

언로딩 성능향상을 위한 서스펜션 상태행렬 변화에 대한 연구

A Study on Variation of State Matrix to Improve the Unloading Performance

이용현† · 김기훈* · 김석환* · 이용은* · 박경수** · 박노철*** · 박영필*

Younghyun Lee, Ki-Hoon Kim, Seokhwan Kim, Yong-Eun Lee, Kyoung-Su Park, No-Cheol Park and Young-Pil Park

Key Words : load/unload(로드/언로드), state matrix(상태행렬), suspension(서스펜션), impact force(충격힘)

ABSTRACT

Most hard disk drives that apply the ramp load/unload technology unload the heads 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 changing the state matrix. Because the state matrix is related to the suspension and slider, to change the state matrix means the structural change of the suspension and slider. We investigate influence for variation of the state matrix components and analyze the relation between the state matrix and the suspension/slider.

1. 서 론

오늘날 정보화의 급속한 발전으로 모든 정보의 디지털화가 진행되고 있으며, 정보통신과 멀티미디어의 발달로 많은 양의 데이터를 신속하고 정확하게 전달 및 저장해야 하므로 HDD, CD-ROM, DVD 등의 디스크 미디어를 이용한 정보기록 장치가 보편화 되고 있다. 정보화 시대의 도래로 휴대용 디지털 기록, 재생 기기들이 발전하면서 사용자의 편리성을 위해 점점 소형화되고 있으며, 고용량의 정보기록 장치에 대한 요구가 증가하고 있다. HDD에 적용되는 그러한 기술 중 이러한 고용량화 및 소형화를 위한 기술중의 하나가 로드/언로드 기술이다. 램프 로드/언로드가 적용된 대부분의 HDD는 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 덤플, 리미터의 관계를 통해 4 단계로 구분된다[2]. 각 단계에서는 슬라이더와 리프트 탭, 덤플, 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, 덤플에서 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 연구에서는 서스펜션 상태행렬에 대해 설명하고, 서스펜션 상태행렬을 L/UL 시뮬레이션에 적용하는 방법을 소개하고자 한다. 또한, 상태행렬은 서스펜션과 슬라이더의 강성에 관련되어 있기 때문에 상태행렬의 변화는 서스펜션과 슬라이더의 구조변경을 의미한다. 따라서, 상태행렬의 각 요소의 변화에 대한 영향을 조사하고 상태행렬과 서스펜션/슬라이더 사이의 관계를 분석하고자 한다.

2. 로드/언로드의 상태행렬

로드/언로드 과정은 서스펜션의 탭과 램프, 슬라이더와 덤플, 리미터의 접촉 조건에 따라 구분된다. 그림 1은 접촉 조건에 따른 4가지의 상태를 나타낸다. 로드의 경우 전체 과정 동안 탭이 램프와 분리되지 않고, 슬라이더도 덤플과 분리되

† 연세대학교 기계공학과 대학원

E-mail : genfair@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4677 FAX : (02)365-8460

* 연세대학교 기계공학과

** 삼성전자 스토리지 사업부

*** 연세대학교 정보저장기기 연구센터

지 않으므로 상태 2(그림 1(b))의 경우가 일정하게 유지된다. 반면, 언로드의 경우에는 4 가지 상태가 모두 존재한다. 그림 1(a)의 상태 1 은 일반적으로 슬라이더가 디스크 위에 존재하는 상태이다. 그림 1(b)의 상태 2 는 탭이 램프에 닿아 있고, 슬라이더도 댄플에 닿아있는 상태이다. 그림 1(c)의 상태 3 은 탭이 램프에 닿아있지만, 슬라이더는 댄플과 분리되어 있는 상태이다. 그림 1(d)의 상태 4 는 상태 3 에서 리미터 간극이 계속 좁혀지다가 리미터가 닿게 되는 상태이다. 상태 4 에서 리미터가 맞닿게 되면 슬라이더는 디스크에서 분리되고, 슬라이더에 형성되어 있는 공기베어링은 사라지게 된다.

