

소형 하드디스크 드라이브의 유연 케이블과 마찰력에 의한 영향에 대한 연구

Effect of Flexible Cable and Friction Force of Small Form Factor Hard Disk Drive

김석환*, 이용현*, 김기훈*, 이상직*, 박영필*, 박노철*, 박경수†, 정문교**
Seokhwan Kim, Yonghyun Lee, Ki-Hoon Kim, Sangjik Lee, No-Cheol Park,
Young-Pil Park, Kyoung-Su Park and Moon-Gyo Jung

(2009년 8월24일 접수; 2009년 9월21일 심사완료; 2009년 9월22일 게재확정)

Abstract

In recent years, the demand for portable digital devices such as cellular phone, digital camera, and MP3 player has been largely increased. To meet the requirements of such portable applications the information storage devices with smaller size, higher capacity, and lower power consumption are needed. A small form factor (SFF) HDD using a load/unload (L/UL) system is one of the appropriate alternatives to satisfy these requirements. Due to complexity of L/UL process and mechanism, it is required to investigate for better understanding the effects of design parameters. Among the various design parameters, flexible cable and friction force on the L/UL ramp become important to the dynamic characteristics of L/UL process as the system is miniaturized. The program for L/UL simulation which considers the effect of flexible cable and L/UL ramp is needed. Unfortunately, there is hardly any commercial program for the L/UL simulation except the Computer Mechanics Laboratory (CML) air bearing design program and the CML L/UL simulation code. Furthermore, the design parameters such as flexible cable and the L/UL ramp are not considered in the CML L/UL simulation code. So we embody the L/UL simulation considering flexible cable and an L/UL ramp by using the ANSYS/LS-DYNA. In this thesis, the effects of flexible cable and friction force on the dynamic characteristics and the performances of the L/UL process are studied. Numerical simulation and related experiments are carried out and compared each other

Key Words : Mirco-drive, Flexible Cable, Load/Unload, Friction Force, Dimple Separation

1. 서론

오늘날 정보화가 급속하게 진행되면서 모든 정보는 디지털화되고, 정보통신과 멀티미디어의 발달로 인해 보다 많은 정보를 보다 빠르게 전달하여야 할 필요성이 커지고 있다. 특히, 모바일 기기를 중심으로 한 고용량, 소형의 정보저장기기의 요구가 커지고 있다. 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 하드디스크 드라이브(HDD)의 기술 중의 하나가 로드/언로드 기술이다. 로드/언로드 시스템은 외부의 충격에 강하고 전력소모가 적으며 높은 면밀도 등의 특성을 가지고 있어 휴대용 정보저장기기로 많은 이점을 가지고 있다. 로드/언로드시 가장 중요한 설계 변수는 슬라이더와 디스크 간의 충돌로 인한 디스크와 슬라이더의 손상과 언로드시 적용되는 램프힘 등이다.

로드/언로드 기술은 시뮬레이션을 통한 수치적 해석방법이 개발되었고, 로드/언로드에 영향을 미칠 수 있는 수많은 인자들에 대한 연구가 Bogy 등 [1]에 의해 진행되었다. 공기베어링표면(ABS)형상, 서스펜션 리미터의 조건, 초기 슬라이더의 동적 특성, 로드/언로드 속도, 램프의 형상 등 많은 요소들에 대해 연구가 진행되었다. 하지만, 로드/언로드 시뮬레이션 프로그램은 로드/언로드시 램프와 서스펜션과의 마찰력과 유연 케이블에 대한 로드/언로드에 대한 동특성 변화를 고려하지 않았다. 따라서, 이러한 요소들에 대한 하드디스크 로드/언로드 시스템의 동특성 영향에 대한 연구가 필요하다. 소형 드라이브에 사용되는 유연 케이블은 비선형의 동특성은 가지고 서스펜션의 거동에 영향을 준다. 또한 서스펜션 리프트 탭이 로드/언로드 램프 위에 위치하고 있는 경우의 리프트 탭과 램프 사이에 작용하는 마찰력은 로드/언로드 속도와 전력 소모에 영향을 준다. 따라서 유연 케이블과 서스펜션 리프트 탭과 램프 사이의 마찰력에 대한 영향을 연구하는 것은 소형 하드디스크 드라이브의 성능을 개선하는데 크게 작용할 것이다.

