

## 실제 디스크 표면 데이터에 대한 접촉 슬라이더의 동적 안정성 해석

### Analysis of Dynamic Characteristics of Contact Slider Over Practical Disk Surface

박경수\* · 전정일\*\* · 박영필\*\*\* · 박노철\*\*\*\*

Kyoung-Su Park, Jeong-Il Chun, Young-Pil Park and No-Cheol Park

**Key Words** : Contact slider, initial condition, diversion, practical surface

#### ABSTRACT

The flying height of contact slider is determined by vertical and pitching motions. This paper performed the computer simulation for flying height change of contact slider. It is changed by many parameters, contact stiffness, contact damping, air bearing stiffness ratio and so on. So computer simulation analysis is performed for knowing for what change of these parameters influences in flying height of contact slider. The practical recording zone surface is gotten by using SPM. In recording zone, flying height is simulated for each parameter, the settling time which the flying height of contact slider is lower than 10nm is analyzed over practical disk surface for changing each parameter. Through these results, the contact slider can be analyzed for more accuracy dynamic characteristics.

#### 1. 서론

1997년 이래로 하드디스크의 면 기록밀도는  $700\text{Kb}/\text{in}^2$ 에서 2000년에는  $7\text{Gb}/\text{in}^2$  정도까지 증가하고 있고, 2002년도에는  $60\text{Gb}/\text{in}^2$ 까지 발전할 것으로 예상되고 있다. 이런 면 기록밀도의 증가로 인해서  $100\text{Gb}/\text{in}^2$  이상의 저장용량도 기대되고 있다. 이러한 면 기록밀도의 증가에 지배적인 영향을 주는 것이 미디어와 슬라이더 사이의 간격인 부상높이이다. 현재는 부상 높이가 약 20nm 정도이지만, 앞으로는 더욱 낮은 부상높이를 요구할 것이다. 그러나 현재의 시스템은 이러한 낮은 부상높이를 갖도록 HGA(Head Gimbal Assembly)를 구현하기가 어려운 문제를 가지고 있다. 그래서 제안된 것이 접촉 슬라이더 시스템이다. 디스크의 표면과 거의 접촉을 하면서 저동하는 슬라이더를 구현함으로써 면기

록 밀도의 증가와 더불어 현재 사용중인 HDD에서의 파킹 영역을 기록 영역화 시킬 수 있어서 저장용량의 극대화를 이룩할 수 있는 시스템이다. 가장 이상적인 접촉 슬라이더 시스템에서는 부상 높이는 0이 되어야 하지만, 디스크의 외부 진동이나 디스크 표면의 돌기의 불규칙성 때문에 독특한 동특성을 가지고 있다. 그래서 이러한 접촉 슬라이더의 동특성을 여러 파라미터들의 변화에 대한 해석이 필요하게 되었다. 이러한 해석은 디스크 표면 조도의 모델링에 의해서 여러 각도로 시뮬레이션이 수행되었다. 1995년에 Kyosuke Ono와 Hiroshi Yamamura는 조화 표면을 가지는 모델에 대해서 수직 진동에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.[1] 2001년에는 Kohei Lida와 Kyosuke Ono는 랜덤 표면 모델을 통해 수직과 피칭 진동에 대한 동특성 해석을 수행하였고 각 파라미터들의 변화에 대한 연구도 수행하였다.[2] 그리고 2001년에는 Takahisa Kato와 Souta Watanabe, Hiroshige Matsuoka는 tri-pad 접촉 슬라이더를 가지고 3자유도에 대한 연구를 수행하였고, 미디어와 슬라이더의 접촉에 대한 경우도 4가지 경우를 포함하는 연구를 수행하였다.[3] 그러나 이러한 연구들에서는 실제 표면을 단순화하여 디스크 표면을 정의하였고, 그러한 바탕 위에서 해석을 수행 했기 때문에 실제 시스템이

