

초소형 하드디스크에서 램프 형상 분석 및 설계 프로세스 연구

Design Procedure and Analysis of Ramp Profile in SFF HDD

이용현[†], 박경수*, 박노철**, 양현석***, 박영필***

Yong-Hyun Lee[†], Kyoung-Su Park*, No-Cheol Park**,

Hyun-Seok Yang*** and Young-Pil Park***

Abstract

Vertical L/UL (Load/Unload) velocity is very important parameter to determine the L/UL performance, and the vertical velocity is determined by the actuator velocity and the ramp profile. However, it is not easy to precisely control the actuator rotating velocity during the L/UL process. Especially in emergency parking, servo system doesn't operate, it is impossible to control an actuator velocity. Then, the vertical unloading velocity depends on only ramp profile. The ramp height and the sliding length for L/UL process in SFF (Small Form Factor) HDD are restricted due to slimness and small media. For these reasons, it is very difficult to design the ramp profile in SFF HDD. Therefore, this study analyzes the unloading dynamic characteristics for various ramp profiles and makes the thesis for ramp profile design.

Key Words : Load/Unload(로드/언로드), Ramp Profile(램프 형상), Ramp Design Procedure(램프 설계 과정)

1. 서론

정보화 시대에서 하드디스크드라이브(HDD)의 발전 방향은 대용량화와 빠른 데이터 전송, 그리고 소형화이다. 특히 휴대용 디지털기들이 널리 사용됨에 따라 대용량의 초소형 HDD의 연구가 진행되고 있다. 그런데 대용량의 초소형 HDD를 개발하는데 있어 비 동작 시 충격에 강하고 낮은 소비전력을 사용하며, 슬라이더의 내구성을 증가시킬 수 있는 로드/언로드(L/UL)기술이 반드시 필요하다.[1] Bogy와 Zeng[2]은 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. Albrecht와 Sai[1]는 램프에 의해 손실되는 디스크의 저장공간을 최소화하기 위하여 램프의 높이에 따른 수직방향으로의 최소한의 공차가 필요하다는 것을 보여주었다.

이제까지 L/UL 성능에 영향을 미치는 각종 설계 변수들에 대해서 시뮬레이션 및 실험 등 많은 연구가 진행되어왔다.[2]-[4] 많은 설계 변수들 중에서 L/UL의 수직속도가 램프 형상과 액츄에이터의 속도에 의해 결정되지만, 언로드 과정에서는 액츄에이터의 속도를 조절하기 어렵고, 일단 램프가 언로드 되면 램프 형상에 의해서만 속도가 변화하므로 램프 형상이 더욱 중요하다.[4]

이에 본 연구에서는 이전 연구인 초소형 HDD에서 램프 형상에 대한 유한요소해석과 실험에 따른 수직 속도에 따른 영향, 램프 각도에 의한 영향을 통해 램프를 제작하는데 있어 제한된 조건에 부합하면서 언로드 성능을 향상시킬 수 있는 램프 설계 프로세스를 제시하고 실제 시스템에 적용 가능성을 확인하고자 한다.

[†] 연세대학교 기계공학과 대학원
E-mail : genfair@yonsei.ac.kr Tel : (02) 2123-4677
· 삼성전자 스토리지 사업부
.. 연세대학교 정보저장협동과정
... 연세대학교 기계공학과
논문접수일 (2005년 5월 4일)

2. 램프 형상에 대한 동특성 해석

2.1 유한요소모델 해석

초소형 하드디스크의 L/U/L 모델을 ANSYS/LS-DYNA 를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.[3] Fig.1 은 L/U/L 에 대한 유한요소모델이며, 실험의 검증을 통해 실제 모델과 유사하게 튜닝하여 램프 형상의 변화를 통한 시뮬레이션 결과에 대해 신뢰성을 확보하였다.

수립된 유한요소모델을 바탕으로 램프의 초기각도를 변화시켜 시뮬레이션을 수행하여, 램프 초기각도에 따른 영향을 살펴보았다.[3]

또한, 공기베어링의 브레이킹 되는 지점을 고려하여 언로딩 성능을 향상시킬 수 있도록 램프의 각을 변화시킨 램프 형상에 대해 시뮬레이션을 수행하였고, 램프를 제작하여 실험을 통해 검증하였다.[3]

연구 결과, 언로딩 과정에서 음압의 영향을 최소화시켜 슬라이더와 디스크의 컨택을 방지하고, 빠른 언로딩 속도를 가능하게 하는 램프를 통해 언로딩 성능을 향상시키고 기록 면적을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.[3]

