

## Ramp Loading 피코 슬라이더의 거동 해석

김범준 · 조광표 · 임윤철\*†

연세대학교 대학원 기계공학과, \*연세대학교 기계공학부

### Dynamics of a Pico Slider during the Ramp Loading Process

Bum-Joon Kim, Kwang-Pyo Cho and Yoon-Chul Rhim\*†

Dept. of Mechanical Eng. Graduate School, Yonsei University

\*School of Mechanical Eng. Yonsei University

**Abstract** – Recently, a load/unload(L/UL) system is adopted to the hard disk drive(HDD) due to its advantages such as lower power consumption, larger data zone, simpler fabrication of disk due to no bumped parking zone, and rarer contact between slider and media. An analysis of the transient motion for the slider is very important to design an air bearing surface(ABS) of the slider to secure the stable performance of the system. During the L/UL process, however, there are several issues occurred such as contact or collision between slider and media. Sometimes this will cause the system failure. In this study, the dynamics of a pico slider during the loading process are investigated through numerical simulation using FEM analysis and experiment. Ramp profile and angular velocity of the swing arm actuator are very important parameters for the design of L/UL system to avoid collision between slider and disk.

**Key words** – loading process, air bearing surface, slider dynamics, collision, HDD, FEM.

## 1. 서 론

### 1-1. 연구 배경 및 목적

노트북, PDA 등 휴대용 장비의 사용 증가에 따라 이들 장비에 내장되는 정보저장기기인 HDD의 소형화와 높은 기록밀도화에 관련된 연구가 빠르게 진행되고 있다. HDD의 경우 parking zone을 사용하는 기존의 Contact-Start-Stop(CSS)방식보다 휴대용에 적합한 L/UL방식으로의 대체가 빠르게 진행되고 있으며 현재 pico 슬라이더를 비롯해서 femto 슬라이더에 이르기까지 매우 작은 크기의 슬라이더들에 대하여 이러한 방식이 많이 적용되고 있다[1-3]. CSS 방식과 달리 L/UL은 디스크 외륜 밖에 슬라이더가 파킹되어 있다가 작동 시 슬라이더가 ramp를 따라 디스크 위로 loading되고, 비사용 시 다시 파킹 위치로 되돌아가는 방식으로 landing zone이 불필요하게 되어 디스크의 기록영

역을 극대화 할 수 있다. 이는 노트북 등의 휴대용 기기에 매우 적합한 방법으로서 외부 충격에 강한 장점도 있다. 또한 노트북은 전력소모에 민감한 제품으로서 배터리의 소모량을 최소한으로 줄여야 하므로 HDD를 사용하지 않을 때에는 정지시켜야만 하는데 CSS방식에서는 접촉으로 인해 슬라이더와 디스크의 손상이 발생할 가능성이 높다. 이러한 이유로 노트북과 같은 휴대용 기기에 사용하는 HDD에서는 L/UL의 사용이 증가하게 되었다. 그러나 100~300 μm의 높이에서 loading될 때 슬라이더의 pitching 각이 매우 큰 범위로 변하기 때문에 ABS (air bearing surface)에 의한 유체 동압 효과가 슬라이더의 loading거동에 의한 운동량에 못 미치게 되어 슬라이더와 디스크는 충돌할 가능성이 높아진다. 이러한 충돌이 반복적으로 나타나게 되면 시스템은 불안정해지고 결함을 일으킬 수 있다. 본 연구에서는 실험 및 수치해석을 이용하여 Loading시의 슬라이더의 거동을 알아보고 회전디스크와 슬라이더의 충돌을 예측하고자 한다.

†주저자 · 책임저자 : rhimyc@yonsei.ac.kr

1-2. 관련 연구 동향

높은 기록밀도를 얻기 위하여 슬라이더의 부상 높이가 점차 낮아짐에 따라 좁은 간극에서의 유동해석에 no slip조건을 적용하기는 부적절하다. Fukui와 Kaneko[1]는 선형화된 볼츠만 식으로부터 유동인자의 개념을 도입하여 레이놀즈 식에 응용함으로써 온도, 압력, 속도 구배에 의한 유동의 슬립효과를 적절히 반영하였다.