† 연세대학교 기계공학과
E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-4677
* 연세대학교 기계공학과
** 엘지전자

2. 수치해석과 FE 모델 수립

2.1 램프 형상과 리프트-탭의 수치 모델

전력소모와 로드/언로드 속도 제한의 관점에서 볼 때, 서스펜션 리프트-탭이 램프 위에서 거동할 때의 동특성을 해석하는 것이 중요하다. 먼저 로드/언로드 과정에서 상호작용하는 힘을 마찰력을 포함하여 정의하였다. 유연 케이블과 상호작용하는 힘을 분석하기 위해 Fig.1에서 보는 바와 같이 램프면을 4가지 스텝으로 나누었다. 로드 과정의 경우 첫 번째 스텝은 경사면이 시작되기 직전의 구역으로 정의하였다. 두 번째 스텝은 경사면으로 정의하였고(θ_1), 세 번째 스텝은 램프의 가장 높은 높이를 가지며 일정한 높이를 유지하는 구간으로 정의하고, 마지막 스텝은 θ_2 의 경사를 갖는 경사면으로 정의하였다. 언로드 과정의 경우는 로드와 반대로 순서로 정의하였다. 로드 과정에서의 각 스텝에서의 리프트 탭의 지배방정식과 자유물체도는 Fig.2에서 보는 것과 같다. 서스펜션의 리프트 탭의 무게는 HDD 액추에이터에 비해 매우 작으므로 무시하였다. 각각의 수식에 사용된 변수는 램프 각도와 램프의 높이, 그리고 리프트 탭에 작용하는 힘들이다. p 는 서스펜션의 프리로드를 나타낸다. F_{vcm} 은 액추에이터에 의한 힘이다. F_x 는 램프 경사와 평행한 방향의 힘이고 F_y 는 램프 경사면에서 수직인 방향에서 적용된 힘이다. N_i 는 각 스텝의 수직 방향으로 적용되는 힘이며, F_{ni} 는 각 스텝에서 서스펜션과 슬라이더의 무게로 인해 생기는 서스펜션의 변형으로 인한 힘을 나타내었다.

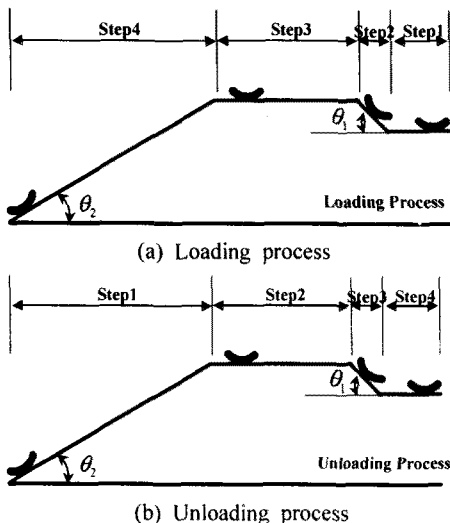
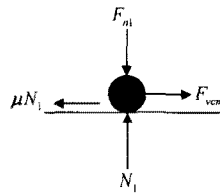


