된 스피들 모터의 회전 진동이 구조물을 가진하여 발생되는 구조기인소음(structure borne noise) 특성, 그리고 디스크의 고속 회전에 따라 디스크의 표면에서 발생하는 공기유동으로 발생되는 공력기인소음(air borne noise) 특성으로 나눌 수 있다.[1]

본 논문에서는 HDD 시스템에 있어서 스피들 모터의 회전 진동에 따른 구조기인소음을 제어함을 목적으로 한다. 이를 위하여, 우선 하드 디스크 드라이브용 스피들 모터의 진동 특성을 스피들 모터의 구조적 측면과 전자기적 측면을 기준으로 분석하고, 이러한 스피들 모터로부터의 가진 특성이 하드 디스크 드라이브 시스템에 미치는 응답 특성은 운행변형형상(ODS;Operational Deflection Shape)을 측정하여 평가한다. 마지막으로 하드디스크 드라이브의 구조기인 소음을 저감하기 위한 스피들 모터의 구조를 제안하고 그에 따른 소음 특성의 향상을 실험적으로 규명하도록 한다.

2. 하드 디스크 드라이브에서 스피들 모터의 구조 특성

HDD의 정보 기록 및 재생 과정은 상대 운동에 의한 극부 공기압에 의해 부상된 자기 헤드(Magnetic Head)를 통해 회전 디스크에 신호를 자화(Magnetization)시키는 과정이다. 이러한 과정에서 디스크를 회전시키기 위해 3상 DC-브러시리스 모터(3-Phase DC Brushless Motor)를 사용하며 헤드의 위치를 제어하기 위해 VCM(Voice Coil Motor)을 사

* 삼성종합기술원 Nano System Lab.
** 정희원, 삼성종합기술원 Nano System Lab.
*** Samsung Information Systems America

용한다.

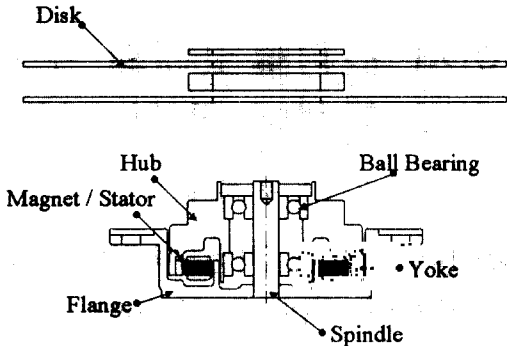


Fig. 1 Components of Disk-Spindle Motor System

이 두 모터는 HDD의 두가지 동력 전달원으로 시스템의 동적 특성을 결정짓는 요소들이다. HDD의 소음 수준은 기록 재생이 이루어지고 있는 Seek Time에서와 그렇지 않은 Idle Time에 대해 각각 평가 한다. 본 논문에서는 VCM이 정지해 있는 Idle Time의 소음에 대한 스피들 모터(Spindle Motor)의 영향에 대해 고찰하였다.