\* 연세대학교 기계공학과  
E-mail : odi76@cisd.yonsei.ac.kr  
Tel : (02) 2123-4677

\*\* 연세대학교 기계공학과

\*\*\* 연세대학교 기계공학과 정교수

\*\*\*\* 연세대학교 정보저장협동과정 조교수

구현되었을 때 많은 오차를 포함하는 결과를 나올 수도 있을 것이다. 그래서 이 논문에서는 현재 사용중인 HDD 디스크의 실제 표면을 SPM을 이용하여 표면 조도에 대한 정보를 얻고 이렇게 얻은 디스크 표면에 대해서 접촉 슬라이더의 동특성을 분석하였다. 그리고 그러한 동특성들이 여러 조건변수들의 변화에 따라 어떻게 변화하는지를 해석해서 실제 시스템 구현에 중요 변수를 찾아내는 연구를 수행하였다.

## 2. 모델링 및 지배방정식

### 2.1 모델링

이 논문에서는 tri-pad 슬라이더의 수직과 피칭 방향의 운동을 고려해서 2자유도 모델링을 하였다. Fig. 1은 tri-pad 슬라이더로 길이는 1.25mm이고 폭은 1.00mm, 높이는 0.3mm인 피코 슬라이더를 해석에 사용하였다. HGA부분은 수직방향에 대한 강성( $k$ )와 감쇠( $c$ ) 그리고 피칭방향에 대한 강성( $k_\theta$ )와 감쇠( $c_\theta$ )로 모델링하였다. 또한 접촉 슬라이더의 공기 베어링 힘 부분은 앞 부분의 스프링과 뒷부분의 스프링을  $k_f, k_r$ 로 그리고 댐핑을 각각  $c_f, c_r$ 을 가진 것으로 모델링하였다. 슬라이더 끝의 헤드 부분은 미디어와 접촉시 운동방향의 반대 방향으로 발생하는 마찰력을  $\mu F_c$ , 접촉 강성( $k_c$ )과 감쇠( $c_c$ )로 모델링하였다. 슬라이더는 3.5 인치의 디스크에 pad(1)의 위치는 중심으로부터 반지름( $r_1$ )이 23.87mm의 위치하고, pad(2)는 반지름( $r_2$ )이 24.37mm의 위치에서 운동하는 것으로 생각하였다. 접촉 슬라이더에는 정하중( $F$ ), 접촉력( $F_c$ ), 모멘트( $M$ )이 작용하고 있고, 공기 베어링 효과에 의한 힘은  $F_{af}, F_{ar}$ 이 작용하고 있다고 가정하였다. 이들 힘의 평형상태를 기준으로 상태의 변화량에 대한 해석을 수행하였다.

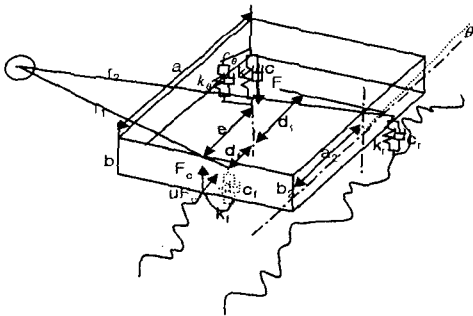


Fig. 1 2DOF tri-pad contact slider model

### 2.2 지배방정식

힘들의 평형상태를 기준으로 상태변화량에 대한 운동방정식을 유도하면, 평형상태에서의 하중은  $F_0$ , 모멘트는  $M_0$ , 공기 베어링에 의한 힘은  $F_{a0}, F_{ar0}$  이고 자세는 슬라이더의 헤드부분이 디스크의 표면과 접촉하고 있고, 즉  $z=0, \theta_0=300\mu\text{rad}$ 인 상태를 기준으로 하였다. 이 상태에서 하중 ( $F_b$ )와 모멘트 ( $M_b$ )가 더해지면 슬라이더는 평형점이  $\delta$ 만큼 밑으로 내려가게 된다. 그 상태를 기준으로 슬라이더의 질량중심의 수직운동에 대한 변위( $z_G$ )와 피칭 방향에 의한 변위( $z_\theta$ )에 대한 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

상태공간 변수는  $U=(z_G, z_\theta)$ 이고,

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f_b + f_a + f_c \quad (1)$$

각 요소에 대한 행렬은 다음과 같다.