Fig. 1 Each step for ramp profile during L/UL process



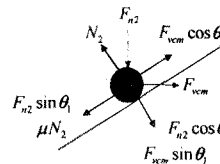
$$F_x = F_{vcm} - \mu N_1$$

$$F_y = N_1 - F_{n1} = 0$$

$$F_{n1} = mg + p + kh_1$$

where $p = \text{preload}$

Step1

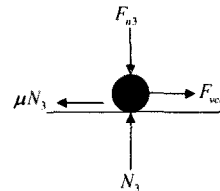


$$F_x = F_{vcm} \cos \theta_1 - F_{n2} \sin \theta_1 - \mu N_2$$

$$F_y = N_2 - F_{vcm} \sin \theta_1 - F_{n2} \cos \theta_1 = 0$$

$$F_{n2} = mg + p + k[h_1 + \delta h(t)]$$

Step2

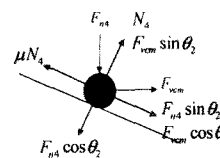


$$F_x = F_{vcm} - \mu N_3$$

$$F_y = N_3 - F_{n3} = 0$$

$$F_{n3} = mg + p + k(h_1 + h_2)$$

Step3



$$F_x = F_{vcm} \cos \theta_2 + F_{n4} \sin \theta_2 - \mu N_4$$

$$F_y = N_4 + F_{vcm} \sin \theta_2 - F_{n4} \cos \theta_2 = 0$$

$$F_{n4} = mg + p + k[h_1 + h_2 - \delta h(t)]$$

Step4

Fig.2 Governing equation and free-body diagram of the lift tap

또한, μ 는 램프의 마찰계수이고, θ_1 과 θ_2 는 램프 경사면의 경사각이다. 위에서 구한 관계식을 통해서 각 스텝별로 리프트 탭에 적용되는 수직, 수평방향의 힘을 구하여 다음절에서 사용한 ANSYS/LS-DYNA를 이용한 시뮬레이션에 적용하였다.

2.2 FE 로드/언로드 모델 수립

이번 절에서는 ANSYS/LS-DYNA를 이용하여 FE(Finite Element) 로드/언로드 모델을 수립하였다. ANSYS/LS-DYNA는 비선형의 구조해석을 짧은 시간에 수행하기에 유리한 프로그램이기 때문에 본 연구의 해석에 적합하다고 판단하였다. 시뮬레이션은 크게 2가지 과정으로 진행되었다. Fig.3에서 보는 것처럼 실제 로드/언로드 시스템과 FE 모델과의 상관관계를 발전시켜나가며 수행하였다. 첫 번째로는 실제 액추에이터 시스템의 모달 해석

을 수행하였다. 모달 해석을 통해 얻은 공진주파수를 시뮬레이션 모델에 적용하여 FE 모델을 수립하였다. 로드/언로드시의 수평방향 속도의 변화를 실험과 시뮬레이션 결과를 각각 구하여 비교하고, 램프와 리프트 탭간의 충돌 조건과 리프트 탭의 형상, 매쉬 크기, 마찰 조건 등 시뮬레이션 조건을 변화하여 실제 시스템과 맞는 수정된 FE 모델을 구축하였다. Fig.4 는 앞서의 과정을 통해 수립한 FE 로드/언로드 동적 모델이다. 로드와 언로드 과정에서 적용되는 구속조건의 차이가 있기 때문에 독립

적으로 수립하였다. 구축한 모델은 액추에이터와 램프, 그리고 유연케이블 등으로 구성되었다. 로드 과정에서는 초기 VCM 힘을 적용하였다. 공기베어링 힘은 슬라이더의 중앙에 적용한다고 가정하였다. 로드/언로드 과정시 적용되는 공기베어링 효과는 CML 로드/언로드 시뮬레이션을 통해 구하였다. 덤플의 프리로드는 1.52mN을 주었고, 리프트 탭이 램프 경사면을 이동할 때 서스펜션의 변형량을 이용하여 수직방향의 힘을 구하였다. Fig.5에서 확인할 수 있듯이 시뮬레이션 결과와 실험결과가 로드/언로드시에 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 언로드 과정의 경우 시뮬레이션 결과가 초기에 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 시뮬레이션의 초기 속도 때문에 발생하는 것이다. 언로드 과정의 시뮬레이션 결과 역시 실험결과와 유사한 경향을 보인다.

