

# 충돌을 고려한 Dynamic L/UL 슬라이더의 동적 거동 해석

## Analysis of Slider Dynamics in Loading Process considering Collision

김범준\*, 임윤철†.  
Bum-Joon Kim\* and Yoon-Chul Rhim†

### Abstract

Dynamic L/UL(Load/Unload) system has many merits, but it may happen an undesirable collision during the dynamic loading process. In this paper, the dynamics of negative pressure pico-slider was investigated through numerical simulation during the loading process. A simplified L/UL model for the suspension system has been presented and a simulation code has been developed to analyze the motion of the slider. A slider design has been simulated at various disk rotating speeds, skew angles of slider. We can decrease the possibility of collision and smoothen the loading process for a given slider-suspension design by selection an optimal rpm and pre-skew angle.

**Key Words :** collision, dynamic L/UL, numerical simulation, rotating speed, skew angle

### 기호설명

m	슬라이더의 질량
$I_p$	슬라이더의 질량관성 모멘트(Pitch)
$I_r$	슬라이더의 질량관성 모멘트(Roll)
$C_z$	Load Beam의 댐핑 계수
$C_p$	Flexure의 댐핑 계수(Pitch)
$C_r$	Flexure의 댐핑 계수(Roll)
$K_z$	Load Beam의 강성 계수
$K_p$	Flexure의 강성 계수(Pitch)
$K_r$	Flexure의 강성 계수(Roll)
g	중력 가속도
p	Air bearing 압력
$p_a$	대기압력
h	슬라이더와 디스크 사이의 간극
$h_{min}$	슬라이더와 디스크 사이의 최소 간극
Q	유량 계수
$\mu$	공기의 점도
U	디스크의 x 방향 속도
V	디스크의 y 방향 속도
n	충돌면의 법선 벡터
$v_a$	접근 속도
$v_s$	분리 속도
e	반발 계수

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경 및 목적

다이나믹 L/UL 기술은 주로 휴대용 드라이브나 리무버블(Removable)드라이브 등과 같은 소형정보 저장 기기에서 충격에 강건하고 데이터 저장영역을 극대화하기 위하여 적용되어 왔으며 점차 모든 디스크 드라이브에 적용하기 위하여 기술 발전이 지속되고 있다.

L/UL 시스템은 디스크의 공간을 최대한으로 활용하고 정보를 읽고 쓰지 않는 동안에는 디스크 밖으로 슬라이더를 이동시켜 파킹시킴으로써 불필요한 동력 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 Loading/ Unloading 시에 슬라이더가 회전하고 있는 디스크 면과 충돌하여 고착(Stiction)을 유발하거나 파티클을 발생시켜 시스템 내부를 오염시키고 때로는 고장의 원인이 되기도 한다.

이에 따른 L/UL 용 슬라이더의 설계 목적은 로딩시의 충돌을 고려하고 디스크에 손상을 입히지 않는 범위에서 짧은 시간 안에 슬라이더에 요구되는 FH(Flying height)에 도달하도록 안정된 시스템을 구축하는 것이다. L/UL 시스템에는 많은 파라미터들이 성능에 영향을 미치는데 L/UL 시 슬라이더를 유도하는 Ramp의 형상과 ABS의 형상, 회전수, 로딩 속도, 슬라이더에 가해지는 댐핑 로드

† 연세대학교 기계공학과  
E-mail : rhimyc@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-2820

\* LG 전자 DA 사업부  
논문접수일 (2006년 5월 1일)

등이 해당된다. 본 논문에서는 자체 제작한 ABS Simulation Code 를 이용하여 다이내믹 L/UL 시스템의 성능을 예측하고 로딩시 발생할 수 있는 충돌의 가능성을 낮추기 위한 방안을 제시하고자 한다.

1.2 관련 연구 동향

Jeong, Bogy(1)는 Slider-Disk contact 을 피하기 위한 조건을 찾기 위해 실험을 통해 L/UL system 을 연구하였고, Ponnaganti, Kane(2)은 슬라이더의 6 자유도 해석을 통해 Collision 영역에서의 Slip Contact 와 No-Slip Contact 거동을 예측하였다.

Yamada, Bogy(3)는 서스펜션의 중앙부분을 들어 올리는 Horizontal Bar 를 이용하여 L/UL Mechanism 을 규명하였다.