Fu와 Bogy[2]는 실험을 통해 Ramp 형상에 따른 슬라이더의 변위 및 속도 변화를 측정하였으며, Zeng과 Bogy[3]는 수치해석을 통해 L/UL방식을 사용하는 슬라이더의 일반적인 설계변수를 회전수와 ramp profile에 따라 각각 제시하였다. Ponnaganti와 Kane[4]은 CSS방식에서의 슬라이더와 디스크 사이의 충돌을 수치해석을 통해 계산하였으나 충돌 시 슬립이 발생하였을 때 계산되어야 할 비선형 연립 방정식을 해결하지 못하고 여러 가정을 통하여 단순화하였다.

본 연구에서는 loading과정에서 슬라이더의 거동을 수치해석 하였다. 디스크와의 접촉을 고려하여 충돌 시의 충격량-운동량 식을 도입하여 슬라이더의 충돌 속도에 따라 해를 구하고, 8절점의 사각요소를 적용한 FEM 및 4th-order Runge-Kutta 방법을 순차적으로 계산하여 슬라이더의 거동을 해석하였다. 또한 실험을 통해 실제 슬라이더의 거동과도 비교하였다.

2. 수치해석

2-1. L/UL방식 HDD의 개요

CSS방식과는 달리 L/UL방식은 서스펜션의 끝부분에 탭이 있어서 voice coil motor(VCM)의 회전에 따라 탭이 ramp를 따라 올라가면서 파킹되거나 또는 내려오면서 loading된다. 따라서 슬라이더가 loading될 때의 초기위치 및 속도는 램프의 형상과 VCM의 각속도에 의해 결정된다. 또한 서스펜션은 초기의 굽힘 각과 서스펜션의 탄성에 의해 pre-load를 슬라이더에 가하며 슬라이더는 회전디스크와의 상대운동에 따라 발생하는 압력에 의한 힘을 받으므로 이들을 고려하여 슬라이더의 동적 거동을 해석한다. 이때 디스크 회전에 의해 발생하는 유동이 슬라이더에 미치는 영향은 고려하지 않았다.

2-2. 지배방정식

본 연구에서는 모든 프로그램을 자체 제작하여 수행하였다. 프로그램은 크게 세 부분으로 나뉘며 첫째 부

분은 레이놀즈 방정식을 이용한 FEM해석 부분이고 둘째 부분은 운동 방정식을 이용한 Runge-Kutta해석 부분이며 마지막은 충격량-운동량 방정식을 이용한 LU-decomposition해석 부분이다.

ABS에 의한 압력발생의 변화로 슬라이더는 시간에 따라 거동의 변화를 보인다. 이때 슬라이더의 동적 거동 해석을 위한 비정상 상태에서의 압축성을 고려한 무차원화된 수정 레이놀즈 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X} \left( PH^3 Q \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \lambda^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left( PH^3 Q \frac{\partial P}{\partial Y} \right) \\ & = A_x \frac{\partial PH}{\partial X} + A_y \frac{\partial PH}{\partial X} + \sigma \frac{\partial PH}{\partial T} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $H$ 는 슬라이더와 디스크 사이의 간극,  $P$ 는 압력,  $T$ 는 시간이며  $Q$ 는 슬립 보정을 나타내는 유동인자(flow factor)인데 선형화된 볼츠만 방정식에 의거한 Fukui-Kaneko 모델을 적용한 함수이며 다음과 같다.

$$Q = 1 + 6.82 \frac{Kn}{PH} + 8.311 \left( \frac{Kn}{PH} \right)^2 \quad (2)$$

$Kn$ 은 Knudsen number를 의미하며  $A$ ,  $\sigma$ 는 각각 Bearing number와 Squeeze number를 나타낸다.

슬라이더 거동에서 load beam과 flexure의 강성을 고려하여  $x, y$ -축 거동과 yawing모션을 제외한  $z$ -축 거동, pitching, rolling 운동은 다음과 같이 표현할 수 있다.

