

HDD 소음제어를 위한 SDM 기술 개발

⁰김 경 호* • 박 미 유* • 박 윤 식**

SDM Technique Development for HDD Acoustic Noise Control

⁰Gyeong-Ho Kim* • Mi-You Park* • Youn-Sik Park**

Abstract

HDD로부터 방사되는 소음을 제어하려는 연구가 많이 진행되고 있다. 기존의 소음제어 방법은 주로 소음/진동 측정에 의한 실험적 방법과 엔지니어의 직감과 경험을 이용한 반복적 시행 착오법에 의존한다. 그러나, 이러한 방법은 제품 개발 기간의 단축이 요구되고 소음문제가 더욱 크게 대두되는 현실에 비추어 볼 때 부적절하다. 따라서, 본 연구에서는 해석적 방법을 통해 HDD 소음을 체계적으로 제어하고자 한다. 실험을 통해 HDD의 소음/진동특성을 파악하였고 문제가 되는 관심 주파수대역을 선정하였다. 복잡한 HDD 전체구조물에 대한 유한요소모델을 세우기 보다 소음/진동적 측면에서 문제가 되는 커버만 유한요소모델을 수립하고 부분구조합성법을 통해 전체 HDD의 동특성을 예측할 수 있는 모델을 수립하려 하며 현재 이러한 연구를 진행 중에 있다. 이러한 실험/해석모델이 완성되면 궁극적으로 SDM을 적용하여 소음/진동 특성이 향상된 HDD 구조물 설계기법을 제안할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 현재까지의 실험 및 해석결과와 향후 필요한 과제를 고찰하였다.

1. 서론

정보화 사회로 일컬어 지는 현대사회에서 인터넷 및 멀티미디어의 보급/확산으로 정보저장장치의 수요가 급팽창하고 있고 따라서 이의 고성능화를 필요로 하고 있다. 현재 쓰이고 있는 정보저장장치 중에서 가장 널리 쓰이는 것은 HDD(Hard Disk Drive, 하드디스크 드라이브)로 정보저장장치 시장의 80%대를 아직도 유지하고 있다. HDD의 기록/재생 성능의 향상을 위해서는 스피들 모터와 디스크를 포함하는 스피들 시스템의 회전속도 증가가 요구되는데, 이러한 고속화는 HDD 시스템의 진동 및 소음의 진동을 동반하게 된다. HDD에서 발생하는 소음은 일반기계구조물의 소음에 비하여 그 절대음압은 낮은 편이나 사용자가 HDD를 근접위치에 사용하게 되고, 소음성분이 인간의 민감가청대역인 고주파 성분들이 지배적이기 때문에 제품 품질 향상을 위해서는 이러한 소음제어를 위한 노력이 무엇보다 필요하다. HDD에 사용되는 스피들 모터의 회전속도가 이미 1000rpm을 넘어선 고속의 제품이 출시되고 있는 상황에서 수요

자의 소음 저감 요구는 더욱 엄격해지고 있는 현실이므로 소음을 체계적으로 제어할 수 있는 HDD 설계 방법 개발이 절실히 요구되고 있다.

실험장비 및 해석기술의 발달로 HDD의 진동 및 소음특성을 측정/파악하는 기술은 어느 정도 확립되었으며 이 기술을 설계에 활용하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 즉, 소음 저감을 위해서 소음원에서 소음발생을 줄이기 위한 방안과 소음 전달경로에서 이를 차단하려는 방안이 모두 연구되고 있다. 소음원이라고 할 수 있는 스피들 시스템에서 소음을 저감하기 위해, 기존의 스피들 모터에 사용되는 볼베어링을 대신하여 소음특성에서 유리한 유체 동압 베어링을 사용하기 위한 기술적 연구도 진행되었으며⁽¹⁾ 최근 유체 동압 베어링을 채택한 HDD 모델도 시장에 선을 보이고 있다. 소음전달경로에서는 주로 흡음체를 사용하여 소음을 차단하는 방법이 제안되었으며 이 방법은 주로 실험적 방법으로 근접음장에서 음향인텐시티를 측정하고 강한 음향발생을 보이는 위치에 흡음체를 사용하여 소음 저감을 시도했다^(1, 2). 그러나 지금까지의 연구개발방향은 소음/진동 해석 방법과 엔지니어의 직감과 경험을 이용한 반복적 시행 착오법을 따르고 있다. 급속한 시장 환경 변화로