관성에 대한 행렬은

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & j \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c + c_f + c_r & ec + d_f c_f - d_r c_r & ec + d_f c_f - d_r c_r \\ ec + d_f c_f - d_r c_r & c_\theta + e^2 c + d_f^2 c_f + d_r^2 c_r \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k + k_f + k_r & ek + d_f k_f - d_r k_r \\ ek + d_f k_f - d_r k_r & k_\theta + e^2 k + d_f^2 k_f + d_r^2 k_r \end{bmatrix}$$

이고, 작용하는 힘에 대한 행렬은 다음과 같다.

$$f_a = \begin{bmatrix} k_f z_{df} + k_r z_{dr} + c_f \dot{z}_{df} + c_r \dot{z}_{dr} \\ d_r k_f z_{df} - d_r k_r z_{dr} + d_f c_f \dot{z}_{df} - d_r c_r \dot{z}_{dr} \end{bmatrix}$$

$$f_c = \begin{bmatrix} F_c \\ -a_2 F_c - b_2 \mu F_c \end{bmatrix}$$

$$f_b = \begin{bmatrix} -F_b \\ -e F_b + M_b \end{bmatrix}$$

여기서,  $z_{df}, z_{dr}$ 는 pad(1)과 pad(2)에서의 디스크 표면의 변위를 나타내는 변수이다.

#### 1) 접촉시

슬라이더에 작용하는 접촉력인  $F_c$ 는

$$F_c = 0$$

## 2) 비접촉시

$$F_c = c_c(\dot{z}_d - \dot{z}_p) + k_c(z_d - z_p) = 0$$

여기서  $z_d$ 는 헤드부분에서의 디스크 표면의 변위를 나타내는 변수이고,  $z_p$ 는 슬라이더 헤드 부분에서의 수직방향의 변위를 나타낸다.

식(1)의 정적 평형 상태는  $\ddot{u} = \dot{u} = 0$ ,  $z_{dr} = z_{df} = 0$ ,  $\dot{z}_{df} = \dot{z}_{dr} = 0$ ,  $z_c = -\delta$ ,  $z_\theta = 0$ 인 상태이고 이를 기준으로 하여 그 섭동량에 대한 방정식을 식 (1)로부터 유도하면,

### - 비접촉시

$$M\ddot{u}^* + C\dot{u}^* + Ku^* = f_a \quad (2)$$

### - 접촉시

$$M\ddot{u}^* + C^*\dot{u}^* + K^*u^* = f_a + f_c^* \quad (3)$$

여기서,  $u^* = \begin{bmatrix} z_c^* \\ \theta^* \end{bmatrix} = u - K^{*-1}f^{-1}$

$$C^* = C + \begin{bmatrix} a_c & -a_2c_c \\ -a_2c_c & a \frac{1}{2}c_c \end{bmatrix}$$

$$K^* = K + \begin{bmatrix} k_c & -a_2k_c \\ -a_2k_c & a \frac{1}{2}k_c \end{bmatrix}$$

$$f^* = \begin{bmatrix} c_c\dot{z}_d & -a_2k_c \\ -a_2c_c\dot{z}_d & a \frac{1}{2}k_c z_d \end{bmatrix}$$

