

# FE모형을 사용하여 램프상의 로드-언로드 동적특성에 대한 해석 Analysis of Dynamic Characteristics on the L/UL Ramp Using Advanced FE Model

정문교\*·박경수\*\*·박노철\*\*\*·양현석\*\*\*\*·박영필\*\*\*\*

Moon-Gyo Jung, kyoung-Su Park, No-Cheol Park, Hyun-Seok Yang and Young-Pil Park

Key Words : Flexible Cable, HDD, Load/Unload, Slider, Suspension,

## ABSTRACT

Recently, the development of mobile devices demands information storage systems to use micro drive devices. 1-inch micro drive hard disk uses the load/unload(L/UL) technology to increase area recording density and reduce power consumption. Because micro drive has light actuator, effects of the flexible cable that is ignored in 3.5-inch hard disk drive is important to load/unload performances. In this paper, effects of flexible cable on load/unload performances are studied

## 1. 서 론

동적 로드-언로드 시스템은 기존의 CSS 방식의 하드디스크에서 문제가 되었던 슬라이드-디스크 사이의 마찰(stiction)과 마모 문제를 해결하고, 디스크의 소형화에 따른 기록 밀도 증가 및 소비전력 감소 등과 같은 요구사항을 만족시키기 위한 대안으로 오늘날 휴대용 정보저장기에 널리 사용되고 있다. 로드-언로드 기술은 마이크로 드라이브와 서보 드라이브에 응용되어지는 한편 미래 고밀도 초소형 하드디스크 드라이브(HDD)의 발전에 크게 기여할 기술로 주목을 받고 있다.

로드-언로드 시스템은 슬라이더의 공기부상 설계와 서스펜션 작동 변수 등과 같은 많은 디자인 변수들을 갖는다. 이에 이들 변수들이 로드-언로드에 미치는 영향에 대해 이미 많은 연구가 이루어져 왔으며 많은 논문들이 발표되었다. Zeng 와 Bogy [1]은 시뮬레이션에 기초하여 이들 변수들 중 램프 형상(profile), 슬라이더 바닥 곡면 형상(wall profile), 디스크 회전속도, 로딩 속도와 덤플 하중(preload)이 로드-언로드 과정에 미치는 영향에 대해 연구했다. Levi 와 Talke [2]는 스핀들 속도와 디스크 회전속도가 로드-언로드 과정에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 조사하기 위해 실험을 수행했다. Tambe 와 Bhushan [3] 램프 높이, 슬라이더 형상 설계 및 서스펜션 디자인, 디스크 진동이 로드-언로드 과정에 미치는 영향을

알아내기 위한 실험을 수행했다. Suk and Gillis [4]는 실험을 통해 로드-언로드 동안 디스크 손상에 대한 슬라이더 바닥 곡면 형상(wall profile)의 영향에 대해 연구했다. Zeng 과 Bogy [5]는 음압 슬라이더를 가진 서스펜션에서 리미터(limiter)가 로드-언로드 과정에 미치는 영향에 대해 연구했다.

로드-언로드에 대한 이러한 많은 연구가 있었음에도 불구하고, 로드-언로드 동안에 플렉서블 케이블 상호반발력(flex cable bias force)이 로딩과 언로딩 시 속도 및 마찰력에 영향을 준다[6]는 사실이 알려진 것 외에는 플렉서블 케이블(flex cable)이 로드-언로드 성능에 미치는 영향에 대해서는 어떠한 연구 결과도 알려져 있지 않다. 이는 기존의 3.5 인치 데스크 탑(desk top) 하드 디스크에서는 플렉서블 케이블의 상호 반발력의 영향이 미약하여 거의 무시되었던 이유인 것 같다. 그러나 1 인치 마이크로 드라이브의 경우, 휴대용을 목적으로 하는 정보저장기기이기 때문에 적은 전력소비가 요구되므로, 로드-언로드 속도는 줄어들게 되고, 가벼워진 액츄에이터를 사용하기 때문에 로드-언로드 동안에 3.5 인치 하드디스크 드라이브에서는 무시되었던 플렉서블 케이블 상호반발력 및 램프 마찰 등에 큰 영향을 받는다. 그러므로 초소형/휴대용 하드디스크 드라이브에서 이러한 변수들에 대한 해석을 수행하여 최적 조건을 찾아내는 것은 중요한 일이다.