한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

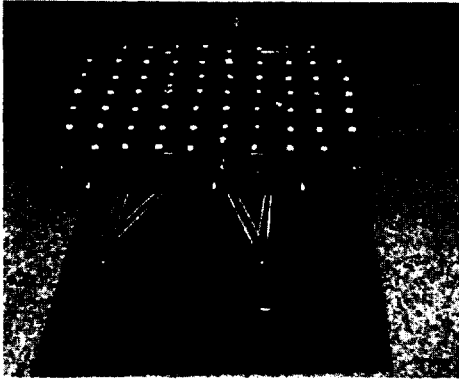


Fig. 1 Operational Vibration Measurement

제품개발 기간의 단축이 무엇보다 시급히 요구되고 특히, HDD의 고속화로 소음문제는 더욱 크게 대두되고 있는 상황에서 기존의 소음제어 방법은 효과적이지 못하고 보다 체계적인 소음 저감 설계 기술 개발이 요구된다.

본 연구에서 HDD 구조물을 모델링하고 SDM(Structural Dynamics Modification, 구조물 동특성 변경법)⁽³⁾을 적용하여 소음/진동을 줄이기 위한 HDD 구조변경 방안을 제시하고자 한다. 이 연구는 현재 진행 중이며 본 논문에서는 HDD 소음/진동 특성 파악 및 HDD 구조물 모델링에 대한 내용을 기술한다.

2. HDD 소음/진동 특성 파악

20GB(5200rpm)용량의 HDD를 대상으로 연구를 수행하였다(Fig. 1). 대상 HDD에 사용된 스피들 모터는 8 pole, 12 slot으로 구성되며 따라서 코깅 토크의 기본 주파수는 2160Hz이다⁽⁴⁾. 대상 HDD에 대해 운전 중 소음/진동을 측정하여 소음/진동이 문제가 되는 관심주파수대역을 설정하였고 모드해석실험을 통해 소음/진동특성을 파악하였다.

2.1 운전 중 진동/소음 측정 실험

Fig. 1과 같이 자유단 조건에서 HDD를 운전하고 HDD 커버(Cover)면의 66개 지점에서 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 이용하여 커버면 진동량(속도)을 측정하였고 CADA-X로 주파수 분석을 수행하였다. Fig. 2는 식(1)과 같이 정의되는 표면 전체의 속도파워스펙트럼을 도시한 것이다.

$$\sum_{i=1}^{66} v(i, f)^2 \quad (1)$$

여기서, i 는 측정위치, f 는 주파수, $v(i, f)$ 는 속도파워스펙트럼을 나타낸다. 주파수 분해능은 0.6

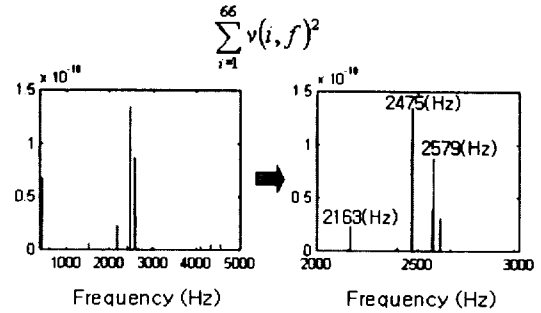


Fig. 2 Operation Velocity Power Spectrum of Cover

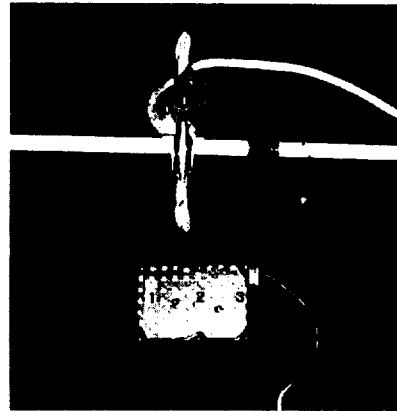


Fig. 3 Sound Pressure Level Measurement

Hz이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 코깅 토크 주파 주파수인 2160Hz 외에 2475Hz와 2579Hz 등에서 큰 진동량이 발생한다.