2.2 램프 형상에 대한 언로딩 동특성 해석

언로딩 시 램프의 형상에 따른 동특성을 알고 향상된 램프 설계에 대한 기준을 제시하기 위해 수직 속도와 램프 각도의 영향을 실험을 통해 살펴보았다.[4]

서스펜션 리프트 탭과 슬라이더의 변위를 측정하여 수직 속도에 따른 실험 결과를 통해 동일한 램프에서 수직 속도에 의한 영향을 분석하였다. 슬라이더와 디스크 컨택 여부를 결정짓는 수직 속도인 임계 언로딩 속도를 구할 수 있었다.

수직 속도에 대한 영향을 살펴본 실험에서 임계 언로딩 속도 이하에서 램프 각도를 변화시켜 실험한 결과 램프의 각이 증가할수록 언로딩은 빨라지지만 슬라이더와 디스크 컨택과 관계된 처짐 변위가 발생함을 알 수 있었다.[4]

램프의 각을 유한요소해석의 결과를 토대로 변화 시켜 측정한 결과 작은 각도에서 언로딩이 시작하여 큰 각에서 공기베어링이 사라지는 것이 큰 각에서 작은 각으로 변하는 것보다 좋은 언로딩 성능을 보인다는 것을 확인할 수 있었다.[4]

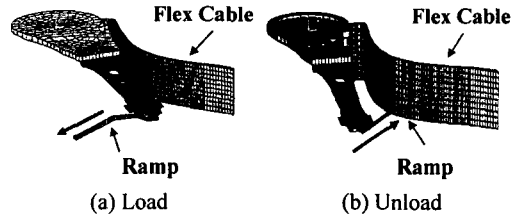


Fig.1 Dynamic FE Model for load/unload process

서스펜션 탭이 램프와 만나는 위치와 공기베어링이 사라지는 위치가 램프를 설계할 때 중요한 지점이며, 램프 설계 프로세스 수립 시 고려되어야 한다.

3. 램프 설계 프로세스

3.1 램프 설계 방정식

언로딩 과정 동안 램프 위에서 서스펜션과 슬라이더의 모션은 3 단계로 나눌 수 있다. 각 단계의 높이를 그 단계에서의 램프 각도와 길이에 대한 함수로 계산하고 슬라이더의 공기베어링형상과 디스크에 의한 음의 힘은 선형 함수로 표현한다.

Fig.2 는 램프 위에서 각 단계의 위치에 대한 길이 및 높이, 각도를 표시한 것이다. 1 단계는 댄플이 분리되어 있지 않은 상태로 댄플 힘(f_{dm})이 음의 힘(f_{neg})보다 큰 경우이다.

2 단계는 댄플은 분리되었지만, 리미터에 걸리지 않은 상태로, 음의 힘이 댄플 힘보다는 크지만 리미터 힘(f_{lim})보다는 작은 경우이다.

3 단계는 리미터에 걸려 있는 상태로 음의 힘이 리미터 힘보다 큰 경우이다. 각 단계에서 힘의 관계를 이용하여 램프 길이 및 높이, 각도에 대한 램프 설계 방정식을 구할 수 있고 식(1)-(10)과 같다.

1 단계 : no dimple separation

$$f_{lift-up} \leq f_{pre} + f_{neg} \quad (\because f_{neg} = \alpha v_0 \sin \theta_1 + b) \quad (1)$$

$$\text{and } f_{lift-up} \leq f_{pre} + f_{dm} \quad (2)$$

$$k_s h_1 = f_{pre} + f_{dm} \quad (2)$$

$$h_1 = (f_{pre} + f_{dm}) / k_s \quad (3)$$

$$l_1 = (f_{pre} + f_{dm}) / (k_s \tan \theta_1) \quad (3)$$

2 단계: dimple separation/ no limiter engagement

$$f_{lift-up} \leq f_{pre} + f_{neg} (\because f_{neg} = \alpha v_0 \sin \theta_2 + b) \quad (4)$$

and $f_{lift-up} - (f_{pre} + f_{dim}) \leq f_{lim}$

$$k_{sep} h_2 = f_{pre} + f_{dim} + f_{lim} - f_{lift-up(1)} \quad (5)$$

$$h_2 = (f_{pre} + f_{dim} + f_{lim} - f_{lift-up(1)}) / k_{sep}$$

$$l_2 = (f_{pre} + f_{dim} - f_{lift-up(1)}) / (k_{sep} \tan \theta_2) \quad (6)$$

