

# 지지구조와 액츄에이터의 유연성을 고려한 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 유한 요소 고유 진동 해석

## Finite Element Modal Analysis of a Spinning Flexible Disk-Spindle System Considering the Flexibility of Supporting Structures and an Actuator in a HDD

서 찬 희\*·이 창 석\*\*·장 건 희\*\*\*·이 호 성\*\*\*\*

Chanhee Seo, Changsuk Lee, Gunhee Jang, Hosung Lee

**Key Words :** Dynamics(동역학), HDD(Hard Disk Drive, 하드 디스크 드라이브), FEM (Finite Element Method, 유한 요소 법), Rotor Dynamics(회전체 동역학), FDB(Fluid Dynamic Bearing, 유체 동압 베어링), Actuator(액츄에이터), Suspension(서스펜션), Off-track error(트랙 오차)

### ABSTRACT

This paper presents a method to analyze the vibration of a flexible spinning disk-spindle system with FDBs, flexible base structure and an actuator in a HDD by using the FEM. Finite element equations of each component of a HDD spindle system from the spinning flexible disk to the flexible base plate are consistently derived by satisfying the geometric compatibility in the internal boundary between each component. A global matrix equation obtained by assembling the finite element equations of each substructure is transformed to a state-space matrix-vector equation, and both damped natural frequencies and modal damping ratios are calculated by using the restarted Arnoldi iteration method. The validity of the proposed method is verified by comparing the simulated natural frequencies, mode shapes with the experimental results.

### 1. 서 론

HDD 는 다른 정보장치에 비해 기억 용량 대비 가격이 저렴하여 캠코더, 디지털 카메라와 같은 mobile 장치와 TV 등과 같은 가전제품 등으로 그 적용 분야를 넓혀가고 있다. HDD 는 3.5" HDD 에서 2.5" 및 1" HDD 등으로 소형 박형화 되어 mobile 장치에 사용되면서 특히 충격에 강인한 HDD 의 개발이 중요 과제로 대두되고 있으며, 이를 구현하기 위해서는 액츄에이터를 포함한 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 고유 진동 및 강제 진동 해석 및 예측이 중요 연구과제로 대두되고 있다.

Fig. 1 은 2.5" HDD 의 구조를 나타내며 베이스 플레이트(base plate), 디스크-스핀들 시스템, 액츄에이터와 커버로 구성되어 있다. 회전하는 디스크-스핀들 시스템은 디스크, 허브(hub), 스페이서(spacer), 클램프(clamp), 영구 자석, 요크(yoke)로 구성된 회전부와 유체 동압 베어링 그리고 지지부인 스테이터(stator), 베이스 플레이트로 구성되어진다. 액츄에이터는 피벗 베어링

(pivot bearing)이라고 불리는 볼베어링(ball bearing)으로 지지되고 암(arm), 서스펜션, E-블록(E-block), fantail 및 데이터를 읽고 쓰는 헤드(head)로 구성되어 있다. HDD 의 회전 디스크 상에는 트랙(track)이라고 불리는 동심원상에 데이터가 쓰여져 있고 액츄에이터 끝단에 있는 헤드가 이를 따라 데이터를 읽고 쓰는 구조로 되어 있다. 따라서 디스크상의 트랙과 헤드 사이의 상대 변위가 커지면 데이터를 읽지 못하는 TMR(Track Mis-Registration)이 발생하게 되며 특히 Non-repeatable Runout 은 데이터 저장 밀도인 TPI(Track Per Inch)에 영향을 미친다. 따라서 액츄에이터를 포함한 HDD 디스크-스핀들 시스템의 고유 진동 및 강제 진동 해석은 강인한 HDD 의 구현 및 기억용량 증대에 필수적인 연구과제이다.