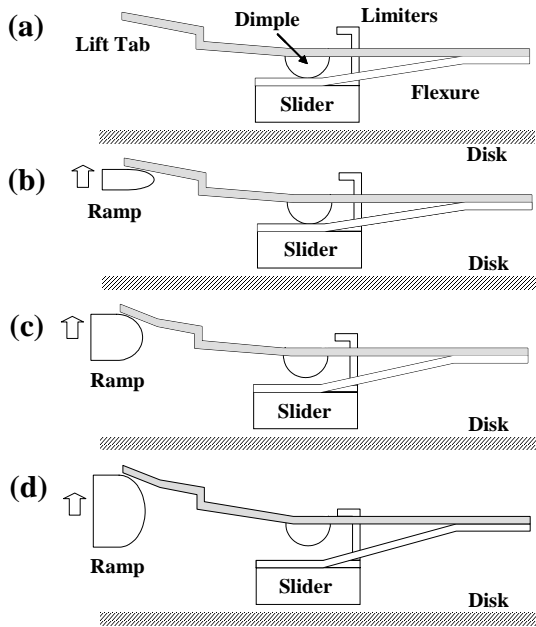


그림 1. 로드/언로드의 4 가지 상태

로드/언로드 과정에서 서스펜션과 슬라이더에는 2 개의 힘과 2 개의 모멘트가 작용한다[9]. 그림 2 의 F.B.D 처럼 F_L 은 탭에 수직방향으로 작용하는 힘이고, F_s 는 슬라이더에 수직방향으로 작용하는 힘이다. $M_{s\theta}$ 와 $M_{s\beta}$ 는 슬라이더의 피치와 롤 방향으로 작용하는 모멘트이다. 각각 작용하는 힘과 모멘트에 대해 탭의 수직변위 z_L 과 슬라이더의 수직 변위 z , 슬라이더의 피치 θ , 롤 β 를 나타낼 수 있다. 이러한 변수들을 통해 4×4 굴절행렬(flexibility matrix) $[H_j]$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} z_L \\ z \\ \theta \\ \beta \end{Bmatrix} = [H_j]_{4 \times 4} \begin{Bmatrix} -F_L \\ -F_s \\ -M_{s\theta} \\ -M_{s\beta} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

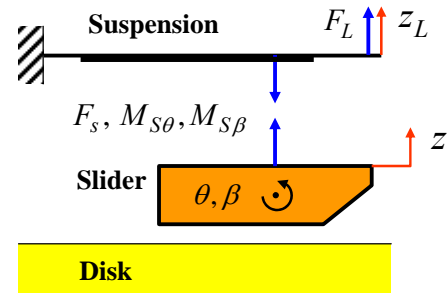


그림 2. 서스펜션과 슬라이더의 F.B.D

강성행렬은 굴절행렬의 역행렬로써 구할 수 있다 [10]. 이 강성행렬이 시뮬레이션에서 사용하는 상태행렬이다. 상태행렬은 그림 1 에서 (a)를 제외한 3 가지 상태에서 모두 구할 수 있다. 상태행렬의 각 요소는 유한요소모델에서 단위 하중에 대한 변위를 통해 강성을 각각 계산할 수 있다. 예를 들어, (1,1) 요소의 경우 탭에 단위 하중 1N 을 가한 후 발생하는 변위를 통해 (2)의 식으로 강성 값을 계산한다.

$$\begin{aligned} F &= kz \\ M &= k_t \theta \end{aligned} \quad (2)$$

F 와 M 은 힘과 모멘트이고, z 와 θ 는 수직변위와 회전각도이다. 상태행렬은 그림 3 과 같이 4×4 로 행렬이며, 첫 번째 열은 탭에 단위 하중을 가한 후 탭의 수직변위, 슬라이더 수직변위, 슬라이더 피치, 슬라이더 롤을 통해 구한 값이다. 두 번째 열은 슬라이더에 단위 하중을 가한 후 구한 값이며, 세 번째와 네 번째는 각각 슬라이더의 피치 방향과 롤 방향 끝단에 길이의 비로 나눈 단위 하중을 가한 후 구한 값이다. 이는 직접적으로 단위 모멘트를 가할 수 없기 때문에 양 끝단에 단위 하중을 분배하여 가한 것이다. 상태행렬에서 대각 요소는 서스펜션과 슬라이더의 각 부분이 서로의 요소에게 영향을 미치지 않기 때문에 각 부분의 설계에 있어 중요한 강성 값이다. 슬라이더 자체에서 발생하는 수직변위와 피치 각, 롤 각은 강성 값을 구하는데 서로에게 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서, 서스펜션 탭에 단위 하중을 가했을 때, 슬라이더의 수직변위와 피치 각, 롤 각만을 계산한다면, 상태행렬을 분석하는데 충분하다. 또한, 일반적인 로드/언로드에서 피치 각의 영향이 롤 각의 영향보다 절대적이기 때문에 롤 각을 통한 강성값은 큰 영향이 없다고 할 수 있다. 상태행렬은 대각을 중심으로 서로 대칭이기 때문에 j_{12} 와 j_{13} 은 j_{21} 과 j_{31} 을 통해 구할 수 있다.