3 단계: limiter engagement

$$f_{lim} < f_{lift-up} - f_{pre} \leq f_{neg} (\because f_{neg} = \alpha v_0 \sin \theta_3 + b) \quad (7)$$

$$k_{lim} h_3 = f_{neg} + f_{pre} - f_{lift-up(1)} - f_{lift-up(2)} \quad (8)$$

$$h_3 = (f_{neg} + f_{pre} - f_{lift-up(1)} - f_{lift-up(2)}) / k_{lim}$$

$$l_3 = (f_{neg} + f_{pre} + f_{lim} - f_{lift-up(1)} - f_{lift-up(2)}) / (k_{lim} \tan \theta_3) \quad (9)$$

Subject to :

$$l_1 + l_2 + l_3 \leq L_2, \quad \theta \leq \arcsin \left(\frac{v_c}{v_0} \right) \quad (10)$$

f_{neg} 는 언로딩 속도와 램프 각도의 함수로 상수 a 와 b 는 각각 -0.16 과 -13.6 이다.[4] 각 단계에 사용된 램프의 설계 변수들은 Table 1 과 같다.

각 방정식의 계산 결과, 식(2), (5), (8)을 통해 램프의 높이를 결정할 수 있고, 식(3), (6), (9)를 통해 램프의 길이를 결정할 수 있다.

그러나, 각 단계의 램프 길이는 식(10)에 의해 설계된 전체 램프 길이를 초과할 수 없다. 램프 형상은 식(10)을 만족시키는 램프의 길이와 각도로 설계되어야 한다. 각도를 결정함에 있어 중요한 요소는 임계 언로딩 속도(V_c)이다. 임계 언로딩 속도란 슬라이더와 디스크의 컨택 여부를 결정하는 속도로서, 기존의 램프 L/U/L 모델에서 컨택의 경계가 되는 속도이다.

이것은 앞선 연구에서 실험을 통해 확인하였다.[4] 이 속도보다 빠른 경우 충돌 가능성이 증가하고 느릴 경우 충돌이 발생하지 않는다. 이 임계 언로딩 속도와 시스템의 초기 언로딩 속도와의

상관 관계가 식(10)이고, 이를 통해 설계하고자 하는 램프 형상의 각도를 구할 수 있다.

기존의 램프 형상은 각 단계에서의 각도 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 가 같은 경우이다. 각 단계의 각도가 모두 같다면 Fig.3 의 시뮬레이션 결과를 구할 수 있다. 이는 언로딩 속도에 대해 설계 가능한 램프 각도를 보여준다.

Fig. 3 에서 램프 각도의 상한은 임계 언로딩 속도로 정의되고, 하한은 공차비(r)에 의해 결정된다. 공차비는 램프를 설계할 때, 디스크의 진동에 의해 탭이 램프 위에서 언로딩되기 시작하는 위치가 변화하는 것을 고려하기 위한 값이다. 만약 언로딩 속도가 150mm/s 일 때, 임계 언로딩 속도가 50mm/s 이고 공차비가 0.85 라면, 설계 가능한 램프 각도는 7°에서 20°사이에서 결정된다. 이를 통하여 램프의 초기 램프 각도를 설정할 수 있다. 역으로, 램프 각도가 결정되면 언로딩 성능에 영향을 미칠 수 있는 언로딩 속도에 대한 규정이 가능하게 된다.

4. 램프 설계 및 실험 분석

4.1 램프 모델 설계

이전 실험 결과를 바탕으로 임계 언로딩 속도를 50mm/s, 초기 램프 각도를 11.3°로 하고 긴급상황에서의 언로딩 수직 속도를 150mm/s 로 설정한다. 이전 연구에서 언로딩 시 공기베어링이 사라지는 위치에서의 램프 각도를 증가시키는 것이 언로딩 성능을 향상시킬 수 있음을 확인 하였다.[3][4] 따라서, 램프 설계 프로세스에 의한 시뮬레이션을 통해 설계한 램프 모델도 Fig.4 에서 보듯이 가변각을 가지고 있는 램프 모델이다. 모델 A 는 11.3°에서 언로딩하여 10.9°에서 공기베어링

