

## 근거리장 광부상 헤드의 Loading 동특성 해석

### Analysis of Optical Flying Head Dynamics for Near-field Recoding System

은길수\* · 김노유\*\*

GilSoo Eun, Nohyu Kim

#### ABSTRACT

Loading/Unloading(L/UL) mechanism has been considered to be an alternative to contact start-stop(CSS) mechanism which eliminates stiction and wear associated with frequent start and stop process. It has other advantages including increased areal density due to lower flying height, reduced power consumption, and improved shock resistance. In order for L/UL to be implemented in Near-field recording system properly, dynamics of optical flying head must be understood and optimized. In this paper the dynamic characteristics during loading process is analyzed numerically to investigate the effect of design parameters such as loading speed, slider shape, and initial conditions on the dynamic responses of flying head.

**Key Words** : Near field recording(근거리장 기록방식), Optical flying head(광부상헤드), Loading dynamics(로딩 동특성), Air bearing(공기베어링), Two-rail slider(두면 슬라이더)

#### 1. 서론

컴퓨터의 대용량화, 고속화가 향상됨에 따라 저장기기의 발전도 활발하게 이뤄지고 있다. Hard Disk Drive(HDD)의 저장용량은 선형밀도와 트랙밀도에 의해서 결정되는데 선형밀도는 슬라이더와 디스크 사이의 간격의 영향을 받으며, 트랙밀도는 슬라이더의 위치 제어 정밀도에 의해 결정된다. 슬라이더와 디스크 사이의 간격이 작아질수록 선형밀도는 높아진다. 컴퓨터의 저장용량과 처리속도의 향상을 가져오기 위해서는 당연히 슬라이더와 디스크 사이의 간격의 좁아질 수밖에 없다. 선형밀도의 극대화로 인한 슬라이더-디스크간의 간격축소로 인해 잦은 접촉과 마모의 문제가 중요하게 대두되었다<sup>(1)</sup>. 슬라이더-디스크간의 접촉으로 인한 HDD의 손상과 그로 인한 정보의 손실, 그리고 손상이 없더라도 잦은 접촉으로 인한 슬라이더의 마모는 사용수명의 단축을 가져오기 때문이다. 특히 접촉은 슬라이더가 Loading/Unloading 될 때 많이 발생된다.

슬라이더의 Loading과 Unloading에는 여러 가지 방식이 있는데 과거에는 간단한 mechanism의 이점 때문에

Contact-Start-Stop(CSS)방식을 선호했지만, 컴퓨터의 대용량화, 고속화가 향상되면서 접촉과 같은 결점이 드러났다. 이 기술은 슬라이더가 정지상태에 있는 경우 내주(ID)의 landing zone에 놓여 있다가 디스크가 구동이 되면 디스크 회전에 의한 air film의 생성으로 슬라이더가 부상하게 되는 방식인데 직접 슬라이더의 표면 위에서 슬라이더가 부상/착지되기 때문에 앞에서 언급한 슬라이더-디스크간의 접촉과 마모가 자주 발생하게 된다. CSS방식 이외에 Load/Unload(L/UL)방식이 있는데, L/UL방식은 슬라이더가 정지시에는 슬라이더를 지지하고 있는 서스펜션이 디스크 둘레에 있는 Ramp로 이동해 착지되었다가 디스크가 구동되면 Actuator에 의해 디스크의 외주(OD)로 이동해 디스크 위로 착지된다. 이 때 이미 디스크의 회전에 의한 air film이 형성되어 착지하면서 슬라이더가 부상상태에 있게 된다. L/UL방식은 CSS방식과 비교해 areal density가 크고, 충격에 대해 강인한 특성이 있으며, 동력소모도 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다<sup>(1,2,3)</sup>.

본 연구에서는 ramp L/UL방식에서 광헤드(슬라이더)가 디스크에 loading될 때 광헤드의 동특성에 영향을 주는 몇 가지 대표적 변수들(loading force의 크기, 슬라이더 레일의 폭, loading 속도)에 대한 loading과정의 변화를 해석하였다.

