

NFR 슬라이더의 동특성 분석

Dynamic Analysis of NFR Slider

안채현* · 임경화**

Chae-Hun An and Kyung-Hwa Rim

Key Words : Optical Disc Drive (광디스크 드라이브), NFR (근접장 기록), Slider (슬라이더), Dynamic Characteristic (동특성), Frequency Response Function (주파수 응답 함수), Sensitivity (민감도)

ABSTRACT

Dynamic analysis using impulse responses is formulated to estimate effect of slider rail shape on dynamic responses. Impulse responses are obtained on numerical nonlinear model including rigid motion of slider and fluid motion of 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 developed NFR(Near Field Recording) slider are checked by comparing those of HDD slider(Nutcracker). Also, sensitivities of slider position conditions and rotation speed on the dynamic characteristics are investigated. The researches show that the utilized method is a good indicator of designing the better slider.

1. 서론

최근에는 HD-TV, 3D 게임기 등의 시장에 대비하여 국내외에서는 초고밀도의 광디스크 시스템에 대한 기술들을 다양하게 연구하고 있다.^(1~2) 그 중에서도 HDD(Hard Disc Drive) 슬라이더 부상기술을 접목시킨 근거리 기록방법(Near Field Recording Method)이 많은 관심을 끌고 있다. 근거리 기록방법은 기존 광디스크 시스템의 원거리 기록방법(Far Field Recording Method)과는 달리 Fig. 1과 같이 광픽업(Optical Pick-Up)을 약 50-150nm로 정도로 광디스크에 매우 인접되게 위치시켜, 초고밀도 기록 또는 재생시키는 기록방법이다. 이에 따라 NFR(Near Field Recording)용 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 연구와 함께 외란에 대한 슬라이더의 동특성 파악이 큰 관심의 대상이 되고 있다. Bogy등은 슬라이더 시스

템의 동특성을 수치 해석적인 방법으로 파라미터를 모달 해석법(Modal Analysis Method)^(3~5) 및 실험적인 방법⁽⁶⁾을 이용하여 추출하였고, 이를 슬라이더의 특성 평가 및 설계에 이용하였다. 또한 Lu 등은 여러 가지 슬라이더를 수치 해석적인 방법으로 해석하고 최적화 이론을 도입하여 슬라이더 레일 설계에 적용하였다.⁽⁷⁾ 김도완등은 슬라이더 수치해석 프로그램을 개발하여 충격, 범퍼 등 외란에 대한 슬라이더의 응답을 해석하였다.⁽⁸⁾

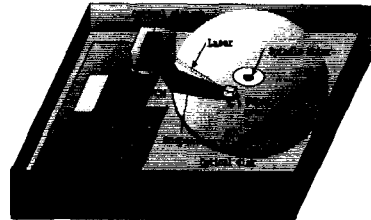


Fig. 1 Near field recording system

기존의 광기록 방식에 HDD 서스펜션과 슬라이더 구조를 채용한 NFR용 광디스크 시스템에서는 HDD 슬라이더의 부상 높이(15~50nm)에 비하여 비교적 높은 부상높이(100nm내외)이지만, 광기록

* 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

** 한국기술교육대학교 제어시스템공학과

의 특성상 비교적 큰 특수렌즈를 슬라이더에 부착해야 하기 때문에 슬라이더의 질량 증가가 필연적으로 수반된다. 그러므로 NFR용 슬라이더의 설계에 있어서도 공기 베어링의 동특성 파악이 필수적이다. 공기 베어링은 비선형성이 매우 크기 때문에 슬라이더의 공기 베어링 수치해석 프로그램을 이용하여 HDD 슬라이더와 현재 개발이 진행중인 NFR 슬라이더의 동특성을 비교하고, 부상 조건 변화에 따른 슬라이더 동특성의 민감도도 분석한다.

2. 시스템의 모델링 및 해석방법

2.1 슬라이더 시스템의 운동 방정식

슬라이더는 강체이고 공기베어링은 미소한 범위 이동 내에서 안정적이라고 가정하면, 슬라이더와 공기베어링은 위의 Fig. 2와 같이 3자유도계로 모델링 한다.

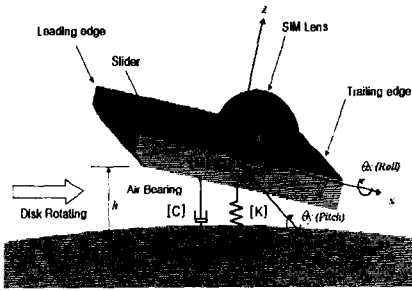


Fig. 2 Mathematical model of a NFR slider

슬라이더의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

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

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

초미세 간격의 공기베어링 해석에 사용되는 수정된 레이놀즈 방정식은 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁾

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

2.2 해석방법

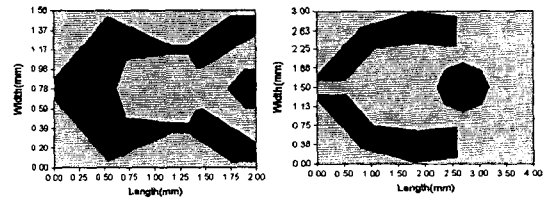
식(1)~식(3)의 강체 운동방정식과 식(4)의 수정된 레이놀즈 비선형 방정식을 각 시간 단계에서 연관시켜 유한차분법으로 수치해석함으로써 슬라이더의 동적 거동을 구한다.