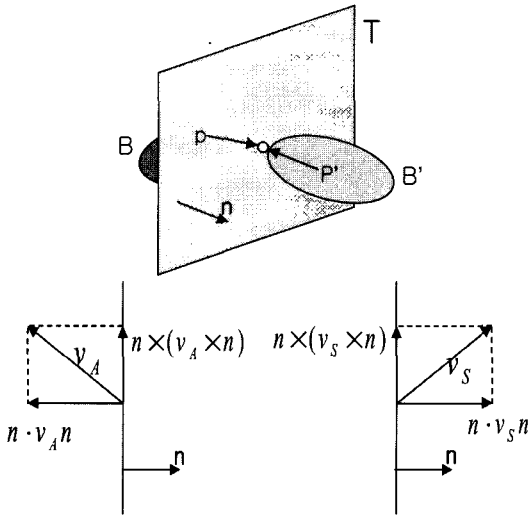
$$\begin{aligned} m \frac{d^2 z}{dt^2} + c_z \frac{dz}{dt} + k_z z + mg &= \iint_A (p - p_a) dA \\ I_p \frac{d^2 \theta_x}{dt^2} + c_p \frac{d\theta_x}{dt} + k_p \theta_x + M_p &= \iint_A (p - p_a) x dA \\ I_r \frac{d^2 \theta_y}{dt^2} + c_r \frac{d\theta_y}{dt} + k_r \theta_y + M_r &= \iint_A (p - p_a) y dA \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서  $m$ 은 슬라이더의 질량,  $g$ 는 중력 가속도,  $p_a$ 는 대기압,  $I$ 는 질량 관성 모멘트,  $c$ ,  $k$ 는 각각 ABS 공기베어링의 댐핑 상수와 스프링 상수를 나타낸다. Runge-Kutta방법을 적용하여 해석하였으며 초기 조건과 FEM에서 계산된 압력을 면적에 대해 적분한 하중과 모멘트를 위 식에 적용한다. 위 식에 사용된 상수 값은 Table 1과 같다. 이때 상수 값은  $z$ -direction, pitching, rolling의 순서를 따른다.

L/UL시스템에서 loading 과정은 슬라이더가 ramp에서 분리되어 하강하다가 air bearing에 의한 반력이 작용하면서 평형상태를 찾아가는 것이다. 이 과정에서 air

**Table 1. Pico Slider Characteristics**

Type of Slider	Coeff. of Stiffness of Suspension & Flexure		Mass [mg]
Pico Slider	26.75	0.01	0.1
			0.3



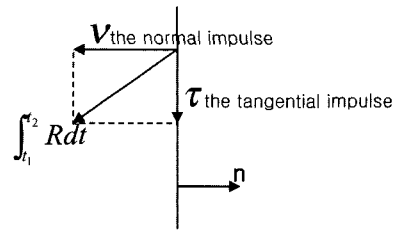
**Fig. 1. Collision between two bodies.**

bearing에 의한 힘이 슬라이더에 작용하는 pre-load를 받쳐주지 못하게 될 때 슬라이더는 디스크와 충돌하게 된다. 이 경우 충돌된 시간 동안의 운동량-모멘텀 식을 이용하여 후의 슬라이더의 속도를 구할 수 있다. 충돌 후의 속도는 슬라이더의 반발계수 및 정지마찰계수, 운동마찰계수, 디스크의 속도에 의해 구해진다.

Fig. 1에서  $n$ 은  $T$ 면에 대한 법선 벡터,  $v_A$ 는 접근 속도,  $v_S$ 는 분리속도를 각각 나타낸다. 이때 반발력이 작용하는 법선 벡터 방향의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n \cdot v_S = -en \cdot v_A \tag{4}$$

또한  $\Delta t$ 동안에 발생한 반발력을 적분하면 운동량이 되고 이것은 Fig. 2에서와 같이 법선 방향성분과 접선 방향 성분으로 분리된다. 이것을 물체의 운동에너지와의 관계식으로 나타내면 식 (5)와 같다.



**Fig. 2. Impulses during collision.**

$$\left[ \frac{\partial K}{\partial u_r} \right]_{t_2} - \left[ \frac{\partial K}{\partial u_r} \right]_{t_1} = \frac{\partial V}{\partial u_r} \cdot \int_{t_1}^{t_2} R dt \tag{5}$$

충돌 후, 슬라이더의 거동은 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 충돌 직후 반발력에 의해 슬라이더와 디스크가 완전히 분리되는 경우이고 다른 하나는 디스크와 슬라이더 사이에 미끄럼(slip)이 발생하여 두 물체가 접촉해있는 경우이다. 각각의 경우에 대한 식은 다음과 같다.

$$\text{noslip} : \eta \times (V_S \times \eta) = 0$$

$$\text{slip} : \left| \tau \cdot \int_{t_1}^{t_2} R dt \right| < \mu_s \left| \eta \cdot \int_{t_1}^{t_2} R dt \right| \tag{6}$$

식 (6)에서 slip인 경우 연립 비선형 방정식을 계산하기 위해서 Newton-Raphson법을 사용하였다.

