

HDD 의 언로딩 성능 개선을 위한 디스크 범프의 설계 및 해석

Design and Analysis of Disk Bump to Improve the Unloading Performance in HDD

이용은*, 이용현[†], 이형준*, 박노철**, 박경수***, 박영필*

Yong Eun Lee, Yonghyun Lee, Hyung Jun Lee, No-Cheol Park,
Kyoung-Su Park and Young-Pil Park

ABSTRACT

In most hard disk drives that apply the ramp load/unload technology, the head is unloaded at the outer edge of the disk while the disk is rotating. During the unloading process, slider-disk contacts may occur by lift-off force and rebound of the slider. The main issue of this paper is to prevent the slider-disk contact by rebound, and we apply a disk bump to the unloading process. To do so, first, the ranges of bump dimension are determined. Second, the stability of each bump is checked by dynamic simulation. Finally, unload simulations are performed for stable bump designs. As a result of these steps, the effect of the bump design and the position for the unloading performance were investigated. As a consequence, we propose the optimal bump design to improve the unloading performance. Furthermore, we can identify to remove rebound contact by applying a bump on disk during the unloading process.

Key Words : Bump design(범프 설계), load/unload(로드/언로드), rebound contact(리바운드 충돌), unloading performance(언로딩 성능)

1. 서 론

램프 로드/언로드가 적용된 대부분의 하드디스크 드라이브는 디스크가 회전하는 동안 디스크의 외각에서 헤드가 언로드 한다[1]. 슬라이더가 디스크에서 램프까지 언로드 할 때, 슬라이더의 위치에 따라 공기 베어링 힘은 변하게 된다. 언로딩 과정은 리프트 탭과 댄플, 리미터의 관계를 통해 4 단계로 구분된다[2]. 각 단계에서는 슬라이더와 리프트 탭, 댄플, 리미터에 대한 각각의 동적 특성을 구할 수 있다. 특히, 리미터가 인가되어 공기 베어링이 최대가 될 때의 힘을 리프트-오프 힘이라 한다[3]. 리프트-오프 힘이 증가함에 따라, 언로딩 안정성은 감소되고 슬라이더-디스크 충돌의 가능성은 증가된다[4]. 또한, 댄플에서 슬라이더가 리바운드 한 후 디스크와 충돌이 발생할 수도 있다. 디스크 표면에 손상을 일으킬 수 있는 이러한 충돌들은 언로딩 성능에 크게 영향을 끼친다[8].

언로딩 과정에서 서스펜션과 리미터, 공기 베어링 표면 설계와 같은 다양한 언로딩 변수들에 대한 효과에 대해 많은 연구가 수행되어 왔고, 이러한 논문들에서 언로딩 성능 개선을 위한 다양한 방법들이 제안되어왔다[4~7].

본 논문에서 우리는 언로딩 성능 개선을 위해, 디스크 표면의 언로드 지역에서 범프를 도입하고자 한다. 동적 시뮬레이션과 언로드 시뮬레이션은 CML 코드[3~5]를 사용하여 다양한 범프들에 대해 수행하였고, 슬라이더의 부상 역학을 조사하였다. 그림 1의 언로딩 과정에서 4 단계의 서스펜션 강성 행렬들과 같은 시뮬레이션 변수들과 ABS(Air-Bearing Surface)형상 및 치수들은 2.5 인치 하드디스크 드라이브에서 구하였다. 시뮬레이션 결과를 토대로 최적의 범프 설계를 상업용 하드디스크 드라이브에 적용하고자 한다.

2. 언로드 특성

2.1 언로딩 과정

언로딩 과정은 램프와 슬라이더, 댄플, 리미터의 관계에 의해 4 단계로 구성된다[2]. 그림 1은 언로딩 과정의 개략도이다. 상태 1에서, 슬라이더는 램프에 인가될 때까지 디스크 위를 부상하고 있다. 상태 2는 리프트 탭이 램프에 인가된 과정으로, 슬라이더와 댄플은 맞닿아있는 상태이다.

