

HDD 스피들 모터 유니트 및 커버, 베이스의 동특성 해석

Dynamic Analysis of HDD Spindle Motor Unit, Cover, Base

이 성진*, 이 장무**

* 서울대학교 대학원 기계설계학과

** 서울대학교 기계설계학과

Abstract

In this paper, we study a dynamic characteristics of HDD. HDD is constructed by spindle motor/disk unit, cover, base, E-block arm/suspension unit, and rotary actuator/voice coil motor. First, we make a FE model of spindle motor/disk unit and analyzed natural frequency/mode analytically and experimentally. Especially, the change of natural frequency of spindle motor unit according to change of B.C is considered. Second, FE model of cover, base is made. Third, we assemble the above three FE mode, we get HDD assembly and dynamic analysis of HDD assembly is accomplished.

Key words : dynamic characteristics, HDD , spindle motor/disk unit, FE model

1. 서론

Spindle motor, Rotating disk, Suspension, Ball Bearing, Rotary actuator/Voice-Coil motor 등으로 구성되어 있는 HDD는 최근 소형화되고, 고집적의 정보 저장을 추구함으로 인하여 고집적화, 고밀도화, 고정밀화 하고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 원판(disk)과 head사이의 거리인 비행높이(flying height)의 감소와 함께 안정화가 요구되고 있다.

head와 disk 사이 거리의 불규칙한 변화는 크게 두가지 요인에 기인한다. 하나는 회전원판의 축방향의 변위(Run-Out)의 반복적 혹은 비반복적인 변화 때문이고, 나머지 하나는 head가 달려있는 suspension의 진동 때문이다. Run-Out은 원판의 편평도, 원판 회전축의 기울어짐, 원판을 회전시켜주는 스피들 모터의 가진동에 의해 발생하고, 특히 스피들 모터로부터 발생하는 가진력의 주파수와 회전원판의 고유진동수가 일치하여 야기되는 비반복적 Run-Out은 서보 메카니즘에 의한 제어가 불가능하므로 HDD설계 초기에 구조적 고찰이 필요하다.

HDD는 Fig.1에서처럼 spindle motor/disk 결합체, cover, base와 disk에 실린 정보를 읽어내는 E-block arm/suspension 유니트의 네가지로 구분된다. 이들을 다시 크게 E-block arm/suspension 유니트와 이를 제외한 나머지 세부분의 결합체의 두가지 결합구조로 나눌 수 있으며, 특히 disk와 suspension head 사이의 일정한 간격 유지와 간섭의 극소화를 이루기 위해서 구동부인 spindle motor/disk의 진동특성을 파악하여, 지진동을 실현하기 위한 최적설계 기법을 확보할 필요가 있다. 또한, spindle motor/disk 결합체는 HDD의 하우징인 base와 cover에 각각 볼트에 의하여 결합되어 있고, 이들 구조와 서로 상호작용을 주

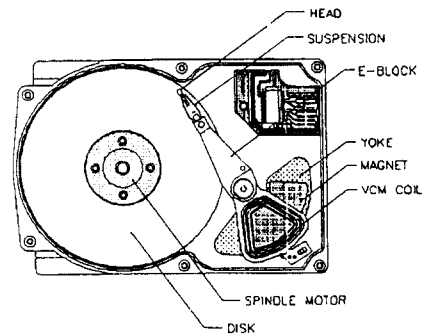


Fig.1 Configuration of a hard disk driver

고 받으며 진동을 증폭 혹은 감쇠 시키고 있다. 따라서, 구동원인 spindle motor의 동특성 뿐 아니라, cover와 base의 동특성 파악 및 최적설계는 HDD의 고성능을 위해 반드시 필요한 과정이다. 따라서, 본 연구는 HDD 전체 결합구조의 지진동 최적설계 기법을 확보하기 위하여 요한요소해석법 및 실험적 해석을 통한 각 유니트들의 동특성 해석을 수행 하였다.

2. 스피들 모터 유니트의 동특성 해석

Disk를 회전시키기 위하여 HDD에서는 주로 불배어링을 이용한 spindle motor를 사용한다. Fig.2은 spindle motor의 단면도를 그린 것이며 Fig.3은 FE 모델이다.

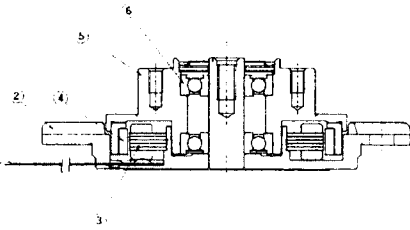


Fig.2 A cross-sectional view of Nidec spindle motor

Fig.2에서 볼 수 있듯이 스피들 모터 유니트는 크게 6가지 부분으로 구분되어 질 수 있으며, 각 부분에 대한 FE 모델에 사용된 물성치는 Table 1에 나타내었다. 사용된 Element type은 모두 Solid 45 이다.