슬라이더 형상에 따른 위의 시스템을 미소한 범위 내에서 안정하고, 선형 시불변 시스템으로 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

비선형 해석에서 구한 충격응답을 식 (5)의 선형 운동방정식의 가정아래 주파수 응답함수를 구하고, 고유진동수를 추출한다. 이 때 충격응답을 구할 때는 각 자유도에 대해 충격속도를 주어서, 동시에 3방향의 충격응답을 구한다.

슬라이더의 종류는 HDD 슬라이더인 NutCracker 슬라이더와 현재 개발중인 NFR 슬라이더를 선정하여 비교 분석한다. 2종류 슬라이더의 형상과 사양은 각각 Fig. 3과 Table 1에 있다.



(a) HDD (NutCracker)

(b) NFR

Fig. 3 Rail shape of HDD and NFR sliders

Table 1 Conditions of slider

Properties	Model	
	HDD(NutCracker)	NFR
Disk Speed (rpm)	5400	2400
Radial Position(mm)	25	45
Normal Load (gram)	3.5	5
Initial Flying Height(nm)	33	115
Initial Roll Angle(μrad)	1.4	0
Initial Pitch Angle(μrad)	148	0
Skew Angle(degree)	0	0

각 슬라이더의 질량 및 관성모멘트는 다음과 같다.

- HDD 슬라이더(NutCracker)

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

- NFR 슬라이더

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

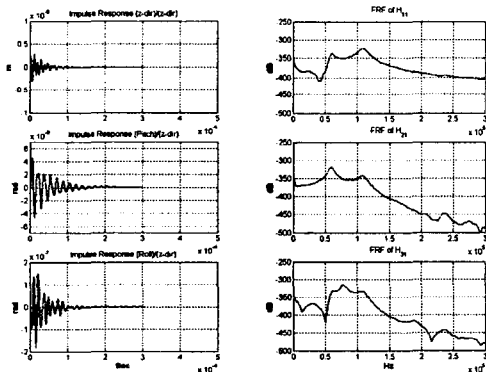
NFR 슬라이더는 렌즈를 부착해야 하는 슬라이더의 특성 때문에 질량이 HDD 슬라이더에 비해 5배 가량 크고, 크기 증가와 렌즈 부착의 영향으로 관성모멘트도 매우 큰 것을 알 수 있다.

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 NFR 슬라이더와 HDD 슬라이더 비교

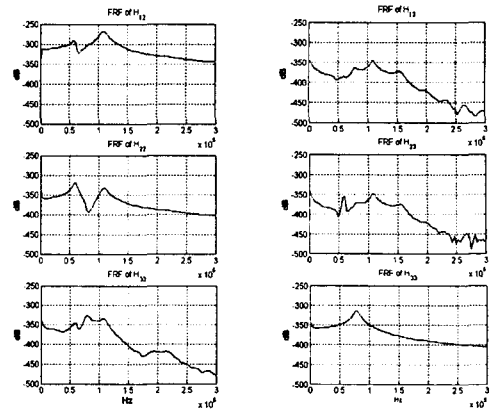
HDD 슬라이더의 충격응답과 주파수 응답함수는 Fig. 4와 같이 나타난다. Fig. 4(a)는 수직 Z방향으로 충격속도를 주었을 때, 수직 z방향(1방향), 피칭 θ_y 방향(2방향) 및 로링 θ_x 방향(3방향)으로 각각 슬라이더 질량중심에서의 동적 거동이다.

해석 결과를 검증하기 위하여 기존자료⁽⁴⁾의 슬라이더 동특성을 고유진동수 관점에서 Table 2에서 비교한다. 기존 해석결과와 거의 비슷하게 분석되어 있고, 약간의 오차는 기존자료의 정확한 슬라이더 레일의 데이터 부족으로 인해서 발생한 것으로 판단된다.