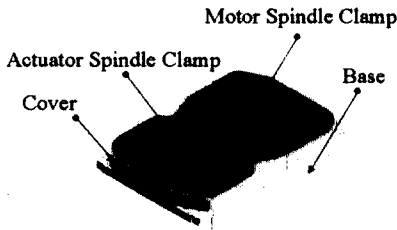


Fig. 2 Appearance of HDD System

스피들 모터는 Fig. 1에 보인 바와 같이 Disk와 결합하여 회전하는 허브(Hub)와 이의 회전운동을 지지하는 축-플랜지(Flange)로 구성되어 있다. 플랜지에 설치된 고정자(Stator)와 허브에 설치되어 있는 회전자(Magnet Rotor)사이의 자기력은 구동 회로에서 전달되는 3상 전류에 의해 회전 토크를 발생시키게 되며 축과 허브사이에 조립된 베어링에 의해 구속되며 디스크를 회전시킨다. 스피들 모터는 일반적으로 플랜지부가 HDD의 베이스에 고정되며 축을 커버(Cover)에 볼트 체결한다. 스피들 모터의 진동 특성은 베어링, 허브, 플랜지 등의 요소의 배치 및 형상에 의해 결정되며 HDD의 커버, 베이스와의 결합부를 가진하여 HDD 시스템의 진동, 소음 특성을 결정한다. Fig 2에는 하드 디스크 드라이브의 외관 형상을 나타내고 있으며, 하부의 베이스와 상부의 커버는 외측에서의 고정 나사로

결합되며 스피들 모터와 VCM 스피들들과 커버 중앙부에서 2개소의 고정 나사로 결합되는 구조로 이루어져 있다.

3. 스피들 모터의 가진 주파수

스피들 모터에서 발생하는 진동 성분은 베어링 회전 진동 성분과 모터의 자기력에 의한 성분 그리고 시스템의 공진 관련 성분으로 나눌 수 있다. 베어링 회전 진동 성분에는 케도륜(Raceway)의 자유 진동, 케이지(Cage)의 자유 진동 그리고 하중 지점과 무하중 구간 사이의 볼의 통과 진동(Ball Passage vibration)등과 같이 베어링의 구조에 의해 결정되는 성분들이 있으며 케도륜의 표면 가공 시에 발생하는 굴곡에 의한 진동 성분이나 볼과 케도륜 사이의 오염 또는 충격에 의한 볼의 파손 등으로 발생하는 진동 성분들이 있을 수 있다.[3] 베어링 회전 진동 성분들은 단품 상태의 스피들 모터의 진동 소음에는 직접적인 영향을 주지만 스피들 모터가 밀폐 조립된 HDD 전체 시스템에서는 베어링 회전 진동에 의한 소음 성분은 HDD 커버와 베이스의 경로를 통하므로 많은 부분 외부로 직접 전파되지는 않는다. 그러나 충격 율활 불량 등으로 인한 베어링 요소의 손상에 의해 발생하는 진동 성분은 전대역의 주파수 범위에 걸쳐 그 진폭을 크게 하므로 HDD 시스템의 진동 소음 수준을 전반적으로 높이는데 기여하게 된다. 디스크-모터 시스템의 구조 공진 문제 이외에도 HDD의 구동 모터에서 발생하는 자기력에 의해 유발되는 진동은 스피들 모터 또한 HDD 커버 베이스의 구조에 의해 다른 경향을 보인다.

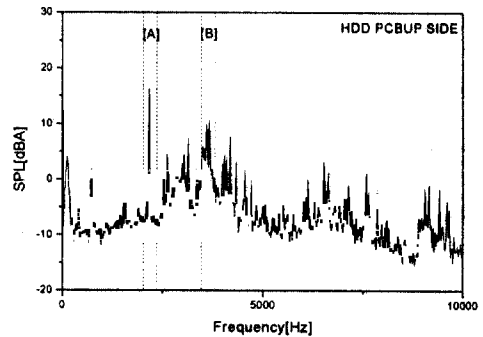


Fig. 3 Sound Pressure Spectrum of HDD At PCBUP Direction

모터의 고정자 권선에는 구동 회로에서 생성된 3상 직류 전원이 인가되며 이 전류의 위상에 따라 회전자에 인력과 척력을 발생시켜 회전하게 하는데 최근에는 디지털 방식의 구동 회로를 사용해 일정 주파수로 스위칭하여 이와 같은 전류를 발생

시키고 있다. HDD의 베이스에 구동 회로 및 제어 회로가 장착된 PCB가 설치되는 것이 일반적이므로 각각의 방향을 PCB의 설치 위치를 기준으로 음압 측정 시 PCB가 위쪽으로 향하면 PCB UP, 아래쪽 측 커버 측을 측정할 경우는 PCB Down 이라 표기한다. Fig. 3은 두 장의 디스크가 장착된 회전수 5400[rpm]의 HDD의 PCBUP 방향에서 측정된 음압 스펙트럼이다. 여기서 음압 수준은 스위칭 주파수와 그 배수 성분 그리고 3~4[KHz] 대역의 성분에 의해 지배됨을 알 수 있다.

