

로드/언로드 성능향상을 위한 서스펜션 상태행렬 연구

A study on suspension state matrix to improve load/unload performance

이용현*, 김기훈*, 김석환*, 박노철*, 박영필*, 박경수[†], 김철순**
Yonghyun Lee, Ki-Hoon Kim, Seokhwan Kim, No-Cheol Park, Young-Pil Park,
Kyoung-Su Park and Cheol-Soon Kim

(2009년 3월 9일 접수; 2009년 3월 20일 심사완료; 2009년 3월 23일 게재확정)

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. The load/unload includes the benefits as like an increased areal density, a reduced power consumption and an improved shock resistance. A lot of papers investigating the effects of the various load/unload parameters such as a suspension tab, a limiter, a ramp and air-bearing surface designs have been published. However, in previous researches, an effect of the suspension is not considered at each load/unload step. In this paper, we focus that a variation of the state matrix affects the load/unload performance on based on a state matrix that is a stiffness matrix of the suspension. Because the state matrix is related to the suspension at each load/unload step, to change the state matrix means the structural change of the suspension. Therefore, we investigated a range of a pitch static attitude(PSA) and a roll static attitude(RSA) for load/unload performance. We also analyzed an effect of the variation of the state matrix a range of load/unload velocity occurred a slider-disk contact. We determined the variation of the state matrix to improve the load/unload performance through comparison of each factor of state matrix.

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

1. 서론

오늘날 정보화의 급속한 발전으로 모든 정보의 디지털화가 진행되고 있으며, 정보통신과 멀티미디어의 발달로 많은 양의 데이터를 신속하고 정확하게 전달 및 저장해야 하므로 각종 정보기록 장치가 보편화되고 있다. 특히, 최근에는 모바일 기기를 중심으로 고용량의 정보저장에 대한 요구가 증가하고 있기 때문에 고용량화와 더불어 소형화가 정보저장기에 있어 중요한 화두가 되고 있다. 이러한 고용량화와 소형화를 동시에 만족시킬 수 있는 하드디스크드라이브(HDD)의 기술 중의 하나가 로드/언로드 기술이다. 로드/언로드 기술은 높은 면밀도와 낮은 전력소모, 내충격성의 이점을 갖기 때문에 현재 대부분의 HDD에서 사용되고 있다.

로드/언로드 기술은 시뮬레이션을 통한 수치적 해석방법이 개발된 이후 로드/언로드에 영향을 미치는 많은 인자들에 대한 연구가 진행되어 왔다.

Bogy 등[1]은 시뮬레이션을 통해 공기베어링 표면(ABS) 형상, 서스펜션 리미터, 슬라이더 초기자세, 슬라이더 버니쉬, 디스크 회전속도, 로드/언로드 속도, 램프 형상, 딤플 힘 등 로드/언로드 성능에 영향을 미치는 많은 요소들에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 서스펜션에 관련된 강성을 4 자유도의 간소화 모델을 통해 구함으로써 로드/언로드 시 서스펜션의 영향을 수치적으로 해석할 수 있었다 [2]. 또한, Taeger 등[3],[4]은 로드/언로드 시스템에서 슬라이더 초기자세인 피치 초기자세(PSA)와 롤 초기자세(RSA)의 영향에 대한 연구를 실험을 통해 수행하였다. 이 연구에서 로드/언로드 시 PSA와 RSA에 따라 로드/언로드 속도 및 ABS 형상에 관한 슬라이더-디스크 충돌 영역을 조사하였고, 각각 sweet spots와 footprint로 정의하였다.

그러나, 기존의 로드/언로드에 대한 연구는 서스펜션 모델보다는 다른 요인에 의한 영향에 대해 주로 수행하였다. 서스펜션 모델은 시스템에 주어진 모델대로 적용만 되었을 뿐, 각 로드/언로드 단계에 맞는 서스펜션의 영향이 고려되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 서스펜션의 강성행렬(stiffness matrix)인 상태행렬을 바탕으로 상태행렬의 변화가 로드/언로드 성능에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 우선, 상태행렬에 대해 해석과 로드/언로드 해석에 적용하는 방법을 소개하고, 상태