HDD의 커버면과 베이스(Base)면으로부터 방사되는 소음을 측정하기 위해, Fig. 3과 같이 무향실에서 소음측정실험을 수행하였다. HDD커버면과 베이스면의 각 3개 지점으로부터 수직으로 40cm 떨어진 근접음장에서 마이크로폰을 사용하여 소음을 측정하였고 주파수 분석(HP 35670A)을 하였다. Fig. 4는 A-보정 음압레벨(A-weighted Sound Pressure Level)을 도시한 것이다. 여기서 주파수 분해능은 4 Hz이다. 그림에서 볼 수 있듯이 베이스면에서 방사되는 소음은 커버면에서 방사되는 소음에 비해 훨씬 적다. 따라서, HDD 소음제어를 위해서는 우선적으로 커버에 대해 SDM을 적용하는 것이 필요하다. Fig. 2와 Fig. 3를 보면 진동량이 크게 나타나는 주파수에서 음압레벨도 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. HDD의 소음은 표면 진동과 밀접하게 관계되어 있고 이러한 소음은 구조기인소음이라는 것을 의미한다. 따라서, 구조물(특히, 커버)의 동특성을 변경하여 HDD 소음제어를 할 수 있을 것으로 기대된다.

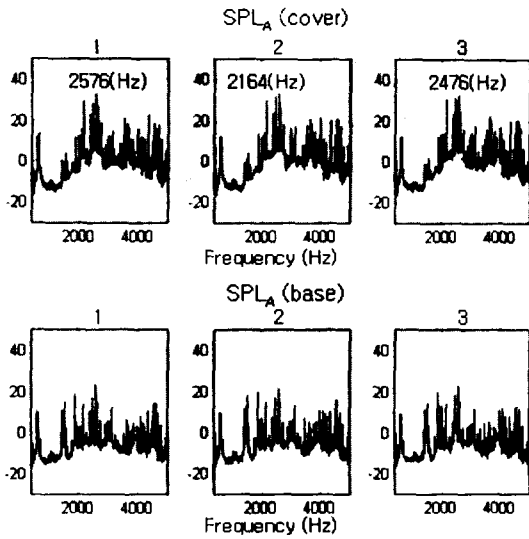


Fig. 4 A-weighted Sound Pressure Level

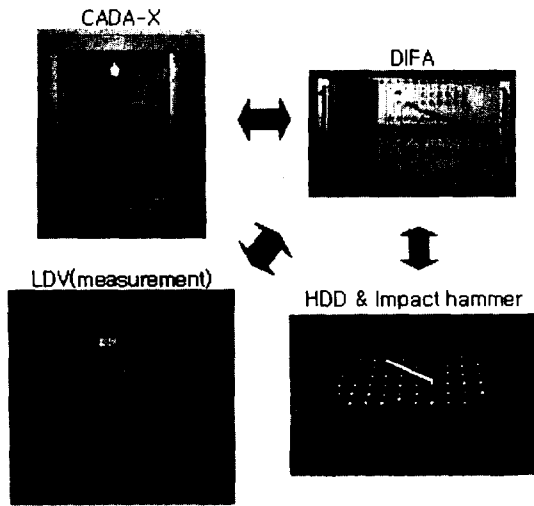


Fig. 5 HDD Modal Testing

2.2 HDD 모드해석 실험

동특성 해석을 위해서 Fig. 5 와 같이 자유단 경계조건에서 모드해석 실험을 수행하였다. 극소형 충격망치(Miniature Impulse Hammer)을 이용하여 HDD 를 가진하고 LDV 로 측정된 속도신호는 데이터 수집기인 DIFA 를 통하여 CADA-X 로 저장된다. Fig. 2 와 4 에서 볼 수 있듯이 소음/진동이 크게 나타나는 주파수 범위는 2~3 kHz 이고 이를 관심주파수대역으로 설정하였다. CADA-X 를 이용하여 구한 고유진동수와 모드형상은 Fig. 6 에 나타나 있다. 11 번째 고유진동수(2094.8Hz)는 코깅토크의 기본주파수(2160Hz)와 근접하게 나타나고