j_{11}	j_{12}	j_{13}	j_{14}
j_{21}	j_{22}	j_{23}	j_{24}
j_{31}	j_{32}	j_{33}	j_{34}
j_{41}	j_{42}	j_{43}	j_{44}

그림 3. 상태행렬과 각 요소

3. 시뮬레이션 및 해석

3.1 시뮬레이션 설정

본 연구의 시뮬레이션에는 삼성 2.5 인치 서스펜션과 슬라이더 모델을 사용한다. 서스펜션 유한요소모델과 슬라이더의 ABS(공기베어링면) 모델을 통해 CML의 로드/언로드 시뮬레이터에 필요한 상태행렬을 계산한다. 상태행렬은 언로드에 영향을 미치는 상태 2와 상태 3, 상태 4를 각각 계산하여 적용하게 된다. 초기 시뮬레이션 결과는 표 1과 같다. 슬라이더와 디스크가 충돌이 발생하는 경우와 충돌이 발생하지 않는 경우로 나뉘고, 충돌이 발생하는 경우 충격힘이 5.549 g중이고 최소간극이 음수 값이 됨을 확인할 수 있다. 실제 슬라이더와 디스크 간의 최소 간극이 충돌이 발생하더라도 음수 값이 될 수 없지만, 시뮬레이션에서는 충돌 후 슬라이더가 디스크로 들어가는 정도를 통해 충격힘을 계산하기 때문에 충돌이 발생하는 모든 경우에서 음수 값이 나타난다. 충돌의 경우에서 충격힘의 값의 정도는 슬라이더와 디스크가 충돌했을 경우의 데미지의 수준을 의미한다. 상태행렬 변화에 대한 영향을 살펴보기 위해 상태행렬의 각 요소는 모두 -10%에서 +10%로 5%의 증가량으로 변화를 주게 된다. 특히, 상태행렬 각 요소 중에서 변화에 대한 감도가 높고, 서스펜션과 슬라이더의 구조 변화에 영향을 많이 받는 j_{11} 와 j_{12} , j_{13} , j_{22} , j_{33} , j_{44} 요소를 변화시켜 언로딩 성능에 미치는 영향에 대해 확인한다.

표 1. 초기 시뮬레이션 결과

모델	최대충격힘 (g중)	최소간극 (nm)	공기베어링 힘 (mN)
충돌	5.549	-59.12	-4.0591
비충돌	0	10.8	-4.0903

3.2 정성적 시뮬레이션 결과

그림 4와 5는 슬라이더와 디스크가 충돌하는 경우와 충돌하지 않는 경우에서 상태행렬 각 요소

의 변화에 따른 정성적인 결과이다. 충격힘 값의 정도보다 충돌이 발생했느냐 발생하지 않았느냐의 여부만을 조사한 것이다. 그림에서는 시뮬레이션에 사용된 상태행렬 요소만 표현하고, 회색 블록은 충돌이 발생한 경우를 의미한다. 그림 4는 충돌이 발생했던 모델로 초기 상태행렬 값에서는 충돌이 발생한다. 그러나, 충돌 경우에서 상태행렬의 각 요소를 변화시킬 경우 충돌이 발생하지 않는 경우를 발견할 수 있다. 2₂₂와 3₂₂, 3₁₃ 요소는 상태행렬 값을 줄이면 충돌이 발생하지 않아 언로딩 성능이 향상한다. 반면, 2₁₂와 2₃₃, 3₁₂, 3₃₃ 요소는 상태행렬 값을 증가시키면 충돌을 발생시키지 않아 좋은 언로딩 성능을 확보할 수 있다. 그림 5는 충돌이 발생하지 않았던 모델로 초기 상태행렬 값에서는 충돌이 발생하지 않는다. 그러나, 상태행렬 각 요소 값의 변화에 따라 충돌이 발생하는 경우가 나타난다. 충돌 경우와 같은 2₁₂와 2₂₂, 2₃₃, 3₁₂, 3₂₂, 3₃₃, 3₁₃ 상태행렬 요소들의 값의 변화에서 충돌이 발생한다. 다만, 앞의 경우와 반대로 2₂₂와 3₂₂, 3₁₃ 요소는 상태행렬 값을 증가시키면 충돌이 발생하고, 2₁₂와 2₃₃, 3₁₂, 3₃₃ 요소는 상태행렬 값을 감소시키면 충돌이 발생한다. 따라서, 슬라이더와 디스크가 충돌하는 경우와 충돌하지 않는 경우에서의 시뮬레이션 결과를 토대로 2₂₂와 3₂₂, 3₁₃ 요소는 상태행렬 값을 감소시킬수록, 2₁₂와 2₃₃, 3₁₂, 3₃₃ 요소는 상태행렬 값을 증가시킬수록 안정적인 언로딩 성능을 향상시킨다는 결과를 얻을 수 있다.