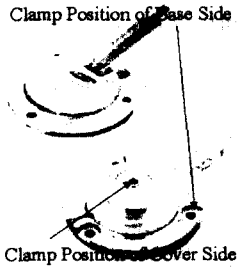


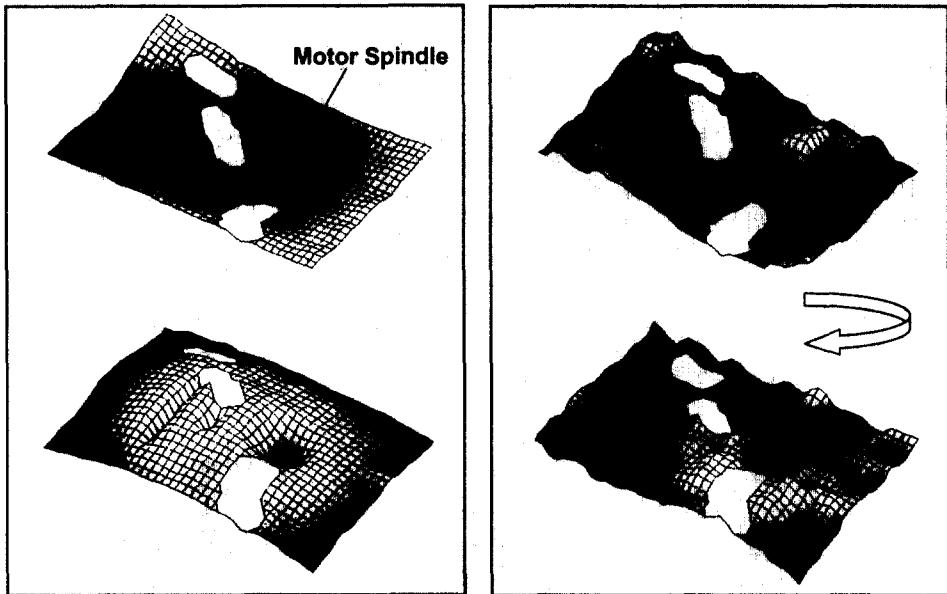
Fig. 4 Spindle Motor Clamp Positions

스핀들 모터는 Fig. 4에 보인 바와 같이 Cover와 축의 한점 그리고 베이스와는 세점의 볼트 체결을 이용하여 면 결합한다. 디스크 모터 시스템에서 발생된 가진력은 네 점의 볼트 체결부를 통

해 HDD 커버와 베이스 및 각 요소로 전달된다.

4. 운행변형형상(ODS: operational deflection shape)을 이용한 가진 특성 분석

HDD의 음압 스펙트럼으로부터 음압 레벨을 결정하는 주요 성분을 파악할 수 있었으며 이러한 성분들에 대한 진동 패턴을 파악하기 위해 운행 변형형상(Operational Deflection Shape)[4]을 측정하였다. 구조물에 대한 모드 형상 측정에서는 구조물의 자유 진동 형상만을 보여주지만 운행 변형형상(ODS) 측정을 통해서는 가진원에 의한 국부적 진동파의 형태까지 잘 설명할 수 있다. Fig. 5는 HDD의 베이스 측에 대한 운행 변형형상 측정 결과이며 (a)와 (b)는 각각 Fig. 3의 A와 B 주파수 성분에 대한 결과이다. 상하 그림은 시간에 대한 운행 변형형상 중 180 위상차를 갖는 동일 주파수 성분에서의 정지 화면이다. Polytek사의 스캐닝 레이저 헤드(Scanning Raser Head) OFV-056을 사용하여 25X40의 격자 점에 대해 베이스 면의 운행 변형형상을 측정하였다. Fig. 5(a)의 운행 변형형상으로부터 이 주파수의 가진은 축 방향 상하 진동을 하고 있는 것을 알 수 있으며 진동 형태의 중심점을 이루고 있는 것은 모터 축의 중심이다.