이에 이번 연구에서 1 인치 마이크로 드라이브를 이용하여 플렉서블 케이블이 로드-언로드 성능에 어떠한 영향을 미치는가를 시뮬레이션과 실험을 통해 알아보았다.

\* 연세대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : jmgyo@hotmail.com  
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

\*\* 연세대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 연세대학교 정보저장공학과  
\*\*\*\* 연세대학교 기계공학과

## 2. 로드-언로드 시뮬레이션

### 2.1 시뮬레이션을 위한 모델링 및 변수 정의

시뮬레이션에 사용한 1 인치 마이크로 드라이버의 액추에이터 시스템, 램프 및 플렉서블 케이블을 구성하고 있는 각각의 부분을 FE 방법을 이용하여 모델링 하였다. 그 각각의 형태는 Fig. 1 과 같다.

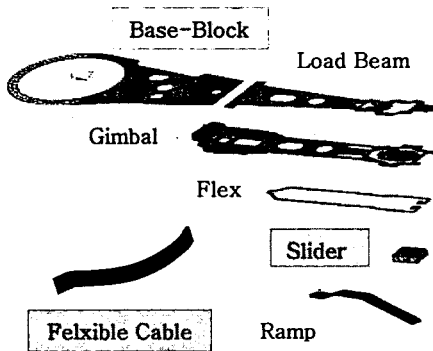


Fig.1 FE Model

액추에이터 시스템은 로드-언로드 시 램프 위를 미끄러져 움직이는 것을 가능하게 하기 위해 끝부분에 탭(tab)을 가진 로드빔(loadbeam), 서스펜션의 형상 변형을 방지하면서 로드빔과 VCM을 연결시키는 역할을 하는 베이스블록(base-block), 슬라이드가 디스크 위를 부상하여 움직일 때 슬라이더의 자유로운 운동에 영향을 미치는 짐발(gimbal), 자기 기록에 대한 신호전달에 사용되는 플렉스(flex), 공기 베어링 압력을 받아 디스크 위를 부상한 상태에서 디스크의 불규칙한 운동에 순응하면서 자기 기록을 가능케 하는 슬라이더(slider)로 구성되어 진다. 램프는 CSS 타입의 하드디스크에서 파킹 존(parking zone)과 같은 역할을 하면서 로드-언로드 동안 서스펜션을 디스크 위로 혹은 디스크 밖으로 안내하는 역할을 하고, 플렉서블 케이블은 액추에이터를 회전시키기 위하여 VCM에 들어가는 전류를 흐르게 하는 역할을 한다.

이러한 각각의 부분들을 결합한 1 인치 마이크로 드라이버의 전체적인 FE 모델의 형태는 Fig. 2 와 같다. 시뮬레이션에 사용한 모델이 실험에 사용한 1 인치 마이크로 드라이버와 같은 상태를 갖게 하기 위하여 플렉서블 케이블을 모델링 할 때는 램프에서의 거리와 각도를 측정하여 초기 상태가 일치되도록 모델링 한다.



Fig.2 Entire FE Model

시뮬레이션에 사용한 1 인치 마이크로 드라이브를 구성하는 각 부분에 해당하는 물성치는 Table. 1 과 같다.