이 된다. 위의 식들에 사용된 변수에 대한 값은 표 1에 나타나 있다. 시뮬레이션을 수행하기 위해서 슬라이더의 초기 조건은  $z_{p0} = 10 \text{ nm}$ 인 상태에서 초기 속도와 가속도는 0인 상태를 출발해서 디스크와 슬라이더가 접촉을 하게 되면 접촉시의 운동방정식을 연산하고, 부상시에는 비접촉시의 지배방정식을 사용하여 운동하는 슬라이더를 1ns의 시간 간격으로 runge-kutta method를 이용한 수치해석을 시뮬레이션을 수행하였다.

table 1. simulation parameter value

$m$	1.59mg	$a_2$	0.625mm
$J$	$2.19 \times 10^{-13} \text{ kgm}^2$	$b_2$	0.15mm
$k$	4.9N/m	$d_f$	0.125mm
$k_\theta$	$1.6 \times 10^{-4} \text{ Nm/rad}$	$d_r$	0.5625mm
$\zeta$	0.002	$e$	0
$\zeta_\theta$	0.002	$F$	10mN
$\zeta_r$	0.05	$F_{c0}$	0.5mN
$\zeta_f$	0.05	$A$	$\sqrt{2} \text{ nm}$
$a$	1.25mm	RPM	7200
$b$	0.3mm		

## 3. 결과

### 3.1 실제 디스크의 측정

실제 디스크의 표면은 SPM(scanning probe microscope)에 의해서 측정되었다. SPM장비는 디스크와 팁사이의 분자간의 힘을 이용하여 디스크의 표면 조도를 측정한다. 이 측정 장비의 구조와 측정 원리는 Fig. 2, Fig. 3에 나타난 바와 같다. 이 장비를 가지고  $10 \times 10 (\mu\text{m})^2$ 의 기록 영역의 디스크 표면 조도를 측정하였으며, 스캔 주파수는 1Hz로 하였으며, 로드는 10.8mN으로 하였다. 4개의 실제 디스크 표면에 대해서 각각의 평균을 통하여 디스크의 표면 조도에 대한 정보를 얻었다. 그림 4는 이러한 SPM을 이용하여 측정한 디스크의 표면 조도를 보여주고 있다. 이 데이터는 linebyline 에 대한 1차 flatting의 필터링을 수행하였다.

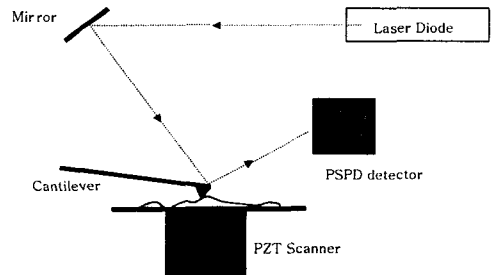


Fig. 2 Structure measuring practical surface

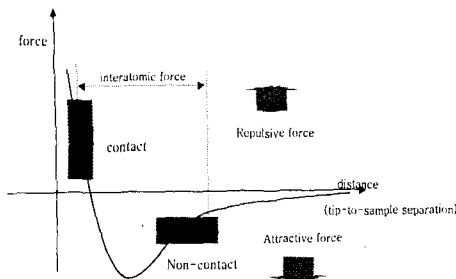


Fig. 3 SPM measuring method and range

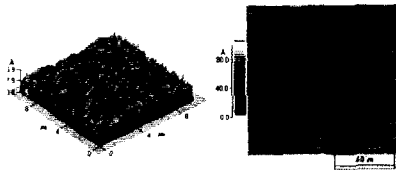
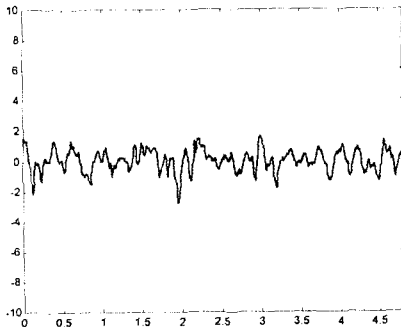


Fig. 4 Practical Disk surface measured by SPM

그림 4에서 보듯이 이들 실제 디스크 조도들은 -4nm와 4nm 사이의 값을 가지고 있으며 그 평균 값은 그림 5에서 보듯이 0.5nm 근방에 많은 값을 가짐을 보여주고 있다. 대체적인 디스크의 조도의 크기가 0.3~1.5사이의 값을 가짐을 알 수 있다.