[†] 연세대학교 기계공학과

E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4680, Fax : (02) 365-8460

* 연세대학교 기계공학과

** 삼성전자 스토리지 사업부

행렬과 서스펜션의 구조와의 관계를 분석할 것이다. 상태행렬의 변화에 따라 PSA 와 RSA 영역에서 슬라이더-디스크가 충돌하는 영역을 살펴보고 로드/언로드 시 안정영역이 어떻게 변화하는지 살펴볼 것이다. 또한, 로드/언로드 시 슬라이더-디스크 충돌이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우에서 상태행렬의 변화에 따른 언로드 성능 변화를 확인하고, 언로드 성능을 향상시킬 수 있는 상태행렬에 대한 해석을 수행할 것이다.

2. 로드/언로드 상태행렬

로드/언로드 과정은 서스펜션 탭과 램프, 슬라이더와 딥플, 리미터의 접촉 조건에 따라 4 단계로 구분된다[2]. 그림 1 은 접촉조건에 따른 4 단계를 나타낸다. 로드의 경우 전체 과정 동안 탭이 램프와 분리되지 않고, 슬라이더도 딥플과 분리되지 않으므로 그림 1(b)와 같은 상태 2 가 일정하게 유지된다. 반면, 언로드의 경우에는 4 가지 상태가 모두 존재한다. 그림 1(a)의 상태 1 은 일반적으로 슬라이더가 디스크 위에 존재하는 상태로 탭은 램프에 접촉되어 있지 않고, 딥플은 슬라이더에 접촉되어 있으며 리미터는 접촉되어 있지 않은 상태이다. 그림 1(b)의 상태 2 는 디스크에서 슬라이더가 분리되지 않은 채 탭이 램프에 닿아 있는 상태로 딥플은 슬라이더에 닿아있는 상태이지만, 리미터는 접촉되어 있지 않은 상태이다. 그림 1(c)의 상태 3 은 디스크에서 슬라이더가 분리되지 않은 채 탭이 램프에 닿아 있지만, 딥플은 슬라이더에서 떨어져 있고 리미터도 떨어져 있는 상태이다. 그림 1(d)의 상태 4 는 상태 3 에서 리미터 간극이 계속 좁혀지다가 리미터가 닿게 되는 상태로, 이 경우 슬라이더는 디스크에서 분리되고 슬라이더와 딥플은 접촉하며 슬라이더에 형성되어 있는 공기 베어링은 사라지게 된다.

로드/언로드 과정에서 서스펜션과 슬라이더에는 2 개의 힘과 2 개의 모멘트가 작용한다[2]. 그림 2 의 자유물체도와 같이 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 수직변위 z , 슬라이더의 피치 θ 와 롤 β 를 나

타낼 수 있다. 이러한 변수들을 통해 4 x 4 굴절행렬(flexibility matrix) $[H_j]$ 를 구할 수 있다. 굴절행렬을 나타내면 (1)의 식의 같다.

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

본 논문에서 사용될 강성행렬은 굴절행렬의 역행렬로써 구할 수 있다[5]. 이 강성행렬이 시뮬레이션에서 사용하는 상태행렬이다. 상태행렬은 그림 1(a)의 상태 1 을 제외한 3 가지 상태에서 모두 구할 수 있다. 상태행렬의 각 강성 요소는 유한요소 모델에서 단위하중에 대한 변위를 통해 각각 계산할 수 있다. 예를 들어, 행렬의 (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.