Table 1. Material Property

Component	Material	Young's modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	Density (kg/mm <sup>3</sup> )	Poisson's ratio
Base Block	Stainless Steel	1.93e8	8.03e-6	0.3
Load Beam	Stainless Steel	1.93e8	8.03e-6	0.3
Gimbal	Stainless Steel	1.93e8	8.03e-6	0.3
Flex	Polyimide film	4.8e6	1.64e-6	0.34
Slider	Al 203 - TCL	4.12e9	4.25e-6	0.27
Ramp	Poly-carbonate	2.3e6	1.19e-6	0.3
Flexiblecable	Flexible PCB	1.67e6	1.6e-6	0.34

ANSYS/LS-DYNA 를 이용하여 Explicit Dynamics 해석을 수행할 때 베이스 블록, 램프, 슬라이더 부분은 로드빔, 짐발, 플렉스, 플렉서블 케이블에 비해 변형이 거의 없으므로 강체(rigid body)로 간주한다. 로드-언로드 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 위와 같이 모델링 한 모델이 실제 모델과 동적 특성을 같은지 확인하기 위해 모드 해석을 수행한다. 모드 해석은 액추에이터만을 가지고 자유 상태에서 행하여지며, 디스크 진동을 정확히 추종하는데 영향을 미치는 몇 가지 모드의 주파수 특성을 조사함으로써 행하여 진다. FE 모델에서 베이스 블록의 모든 자유도는 완전 구속되고, 슬라이드와 짐발은 같은 위치에 노드를 생성시켜 머지(merge)시키고, 짐발과 딴플(dimple)은 딴플 끝부분의 한 절점에서 z-방향으로 커플(couple)되어 있다.

시뮬레이션을 위한 모델의 검증을 위해 실제 1 인치 마이크로 드라이브에 사용되어지는 서스펜션을 가지고 실험을 통해 모드해석을 수행하였는데,

FE 모델과 실험을 통해 구한 이들 각각의 모드에 대한 고유주파수를 Table 2. 에 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 실험을 통해 구한 결과와 시뮬레이션에 의한 모드해석 결과가 10% 이하의 에러(error)범위에 속하므로 서스펜션 모델링은 실제 모델에 동특성 상의 신뢰성을 가진다.

Table 2. FEM & Exp Mode Frequencies

Mode Shape	EXP	FEM	Error(%)
Cantilever	194.7 (Hz)	195.3 (Hz)	-0.3
Slider-Pitching	2.23(kHz)	2.17(kHz)	2.69
Slider-Rolling	2.99(kHz)	2.99(kHz)	0
1 <sup>st</sup> Bending	3.64(kHz)	3.48(kHz)	4.39
1 <sup>st</sup> Torsion	5.82(kHz)	6.09(kHz)	-4.64

### 2.3 로드-언로드 시뮬레이션

실험에 앞서 앞서 설명한 것과 같이 모델링한 FE 모델을 가지고 ANSYS/LS-DYNA 를 이용하여 언로딩 과정에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig.3 은 언로딩 과정에서의 실험과 시뮬레이션에 의해 구한 속도 그래프를 나타낸 것이다. 이 그래프는 x-방향의 속도( $V_x$ )와 y-방향의 속도( $V_y$ )를 구하여 200Hz 의 저주파 여파기(low pass filter)를 통과시킨 후 나오는 아래와 같은 식으로 구하였다.

$$V_{lateral} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

속력이 램프 형상을 따라 어떻게 변화하는지를 알아보기 위해 같은 시간동안의 z 방향 변위와 속도 변화를 Fig.4 에 나타내었다. Fig.5 는 로드-언로드에 사용된 램프형상을 나타낸 것이다.