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

* 연세대학교 기계공학과
** 연세대학교 정보저장공학협동과정
*** 삼성전자 스토리지 사업부

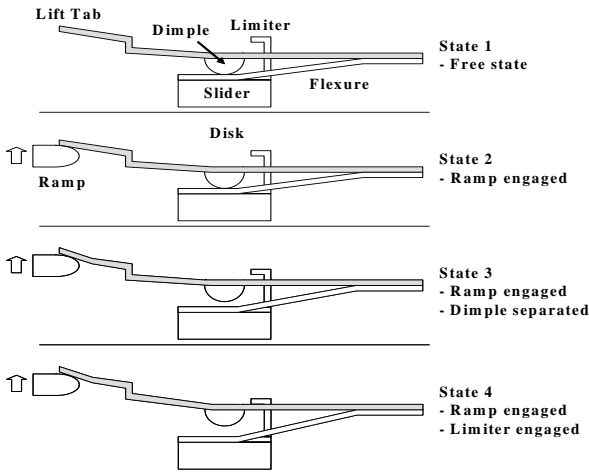


Fig.1 Schematic of the unloading process

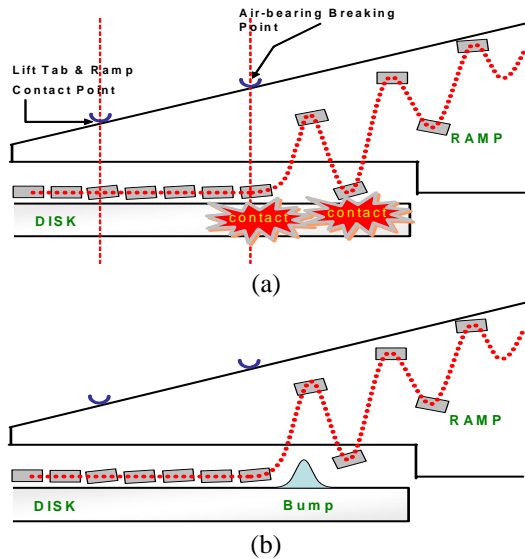


Fig.2 Schematics of trace of the slider on the disk (a) without and (b) with the bump during unloading process.

상태 3에서, 리프트 탭과 램프는 인가되어 있으며 슬라이더는 딴플로부터 분리된다. 상태 4는 램프가 계속 인가되어 있는 상태에서, 로드빔과 리미터가 인가된 상태이다. 리미터가 인가되었을 때, 슬라이더에 영향을 주는 공기 베어링은 사라진다.

2.2 연구 배경 및 방법

언로딩 과정 동안 일어날수 있는 충돌의 경우는 두 개가 있을 수 있다. 하나는 리프트-오프 힘 때문이며, 다른 하나는 그림 2(a)와 같이 슬라이더의 리바운드 때문이다. 본 논문에서는 리바운드에 의한 충돌을 제거하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 리바운드에 의한 충돌은 충돌 위치에서 슬라이더와 디스크 간의 최소 간격을 증가시킴으로써 예방할 수 있으며, 따라서 우리는 디스크에 범프를 적용하고자 한다. 슬라이더가 서스펜션

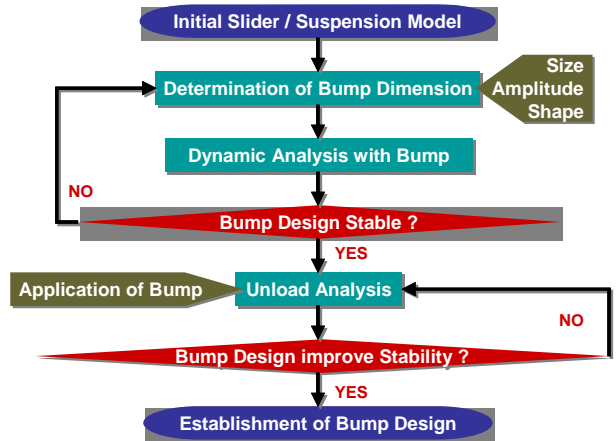


Fig.3 Procedure of bump design

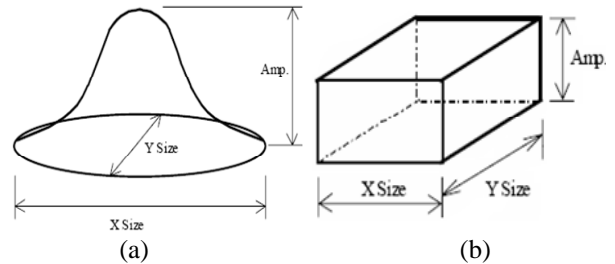


Fig.4 Bump shapes and dimensions (a) sinusoidal (b) rectangular

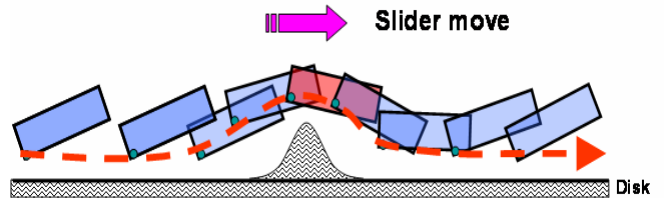


Fig.5 Schematic of the slider on a bump

리미터에 인가된 후, 슬라이더와 디스크의 간격은 증가하고 슬라이더의 피치 각은 변하게 된다. 그림 2(b)는 리바운드 충돌이 범프에 의해 제거될 수 있음을 예상한 것이다. 이러한 범프는 디스크 외곽의 4곳에 위치하며, 슬라이더가 이 4곳 중 한 곳을 통과하게 제어하게 된다. 또한, 로딩 시, 범프가 위치하지 않는 곳을 지나가게 제어한다면, 범프가 로딩에 미치는 영향은 고려하지 않아도 된다. 리바운드 충돌을 제거하기 위해서 그리고 언로딩 성능 개선을 위해서 최적의 범프설계는 필수적이다. 그림 3은 범프 설계의 절차이다. 첫 번째, 크기와 높이와 같은 범프의 치수 범위와 형상을 결정한다. 두 번째, 각 범프 설계의 안정성을 동적 시뮬레이션을 사용하여 확인한다. 세 번째, 안정된 동적 특성을 가지는 범프에 대하여 언로드 해석을

수행하여 최소 간격과 언로딩 안정성 등과 같은 성능을 평가한다. 마지막으로, 최적의 범프 설계를 확립한다.