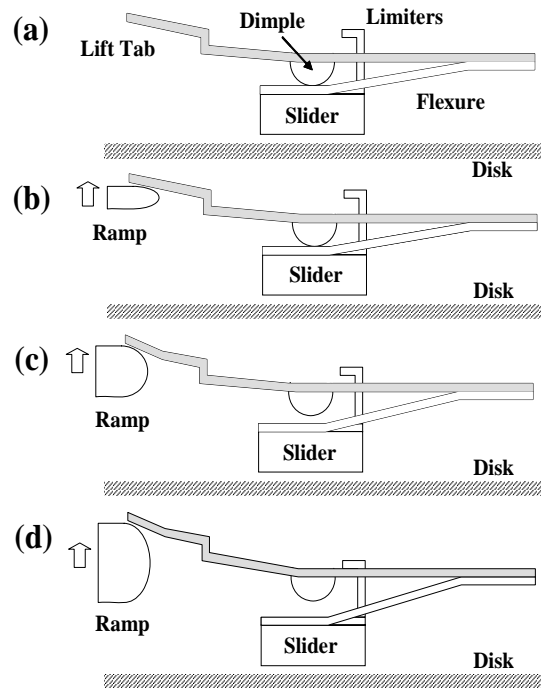


Fig.1 로드/언로드의 4 가지 상태

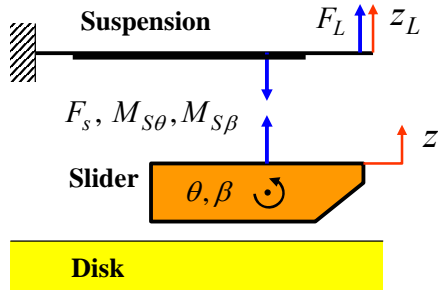


Fig.2 서스펜션과 슬라이더의 자유물체도

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}

Fig.3 상태행렬과 각 요소

상태행렬은 그림 3 과 같이 4 x 4 행렬이며, 첫 번째 열은 탭에 대한 단위 하중을 가한 후 탭의 수직변위와 슬라이더 수직변위, 피치, 롤을 통해 구한 값이다. 두 번째 열은 슬라이더에 단위 하중을 가한 후 탭의 수직변위와 슬라이더 수직변위, 피치, 롤을 통해 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. 대각요소 $j_{11}, j_{22}, j_{33}, j_{44}$ 는 탭의 수직변위와 슬라이더 수직변위, 피치, 롤 각 요소에 단위 하중을 가한 후 구한 자신의 강성을 통해 구한 것이기 때문에 각 부분의 설계에 있어 매우 중요하다. 또한, 로드/언로드 시 단위 하중은 탭으로만 가해지므로, 첫 번째 열인 j_{21} 과 j_{31} 만 추가로 고려해도 상태행렬의 영향을 분석하는데 충분하다. 반면, 실제 로드/언로드 시 피치에 비해 롤의 영향은 거의 미비하므로 j_{41} 는 고려하지 않아도 된다. 또한, 상태행렬은 대각을 중심으로 서로 대칭이기 때문에 j_{12} 와 j_{13} 은 j_{21} 과 j_{31} 을 통해 구할 수 있다. 따라서, 그림 3 의 회색블록의 요소만 고려하면 상태행렬의 영향을 분석할 수 있다.

3. 상태행렬과 PSA/RSA 의 관계

시뮬레이션 설정

로드/언로드 시뮬레이터에서 PSA 와 RSA 를 변화시키는 동시에 상태행렬의 각 요소를 $\pm 5\%$ 변화

Table 1 PSA 와 RSA 의 범위

PSA		RSA			
Variation	Degree(°)	Radian	Variation	Degree(°)	Radian
-1.5°	0.08°	0.0014	-1.0°	-1.0°	-0.0175
-1.0°	0.58°	0.0101	-0.5°	-0.5°	-0.0087
-0.5°	1.08°	0.0188	Initial	0.0°	0
Initial	1.58°	0.0276	+0.5°	+0.5°	0.0087
+0.5°	2.08°	0.0363	+1.0°	+1.0°	0.0175
+1.0°	2.58°	0.0460			

시켜 충격힘(impact force)을 조사한다. 충격힘을 통해 로드/언로드 시 슬라이더-디스크 충돌이 발생하지 않는 안정 영역을 각각 구한다. 초기 모델의 PSA 와 RSA 는 각각 1.58°와 0°이다. PSA 는 초기값 1.58°을 중심으로 0.08°에서 2.58°까지 0.5° 단위로 변화시키고, RSA 는 초기값 0°를 기준으로 -1.0°에서 1.0°까지 0.5°의 단위로 변화시킨다. 일반적으로 PSA 의 경우 2.5° 이상에서는 로드/언로드 성능이 급격히 저하되기 때문에 PSA 는 2.58°까지만 수행한다. 시뮬레이션을 위한 PSA 와 RSA 의 범위를 정리하면 표 1 과 같다.