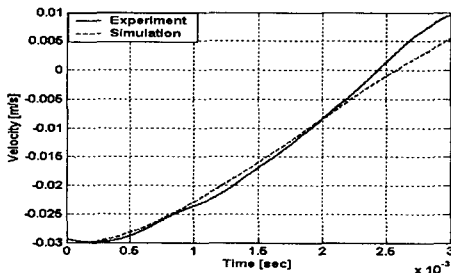


Fig.3 Compare between experiment and simulation

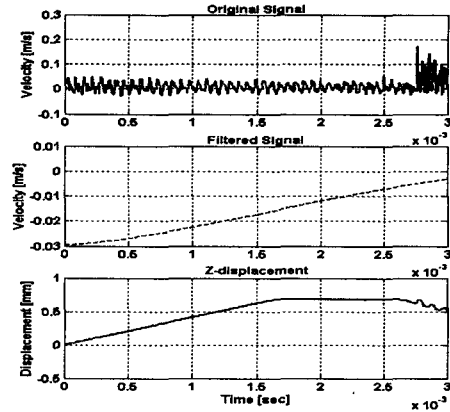


Fig.4 Velocity & displacement in unloading Process

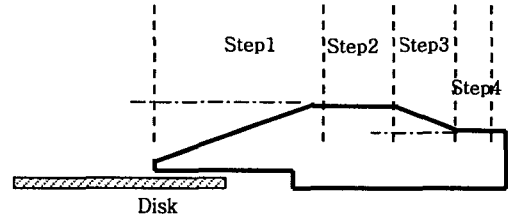


Fig.5 Ramp for L/UL

## 3. 로드-언로드 실험

### 3.1 실험 장치, 표본 및 실험 절차

실험 장치는 Fig.6 에 보여진 바와 같다. Fig.6 (a)는 플렉서블 케이블이 연결되어 있을 때의 로드-언로드 실험을 위한 세트이며 Fig.6(b)는 플렉서블 케이블을 완전히 제거했을 때의 실험 세트이다. 플렉서블 케이블이 제거된 마이크로 드라이버는 VCM 전류에 의해 액츄에이터를 돌릴 수가 없으므로 VCM 에 의한 로드-언로드와 같은 효과를 내기 위하여 서스펜션은 지그(Jig)에 의해 고정되어 램프 위에 놓여있고, VCM 이 액츄에이터를 돌릴 때와 같은 속도로 같은 회전각도 만큼 드라이버를 돌려준다. Fig.6 (c)에 보여준 실험계는 로드-언로드 과정 동안의 시작과 끝점을 지나는 순간의 위치 신호를 검출함으로써 로드-언로드 과정의 시작과 끝나는 순간을 정확히 알기 위하여 수직 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 사용하였다. 사용되어진 LDV 의 속도 및 변위 해상도는 각각  $5\text{mm/s/V}$  와  $8\mu\text{m/V}$  이다. 그리고 액츄에이터의 수평방향의 속도 변화는 인 플레인 LDV(In plane LDV) 사용하여 측정하였다.

LDV 와 인플레인 LDV 를 통해 측정된 신호는 200Hz 의 저주파 여과기 (low pass filter) 를 통과하여 오실로스코프 (oscilloscope) 로 들어간다. 인플레인 LDV 를 이용하여 측정된 신호를 이용하여 리프트 탭 (lift tab) 에서 수평 방향 속도를 계산하기 위하여 액추에이터는 피벗을 중심으로 회전하고, 회전 속력은 탭이 램프 위를 지나는 동안 전 반적으로 같다고 가정한다. 한편, 수직 방향의 로드-언로드 속도는 저주파 여과기를 통과한 LDV 를 이용하여 측정된 신호와 램프 각도로부터 계산된다.