3. 동적 시뮬레이션

3.1 범프 치수의 셋업

범프 형상은 범프 치수에 대한 범위를 정함으로써 결정할 수 있다. 본 논문에서는 사인형과 직사각형 범프들을 선정하였다. 범프의 형상은 그림 4와 같이 X 축, Y 축 그리고 높이로 결정한다. X 축은 슬라이더 운동 방향에 따른 범프의 길이이며, Y 축은 슬라이더 운동의 수직 방향의 범프길이이다. 높이는 범프의 높이이다. 우리는 X 축과 Y 축은 같다고 가정한다. 초기 범프는 50 μm 의 크기와 20nm의 높이를 가진다. 크기의 변화는 50 μm 에서 1300 μm 까지이며, 증분 값은 50 μm 로 한다. 높이의 변화는 20nm에서 200nm까지 20nm의 증분으로 변화시킨다. 총 범프 모델의 개수는 260개이다. 각 범프 모델들을 동적 시뮬레이션에 적용한다.

3.2 충돌 대 비충돌

그림 5는 동적 시뮬레이션상 범프 위의 슬라이더의 개략도이다. 슬라이더가 범프 위를 지나갈 때 슬라이더의 움직임을 보여준다. 시뮬레이션에 의한 슬라이더 운동은 범프 치수에 따라 안정한 경우와 불안정한 경우로 구분된다. 그림 6(a)는 안정한 슬라이더 운동의 경우이다. 이 경우에서, 슬라이더-디스크 충돌은 발생하지 않았다.

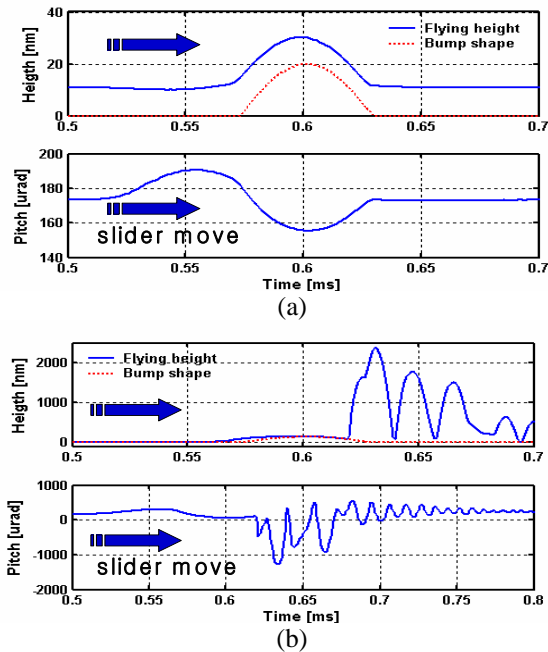


Fig.6 Representative dynamic simulation results: (a) stable motion with non-contact and (b) unstable motion with contact.

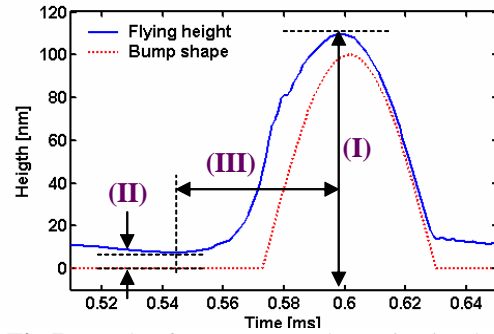
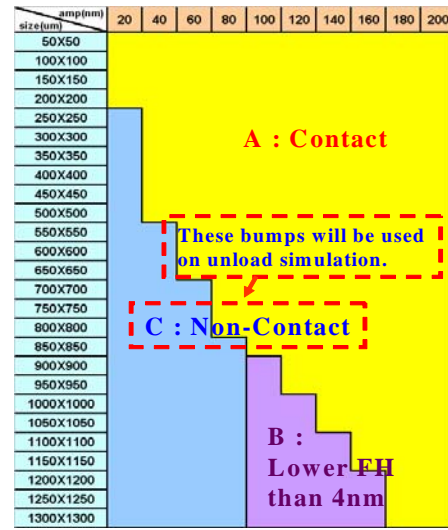
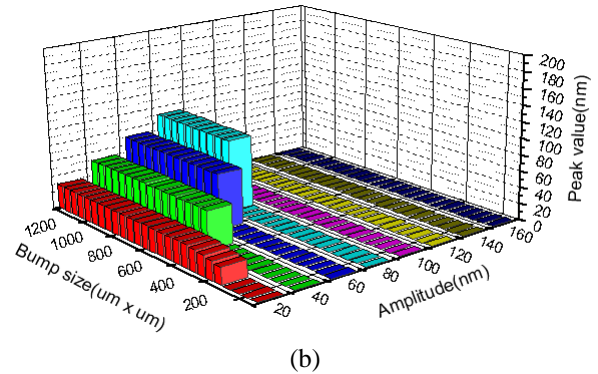


Fig.7 Result of non-contact dynamic simulation and analytical parameters



(a)



(b)

Fig. 8 Effect of bump size and amplitude on (a) dynamic simulation and (b) the peak value for region C.

