

## 근접장 광기록용 슬라이더의 동특성 분석

### Dynamic Analysis of a Slider in Near-field Optical Recording Disk Drive

안 채 현\* · 임 경 화†

Chae-Hun An and Kyung-Hwa Rim

(2002년 8월 27일 접수 : 2003년 2월 24일 심사완료)

**Key Words** : Optical Disk Drive(광디스크 드라이브), NFR(근접장 기록), Slider(슬라이더), Dynamic Characteristic(동특성), Sensitivity(민감도)

#### ABSTRACT

Dynamic analysis using impulse responses is formulated to estimate effect of slider rail shape on dynamic responses in near-field optical recording drive. Impulse responses are obtained on numerical nonlinear model including rigid motion of a slider and fluid motion of an air bearing under the slider. Dynamic characteristics of slider motion are evaluated by utilizing the decay ratio of impulse responses and modal frequencies from frequency response functions. The dynamic characteristics of the designed NFR slider are checked by comparing those of a HDD slider(Nutcracker). Also, sensitivities of slider position conditions and rotation speed on the dynamic characteristics are investigated.

#### 1. 서 론

최근에는 HD-TV, 3D 게임기 등의 시장에 대비하여 국내외에서는 초고밀도 광디스크 시스템에 대한 개발기술들을 다양하게 연구하고 있다.<sup>(1,2)</sup> 그 중에서도 HDD(hard disk drive) 슬라이더 부상기술을 기존 광디스크 드라이브에 접목시킨 근접장 광기록방법(NFR, near-field optical recording method)이 많은 관심을 끌고 있다. 근거리 광기록방법은 기존 광디스크 시스템의 원거리 광기록방법(far-field optical recording method)과 HDD의 밀착 기록 방법(proximity recording method)이 조합된 형태로 Fig. 1과 같이 광픽업(optical pick-up)을 약 100 nm 내외 정도로 광디스크에 매우 인접되게 위치시켜, 초고밀도 기록 또는 재생시키는 기록방법이다. 이에 따라 핵심

부품인 NFR용 슬라이더 개발에 대한 연구가 필요한 상황이다. 상당한 기술 발전을 해온 HDD용 슬라이더 연구에서는 디스크에서의 안정적인 초미세 간격 부상과 빠른 탐색 시간(seek time)에 대한 연구들과 함께 외란에 대한 슬라이더(slider)의 동특성 파악이 큰 관심의 대상이 되고 있다. Bogy등은 HDD용 슬라이더의 동특성을 파악하기 위하여, 모드 해석법(modal analysis method)<sup>(3-5)</sup> 및 실험적인 방법<sup>(6)</sup>을 이용하여 시스템 매개변수를 추출하였고, 이를 슬라이더의 특성 평가 및 설계에 활용하였다. 또한 Lu등은 여러 가지 슬라이더를 수치 해석적인 방법으로 해석하고 최적화 이론을 도입하여 슬라이더 레일 설계에 적용하였다.<sup>(7)</sup> 김도완 등은 슬라이더 수치해석 프로그램을 개발하여 충격, 범퍼 등 외란에 대한 슬라이더의 응답을 해석하였다.<sup>(8)</sup> 한편, 슬라이더를 지지하고 트랙 방향으로 위치를 이동시키는 서스펜션(suspension)에 대한 연구도 필요한데, 슬라이더 부상과 트랙 이동에 따른 서보 대역폭(servo bandwidth) 확보를 위한 동특성 파악에 관한 많은 연구가 있었다. Jeans는 HDD용 서스펜션을 유한요소법을 이용하여 동특성을 해석

† 책임저자, 정회원, 한국기술교육대학교 제어시스템공학과

E-mail : rim@kut.ac.kr

Tel : (041) 560-1147, Fax : (041) 560-1253

\* 한국기술교육대학교 대학원

하였고, 이를 실험적으로 비교하였으며,<sup>(9)</sup> 김정주 등은 HDD용 서스펜션 유한요소 모델의 동특성을 실험적으로 검증하고, 각각의 부품의 부위별 형상 치수를 변경하여 민감도 분석을 수행하였다.<sup>(10)</sup>