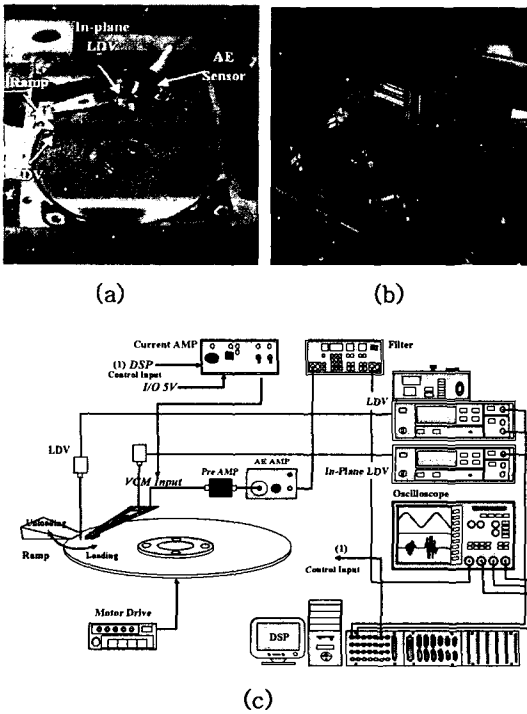


Fig.6 Schematic of Experimental setup

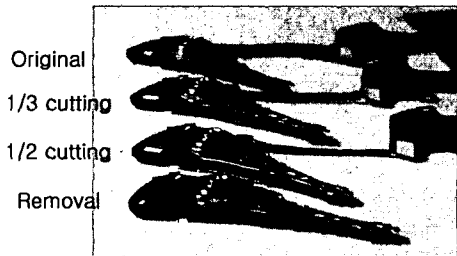


Fig.7 Flexible Cable

이번 실험은 플렉서블 케이블 상호 반발력이 로드-언로드에 미치는 영향에 대해 알아보고자

하는 것이므로, 플렉서블 케이블이 액추에이터에 가해지는 인장력 혹은 압축력에 변화를 주기 위하여 플렉서블 케이블을 원래형상의 너비의 1.0 배, 1/3 배, 1/2 배로 잘라서 로드 및 언로드 과정에 대해 각각 로드-언로드 실험을 수행하고, 플렉서블 케이블을 제거한 후 로드 및 언로드 과정에 대해 로드 언로드 실험을 수행한다. 실험에 사용되어진 플렉서블 케이블은 Fig. 7 과 같다.

### 3.2 로드-언로드 실험 결과

#### (1) 로딩 과정 (Loading Process)

플렉서블 케이블이 있을 경우에는 VCM 전압을 이용하여 서스펜션을 회전시키고, 플렉서블 케이블이 없는 경우에는 앞서 설명한 것과 같이 마이크로 드라이버 몸체를 회전시키면서 10 회씩 반복 측정하여 평균 (averaging) 함으로써 불규칙한 외란 (disturbance) 의 영향을 제거하였다. Fig.8 은 플렉서블 케이블을 제거하지 않은 시스템을 사용하여 VCM 전압을 가하여 액추에이터를 회전시키면서 속도를 측정된 신호를 보여준다. 이 신호는 로딩과정에서 서스펜션이 램프를 지나는 속도를 인플레인 LDV 로 측정하였다.

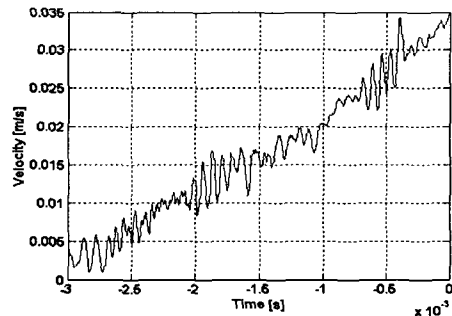


Fig.8 Lateral Velocity in Loading Process

Fig.9 는 플렉서블 케이블을 완전히 제거한 후 앞서 설명한 방법으로 측정된 후, 실험 결과 신호를 200Hz 의 저주파 여과기를 통과시킨다. 그리고 원상태의 플렉서블 케이블 가진 액추에이터를 가진 시스템을 가지고 실험한 결과와 비교해 놓은 것이다. Fig.9 에서 두 그래프를 비교해보면 로딩 과정의 초기에는 플렉서블 케이블을 가진 시스템의 실험결과 그래프가 플렉서블 케이블을 제거한 시스템의 실험 그래프보다 기울기가 큰 것을 볼 수 있다. 이는 플렉서블 케이블을 가진 액추에이터가 로딩 초기에 속도가 더 빠르게 증가한다는

것을 말한다. 반면 램프 끝단에 가까워지는 시점부터는 오히려 속도 그래프가 완만해 지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 속도변화가 플렉서블 케이블을 제거한 시스템에서는 나타나지 않는 것으로 보아 플렉서블 케이블 상호반발력의 영향으로 보인다. 그러므로 로딩 초기의 빠른 속도 증가와 로딩 마지막 부분에서 속도 그래프의 완만한 경사는 로드빔의 탭부분이 램프 위를 움직이는 동안 액추에이터가 플렉서블 케이블에 의해 인장력 혹은 수축력을 받기 때문에 나타나는 속도 변화라고 여겨진다.