(a) Axial excitation along spindle (Fig. 3[A])

(b) Local orbital excitation at contact area of Motor flange and base (Fig.3[B])

Fig. 5 Operational Deflection Shapes Of HDD PCBUP Side

Fig. 5(a)는 Fig. 3의 [A] 영역에서 파악한 1차 스위칭 주파수에 대한 운행 변형 형상이다. 이 주파수 성분은 모터 고정자와 회전자 구조에 의해 결정되는 것으로 발생 원리에 따라 코깅 토크(Cogging Torque) 성분과 축 방향 자기력 성분(Axial Magnetic Force)으로 나눌 수 있다. 첫번째는 영구 자석과 강자성체 고정자 요크 사이에 저장된 자기 에너지의 불균등 분포에 의해 발생하는 코깅 토크 주파수라 하며 이론적 가진 주파수는 다음과 같다.

$$\text{Frequency} = \text{LCM}(\text{Pole, Slot}) \times \text{Rotation Frequency} \times N$$

여기서 N은 양의 정수이다. 코깅 토크는 모터의 축에 대해 반경 방향으로 발생하는 것으로 Fig. 5(a)의 가진은 코깅 토크에 의한다고 하기 보다는 동일 가진 주파수 성분을 갖는 축 방향 자기력 성분(Axial Magnetic Force)에 의한 것이라 할 수 있다.

이는 스피들 모터 영구 자석의 자속 경로를 제어하며 영구 자석을 허브(Hub)에 지탱시키고 영구 자석의 자속이 정보가 기록된 디스크에 영향을 주는 것을 막기 위해 영구 자석 바깥쪽에 장착된 자성체 요크(Yoke, Fig. 1)로 인해 영구 자석부가 축 방향 비대칭 구조를 가지고 있어 축 방향으로 발생하게 되는 가진이다. 또 Fig. 5(b)의 [B] 영역에 존재하는 3.6KHz 주파수 성분에 대한 운행 변형 형상에서는 모터의 플랜지와 베이스의 접촉원을 따라 진동파가 회전하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에서 스피들 모터의 베이스와의 체결부를 보면 3점의 볼트 결합부와 원형의 면 접촉 부로 이루어 짐을 알 수 있는데 이 진동은 면 접촉부를 따라 디스크의 회전 방향과 동일한 방향으로 발생하고 있다. 진동파의 회전 중심에 대해 진폭 상승부와 하강부가 180° 위상차를 보이고 있는 데이로부터 원형 면 접촉부에 모멘트 가진이 전달되고 있다고 추정하였다. 또 이 가진 성분을 결합부 회전 가진으로 부르기로 한다. Fig. 6의 모터 축 하부에 편심 회전 가진이 전달될 경우 플랜지는 축 중심과 체결부를 잇는 모멘트 팔로 작용하게

된다.