\* 한국기술교육대학교 기계공학부 대학원

\*\* 한국기술교육대학교 기계공학부

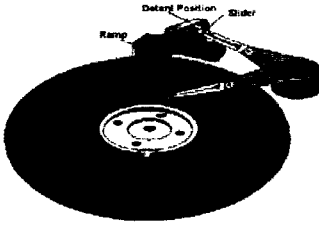


Fig. 1 Ramp L/UL mechanism(IBM)

## 2. 이론

### 2.1 수학적 모델

본 연구에서 사용된 슬라이더의 모델은 Fig.1과 같다. 슬라이더는 two-rail slider이며, 슬라이더의 수직방향 변위와 y축 회전(pitch angle)방향을 고려한 2자유도계로 가정하였다. Fig. 2는 이 슬라이더의 모델이다.  $L$ ,  $W$ 는 슬라이더의 전체길이와 폭이고,  $B$ 는 슬라이더 레일 하나의 폭이다.

$k_z$ ,  $k_\theta$ ,  $c_z$ ,  $c_\theta$ 는 서스펜션의 z 방향,  $\theta$ 방향의 강성 계수와 감쇠계수이다.  $Z$ 는 무게중심에서의 수직방향의 변위이며,  $Z_D$ 는 디스크 표면의 높이,  $h$ 는 최소 flying height이다.  $U$ 는 disk의 선속도이고,  $x_{TP}$ ,  $\theta_{TP}$ 는 각각 테이퍼의 길이, 테이퍼 각을 나타낸다.  $x_G$ ,  $x_S$ 는 각각 슬라이더의 앞에서부터 무게중심, 서스펜션 지지점까지의 길이이며,  $x_{GS}$ 는 무게중심과 서스펜션 지지점의 길이를 나타낸다.

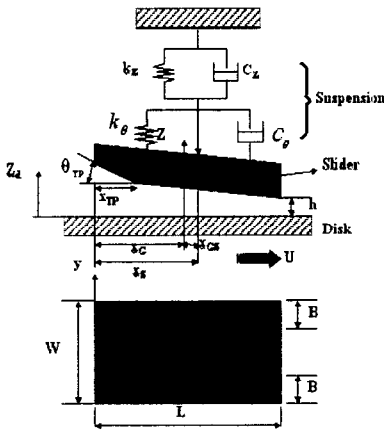


Fig. 2 광헤드 슬라이더 모델

위 모델에 대한 슬라이더의 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다<sup>(3,4)</sup>.

$$M_z Z'' + F_s = 2 \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 (P-1) dXdY \quad (1)$$

$$I_\theta \theta'' + M_s - F_s X_{GS} = 2 \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 (P-1) (X_{GS} - X) dXdY \quad (2)$$

여기서:

$$F_s = F_0 + K_z(Z - X_{GS}\theta) + C_z(\dot{Z} - X_{GS}\dot{\theta}) \quad (3)$$

$$M_s = M_0 + K_\theta\theta + C_\theta\dot{\theta} \quad (4)$$

$M_z$ ,  $I_\theta$  : 슬라이더의 질량, 관성 모멘트

$Z$ ,  $\theta$  : 슬라이더의 수직방향, Pitch 방향 변위

$P$  : 압력

$F_0$ ,  $M_0$  : 서스펜션의 preload, 초기 moment

$X_{GS}$  : 무게중심과 서스펜션 지지점간의 거리.

Air bearing에서의 Reynolds 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( Q \frac{\partial P}{\partial X} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left( Q \frac{\partial P}{\partial Y} \right) - A \frac{\partial}{\partial X} (PH) - \sigma \frac{\partial}{\partial T} (PH) = 0 \quad (5)$$

여기서 :

$$Q(P, H) = \phi(P, H) P H^3 \quad (6)$$

$$\phi(P, H) = a_0 + a_1 \left( \frac{Kn}{PH} \right) + a_2 \left( \frac{Kn}{PH} \right)^2 + a_3 \left( \frac{Kn}{PH} \right)^3 \quad (7)$$

$$P(0, Y, T) = P(1, Y, T) = P(X, \frac{1}{2}, T) = P(X, -\frac{1}{2}, T) = 1 \quad (8)$$

$R$  : 슬라이더 레일폭에 대한 길이의 비 (=  $L/B$ )

$H$  : 슬라이더와 디스크간의 spacing

$A$  : bearing number

$\sigma$  : squeeze number

$Kn$  : Knudsen number

슬라이더와 디스크의 간극이 아주 작게 되면, 슬라이더 아래쪽의 공기의 유동에 대해 공기의 평균분자운동 거리(mean free path)를 무시할 수 없게 된다. 이 때는 연속체 가정에서 출발한 레이놀즈 방정식 중 포아제(Poiseuille) 유동량에 해당하는 Poiseuille flow factor  $\phi(P, H)$ 는 고체 경계 면에서의 유동조건(no-slip condition)을 사용할 수 없기

