

램프 형상에 대한 램프 상의 로드/언로드 동특성 해석

Load/Unload Dynamics of Slider on Ramp for Various Ramp Shapes

이 용 현* · 박 경 수* · 박 노 철** · 양 현 석*** · 박 영 필****

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

(2005년 4월 14일 접수 : 2005년 10월 27일 심사완료)

Key Words : Load/Unload(로드/언로드), Ramp Profile(램프형상), Slider(슬라이더), Air Bearing(공기베어링)

ABSTRACT

L/UL(Load/Unload) mechanism has been widely used in SFF(Small form factor) HDD because L/UL technology has many advantages such as an increase of areal density, reduction of power consumption and improvement of shock resistance. In this system, the most important design goal is no slider-disk contact and fast air-bearing breaking during L/UL process. To do so, we should consider many design parameters related to L/UL system. The ramp shape is the most dominant component among parameters which dramatically affect the L/UL performance. This paper makes an advanced ramp model using ANSYS/LS-DYNA. Through this FE model, this paper investigates the effect of initial ramp slope and location of air-bearing breaking. From the experiment for three different ramps, we also verify that experimental results agree with simulation results. We conclude that the ramp design should have small ramp slope at the moment which a suspension tap contacts with ramp and large ramp slope after air-bearing breaking in order to improve L/UL performance.

1. 서 론

인터넷이 널리 보급되고 정보화가 급속하게 진행함에 따라 개인이 저장하거나 주고받아야 하는 정보의 양이 많아지게 되면서 정보를 저장해야 하는 장치들에 대한 수요가 늘어나고 있다. 특히 전세계가 인터넷이라는 네트워크로 연결되고, 소형 디지털 기기의 사용이 증가하면서 언제 어디서나 대용량의 정보를 다운로드 할 수 있는 대용량, 초소형의 저장장치에

대한 개발이 요구되고 있다.

정보저장기기 중 하드디스크 드라이브는 전송 속도가 빠르고 가격당 저장용량이 높다는 이점을 바탕으로 현재 다른 정보저장기기에 비해 널리 사용되고 있다. 더욱이 1999년 IBM의 1인치 마이크로드라이브를 시작으로 2004년 도시바에서 0.85인치가 개발되면서 휴대 가능한 초소형 하드디스크 드라이브에 대한 관심은 크게 증가하였다. 그런데 이러한 초소형 하드디스크를 개발하는데 반드시 필요한 기술 중의 하나가 로드/언로드(L/UL)기술이다. L/UL기술의 주된 목적은 슬라이더와 디스크간의 충돌을 막아 그로 인한 미디어의 손상을 방지하고 부드럽고 짧은 언로딩 과정을 구현하는 것이다. 이러한 L/UL시스템을 구현하는 데 있어 슬라이더의 공기베어링 형상이나 서스펜션의 작동 변수 등의 많은 설계 변수들이 존재한다.⁽¹⁾ Zeng과 Bogy⁽¹⁾는 시뮬레이션을 이용하여 램프 형상, 슬라이더 베리쉬, 디스크 회전속도, L/UL속도,

* 책임저자 : 정희원, 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : genfair@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 정희원, 연세대학교 정보저장협동과정

*** 연세대학교 기계공학과

**** 정희원, 연세대학교 기계공학과

공기베어링 형상 설계, 슬라이더의 초기 위치, 덤플 초기하중, 부상력 등이 L/UL과정에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Albrecht와 Sai⁽²⁾는 램프에 의해 손실되는 디스크의 저장공간을 최소화하기 위하여 램프의 높이에 따른 수직방향으로의 최소한의 공차가 필요하다는 것을 보여주었다.