많은 연구자들이 회전하는 유연 디스크와 스팀들을 포함한 HDD 고유 진동 해석에 관한 연구를 수행하여 왔으며, Jintanawan<sup>(1)</sup> 등은 부분 구조 합성법과 모드 가정법을 이용하여 유연 디스크와 지지축의 탄성 변형을 고려한 고유 진동 특성을 해석하였다. Jang<sup>(2)</sup> 등은 유한 요소법과 부분 구조 합성법을 이용하여 지지축의 탄성 변형을 고려한 3.5" HDD 시스템의 고유 진동을 해석하였다. 그러나 HDD 의 동특성은 복잡한 구조를 가지는 베이스 플레이트의 유연성에 의해 크게 영향을 받는데 이들이 제한한 해석 방법은 복잡한 유연 지

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과  
E-mail : 4hec2@paran.com  
Tel : (02) 2299-5685, Fax : (02) 2292-3406  
\*\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과  
\*\*\* 한양대학교 기계공학부  
\*\*\*\* 삼성전자, Storage 사업부

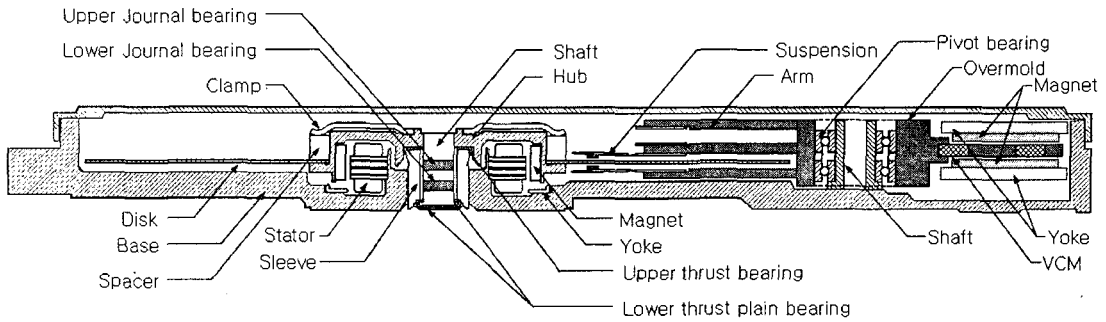


Fig. 1 Mechanical structure of a HDD

지구조인 베이스 플레이트를 포함하지 못했다. Tseng<sup>(3)</sup> 등은 부분 구조 합성법과 모드 가정법을 이용하여 유연 디스크와 유연 스펀들 지지구조의 일부인 하우징(housing)의 유연성을 고려한 고유 진동 특성을 해석하였다. Jang<sup>(4)</sup> 등은 복잡한 형상의 지지 구조를 가지는 베이스 플레이트와 하우징의 유연성을 고려한 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템을 유한 요소법과 부분 구조 합성법을 이용하여 고유 진동 해석을 하였다. 그러나 이들의 연구는 액츄에이터를 포함하지 않았기 때문에 회전 디스크와 헤드 사이의 상대 운동에 대한 연구를 수행하지 못했다. 또한 많은 연구자들이 회전 디스크-스핀들 시스템을 제외한 액츄에이터의 고유 진동 해석을 수행하였다. Park<sup>(5)</sup>, Xu<sup>(6)</sup>, Gao<sup>(7)</sup> 등은 유한 요소법을 사용하여 헤드/액츄에이터만의 고유 진동 해석을 수행하였다. 그러나 복잡한 유연 베이스 플레이트 위에 회전하는 디스크-스핀들 시스템과 액츄에이터를 포함한 전체 HDD 시스템에 대한 고유 진동 해석은 이루어지지 않았다.

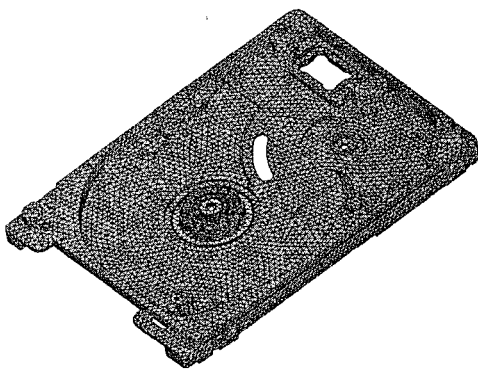


Fig. 2 Finite element model for base plate, sleeve and stator

본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 복잡한 형상을 가진 베이스 플레이트, 액츄에이터를 포함하고 유체 동압 베어링으로 지지되는 유연 회전 디스크-스핀들 시스템에 대한 고유 진동 해석을 수행하고 실험을 통해 해석 방법 및 해석 결과의 타당성을 검증하였으며 고유 진동 모드를 고찰하였다.