2. 수치 해석

2.1 L/UL 시스템의 개요

본 연구에 사용된 Simulation model 은 Fig. 1 과 같다. CSS(Contact-Start-Stop) 타입과 달리 Ramp L/UL 는 비작동시 슬라이더가 디스크의 외부의 Detent Position 에 고정되어 있다가 기기 작동시 디스크가 회전하면서 VCM의 회전에 의해 슬라이더가 Ramp 를 따라 디스크에 도달하게 된다.

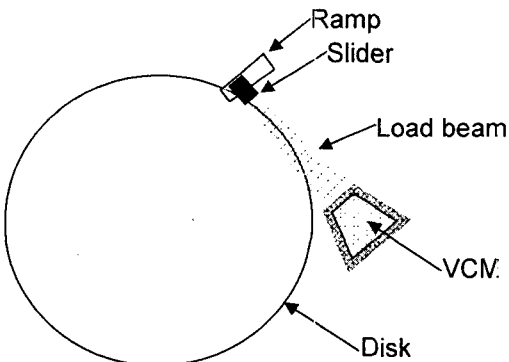


Fig. 1 Assembly of Dynamic Ramp L/UL System

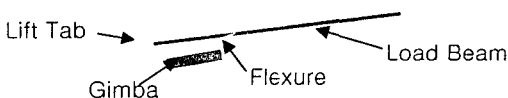


Fig. 2 Simplified suspension model

이러한 과정을 시뮬레이션 하기 위해서 모델을 단순화 할 필요가 있다. Figure 2 는 단순화 된 슬라이더와 서스펜션을 나타낸다. 슬라이더는 Gimbal 및 Flexure 에 의해 Pitch, Roll 거동이 구속되며, Load beam 에 의해 중력방향으로의 Pre-Load 를 받는다.

2.2 지배 방정식

서스펜션의 지배방정식은 다음과 같다. 이때 식 (1)은 Load beam 의 영향을 받고, 식 (2), (3)은 Flexure 에 의해 구속된다.

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

$$I_p \frac{d^2\theta_p}{dt^2} + c_p \frac{d\theta_p}{dt} + k_p \theta_p + M_p = \iint_A (p - p_a) x dA \quad (2)$$

$$I_r \frac{d^2\theta_r}{dt^2} + c_r \frac{d\theta_r}{dt} + k_r \theta_r + M_r = \iint_A (p - p_a) y dA \quad (3)$$

슬라이더에 가해지는 pre-load 는 서스펜션의 평형상태에서의 높이와 Loading 시의 초기 높이와의 차에 의해 결정된다.

슬라이더가 램프를 따라 Loading 이 되면서 슬라이더의 밑면에서 Air bearing 효과에 의해 압력이 상승되어 슬라이더를 떠받치는 힘이 작용하게 된다. 이는 수정 레이놀즈 식을 적용하여 구할 수 있다.

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

이를 무차원화 하면

$$\frac{\partial}{\partial \Lambda} \left( \rho H^3 Q \frac{\partial p'}{\partial \Lambda} \right) + \lambda^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left( \rho H^3 Q \frac{\partial p'}{\partial Y} \right) = \Lambda, \frac{\partial p'}{\partial \Lambda} + \Lambda, \frac{\partial p'}{\partial Y} + \sigma \frac{\partial p'}{\partial T} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 위 식에서  $\Lambda$ 와  $\sigma$ 는 각각 베어링 넘버와 스퀴즈넘버를 뜻한다.

식 (5)는 세 부분으로 나누어 해석할 필요가 있다. 첫째, 식의 좌변에 있는 Flow factor 는 슬라이더 디스크 사이의 간극이 마이크로단위 이하로 내려가면서 공기의 평균자유행정과 간극이 비슷한 크기의 값을 갖게 되며 이때 No-slip condition 을 적용하기 어려워진다. Fukui, Kaneko 는(4,5) 이를 위해 선형화된 볼츠만 식을 이용하여 매우 작은 간극에서도 레이놀즈 식을 사용할 수 있도록 flow

factor(Q)란 개념을 도입하였다. Knudsen number 의 크기에 따라 적절한 슬립 모델을 사용할 수 있다. 또한 Knudsen number 가 0.01 이하로 내려갈 때, 즉 간극이 공기의 평균자유행정보다 매우 클 때 Q 의 값은 1 에 근접하여 No-Slip condition 을 적용하고 Continuum flow 로 해석하게 된다. 세 번째는 수치 해석상 간극이 sub- nanometer 로 작아지면 베어링 넘버는 무한대로 커지게 되어 수렴하기 어려워진다. 이때 슬라이더내의 압력이 유한한 값을 갖기 위해서는  $\frac{\partial PH}{\partial X}$ ,  $\frac{\partial PH}{\partial T}$  가 0 이 되어야 한다. 슬라이

더는 infinite-wide-bearing 으로 가정할 수 있고 Air bearing 에 의한 Load 는 시간과 속도에 관계없이 일정한 값이 된다. 이때  $PH \approx p_a \cdot h_{min}$  과 같다.