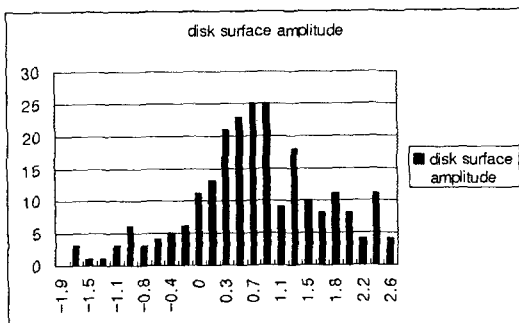


Fig. 5 Distribution for disk surface amplitude

### 3.2 시뮬레이션 결과

앞에서 구한 디스크의 표면에 대해서 접촉 슬라이더의 운동 특성을 알아보았다.  $k_f$ 의 변화에 따른 접촉 슬라이더의 초기조건 수렴 정도를 시간 응답을 통해서 알아보았다. 그림 6에서 보듯이  $k_f$ 값이  $k_f=5 \cdot 10^3 N/m$ 에서  $k_f=5 \cdot 10^4 N/m$ ,  $k_f=5 \cdot 10^5 N/m$ 으로 커짐에 따라서 초기의 부상높이가 빠르게 수렴하고 있음을 알 수 있다.  $k_f=5 \cdot 10^3 N/m$ 인 경우는 수렴 시간이 약 0.5ms인데 반하여  $k_f=5 \cdot 10^5 N/m$ 인 경우에는 약 0.15ms로 빨라진 경향을 보여준다. 이는  $k_f$ 가 작은 값을 가지고 있을 때에는 슬라이더가 접촉하고 부상했을 때 강성이 약하기 때문에 음압력의 영향이 작아져서 천천히 떨어지게 되는 반면에  $k_f$ 가 큰 값을 가지고 있는 경우에는 큰 강성이 빠르게 잡아당기므로 빠른 수렴 속도를 가질 수 있다. 이는 그림 6에 보는 바와 같이  $k_f=5 \cdot 10^3 N/m$ 인 경우에는 한번의 진동주기가 약 0.1ms인데 반해,  $k_f=5 \cdot 10^5 N/m$ 인 경우에는 주기가 0.01ms 정도로 빨라진 것을 볼 수 있다.

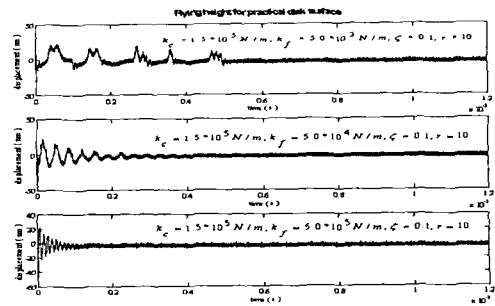


Fig. 6 time response for front air-bearing stiffness

전단부와 후단부의 공기 베어링 강성 비인  $r$ 이 변화할 때는 어떠한 특성을 갖는지에 대한 시뮬레이션도 수행하였다. 그림 7에서 보듯이  $r$ 이 10에서 0.1, 0.01로 작아짐에 따라서 특이한 시간 응답을 보여줌을 알 수 있다.  $r$ 이 10인 경우는 초기조건 수렴 시간은 길게 반해 부상 높이는 억제되어 운동을 하는 것을 알 수 있고  $r$ 이 0.1인 값을 가질 경우는 처음 한번은 크게 진동을 하고 곧바로 수렴을 하고 있음을 알 수 있다. 부상 높이가 강성비에 대한 특성은 수렴성 측면에서는 약 0.1정도의 값이 좋아 보이나 접촉 슬라이더 시스템 측면에서는 100nm 이상의 부상특성을 보여주기 때문에 다시 디스크와의 접촉시에 큰 손상을 입힐 가능성이 있고 안정성 측

면에서는 불안한 모습을 보여준다.