## 2. 유한 요소 해석

### 2.1 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 유한 요소 모델

본 연구에서는 Jang<sup>(4)</sup> 등이 제안한 방법을 적용하여 복잡한 형상의 지지 구조인 베이스 플레이트의 유연성을 고려하고 유체 동압 베어링으로 지지되는 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 유한 요소 모델을 개발하였다. Fig. 2 와 같이 베이스 플레이트와 스테이터와 유체 동압 베어링의 슬리브를 포함하는 HDD 정지부는 각 절점에서 회전 자유도를 포함한 6 자유도를 갖는 4 절점 사면체 유한 요소로 분할하고, Fig. 3 과 같이 회전하는 스펀들 시스템의 허브와 디스크는 6 자유도를 갖는 beam 과 annular sector 요소로 분할하여, 회전부와 정지부의 기하학적 적합성 (geometric compatibility)을 유지하였다. 그리고 유체 동압 베어링은 5 자유도의 강성 및 감쇠계수

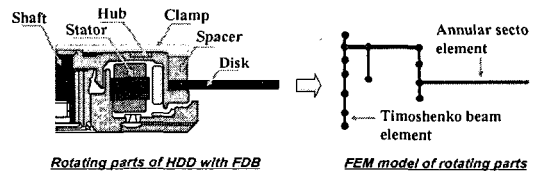


Fig. 3 Finite element model for rotating shaft, spindle and disk

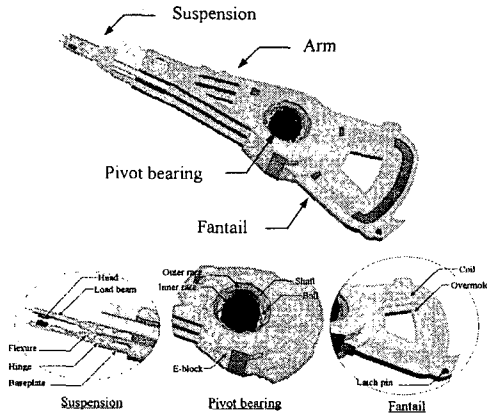


Fig. 4 Mechanical structure of an actuator

로 모델링하였고 회전부와 정지부 사이에 기하학적 구속조건을 적용 하였다. 유체 동압 베어링의 강성 및 감쇠 계수를 구하는 데에는 본 연구실에서 개발한 유체 동압 베어링 해석 프로그램인 HYBAP (Hydrodynamic Bearing Analysis Program)을 사용하였다.

## 2.2 액츄에이터의 유한 요소 모델

Fig. 4 는 액츄에이터의 세부구조를 나타낸다. 액츄에이터의 기계요소는 베이스 플레이트와 같이 회전 자유도를 포함하는 사면체 요소를 사용하였다. 피벗 베어링의 강성 계수는 본 연구실에서 개발한 볼 베어링 해석 프로그램인 WinBAP 을 사용하였다. 볼 베어링의 강성 계수는 베어링에 가해지는 하중에 의한 볼과 내외륜 사이의 접촉력을 병진 변위와 각 변위로 편미분함으로써 얻을 수 있다. WinBAP 은 Jones<sup>(8)</sup> 의 이론에 따라 볼 베어링의 기하학적 조건과 작동조건에 따른 비선형 접촉력을 계산하여 선형화된 5 자유도의 강성 행렬을 계산한다. 피벗 베어링의 내륜과 외륜을 3 차원 요소로 모델링할 경우 베어링 영역 면의 절점은 여러 개이나 베어링 연결 절점은 하나이므로 연결할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 내륜과 외륜의 사이에 가상 절점을 생성하고 내륜과 외륜의 각 절점들에 대하여 기하학적 구속조건<sup>(9)</sup>를 적용시켜 가상 절점의 자유도가 베어링 내외륜의 접촉면상의 절점들과 강체 운동을 하도록 하였다. 이 가상 절점들 사이에 WinBAP 에서 계산된 5x5 자유도의 강성 행렬을 연결시켜 베어링을 모델링 하였다. VCM(Voice Coil Motor)에 사용되는 코일은 모달 실험을 통해 측정된 고유 진동수와 유한 요소법으로 해석한 고유 진동수가 일치하도록 모델링하여 전체 시스템 해석에 적용하였다.