시뮬레이션 결과

그림 4 와 그림 5 는 초기 모델의 PSA 와 RSA 범위에 의한 로드/언로드의 안정영역이다. 각각 PSA 와 RSA 에 대한 충격힘 값을 영역으로 나타낸 것이다. 안정영역을 도시할 때, 각 PSA 와 RSA 에 대한 충격힘 값을 각 값에 대한 근사함수를 토대로 계산하여 도시한 것이다. 초기 모델의 로드인 경우 PSA 가 0.58°보다 높은 범위에서는 RSA 전 범위에 대해 충격힘이 0 이므로 슬라이더-디스크 충돌이 발생하지 않는다. 반면, 초기 모델의 언로드인 경우 PSA 가 0.58°에서 1.08°까지는 전 범위의 RSA 에 대해 안정적이고 PSA 가 1.58° 이상에서는 PSA 가 1.58°일 때 RSA 가 -0.5°인 경우와 RSA 가 0°인 경우에서만 슬라이더-디스크 충돌이 발생하지 않는다. PSA 가 0.08°에서는 RSA 가 1.0°인 경우만 슬라이더-디스크 충돌이 발생하지 않음을 확인 할 수 있다.

그림 6 은 초기 모델에서 상태행렬을 $\pm 5\%$ 로 변화시켰을 때 로드의 안정영역에 대한 증감을 정규화하여 도시한 것이다. 상태 2 행렬의 요소들의 변화가 안정영역의 변동에 큰 영향을 미치는 반면, 상태 3 과 4 는 안정영역에의 영향이 거의 없음을 확인할 수 있다. 그러나, 상태 2 의 변화에 대한

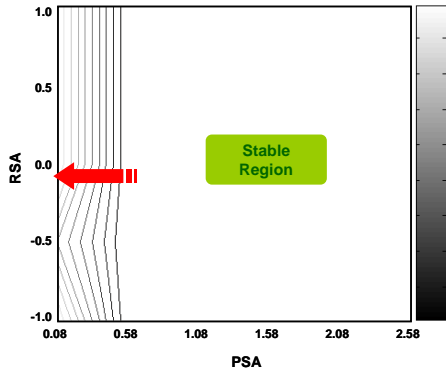


Fig. 4. 초기 모델의 로드 안정영역

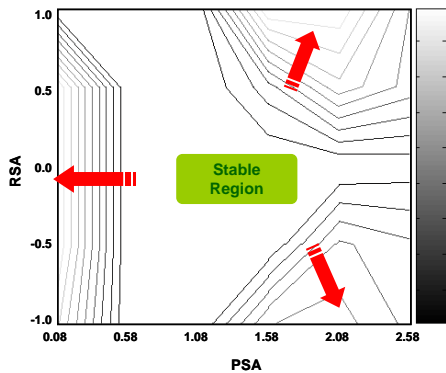


Fig. 5 초기 모델의 언로드 안정영역

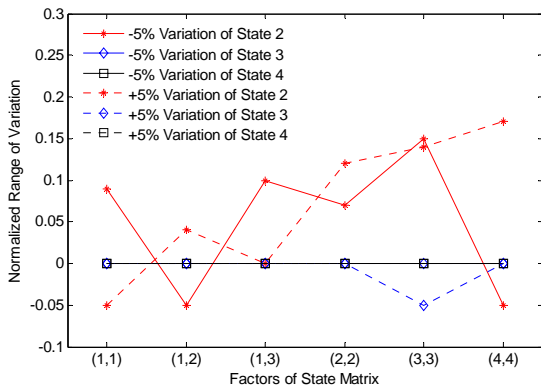


Fig. 6 로드 안정영역의 정규화 변화

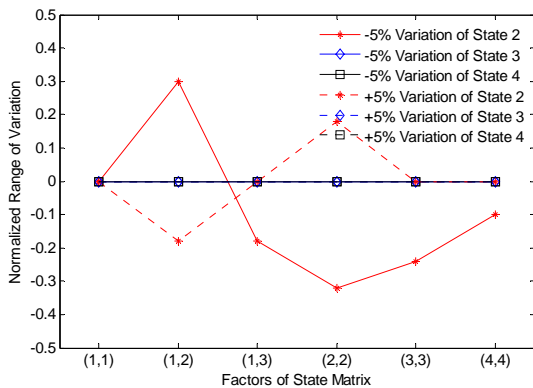


Fig. 7 언로드 안정영역의 정규화 변화

안정영역의 증감은 실제 형성되는 PSA 와 RSA 의 영역에서 살펴본다면, 설계 공차 및 외란에 의해 변경될 수 있는 범위 내에서 대부분 안정적이라는 결론을 얻을 수 있다.