Table 1 Material Property of Spindle motor unit

	E (Young's modulus) GPa	ν (Poisson's Ratio)	ρ (Density) kg/m ³
① Steel	206.8	0.29	7820
② ADC-12	60	0.33	2900
③ Coil/Magnet	80	0.29	4200
④ Magnet	206.8	0.29	7820
⑤ Al	70	0.33	2770

Table 1에 실려진 steel과 알루미늄의 물성치는 일반적으로 알려진 값을 그대로 사용하였고, ADC-12로 알려진 재질은 알루미늄을 재료로 이용하여 가공처리된 재료로 그 물성치를 정확히 알지 못함으로 인하여, 알루미늄의 물성치를 이용하되 실험모드해석에서 얻은 고유치에 FE 고유치 해석결과가 일치하도록 조정된 값이다.

또한, Coil/Magnet 부분은 steel판을 적층시킨 뒤 Coil을 감아 만든 구조로 이루어져 있어 물성치를 예측하기란 무척 어려운 일이다. 따라서, 이부분의 물성치 중 밀도는 정밀한 저울로 측정된 질량과 FE 모델의 질량이 같도록 결정된 값이며, 강성은 Stator(①와 ②)로만 이루어진 부를 실험해석 고유치에 FE 해석결과를 튜닝하여 조정된 값이다.

Coil/Magnet 부가 Stator에 첨가됨으로 인하여 Stator부의 Axial mode(Rigid-up mode)와 2nd Pitch mode(Tilting mode)의 고유치를 급격히 떨어뜨리는 결과를 가져왔으나 고유치들은 4500Hz 이상의 높은 값들을 갖는다.

Rotor/Shaft부의 FE modeling에서 특히 어려운 부분은 볼베어링의 강성을 처리하는데 있다. bearing은 구조상 하나의 구조로 만들어진 것이 아니라 외륜, 내륜, 볼등으로 구성된 조립품이며 외륜과 내륜은 볼을 통해서 점접촉 하고 있다. 보통 베어링의 등가강성은 실험적 결과로부터 얻어지고 이런 등가강성을 FE 모델에 적용시키기에는 일반적으로 Spring Element가 가장 적절하다. 따라서, Bearing 부분을 등가의 스프링 - 베어링의 축방향 강성을 대표하는 Axial Spring과 반경방향 강성을 대표하는 Radial Spring - 으로 모델링하여 Spindle Motor FE 모델을 완성하였다. 베어링의 등가강성은 실험적 결과가 없기 때

문에 Spindle Motor를 사유단 경계조건으로 놓고 Modal Test를 통하여 얻은 고유진동수에 FEM 해석결과가 일치하도록 등가강성 값을 튜닝하였다.

스핀들 모터의 세가지 기본 진동 모드중 Axial mode는 Axial Spring 강성에, Radial mode는 Radial Spring 강성에 관련되며, Pitch mode는 두개의 스프링 강성과 동시에 관련된다. 그러나, 실험을 통해서 Axial mode와 Pitch mode만 측정이 가능하므로, Axial Spring 강성을 Axial mode 고유치와 우선적으로 튜닝하고, 이 값을 고정시킨뒤 Radial Spring 강성을 Pitch mode 고유치에 튜닝시켰다.

튜닝된 베어링의 등가강성은 Radial Spring이 35×10^6 N/m, Axial Spring이 15×10^6 N/m이고, 베어링을 모델링한 각 Spring Element는 각각 18개가 사용되었다.

이렇게 해서 구성된 Fig.3의 모델을 ANSYS 상용 프로그램에 적용시켜 고유치 해석을 수행하였다. 경계조건은 자유단 조건으로 하였으며 Table 2는 해석결과를 실험결과와 서로 비교한 것이다.