## 2.3 디스크와 헤드의 연결

회전 디스크와 헤드 사이에는 약 10nm 정도의 간극이 존재하며 공기 베어링이 형성된다. 디스크와 헤드 상의 공기 베어링은 공기 베어링의 축방

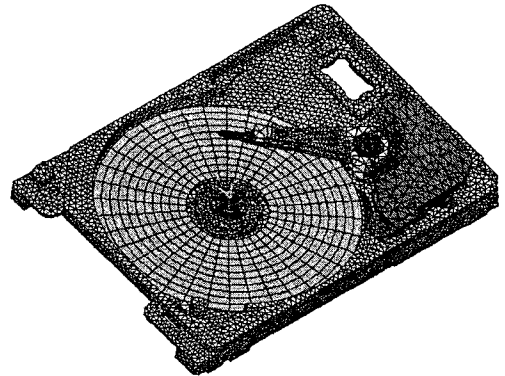


Fig. 5 Finite element model of a HDD spindle system with base plate and an actuator

향 강성을 선형 스프링(linear spring) 요소로 모델링하여 연결하였다.

## 3. 고유치 수치 해석

### 3.1 유한 요소 모델의 전체 시스템 행렬

Fig. 5 는 1 장의 2.5" 디스크를 장착하고 5400rpm 으로 회전하며 액츄에이터를 포함한 HDD 스피들 시스템의 유한 요소 모델이고, Table 1 은 이 시스템에 사용된 요소의 수와 형태를 나타내고 전체 요소수는 71,463 이다. 본 연구에서 해석하고자 하는 액츄에이터를 포함하는 HDD 의 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 운동 방정식은 자유도가 매우 크고 회전에 따른 자이로스코픽(gyroscopic) 항과 유체 동압 베어링의

Table 1 Element number and type for each substructure of a HDD with an actuator

Components	Element number	Element type	
Base plate	34,532	Tetrahedron element	
Stator	674		
Sleeve	724		
Thrust cap	147		
Thrust yoke	521		
Fluid dynamic bearing	5	5x5 stiffness and damping matrix	
Rotating shaft	34	Timoshenko beam element	
Disk	360	Annular sector element	
Actuator	Ball bearing	2	5x5 stiffness matrix
	Fantail	5,809	
	Arm & E-block	4,160	Tetrahedron element
	Inner/Outer race	3,393	
	Dummy	483	
Yoke	Suspension	16,492	Tetrahedron element
	Yoke	3,367	
	Magnet of yoke	760	

비대칭 동특성 계수로 인해 다음과 같이 비대칭 형태를 가지게 된다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{C} + \mathbf{G})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{M}$  은 전체 유한 요소 시스템의 질량 행렬,  $\mathbf{G}$  는 자이로스코픽 행렬,  $\mathbf{C}$  는 감쇠 행렬,  $\mathbf{K}$  는 강성 행렬이다. 식(1)은 비대칭 행렬에 대한 복소수 고유치를 갖는 방정식이 되고 고유치 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$\lambda^2 \mathbf{M}\mathbf{x} + \lambda(\mathbf{C} + \mathbf{G})\mathbf{x} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (2)$$

고유치의 수치해석을 위해 식(2)를 state-space 형태로 바꾸면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\lambda \begin{bmatrix} -(\mathbf{G} + \mathbf{C}) & -\mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \lambda \mathbf{x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \lambda \mathbf{x} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

식(3)의 고유치 문제를 Arnoldi 반복법을 사용하여 풀면 고유치와 고유벡터를 구할 수 있다.<sup>(10)</sup>

#### 4. 해석 결과 및 고찰

##### 4.1 실험 및 해석 방법의 검증

본 해석의 타당성을 검증하기 위해 impact hammer 를 이용한 모달 실험을 수행하였으며 실험 결과를 수치 해석 결과와 비교하였다. Fig. 6 은 실험 장치도를 나타내고 베이스 플레이트 옆면의 네 점은 나사로 지그에 고정하였다.

Fig. 7 에서와 같이 디스크의 외경을 가진할 경우 디스크의 고유 진동 모드가 지배적이어서 지지 구조와 액츄에이터의 진동모드를 측정하지 못하는 경우가 발생하게 된다. 액츄에이터를 포함한 HDD 시스템의 정확한 고유 진동수 측정을 위해