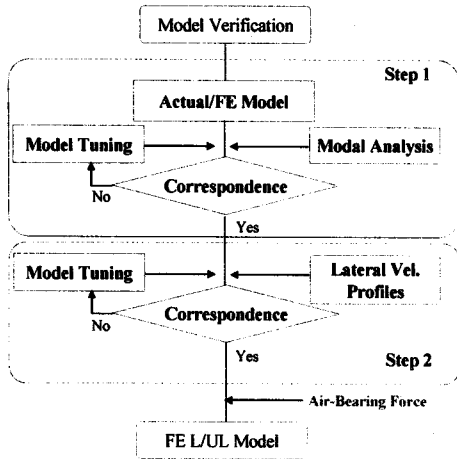
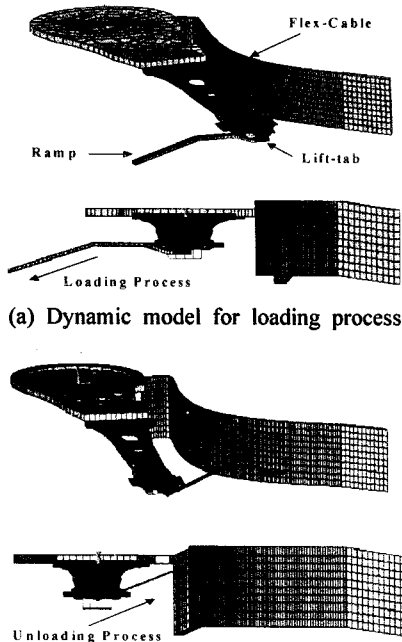


Fig.3 Flow chart for verification of FE model



(a) Dynamic model for loading process
(b) Dynamic model for unloading process
Fig.4 FE L/UL model using ANSYS/LS-DYNA

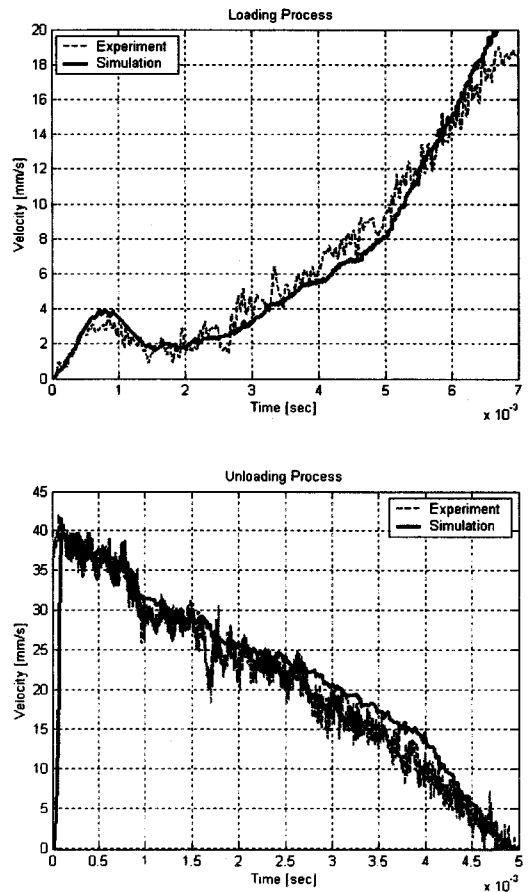


Fig.5 Comparison of velocity profiles for the L/UL process

3. 시뮬레이션

3.1 로드/언로드 과정의 반작용 힘

앞서 밝힌 바와 같이 로드/언로드 과정의 상호작용되는 힘에 대한 연구는 하드디스크의 성능을 향상시키는 데 매우 중요하다. Fig 6과 Fig 7는 로드/언로드시 리프트 탭이 램프위를 이동할 때의 반작용 힘을 보여준다. 로드 과정의 경우 반작용 힘의 최대치는 스텝 2가 끝나는 부분에서 나타나고, 스텝 1과 스텝 3에서 반작용힘은 일정한 값을 갖게 되는데 이것은 램프의 경사면의 각도가 변화하지 않기 때문이다. 스텝 4에서는 전체 수직방향의 힘이 램프경사면이 낮아짐에 따라 일정하게 줄어들게 된다. 언로드 과정에서의 반작용 힘은 Fig 7에서 확인할 수 있다. 스텝 1은 에어베어링 힘이 존재하고 반작용힘이 증가한다. 리프트 탭이 램프의 경사면을 다 올라가게 되면 서스펜션의 변형량이 커져서 수직방향의 힘이 증가하게 된다. 이같이 서스펜션의 탭을 끌어당기는 힘은 마찰력을 증가시켜 언로드 방향과 반대 방향으로 작용한다. 결과적으로 전체 반작용힘은 이 과정에서 급격하게 증가하고, 스텝의 마지막 과정에서 최대치를 갖게 된다. 스텝 4에서는 경사면의 감소에 따라 반작용힘은 감소하게 된다.