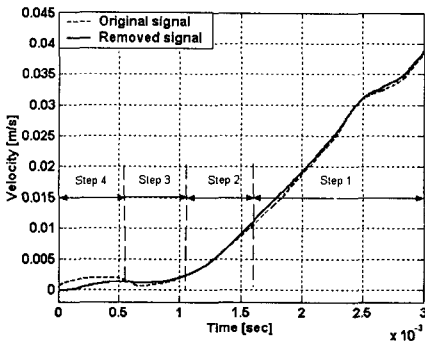


Fig.9 Comparison between two signals

Fig.10 은 플렉서블 케이블 상호반발력의 크기 변화가 로딩 속도에 미치는 영향을 그래프로 나타낸 것이다.

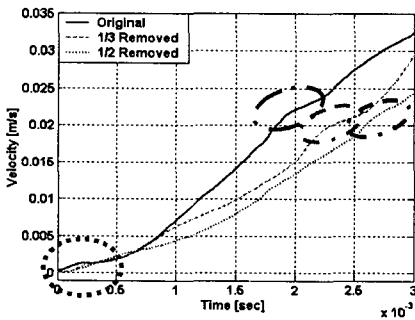


Fig.10 Effect of flexible cable change

플렉스 케이블을 1/3 과 1/2 로 자르고 실험한 결과는 원래 상태의 플렉스 케이블과 비교했을 때 그 폭이 좁아짐에 따라 로딩 초기에 플렉서블 케이블이 액추에이터를 미는 힘이 약해지기 때문에 속도를 천천히 증가시키고, 로딩과정의 마지막 부분에서는 액추에이터를 당기는 힘이 폭이 좁아짐

에 따라 약하게 되어 액추에이터의 로딩속도에 영향을 줄 수 있는 힘에 도달하기 위해서는 더 큰 변위가 요구되므로 램프형상에 가까워진 시점에서 속도 그래프상에 완만한 경사가 나타난다. 이는 로딩-언로드 과정에서 플렉스 케이블은 로딩동안은 더 많이 휘게 되는데 이때 탄성력에 의한 복원력이 액추에이터에 미치게 된다. 따라서 플렉스 케이블의 폭이 좁아지면 탄성력이 작아져 플렉스 케이블 상호반발력이 액추에이터의 운동에 영향을 미치는 힘이 되려면 변형이 크게 일어나는 램프 끝단 부근으로 이동함을 알 수 있다.

## (2) 언로딩 과정 (Unloading Process)

로딩 과정과 마찬가지로 원상태의 플렉서블 케이블을 가진 액추에이터를 VCM 으로 회전시키면서 언로딩 시 서스펜션의 탭 부분이 램프 위를 움직일 때의 속도 신호를 측정하여 Fig.11 에 나타내었다.

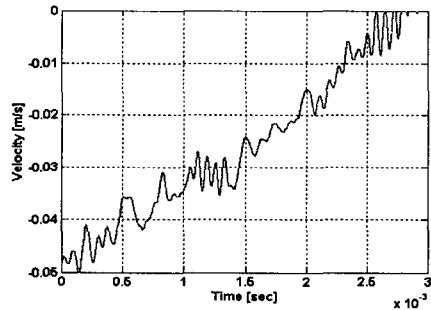


Fig. 11. Lateral velocity in Unloading Process

Fig.12 는 플렉서블 케이블의 영향을 알아보기 위하여 플렉서블 케이블이 있는 원래 시스템을 가지고 로드-언로드 실험을 수행하여 언로드 과정 동안에 램프 상에서의 속도를 측정하고, 플렉서블 케이블을 제거한 상태에서 언로드 과정의 램프 상의 속도를 측정하여 비교한 것이다.