또한 곡률반경이 작은 지점에서의 해석 결과에 대한 신뢰도를 높이기 위해 슬라이더 밀면의 디스크 곡률을 적용하여 FEM 해석 시 각각의 Nodal Point 에서의 디스크 속도를 계산하여 각기 다른  $\Lambda_x, \Lambda_y$  를 적용하여 해석을 수행하였다.

L/UL 시스템에서는 슬라이더가 Ramp 를 따라 디스크로 진입할 때의 초기 높이가 정상 상태에 비해 매우 높기 때문에 떨어질 때 Air bearing 에 의한 반력이 작용해도 초기 높이에서 가속된 슬라이더의 하중을 받쳐주지 못하고 디스크와의 충돌이 발생하게 된다. 이때의 충돌된 시간동안의 Impact-Momentum 식을 이용하여  $\Delta t$  후의 슬라이더의 속도를 구할 수 있다. 충돌 후의 속도는 HGA (Head-Gimbal-Assembly) 와 디스크와의 반발 계수 및 정지마찰계수, 운동마찰계수, 그리고 디스크와의 상대속도에 의해 구할 수 있다.

$$n \cdot v_S = -e n \cdot v_A \quad (6)$$

$t_1$  과  $t_2$  사이에서 충돌이 발생되었을 때 임펄스 (Impulse)를 R 이라 하고, K 를 슬라이더의 운동에너지(Kinetic Energy)라 놓으면 Impulse-Momentum 식은 다음과 같다.

$$\left[ \frac{\partial K}{\partial u_r} \right]_{t_2} - \left[ \frac{\partial K}{\partial u_r} \right]_{t_1} = \frac{\partial V}{\partial u_r} \cdot \int_{t_1}^{t_2} R dt \quad (7)$$

이때  $u_r(r=1, \dots, 6)$ 은 6 자유도에 대한 속도를 의미한다. 만일 슬라이더와 디스크면 사이에 Slip 이 일어나지 않았다면  $t_2$ 에서

$$\eta \times (V_s \times \eta) = 0 \quad (8)$$

$$\left| \tau \cdot \int_{t_1}^{t_2} R dt \right| < \mu_s \left| \eta \cdot \int_{t_1}^{t_2} R dt \right| \quad (9)$$

로 나타내어 지며  $\mu_s$  는 정지마찰 계수를 나타내고  $\tau$ 와  $\eta$  는 각각 슬라이더의 접선벡터와 법선 벡터를 나타낸다. 반대로 식 (9)가 성립되지 않았을 때 Slip 이 일어난 것으로 간주하여 식은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\left[ \tau \cdot \int_{t_1}^{t_2} R dt \right] = -\mu_k \left| \eta \cdot \int_{t_1}^{t_2} R dt \right| \cdot \frac{\eta \times (V_s \times \eta)}{|\eta \times (V_s \times \eta)|} \quad (10)$$

$\mu_k$  는 운동마찰 계수를 나타내며 식(6)-(9) 이나 식(6), (7)과 (10)을 연계하여 충돌 후의 속도를 계산할 수 있다. Dynamic 식은 3 자유도를 갖는 해석인데 반해 Impulse-Momentum 식은 6 자유도를 갖는다. 이것은 낙하 과정에서 슬라이더의 거동은 간극방향인 Z 방향과 Pitch, Roll 방향으로의 거동을 제외하고는 다른 방향으로의 모션(Motion)은 무시할 수 있지만, 충돌이 발생하였을 때 비교적 강한 힘이 짧은 시간에 작용하기 때문에 X, Y 방향과 Yaw 방향의 모션이 나머지 세 방향의 모션과 함께 Couple 되어 해석해야 한다. 그러나  $\Delta t$  이후의 슬라이더의 해석에서 Z, Pitch, Roll 방향을 제외한 다른 세 방향의 속도는 0 으로 가정한다.