지금까지의 연구들은 램프가 L/UL과정에 미치는 영향에 대한 언급은 있었지만, 단지 슬라이더-디스크의 충돌 여부만 확인하는 수준에 그쳤다.⁽³⁾ 언로딩 시 공기베어링이 브레이크 되는 위치와 램프의 상관관계에 대해 실험을 통한 정확한 검증이 없었다. 이에 이 연구에서는 1인치 하드디스크 드라이브의 액추에이터를 FE모델로 구성하여 ANSYS/LS-DYNA로 시뮬레이션을 수행한 후 모델의 검증을 통해 램프의 형상 변화에 따른 공기베어링 브레이킹 포인트의 변화와 L/UL성능의 관계를 밝힐 것이다. 또한 L/UL 성능을 향상시키는 개선된 모델을 설계하여 시뮬레이션을 수행한 후 램프를 제작하고 실험을 통하여 이를 확인/검증할 것이다. 언로딩 시 부드럽게 공기베어링이 브레이킹 되면서 빠르게 언로딩이 수행되는 램프 변수를 제시하고자 한다.

2. L/UL 메커니즘

하드디스크 드라이브는 크게 디스크와 슬라이더, 액추에이터로 구분된다. 디스크는 정보의 기록면이고 슬라이더는 기록/재생을 위한 헤드를 포함하며 공기베어링을 형성시켜 디스크 위에서 부상하게 된다. 액추에이터는 슬라이더 및 서스펜션을 지지하는 동시에 디스크 위에서 구동을 담당한다. 기존의 하드디스크 드라이브에 적용되었던 CSS(contact start stop)방식은 램프가 존재하지 않고 디스크 위에 랜딩존을 위한 텍스처 구조가 존재한다. 이 구조에 의해 헤드의 부상 높이를 줄이는데 문제점이 존재하고 비 구동 시

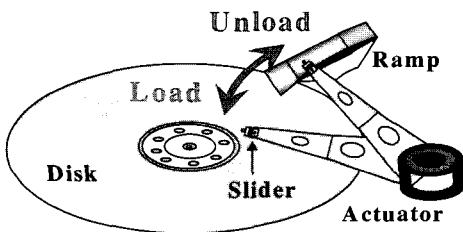


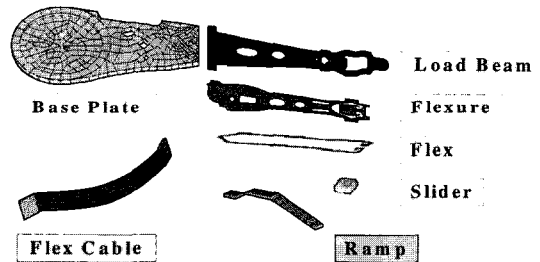
Fig. 1 L/UL mechanism

외부 충격에 약하기 때문에 정보가 손실될 가능성이 크다. 이에 반해 소형 하드디스크 드라이브에 많이 사용되는 L/UL방식은 Fig.1처럼 비 구동 시 램프 위로 언로딩 되어 있다가 구동 시 램프 로딩을 통해 슬라이더를 디스크 위치시키는 기술로 기록면 전체를 유효하게 사용하고 부상 높이를 낮출 수 있어 쉽게 저장용량을 늘리기 쉽다. 또한 비 동작 시 충격에 강하고 저 소비전력을 사용하기 때문에 휴대 가능한 하드디스크 드라이브를 만드는 데 유리하다⁽²⁾

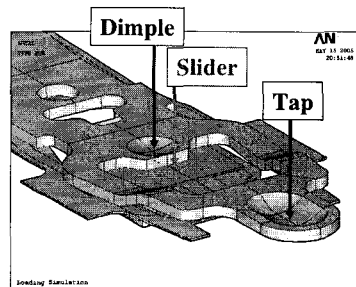
3. L/UL 모델의 수립

3.1 유한요소모델의 구성

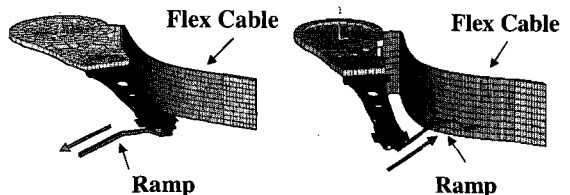
시뮬레이션을 수행할 1인치 하드디스크 드라이브의 유한요소 모델은 Fig.2(a)처럼 구성되어 있다. 기록/재생 헤드를 지지하는 서스펜션⁽⁴⁾과 기록/재생 신호