때문에 기체의 입자성에 기인하는 불연속 유체로서의 특성이 나타나게 된다<sup>(4)</sup>. 따라서 비연속성 효과를 고려하기 위해 슬립 조건(slip condition)을 적용하여 선형화 된 Boltzmann 방정식을 이용하여 flow factor를 결정하였다. 이를 근거로 슬라이더의 진동이 steady 상태에서의 간극  $H_0$  에 비해 작다고 가정하면, 동적 조건에서의 간극  $H$ , 압력  $P$ , 수직방향 변위  $Z$ , 회전각 변위  $\theta$ 는 다음과 같다<sup>(5,6)</sup>.

$$H(X, T) = H_0(X) + \Delta H(X, T) \quad (9)$$

$$P(X, Y, T) = P_0(X, Y) + \Delta P(X, Y, T) \quad (10)$$

$$Z(T) = Z_0 + \Delta Z(T) \quad (11)$$

$$\theta(T) = \theta_0 + \Delta\theta(T) \quad (12)$$

여기서,  $H_0$ ,  $P_0$ ,  $Z_0$ ,  $\theta_0$  는 각각 spacing, 압력, 수직 변위, pitch 변위의 초기 값이며 (9)-(12)식을 (1)-(8)식에 대입하고, 제곱 이상의 항을 무시하면 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$F_0 + K_Z(Z_0 + X_{CS} \theta_0) = 2 \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 (P_0 - 1) dXdY \quad (13)$$

$$M_0 + K_\theta \theta_0 [F_0 + K_Z(Z_0 + X_{CS} \theta_0)] X_{CS} = 2 \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 (P_0 - 1)(X_C - X) dXdY \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( Q_0 \frac{\partial P_0}{\partial X} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left( Q_0 \frac{\partial P_0}{\partial Y} \right) - A \frac{\partial}{\partial X} (P_0 H_0) = 0 \quad (15)$$

$$P_0(0, Y) = P_0(1, Y) = P_0(X, \frac{1}{2}) = P_0(X, -\frac{1}{2}) = 1 \quad (16)$$

$$M_Z \Delta Z'' + C_Z \Delta Z' + K_Z \Delta Z = 2 \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 \Delta P dXdY \quad (17)$$

$$I_\theta \Delta \theta'' + C_\theta \Delta \theta' + K_\theta \Delta \theta = 2 \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 \Delta P (X_C - X) dXdY \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X} \left[ Q_0 \frac{\partial \Delta P}{\partial X} + \left( \left( \frac{\partial Q}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left( \frac{\partial Q}{\partial H} \right)_0 \Delta H \right) \frac{\partial P_0}{\partial X} \right] + \\ & R^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left[ Q_0 \frac{\partial P_0}{\partial Y} + \left( \left( \frac{\partial Q}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left( \frac{\partial Q}{\partial H} \right)_0 \Delta H \right) \frac{\partial P_0}{\partial Y} \right] \\ & - A \frac{\partial}{\partial X} [(P_0 \Delta H + \Delta P H_0)] \\ & - \sigma \frac{\partial}{\partial T} [(P_0 \Delta H + \Delta P H_0)] = 0 \quad (19) \end{aligned}$$

$$\Delta P(0, Y, T) = \Delta P(1, Y, T) = \Delta P(X, \frac{1}{2}, T) = \Delta P(X, -\frac{1}{2}, T) = 0 \quad (20)$$

(13)-(16)의 방정식과 (17)-(20)의 dynamic 방정식은 flyin head(slidebar)의 동적 특성의 수치해석에 이용된다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 해석 프로그램의 구성

본 연구에서 사용된 해석프로그램은 공기베어링에 대한 Reynolds 방정식과 서스펜션 및 광헤드의 운동방정식을 해석함으로써 loading과정의 동적거동을 계산하였다. Reynolds 방정식으로부터 air bearing의 압력분포를 계산하고, 압력분포에 의한 압력장을 적분해 resultant force를 계산한 후 이 값을 입력값으로 하여 슬라이더의 운동방정식을 4차 Runge\_Kutta 알고리즘을 이용해 계산하여9 슬라이더의 위치를 예측하였다. Reynolds방정식으로부터 현재의 위치에 대한 resultant force가 다시 계산되고, 4차 Runge\_Kutta 알고리즘을 이용해 운동방정식으로부터 다음 시간에서의 위치를 반복적으로 계산하여 동적 거동을 예측하였다.