그림 7 은 초기 모델에서 상태행렬을 $\pm 5\%$ 로 변화시켰을 때 언로드의 안정영역에 대한 증감을 정규화하여 도시한 것이다. 로드 안정영역과 마찬가지로 상태 2 행렬의 요소들의 변화가 안정영역의 변동에 큰 영향을 미치는 반면, 상태 3 과 4 는 안정영역에의 영향이 거의 없음을 확인할 수 있다. 상태행렬 요소 2_{12} 는 감소할수록 안정영역이 증가하고 상태행렬 요소 $2_{13}, 2_{22}, 2_{33}, 2_{44}$ 는 감소할수록 안정영역이 감소함을 알 수 있다. 로드 안정영역에 비해 선형적인 결과를 도출할 수 있는데, 이는 언로드 안정영역이 로드 안정영역보다 작아 상태행렬의 변화에 더욱 민감하게 변화하기 때문이다. 시뮬레이션 결과를 통해 언로드 시 안정영역을 충분히 확보하기 위해서는 상태행렬 요소 2_{12} 를 감소시키고, 상태행렬 요소 2_{22} 를 증가시키는 서스펜션 모델을 설계해야 한다.

4. 상태행렬과 충격힘의 관계

시뮬레이션 설정

서스펜션의 유한요소모델과 슬라이더의 ABS 모델을 통해 로드/언로드 시뮬레이터에 필요한 상태행렬을 계산한 후 언로드에 영향을 미치는 상태 2 와 3,4 에 대한 상태행렬만을 추출한다. 초기 시뮬레이션 결과는 표 2 와 같다. 슬라이더-디스크 충돌이 발생하는 경우와 충돌이 발생하지 않는 경우로 나누는데, 충돌이 발생하는 경우는 충격힘이 5.549gf(gramforce)이며 최소간극(minimum clearance)이 음수가 된다. 실제 슬라이더와 디스크 간의 최소간극이 음이 될 수 없지만, 시뮬레이션에서는 충돌 후 슬라이더와 디스크가 겹치는 정도를 통해 충격힘을 계산하기 때문에 충돌이 발생하는 모든 경우에서 음수 값을 구할 수 있다. 충돌 시 구할 수 있는 충격힘의 값은 슬라이더-디스크 충돌이 발생했을 때의 충돌 데미지 수준을 의미한다. 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 대각행렬 $j_{11}, j_{22}, j_{33}, j_{44}$ 와 j_{12}, j_{13} 요소를 변화시켜 언로드 성능에 미치는 영향에 대해 확인한다.

Table 2 초기 시뮬레이션 결과

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

정성적 시뮬레이션 결과

그림 8 과 9 는 슬라이더-디스크 충돌이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우에서 상태행렬 각 요소의 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 8 은 충돌이 발생했던 모델로 초기 상태행렬 값에서는 충돌이 모두 발생했다. 그러나, 이 경우 상태행렬의 각 요소를 변화시킬 경우 충돌이 발생하지 않는 경우를 발견할 수 있다. 2_{22} 와 3_{22} , 3_{13} 요소는 상태행렬 값을 줄이면 충돌이 발생하지 않아 언로드 성능이 향상한 반면, 2_{12} 와 2_{33} , 3_{12} , 3_{33} 요소는 상태행렬 값을 증가시키면 충돌이 발생하지 않아 좋은 언로드 성능을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