(a) Model components



(b) Measuring points of tap, slider and dimple



(c) Dynamic FE model for load/unload process
Fig.2 FE model of actuator system

및 구동 전류의 전달을 위한 플렉스 케이블, L/UL를 가능하게 하는 램프로 구성된다. 또한 Fig. 2(b)처럼 모델의 탭과 덤플, 슬라이더의 변위를 구하여 언로딩 시랩트 위에서의 동특성을 확인한다. 탭은 서스펜션 끝에 위치하여 램프 위에 접촉되는 부분이다. 덤플은 서스펜션과 슬라이더가 만나는 위치로 덤플에 의해 슬라이더는 외팔보 모드에서 6자유도의 운동 모드로 바뀌게 된다. Fig. 2(c)처럼 ANSYS/LS-DYNA를 사용하여 두 개의 유한요소모델을 가지고 시뮬레이션을 수행한다.⁽⁵⁾ L/UL에 따라 모델이 다른 것은 각각 시작 위치가 달라 좌표 값을 설정하는데 어려움이 있고 초기 위치에 따라 서스펜션에 가해지는 초기하중

의 변화를 고려해야 하기 때문이다. 실제 시스템과 같게 하기 위해 서스펜션의 초기하중은 1.5g(14.175 mN)로 설정하고, 램프의 형상 변수들은 Table 1의 값들을 적용한다.

3.2 램프 형상 및 동적 해석

Fig. 3에서처럼 L/UL과정 동안 램프 위에서 서스펜션 탭의 운동은 램프 형상에 따라 4단계로 구분하고, Fig. 4는 각 단계에서의 서스펜션 탭의 운동에 대한 자유물체도와 운동방정식을 각 단계 별로 보여주고 있다. 각 단계에서 액추에이터를 구동시키는 보이스코일모터(VCM)에 의해 발생하는 로렌츠 힘 F_{VCM} 과 초기하중에 의한 힘 F_n 사이의 관계를 탭 강성 k 와 마찰계수 μ 를 통해 계산하여 수평수직 방향의 힘 F_l 와 F_v 를 구할 수 있다. 이는 시뮬레이션 및 실험에서 보여지는 결과를 해석하는데 사용된다.

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
Height 1(h_1)	0.4 mm
Height 2(h_2)	0.2 mm
Angle 1(θ_1)	15.9°
Angle 2(θ_2)	14.6°
Mass(kg)	5.94e-6 kg
Friction coefficient	0.3~0.33

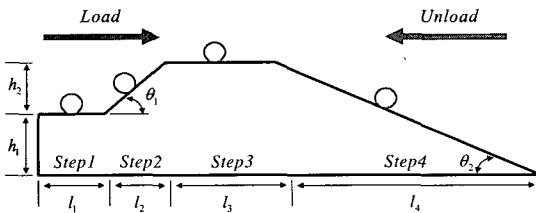


Fig. 3 Ramp profile

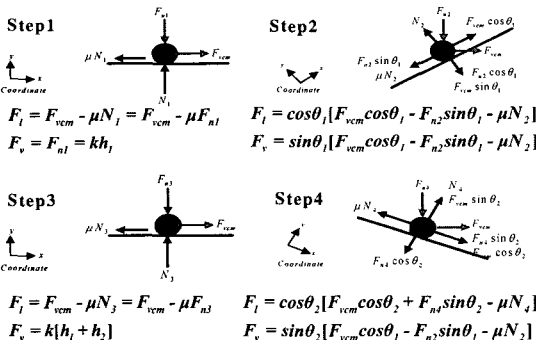


Fig. 4 Dynamic analysis for tap on ramp

4. L/UL 모델의 검증

4.1 실험 장치 및 구성

Fig. 5는 모델 검증을 위한 실험 장치를 보여준다. 실험 장치로 L/UL 과정에서 로딩이 끝나는 시점과 언로딩이 시작하는 시점을 측정하기 위해 LDV(laser doppler vibrometer)를 사용한다. 평면 LDV(In-Plane LDV)는 액추에이터의 수평방향 속도를 측정하는데 사용되고, 서스펜션 탭과 측정 점과의 길이