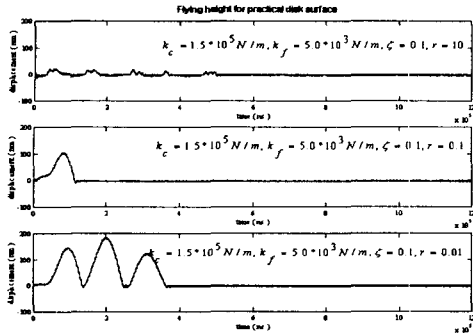


Fig. 7 time response for air-bearing stiffness ratio

$k_c$ 인 접촉 강성이 커짐에 따라서는 어떠한 운동 안정성을 보이는지에 대해서 알아보았다. 그림 8은 접촉강성이 커짐에 따른 접촉 슬라이더의 시간 응답을 보여준다. 그림에서 보듯이 접촉 강성이 큰 값을 가질 경우에는 디스크는 초기조건을 빠르게 수렴하고 있음을 알 수 있다. 그런데 접촉강성이 크면 10nm의 수렴속도는 빠른 반면 계속적인 요동으로 거동중에 불안정성을 가짐을 알 수 있다. 이는 접촉강성이 커짐은 곧 반발력의 증가를 보여주고 이는 접촉시에 빠른 진동주기를 보여줌으로써 초기 수렴 속도에는 좋은 측면이 있을 수 있으나, 거동중에 부상의 안정성을 신뢰할 수 없는 모습을 보여주고 있다.

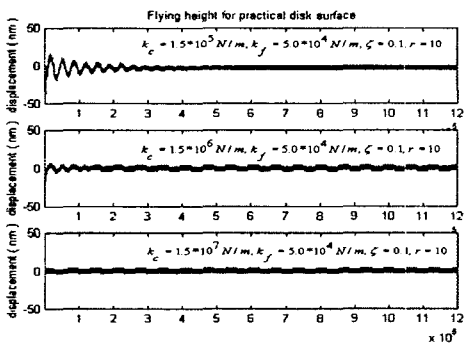


Fig. 8 time response for contact stiffness

접촉 댐핑의 값을 변화시키면서 특성을 살펴보았다. 이것은 디스크와 헤드사이의 마찰문제에 민감한 변수이므로 이것의 값에 대한 동특성 파악은 중요한 문제이다.  $\zeta$ 의 값이 작은 경우에는 힘의 크기 값이 감쇠작용을 적게 받아 느리게 수렴하는 특성을 보여

주고 있으며, 반대의 경우에는 감쇠력이 크므로 빠른 수렴성을 보여주고 있다.