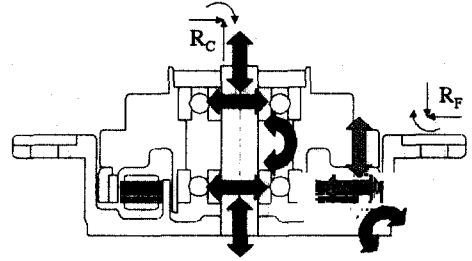


Fig. 6 Excitation Sources of HDD Spindle Motor

5. 스피들 모터의 구조 가진 제어 모델

앞 절에서 살펴 본 운행 변형 형상 분석에 기초하여 HDD의 소음 스펙트럼에 민감한 주파수에 대해 가진의 전달 경로를 제어하기 위해 모터 축의 지지부인 플랜지 부의 설계를 변경한 모델을 제작하였다. Fig. 7(a)에 보인 바와 같은 스피들 모터를 비교 대상으로 하여 각 주파수 대역에 대한 제어 방안을 적용한 Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)의 모델을 평가하였다. Fig. 6(a)로부터 축 방향 자기력 성분에 의한 진동은 모터의 축이 상하 방향으로 진동하는 형태임을 알 수 있었다. 모터 축의 상부는 커버에 볼트 체결되고 하부는 플랜지에 압입되므로 모터 축의 상하 진동량을 저감할 수 있도록 플랜지 바닥의 강성을 보완하도록 하였다.

또 Fig. 6(b)에서 보인 바와 같은 HDD 베이스와 모터 체결부를 따라 발생하는 원형 진동파 성분은 디스크-스피들 모터의 회전에 의한 국부적 가진 성분이며 음압 스펙트럼 상에서도 지배적인 성분을 알 수 있다. 이와 같은 진동은 디스크-스피들의 베이스 축 지지점의 편심 궤적 운동을 구속하고 베이스와 플랜지 결합부로의 전달 모멘트를 감소시키는 것이 필요하다. Fig. 7(c)에 보인 모델 C에서는 베이스와의 볼트 체결 지점과 축 결합 부간의 모멘트 강성을 증가시키기 위해 플랜지의 바닥과 벽의 두께를 모두 증가시켰다.

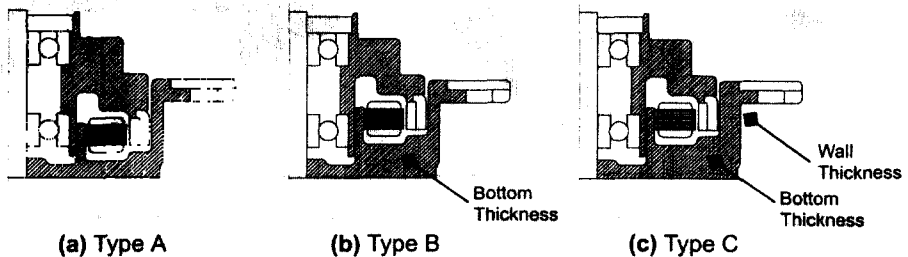


Fig. 7 Three Types of Structure Changed Model for HDD Spindle Motor

6. 스피들 모터의 형상변경에 따른 HDD

소음 특성의 변화

Fig. 7에 보인 바와 같은 세가지 모델에서 회전자와 고정자에는 아무런 변화를 주지 않은 상태이며 허브(Hub) 베어링-스핀들의 설계 역시 모두 동일한 상태를 유지하였다. 각 모델의 음압 측정 결과는 플랜지의 구조적 변화에 의한 소음 특성의 차이만을 보여 주고 있다.

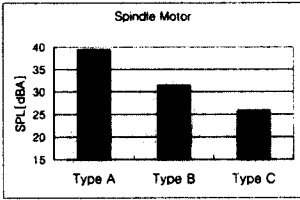


Fig. 8 Comparison of Spindle Motor Noise Level

스폰지 위에 올려 놓은 스피들 모터에 대한 각 모델의 소음 레벨의 차이를 Fig. 8에 보였다. 플랜지 부의 설계 보완이 단품 상태의 모터 소음에서 큰 차이를 보여 주고 있다. 플랜지 부의 보강으로 단품 상태의 소음 특성이 개선되었음을 보여 주고 있다. 그러나 HDD 구조 안에서의 스피들 모터의 영향은 단품 상태와는 차이가 있으므로 세트 상태의 적합성을 검토하는 것은 필수적이다.