### 2.3 수치 해석 결과

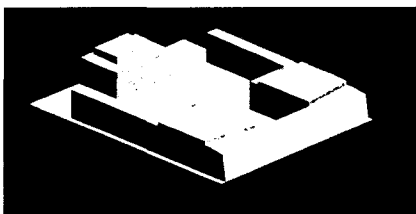
시뮬레이션에서 Pico 슬라이더가 적용되었다. 슬라이더의 특성은 Table 1 과 같다. Figure 3 은 슬라이더의 형상을 나타내는데 슬라이더의 깊이 (Recess)는  $2.5\mu m$ 이며 FH 를 낮추기 위해 음압 슬라이더의 형태가 적용되었다. Leading Edge 에서 상승된 압력이 바로 뒤편의 Recess 에 의해 압력강하가 일어나도록 설계되었고 음압 슬라이더의 장점은 강성과 댐핑 효과가 뛰어나지만, 반대로 Unloading 시에 음압에 의해 슬라이더와 서스펜션이 분리되어 심한 진동을 유발시켜 Contact 을 유발하는 단점을 지니고 있다. 서스펜션의 강성계수 및 Pitch, Roll 의 댐핑 계수는 각각 10N/m, 0.1Ns/m, 0.3Ns/m 로 설정하였다. 또한 실제 L/UL System 에 사용되는 파라미터를 적용하여 계산을 수행하였는데, Ramp profile, 초기 Skew 각도, 초기 높이는 각각  $20^\circ$ ,  $10.27^\circ$ ,  $20\mu m$  이다. 댐플 위치는 Leading Edge 로부터 60% 지점에 위치 하며, 슬라이더와

**Table 1** Characteristics of Pico slider

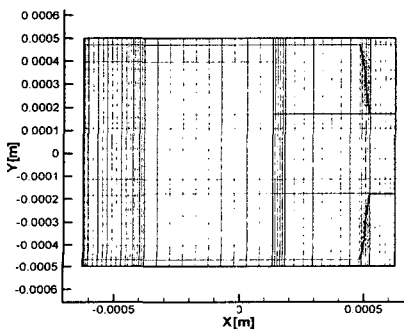
	SIZE (mm)	MAS S (mg)	Pre-load (mN)	Coefficient of restitution
Pico Slider	1.25×1×0.3	3	12.5	0.8

디스크 사이의 정지 마찰력과 운동 마찰력을 각각 0.25, 0.2 로 적용하였다. 수직방향의 초기속도는 램프의 형상과 VCM 의 회전 각속도에 의해 결정된다. 본 연구에서는 VCM 의 회전 각속도를 1rad/s 로 적용하여 수직방향 초기 속도는 38.5mm/s 이다. Figure 4 는 FEM 해석에 적용된 슬라이더의 메쉬 형상을 보여준다. ABS 형상은 비선형 성향을 보이므로 압력구배가 크게 나타날 것으로 예상되는 지점에 요소를 집중 시켜 해석을 수행하였다. 디스크의 Roughness 는 peak-to-valley 12nm 로 설정하였다. 슬라이더의 Loading 위치는 디스크 중심으로부터 30mm 지점이며, skew 는 -10.2°이다.

L/UL System 에서 회전수, Pre-Skew 각도에 따른 거동을 수치 해석을 통해 시뮬레이션을 수행하였다. Figure 5 는 해석을 통해 얻어진 정상상태의 압력분포를 나타낸다. FH(Flying height)는 약 25nm 이며 Pitching angle 과 Rolling angle 은 각각 -40urad, 4.6urad 으로 나타났다. 이때 Air bearing 에 의한 힘은 약 22mN 로 나타났다. 정상상태의 결과를 바탕으로 회전수, Pre-Skew 각도를 달리하여 해석을 수행하였다. 이때 Standard 형의 Pre-skew 각도가 0°일 때 -10.2°의



**Fig. 3** Scheme of the geometry of Pico slider



**Fig. 4** Mesh of negative pressure Pico slider

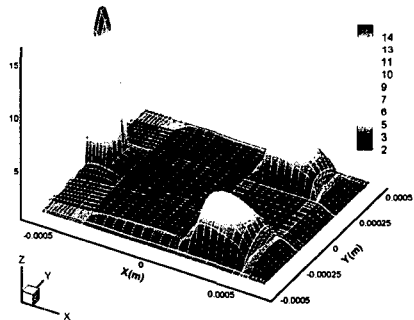
Skew 각을 갖기 때문에 두 번의 해석을 통하여 각각 -10.2°, 0.2°, 10.2°의 Skew 각도변화에 따른 거동을 비교하였다.