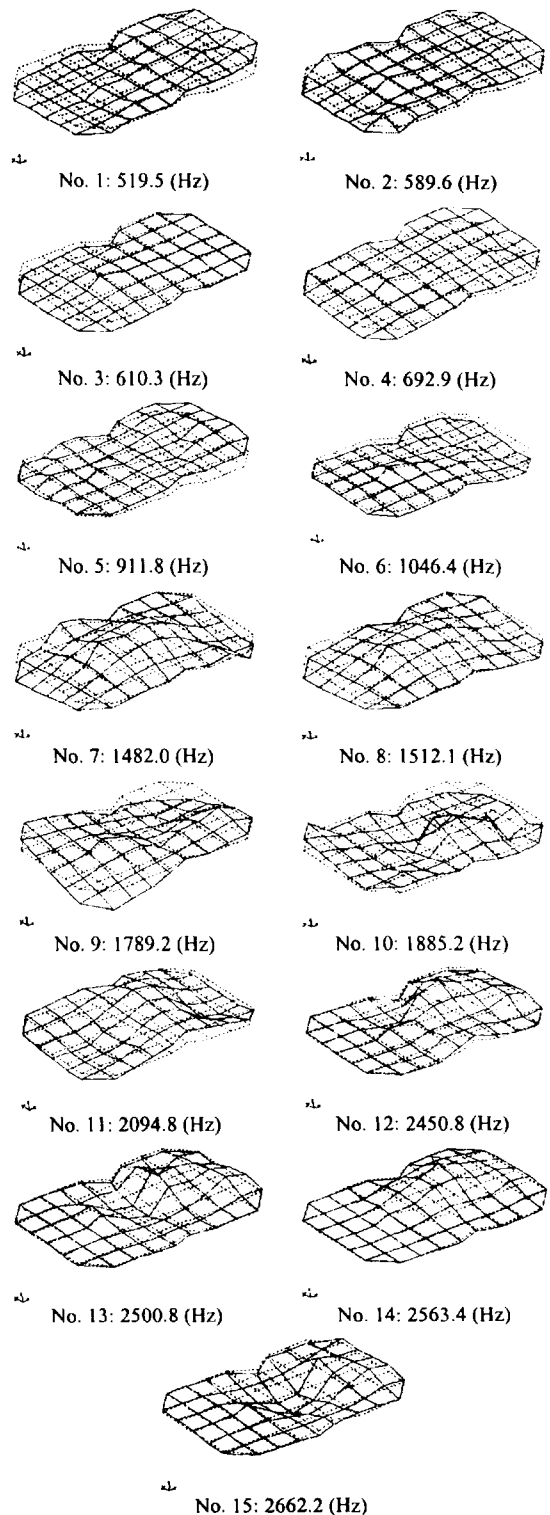


Fig. 6 Experimental Natural Frequencies and Mode shapes of HDD

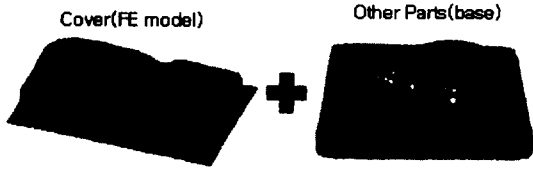


Fig. 7 HDD Substructure Synthesis

소음 및 진동이 크게 나타나는 2.4~2.6kHz 에 4 개 정도의 모드들이 인접해 있음을 알 수 있다. 따라서, 이런 모드들의 영향으로 관심주파수 대역에서 소음/진동이 크게 발생한다고 추측할 수 있다.