(a) Impulse Response

(b) H_{11}, H_{21}, H_{31}



(c) H_{12}, H_{22}, H_{32}

(d) H_{13}, H_{23}, H_{33}

Fig.4 Impulse responses and frequency response functions of HDD Slider

Table 2 Comparison of modal frequencies

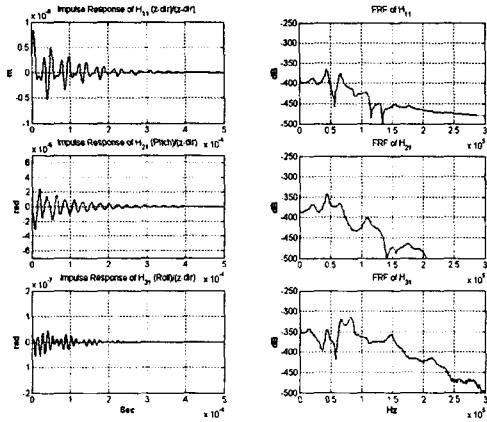
Mode Shape	Reference Data ⁽⁴⁾	Analysis Result
Vertical Mode	55.2KHz	57.8KHz
Rolling Mode	84.4KHz	79.4KHz
Pitching Mode	125.2KHz	119.9KHz

Fig. 5는 NFR 슬라이더의 z방향 입력에 대한 각 자유도의 충격응답과 각 자유도에 대한 주파수 응답 함수를 나타낸 것이다. 모델링에 포함된 서스펜션의 영향으로 생성되는 1KHz 부근의 고유진동수들을 제외하면, 슬라이더는 3개의 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, x축을 기준으로 좌우 대칭의 형상을 가지기 때문이다. 따라서 이는 1자유도계로 가정하면 간략히 강성을 유추해 낼 수 있다.

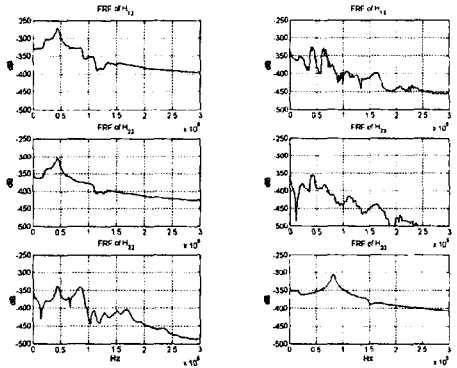
$$f_{33} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{33}}{m_{33}}} \quad (6)$$

Table.3 Natural Frequency of Sliders

Mode Shape	HDD	NFR
Vertical Mode	57.8KHz	45.9KHz
Rolling Mode	79.4KHz	81.9KHz
Pitching Mode	119.9KHz	65.9KHz



(a) Impulse Response (b) H_{11}, H_{21}, H_{31}



(c) H_{12}, H_{22}, H_{32} (d) H_{13}, H_{23}, H_{33}

Fig.5 Impulse Response, Frequency Response Function of NFR Slider

Fig 4와 Fig. 5의 충격응답을 비교해 보면, NFR 슬라이더는 안정한 상태로 돌아오는데 약간의 시간이 더 필요하게 되고, 수직 방향 변위가 매우 큼을 알 수 있다. 따라서 더 큰 감쇠를 줄 수 있는 방향으로 디자인의 변경이 요구된다. 또한 고유진동수의 측면을 살펴본 Table 3 결과에서, 질량의 증가로 인하여 NFR 슬라이더의 고유진동수가 대체적으로 작다. 그러나 NFR 디스크 회전속도가 HDD 회전속도의 1/2 정도이므로, 외란 주파수를 고려하면 NFR 슬라이더의 강성은 충분한 것으로 판단된다.

3.2 민감도 분석

디스크 흠, 먼지 등의 외란인 경우와 공기베어링에 인입하는 경우에 슬라이더 거동을 예측하기 위하여 슬라이더 위치 변화와 디스크 회전속도에 따른 동특성 변화를 조사한다. Fig 6은 부상높이 변화에 따른 H_{11} 의 주파수 응답 함수의 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. 8은 NFR 슬라이더의 초기의 로링각 위치변화에 따른 각각의 모드의 고유진동수 변화를 나타낸 것이다. 로링각의 변화에 따라 고유진동수의 변화는 매우 미미하다. 따라서 로링각은 슬라이더 시스템의 안정성에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

