

# 램프 형상에 대한 램프 상의 로드/언로드 동특성 해석

## Load/Unload Dynamics of Slider on Ramp for Various Ramp Shape

이용현\*·박경수\*·박노철\*\*·양현석\*\*\*·박영필\*\*\*

Yong-Hyun Lee, Kyoung-Su Park, No-Cheol Park, Hyun-Seok Yang and Young-Pil Park

Key Words : Load/Unload, Ramp profile, Force, Suspension dimple, Slider, FE model, Air bearing break

### ABSTRACT

Load/Unload(L/UL) technology includes the benefits, that is, increased areal density, reduced power consumption and improved shock resistance contrary to contact-start-stop(CSS). It has been widely used in portable hard disk drive and will become the key technology for developing the small form factor hard disk drive. The main objectives of L/UL are no slider-disk contact or no media damage. For realizing those, we must consider many design parameters in L/UL systems. In this paper, we focus on the effect of the ramp profile. We can find out the lateral velocities in L/UL process through experiments and simulations for force of voice coil motor and friction force on ramp. And then, we will gain the optimal design of ramp slope to maintain the minimum clearance of suspension dimple and slider with FE model. In special, after finding the point at which air bearing breaks and designing the ramp, we will identify the results for improving unload performance.

### 1. 서론

인터넷이 널리 보급되고 정보화가 급속하게 진행함에 따라 개인이 저장하거나 주고받아야 하는 정보의 양이 많아지게 되면서 정보를 저장해야 하는 장치들에 대한 수요가 늘어나고 있다. 특히 전 세계가 인터넷이라는 네트워크로 연결되면서 언제 어디서나 대용량의 정보를 다운로드 할 수 있는 대용량, 초소형의 저장장치에 대한 개발이 요구되고 있다. 휴대폰, 디지털카메라, PDA, MP3, 캠코더 등 소형 디지털 기기들의 사용이 늘어날수록 휴대 가능한 대용량, 초소형의 정보저장기기가 중요한 이슈로 떠오를 것이고, 앞으로 소형 디지털 기기를 구성하는데 필수적인 제품으로 발전할 것으로 예상된다.

정보저장기기 중 하드디스크 드라이브는 빠른 전송 속도와 가격당 저장용량이 높다는 이점을 바탕으로 현재 다른 정보저장기기에 비해 널리 사용되고 있다. 특히 1999년에 IBM에서 마이크로드라이브라는 초소형 1인치 하드디스크를 개발, 시판한 것을 시작으로 2004년에는 도시바에서 0.85인치의 하드디스크가 개발되면서 소형화에 박차를 가하고 있다. 소형화가 이루어짐에 따라 휴대폰에 메모리를 대신하여 탑재할 수 있는 여건을 갖추게 되었고 하드디스크에 대한 관심과 시장성은 크게 증가하게 되었다. 하지만, 하드디스크

는 구동의 특성 상 외부 충격에 약하고 정보의 손실이 발생할 가능성이 높다. 이러한 외부 충격에 대해 견딜 수 있는 동시에 소형의 미디어에 대용량의 정보를 기록할 수 있는 시스템을 구현하기 위하여 필요한 것이 로드/언로드(L/UL) 기술이다. L/UL은 기존 CSS(Contact Start Stop) 방식에 비해 디스크의 텍스처 존이 없고 헤드의 부상 높이를 낮게 가져갈 수 있기 때문에 면 기록 밀도를 높일 수 있다.[1] 또한 소비 전력이 작고, 비구동시 외부 충격에 대해 슬라이더와 디스크 사이의 헤드 슬랩(Slap)을 막을 수 있어 휴대용 하드디스크에 적용되기에 유리한 점을 가지고 있다.