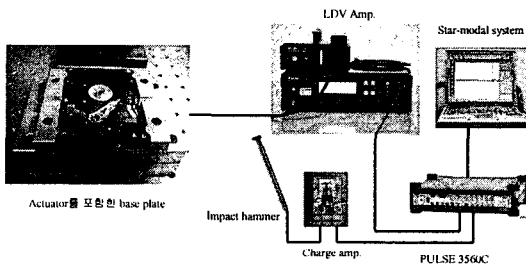


Fig. 6 Experimental setup for modal testing

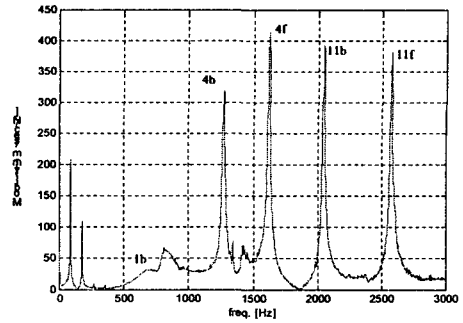


Fig. 7 Frequency response function of the outer rim of the disk with the excitation of the outer rim of the disk

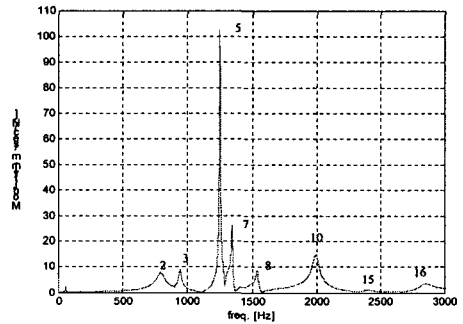


Fig. 8 Frequency response function of the arm with the excitation of the base plate

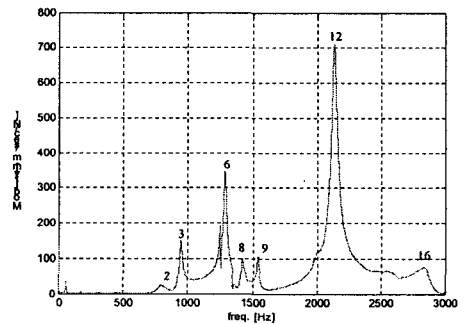


Fig. 9 Frequency response function of the overmold with the excitation of the E-block

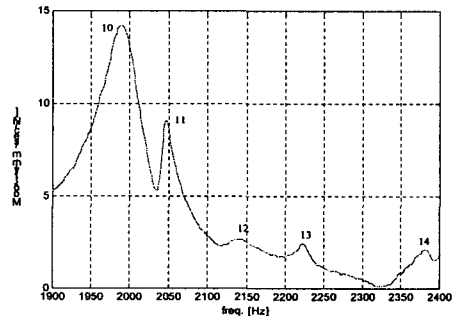


Fig. 10 Zoomed frequency response function of the arm with the excitation of the outer rim of the disk

서 Fig. 7, 8, 9 와 같이 여러 측정점과 가진점에 대한 modal testing 을 수행하였고 고유 진동 모드를 분석하기 위하여 STAR Modal 시스템을 이용하여 고유 진동 모드를 실험적으로 구하였다.

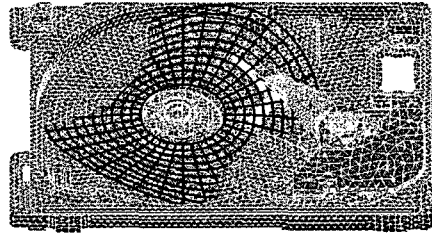
Table 2 는 정격 회전 속도 5,400rpm 에서 액츄에이터를 포함한 HDD 스피들 시스템의 유한 요소 고유 주파수 해석 결과와 실험 결과를 0-3000Hz 의 영역에서 비교한 것으로 제안된 해석 방법이 고유 진동수와 모드를 잘 예측함을 알 수 있다.

#### 4.2 고유 진동 모드 고찰

Table 2 에서와 같이 액츄에이터를 포함한 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 고유 진동 모드는 크게 모드감쇠비(modal damping ratio,  $\xi$ )가 0 인 순수 디스크 진동 모드와 0 이 아닌 진동 모드로 구분할 수 있다. 그리고 모드감쇠비가 0 이 아닌 진동모드도 모드감쇠비가 큰 강제운동을 하는 half-speed whirl 진동 모드와 모드감쇠비가 비교적 작은 진동모드인 베이스 플레이트, 디스크-스핀들과 액츄에이터가 연성되는 진동 모드로 분류할 수 있다. Table 3 은 액츄에이터를 포함한 HDD 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 고유 진동 모드를 나타낸다. Fig. 4 와 같이 액츄에이터는 3 개의 암으로 구성되어 있고 Table 3 에서의 암 1, 암 2, 암 3 은 각각 위쪽 암, 중간 암, 아래쪽 암을 나타낸다.