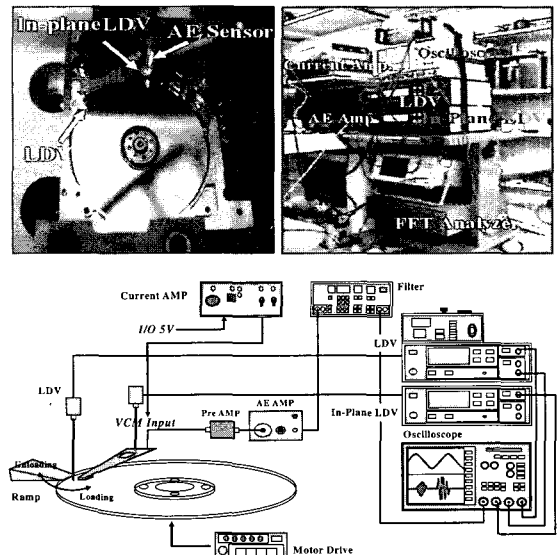


Fig. 5 Experimental setup

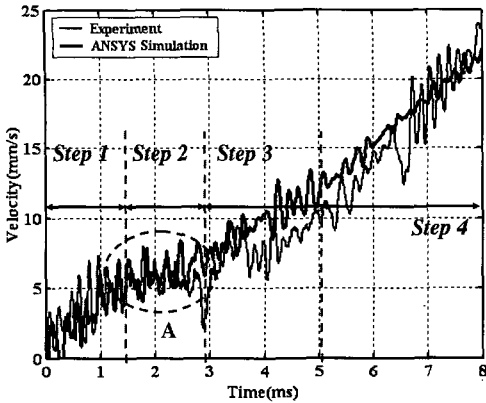


Fig. 6 Lateral velocity profile(Load)

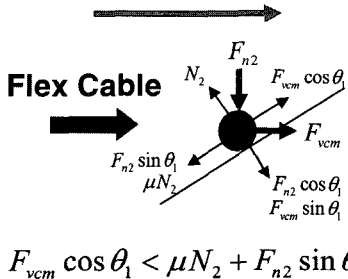


Fig. 7 Free body diagram at point A

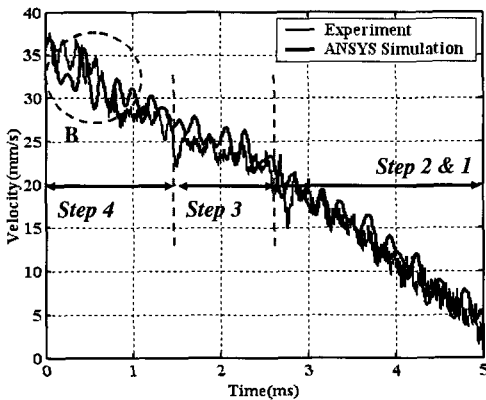
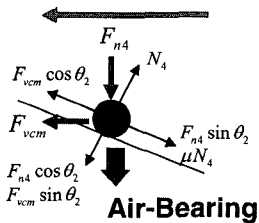


Fig.8 Lateral velocity profile(unload)



$$F_{vcm} \cos \theta_2 < \mu N_4 + (F_{n4} + F_{Air-bearing}) \sin \theta_2$$

Fig.9 Free body diagram at point B

비에 따라 탭에서의 수평 속도를 구할 수 있었다. 또한, 신호의 저장과 분석을 위해 오실로스코프가 사용된다.