#### 3.2 Air bearing 시뮬레이션

디스크의 회전으로 인한 슬라이더와 디스크사이의 Air bearing의 simulation 프로그램은 Reynolds 방정식을 해석하는 solver로 처음 슬라이더의 형상과 최소높이가 입력되면 steady state의 압력장을 해석해 압력장으로부터 resultant force를 계산한다. 형상 변수값과 최소높이는 입력 파일에 의해서 프로그램에 입력된다. 형상에 대한 입력이 끝나면 슬라이더 모델을 x축과 y축으로 이산화 한다. 이산화 과정에서 형상에 따라 메쉬(mesh)의 크기는 달라지는데, 테이퍼가 있을 경우 슬라이더의 입구에서부터 테이퍼까지 메쉬(mesh)의 크기가 감소하며, 테이퍼가 끝나게 되면 다시 메쉬의 크기가 커지게 된다. 이산화 과정이 끝나게 되면 steady 상태에서 Reynolds 방정식을 해석하여 압력장을 계산한다. 이 때 Reynolds 방정식은 J. White's factored implicit 유한차분 알고리즘<sup>(3)</sup>을 사용해 해석하였고 압력장이 계산되면 압력장을 슬라이더 면적에 대해 적분하여 resultant force와 moment가 계산된다.

#### 3.3 서스펜션과 광헤드의 운동해석

Suspension과 광헤드(slidebar)의 동특성을 해석하기 위한 프로그램의 흐름도는 Fig.3과 같다. 수치해석 프로그램은 Reynolds 방정식 해석과 슬라이더의 운동방정식을 위한 두

개의 solver를 가지고 있다. 정상상태의 air bearing 프로그램으로부터 얻은 air bearing의 resultant force 및 슬라이더의 형상에 대한 값과 dynamic 해석을 위해 필요한 변수들의 초기 값이 입력되면 최초 air bearing의 resultant force에 대해서 Runge-Kutta를 이용해 운동방정식의 미분방정식을 적분하고, 압력장에 대한 슬라이더의 위치를 예측한다. 슬라이더의 위치예측이 끝나면 예측한 위치에 대해서 Reynolds 방정식으로부터 air bearing의 압력장을 다시 계산한다. 이때 Reynolds 방정식은 유한 차분법에 의해 해석되며, 포아제 유동계수(Poiseuille flow factor)는 볼츠만 방정식을 이용했다. 압력장을 슬라이더의 면적에 대해 적분함으로써 예측한 위치에 대한 resultant force를 계산한다. Resultant force로부터 다시 새로운 슬라이더의 위치를 예측하게 된다. 새로운 위치에서 슬라이더가 디스크와 충돌하는지의 여부를 파악하고 충돌하게 되면 프로그램은 종료되고 충돌이 일어나지 않으면 헤드에서의 resultant force와 슬라이더 위치의 반복 계산이 수행된다.

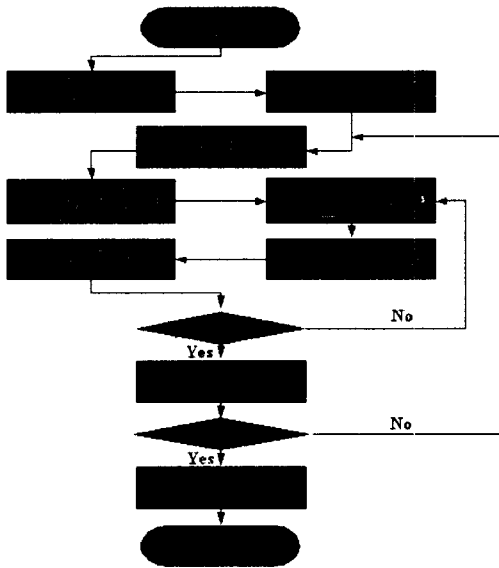
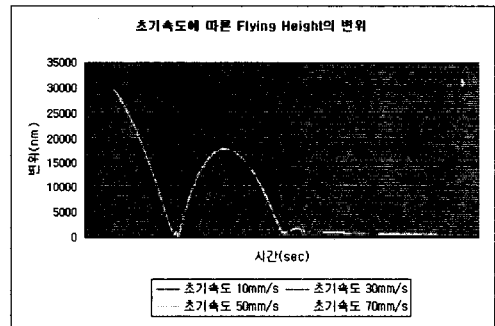