Table 2 Natural frequency and mode of spindle motor units

Mode	Natural frequency (Hz)	
	FEM	Experiment
① Tilting(Pitch)		1605
	1626	1620
		1530
② Radial		1545
	3120	
③ Rigid-Up (Axial)		2885
		3000
	3124	3015
		3135

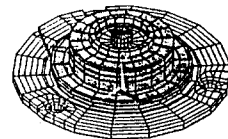


Fig.3 FE model of spindle motor unit

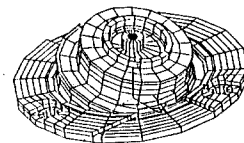


Fig.4 Pitch (Tilting) mode of spindle motor units

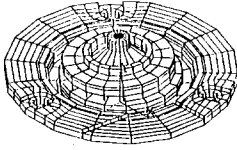


Fig.5 Axial(Rigid-Up) mode of spindle motor units

한편, Spindle Motor unit는 Base와 Cover에 각각 볼트 체결되어 결합되어진다. Spindle Motor에 대한 관점에서 볼 때 Base와 Cover는 경계조건으로 동특성에 영향을 미친다. 이렇게 base와 결합되는 관개 및 cover의 존재가 Spindle Motor unit의 동특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 네가지 경계조건의 변화에 따른 FE 해석을 수행하였다. Disk는 Rotor와 강결합 시킨 FE 모델을 이용하였다. 경계조건은 다음과 같이 네 경우로 달리 하였다.

첫째, Stator의 3 node를 Fixed 시켰다. Fixed 시킨 3 node는 Base Plate 와 볼트 결합되는 세 부분에 해당된다. 각 node 는 120° 씩 떨어져 있다.

둘째, Stator의 4 node를 Fixed 시켰다. 이는 Stator를 고정하기 위해 볼트 결합하는 부분을 네 곳으로 늘릴 경우 고유진동수가 어떻게 달라지는지 알아보기 위해서 이다.

셋째, Stator의 3 node를 Base Plate와 강결합 시키고, Base Plate의 네 지점은 Fixed 시켰다. Stator의 3 node는 Base와 실제 볼트 결합하는 부분이고, Base Plate가 설치되는 네 곳의 Bolting 부분은 Fixed 시켰다.

네째, 첫째와 같은 경계조건에 Cover가 결합되는 Spindle Motor의 Shaft 윗쪽 끝부분의 한 node를 Fixed 시켰다. 이는 Cover의 유무에 따른 고유진동수의 변화를 예측하기 위한 것이다.

아래 Table 3는 네 가지 경계조건의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 정리한 것이다.

Table 3 Natural frequency according to the variation of boundary condition

Mode	Natural Frequency			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Pitch (Tilting)	276	277 279	272 274	303 304
Axial (Rigid-Up)	466	466	453	
Disk Bending	473	474	473	473
	516	516	516	516
	561	561	561	61
	607	607	607	607

위의 해석결과를 살펴보자. 우선, Case 1과 Case 2를 비교해 보면 각 모드에서 고유진동수의 값에 변화가 없다. Case 1은 3개의 node를 Fixed 시킨 결과이고 Case 2는 하나의 node를 더 Fixed 시킨 결과임을 감안할때, Spindle Motor 의 Stator를 고정시키기 위하여 볼트의 갯수를 늘리는 것은 Pitch mode의 고유치에 영향을 미치지 못함을 예측할 수 있다.

Case 1과 Case 3를 비교해보자. Case 3는 Spindle motor를 Base Plate 위에 올려놓은 상태에서 고유치 해석을 수행한 결과이다. 즉, Case 1에서는 3개의 node를 강체 위에 고정시킨 반면 Case 3는 3개의 node를 base plate에 강결합하여 base plate의 강성과 질량이 경계조건으로 포함되도록 하였다. 이때의 결과를 서로 비교해보면, Base Plate의 유무는 pitch mode의 고유치에는 영향을 거의 미치지 못하며, Axial mode의 고유치를 약 28% 줄였다. 이런 현상은 Pitch mode는 식초가 Rigid 하지 않더라도 큰 영향을 받지 않지만 Axial mode는 기초의 강성이 어느 정도 영향을 주고 있음을 볼 수 있다. 따라서, Base의 Spindle motor 결합부의 강성은 어느 정도 충분히 커야 할 필요가 있다.

마지막으로 Case 1과 Case 4를 비교해 보면, Cover의 유무가 Spindle Motor의 Pitch mode와 Axial mode에 어떤 영향을 미치는지를 예측할 수 있다. Case 4는 Spindle Motor 내의 Shaft의 위쪽 끝점의 한 node - Cover 와 결합되는 부분 - 를 Fixed 시켜서 고유치 해석한 결과이다. Pitch mode의 경우 9.8 % 만큼 고유치를 높였으며, Axial mode는 없어져 버렸다. 즉 Cover가 있음으로 해서 Pitch mode의 고유치를 약 10% 정도 높일 수 있음을 예측 할 수 있다.