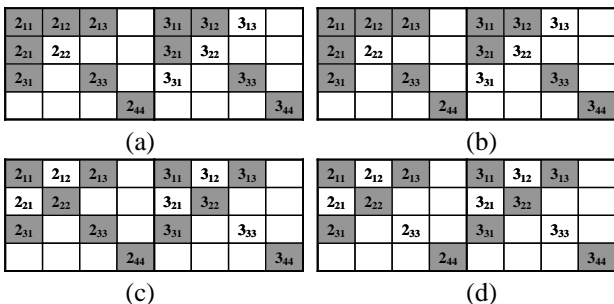


Fig. 8 충돌 경우의 상태행렬 변화량에 대한 정성적 결과 (a) -10% (b) -5% (c) +5% (d) +10%

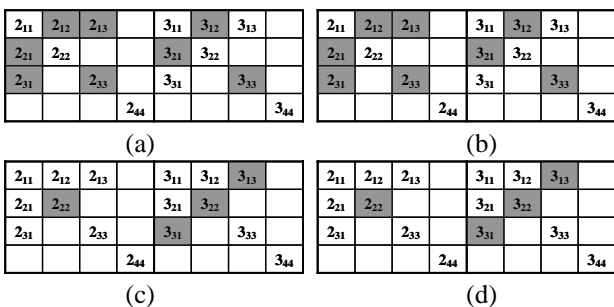


Fig. 9 비충돌 경우의 상태행렬 변화량에 대한 정성적 결과 (a) -10% (b) -5% (c) +5% (d) +10%

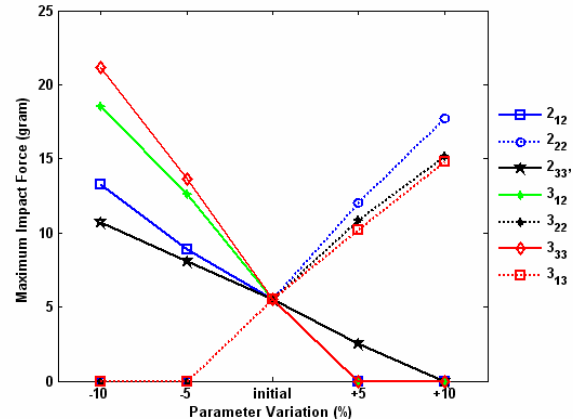


Fig. 10 충돌 경우에 각 상태의 충격힘

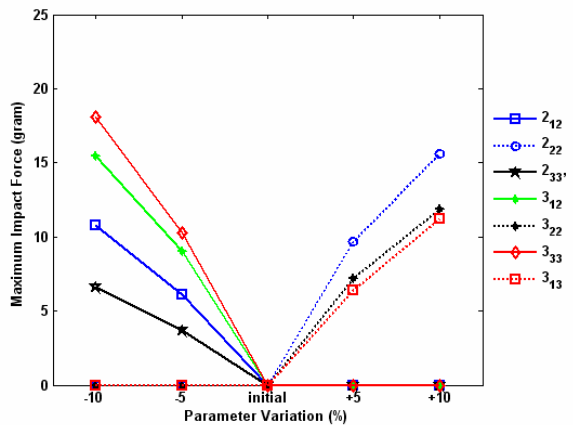


Fig. 11 비충돌 경우에 각 상태의 충격힘

그림 9 는 충돌이 발생하지 않았던 모델로 초기 상태행렬 값에서는 충돌이 발생하지 않았다. 그러나, 상태행렬 각 요소 값의 변화에 따라 충돌이 발생하는 경우가 나타난다. 충돌 경우와 같은 2_{12} 와 2_{22} , 2_{33} , 3_{12} , 3_{22} , 3_{33} , 3_{13} 상태행렬 요소들의 값의 변화에서 충돌이 발생한다. 다만, 앞의 경우와 반대로 2_{22} 와 3_{22} , 3_{13} 요소는 상태행렬 값을 증가시키면 충돌이 발생하고, 2_{12} 와 2_{33} , 3_{12} , 3_{33} 요소는 상태행렬 값을 감소시키면 충돌이 발생한다. 따라서, 슬라이더와 디스크가 충돌하는 경우와 충돌하지 않는 경우에서의 시뮬레이션 결과를 토대로 2_{22} 와 3_{22} , 3_{13} 요소는 상태행렬 값을 감소시킬수록, 2_{12} 와 2_{33} , 3_{12} , 3_{33} 요소는 상태행렬 값을 증가시킬수록 안정적인 언로드 성능을 향상시킨다는 결과를 얻을 수 있다.