4.2 실험 결과 및 모델 검증

실험을 통해 L/UL 과정에서 수평 속도를 측정하여 ANSYS/LS-DYNA 시뮬레이션 결과와 비교한다. 두 결과의 비교를 통해 시뮬레이션 모델을 실제 실험 결과와 가장 가깝도록 변수들을 수정하여 향상된 유한요소모델을 구축할 수 있다. 사용된 변수들은 25 mm/s의 로딩속도와 37 mm/s의 언로딩 속도, 14.175 mN의 서스펜션 탭의 초기하중, 1.52 mN의 덤플 초기하중이다. 또한 0.3의 운동마찰계수를 통해 쿨롱 마찰력을 사용한다.

(1) 로딩 과정

Fig. 6은 로딩 과정에서 시뮬레이션과 실험의 수평 방향 속도를 비교한 것으로 전구간에서 유사한 형태를 보이고 있다. 1과 2 단계에서 플렉스 케이블의 굽힘 탄성 장력의 영향이 작용하고, 특히 A에서 작용하는 힘의 분포와 식은 Fig. 7과 같다

(2) 언로딩 과정

Fig. 8은 언로딩 과정에서 시뮬레이션과 실험의 수평방향 속도를 비교한 것이다. 전 구간에서 유사한 결과가 나타난다. 언로딩 과정에서는 4단계에서 공기 베어링이 브레이크 되는 지점이 중요하다. B에서는 Fig. 9와 같이 공기베어링 힘과 중력에 의한 마찰력이 증가하여 속도가 줄다가 공기베어링이 사라지는 순간 분리되었던 슬라이더가 상승하게 되고 서스펜션 탭 속도의 감소가 둔화된다.

5. 언로딩 성능 향상을 위한 램프 설계

5.1 램프의 주요 포인트

램프 위의 L/UL 과정에서는 램프의 위치에 따라 Fig. 10처럼 L/UL 동특성을 결정하는 중요한 위치가 존재한다. 특히, 언로딩 과정에서는 A와 C지점이 중요하다. A의 경우, 직접 탭이 램프에 부딪히는 위치로 충격량이 직접 전달되어 서스펜션의 진동을 유발시킨다. 또한 이 위치는 슬라이더의 부상이 시작되는 곳으로 공기베어링의 흡착 효과가 발생하게 된다.⁽¹⁾ C의 경우, 슬라이더와 덤플이 분리된 상황에서 공기 베어링에 대한 영향이 사라지는 위치이다. 이 위치에서 슬라이더와 덤플의 간격은 최고조에 이르고 공기

베어링이 사라지면 슬라이더는 빠른 속도로 상승하게 되어 뒹굴과 부딪히게 된다. 이후 리바운딩을 하게 될 경우 언로딩 과정이 느리게 진행 중이라면 슬라이더가 디스크와 충돌할 가능성이 높아지게 된다.

5.2 램프 형상 설계의 제한 조건

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⁽²⁾. 또한 램프와 디스크가 접치는 구간인 L 내에서 공기베어링이 브레이크 되어야 하기 때문에 Fig. 11의 $L_1 + L_2 < L$ 이어야 한다. 길이와 높이의 제한 조건을 바탕으로 램프의 각도의 범위를 구할 수 있다.

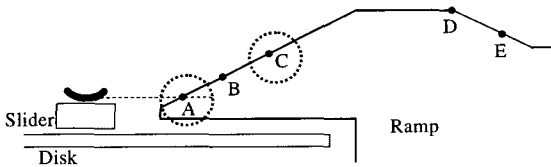
$$H_3 + H_4 \geq h_1 + h_2 \tag{1}$$

$$L_1 + L_2 < L \tag{2}$$

$$h_1 = L_1 \tan \theta, \quad h_2 = L_2 \tan \theta \tag{3}$$

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

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



A : Tap contact point when unloading
 B : Air bearing build up point when loading
 C : Air bearing breaking point when unloading
 D : Maximum friction point when loading
 E : Detent angle