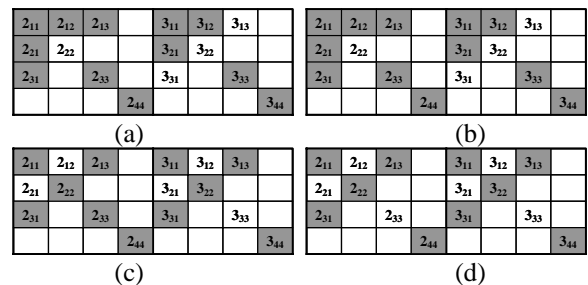


그림 4. 충돌 경우의 정성적 결과, 변화량 (a) -10%, (b) -5%, (c) +5%, (d) +10%

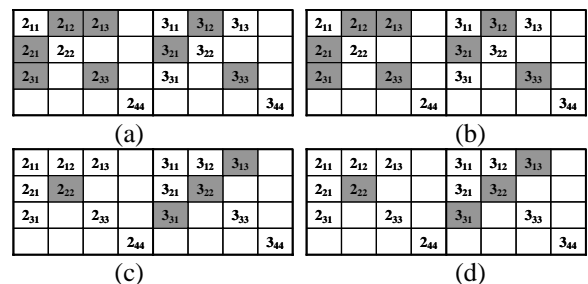


그림 5. 비충돌 경우의 정성적 결과, 변화량 (a) -10%, (b) -5%, (c) +5%, (d) +10%

3.3 충격힘과 해석

그림 6 과 7 은 충돌이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우에서 최대 충격힘을 나타낸 것이다. 충격힘이 클수록 슬라이더와 디스크의 충돌이 더 큰 데미지를 받는다. 따라서, 충격힘이 0 이 된다면 언로딩 성능을 향상시킨다고 볼 수 있다. 각 상태 별로 충격힘의 발생 분포를 분석한 결과, j_{12} 와 j_{33} 요소는 양의 변화량에서 언로딩 성능을 향상시킬 수 있고, j_{22} 와 j_{13} 요소는 음의 변화량에서 언로딩 성능을 향상시킬 수 있다. 상태행렬의 각 요소는 서스펜션의 구조 및 강성과 관계가 있기 때문에 상태행렬의 변화는 서스펜션 구조 변경을 의미한다. 즉, 서스펜션 구조의 변경을 통해 언로딩 성능을 향상시킬 수 있는 상태행렬을 얻어낼 수 있다는 것이다. 변경된 서스펜션을 통해 제작된 서스펜션 모델은 신뢰성을 확보할 것으로 예상된다. j_{12} 요소는 탭의 단위 하중에 대한 슬라이더의 수직변위를 통한 계산한 것으로, j_{12} 을 증가시키기 위해 로드빔과 플렉처의 강성을 증가시키는 구조변경이 필요하다. 반면, j_{22} 요소는 플렉처의 강성이 큰 영향을 끼치므로, j_{22} 를 감소시키기 위해서는 플렉처의 강성을 감소시키는 것이 요구된다.