L/UL 기술의 주된 목적은 슬라이더와 디스크간의 충돌을 막고 그로 인한 미디어의 손상을 방지하고 부드럽고 짧은 언로딩 과정을 구현하는 것이다.[2] 이러한 L/UL 시스템을 구현하는 데 있어 슬라이더의 공기 베어링 형상이나 서스펜션의 작동 변수 등의 많은 설계 변수들이 존재한다.[3] Zeng 과 Bogy [2~4]는 시뮬레이션을 이용하여 램프 형상, 슬라이더 버니쉬, 디스크 회전속도, L/UL 속도, 공기 베어링 형상 설계, 슬라이더의 초기 위치, 덤플 초기힘, 부상력 등이 L/UL 과정에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Albrecht 와 Sai [1]는 램프에 의해 손실되는 디스크의 저장공간을 최소화하기 위하여 램프의 높이에 따른 수직방향으로의 최소한의 공차가 필요하다는 것을 보여주었다. Tambe 와 Bhushan [5]은 슬라이더-디스크 충돌과 관련하여 L/UL 성능은 램프의 높이, 즉 램프와 디스크 사이의 간격이 증가할수록 좋아진다는 것을 언급하고, AE 신호의 RMS (Root Mean Square)를 통해 L/UL 과정에서의 충돌 특성을 규정하였다.

\* 연세대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : genfair@yonsei.ac.kr  
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

\*\* 연세대학교 정보저장협동과정

\*\*\* 연세대학교 기계공학과

이제까지의 연구는 L/UL 에서 램프가 미치는 영향에 대한 언급은 있었지만, 단지 슬라이더-디스크의 충돌 여부만 확인하는 수준에서 L/UL 성능을 평가하였다. 또한 언로딩 시 공기 베어링이 브레이크 되는 위치에 대한 정확한 규명이 없었다. 이에 본 연구에서는 1 인치 하드디스크 드라이버의 액츄에이터 및 서스펜션, 플렉서블 케이블, 램프를 FE 모델로 구성하여 ANSYS/LS-DYNA 로 시뮬레이션을 수행하고 L/UL 속도를 실험 결과와 비교할 것이다. 속도와의 상관관계를 바탕으로 언로드 시 램프의 각도와 딥플-슬라이더 사이의 간격에 대한 관계를 규명하고, 이것이 슬라이더-디스크의 충돌에 영향을 미침을 확인한다. 마지막으로 공기 베어링이 브레이크 되는 포인트를 통해 슬라이더의 바운딩을 최소화 시킬 수 있는 램프 변수를 제시하고자 한다.

## 2. L/UL 모델의 수립

### 2.1 FE 모델의 구성

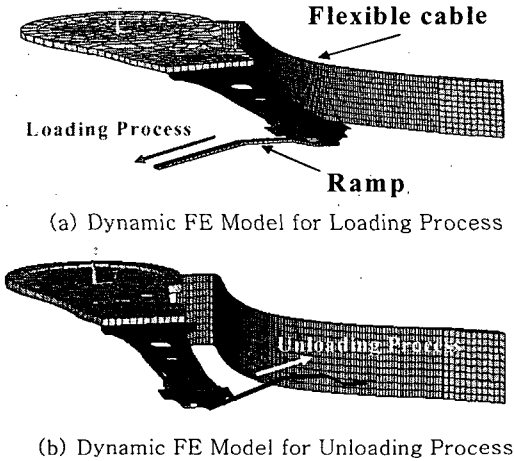


Fig.1 FE Model of Actuator System

시뮬레이션을 위한 모델은 1 인치 하드디스크 드라이버의 서스펜션 및 액츄에이터, 플렉서블 케이블, 그리고 램프로 구분된다. ANSYS 를 사용하여 FE 모델을 구성하였다. Fig.1 은 시뮬레이션을 수행하는 모델을 L/UL 로 구분하여 각각 모델을 다르게 설정하였다. 이는 초기 시각 위치가 달라 좌표 값을 설정하는데 어려움이 있기 때문이다. 단, L/UL 과정에서는 서스펜션의 초기힘을 중력의 1.5 배인 1.5g (14.175mN)으로 설정하고 시

뮬레이션을 수행하였고, 램프의 형상에 맞게 값들을 조정하였다.

### 2.2 램프 형상 및 동적 해석

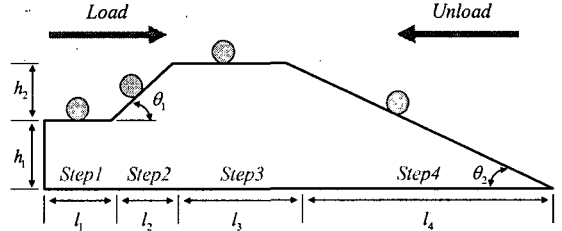


Fig.2 Ramp Profile

Fig.2 은 L/UL 에 사용된 램프의 형상이다. 각각의 변수들은 Table 1 에서 볼 수 있고, 램프에 각 단계에 대한 동적 해석은 Fig.3 을 통해서 알 수 있다. 이는 램프 위를 움직이는 탭에 작용하는 힘의 방향을 자유 물체도로 나타낸 후 L/UL 의 속도와 마찰력에 영향을 주는 수평/수직 방향의 힘으로 다시 구한 것이다.