**2-3. 유한요소해석**

슬립을 고려한 압축성 레이놀즈 방정식은 압력 및 간극의 급격한 변화로 비선형 성향을 보이기 때문에 안정된 결과를 얻기 위해서 Table 2에서와 같은 기법을 적용하였다.

Galerkin Method를 사용한 지배방정식의 가중 잔류식을 구하면 다음과 같다.

$$R(p) = \frac{\partial}{\partial X} \left( PH^3 Q \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \lambda^2 \left( PH^3 Q \frac{\partial P}{\partial Y} \right) - \Lambda_x \frac{\partial PH}{\partial X} - \Lambda_y \frac{\partial PH}{\partial Y} - \sigma \frac{\partial PH}{\partial T} \tag{7}$$

식 (7)에 형상함수(shape function)를 곱한 후 Green's theorem을 적용하면 다음과 같다.

**Table 2. FEM formulation**

Type of Element	Nodes/Element	Weight Function	Time Marching	Non-linear Solver
Quadrilateral	8 nodes	Galerkin Method	Implicit Method	Newton-Raphson

$$W(p) = \int_A [N]^T [-R(p)] dA \quad (8)$$

$$W(p) = \int_A [N]^T \left[ -\frac{\partial}{\partial X} (PH^3 Q \frac{\partial P}{\partial X}) - \lambda^2 \frac{\partial}{\partial Y} (PH^3 Q \frac{\partial P}{\partial Y}) + A_x \frac{\partial PH}{\partial X} + A_y \frac{\partial PH}{\partial Y} + \sigma \frac{\partial PH}{\partial T} \right] dA \quad (9)$$

이때의 각 요소에 대한 stiffness matrix와 force vector는 다음과 같다.

$$[K] = \int_A Q \frac{\partial N \partial N}{\partial X \partial X} + \lambda^2 \frac{\partial N \partial N}{\partial Y \partial Y} + \sigma \frac{dH}{dT} [N]^T [N] dA$$

$$\{F\} = \int_A A_x PH \frac{\partial N}{\partial X} + A_y PH \frac{\partial N}{\partial Y} dA$$

$$[C] = \int_A \sigma H [N]^T [N] dA \quad (10)$$

[C]는 스퀴즈 항을 나타낸다. 수치적분은 9-point Gauss-Legendre 적분을 이용하였으며, 전체 대수행렬 방정식은 계산시간 및 메모리 사용을 줄이기 위해 skyline-method를 적용하여 해를 구하였다.

식 (10)의 스퀴즈 항은 다음과 같이 근사화 될 수 있다. 이때 time marching 기법으로 유한차분법이 사용되었다.

$$\{\dot{P}_{T+\Delta T}\} \approx \frac{1}{\Delta T} (\{P_{T+\Delta T}\} - \{P\}) \quad (11)$$

식 (11)는 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{P_{T+\Delta T}\} = \{P_T\} + \Delta T \{f(\{P_{T+\Delta T}\}, T + \Delta T)\} \quad (12)$$

이 방법은 다음의 Newton-Raphson법과 연계되어 최종적으로 식 (13)과 같이 나타낼 수 있으며 해석의 안정화를 위해 relaxation factor를 1미만으로 설정하였다.

$$[K_{nl}] \{\Delta P^i\} = \{R_{nl}\} \quad (13)$$

위 식의 각 항들은 다음과 같다.

$$\{R_{nl}\} = \{\bar{R}_{T+\Delta T}\} - \{\bar{K}(P_{T+\Delta T}^{i-1})\} \{P_{T+\Delta T}^{i-1}\}$$

$$= \Delta T (\{\bar{F}_{T+\Delta T}\} - [K(P_{T+\Delta T}^{i-1})] \{P_{T+\Delta T}^{i-1}\}) + [C] (\{P_T\} - \{P_{T+\Delta T}^{i-1}\}) \quad (14)$$

$$[K_{nl}] = [C] + \Delta T ([K(P_{T+\Delta T}^{i-1})] + \left[ \frac{\partial K}{\partial P} \cdot P \right]_{T+\Delta T}^{i-1}) \quad (15)$$

위 식은  $\Delta P$ 가 설정된 수렴조건을 만족할 때까지 반복 계산된다.

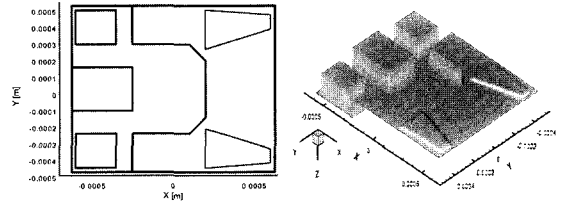


Fig. 3. Geometry of the ABS of a pico-slider.