Fig.10 Ramp design points

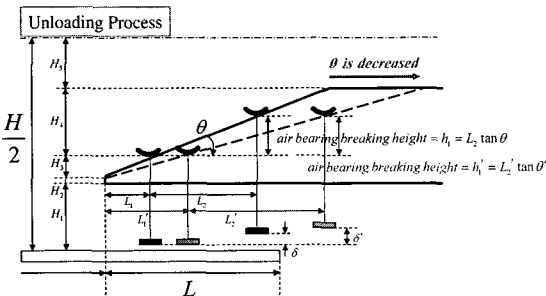


Fig. 11 Design constraints for unloading process

5.3 램프의 각도에 따른 언로딩 특성

초기 모델에 대하여 설계 가능한 램프의 각도를 계산한 결과 약 14° 이상이어야 식 (5)를 만족한다. 초기 모델의 값이 14.6° 이므로 실제 모델에서는 각도를 14° 이하로 낮추기가 어려울 것이다. 시뮬레이션에서는 램프 각도의 증가를 0.3° 단위로 조절하지만 감소시킬 때에는 제한 조건보다 낮출 수 있다면 성능이 더 좋아지는지 확인하기 위해 0.6° 씩 감소시킨다. 그 결과, Fig. 12처럼 램프의 각도가 낮을수록 공기베어링이 부드럽게 브레이크 되어 슬라이더가 디스크와 충돌하지 않는 것을 확인할 수 있다. 다만 공기베어링의 영향에서 벗어난 후 빠른 속도로 상승하지 않은 점은 언로딩 성능 향상 측면에서는 좋지 않다. 반면 램프의 각도가 증가하게 되면 공기베어링이 사라진 후 빠른 속도로 상승하지만 공기베어링에 의한 압력이 크게 작용하게 되어 슬라이더와 디스크가 충돌하는 것을 볼 수 있다. 이는 공기베어링의 영향에서 벗어날 때 램프 각도에 의해 영향을 받기 때문이고, 결국 램프의 각도를 Fig. 10의 A와 C의 위치에 따라 가변적으로 가져가는 것이 언로딩 향상에 도움이 된다고 할 수 있다.

5.4 공기베어링 브레이킹을 감안한 램프 설계

시뮬레이션 결과를 통해 램프의 각도를 위치에 따라 변화시켜 언로딩 성능을 향상시킬 수 있을 것이라고 가정할 수 있다. 탭과 램프가 처음 만나는 위치는 각도가 낮아야 공기베어링의 영향을 최소화시킬 수 있고, 이후 각도를 상승시켜 수직속도를 증가시키는 것이 리바운딩에 의한 충돌 가능성을 감소시키는 것이다. 하지만 램프 설계 시 각도가 낮아지면 램프의

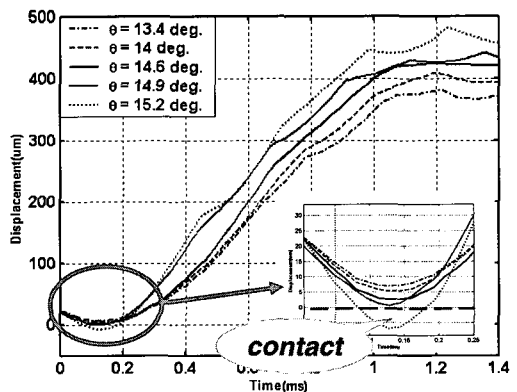


Fig. 12 Slider displacements for various ramp slope

높이는 정해져 있기 때문에 L 이 증가하게 된다. 결국 디스크의 공간을 더 차지하게 되어 저장공간의 감소를 가져오게 된다. 따라서 시스템의 수평길이와 높이의 제한조건을 감안하여 램프 각도를 변화시키는 램프 형상이 필요해진다. Fig. 13처럼 3가지 경우로 램프를 설계하여 언로딩 성능에 대해 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션의 결과는 Fig. 14와 같다. 2의 경우는 램프 각도가 클 때의 결과와 같고 1과 3의 경우는 각도가 낮을 때의 결과와 유사하다. 특히 모든 경우에서 슬라이더-디스크의 충돌이 발생하지 않은 점은 설계