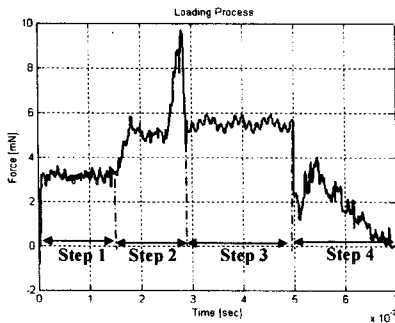


Fig.6 Variation of counteractive force on ramp (loading process)

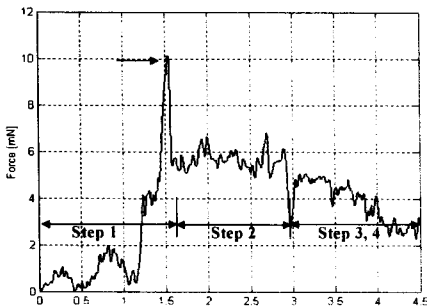


Fig.7 Variation of counteractive force on ramp (unloading process)

3.2 마찰계수의 영향

램프의 마찰계수는 램프의 표면거칠기와 램프의 재질 등에 따라 결정된다. 또한 로드/언로드 과정이 지속적으로 진행됨에 따라서 변화할 수 있다 [2~4]. Bergard Hiller 등[5]은 마찰계수의 변화에 대해 연구하였다. 마찰계수의 변화는 로드/언로드의 속도에 영향을 미치기 때문에 마찰계수의 변화에 대한 연구가 필요하다. Fig. 8은 마찰계수의 변화($\mu=0.3$, $\mu=0.25$, $\mu=0.2$)에 따른 반작용힘의 변화를 보여준다. 전체 과정에서의 마찰계수의 효과는 크지 않지만 마찰계수가 커지면 반작용 힘의 최대치가 커진다. 따라서, 언로드 속도가 반작용 힘의 최대치로 구할 수 있는 언로드 속도의 한계보다 커져야 한다. 마찰계수가 0.3이상인 경우 최대 반작용 힘은 스텝 1이 끝날 때 10mN 정도이고, 마찰계수가 0.25인 경우는 9mN, 0.2인 경우에는 8mN으로 확인되었다.

3.3 유연 케이블 바이어스 힘

유연 케이블은 비틀림 용수철의 역할을 하게 되어 구동기의 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 w/o 유연케이블, 1/3 유연케이블, 1/2유연케이블, 1 유연케이블 등 4가지 모델을 사용하였다. w/o 유연케이블은 유연케이블이 없는 모델이며, 1/3, 1/2 유연케이블은 유연케이블을 1/3, 1/2만 남긴 모델이며, 1 유연케이블은 초기 모델을 뜻한다. 시뮬레이션 결과를 살펴보면 모델별 영향은 스텝 1과 4에서 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig 9는 로드과정에서의 유연 케이블의 영향을 나타낸 것이다. 유연케이블은 리프트 탭에 힘을 주게 되고 스텝 1에서의 반력이 줄게 된다. 반대로 비선형 스프링은 인력으로 작용하여 스텝 4에서의 반작용 힘의 증가의 결과를 가져온다. 그러나 로드 과정의 스텝 2와 3에서는 크게 영향을 끼치지 못한다. 또한, Fig 9에서 확인할 수 있듯이 유연 케이블은 반작용

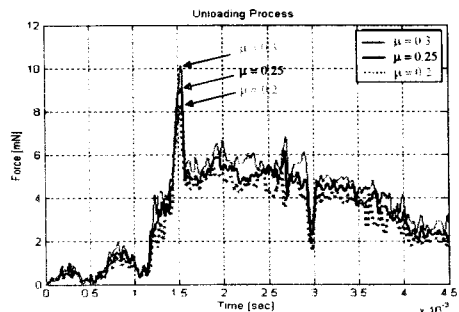


Fig.8 Counteractive force at different friction coefficient

힘의 최대치에는 영향을 끼치지 못한다. 결국 유연 케이블은 로드과정의 스텝 1과 3에서는 인력과 척력으로 작용한다. Fig 10은 언로드 과정에서의 유연 케이블 바이어스 힘의 영향에 대한 그래프이다. 언로드 과정에서 반작용력은 로드 과정에서와 다른 경향을 보인다. 스텝 1의 마지막 부분의 최대치 부분을 제외하고는 모델별 크게 차이가 없다.