3. HDD 모델링

HDD 는 크게 상부의 커버와 하부의 베이스 구조물로 구성되어 있다. 스피들 모터 시스템, 액츄에이터 그리고 PCB 등은 베이스에 장착되어 복잡한 구조를 가진다(Fig. 7). 직접적인 가진원인 스피들 모터 시스템의 회전으로 베이스 구조물은 가진되고 8 개의 지점에서 체결된 볼트로 통해 커버로 진동이 전달된다. 커버에서 방사되는 소음은 대부분 이러한 진동에 의한 것이고 그 외 HDD 내부 유동장에 의해 커버가 가진되어 발생한다. Fig. 4 에서 볼 수 있듯이 소음은 베이스면보다 주로 커버면을 통해 많이 방사된다. 이러한 소음을 줄이기 위해 해석적인 SDM 을 사용하려면 HDD 의 모델이 필요하다. 하지만, 전체 HDD 의 모델을 세우기는 매우 힘들다. 특히, 베이스구조물에는 PCB 와 같은 부가 구조물이 장착되어 복잡한 동특성을 보이며 3kHz 의 관심주파수까지 이러한 동특성을 잘 나타낼 수 있는 모델을 세우려면 많은 노력이 소모된다. 만일 그러한 전체 HDD 의 모델이 수립되었다더라도 전체 자유도가 매우 커지게 되므로 해석적 방법에는 많은 어려움이 발생한다. 본 연구에서는 SDM 의 대상을 구조가 비교적 간단하고 소음 방사량이 상대적으로 많은 커버로만 국한하고 이의 유한요소모델을 세운다. 베이스구조물은 실험을 통해 구한 실험모델을 사용하며 전체 HDD 의 모델은 커버의 유한요소모델과 베이스구조물의 실험모델을 결합하여 만든다. 즉, 부분구조합성법 (Substructure Synthesis)⁽³⁾을 사용하여 전체 HDD 의 모델 수립하고 소음/진동을 저감할 수 있도록 커버의 유한요소모델에 대해 해석적 SDM 을 적용한다.

본 장에서는 커버의 유한요소모델을 수립하고 수립된 모델의 타당성을 검토하기 위해 실험에서 구한 커버의 동특성과 비교한다.



Fig. 8 HDD Cover

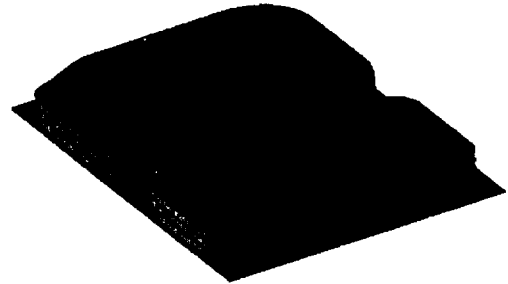


Fig. 9 HDD Cover Geometry Model

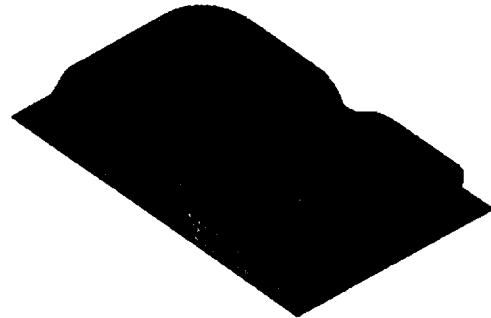


Fig. 10 HDD Cover Finite Element Model

3.1 HDD 커버 유한요소모델링

Fig. 8 에서와 같이 HDD 커버는 3 차원 구조물로 표면 위치에 따라 두께의 변화가 심하고 비교적 복잡한 형상을 보인다. 커버의 유한요소모델은 부분구조합성과 SDM 에 쓰이므로 주요관심주파수범위(2~3kHz) 내에서 실제 커버의 동특성을 잘 나타낼 수 있어야 한다. 커버를 잘라서 두께를 정확히 측정하고 2 차원 도면을 활용하여 커버형상모델을 만들었다(Fig. 9). Fig. 10 은 커버의 유한요소모델을 나타낸다. 커버의 재질은 알루미늄으로 해석에 사용된 물성치는 아래와 같다.

Young's Modulus = 68.4Gpa
Density = 2560kg/m³
Poisson's Ratio = 0.32

유한요소모델은 solid 와 shell 요소로 구성되며 총 자유도의 수는 12,234 이다. 해석결과는 Fig.