Table 1. Values of the Ramp Parameters

Parameters	Value
Length 1 ( $l_1$ )	0.735 mm
Length 2 ( $l_2$ )	0.7 mm
Length 3 ( $l_3$ )	1.5 mm
Length 4 ( $l_4$ )	2.3 mm
Length 5 ( $l_5$ )	0.3 mm
Height 1 ( $h_1$ )	0.4 mm
Height 2 ( $h_2$ )	0.2 mm
Angle 1 ( $\theta_1$ )	15.9°
Angle 2 ( $\theta_2$ )	14.6°
Mass (kg)	5.94e-6 kg
Friction Coefficient	0.3-0.33

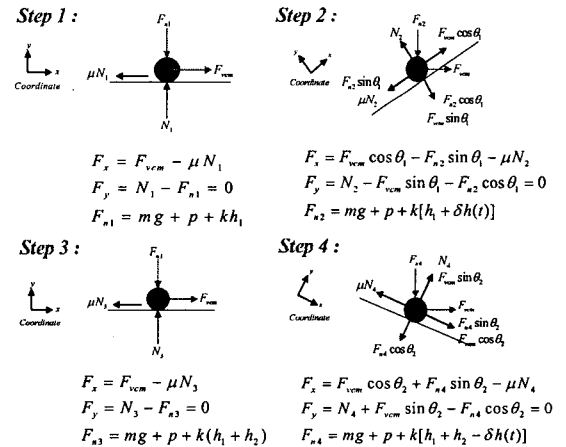


Fig.3 Dynamic Analysis for Tap on Ramp

### 3. L/UL 실험

#### 3.1 실험 장치 및 구성

실험 장치는 Fig.4 와 같고 시스템은 Fig.5 와 같이 구성하였다. 1 인치 하드디스크 드라이브를 이용하였고 L/UL 과정에서 디스크의 진동 및 로딩이 끝나는 시점, 언로딩이 시작하는 시점을 측정하기 위해 LDV (Laser Doppler Vibrometer) 를 사용하였다. 이 LDV 는  $5\text{mm/s/V}$  의 속도 분해능과  $8\mu\text{m/V}$  의 변위 분해능을 가지고 있다. 평면 LDV (In-Plane LDV) 는 액츄에이터의 수평방향 속도를 측정하는데 사용되고 서스펜션의 길이와 램프의 각도 등을 통하여 L/UL 끝 단의 탭에서의 속도를 구할 수 있다. 슬라이더와 디스크의 충돌을 측정하는 AE 신호는 60dB 의 전송폭기로 증폭되었으며 고역통과필터에서 600kHz 의 차단주파수를 통하여 정연한 신호를 사용하였다. 신호의 저장과 분석을 위해 오실로스코프가 사용되었다.

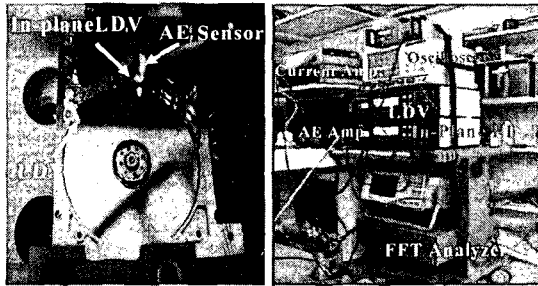


Fig.4 Photographs of the Experimental Setup

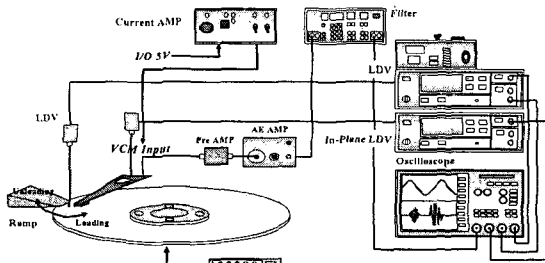


Fig.5 Schematic of the Experimental Setup

#### 3.2 실험 결과

##### (1) 로딩 과정

Fig.6 은  $25\text{mm/s}$  로딩 속도에 대하여 수평방향의 속도성분을 나타낸 것이다. 램프의 형상에 따라 4 단계로 나누었다. 경사를 올라가는 2 단계를