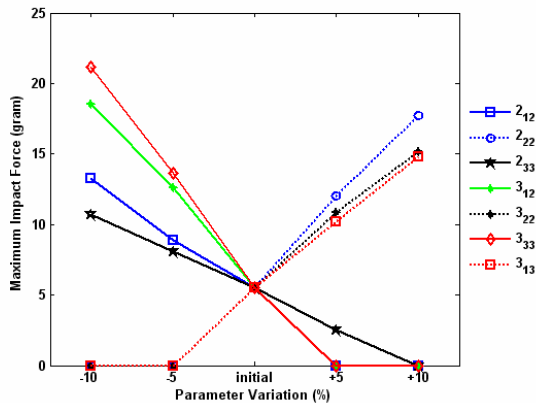


그림 6. 충돌 경우에 각 상태의 충격힘

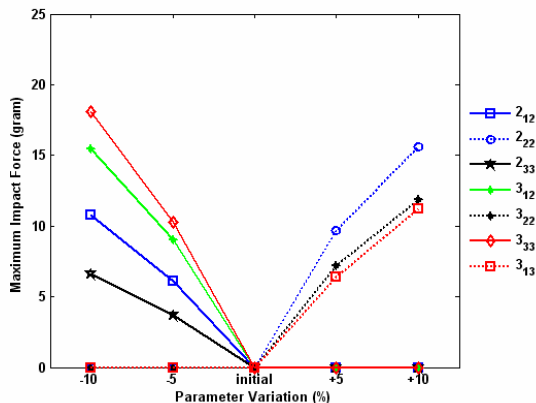


그림 7. 비충돌 경우에 각 상태의 충격힘

4. 결론

본 연구에서는 슬라이더와 디스크의 충돌을 막기 위해, 즉 언로딩 성능을 향상시키기 위해 로드/언로드 시뮬레이션에 적용하는 상태행렬의 변화에 영향을 알아보았다. 상태행렬은 서스펜션의 강성과 관계가 있기 때문에 상태행렬 각 요소의 변화는 그에 맞는 서스펜션 구조의 변경을 요구한다. 본 연구의 결과를 통해 상태행렬의 j_{12} 와 j_{33} 요소는 증가시키고 j_{22} 와 j_{13} 요소는 감소시키는 것이 언로딩 성능을 향상시킨다는 알 수 있었다. 이후 서스펜션 모델의 구조와 상태행렬의 관계를 밝혀 언로딩 성능을 향상시킨 서스펜션 모델의 제안이 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 연세대학교 정보저장기기 연구센터 [CISD]와 삼성전자 스토리지 사업부의 지원을 받아 이루어졌으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) M. Suk, T. Albrecht, "Evolution of Load/Unload Technology," *Microsystem Technologies-MEMS, Systems for Information Storage & Processing* 9, pp. 256-265, 2002.
- (2) T. Hideaki, K. Hidekazu and M. Masaaki, "Effect of Air-Bearing Design on Slider Dynamics During Unloading Process," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, No. 4, pp. 1818-1820, July 2001.
- (3) Q.H. Zeng, M. Chapin and D.B. Bogy, "Dynamics of the Unload Process for Negative Pressure Sliders," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, No. 2, pp. 916-920, March 1999
- (4) D.B. Bogy and Q.H. Zeng, "Design and operating conditions for reliable load/unload systems," *Tribology International* 33, pp. 357-366, 2000
- (5) Q.H. Zeng and D.B. Bogy, "Effect of Certain Design Parameters on Load/Unload Performance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, No. 11, pp. 140-147, 2000.
- (6) B. Liu and L.Y. Zhu, "Experimental Study on Head Disk Interaction in Ramp Loading Process," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, No. 4, pp. 1809-1813, 2001.
- (7) W. Hua, B. Liu, G. Sheng and J. Li, "Further Studies of Unload Process with a 9D Model," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, No. 4, pp. 1855-1858, 2001.
- (8) Y. Shinji, S. Weissner, L. Zhou, F.E. Talke, "Investigation of disk damage caused during load/unload using a surface reflectance analyzer," *Tribology International* 38, pp. 81-87, 2005
- (9) Q.H. Zeng and D.B. Bogy, "A Simplified 4-DOF Suspension Model for Dynamic Load/Unload Simulation and Its Application," *ASME Journal of Tribology*, vol.122, pp.274-279, Jan. 2000
- (10) L. Meirovitch, "Elements of Vibration Analysis," McGraw-Hill, the 2nd edition, pp.148-153