Standard Type 은 실제 모델의 파라미터를 적용하여 해석을 수행하였다. Figure 6 은 Standard model 에서의 FH, Load, Pitch, Roll 의 결과를 나타낸다.

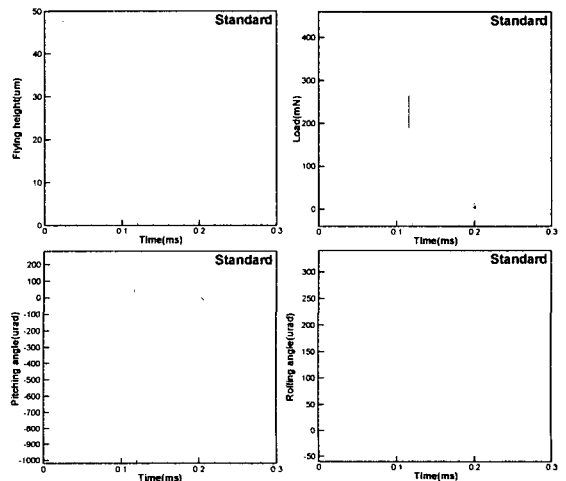
회전속도가 낮을수록 Loading 시에 반발된 높이가 높아지는 것을 볼 수 있는데 이것은 충돌 직전 Air bearing 에 의한 힘이 작은 상태에서 마찰에 의

**Table 2** variables for simulation

	RPM	Pre-Skew(deg.)
Standard	3200	0.0
TEST 1	7200	0.0
TEST 2	3200	10.0
TEST 3	3200	20.0



**Fig. 5** Pressure distribution normalized to ambient



**Fig. 6** Characteristics of Standard model during the loading process

한 힘이 충돌후의 높이를 상승시키는 역할을 하는 것으로 해석할 수 있다.

Skew 각도가 커질수록 반발된 높이의 변화가 크게 달라짐을 볼 수 있다.

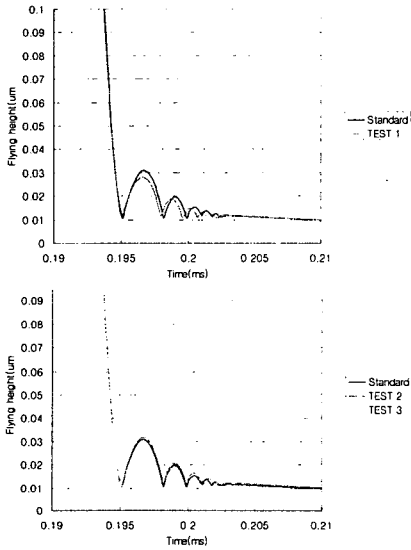


Fig. 7 FH during the loading process for several variables

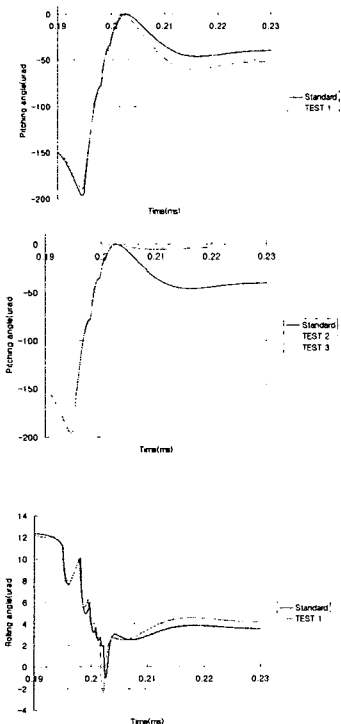


Fig. 8 Pitch and Roll changes during the loading process

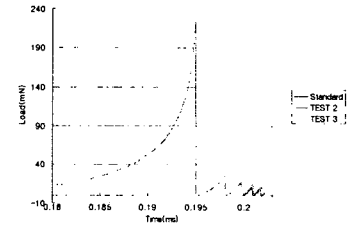
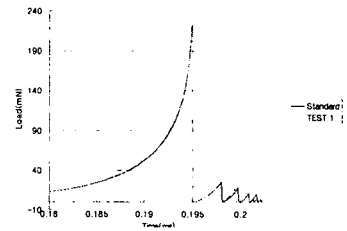
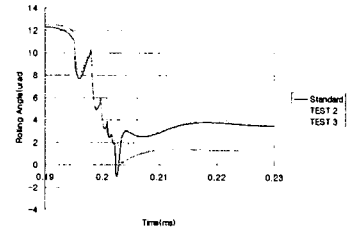