4. 실험

램프 경사면에 대한 반작용 힘을 측정하는 것이 실험적으로 어렵기 때문에 본 연구에서는 수평방향 속도를 측정하여 분석하는 방식을 채택하였다. 반작용 힘에 의해 수평방향 속도의 변화가 생기기 때문에 수평방향 속도를 측정하여 반작용 힘의 영향에 대한 평가가 가능하다. 수평방향 속도는 회전 중심 부근에서 측정하여 서스펜션의 길이와 측정 지점에 대한 비례식을 통해 실제 서스펜션 끝단의 속도를 추정하였다. Fig. 11은 실험을 통해 구한 로드 과정시 수평방향 속도를 나타낸다.

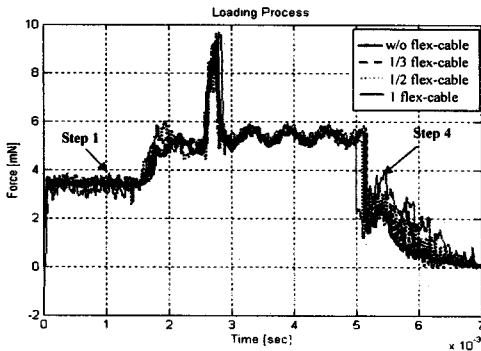


Fig.9 Counteractive force with respect to flex-cable (loading process)

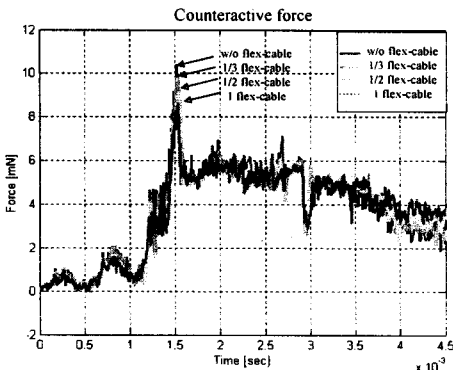


Fig. 10 Counteractive force for different flex-cable(unloading process)

Fig. 11에서 보는 것처럼 스텝 1과 2에서는 수평방향 속도가 증가하였다가 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 수직방향으로 작용하는 힘의 증감에 따른 것이다. Fig 12는 유연 케이블의 두께에 따른 수평방향 속도를 나타낸다. 각각의 경우에 유연 케이블에 의한 힘에 의해 (A) 부분에서 수평방향의 속도 변화가 생긴다. 그래프에서 보는 것과 같이 수평방향의 속도는 유연 케이블 힘의 크기에 따라 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있다. Fig 13은 30mm/s로 언로드할 경우의 1/3 유연케이블과 1 유연케이블의 수평방향 속도이다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 유연 케이블의 영향은 스텝 1과 2에서는 거의 없지만 스텝 3과 4에서는 급격하게 증가한다. 스텝 3과 스텝 4에서의 가속도는 각각 -6.25mm/s^2 , -1.86mm/s^2 이다. 수평방향 속도의 감소는 각 스텝에서 액추에이터에 의해 반대방향으로 힘이 적용된다는 것을 확인해준다. 즉, 1 유연케이블의 경우가 1/3 유연케이블 모델에 비해 유연 케이블 바이어스 힘으로 인해 더 큰 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 유연케이블의 바이어스 힘이 언로드 과정시 구동기의 동특성에 큰 영향을 주지는 못한다.