제외하고 모두 속도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 특히 A 를 보면, 1 단계에서 속도가 3 단계보다 큰 폭으로 증가하고 2 단계에서도 속도가 증가하다가 감소함을 볼 수 있다. 이는 헤드에 재생 기록 신호를 전달하거나 액츄에이터의 구동 전류를 보내기 위한 플렉서블 케이블의 굽힘 탄성 장력의 영향 때문이다. Fig.7 은 2 단계에서 플렉서블 케이블의 장력이 가해지는 것을 도표로 나타낸 것이다.

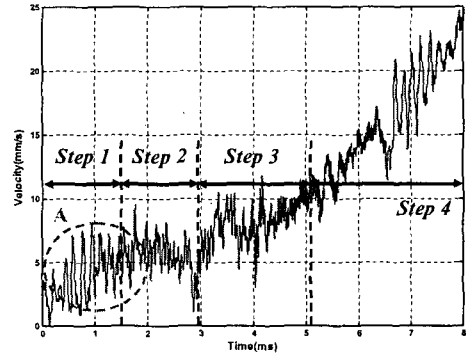


Fig.6 Lateral Velocity Profile (Load)

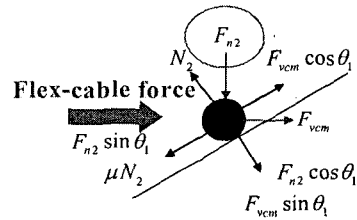


Fig.7 Free Body Diagram at Step 2

##### (2) 언로딩 과정

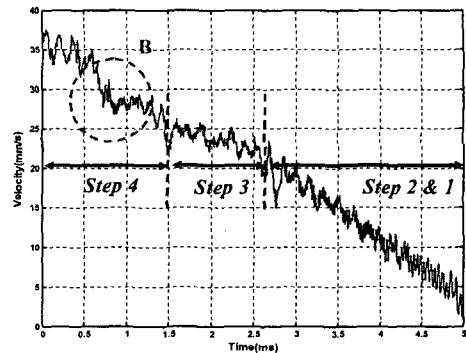


Fig.8 Lateral Velocity Profile (Unload)

Fig.8 은  $37\text{mm/s}$  의 언로딩 속도에 대하여 수평방향의 속도 성분을 나타낸 것이다. 램프 형상의

4 단계에서 1 단계로 진행한다. 언로딩 과정 4 단계에서 공기베어링이 브레이크 되는 지점이 중요하다. 이 지점에서 Fig.9 와 같이 진행방향에 반대 방향으로 힘이 가해지게 되고 3 단계를 넘어가면 이후의 단계는 파킹이 될 때까지 언로드 성능에 큰 영향을 미치지 않는다.

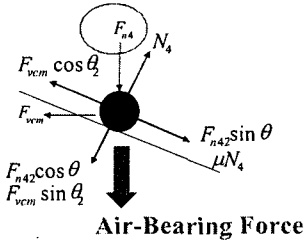


Fig.9 Free Body Diagram at Step 4

B 는 언로딩 과정의 4 단계에서 공기 베어링이 브레이킹 되기 전까지 Fig.9 와 같은 추가적인 힘에 의해 발생하는 현상이다. 마찰력을 증가시키는 힘으로 인해 속도가 급격하게 줄다가 공기 베어링이 사라지게 되어, 바운딩에 의해 속도의 감소폭이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 분석

##### 4.1 시뮬레이션

L/UL 시뮬레이션은 Fig.2 의 램프 형상을 이용하여 ANSYS/ LS-DYNA 의 Explicit Dynamics 해석을 사용하였다.