슬라이더가 범프를 지나갈 때, 부상 높이는 증가했고, 슬라이더의 피치 각은 변하였다. 피치 각은 슬라이더가 범프를 지나가기 직전에 증가했고, 범프를 통과할 동안 감소하였다. 그림 6(b)는 불안정한 슬라이더 운동의 경우이다. 범프에 의한 슬라이더-디스크 충돌은 불안정한 슬라이더의 운동 때문이다. 슬라이더-디스크 충돌은 범프를 지나가는 중간 위치에서 발생하였다. 피치 각은 충돌의 영향을 받을 때 극심하게 변하였다. 모든 범프 모델

들에 대한 동적 시뮬레이션 결과들 이러한 두 가지 경우로 나눌 수 있다.

3.3 해석 변수들

동적 시뮬레이션의 결과들은 정확하게 해석하기 위해서 해석적 변수들을 정의하는 것은 중요하다. 그림 7은 시뮬레이션 결과와 해석적 변수들을 보여준다. (I)는 가장 중요한 변수이다. 그것은 '최대값'이며, 슬라이더 헤드의 최대 부상 높이를 의미한다. 이 값이 높을수록 시스템의 안정성은 좋아지게 된다. (II)는 '처짐부상높이'이다. 슬라이더가 범프 안으로 들어가기 직전에 슬라이더의 최소 높이를 말한다. 만약 이 높이가 임계 부상 높이보다 낮다면(4nm), 슬라이더-디스크 충돌의 가능성은 증가한다. 임계 부상 높이는 부상 높이를 낮출 수 있는 조건에서 정상 상태 시뮬레이션을 수행한 결과 충돌이 발생한 높이를 말한다. (III)는 '상승시간'이며, '최대값'과 '처짐부상높이' 사이의 시간이다. 이 시간이 짧을수록 언로딩 과정은 빨라지며, 언로딩 성능은 개선된다.

3.4 시뮬레이션 결과

범프 형상에 대한 시뮬레이션 결과들에 따르면, 직사각형 범프는 모든 범프에서 충돌이 일어났다. 따라서, 사인형 범프 형상에 대해서만 시뮬레이션 결과들을 제시하였다. 그림 8(a)는 동적 시뮬레이션 결과들에 대한 도표이다. A 지역 범프들은 모두 슬라이더-디스크 충돌이 일어났음을 알 수 있다. A 지역을 제외한 모든 지역에 대한 시뮬레이션 결과는 안정한 슬라이더 운동을 하며, 슬라이더-디스크 충돌이 발생하지 않았다. 하지만, B 지역 시뮬레이션 결과를 살펴 보면, '처짐부상높이'가 4nm 보다 작다. 범프를 적용했을 경우 안정성이 낮아지게 된다. 따라서, 이러한 해석들을 고려한 최적의 범프 설계는 C 지역의 범프들이다. 그림 8(b)는 최적 범프 설계와 '최대값' 범위를 보여준다. 좋은 범프 설계를 위해서 '최대값'이 높을수록, 범프의 크기와 높이는 작을수록 바람직하다.

4. 언로드 시뮬레이션

4.1 언로드 시뮬레이션에 대한 범프의 적용

동적 시뮬레이션을 통해 설계된 범프를 언로드 시뮬레이션에 적용하기 위해, 그림 9와 같이 언로딩 순간에 범프가 슬라이더의 밑에 위치시켜야 한다. 따라서, 언로딩이 시작하고 범프가 슬라이더의 밑에 위치할 때까지 이동한 거리를 X_{position} 으로 설정한다. X_{position} 은 디스크의 선속도와 언로딩 과정 시 슬라이더를 위치시키고자 하는 언로딩 시각의 곱이다. 언로드 시뮬레이션에서, 슬라이더가 램프를 타고 올라 갈 때, 실제 부상 높이는 일반적으로 디스크 위에서의 수 nm에 해당하는 값이 아니다.