**Table 2** Comparison between numerical and experimental results of the natural frequencies for a HDD at 5,400 RPM

Mode	Experiment	Simulation		Error (%)
	$f_d$ (Hz)	$\xi$	$f_d$ (Hz)	
Half-speed whirl	-	0.51127	46.03	-
Half-speed whirl	-	0.41595	46.47	-
Mode 1b	700	0.07810	705.78	0.83
Mode 2	780	0.02363	834.21	6.95
Mode 1f	876	0.05401	888.53	1.43
Mode 3	944	0.00419	961.84	1.89
Mode 4b	1272	0.00000	1229.33	-3.35
Mode 5	1250	0.00057	1248.74	1.77
Mode 6	1268	0.00004	1272.10	-1.52
Mode 7	1344	0.00005	1310.30	-2.51
Mode 8	1416	0.00046	1418.79	0.20
Mode 9	1537	0.00022	1444.67	-6.01
Mode 4f	1623	0.00000	1589.33	-2.07
Mode 10	1990	0.00042	1894.75	-4.79
Mode 11b	2045	0.00000	2067.13	1.08
Mode 12	2140	0.00643	2146.09	0.28
Mode 13	2220	0.00831	2213.14	-0.31
Mode 14	2383	0.00085	2371.47	-0.48
Mode 15	2410	0.01648	2530.31	4.99
Mode 11f	2574	0.00000	2607.13	1.29
Mode 16	2848	0.00334	2954.36	3.73



**Fig. 11** Pure disk mode with 2 nodal diameters

#### (1) 순수한 디스크 모드

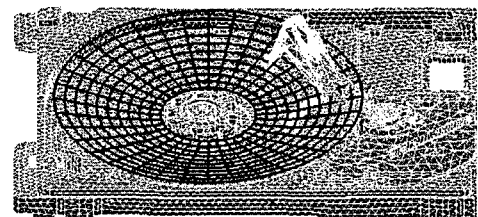
4 번과 11 번 모드는 순수하게 디스크 변형만을 하고 지지구조는 변형을 하지 않으며, modal damping ratio 가 0 인 진동 모드로써 유체 동압 베어링의 감쇄효과가 없음을 알 수 있다. 4 번 진동 모드는 절점 직경 2 개를 가진 디스크 모드 (0,2)이며 11 번 진동모드는 절점 직경 3 개를 가진 디스크 모드 (0,3)이고 각 모드는 전진 후진 모드로 분리된다. Fig. 11 은 모드 4 번을 나타낸다.

#### (2) Half-speed whirl 모드

수치 해석 결과 중 회전 속도의 약 1/2 에 해당하는 주파수 주변에 두 개의 진동 모드가 나타나고 이는 회전부가 강제 운동을 하는 진동 모드이다. 이는 Zang 등<sup>(11)</sup>이 규명한 herringbone groove 를 사용하는 유체 동압 베어링의 half-speed whirl 모드에 해당한다. Table 2 에서 보듯이 half-speed whirl 에 해당하는 진동 모드가 실험에서 측정되지 않은 것은 실제 유체 동압 베어링의 감쇠계수가 커서 damp-out 된 것으로 사료되며 이에 대한 고찰이 필요하다.

#### (3) 베이스 플레이트, 디스크-스핀들과 액츄에이터가 연성되는 모드

액츄에이터와 연성되는 모드들은 크게 디스크 (0,0)모드와 연성되는 것들과 디스크 (0,1)모드와 연성되는 것들로 나눌 수 있다. 모드 2, 3, 5, 6, 7



**Fig. 12** Mode shapes of mode 8 coupled with disk(0,0) mode

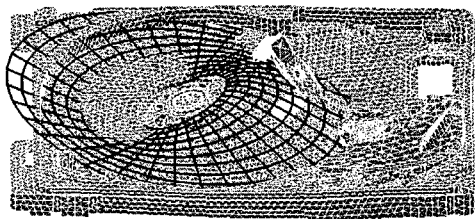
**Table 3** The description of modes for a HDD with the actuator at 5,400 RPM