##### 4.2 L/UL 실험 및 시뮬레이션 비교

###### (1) 로딩 과정

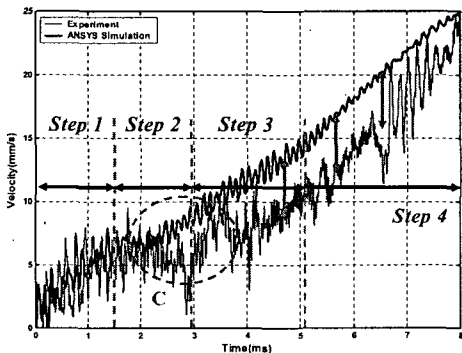


Fig.10 Comparison of Exp. and Sim. for Loading

Fig.10 은 로딩과정에서 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 단계 1 과 단계 2 의 초반부는 거의 유사한 속도를 보이고 있지만, C 에서 마찰력에 의해 속도가 감소하는 정도에서 차이를 보이고 있다. 그 차이가 로딩과정이 끝날 때까지 거의 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 서스펜션 탭과 램프 사이의 마찰력이 수치에 의해 정확하게 계산된 값으로 적용되지 않는다는 것을 보여주고, 실험의 경우 환경적인 조건에 의해 시뮬레이션보다 속도가 작게 나올 것이라는 가정과 일치함을 확인할 수 있었다.

###### (2) 언로딩 과정

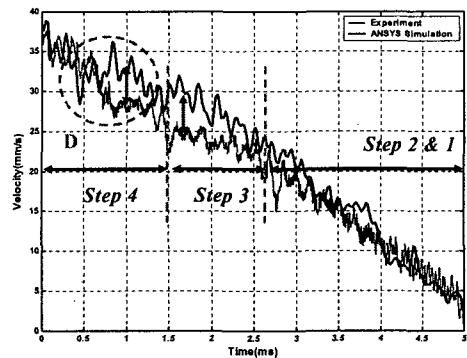


Fig.11 Comparison of Exp. and Sim. for Unloading

Fig.11 은 언로딩 과정에서 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 공기 베어링의 영향이 작용하는 단계 4 에서 D 에서 실험은 속도 감소 폭이 컸지만 시뮬레이션은 속도가 크게 감소하지 않았다. 오히려 리바운딩에 의한 영향이 실험보다 더 작용하여 단계 4 와 3 에서의 속도의 차이가 생긴다. 이외의 단계에서는 결과가 유사한 것을 알 수 있다.

#### 5. 언로딩 성능 향상을 위한 램프 설계

##### 5.1 램프 형상 및 주요 포인트

램프 위의 L/UL 과정에서는 슬라이더와 서스펜션 탭의 위치에 따라 중요한 몇 가지 위치가 존재한다. 특히, 언로딩 성능에 중요한 영향을 끼치는 위치는 Fig.12 에서 나타난 A 와 C 위치이다. A 의 경우, 직접 탭이 램프에 부딪히는 위치로 수평방향 속도에 의한 충격량이 직접 전달되어 서스펜션이나 플렉서의 진동을 유발시킨다. 또한 이 위

치는 슬라이더의 부상 시작되는 곳으로 공기 베어링의 흡착 효과가 발생하게 된다. [3] C의 경우, 플렉서와 덤플이 분리된 상황에서 공기 베어링에 대한 영향이 사라지는 위치이다. 언로드 속도에 따라 부상력에 차이가 생겨 그 위치는 조금씩 변화한다. 이 위치에서는 슬라이더와 덤플의 간격이 최고조에 이르는데, 슬라이더가 덤플에 부딪힌 후 강하게 리바운딩을 하게 될 경우 언로딩 과정이 진행 중이라면 슬라이더가 디스크와 충돌할 가능성이 높아지게 된다.

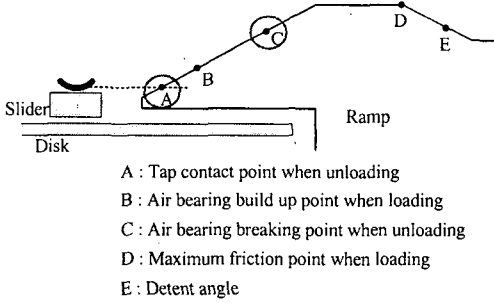


Fig.12 Key points of Ramp

## 5.2 언로딩 과정에서의 램프 설계 변수

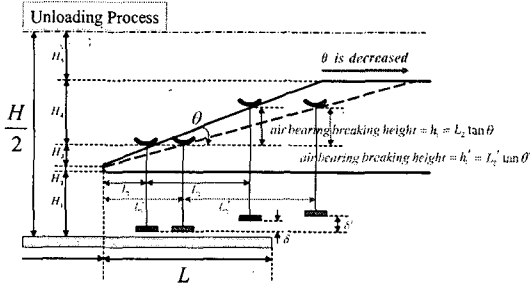


Fig.13 Ramp profile constraint for Unloading

하드디스크의 대용량화와 소형화를 위해 램프의 설계는 제한 조건을 가지게 된다. 활용 가능한 디스크 내의 공간의 높이( $H/2$ )는  $H_1 \sim H_5$ 의 합과 같다. [1] 또한 램프와 디스크가 겹치는 구간인  $L$  내에서 공기 베어링이 브레이크 되어야 하기 때문에 Fig.13의  $L_1 + L_2 < L$  이어야 한다. 길이와 높이의 제한 조건을 바탕으로 램프의 각도의 범위를 구할 수 있다.