이상으로 Spindle Motor의 경계조건을 몇가지 설정하여 고유치 해석을 수행해 본 결과, cover는 Pitch mode의 고유치에 영향을 미치고 있음을 보았으며, 나머지 볼트 체결부의 갯수 및 Base의 존재는 큰 영향이 없음을 보았다. 그리고 Axial mode의 고유치는 Base의 존재가 약간의 영향을 미침을 확인하였다.

3. Cover, Base의 동특성 해석

Fig.6, Fig.7에서는 HDD Cover와 Base의 FE 모델을 보여준다. FE 모델은 초기의 단순한 모델에서 부터 점차 세밀한 모델로 발전시켜 가면서 최종적으로 얻은 모델이다. 이 세밀한 모델에는 cover와 base에 만들어져 있던 요철도 모델링에 포함되어 있으며, 이 요철은 cover, base의 고유진동수 뿐 아니라 고유모드에 영향을 미치며 특히 nodal line이 특정한 부분을 지나도록 모델링할 필요가 있는 경우 이 요철을 조정함으로써 nodal line의 위치를 조정할 수 있겠다.

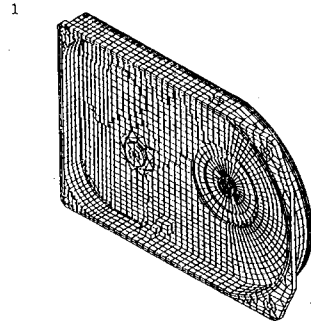


Fig.6 FE model of Cover

ANSYS 상용 FEM 프로그램을 이용한 고유치 해석 결과는 아래의 Table 4, Table 5과 같다. 경계조건은 자유단이다.

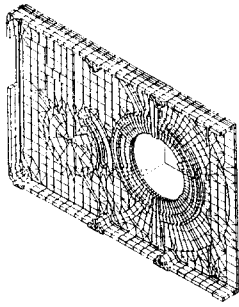


Fig.7 FE model of Base

Table 4 Natural frequency and mode of cover

Mode	Natural frequency (Hz)				
	Experiment	FEM			
		model 1	model 2	model 3	model 4
1. Torsion	680	770 (12%)	765 (11%)	753 (9%)	703 (2%)
2. Bending	1560	1638 (5%)	1620 (4%)	1604 (3%)	1511 (-3%)
3. Bending	1860	2042 (10%)	2027 (9%)	1969 (6%)	1815 (-1%)

Table 5 Natural frequency and mode of base

Mode	Natural frequency (Hz)				
	Experiment	2nd model	4th model	5th model	6th model
1. Torsion	735	843	799	840	797
2. Bending	1387	1440	1386	1459	1494
3. Bending	1500	1780	1677	1748	1647

Torsion mode나 Bending mode에 있어서 nodal line이 spindle motor와 결합되는 부분과 떨어져 있다. 이 경우 전체 HDD가 결합되어 하나의 결합체로 동작할 경우 고유진동수 근처에서 spindle motor shaft의 진동변위를 더욱 크게 유발시킬 확률이 있으며 HDD의 동특성을 악화시킬 우려가 있다. 따라서, cover, base의 구조를 설계할 경우 spindle motor의 shaft와 결합되는 부분에 저차 고유모드의 nodal line이 가까이 가도록 설계에 고려할 필요가 있다.

실험은 base를 고무줄에 매단 상태(자유단 경계조건)에서 소형 가속도계를 붙이고 소형 impulse hammer로 충격을 주어 20군데의 FRF를 측정하였으며 이를 바탕으로 고유모드와 고유진동수를 찾아내었다.

Base의 6th model의 FE 해석결과에서 보듯이 고유진동수는 실험치와 1%~4%의 오차를 가지며 Torsion 모드만 8%의 오차를 가진다.

4. Base, Spindle Motor, Cover 결합체의 자유진동해석

앞에서 각각 모델링된 세 부분을 결합하여 VCM과 E-Block을 제외한 HDD 결합체의 FE 모델을 완성하였다. Base와 스피indle 모터의

Stator 부분은 3 node를 잡아 강결합 - 실제로는 Bolt 체결 - 시켰고, Spindle Motor의 Shaft 윗쪽 끝부분과 Cover의 3 node를 강결합 시켰다. 또한, Cover와 Base는 4 곳에서 볼트 체결되도록 되어있다. 이 결합부는 볼트를 SOLID 45 Element를 사용하여 육면체 모양으로 모델링하여 이것을 통해 Cover와 Base가 서로 체결되도록 하였다. 이 부분에 대해서는 앞으로 결합부 이론을 사용하여 적절히 다시 모델링할 필요가 있다. 그리고, Cover와 Base 사이에 고무가 끼워져 있으며, 이것 역시 적절히 SOLID 45 Element를 이용하여 모델링에 참가하였으나, 발생되는 일반적인 고무의 물성치를 사용하였다.