Fig. 3 Flowchart of the simulation Program

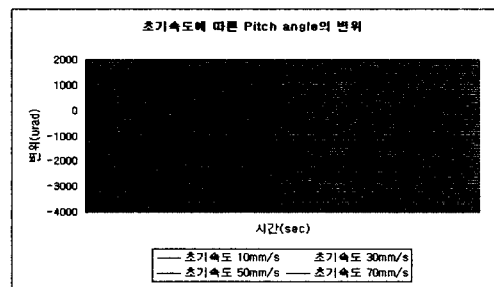
### 3.4 Loading과정의 동적 해석 결과

본 연구에서 2자유도 시스템의 수학적 모델과 해석프로그램을 이용해 슬라이더의 loading dynamic에 대한 여러 변수들의 영향을 해석했는데, 슬라이더의 suspension이 Z방향의 초기속도를 가지고 디스크에 loading될 때 헤드의 동적 거동을 조사하였다. 일반적으로 L/UL process는 수직 변위

에 대해 대략 10-100 mm/s의 속도를 가지기 때문에 100 mm/s 이내에서 초기속도를 변화 시켜 해석을 수행했으며, 슬라이더 레일 폭과 같은 형상이나 preload등의 각 변수들이 loading 과정의 동적거동에 미치는 영향을 해석하였다. 변수는 loading force의 작용 위치( $X_s$ )와 크기( $F_0$ ), 슬라이더 레일의 폭( $B$ ), 슬라이더 레일의 테이퍼 길이( $X_{TP}$ )와 테이퍼 각( $\theta_{TP}$ )이다. Fig. 4는 형상변화는 그대로 두고, 초기속도만을 변화시켰을 때의 광헤드 중심부 수직변위와 pitch angle의 변화이다. 초기속도가 증가함에 따라 flying height와 pitch angle의 진폭이 모두 증가하는 것을 볼 수 있는데, 특히 pitch angle은 flying height에서보다 변화가 심한 것을 알 수 있는데 이로부터 슬라이더의 상태가 불안정해지는 것을 예측할 수 있다. 그러나 최종 flying height나 pitch angle에는 거의 영향을 미치지 못하고 있는데, 이것은 슬라이더의 형상변화 없이 초기속도만을 변화시켰기 때문이다. 초기속도에 대한 각 변수들의 두드러진 경향을 보기 위해 초기 속도가 20mm/s일 때 각 변수들에 대해서 해석을 수행하였고, 해석결과는 Fig.5와 Fig.6에서 보여주고 있다.



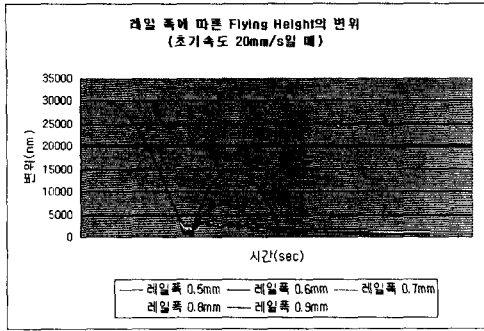
(a)



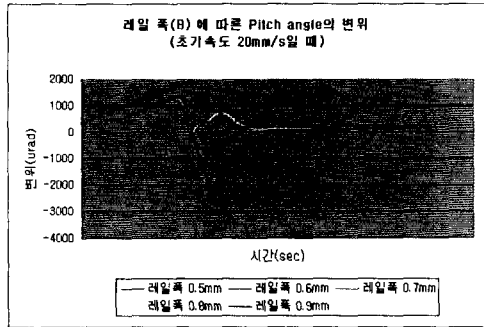
(b)

Fig. 4 Loading속도 변화에 따른 loading과정 변화, (a)

수직 변위 추이 , (b) Pitch angle 변화



(a)