4. 결론 및 향후과제

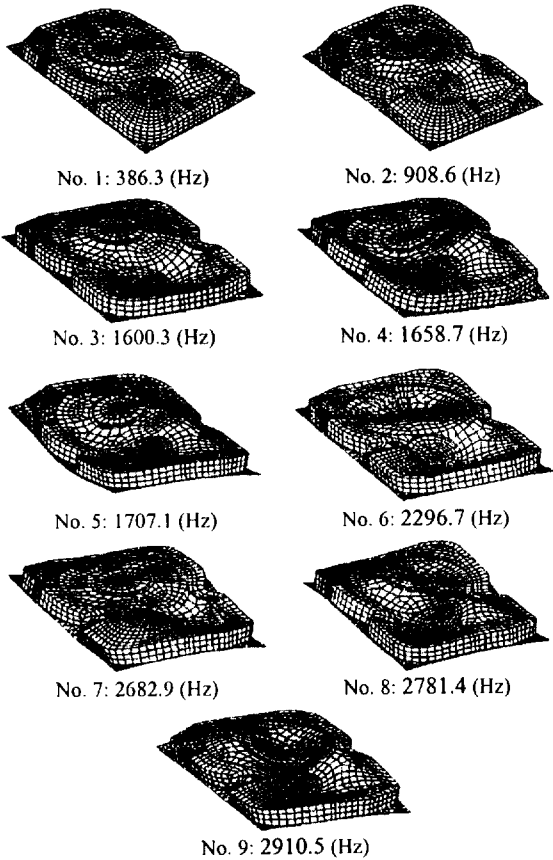


Fig. 11 Natural Frequencies and Mode Shapes of the FE Model

11에 나타나 있다.

3.2 HDD 커버의 해석결과와 실험결과의 비교

유한요소해석결과의 타당성을 검토하기 위해 Fig. 5와 같이 자유단 조건에서 커버의 모드해석 실험을 수행하였다. 극소형 충격망치로 가진하였고 접촉식 센서의 질량효과를 없애기 위해 비접촉식 레이저 변위 센서를 이용하여 응답(속도)를 측정하였다. 모드해석은 CADA-X를 이용하여 수행하였다. Fig. 12는 이러한 모드해석 결과를 나타내며 Table 1은 실험과 유한요소해석에서 구한 고유진동수를 비교한 것이다. Table 1에서 볼 수 있듯이 유한요소해석에서 구한 고유진동수는 대체적으로 실험에서 구한 고유진동수에 비해 5~7% 가량 작게 나타난다. 이는 유한요소모델의 강성이 실제커버의 강성에 비해 적게 평가되었음을 의미한다. 커버의 유한 요소모델은 부분구조합성법을 이용하여 전체 HDD의 동특성을 구하기 위해 쓰이므로 오차가 줄어든 개선된 모델이 필요하다. 모델개선 작업은 현재 진행 중에 있다⁽⁵⁾.

해석적 방법을 통하여 HDD로부터 방사되는 소음을 줄이려는 연구를 수행하고 있다. 운전 중 HDD 표면 진동량과 음압레벨을 측정하여 관심주파수범위를 2~3kHz로 선정하였고 모드해석실험을 통해 HDD의 동특성을 파악하였다. 또, 음압레벨 측정실험 결과에서 방사되는 소음은 베이스면에 비해 커버면에서 크게 나타났고 따라서 구조변경 대상을 커버로 한정하였다. 베이스구조물의 복잡성으로 인해 전체 HDD의 해석적 모델을 수립하기는 많은 어려움이 따를 것으로 예상된다. 본 연구에서는 구조변경의 대상이 되는 커버에 대해서만 유한요소모델을 세우고 부분구조합성법을 통해 전체 HDD의 모델을 만들려 한다. 2차원 도면과 두께의 실측을 통해 커버의 유한요소모델을 수립하였다. 유한요소모델의 타당성을 검토하기 위해 실험에서 구한 커버의 모드매개변수와 유한요소해석을 통해 구한 모드매개변수를 비교하였다. 해석을 통해 구한 커버의 고유진동수는 대체적으로 실제 고유진동수에 비해 4~7%가량 작은 값을 가진다. 실험결과와의 정확한 예측을 위해서는 개선된 유한요소모델이 필요한 것으로 판단된다.