Fig.8은 전체 결합체의 단면도를 나타내고 있다. 사용된 Element 총 개수는 15383 개 이고, DOF은 대략 64488 이다. 자유도의 개수 및 사용된 Element의 개수가 너무 많아서 각 부분들에 대한 FE 모델을 간소화 할 필요가 있겠다. 그리고 Cover와 Base 사이에 들어가는 고무를 접촉 Element 등으로 대체해서 모델링 하거나, 아니면 결합부 이론을 도입하여 고무와 볼트 체결부를 모델링 해 볼 필요가 있다. 본 모델에서는 고무등의 역할을 규정짓기가 어렵기 때문이다.

Table 6에 ANSYS 상용 FEM 패키지를 이용한 해석결과를 실었으며, 2장의 Case 3, Case 4의 경계조건에 대한 해석결과와 비교하였다. Table 6의 해석결과를 비교해보면 Base와 Cover의 고유진동수와 Disk/Spindle motor의 Pitch (Tilting) mode의 고유진동수의 차이가 크므로 서로 간섭을 일으키지 못하여 Base 와 Cover의 경계조건을 Rigid Body 위에 Disk/Spindle Motor를 올려놓고 Shaft의 끝을 Fixed 시킨 경계조건과 Pitch mode의 고유치 값과 큰 차이가 없다.

Table 6 Natural frequency of HDD Assembly. BC : Base is Clamped

Mode	Natural Frequency (Hz)		
	Case 3	Case 4	HDD Assembly
Pitch	272	303	301
	274	304	
Axial	453		457
Disk Bending	473	473	473
	516	516	516
	561	561	561
	607	607	579

그러나, Axial mode의 경우에는 Cover와 Base의 경계조건과 단순 고정된 경계조건이 차이가 난다. 이는 Cover와 Base의 Bending mode의 영향이 Spindle motor/Disk에 미치기 때문이다. 그러나, 2장의 Case 3와 비교해보면 Cover를 모델에 참가하는 아니는 Axial mode의 고유치 값은 거의 비슷함을 알 수 있다. 즉, Axial mode는 Base의 영향이 미치는 것이며, Cover의 영향은 거의 없다고 볼 수 있다.



Fig.8 FE model of HDD assembly

5. 결론

HDD를 이루는 각 부품들에 대한 동특성을 파악하기 위하여 FE 모델을 완성하였으며, 이 모델을 이용한 FE Analysis 결과와 실험 결과를 비교하여 FE 모델을 수정하였다. 특히, Cover와 Base의 FE 모델에서는 아주 세밀한 구조도 모두 모델에 첨가 함으로써 여기에 존재하는 요철등이 동특성에 미칠 영향을 고려하였다. 수정되어 완성된 각 FE 모델들을 강결합시켜 전체 HDD 결합체 FE 모델을 얻었다. 이 FE 모델을 이용하여 ANSYS 고유치 해석을 통하여 HDD 조립품의 고유진동수와 고유모드를 구하여 기본 동특성을 알아 보았다. 또한 Disk/Spindle motor 부만을 몇가지 경계조건하에서 수치 해석함으로써 경계조건이 Disk 구동부에 미칠 영향을 연구하였다. 본 연구에서는 기본적인 동특성인 고유진동수 및 고유모드에 관한 연구를 주로 하였으며, 이렇게 하여 만들어진 HDD의 FE 모델은 HDD의 저진동 설계를 위한 이러가지 simulation, 민감도 해석등에 활용될 것이며, 이를 통해 최적설계를 위한 설계 변수의 파악을 위하여 이용될 것이다.

Reference

- [1] D. Jennings, H. Lenthold, L. Nagarathnam, "RotorDynamics of Ball Bearing Spindle Motor with High Inertial Load and Low Mechanical Damping", Pro. of Incremental Motion Control Sys. and Device, June 1995
- [2] L. Nagarathnam, H. Lenthold, D. Jennings, "Mechanical Vibration caused by Ball Bearings in Spindle Motors", Pro. of Incremental Motion Control Sys. and Device, June 1995
- [3] C. O. Orgun, B. H. Tongue, "On Localization in Coupled, Spinning, Circular Plates", J. of Vib. and Acoustics, vol 116, 1994
- [4] Gregory M. Frees, "Disk Drive Spindle Dynamics - Analysis and Measurement", IBM Adstar
- [5] Bathe, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall Inc.