근접장 광기록용 슬라이더는 HDD용 슬라이더의 부상 높이(10~50 nm)에 비하여 비교적 높은 부상높이(100 nm 내외)만 확보해도 되는 설계여유가 있지만, 광기록의 특성상 비교적 큰 특수렌즈를 슬라이더에 부착해야 하기 때문에 슬라이더의 질량이 증가하는 어려운 설계조건도 있다. 그러므로 근접장 광기록용 슬라이더의 설계에 있어서도 공기 베어링의 동특성 파악이 필수적이다. 또한 광학계 설치로 인하여 서스펜션이 다소 복잡한 구조를 가지면서, 서스펜션의 하중과 슬라이더의 부상력을 상호 전달하는 딴플점(dimple point)을 구성하기가 어려운 단점도 있다. 본 논문에서는 이러한 HDD의 조건과 다른 상황을 고려하여 설계된 근접장 광기록용 슬라이더와 서스펜션에 대한 동특성을 검증하기 위하여, 제안된 수치해석 방법을 이용하여 상용화된 HDD용 부품과 비교하였다. 수치해석에서는 매우 작은 부상조건에 잘 맞는 기존 공기 베어링의 모델링과 슬라이더 강체 모델링을 연관시켜 슬라이더의 충격응답을 구하였다. 충격응답은 공기 베어링의 동특성을 파악하는데 유용한 데이터이다. 그리고 충격응답을 이용하여 주파수 응답함수를 구한 뒤에 모드개변수를 추출하여 슬라이더의 동특성을 비교하였다. 또한 부상높이, 회전속도 등의 운전 조건 변화에 따른 슬라이더 동특성의 민감도를 분석하였다.

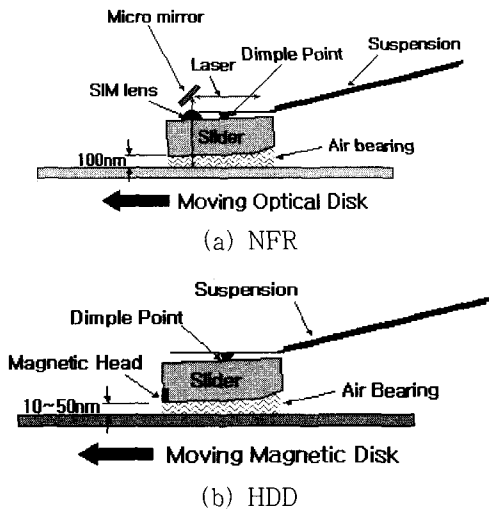


Fig. 1 Comparison of a NFR slider with a HDD slider

## 2. 시스템의 모델링 및 해석방법

### 2.1 슬라이더 시스템의 운동 방정식

슬라이더는 강체이고 공기베어링은 미소한 범위 이동 내에서 선형이라고 가정하면, 부상높이를 구하기 위하여 Fig. 2와 같은 슬라이더와 공기베어링을 상하 방향( $z$ ), 피칭방향( $\theta_y$ ) 및 로링방향( $\theta_x$ )만 고려된 3 자유도계로 모델링 한다.<sup>(3)</sup> 슬라이더의 운동방정식은 슬라이더의 질량  $m$ , 서스펜션의 강성계수  $k$ , 감쇠계수  $c$ , 외력  $f(t)$  및 공기베어링의 압력  $p$ 와 정상상태 압력  $p_s$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c_z \frac{dz}{dt} + k_z = f_z(t) + \int_A (p - p_s) dA \quad (1)$$

$$I_{\theta_y} \frac{d^2 \theta_y}{dt^2} + c_{\theta_y} \frac{d\theta_y}{dt} + k_{\theta_y} = f_{\theta_y}(t) - \int_A (p - p_s) x dA \quad (2)$$

$$I_{\theta_x} \frac{d^2 \theta_x}{dt^2} + c_{\theta_x} \frac{d\theta_x}{dt} + k_{\theta_x} = f_{\theta_x}(t) - \int_A (p - p_s) y dA \quad (3)$$

한편, 초미세 간격이 고려되어 공기베어링 해석에 사용되는 수정된 레이놀즈 방정식은 다음과 같이 표현된다.<sup>(5)</sup>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho h^3 Q \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho h^3 Q \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ & = 6\mu V_x \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 6\mu V_y \frac{\partial(\rho h)}{\partial y} + 12\mu \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $h$ 는 슬라이더와 디스크 간의 미세 간격이고,  $Q, \mu, V$ 는 각각 유동량, 공기 점성계수, 유동의 속도이다.