$$H_3 + H_4 \geq h_1 + h_2 \quad (1)$$

$$L_1 + L_2 < L \quad (2)$$

$$h_1 = L_1 \tan \theta, \quad h_2 = L_2 \tan \theta \quad (3)$$

$$\theta < \tan^{-1} \left( \frac{H_3 + H_4}{L_1 + L_2} \right) \quad (4)$$

$$\tan^{-1} \left( \frac{H_3 + H_4}{L} \right) < \theta < \tan^{-1} \left( \frac{H_3 + H_4}{L_1 + L_2} \right) \quad (5)$$

## 5.3 램프의 각도에 따른 언로딩 특성

Fig.14는 초기 모델에서 덤플의 변위와 슬라이더의 변위를 측정하여 리바운딩이 발생하는 위치와 리바운딩의 크기, 공기 베어링이 브레이크 되는 지점을 나타낸 것이다. 리바운딩의 크기가 크거나 언로딩이 빠른 시간 안에 일어날수록 슬라이더-디스크 충돌이 발생할 가능성이 높다.

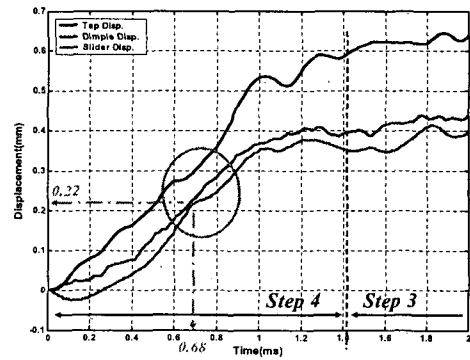


Fig.14 Unload Characteristics for Initial Model

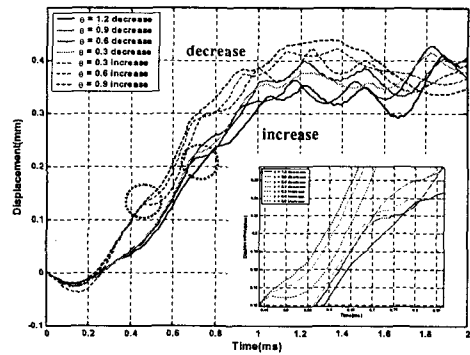


Fig.15 Slider Displacements for Various Ramp Slope

초기 모델에 대하여 설계 가능한 램프의 각도를 계산한 결과 약  $14.1^\circ$  이상이어야 (2)를 만족하였다. 초기모델의 값이  $14.6^\circ$  이므로 더 이상 각도를 낮추기가 어려울 것으로 예상된다. 각도를 낮출 수 있다면 성능이 더 좋아지는 지 확인하기 위해 램프의 각도를  $13.4^\circ \sim 15.5^\circ$  으로  $0.3^\circ$  씩 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과

Fig.15 에서 보는 것처럼, 언로딩의 경우 램프의 각도가 낮을수록 부상력이 상대적으로 감소하고, 결국 슬라이더와 디스크 간의 리바운딩이 감소하게 되어 충돌의 가능성이 적어 진다고 볼 수 있다. 이는 공기 베어링이 브레이크 되기 전까지 램프 각도에 의해 영향을 받는 것이고, 램프의 각도가 낮을수록 언로딩 성능이 향상된다고 할 수 있다.