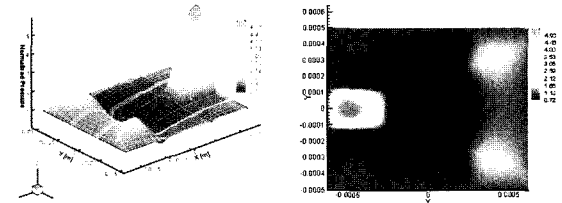


Fig. 4. Contour of pressure distribution (3000 RPM).

#### 2.4. 해석 모델 및 방법

슬라이더의 ABS형상으로 음압 슬라이더가 주로 사용되는데 일반적으로 슬라이더의 중앙부분에 recess를 두어 양압(positive pressure)과 음압이 적절하게 발생되도록 설계된다. 이러한 음압 슬라이더는 air bearing의 강성을 증가 시키고 더 낮은 부상높이(flying height : FH)를 유도하는 역할을 한다. 해석에 사용된 슬라이더는 Fig. 3 및 4와 같다. 슬라이더는 댄플 포인트를 통해 서스펜션으로부터 pre-load를 받게 되고 이때의 pre-load는 서스펜션의 강성계수와 무 하중(no loaded) 상태로부터 변형된 변위에 의해 결정된다. 슬라이더의 거동을 해석하기 위해 air bearing 효과가 영향을 미치는 높이에서부터 초기조건 등을 이용하여 Runge-Kutta method와 FEM을 연계하여 해석한다. 이때 relaxation factor는 FH에 따라 0.5에서 0.9까지의 적절한 값을 갖게 된다. 본 해석에서는 디스크의 회전수 및 loading 속도의 변화에 따른 슬라이더의 거동을 수치해석을 통하여 알아보았다.

#### 2.5. 해석결과

Pico slider를 수치해석한 결과는 다음과 같다. 디스크의 회전수에 따라 FH의 변화가 가장 크게 나타났으며 회전수가 증가할수록 loading시 진동량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 변동의 가장 큰 원인은 회전수가 증가할수록 슬라이더와 디스크 사이의 유속이 빨라지게 되어 air bearing에 의한 압력이 증가하기 때문이며 높은 FH에서도 pre-load를 지탱할 수 있게 된다. 또한 시

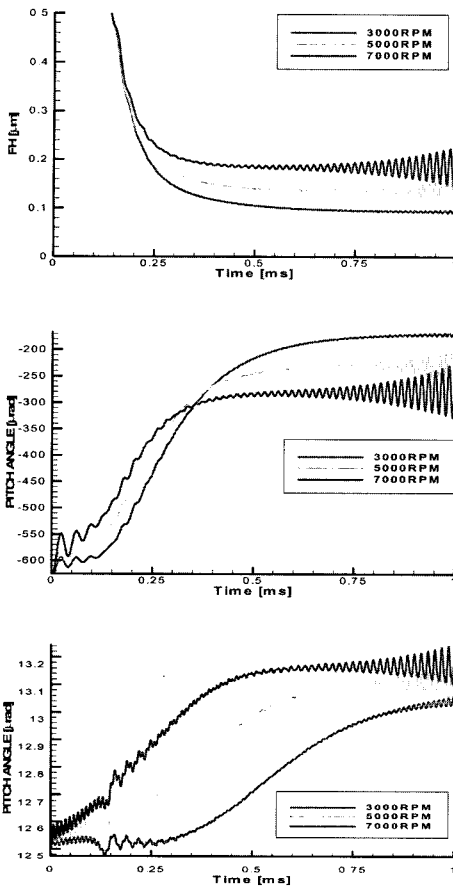


Fig. 5. Dynamics of slider with respect to RPM.

간에 따른 힘의 변화율이 크기 때문에 loading시 많은 진동을 유발하게 된다. 그러나 0.5 ms까지의 air bearing force의 변화는 회전수와는 관계없음이 확인되었다. 또한 loading속도를 15.4 mm/s, 46.2 mm/s, 77.0 mm/s로 변화시켰을 때 loading속도가 증가할수록 불안정한 거동을 나타내었다. 슬라이더가 ramp를 따라 내려오는 구간에서 슬라이더의 진동량이 큰 폭으로 변화하였으며 air bearing에 의한 힘의 변화율 또한 유사한 양상을 띠고 있다. 이는 air bearing에서의 스퀴즈 효과에 의한 영향이 지배적이기 때문이라고 판단된다. Loading속도가 빠를수록 air bearing force역시 비례하여 증가하여서 슬라이더와 ramp의 분리가 단시간 내에 이루어진다.