된 모델들이 일반 램프보다는 안정적이라는 것을 알게 해준다. 1의 경우보다는 2와 3의 경우에서 공기베어링이 사라진 후 빠른 속도로 상승하는 것을 볼 수 있다. 슬라이더와 디스크의 간격, 슬라이더 상승 속도 면에서 3의 경우가 가장 좋은 결과가 나타남을 보여 주고 있다.

6. 램프의 제작 및 실험

시뮬레이션을 이용하여 설계된 램프를 제작하여 실험을 통해 시뮬레이션 결과와 같게 나오는지 검증할 필요가 있다. 슬라이더의 거동을 확인하기 위해 Fig. 15와 같이 1인치 하드디스크 드라이브의 세트를 고정시키고 제작된 램프를 회전시켜 L/UL 가 실제 시스템과 동일하게 이루어지도록 구성한다.

다양한 램프 형상에 대한 언로딩 실험 결과는 Fig. 16과 같다. 서스펜션 탭이 램프 위에서 언로딩이 일어나는 위치는 각각 11.6° , 15° , 13° 부근으로 탭과 슬라이더의 변위를 살펴보면 초기 램프 각에 따라 각도가

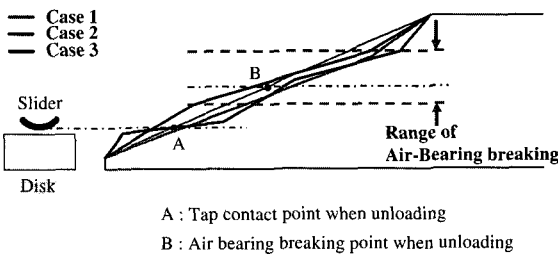


Fig. 13 Various ramp models

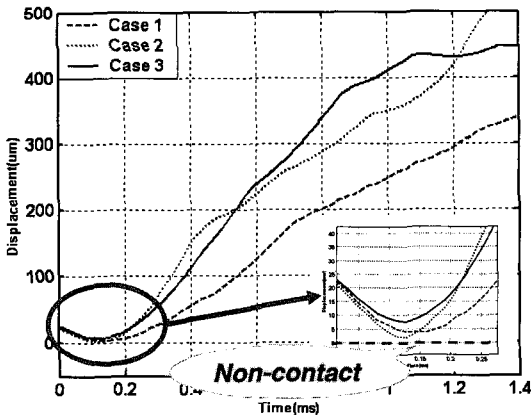


Fig. 14 Results of various ramp shape

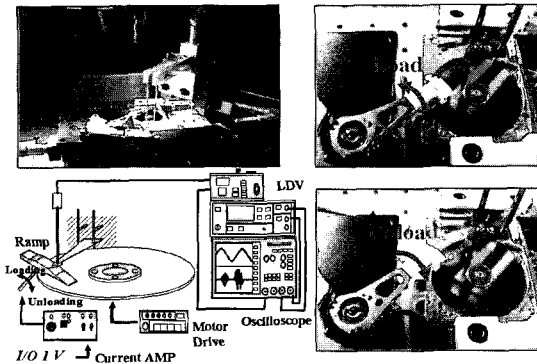
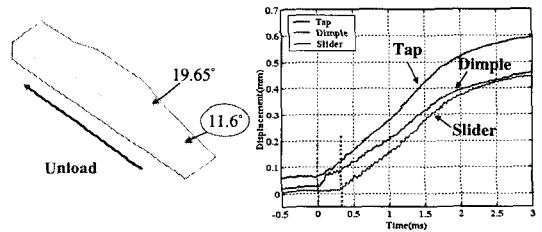
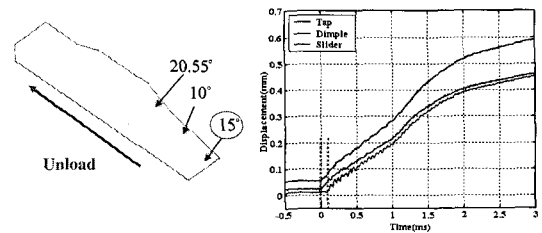