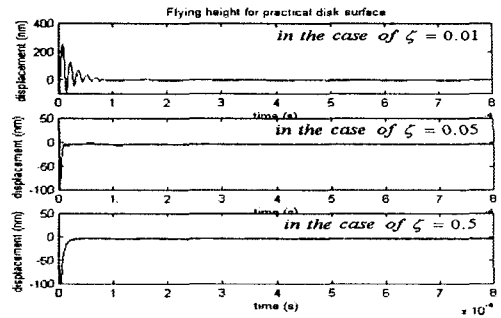


Fig. 10 time response for contact damping

접촉 슬라이더의 기하학적 중심과 후단부 공기 베어링 강성력을 받는 위치까지의 거리를  $d_r$ 이라 정의한다. 이 변수는 힘의 평행측면에서 중요한 변수이므로 이에 대한 실제 디스크 표면 조도 위에서의 초기 수렴속도에 대한 경우를 살펴보았다. 슬라이더의 헤드부분에 노드 점이 있는 관계로 힘은 노드 점 근처에 작용하는 것이 안정성 측면에서는 큰 역할을 보여주고 있다. 수렴속도에 대해서는 그림 9에 보는 바와 같이  $d_r$ 의 값이 후단부의 헤드부분에 가까운 값을 가질수록 빠른 수렴 속도를 나타내는 경향을 보여주고 있다. 헤드 끝단까지의 거리가 0.625mm이므로 이에 가까운 0.6mm인 경우에 0.5ms정도의 수렴 속도로 빠르게 안정된 모습을 찾아감을 보여주고 있다.

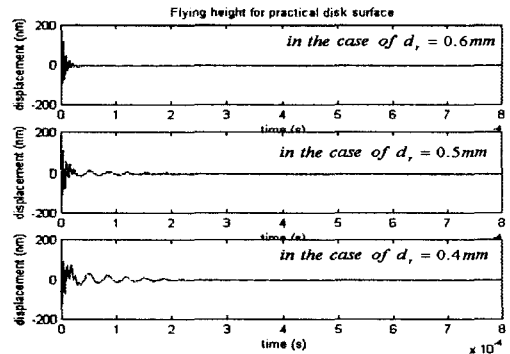


Fig. 9 time response for  $d_r$

#### 4. 결론

이상에서 본 바와 같이 실제 디스크의 표면조도에 대한 데이터를 통해 실제 디스크의 표면과 가장 유사한 표면을 구현하였고, 이 디스크 위에서 구동하는 접촉 슬라이더의 동특성에 대한 초기 부상 수렴성과 부상 안정성에 대해서 알아보았다. 빠른 초기 수렴성을 위해서는 접촉 슬라이더 시스템은 큰  $k_f$ 의 값을 가져야 하며, 이와 더불어 큰 접촉강성과 댐핑을 가져야 함을 알 수 있었다. 또한 헤드 부분의 공기 베어링 강성력을 받는 부분은 노드 점에 가까운 값을 가질수록 빠른 수렴성을 보여줌을 알 수 있었다. 그러나 접촉 슬라이더 시스템의 구현이라는 목적에서는 수렴성 뿐만 아니라 부상 안정성에도 중요한 목표가 있으므로, 부상 안정성이 접촉강성의 값은 어느 정도 작은 값을 갖는 것이 중요하며, 또한 전,후단부의 공기 베어링 강성비의 값은 큰 값을 갖음으로써 전단부와 후단부의 힘의 평형일때 헤드 부분이 10nm 이하의 부상 높이를 유지하도록 하는 것 또한 중요한 목표이다.

#### 후 기

본 연구는 과학재단 지정 정보저장기기 연구센터의 지원 (2000G0101)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kyosuke Ono, Hiroshi Yamamura and Takaki Mizokoshi, 1995, " Computer analysis of the dynamic behavior and tracking characteristics of a single-degree of freedom slider model for a contact recording head", ASME, journal of tribology, Vol. 117, pp 124~129
- (2) Kyosuke Ono, Kohei Iida, 2001, " Analysis of bouncing vibrations of 2-DOF model of tri-pad contact slider over a random wavy disk surface", ASME, journal of tribology, Vol. 123, pp. 159~167
- (3) Takahisa Kato and Souta Watanabe, Hiroshige Matsuoka, 2001, " Dynamic characteristics of an in-contact head slider considering meniscus for : part 2-application to the disk with random undulation and design conditions", ASME, journal of tribology, Vol.123,

pp. 168~174

(4) A. Majumdar, B. Bhushan, 1991, " Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces", ASME, journal of tribology, Vol. 113, pp. 1~11

(5) Bgarat Bhushan, 1996, " methodology for roughness measurement and contact analysis for optimization of interface roughness", IEEE, transactions on magnetics, Vol. 32, pp. 1819~1825