Mode number	Disk-spindle-base plate*				Actuator**			Note***
	Disk	Hub	Shaft	Base plate	Arm	Fantail	Yoke	
Half-speed whirl	(0,1)	Rigid body motion	Rigid body motion	No motion	No motion	No motion	No motion	
Half-speed whirl	(0,1)	Rigid body motion	Rigid body motion	No motion	No motion	No motion	No motion	
Mode 1b	(0,1)	(+)	Bending(+)	(+)	1,2,3 bending(+)	Bending(+)	No motion	+
Mode 2	(0,0)	(+)	Axial(+)	(+)	1,2,3 bending(+)	Bending(+)	No motion	+
Mode 1f	(0,1)	(+)	Bending(+)	(+)	1,2,3 bending(+)	Bending(+)	No motion	+
Mode 3	(0,0)	(+)	Axial(+)	(+)	1,2,3 bending(+)	Bending(+)	No motion	-
Mode 4b	(0,2)	No motion	No motion	No motion	No motion	No motion	No motion	
Mode 5	(0,0)	(-)	Axial(-)	(-)	1,3 bending(+) 2 bending(-)	Bending(-)	No motion	+
Mode 6	(0,0)	(+)	Axial(+)	(+)	1,2 bending(+) 3 bending(-)	Bending(+)	Bending(+)	-
Mode 7	(0,0)	(-)	Axial(-)	(-)	1,2 bending(+) 3 arm bending(-)	No motion	No motion	+
Mode 8	(0,0)	(-)	Axial(-)	(-)	1,2,3 bending(+)	Bending(+)	No motion	+
Mode 9	(0,0)	(+)	Axial(+)	(+)	1,2,3 bending(+)	Bending(+)	Bending(-)	-
Mode 4f	(0,2)	No motion	No motion	No motion	No motion	No motion	No motion	
Mode 10	(0,1)	(-)	Bending(-)	(-)	1,2,3 bending(+)	Bending(+)	Bending(+)	+
Mode 11b	(0,3)	No motion	No motion	No motion	No motion	No motion	No motion	
Mode 12	(0,1)	(-)	Bending(-)	-	1,2,3 bending(+)	Torsion	Bending(+)	+
Mode 13	(0,1)	(-)	Bending(-)	(+)	1,2,3 bending(+)	Torsion	Bending(+)	+
Mode 14	(0,1)	(-)	Bending(-)	(+)	1,2,3 torsion(+)	Torsion	Bending	
Mode 15	(0,1)	(-)	Bending(-)	(+)	1,2,3 bending(+)	Torsion	Bending(+)	
Mode 11f	(0,3)	No motion	No motion	No motion	No motion	No motion	No motion	
Mode 16	(0,1)	(-)	Bending(-)	(+)	1,2,3 torsion(+)	Torsion	No motion	

\* Phase of the spindle and base is explained with respect to the motion of disk.  
 \*\* Phase of the arm, 2,3 and fantail and yoke is explained with respect to the motion of arm 1.  
 \*\*\* Note explain the phase of the disk with respect to the motion of arm 1.  
 In-phase phase and out-of-phase motion are denoted as + and - respectively.

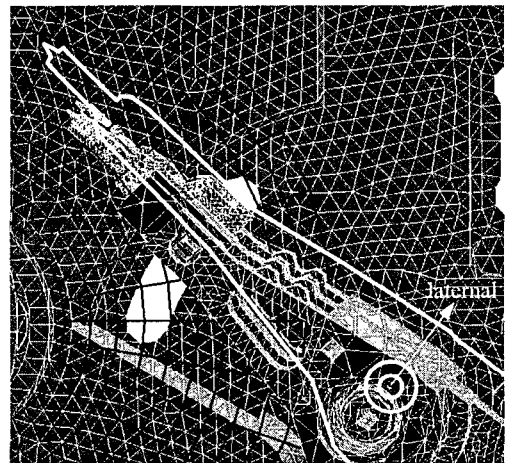
8, 9 은 디스크(0,0)모드와 연성되고 Fig. 12 는 모드 8 번을 나타낸다. 모드 5 와 7 은 액츄에이터의 변형이 디스크와 베이스 플레이트의 변형에 비해 큰 모드이다. Table 2 에서 모드 5 와 7 의 모드감쇠비가 다른 모드에 비해 작은데 이는 연성의 효과가 적은 것을 나타낸다. 모드 1, 10, 12, 13, 14, 15, 16 은 디스크(0,1)모드와 연성되고 그림 13 은 모드 15 번을 나타낸다.