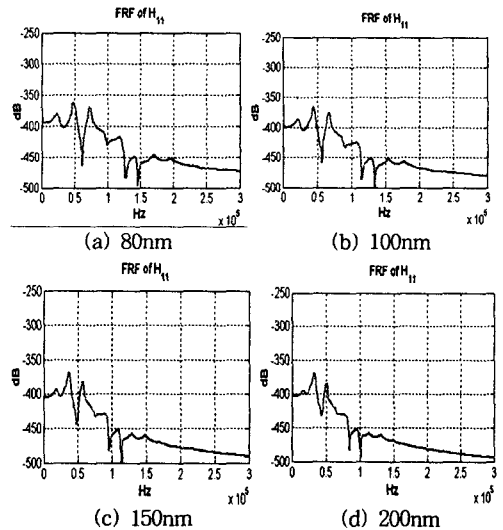


Fig. 6 Effect of initial flying height : NFR Slider

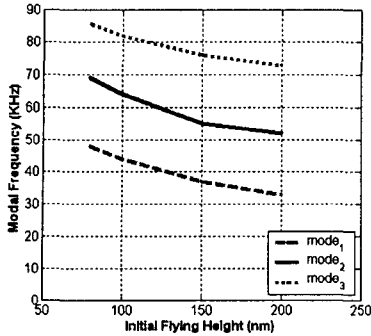


Fig.7 Effect of initial flying height : NFR Slider

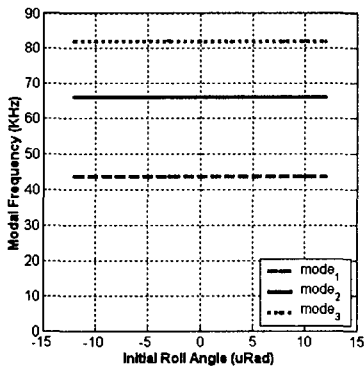


Fig.8 Effect of initial rolling angle

Fig. 9는 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.

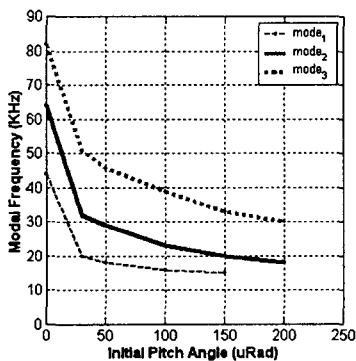


Fig.9 Effects of initial pitching angle

Fig. 10은 디스크 회전 속도(RPM)의 변화에 따른 NFR 슬라이더의 고유진동수의 변화를 보인 것이다. 회전속도의 변화는 보는 바와 같이 피칭 각이나 높이의 변화에 비하여 둔감한 반응을 보인다. 그러나 5400rpm에서는 디스크와 슬라이더는 충돌을 일으키는 결과를 보였다.

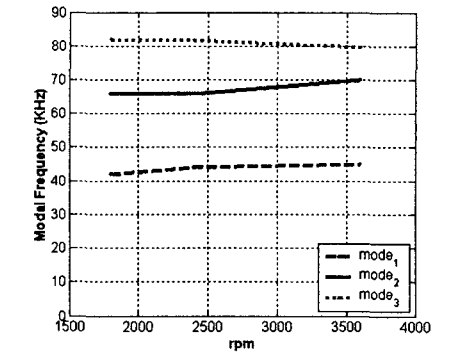


Fig.10 Effects of disc rotation speed

4. 결 론

슬라이더 설계에서 매우 중요한 요소인 슬라이더 공기베어링의 동특성을 파악하기 위하여, 슬라이더를 공기베어링 해석과 연관된 강체운동으로 모델링 하였다.

현재 HDD에 적용되어 있는 표준모델과 현재 연구중인 NFR 슬라이더를 모델링 하여 여러 가지 조건을 변화시키며 충격입력에 대한 주파수 응답 함수를 구하였고, 이를 이용하여 다양한 동특성 및 초기조건에 따른 민감도를 분석하였다. 공기 베어링의 동특성은 부상위치에 따라 큰 비선형성을 나타내었다. 위의 연구 결과 서로 연관된 3자유도 슬라이더-공기 베어링 시스템의 상호관계를 파악할 수 있는 자료를 얻을 수 있었고, 초기 조건 변화에 따른 해석을 통하여 슬라이더 거동 시 슬라이더의 위치가 다음 거동에 미치는 영향을 개략적으로 파악할 수 있었다. 또한 현재 개발 중에 있는 NFR 슬라이더를 HDD 슬라이더와 비교 분석함으로써 개선사항에 대한 정보를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-1999-00260) 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," *한국소음진공학회지*, Vol. 10, No. 5, pp. 865~872.
- [3] Q. H. Zeng, and L. S. Chen and D. B. Bogy, 1997, "A Modal Analysis Method for Slider-Air Bearings in Hard Disk Drives," *IEEE Transactions Magnetics*. Vol. 33, No. 5. pp. 3124~3126.
- [4] D. B. Bogy and Q. H. Zeng, and L. S. Chen, 1997, "Air-Bearing designs for stable performance in proximity magnetic recording," *International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment*. pp. 65~70.
- [5] Q. H. Zeng and D. B. Bogy, 1999, "Stiffness and Damping Evaluation of Air Bearing Slider and New Design with High Damping," *Journal of Tribology*, Vol. 121. pp. 341~347.
- [6] David B. Bogy, 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 Lu, Young Hu, Matthew O'Hara and David B. Bogy, 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 동적 수치해석," *Journal of KSTLE*, Vol. 16, No. 4, pp. 295~301.