### 3. 실험

#### 3-1. 실험 방법

전체 실험장치의 구성을 Fig. 9에 나타내었다. 실험

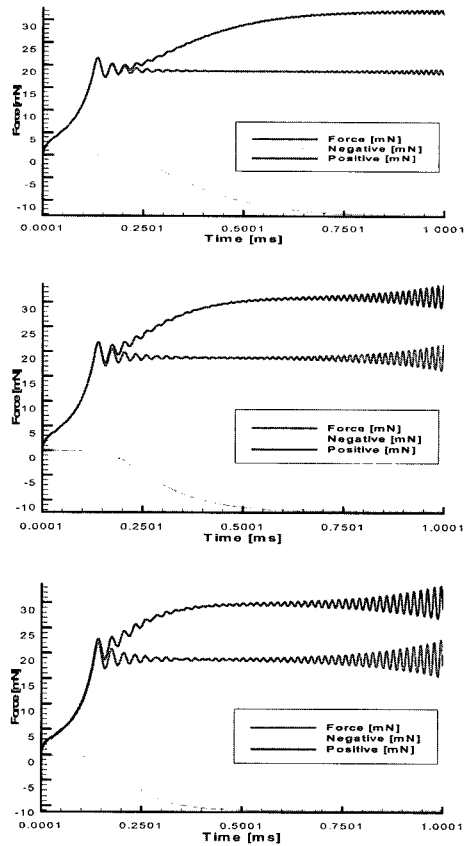


Fig. 6. Air bearing force with respect to RPM (3000 RPM, 5000 RPM, 7000 RPM).

장치는 크게 서스펜션과 ramp로 구성되어 있으며 서스펜션은 마이크로 스테이지에 고정되어 원하는 위치와 높이로 이동이 가능하다. 3.5 inch디스크를 사용하였으며 슬라이더의 실험 조건을 Table 3에 정리하였다. Ramp는 알루미늄 재질의 E-block을 가공하여 제작하였으며, 실제 슬라이더의 움직임과 유사한 결과를 얻기 위해 VCM을 이용하였다. Loading속도는 각각 15 mm/s, 25 mm/s이며 스위치를 이용하여 방향전환을 가능하게 하였다. Ramp의 경사 각도는 약 15°이며 Fig. 10에서와 같이 수직방향으로 하강하도록 평면 가공하였다. 슬라이더의 loading시의 거동을 측정하기 위하여 dual beam LDV(Laser Doppler Vibrometer)와 오실로스코프를 이용하였다. 사용된 LDV는 변위와 속도를 동시에 측정할 수 있으며 measurement beam은 슬라이더의 댄플 포인트를, reference beam은 디스크를 각각 측정 하여 디스크에 대한 상대적인 거동을 측정하였다. 실험은 반복 수행을 거쳐 결과에 대

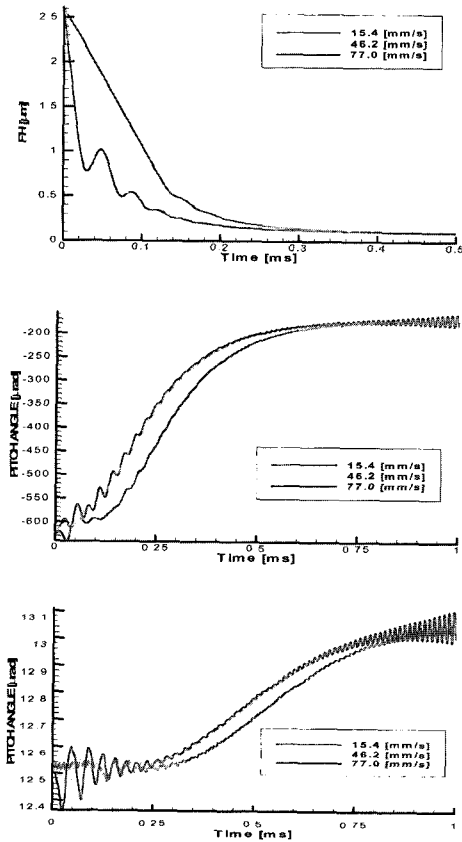


Fig. 7. Dynamics of slider w.r.t. loading velocity.