#### 5.4 브레이크 포인트를 감안한 램프 설계

시뮬레이션 결과를 통해 램프의 각도가 낮을수록 언로딩 성능 상승한다는 것을 알 수 있었다. 하지만 램프 설계 시 각도가 낮아지면 램프의 높이는 정해져 있기 때문에 L 이 증가하게 된다. 결국 디스크의 공간을 더 차지하게 되어 저장공간의 감소를 가져오게 된다. 따라서 램프의 전 구간에서 각도를 낮추기 보다는 탭이 램프와 처음 부딪치는 위치와 에어 베어링이 브레이크 되는 위치에서 각도를 감소시키는 형상으로 설계할 필요가 있다. Fig.16 처럼 3 가지 경우로 램프를 설계하여 언로딩 성능에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

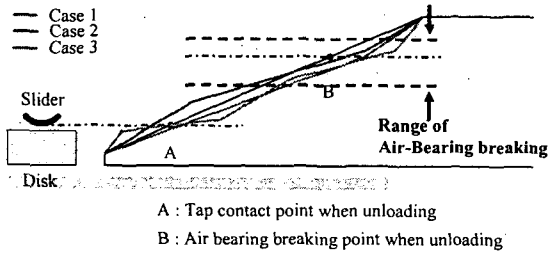


Fig.16 Various Ramp Shape

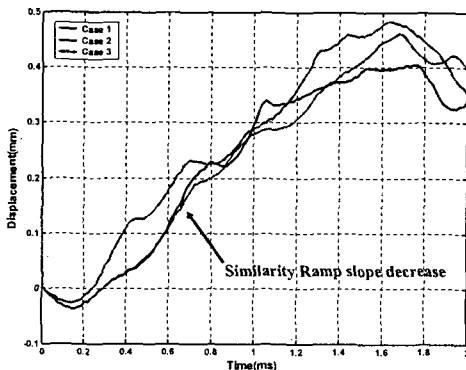


Fig.17 Results of Various Ramp Shape

시뮬레이션의 결과는 Fig.17 과 같다. 2 의 경우만 제외하고 램프가 낮은 경사도를 가질 때의 결과와 유사한 점을 보였다. 슬라이더의 변위가 완

만하게 증가하여 바운딩의 크기가 작았다. 특히, 경사도를 가변적으로 변화시킴으로써 램프 길이의 한계 때문에 각도를 일정 값 이하로 낮출 수 없었던 점을 보완할 수 있게 되었다.

#### 6. 결론

본 연구에서는 L/UL 의 성능을 좌우하는 많은 변수 중 램프의 형상에 따른 동특성 및 영향에 대하여 실험과 시뮬레이션을 바탕으로 검증하였다. 특히 슬라이더와 디스크의 충돌이 발생하기 쉬운 언로딩의 경우 램프의 형상에 의해 언로딩 속도가 결정되고 그에 따라 에어 베어링에 의한 영향이 결정된다. 에어 베어링이 브레이크 되는 위치에서 각도가 상승하면 상대적으로 수직방향의 속도는 증가하게 되고 슬라이더가 디스크에 리바운딩 되는 크기가 증가하게 되어 언로딩의 안정성이 감소하게 된다. 이러한 램프의 형상에 의한 특징을 통해 에어 베어링이 브레이크 되는 지점에서 각도가 감소하는 램프 형상을 설계하면 언로딩 성능이 함을 알았다. 이후 램프를 제작하고 슬라이더와 디스크의 충돌 실험을 통해 언로드 성능의 향상을 적용할 수 있을 것이다.

#### 후기

본 연구는 한국과학기술원 지정 정보저장기기 연구센터 [CISD]. (R11-1997-042-11000-0)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고 문헌

- (1) T. R. Albrecht and F. Sai, March 1999, Load/Unload Technology for Disk Drives, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 857-862
- (2) D.B. Bogy and Q.H. Zeng, 2000, Design and operating conditions for reliable load/unload systems, *Tribology International* 33, pp. 357-366
- (3) Q.H. Zeng and D.B. Bogy, January 2000, Effects of Certain Design Parameters on Load/Unload Performance, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 1, pp. 140-147
- (4) Q.H. Zeng and D.B. Bogy, January 2000, A Simplified 4-DOF Suspension Model for Dynamic Load/Unload Simulation and Its Application, *Transactions of the ASME, Journal of Tribology*, Vol. 122, pp. 274-279
- (5) N.S. Tambe and F. Sai, 2002, Effect of load/unload process on friction/stiction and durability of head-disk interface, *Microsystem Technologies* 8, pp. 409-418
- (6) 정문교, 박경수, 박노철, 양현석, 박영필, 2004, "FE 모델을 사용하여 램프상의 로드-언로드 동적 특성에 대한 해석", 추계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, pp. 413-418