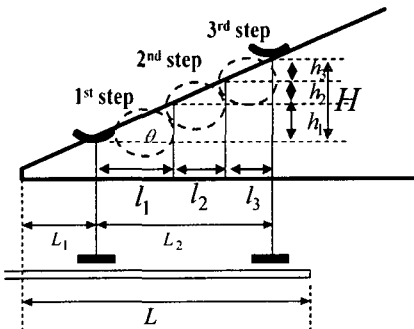


Fig.2 Schematic for ramp profile design

Table 1. Parameters used in ramp design

f_{pre}	1.5g	k_t	1280N/m
f_{lim}	2.21mN	k_{sep}	55N/m
f_{dim}	1.5mN	k_{lim}	860N/m
f_{neg}	$\alpha v_0 \sin \theta + b$	L_2	700 μ m
V_c	50mm/s	r	0.5~0.9

이 사라지게 함으로써 음압을 감소시키고, 이후 15.9°로 빠르게 언로딩을 하게 설계한 것이다. 모델 B는 모델 A와 같지만 뒤편이 분리되는 구간의 램프 경사를 높여 분리구간을 짧게 하여 기록밀도를 향상시키기 위한 램프 모델이다.

Table 2는 각 모델의 치수를 나타낸 것이고, Table 3은 각 모델의 탭에 작용하는 힘과 전체 램프의 길이를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과를 통해 모델 B의 경우 전체 언로딩 길이가 줄어든 만큼 램프가 디스크를 덮고 있는 길이가 감소하여 120 트랙의 저장용량이 증가함을 확인할 수 있다.

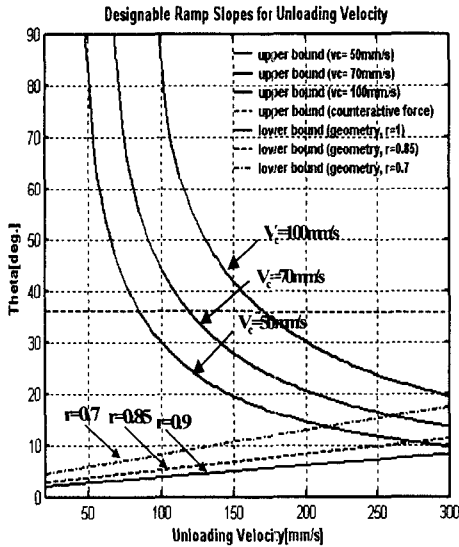


Fig.3 Effect of tolerance ratio and critical velocity on the designable slope

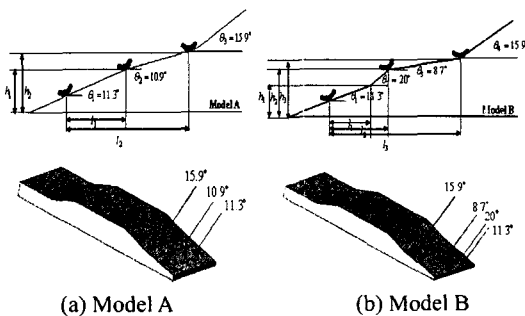


Fig.4 Advanced ramp design

Table 2. Required height and length for each step

		Model A	Model B
h	h_1 (μm)	12.68	12.68
	h_2 (μm)	36.2	36.2
	h_3 (μm)	41.1	41.1
l	l_1 (μm)	63.5	63.5
	l_2 (μm)	181.2	99.5
	l_3 (μm)	213.4	268.6
θ	θ_1	11.3°	11.3°
	θ_2	10.9°	20°
	θ_3	15.9°	8.7°
	θ_4	-	15.9°

Table 3. Total forces, length and height for each of models

	Model A	Model B	
Ramp	11.3°/10.9°	11.3°/20°/8.7°	
Total tab force(mN)	54.3	54.3	Emergency Case
Total length(μm)	458.1	431.7	Emergency Case
GB margin @ 115k TPI	-	0.0264/0.000221 = 120tracks	Emergency Case
Total height(μm)	90	90	Emergency Case

4.2 실험 분석

시뮬레이션으로 설계된 램프 모델의 검증을 위해 실험을 수행한다. 실험은 램프 형상에 따른 서스펜션 리프트 탭과 슬라이더의 거동을 확인하기 위하여 2대의 LDV를 이용하고, 시스템의 액추에이터를 고정시키고 램프를 회전시키는 실험 장치를 구성하였다.[3,4] Fig.5는 실험을 수행한 실험 장치를 나타낸다.

Fig.6은 두 모델의 다양한 수직속도에 대하여 언로딩 동특성을 실험한 결과이다. 그래프를 살펴보면 각 실험 결과에 대해 처짐 변위가 발생하지 않음을 알 수 있다.