한 평균을 취하였다. LDV와 오실로스코프의 설정 값들은 Table 4에 정리하였다. 디스크의 회전수는 수치 해석과 마찬가지로 3,000~7,000 rpm까지를 실험범위로 설정하였으며 loading속도에 의한 영향을 비교하기 위해 VCM에 공급되는 전압을 증가시키면서 측정하였다.

3-2. 실험 결과

회전수 변화에 따른 실험결과는 Fig. 11과 같다. 7000 rpm의 경우 부상높이가 1.5 μm인 위치부터 ABS의 영향이 나타나 접근속도가 느려짐을 보여준다. 슬라이더의 z방향 속도는 디스크의 회전수가 증가할수록 변화량이 커지며 영으로 수렴하는데 걸리는 시간도 길어짐을 알 수 있다. 일반적으로 슬라이더의 부상량이 약 0.5 μm 이내로 접근하면서 디스크 회전수에 관계없이 속도가 0으로 감소하는 것으로 보아 이때부터 air bearing 효과가 작용하는 것으로 판단된다.

Loading 속도의 변화에 따른 결과는 Fig. 12에 나타

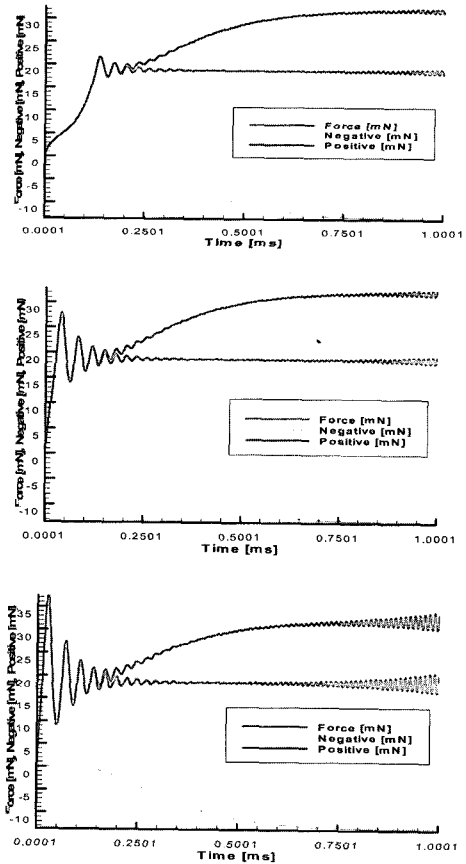


Fig. 8. Air bearing force with respect to loading velocity (15.4 mm/s, 46.2 mm/s, 77.0 mm/s).

Table 3. Experimental condition values of sliders

Pre-load [mN]	Loading Height [μm]	RPM [rev/min]	VCM Volt. [mm/s]
≈18.7	≈100	3000	15 mm/s
		5000	25 mm/s
		7000	

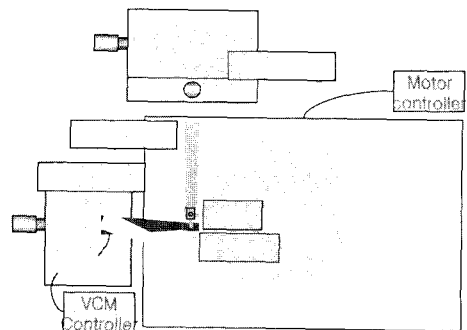
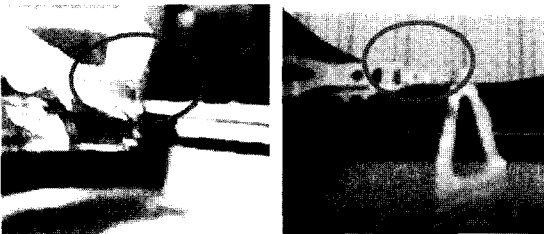


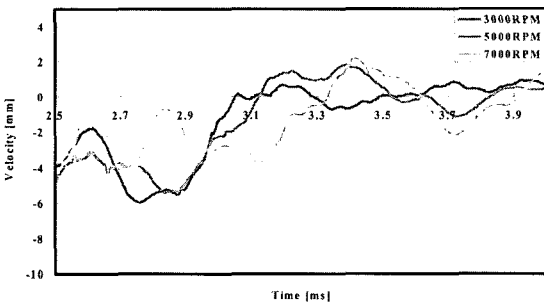
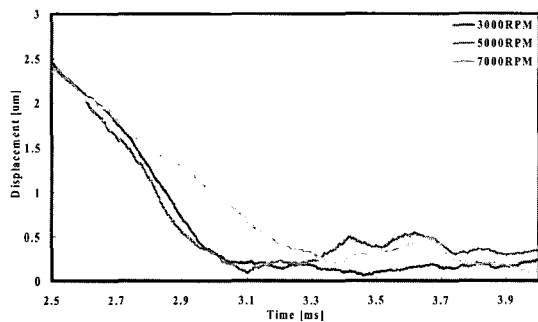
Fig. 9. Experimental setup with L/U/L mechanism.