Fig. 9 Load of Air bearing during loading process

Figure 10 에서 y 축의 1~4 의 숫자는 슬라이더의 접촉 위치를 뜻한다. 즉, Leading edge(OD)-1, (ID)-2 와 Tailing edge(OD)-3, (ID)-4 를 가리킨다. 충돌 발생 빈도는 회전속도가 낮을수록 적어지고, Pre-Skew 각도가 20°일 때 발생위치가 늦춰지며 그 빈도가 적어지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 이 때 Leading edge 에서의 충돌이 일어나지 않았다.

### 3. 결론

Loading 시 Pico 슬라이더의 과도 현상을 FEM 을 이용한 시뮬레이션 프로그램을 통해 해석하였다.

본 연구를 통해서 Pico 음압 슬라이더에 대한 정상상태에서의 압력 분포 및 Air bearing 효과에 의한 Load 를 계산하였고 디스크의 회전수, Pre-Skew 각도, Loading 속도에 따른 슬라이더의 거동을 비교하였다.

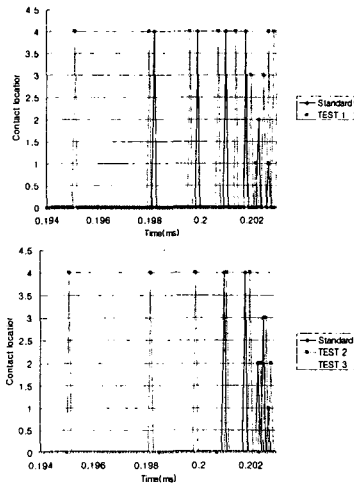


Fig. 10 Collision location

L/UL 시스템에서 사용되는 음압 Pico 슬라이더의 연구를 통해 Loading 시 레이놀즈 식에서의 스쿼즈 효과에 의한 압력 상승이 크더라도 서스펜션의 강성에 의해 충돌을 초래한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 충돌 빈도를 낮추기 위해서는 Loading 시에 회전속도가 낮아져야 한다. 또한 Pre-Skew 각도를 주어 슬라이더가 약 10° 정도의 Skew 각도를 유지할 때 충돌 가능성을 줄일 수 있다. 이때 슬라이더의 Leading edge 부근에서의 충돌을 피함으로써 짧은 시간 내에 정해진 FH 를 찾아가기 위한 압력생성을 유지시킬 수 있다.

## 후 기

본 연구는 연세대학교 정보저장기기연구센터의 지원(Grant No. R11-1997-042-12002-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] T.G. Jeong and D.B. Bogy, 1990, "Slider-Disk Interactions During The Load-Unload Process," IEEE Transactions on Magnetics. Vol.26, No.5, pp. 2490~2492
- [2] V. Ponnaganti, T. R. Kane, and J. W. White, 1987, "Dynamics of Head-Disk Contact/Impact in magnetic recording," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.23, No. 5, pp.3435~3437
- [3] T. Yamada and D.B. Bogy, 1988, "LOAD-UNLOAD SLIDER DYNAMICS IN MAGNETIC DISK

DRIVES," IEEE Transactions on magnetics, Vol.24, No. 6, pp. 2742~2744

- [4] S. Fukui and R. Kaneko, 1990, "A Database for interpolation of Poiseuille Flow Rates for High Knudsen Number Lubrication Problems," ASME Journal of Tribology, Vol.112, pp.78~83
- [5] S. Fukui and R. Kaneko, 1988, "Analysis of Flying Characteristics of Magnetic Heads With Ultra-Thin Spacings Based On The Boltzmann Equation," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.24, No.6, pp. 2751~2753
- [6] Qing-Hua Zeng and David B. Bogy, 2000, "Effects of Certain Design Parameters on Load/Unload Performance," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.36, No.1, pp.140~147
- [7] Kane, Thomas R., 1985, Dynamics : Theory and Applications, McGraw-Hill, pp. 231~241