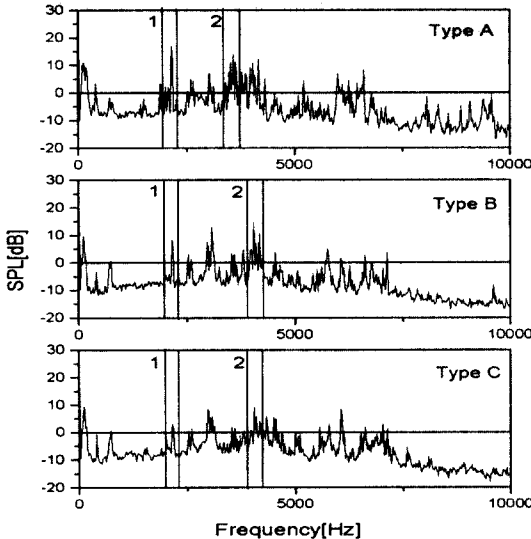
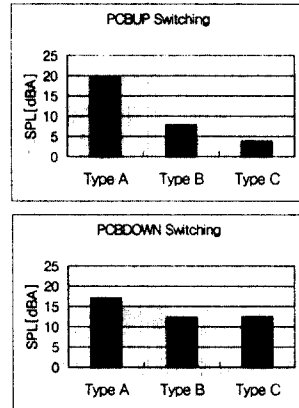


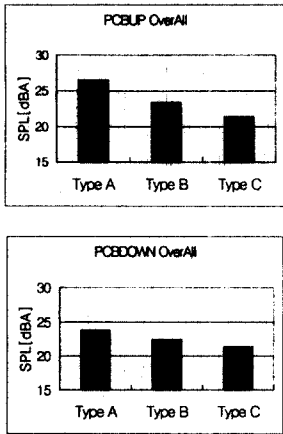
Fig. 9 Comparison of Sound Pressure Spectrum for Three Types of Motor

Fig. 7의 각 모델에 대하여 5개의 샘플을 제작하여 음압 수준과 음압 스펙트럼을 비교하였다. 각 모델에서의 샘플들은 유사한 음압 스펙트럼을 보여 주고 있으며 Fig. 9에 그 대표 스펙트럼을 나타내었다. Fig. 7에서는 스피들 모터의 구조적 특성에 의해 발생하는 주파수 성분 중 앞서 기술한 바와 같은 축 방향 자기력 성분 주파수와 결합부 회전 가진 성분의 변화를 중심으로 비교한다. 각 성분을 Fig. 9 그래프 상에 영역 1과 2로 나타내었다. Type A에 비해 Type B에서는 축 방향 자기력 성분 주파수의 음압 피크 수준이 절반 이하로 감소하였음을 알 수 있는데 이는 Type B의 플랜지 바닥 강성의 증가가 축 방향 자기력 성분 주파수에서의 모터 축 방향 가진의 진폭을 감소시키는 데 효과를 보이고 있음을 알 수 있다. 플랜지의 바닥과 벽면의 두께를 모두 증가시킨 Type C의 경우 스위칭 주파수의 피크 수준이 세 모델 중 가장 낮은 수치를 보여 주고 있는데 이는 플랜지의 바닥면과 벽면의 두께 증가가 축 방향 강성 보완에 모두 효과가 있었음을 보여 주고 있다.

Fig. 6(b)에서 보인 바와 같은 결합부 회전 가진 성분은 Type A의 경우 3.6KHz에 존재하나 Type B에 대한 운행 변형 형상과 음압 스펙트럼을 비교해 보면 4.1KHz로 이동하였음을 알 수 있었다. 그러나 Type B에서는 플랜지 바닥의 두께 변화로 인해 Type A에 비해 주파수는 이동하였으나 그 진폭은 별다른 차이를 보여 주지 않고 있다. 또 Type C에서 이 성분은 4.3KHz로 이동하며 그 진폭이 Type A, B에 비해 15dB 이상 감소하였다. 이와 같은 결과는 결합부를 통해 전달되는 가진 성분은 축 결합부와 베이스와의 체결부로 이어지는 모멘트 강성의 증가로 제어될 수 있음을 보여 주고 있다.