**Table 4. Setting values of LDV & oscilloscope**

	Voltage Unit [Unit/V]		Time Range	Acquisition Num. of data
LDV	20 $\mu$ m 80 $\mu$ m	25 mm/s	.	.
Oscilloscope	1 V / 0.5 V		10 ms	2.5 M/s

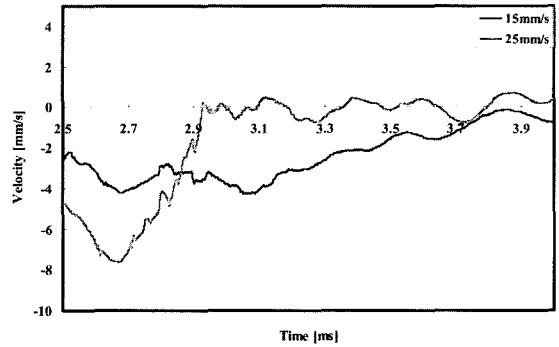
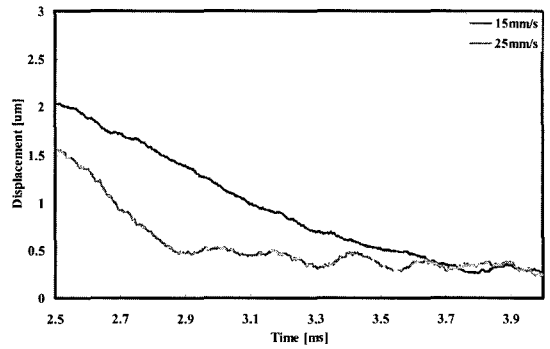


**Fig. 10. Zoom in experiment set-up.**



**Fig. 11. Flying height & z-direction velocity variation with respect to RPM.**

나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 loading속도가 증가할수록 스쿼즈 효과의 영향이 증가하게 되어 air bearing force가 발달하는 구간에서 슬라이더의 불안정한 거동을 유발하게 된다. 이때 z-축 방향 및 pitching, rolling 방향의 거동 변화가 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 loading속도의 증가로 인해 디스크와의 충돌 가능성이 높아짐을 알 수 있다.



**Fig. 12. Flying height & z-direction velocity variation with respect to loading velocity.**

#### 4. 결 론

L/UL용 pico slider에 대한 3자유도 및 충돌을 고려하여 슬라이더의 거동을 해석하였으며 수치해석 결과 및 실험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 디스크의 회전수가 낮을수록 FH가 낮아지며 진동량이 감소하며 이는 실험을 통하여 검증되었다. 따라서 슬라이더가 부상을 일으킬 수 있는 범위 내에서 회전수가 낮을수록 안정된 loading거동을 나타낸다.

2. Ramp 형상 및 VCM의 회전 각속도에 의해 vertical loading 속도가 결정되며 이때 속도가 빠를수록 슬라이더의 수직방향 거동 변화가 크기 때문에 충돌할 위험이 증가되고 air bearing force에 의한 슬라이더의 거동이 불안정해 짐을 알 수 있다.

#### 후 기

이 연구는 한국과학재단의 지원을 받아 연세대학교 정보저장기연구센터(Grant No. R11-1997-042-12002-0)에서 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. Fukui, S., Kaneko, R., *JSME*, Paper 86-317A., 1986.
2. Ta-Chung Fu and David B. Bogy, "Slider Vibrations Induced by Ramp-Suspension Interaction During the Ramp Loading Process," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 30, No. 6, 1994.
3. Qing-Hua Zeng and David B. Bogy, "Effects of Certain Design Parameters on Load/Unload Performance," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 36, No. 1, 2000.
4. V. Ponnaganti and T. R. Kane, "Dynamics of Head-Disk Contact/Impact in Magnetic Recording," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 23, No. 5, 1987.