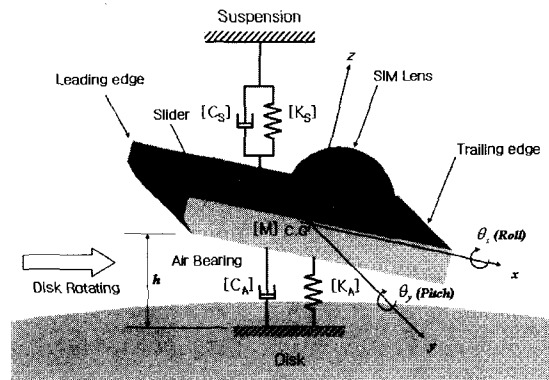


Fig. 2 Mathematical model of a NFR slider

### 2.2 근접장 광기록용 서스펜션의 구조 제안 및 모델링

슬라이더를 지지하고 원하는 디스크 트랙으로 이동시키는 역할을 하는 서스펜션은 식 (1)~(3)과 같이 슬라이더의 동적 거동에 공기베어링의 압력과 더불어 큰 영향을 주게 된다. 본 논문에서 제시한 NFR용 서스펜션은 Fig. 3과 같이 NFR용 슬라이더의 무거운 질량을 감안하여 플렉서(flexure)의 역할을 겸하는 일체형 서스펜션을 채택하였고, 광경로를 제어하는 마이크로 미러(micro mirror)를 슬라이더 부상과 직접 연관이 적은 보조 서스펜션(sub-suspension)에 부착함으로써 질량 증가로 인한 고유진동수의 감소를 회피하였다.

렌즈 및 광경로로 인한 뒤틀림 위치 선정의 난점을 해결하기 위한 Fig. 4의 뒤틀림봉(dimple rod)을 부착하여 보조 서스펜션 하단에 뒤틀림점이 생성되도록 하였다. 뒤틀림점을 통하여 슬라이더에 가해지는 예비 하중(pre-loading force)은 서스펜션의 수직강성, 굽힘각에 비례한다.<sup>(11)</sup> 따라서 비교적 변형이 용이한 주 서스펜션(main suspension)의 굽힘각과 보조 서스펜션의 수직강성을 변경함으로써 슬라이더 부상시 요구되는 적절한 예비 하중을 유지할 수 있다.

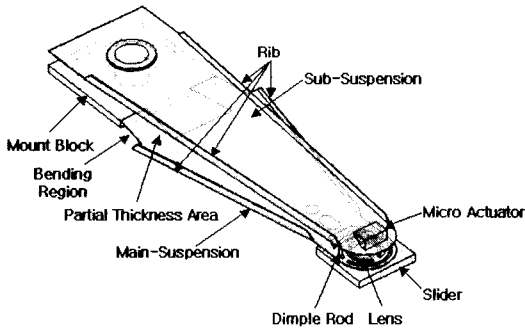


Fig. 3 Design of a NFR suspension

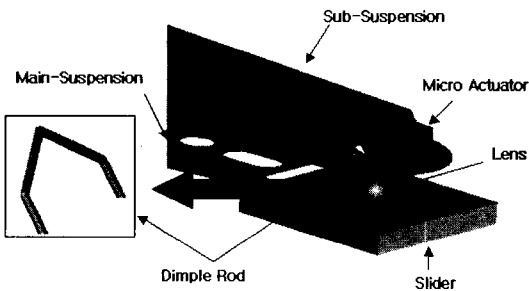


Fig. 4 A NFR suspension and dimple rod

제안된 NFR용 서스펜션의 구조와 형상의 적절성을 검증하기 위하여, 이미 성능이 검증된 상용 HDD용 서스펜션의 동특성과 비교하면서 설계단계에서 유한요소법을 이용하여 간접적으로 확인하였다. Table 1은 공기베어링이 존재하지 않은 자유상태(free condition)에서의 서스펜션의 유한요소 모델을 HDD용의 물성치에 준하여 모드 해석을 수행하여, 고유진