유한요소모델 개선 작업은 현재 진행 중이다. 관심주파수범위에서 실험결과와 잘 맞는 유한 요소모델이 수립되면 부분구조합성법을 통해 HDD 전체 모델을 수립할 수 있다. 궁극적으로 모델이 완성되면 SDM 기법을 적용하여 소음/진동 특성을 개선할 수 있는 방안을 제시하고 실험적으로 이를 증명하고자 한다.

참고문헌

- (1) 황태연, 강성우, 한윤식, 손 영, 전정일, "고속 HDD의 소음 제어," 한국소음진동공학회지, 제 9권, 제 4호, 1999, pp. 660~668.
- (2) 강성우, 한윤식, 황태연, 손 영, 구자춘, "음향 인텐시티를 이용한 하드 디스크 드라이브의 소음원 파악 및 음향파워 제어," 춘계 소음진동학술대회 논문집, 2000, pp. 1540~1548.
- (3) Mania, N. M. M. and Silvia, J. M. M., "Theoretical and Experimental Modal Analysis," Research Studies Press LTD., 1997.
- (4) 손 영, 황태연, 강성우, 한윤식, 구자춘, "하드 디스크 드라이브에 있어서 스핀들모터의 구조적 가진에 따른 시스템의 소음 특성에 관한 연구," 춘계 소음진동학술대회 논문집, 2000, pp. 1549~1554.

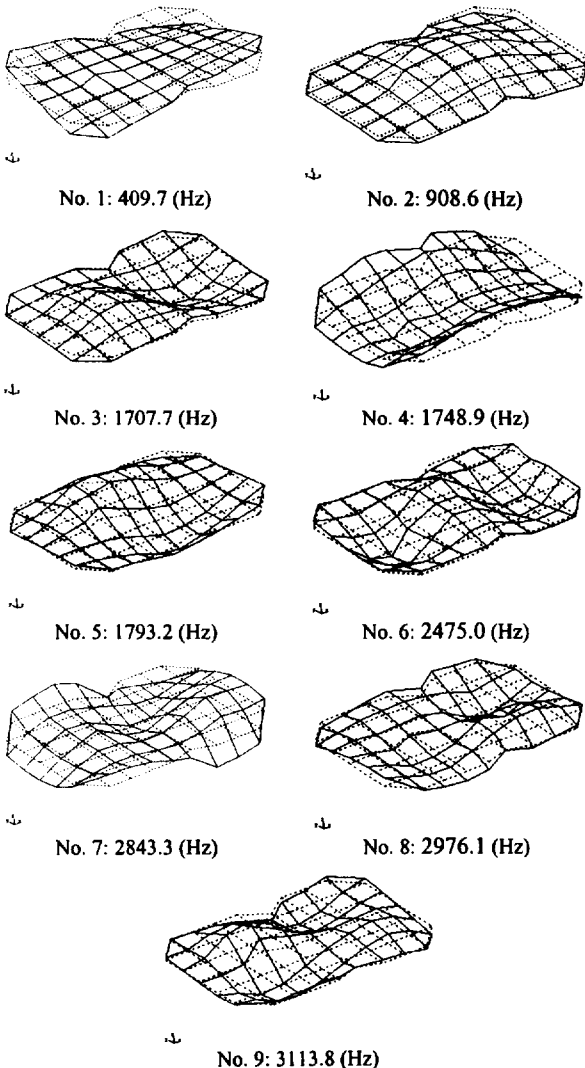


Table 1 Comparison of Experimental and Analytical Natural Frequencies

Mode no.	Experimental natural frequency (Hz)	Finite element natural frequency (Hz)	Error (%)
1	409.7	386.3	5.7
2	908.1	908.6	0.1
3	1707.7	1600.3	6.3
4	1748.9	1658.7	5.2
5	1793.2	1707.1	4.8
6	2475.0	2296.7	7.2
7	2843.3	2682.9	5.6
8	2976.1	2781.4	6.5
9	3113.8	2910.5	6.5

Fig. 12 Experimental Natural Frequencies and Mode Shapes

(5) Friswell, M. J. and Mottershead, J. E., "Finite Element Moel Updating in Structural Dynamics," Kluwer Academic Publishers, 1995