고유 진동 모드 9, 10, 12, 13, 14, 15 는 측면 방향 운동이 발생하여 트랙 오차에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 모드 12 는 out-of-phase 디스크(0,1) 모드와 연성된 것으로 디스크의 운동



**Fig. 13** Mode shapes of mode 15 coupled with disk(0,1) mode

과 액츄에이터의 측면 병진 운동이 반대인 모드로써 트랙 오차에 대한 영향이 모드 9, 10, 13, 15 에 비해 클 것으로 사료된다. Fig. 14 는 모드 14 를 나타내고 실선은 변형전 액츄에이터의 자세를 나타낸다. 모드 14 는 암과 fantail 이 같은 방향으로 비틀리면서 측면 병진 운동이 크게 발생하는 모드로써 트랙 오차에 영향이 클 것으로 사료된다



**Fig. 14** Mode 14 contributing to off-track error

## 5. 결론

본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 복잡한 형상을 가진 베이스 플레이트, 액츄에이터를 포함하고 유체 동압 베어링으로 지지되는 유연 회전 디스크-스핀들 시스템에 대한 고유 진동 해석을 수행하고 실험을 통해 해석 방법 및 해석 결과의 타당성을 검증하였으며 고유 진동 모드를 고찰하였다.

본 연구에서 제시한 해석 방법은 커버(cover)를 포함한 HDD 시스템 전체의 고유 진동 및 강제 진동 해석으로의 확장이 가능하고 디스크와 헤드의 메커니즘을 고려한 강건한 HDD 스핀들 시스템의 설계 해석에 유용할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- (1) Jintanawan, T., Shen, I. Y. and Ku, C.-P. R. "Free and Forced Vibrations of a Rotating Disk Pack and Spindle Motor System with Hydrodynamic Bearings", 1999, *J. Info. Storage Proc. Syst.*, vol. 1, pp. 45-58.
- (2) G. H. Jang, M. S. Jung and S. H. Lee, 2002, "Free Vibration Analysis of a Spinning Flexible Disk-Spindle System Supported by Ball Bearing and Flexible Shaft Using Finite Element Method and Substructure Synthesis", *J. Sound and Vibration*, vol.251(1), pp.59-78.
- (3) Tseng C. W., Shen J. Y. and Shen I.Y., 2003 "Vibration of rotating-shaft HDD spindle motors with flexible stationary parts", *IEEE Trans Magn*, vol.39, pp. 794-799.
- (4) G. H. Jang, J. H. Han and C. H. Seo, 2005, "Finite Element Modal Analysis of a Spinning Flexible Disk-Spindle System in a HDD Considering the Flexibility of Complicated Supporting Structure", *Microsystem Technologies*, vol.11, no.7, pp. 488-498.
- (5) S. Y. Park and T. G. Jeong, 1999, "Dynamic Characteristics of the Actuator System of Magnetic Recording Hard Disk Drives", *KSME(A)*, vol.23(12), pp.22677-2278.
- (6) L. M. Xu and N. Guo, 2003, "Modal Testing and Finite Element Modelling of Subsystem in Hard Disk Drive", *Mechanical System and Signal Processing*, vol.17(4), pp.747-764.
- (7) Feng Gao, Fook Fah Yap and Ying Yan, 2005, "Modeling of Hard Disk Drives for Vibration Analysis Using a Flexible Multibody Dynamics Formulation", *IEEE Trans Magn*, vol.41(2), pp. 744-749.
- (8) Jones, A. B., 1960, "A General Theory of Elasticity Constrained Ball and Radial Roller Bearings under Arbitrary Load and Speed Conditions", *J. Basic Eng.*, ASME, vol.82, pp.309-320.
- (9) Cook, R. D., Malkus, D. S., and Plesha, M. E., 1989, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 3rd edn. John Wiley & Sons
- (10) Lehoucq, R. B. and Sorensen, D. C., 1996, "Deflation Techniques for an Implicitly Restarted Arnoldi Iteration", *J. Matrix anal. Appl. SIAM*, pp. 789-821.
- (11) Zang, Y. and Hatch, M. R., 1996, "On the whirl dynamics of hydrodynamic bearing spindle in information storage systems", *International Symposium on Information Storage and Processing Systems*, Vol. 2, pp.73-84.