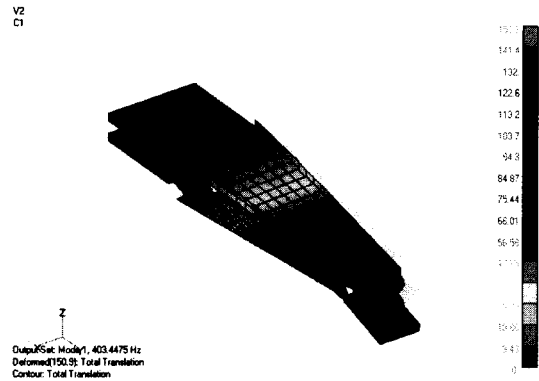


Fig. 5 Cantilever mode shape of a NFR suspension

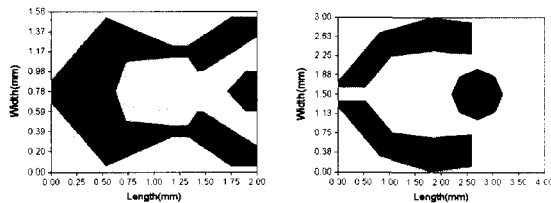
Table 1 Comparison of natural frequencies

Mode shape	Natural frequencies of a NFR suspension (Hz)	Natural frequencies of a hutchinson type 850 suspension (Hz)
Cantilever	403.45	172.8
Slider pitch	883.90	1101.8
Slider roll	1224.62	1321.1
Bending 1	1785.40	2498.7
Torsion 1	2654.35	2379.7
1st torsion (sub-suspension)	2989.69	.
Coupled bending 1	3523.97	.
Torsion 2	5458.98	7826.8
Hollow	6931.60	.
Sway	7666.55	7320.6

동수와 모드 형상을 기존연구<sup>(10)</sup>의 HDD용 서스펜션 동특성과 비교한 것이다. 자유상태 해석에서 나타나는 외팔보 모드(cantilever mode), 슬라이더 피치(slider pitch) 및 슬라이더 롤(slider roll) 모드는 순응도 모드로서 공기베어링이 존재하는 작동상태(working condition)에서는 나타나지 않지만, 슬라이더의 부상과 밀접한 관련이 있는 모드들이다. 이중 서스펜션(dual suspension) 구조로 인한 수직방향 강성 증가로 외팔보 모드인 경우는 2배 이상 증가하였고, 렌즈의 부착으로 인한 무게 중심의 이동에 의해 슬라이더 피치 모드는 약간 감소하였다. 그 외의 모드들 또한 HDD용 서스펜션과 유사한 동특성을 보이고 있다. 슬라이더 강제 모델링에 고려되는 서스펜션의 강성은 슬라이더의 무게 중심에서 각각의 자유도에 단위하중을 부과하고 이의 변위를 유한요소법으로 해석함으로써 얻어진 변위를 역행렬법을 이용하여 추출하였다.<sup>(12)</sup>

2.3 해석방법

공기 베어링의 비선형 특성이 크지만, 슬라이더의 동특성을 평가하기 위하여 식 (5)와 같이 등가 3자유도 선형계로 가정하여 평가한다.



(a) HDD(Nutcracker) (b) NFR  
Fig. 6 Rail shape of HDD and NFR sliders

Table 2 Working conditions of sliders

Properties	Model	
	NFR	HDD (Nutcracker)
Disk speed (rpm)	2400	5400
Radial position(mm)	45	25
Pre-loading force (gram)	5	3.5
Initial flying height(nm)	115	33
Initial roll angle(μ rad)	0	-0.7
Initial pitch angle(μ rad)	0	148
Skew angle(degree)	0	0

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\}, u = \{z, \theta_y, \theta_x\}^T \quad (5)$$

여기서 [M]은 슬라이더의 질량행렬이고, [C]와 [K]는 공기베어링과 서스펜션의 특성을 함께 고려한 감쇠행렬과 강성행렬이다.

등가 3자유도계를 구하기 위하여, 우선 식 (1)~식 (3)의 강제 운동방정식과 식 (4)의 수정된 레이놀즈 비선형방정식을 각 시간 단계에서 연관시켜 유한차분법으로 수치 해석하여 슬라이더의 충격응답을 구한다. 충격응답을 구할 때는 각 자유도에 대해 초기 충격속도를 주어서, 동시에 3방향에서 구한다. 비선형 해석에서 구한 충격응답을 이용하여 주파수 응답함수를 구한다. 식 (5)의 선형 운동 방정식의 주파수 응답함수에 맞추어서 커브피팅(curve fitting)을 통하여 고유진동수를 추출한다.

검토될 슬라이더는 현재 개발 중인 NFR용 슬라이더와 함께 HDD용 슬라이더인 Nutcracker 슬라이더를 선정하여 비교 분석한다. 두 종류 슬라이더의 형상과 사양은 각각 Fig. 6과 Table 2에 있다. 각 슬라이더의 질량 및 관성모멘트는 다음과 같다.