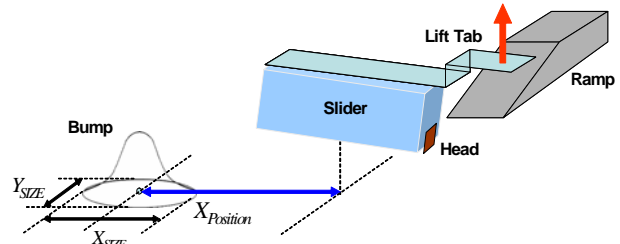


Fig.9 Schematic of unload process simulation with bump

공기 베어링과 슬라이더를 들어올리는 리프트 힘에 의해 슬라이더의 부상 높이가 수백 nm에서 수 μm 로 증가하기 때문에 범프의 높이를 동적 시뮬레이션에 적용할 때와 다르게 적용시켜야 한다. 동적 시뮬레이션에서는 디스크 위에서의 부상 높이를 고려하여 수십 nm로 설정하였지만, 언로드 시뮬레이션에서는 범프의 높이를 언로딩으로 인해 상승한 값을 토대로 적용시켜야 한다. 언로딩 속도 별로 상승한 값들은 다르기 때문에 각각 초기 상태에서 언로드 시뮬레이션을 수행하여 범프를 적용하고자 하는 위치에 맞는 범프 높이를 정해야 한다.

4.2 시뮬레이션 결과

언로드 시뮬레이션은 충돌이 발생하지 않는 경우와 그렇지 않은 경우에 범프의 영향을 평가하기 위해서 세 가지 속도에 대해 수행하였다. 먼저, 범프가 없는 경우에도 충돌하지 않는 초기 속도에서의 시뮬레이션으로써, 이러한 경우 범프를 이용하여 슬라이더의 언로딩 성능이 개선됨을 확인할 수 있었다. 또한, 범프가 없을 때 충돌이 발생하는 속도에서의 시뮬레이션으로써, 초기 속도에 1 IPS와 5 IPS를 더한 속도에서 범프를 첨가함으로써 충돌을 피할 수 있는지 파악하고자 하였다.

그림 10은 범프가 없는 경우 초기 속도에서의 시뮬레이션 결과를 나타내는 것으로, 시뮬레이션에 적용될 범프의 위치를 함께 제시하였다. 이 경우 슬라이더가 리바운드 된 후 디스크와의 간격이 최소가 되는 A 지점에서 충돌은 발생하지 않았으며, 이 때의 간격을 이용하여 범프의 높이와 적용할 위치를 결정하였다. 그림 11은 범프의 각 위치에서 범프의 크기와 높이에 대한 시뮬레이션 결과이다. 모든 경우 A 점에서 충돌이 발생하지 않았다. 그러나, ②, ③ 그리고 ④ 위치를 제외한 나머지 위치에서 최소 간격은 범프가 없을 경우의 최소 간격보다 낮았다. 시뮬레이션 결과를 토대로, $600\mu\text{m} \sim 800\mu\text{m}$ 의 크기와 $600\text{nm} \sim 1000\text{nm}$ 의 높이를 가지는 범프가 가장 좋은 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

그림 12는 범프가 없는 경우 충돌이 발생하는 경우으로써, 초기 속도에 1 IPS를 더한 속도에서의 시뮬레이션 결과이다. 또한, 시뮬레이션에 적용하

기 위한 범프의 위치도 제시하였다. 이 경우 슬라이더가 리바운드 된 후 B 점에서 충돌이 발생하였다. 충돌이 발생하지 않았던 앞선 시뮬레이션에서 결정한 범프의 높이와 위치를 고려하여 이번 시뮬레이션에 적용할 범프의 높이와 위치를 결정하였다. 이는 설계한 범프의 크기 및 높이를 모든 시뮬레이션 결과에 적용시키기 위한 것이다. 그림 13 은 범프의 각 위치에서의 범프의 크기와 높이에 대한 시뮬레이션 결과이다. ②, ③을 제외한 나머지 위치에서 최소 간격들은 0 보다 낮았으며, 그 결과 충돌이 발생하였다. 따라서, 이 시뮬레이션 결과를 토대로, 700 μ m ~ 900 μ m 의 크기와 900nm ~ 1200nm 의 높이를 갖는 범프가 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

그림 14 는 범프가 없는 경우 충돌이 발생하는 경우로써, 초기 속도에 5 IPS 를 더한 속도에서의 시뮬레이션 결과이며, 시뮬레이션에 적용하기 위한 범프의 위치도 제시하였다. 이 경우 역시 빠른 언로딩 속도에 의해 슬라이더가 리바운드 된 후 C 점에서 충돌이 발생하였다. 앞선 두 개의 시뮬레이션에서 결정한 범프의 높이와 위치를 고려하여 범프의 높이와 위치를 결정하였다. 범프의 위치가 앞선 두 시뮬레이션에 적용한 위치와 다른데, 이는 범프의 높이를 우선 기준으로 잡고 이에 해당하는 위치를 선정하기 때문이다. 그림 15 는 범프의 각 위치에서 범프의 크기와 높이에 대한 시뮬레이션 결과이다. ⑤, ⑥ 위치를 제외한 나머지 위치에서 최소 간격들은 대부분 0 보다 낮았으며, 그 결과 충돌이 발생하였다. 이 시뮬레이션 결과에서는 700 μ m 의 크기와 1000nm ~ 1300nm 의 높이를 갖는 범프가 가장 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

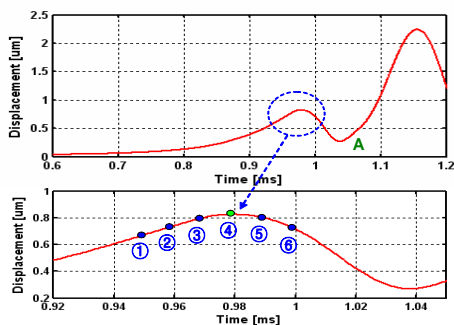


Fig.10 Minimum clearance between the slider and the disk without bump at the initial velocity and the relative locations of the bump (①~⑥) for applying to simulation.