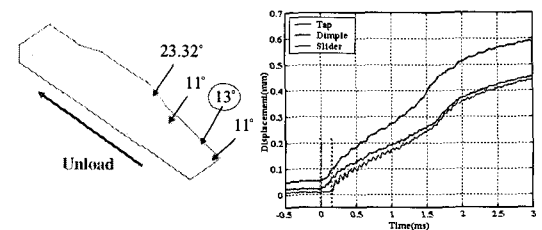
Fig. 15 Experimental setup



(a) Ramp of case 1



(b) Ramp of case 2



(c) Ramp of case 3

Fig. 16 Results of various ramp shapes

클수록 램프 위에서 빠른 속도로 언로딩이 일어남을 확인할 수 있다. 이는 수직 속도가 낮을수록 슬라이더에 작용하는 공기베어링의 영향이 오래 지속되기 때문이고, 이에 따라 디스크 위에서 오랜 시간 머물게 된다. 일단 램프에 언로딩이 된 상황에서는 슬라이더-디스크가 충돌하지 않는 범위 내에서 빠른 속도로 상승하는 것이 좋다고 할 수 있다. 다만 Fig. 16(b)의 경우처럼 초기 각도가 높을 경우 언로딩은 빠른 속도로 일어나지만 슬라이더의 리바운딩이 낮은 위치에서 발생하게 되어 이에 의한 슬라이더-디스크의 충돌 가능성은 증가하게 된다. 결국 실험 결과를 통해 시뮬레이션과 같은 3의 경우가 좋은 언로딩 성능을 보인다고 할 수 있다.

7. 결 론

이 연구에서는 L/UL의 성능을 좌우하는 많은 변수 중 램프 형상에 의한 영향에 대하여 실험 및 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 램프 형상에 따라 램프상의 언로딩 속도와 공기베어링은 영향을 받게 된다. 슬라이더-디스크 충돌이 일어나지 않는 동일한 액추에이터 언로딩 속도 하에서 서스펜션 탭과 만나는 램프의 각도가 커질수록 수직방향의 속도는 증가하게 되어 공기베어링이 빠른 속도로 사라지게 된다. 슬라이더가 디스크 표면 위에 머물게 되는 시간이 줄어들수록 시스템의 안정성은 향상된다. 그러나 초기 각도를 지나치게 높일 경우 충격량이 증가하고 슬라이더의 리바운딩이 낮은 위치에서 발생하기 때문에 오히려 시스템의 안정성은 떨어지게 된다. 이러한 램프

형상에 의한 동특성의 확인을 통해 언로딩 성능을 개선할 수 있는 램프의 설계가 가능하고 제작 및 실험을 통해 검증할 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터[CISD](R11-1997-042-11000-0)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Bogy, D. B. and Zeng, Q. H., 2000, "Design and Operating Conditions for Reliable Load/unload Systems", *Tribology International* 33, pp.357~366.
- (2) Albrecht, T. R. and Sai, F., 1999, "Load/Unload Technology for Disk Drives", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 857~862.
- (3) Suk, M. and Albrecht, T. R., 2002, "The Evolution of Load/unload Technology", *Microsystem Technologies* 8, pp. 10~16.
- (4) 김유성, 김경호 외, 2004, "초소형 광디스크 드라이브용 관성 래치 설계", *한국소음진동공학회 논문집*, 제 14 권, 제 4 호, pp. 287~294.
- (5) 정문교, 박경수 외, 2004, "FE모형을 사용하여 램프상의 로드-언로드 동적 특성에 대한 해석", *한국소음진동공학회 추계학술대회논문집*, pp. 413~418.