- NFR용 슬라이더

$$M_{c(NFR)} = \begin{bmatrix} 3.000 \times 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 3.809 \times 10^{-11} & 0 \\ 0 & 0 & 2.144 \times 10^{-11} \end{bmatrix} (\text{kg.m})$$

- HDD용 슬라이더(Nutcracker)

$$M_{c(HDD)} = \begin{bmatrix} 5.952 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 2.176 \times 10^{-12} & 0 \\ 0 & 0 & 1.361 \times 10^{-12} \end{bmatrix} (\text{kg.m})$$

NFR용 슬라이더는 렌즈를 부착해야 하는 슬라이더의 특성 때문에 질량이 HDD용 슬라이더에 비해 5배 가량 크고, 크기 증가와 렌즈 부착의 영향으로 관성모멘트도 매우 큰 것을 알 수 있다.

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 NFR용 슬라이더와 HDD용 슬라이더 비교

Fig. 7 (a)는 NFR용 슬라이더의 무게 중심에서 수

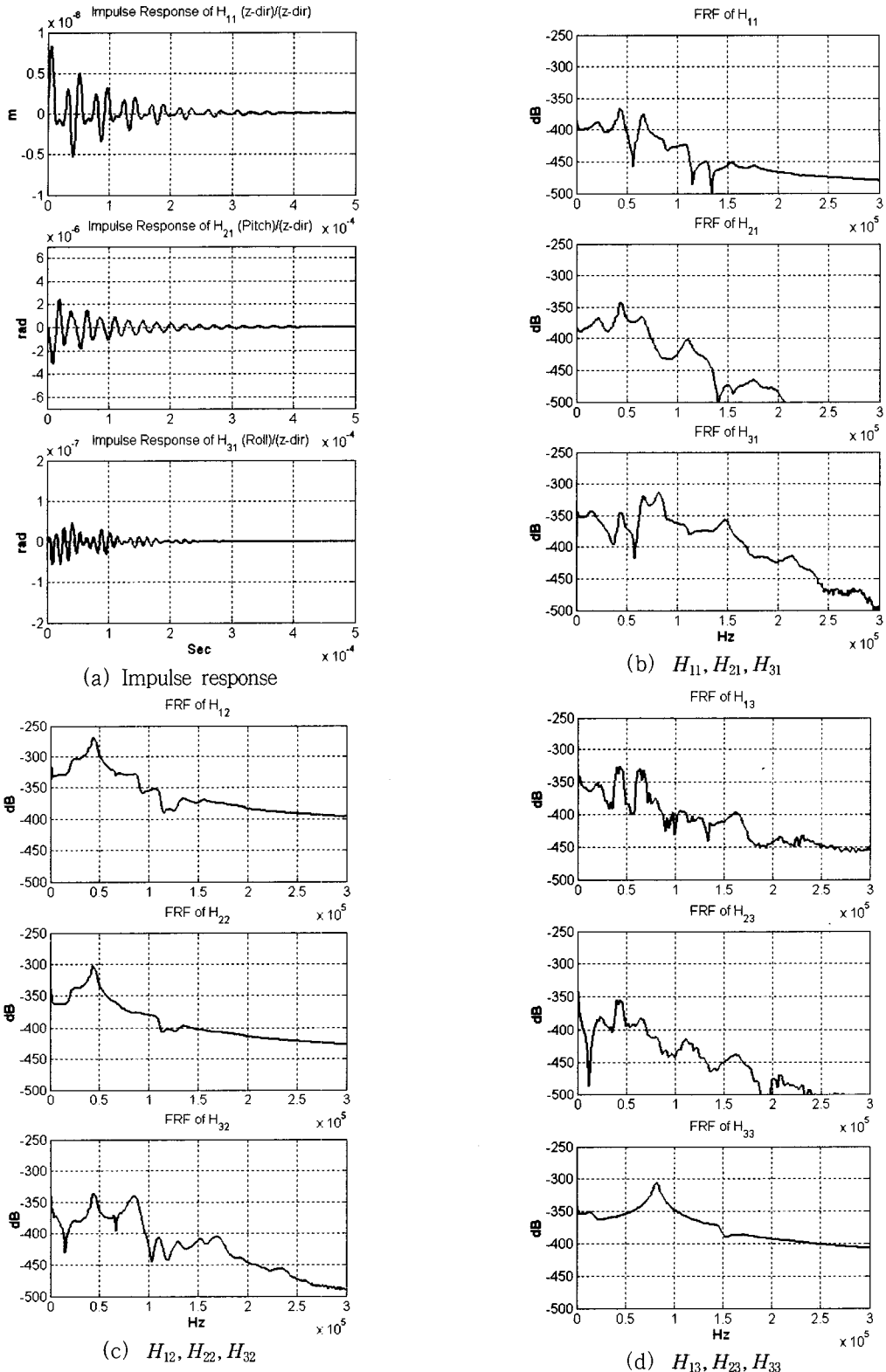


Fig. 7 Impulse response, frequency response functions of a NFR slider

직  $z$ 방향으로 충격속도를 주었을 때, 수직  $z$ 방향(1방향), 피칭  $\theta_y$ 방향(2방향) 및 로링  $\theta_x$ 방향(3방향)으로 각각 슬라이더 질량중심의 충격 응답을 나타낸 것이고, (b)~(d)는 각 자유도에 대한 주파수 응답 함수를 나타낸 것이다. 또한 본 연구에서 사용한 해석 방법을 검증하기 위하여, 기존자료<sup>(4)</sup>에 있는 HDD 슬라이더에 대해서도 해석하였다. 충격응답을 이용하여 주파수 응답함수를 구한 뒤에, 고유진동수를 구하여 Table 3에서 기존 연구 결과치<sup>(4)</sup>와 비교하였다. 기존 해석결과와 거의 비슷하게 분석되어 있고, 약간의 오차는 기존자료의 정확한 슬라이더 레일의 데이터 부족으로 인해서 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 7에서 모델링에 포함된 서스펜션의 영향으로 생성되는 고유진동수들을 제외하면, 슬라이더는 3개의 강제 고유 진동수를 가짐을 볼 수 있다. 