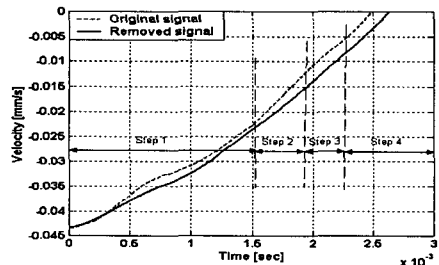


Fig. 12. Comparison between two signals

플렉서블 케이블이 달려있는 액츄에이터는 언로딩 초기에 속도 그래프상의 기울기가 갑자기 증가하는 것을 보여준다. 이것은 램프가 step 1 을 지날 때 플렉서블 케이블이 당기기 때문이다. 로딩 과정에서와 마찬가지로 플렉서블 케이블을 1/3, 1/2 로 잘라서 실험을 반복해서 Fig.13 에 나타내었다. 플렉서블 케이블의 폭이 좁아짐에 따라 언로딩 초기에 플렉서블 케이블이 액츄에이터를 당기는 힘이 약해지므로 언로딩 과정에서는 뚜렷이 나타나지 않는 것을 확인했다.

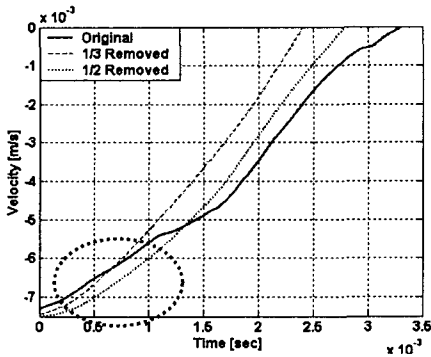


Fig. 13. Effect of flexible cable

#### 4. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 1 인치 마이크로 드라이브에서는 기존의 3.5 인치 하드디스크에서는 무시되었던 플렉서블 케이블 상호반발력이 로드-언로드 과정에 영향을 미치는 것을 보게 된다. 실험을 통해 확인한 바와 같이 로드 과정에서 플렉스 케이블은 시작 단계에서는 서스펜션을 밀어주고 마지막 단계에서는 당겨주는 것을 알 수 있다. 그리고 언로드 과정에서는 언로드 초기에 당겨주는 것을 알 수 있다. 이미 알려진 바에 의하면 슬라이드가 로딩하는 동안에 공기 부상력(air bearing force)이 충분히 생성되기 위해 속도를 작게 하고, 언로딩 시는 공기 부상력이 사라지는

시점에서 언로딩 속도를 증가시키는 것이 좋다. 그러므로 플렉서블 케이블 상호반발력의 당기는 힘과 미는 힘의 분기점을 정확히 알아내어 로딩 시는 공기압이 생성되는 위치에서, 언로딩 시는 공기 부상력이 사라지는 위치에서 플렉스 케이블이 당기는 힘이 최대가 되도록 램프형상을 디자인한다면 마이크로 드라이브와 같은 초소형 하드디스크에서의 로드-언로드 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터[CISD] (R11-1997-042-11001-0)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Q. H. Zeng and D. B. Bogy, 2000, Effects of Certain Design Parameters on Load/Unload Performance, IEEE Trans. Mag 36: 140-147
- [2] P. G. Levi and F. E. Talke, 1993, Effects of ramp profile and spindle speed on head-disk contact during rotary load/unload, IEEE Trans. Mag 29: 3918-3920
- [3] N. S. Tambe and B. Bhushan, 2002, Effect of load/unload process on friction/stiction and durability of head-disk interface, Microsystem Tech. 8: 409-418
- [4] M. Suk and D. Gillis., 1998, Effects of slider burnish on disk damage during dynamic load/unload, ASEM J. of Trib., vol. 120, pp. 332-338
- [5] Q. H. Zeng and D. B. Bogy, 1999, Effects of suspension limiters on the dynamic load/unload applications, IEEE Trans. Mag 35: 2490-2492
- [6] M. Suk and D. Gillis., 2000, Comparison of Friction Measurement Between Load/Unload Ramps and Suspension Lift Tabs Using Strain Gage and Actuator Current, IEEE Trans. Mag 36: 2721-2723