또한 실험과 시뮬레이션에 의해 계산된 언로딩 동적 특성을 정리한 Table 4에서 음압에 영향을 미치는 수직방향의 탭 변위는 실험과 시뮬레이션 결과가 유사함을 확인할 수 있다. 즉, 시뮬레이션

을 통한 램프 설계 프로세스에 대한 검증을 수행하였으며 프로세스에 의해 램프를 제작하여 실험을 수행한 결과 이전 언로딩 동특성 실험에서 수직 속도가 90mm/s 이상에서 발생하였던 처짐 변위 [4]가 150mm/s 인 긴급상황의 경우에서도 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

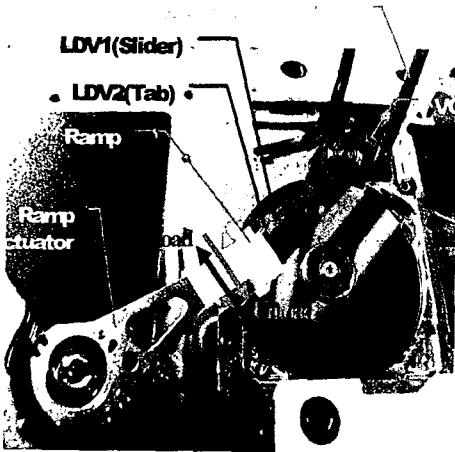
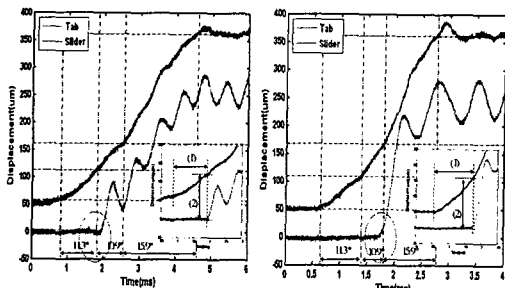
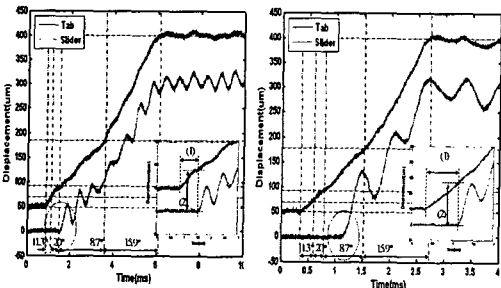


Fig.5 Experimental setup



(a) 77mm/s and 144mm/s of model A



(b) 66mm/s and 147mm/s of model B

Fig.6 Unloading dynamics for various velocities

Table 4. Dynamic characteristics for advanced models

Ramp	Model A		Model B	
	11.3°/10.9°		11.3°/20°/8.7°	
Vertical velocity (mm/s)	77	144	66	147
Release time(ms)	1.46	1.01	0.89	0.8
Tab-slider clearance(µm)	121	146	103	134
Vertical tab disp.(µm) (experiment)	71	93	53	84
Vertical tab disp.(µm) (simulation)	72.1	81.7	68.6	82
Sag disp. (µm)	-	-	-	-

5. 결론

본 연구에서 L/U/L 모델에 대한 유한요소해석과 실험을 통해 램프의 동특성을 확인할 수 있었고, 수직 속도 및 램프 각도가 언로딩 성능을 좌우하는 음압과 처짐 변위에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 언로딩 시 공기베어링이 사라질 때, 음압을 감소시키면서 처짐 변위가 발생하지 않게 하는 램프를 설계한다면 램프의 설계를 통해 긴급 상황에서 발생할 수 있는 슬라이더와 디스크의 컨택을 방지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이에 램프 위에서의 언로딩에 위에서 제시한 3 단계의 설계 방정식을 토대로 언로딩 성능을 향상시킬 수 있는 램프 설계가 가능함을 제시하는 바이다.

후기

본 연구는 연세대학교 광 메카트로닉스 사업단의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [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 Vol.33, pp.357-366
- [3] Y.H.Lee, K.S.Park, N.C.Park, H.S.Yang, and Y.P.Park, 2005, "Load/Unload Dynamic of Slider on Ramp for Various Ramp Shapes", Journal of KSNVE, Vol 15, No.11, pp.1248~1254

- [4] Y.H.Lee, K.S.Park, N.C.Park, H.S.Yang, and Y.P.Park., 2005, "Experimental Study on Various Ramp Profiles during Unloading Process", Proceedings of KSNVE Fall conference, pp. 314~317.