그러나  $H_{33}$ 의 주파수 응답 함수를 관찰하면 다른 모드들은 나타나지 않고 1개의 모드만 존재함을 알 수 있다. 이는 로링 방향에 관계된 모드형상이고, 다른 자유도와는 비연성 모드(decoupling mode)임을 알 수 있다. 이는 로링의 방향이 슬라이더 밑에서 윤활막을 형성하는 공기의 흐름방향과 직접적으로 일치하지 않고, 축을 기준으로 좌우 대칭의 형상을 가지기 때문이다. 또한 고유 진동수의 측면을 살펴 본 HDD용과 NFR용 슬라이더의 비교 결과를 Table 4에 나타내었다. 질량의 증가로 인하여 NFR용 슬라이더의 고유진동수가 대체적으로 작다. 그러나 현재 고려되고 있는 NFR 디스크 회전속도가 HDD 회전속도의 1/2 정도이므로, 디스크의 외란 주파수를 고려하면 NFR용 슬라이더의 강성은 충분한 것으로 판단된다.

Table 3 Comparison of natural frequencies

Mode shape	Reference data <sup>(4)</sup>	Analysis result
Vertical mode	55.2 kHz	57.8 kHz
Rolling mode	84.4 kHz	79.4 kHz
Pitching mode	125.2 kHz	119.9 kHz

Table 4 Natural frequencies of sliders

Mode shape	NFR	HDD
Vertical mode	45.9 kHz	57.8 kHz
Rolling mode	81.9 kHz	79.4 kHz
Pitching mode	65.9 kHz	119.9 kHz

### 3.2 민감도 분석

디스크 흠, 먼지 등의 외란인 경우와 공기베어링에 인입하는 경우에 슬라이더의 과도 거동을 예측하기 위하여 슬라이더 위치 변화와 디스크 회전속도에 따른 동특성 변화를 조사한다. Fig. 8은 부상 높이에 따른 주파수 응답 함수의 고유진동수의 변화이다. 각 모드들의 고유진동수는 부상높이가 증가함에 따라 낮아지고 있음을 볼 수 있는데, 이는 공기 베어링의 동적 강성이 감소하기 때문이다. 공기 베어링의 비선형성에 큰 영향을 미치는 요인 중에 하나가 부상높이라는 것을 보여 주고 있다. Fig. 9는 NFR슬라이더의