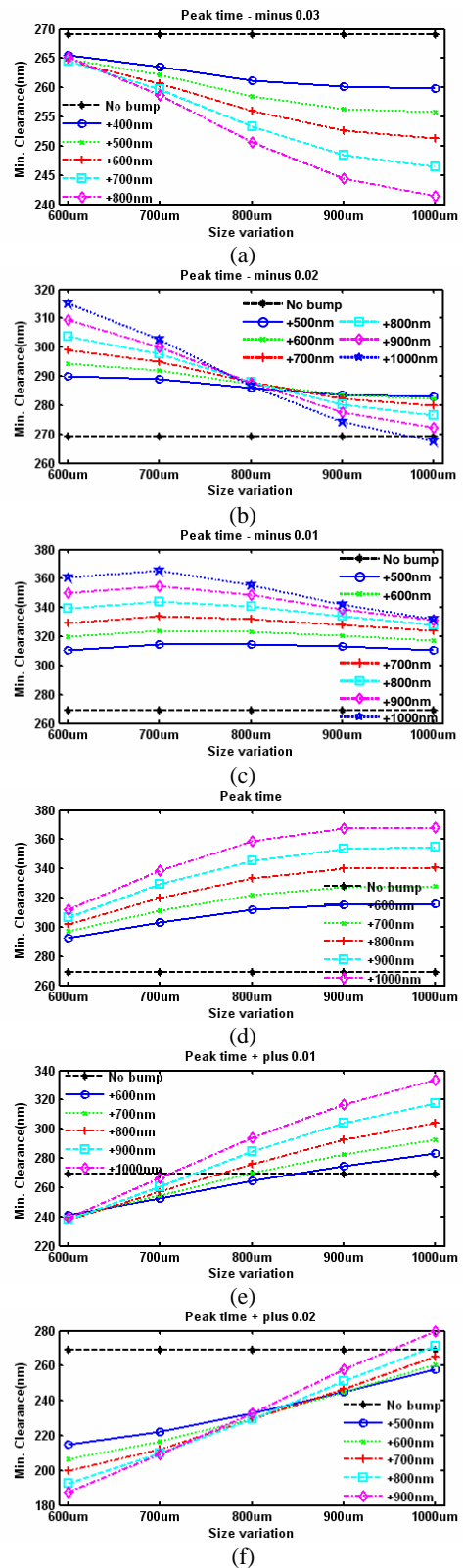


Fig.11 Effect of the bump position on the minimum clearance between slider and disk at the initial velocity (non-contact condition): (a) position ①, (b) position ②, (c) position ③, (d) position ④, (e) position ⑤, and (f) position ⑥

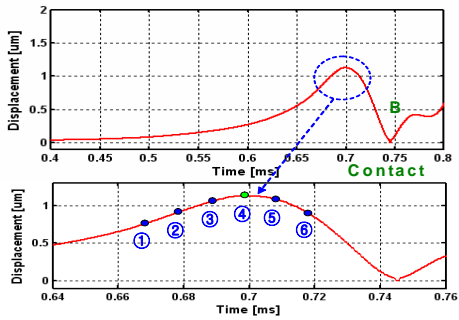


Fig.12 Minimum clearance between the slider and the disk without bump at the initial velocity plus 1 IPS and the relative locations of the bump (①~⑥) for applying to simulation.

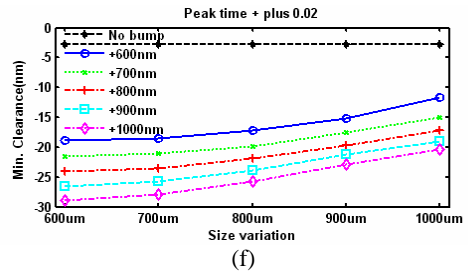


Fig.13 Effect of the bump position on the minimum clearance between slider and disk at the initial velocity plus 1 IPS (contact condition): (a) position ①, (b) position ②, (c) position ③, (d) position ④, (e) position ⑤, and (f) position ⑥