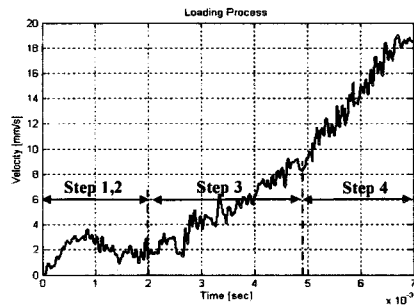


Fig. 11 Lateral velocity profile with respect to flex cable force

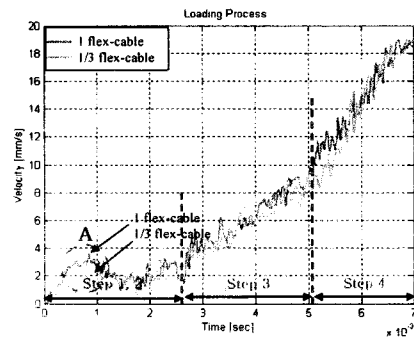


Fig. 12 Lateral velocity profiles for 1 and 1/3 flex-cable

참고문헌

- [1] D.B Bogy and Q. H. Zeng, 2000, "Design and operation condition for reliable load/unload systems", Tribol. Int., Vol 33, pp.357-366
- [2] Nikhil S. Tambe, Bharat Bhushan, 2003, "Durability studies of head-disk interface using padded and load/unload picosliders for magnetic rigid drives", Wear 255, pp. 1334-1343
- [3] J. R. Yaeger, 2002, "Ramp Wear and Debris From Load/Unload Lift-Tab Roughness", Transaction of ASME, Journal of Tribology, VOL. 38, No. 5, pp. 2126-2128
- [4] N. S. Tambe and B. Bhushan, 2002, "Effect of Load/Unload Process on Friction/Stiction and Durability of Head-disk Interface", Microsystem Technologies , pp. 409-418
- [5] B. Hiller, J. R. Yager and R. G. Sonnenfeld, 2001, "Ramp Load/Unload Friction Dependence on Temperature, Velocity and Ramp Material", IEEE transactions on magnetics, Vol. 37, No. 4, pp. 1852-1854

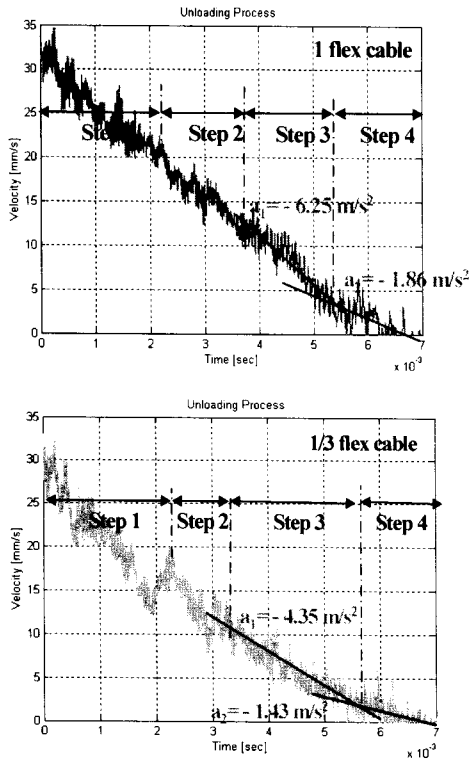


Fig. 13 Lateral velocity profiles for different flex-cable

5. 결론

본 연구는 램프 위에서 발생하는 마찰력과 플렉스 케이블의 바이어스등을 향상된 유한요소 로드-언로드 모델 및 실험을 통해서 조사하였다. 그 시뮬레이션 결과를 통하여 큰 마찰계수는 진행방향의 반대로 작용하는 저항력을 크게 하는 역할을 수행한다는 것을 밝혔으며, 플렉스 케이블의 반력은 로딩시에는 액츄에이터가 로딩할 수 있도록 밀어주는 힘으로 작용을 하고 언로딩시에는 언로딩 방향으로 밀어주는 힘으로 작용한다는 것을 규명하였다. 그러나 언로딩 시의 그 힘의 크기는 작아 그 역할은 미비하다 할 수 있다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R17-2008-040-01001-0).