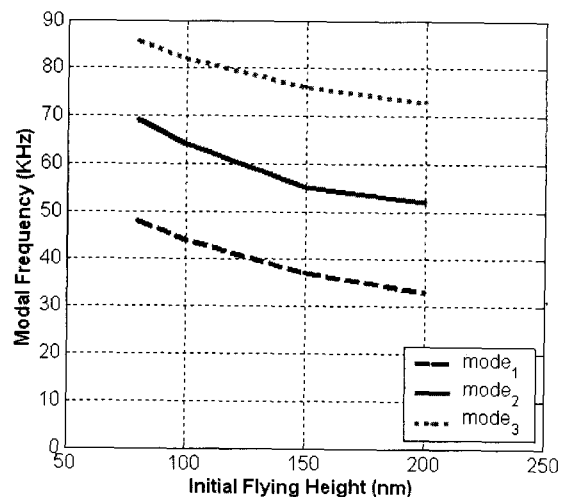


Fig. 8 Effects of initial flying height

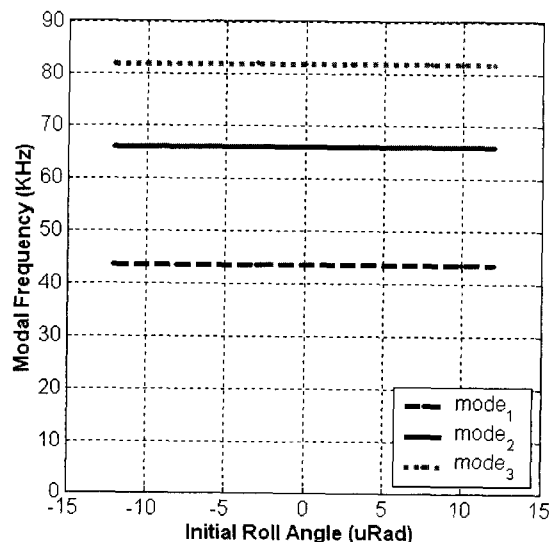


Fig. 9 Effects of initial rolling angle

초기의 로링각 위치변화에 따른 각각의 모드의 고유진동수 변화를 나타 낸 것이다. 로링각의 변화에 따라 고유진동수의 변화는 매우 미미하다. 따라서 로링각은 슬라이더 시스템의 안정성에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 10은 초기 피칭 각의 변화에 따른 각각의 모드의 고유진동수의 이동을 나타낸 것이다. 보는 바와 같이, 피칭 각의 변화에 따라 초기에는 큰 고유진동수의 변화를 보이거나 점차 그 영향이 감소하는 경향을 보인다. 피칭 각은 변화가 시작되면 급속하게 시스템에 영향을 주게 되지만, 어느 정도 이상의 각을 넘어가게 되면 그 효과가 감소함을 알 수 있다.

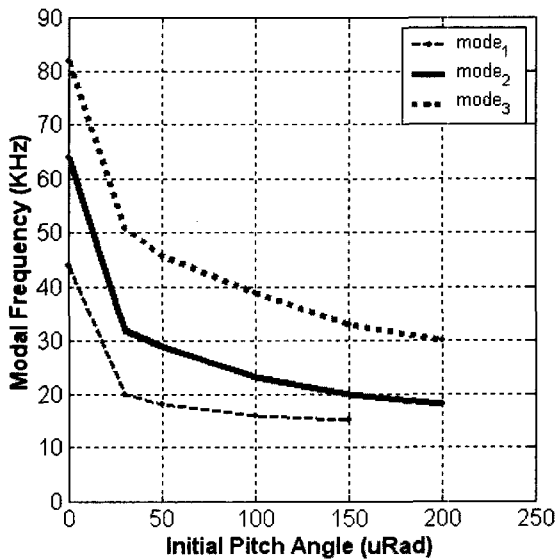


Fig. 10 Effects of initial pitching angle

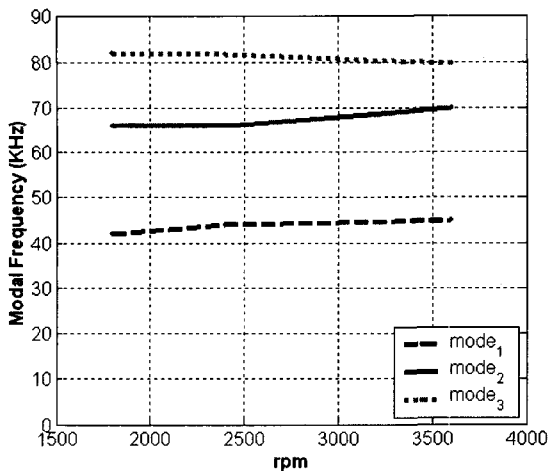


Fig. 11 Effects of disk rotation speed

Fig. 11은 디스크 회전 속도의 변화에 따른 NFR용 슬라이더의 고유진동수의 변화를 보인 것이다.