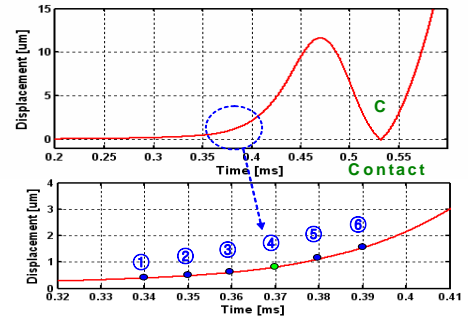
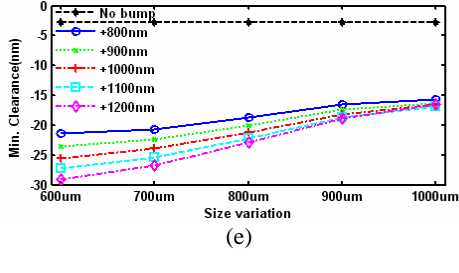
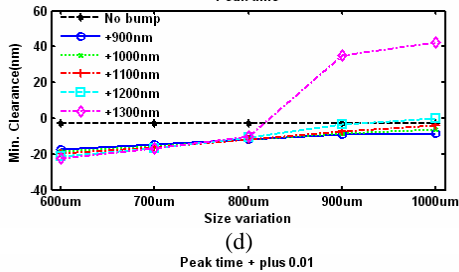
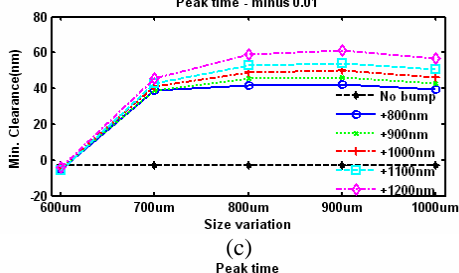
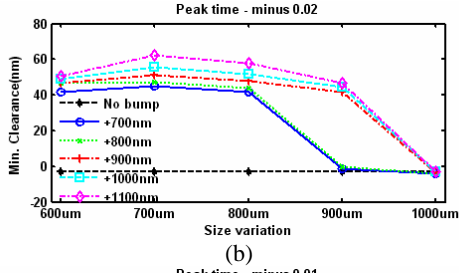
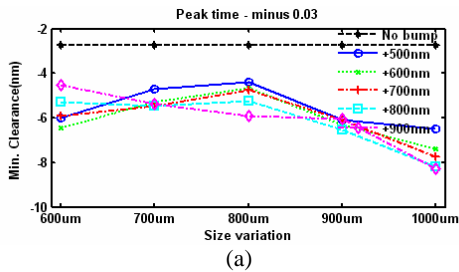
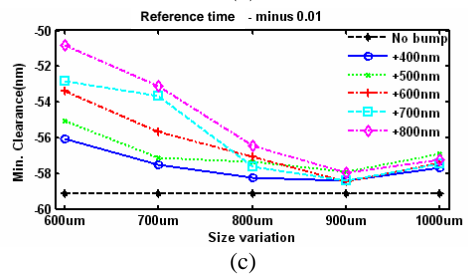
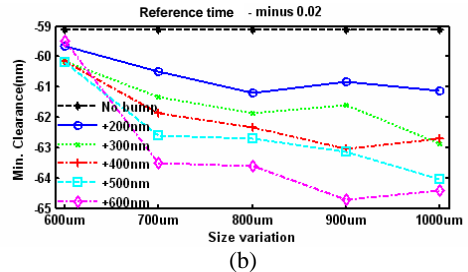
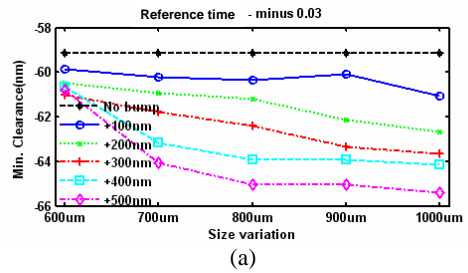


Fig.14 Minimum clearance between the slider and the disk without bump at the initial velocity plus 5 IPS and the relative locations of the bump (①~⑥) for applying to simulation.



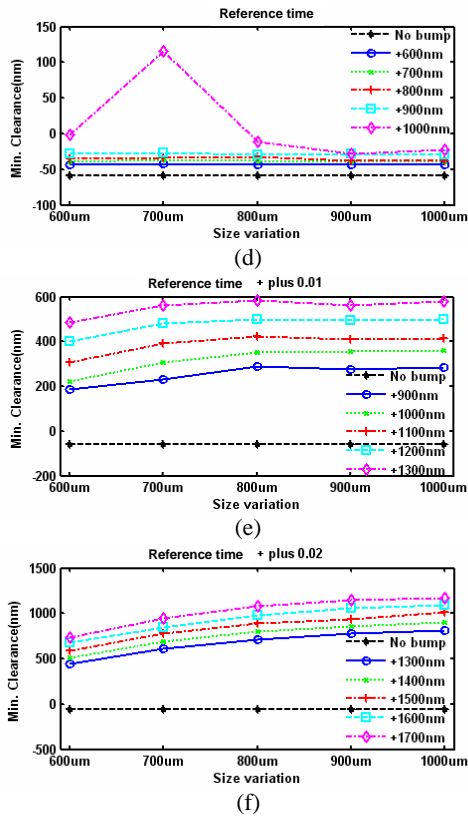


Fig.15 Effect of the bump position on the minimum clearance between slider and disk at the initial velocity plus 5 IPS (contact condition): (a) position ①, (b) position ②, (c) position ③, (d) position ④, (e) position ⑤, and (f) position ⑥