(a) Switching Frequency Component Level



(b) Overall Sound Pressure Level

Fig. 10 Comparison of Sound Pressure Level for Three Types of Motor

Fig. 10(a)에서는 축 방향 자기력 성분 주파수에서의 샘플들의 음압 수준 평균을 HDD의 PCBUP과 PCB DOWN 방향에 대해 각각 비교하였다. PCB Up 방향의 음압 측정에서는 축 방향 자기력 성분 주파수의 샘플들의 평균치는 Type A에서 19dB, Type B에서 8dB, 그리고 Type C에서 4dB이다. 또 PCB DOWN 방향에서의 측정에서는 Type A에 비해 Type B, C가 5dB 가량 낮은 수준을 보이고 있으나 Type B, C의 차이는 없다. 이는 Type B에 비해 Type C에서 플랜지 벽면 보강으로 베이스 쪽으로의 축 방향 가진 성분의 전파는 줄일 수 있으나 커버 쪽으로는 모터 축을 통해 직접 전파되므로 이를 차단하는 데는 효과가 없음을 보여 주고 있다. 그러므로 축 방향 가진 성분의 제어를 위해서는 모터 축의 축 방향 지지부 강성을 키우는 것이 가장 효과적이라 할 수 있다.

Fig. 10(b)에는 각 샘플을 사용한 HDD의 전대역(100Hz~20KHz)에 대한 음압 수준을 비교하였다. 스핀들 모터의 구조 개선을 통한 음압 개선 효과는 PCBDOWN 방향에 비해 PCBUP 방향에서 크게 볼 수 있었는데 이는 앞서 기술한 바와 같이 음압 스펙트럼에서 파악한 주요 성분에 대한 개선 효과가 PCBUP 방향에서 컸기 때문이다.

7. 결론

HDD 시스템에 대한 음압 스펙트럼으로부터 주요 소음 성분을 파악하였으며 운행변형형상 측정 결과를 통해 가진 패턴을 파악하였다. HDD 시스템의 소음 수준에 지배적인 성분은 스핀들 모터에 의한 국부적 구조 가진에 기인했는데 이러한 성분으로는 스핀들 모터 구동 스위칭 주파수와 동일한 주파수에서 발생하는 축 방향 자기력 성분과

스핀들 모터와 베이스의 결합부를 통해 전달되는 결합부 회전 가진 성분이었다.

이러한 가진 성분의 전달부인 스핀들 모터의 구조를 변경한 세가지 모델에 대해 각 주파수 소음 성분의 변화를 관찰하였으며 스핀들 모터의 플랜지의 바닥과 벽면의 강성을 증가시킨 Type C의 경우에 두가지 주파수 성분에서 모두 효과적인 소음 제어 결과를 보였다. 실험 결과로부터 동일한 요소를 갖는 스핀들 모터더라도 가진 성분의 전달 경로에 대한 설계의 적합성을 확보하면 HDD 시스템의 소음 수준의 개선을 이룰 수 있음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 삼성전자 지원으로 수행중인 HDD 초저 소음 제어 과제에 연구 결과이며 연구에 도움을 주신 삼성전자 스토리지 사업부와 SISA의 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 황태연, 강성우, 한윤식, 손영, 정정일, "고속 HDD의 소음 제어", 한국 소음 진동공학회지 제9권 제4호, 1999년 pp 660-668
- [2] T. Momono, B. Noda, "Sound and Vibration in Rolling Bearings", Motion and Control, NSK, 1999, No.6 pp.29~37
- [3] T.A.Harris, "Rolling Bearing Analysis", Wiley, 1991
- [4] O. Dossing, "Structural Stroboscopy - Measurement of Operational Deflection Shapes," B & K, 1988, pp.18~26.