회전속도의 변화에 의한 고유진동수 변화는 보는 바와 같이 피칭 각이나 높이의 변화에 비하여 둔감한 반응을 보인다. 이러한 현상은 속도가 다른 디스크의 내주, 중주, 외주 위치 등에서도 슬라이더 부상높이가 동일하게 유지되도록 하는 슬라이더의 설계 원칙에 맞는 슬라이더 형상이기 때문이다.

#### 4. 결 론

슬라이더 설계에서 매우 중요한 요소인 슬라이더 공기베어링의 동특성을 파악하기 위하여, 슬라이더를 공기베어링 해석과 연관된 강제운동으로 모델링 하였다. 또한 근접장 광기록 디스크 드라이브의 조건에 맞는 슬라이더와 서스펜션의 구조 설계안을 제시하였고, 충격응답을 이용한 평가방법을 통하여 HDD용 슬라이더의 해석치와 비교하여 성능을 검증하였다. 그리고 근접장 광기록용 슬라이더를 모델링 하여 여러 가지 조건을 변화시키며 충격입력에 대한 주파수 응답 함수를 구하였고, 이를 이용하여 슬라이더 초기위치 및 운전속도에 따른 민감도도 분석하였다. 공기 베어링의 동특성은 부상위치에 따라 큰 비선형성을 확인 하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목지기초연구(과제번호: R01-1999-000-00260-0) 지원으로 이루어졌으며, 재단의 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 김현기, 장 혁, 김광선, 임경화, 2000, "광디스크 드라이브 공기베어링 슬라이더의 형상민감도 해석," Journal of the Microelectronics & Packaging Society, Vol. 7, No. 4, pp. 37~42.
- (2) 임경화, 2000, "헤드간섭으로 인한 회전디스크의 안정성 분석," 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 5 호, pp. 865~872.
- (3) Zeng, Q. H., Chen L. S. and Bogy, D. B., 1997, "A Modal Analysis Method for Slider-air

Bearings in Hard Disk Drives," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 5, pp. 3124~3126.

(4) Bogy, D. B., Zeng, Q. H. and Chen, L. S., 1997, "Air-bearing Designs for Stable Performance in Proximity Magnetic Recording," International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, pp. 65~70.

(5) Zeng, Q. H. and Bogy, D. B., 1999, "Stiffness and Damping Evaluation of Air Bearing Sliders and New Designs with High Damping," Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 341~347.

(6) Bogy, D. B., 1999, "Experimental Evaluation of Stiffness and Damping of Slider-air Bearing in Hard Disk Drives," Transactions of the ASME, Vol. 121, pp. 102~107.

(7) Sha L., Young H., Matthew, O'Hara and Bogy, D. B., 1996, "Air Bearing Design, Optimization, Stability Analysis and Verification for sub-25nm Flying," IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, Vol. 32, No. 1, pp. 103~109.

(8) 김도완, 임윤철, 2000, "하드디스크 슬라이더의 동적수치해석," Journal of KSTLE, Vol. 16, No. 4, pp. 295~301.

(9) Jeans, A. H., 1992, "Analysis of the Dynamics of a Type 4 Suspension," Transactions of the ASME, Vol. 114, pp. 74~78.

(10) 김정주, 전정일, 변용규, 노광춘, 정정주, 정태건, 1997, "고트랙밀도 HDD 서스펜션의 동특성 해석," 대한기계학회 논문집(A), 제 21 권, 제 11 호, pp. 1885~1895.

(11) Ruiz, O. J. and Bogy, D. B., 1990, "A Numerical Simulation of the Head-disk Assembly in Magnetic Hard Disk Files: Part I - Component Models," Transactions of the ASME, Vol. 112, pp. 593~602.

(12) Zeng, Q. H. and Bogy, D. B., 1999, "Slider Air Bearing Designs for Load/Unload Applications," IEEE/ASEM TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 35, No. 2, pp. 746~751.