4.3 디스크 범프의 효과에 대한 입증

세 개의 시뮬레이션 결과를 통해 언로딩 성능을 향상시킬 수 있는 범프의 크기와 높이의 대략적인 영역을 구할 수 있었다. 그러나, 가능하다면 범프의 크기와 높이는 작을수록 예상치 못한 성능의 저하를 막을 수 있기 때문에, 본 논문에서 결정한 최적의 범프의 크기와 높이는 각각 700 μ m 와 1 μ m 이다. 이 범프를 적용할 때, 언로딩 시 안정된 영역이 가장 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 16 은 크기 700 μ m 와 높이 1000nm 에서 세 개의 속도에 대한 시뮬레이션 결과들을 보여준다. 모든 경우, 부상 높이들이 증가하였고 발생하였던 충돌은 사라지는 것을 확인할 수 있다. 언로딩 과정 동안 범프를 추가함으로써, 언로딩 성능이 개선 될 가능성을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 하드디스크드라이브의 언로딩 성능을 향상시키기 위하여 기존 디스크의 언로드 지역에 범프를 형성하는 것을 제안하였다.

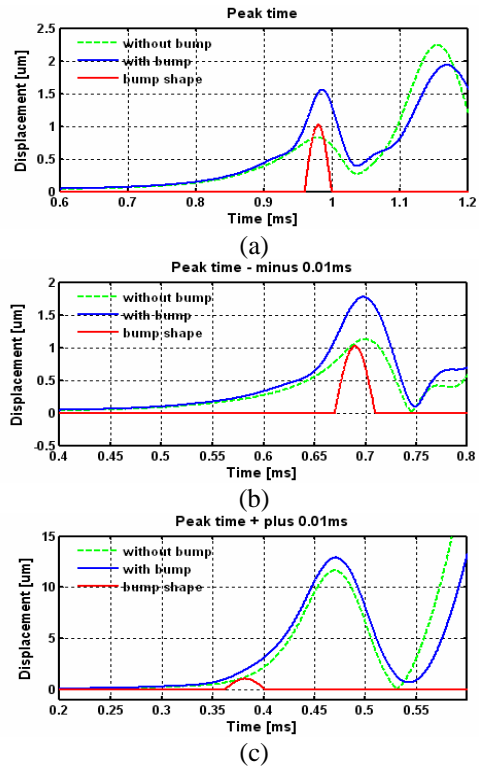


Fig.16 Unloading profile of the slider on the bump with 700 um diameter and 1 um height at three different unloading velocities: (a) initial, (b) initial + 1 IPS, and (c) initial + 5 IPS.

이를 위하여 CML 코드를 이용하여 다양한 형상, 높이, 크기를 가지는 범프에 대한 동적 및 언로드 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 범프를 사용함으로써 언로드 성능을 향상시킬 수 있었으며, 특히, 상업용 2.5 인치 하드디스크드라이브에 적용하기 위한 최적의 범프는 사인형상으로 크기 700 μ m, 높이 1000nm 를 가져야 함을 알 수 있었다. 이와 같이 최적화된 범프는 5 IPS 의 속도 증가에서도 성공적으로 충돌없이 언로딩 될 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(CISD)와 BK 나노/마이크로 응용기계기술 인력양성사업단, 삼성전자 산학과제의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

[1] M. Suk and T. Albrecht, 2002, "Evolution of load/unload technology," *Microsyst. Technol.*, Vol. 9, pp. 256-265.
 [2] T. Hideaki, K. Hidekazu, and M. Masaaki, July 2001,

- “Effect of air-bearing design on slider dynamics during unloading process,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, No. 4, pp. 1818–1820.
- [3] Q. H. Zeng, M. Chapin, and D. B. Bogy, 1999, “Dynamics of the unload process for negative pressure sliders,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 35, No. 2, pp. 916–920.
- [4] D. B. Bogy and Q. H. Zeng, 2000, “Design and operating conditions for reliable load/unload systems,” *Tribol. Int.*, Vol. 33, pp. 357–366.
- [5] Q. H. Zeng and D. B. Bogy, 2000, “Effect of certain design parameters on load/unload performance,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 36, No. 1, pp.140–147.
- [6] B. Liu and L. Y. Zhu, 2001, “Experimental study on head disk interaction in ramp loading process,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, No. 4, pp.1809–1813.
- [7] W. Hua, B. Liu, G. Sheng, and J. Li, 2001, “Further studies of unload process with a 9D model,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, No. 4, pp. 1855–1858.
- [8] Y. Shinji, S. Weissner, L. Zhou, and F. E. Talke, 2005, “Investigation of disk damage caused during load/unload using a surface reflectance analyzer,” *Tribol. Int.*, Vol. 38, pp. 81–87.