충격힘과 해석

그림 10 과 11 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 언로드 성능을 향상시킨다고 볼 수 있다. 각 상태 별로 충격힘의 발생 분포를 분석한 결과 j_{12} 와 j_{33} 요소는 양의 변화량에서 언로드 성능을 향상시키며, j_{22} 와 j_{13} 요소는 음의 변화량에서 언로드 성능을 향상시킨다. 상태행렬의 각 요소는 서스펜션 구조 및 강성과 관계가 있기 때문에 상태행렬의 변화는 서스펜션 구조 변경을 의미한다. j_{12} 요소는 탭의 단위 하중에 대한 슬라이더의 수직변위를 통해 계산한 것으로, j_{12} 를 증가시키기 위해 서스펜션 로드빔의 강성을 증가시키는 구조변경이 필요하다. 반면, j_{22} 요소는 플렉서의 강성이 큰 영향을 끼치므로 j_{22} 를 감소시키기 위해서는 플렉서의 강성을 감소시키는 것이 요구된다. 따라서, 언로드 성능을 향상시키기 위한 서스펜션 모델 설계의 방향은 로드빔의 강성을 증가시키면서 플렉서의 강성을 감소시키는 것이라 할 수 있다. 로드빔 강성과 플렉서 강성은 관련된 j_{12} 와 j_{22} 의 범위를 고려하여 각 파트의 두께, 너비, 재질, 유효 면적 등의 변경을 통해 최적화 시키는 것이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 서스펜션의 강성행렬인 상태행렬을 바탕으로 상태행렬의 변화가 로드/언로드 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 상태행렬의 정의와 로드/언로드 해석에의 적용 방법을 살펴보았고, 상태행렬의 변화에 따라 로드/언로드 성능에 변화가 발생한다는 것을 알 수 있었다. PSA 와 RSA 에 의한 로드/언로드 안정영역은 상태행렬의 변화에 따라 증감하였고, 2_{12} 를 감소시키고, 2_{22} 를 증가시키는 것을 통해 언로드 안정영역을 확보할 수 있음을 확인하였다. 또한, 언로드 시 슬라이더-디스크 충돌이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우에서 상태행렬 요소 j_{12} 와 j_{33} 을 증가시키고 j_{22} 와 j_{13} 을 감소시키면 언로드 성능이 향상하였다. 두 결과에서 j_{12} 와 j_{22} 요소는 두 번째 상태에서 서로 증감이 상충하는 결과가 도출되었다. 서스펜션의 상태행렬의 관점에서만 고려하면 상태행렬의 범위에 대해 정의하기 어렵고 최적화를 수행함에 있어 어려움이 예상된다. 그러나, 언로드 수행 시 PSA 와 RSA 는 고정되며, 현재 고정된 초기 PSA 와 RSA 에서는 전 상태행렬에서 안정된 언로드를 수행하기 때문에, 서스펜션의 로드빔과 플렉서에 대한 강성은 충격힘에 의한 변화를 우선적으로 고려해야 한다. 따라서, 서스펜션 설계 시, 상태행렬을

추출하고 PSA 와 RSA 에 의한 안정영역을 검토한 후 상태행렬의 변화에 무관한 PSA 와 RSA 범위에서 슬라이더-디스크 충돌을 막는 상태행렬 변화에 관련된 서스펜션 설계를 수행해야 한다.

후 기

본 연구는 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원과 BK 나노/마이크로 응용기계기술 인력양성사업단, 삼성전자의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R17-2008-040-01001-0).

참고문헌

- [1] D. B. Bogy and Q. H. Zeng, 2000, "Design and operating conditions for reliable load/unload systems," Tribol. Int., Vol. 33, pp. 357-366.
- [2] Q.H. Zeng and D.B. Bogy, 2000, "A Simplified 4-DOF Suspension Model for Dynamic Load/Unload Simulation and Its Application," ASME Journ. Tribol., Vol.122, pp.274-279.
- [3] J.R. Yaeger, 2002, "Ramp loading "sweet spots", Microsys. Technol., Vol.8, pp.41~46.
- [4] J.R. Yaeger, 2002, "Ramp unloading "footprints", Microsys. Technol., Vol.8, pp.22~26.
- [5] L. Meirovitch, "Elements of Vibration Analysis," McGraw-Hill, the 2nd edition, pp.148-153