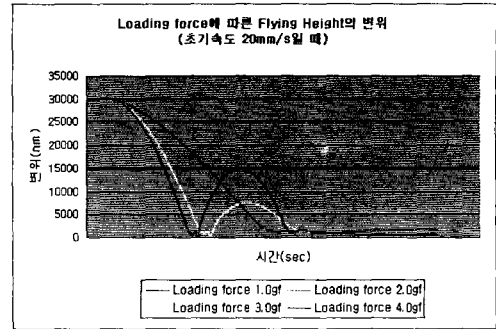


(b)

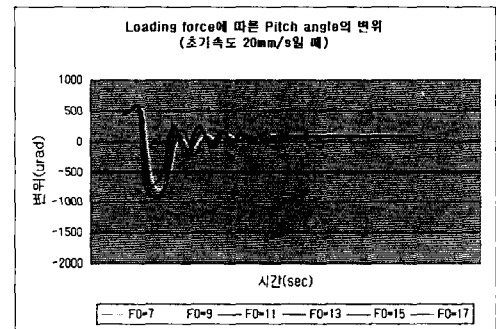
Fig. 5 레일폭 크기에 따른 loading과정 변화, (a) 수직 변위 추이 , (b) Pitch angle 변화

Fig.5는 rail width에 따른 loading 과정을 해석한 결과이다. Rail width의 증가에 따라 진폭이 flying height와 pitch angle에서 모두 많이 감소하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 슬라이더가 빠르게 안정상태로 된다는 것을 추측할 수 있다. 또한 rail width의 증가에 따라 최종 flying height와 pitch angle의 변화가 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 flying height가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig.6는 preload force에 따른 해석결과인데 flying height와 pitch angle의 진폭이 있어서 preload force가 증가할수록 모두 증가하는 것을 볼 수 있으며, flying height와 pitch angle의 최종 값은 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 preload가 감소하면 loading과정이 부드러워 지기는 하지만 광헤드가 안정화될 때까지의 시간이 길어져 seek time이 증가하므로 적절한 최적값을 선정하는 것이 필요하다.



(a)



(b)

Fig. 6 Preload force 크기에 따른 loading과정 변화, (a) 수직 변위 추이 , (b) Pitch angle 변화

#### 4. 결론

본 연구에서는 근거리장 기록방식에서의 광헤드가 ramp loading과정에서 나타내는 동적 거동특성을 공기베어링을 고려한 수치해석을 이용하여 조사하였다. Loading 동특성에서 서스펜션의 질량과 스프링 상수가 미치는 영향은 일반적으로 매우 크며 이것과 관련한 preload의 영향은 loading시의 안정성과 매우 밀접한 관계가 있음을 확인하였는데 preload가 클 경우에는 디스크에 충돌의 위험이 있으며 너무 작을 경우는 seek time이 너무 길어지는 단점이 있으므로 적절한 최적값이 설계가 필요함을 알 수 있었다. 또한 loading속도에 대한 loading과정의 변화도 여러가지 loading 속도에 대하여 해석되었는데 이 역시 서스펜션의 동특성과 더불어 부드럽고 안정된 loading 과정에 중요한 변수임을 확인하였으며 이 결과들을 토대로 본 연구에서 개발된 loading해석 프로그램이 근거리장 광헤드의 loading 동특성을 최적화하는데 효과적으로 이용될 수 있으리라 기대된다.

## 후 기

본 연구과제는 한국과학재단 목적기초 연구(과제번호 1999-1-304-007-3)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Hiromu Hashimoto, Yasuhisa Hattori, 2000, "Improvement of the Static and Dynamic Characteristics of Magnetic Head Sliders by Optimum Design", ASME Journal of Tribology, Vol. 122, pp. 280-287.
- [2] 김도완, 임윤철, 2000, "하드디스크 슬라이더의 동적수치 해석", Journal of KS8TLE, Vol. 16, No. 4, pp295-301.
- [3] Q. H. Zeng, D. B. Bogy, 2000, "A Simplified 4-DOF Suspension Model for Dynamic Load/Unload Simulation and Its Application", ASME, Journal of Tribology, Vol. 122, pp274- 279.
- [4] Q. H. Zeng, D. B. Bogy, 1999, " Slider Air Bearing Designs for Load/Unload Applications", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp. 746-751.
- [5] Q. H. Zeng, Mark Chapin and D. B. Bogy, 1999, " Dynamics of the Unload Process for Negative Pressure Sliders ", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp. 916-920.
- [6] T. R. Albrecht, F. Sai, 1999, " Load/Unload Technology for Disk Drives ", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp 857-862.