

로드/언로드 성능향상을 위한 서스펜션의 구조최적화

김기훈[†], 손석호*, 박경수**, 윤상준*,
박노철**, 양현석***, 최동훈*, 박영필***

Integrated Optimal Design for Suspension to Improve Load/Unload Performance

Ki-Hoon Kim[†], Suk-Ho Son*, Kyoung-Su Park***, Sang-Joon Yoon*,
No-Cheol Park**, Hyun-Seok Yang***, Dong-Hoon Choi*, Young-pil park***

Key Words : load/unload(로드/언로드), state matrix(상태행렬), lift-off force(리프트오프 힘), optimization(최적화)

ABSTRACT

Load/Unload(L/UL) technology includes the benefits, that is, increased areal density, reduced power consumption and improved shock resistance contrary to contact-start-stop(CSS). It has been widely used in portable hard disk drive and will become the key technology for developing the small form factor hard disk drive. The main object of L/UL is no slider-disk contact or no media damage. For realizing those, we must consider many design parameters in L/UL system. In this paper, we focus on lift-off force. The "lift-off" force, defined as the minimum air bearing force, is another very important indicator of unloading performance. A large amplitude of lift-off force increases the ramp force, the unloading time, the slider oscillation and contact-possibility. To minimize "lift-off" force we optimize the slider and suspension using the integrated optimization frame, which automatically integrates the analysis with the optimization and effectively implements the repetitive works between them. In particular, this study is carried out the optimal design considering the process of modes tracking through the entire optimization processes. As a result, we yield the equation which can easily find a lift-off force and structural optimization for suspension.

1. 서론

디지털 시대의 도래로 모든 정보들이 디지털화 되고, 이렇게 변환된 정보의 전달 및 저장을 위한 휴대용, 고용량의 정보저장기기에 대한 필요성이 증가하고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 하드디스크는 저전력과 신뢰성확보를 동시에 만족해야 하므로 기존의 구동방식인 CSS(Contact Start Stop)방식 대신 로드/언로드(Load/Unload)방식이 적

용되고 있다. 로드/언로드 기술의 주된 목적은 슬라이더와 디스크간의 충돌을 막고 그로 인한 미디어의 손상을 방지하고 부드럽고 짧은 언로딩 과정을 구현하는 것이다. 이러한 로드/언로드 시스템을 구현하는 데 있어 슬라이더의 공기베어링 형상이나 서스펜션의 작동 변수 등의 많은 설계 변수들이 존재한다. Zeng et. al.[1]과 Hu et. Al.[2]은 음압(negative pressure) 슬라이더의 언로딩 과정에 대하여 연구하였고 당기는 힘(suction force)이 언로딩 과정에서 대부분의 슬라이더에 심각한 영향을 준다는 것을 보였다. 이를 막기 위하여 Zeng 과 Bogy[3]는 L/UL 과정에서 슬라이더의 형상을 디자인하였다. 또한 Zeng 과 Bogy[5]는 L/UL 시뮬레이션을 위해 단순화된 4 자유도 서스펜션 모델을 이용하였고 그에 대한 응용을 알아보았다. 지금까지의 연구에서는 리프트오프(lift-off)힘이 슬라이더-디스크 간의 충돌에 심각한 영향을 준다[5]는 연

[†] 연세대학교 기계공학과 대학원
E-mail : kkhmllove@nate.com
TEL : (02)2123-4677 FAX : (02)365-8460
* 한양대학교 기계설계학과
** 연세대학교 정보저장기기 연구센터
*** 연세대학교 기계공학과

구는 있었지만 서스펜션의 형상변화에 의한 리프트오프 힘의 변화가 어떻게 되는지에 대한 연구는 없었다. 서스펜션의 형상변화가 리프트오프 힘에 어떠한 영향을 주는지를 알기 위해서는 로드/엔로드 시뮬레이터[5]를 통하여 알 수 있는데 이는 많은 시간을 요하게 된다. 따라서 서스펜션의 형상변화에 따른 정적(static)해석을 통하여 로드/엔로드 해석을 통해 나오는 엔로딩 과정에서 충돌을 야기시키는 중요한 인자중의 하나인 리프트오프 힘을 예측할 수 있는 식을 제시하여 서스펜션의 구조최적화를 구하고자 한다.

2. 본 론

1. 로드/엔로드 메커니즘

하드디스크 드라이브는 크게 디스크와 슬라이더, 액츄에이터로 구분된다. 디스크는 정보의 기록면이고 슬라이더는 기록/재생을 위한 헤드를 포함하며 공기베어링을 형성시켜 디스크 위에서 부상하게 된다. 액츄에이터는 슬라이더 및 서스펜션을 지지하는 동시에 디스크 위에서 구동을 담당한다. 기존의 하드디스크 드라이브에 적용되었던 CSS방식은 램프가 존재하지 않고 디스크 위에 랜딩존(landing zone)을 위한 텍스처 구조가 존재한다. 이 구조에 의해 헤드의 부상 높이를 줄이는데 문제점이 존재하고 비 구동 시 외부 충격에 약하기 때문에 정보가 손실될 가능성이 크다. 이에 반해 소형 하드디스크 드라이브에 많이 사용되는 로드/엔로드 방식은 Fig.1처럼 비 구동 시 램프 위로 엔로딩 되어 있다가 구동 시 램프 로딩을 통해 슬라이더를 디스크 위치시키는 기술로 기록면 전체를 유효하게 사용하고 부상 높이를 낮출 수 있어 쉽게 저장용량을 늘리기 쉽다. 또한 비 동작 시 충격에 강하고 저 소비전력을 사용하기 때문에 휴대 가능한 하드디스크 드라이브를 만드는 데 유리하다.[7]

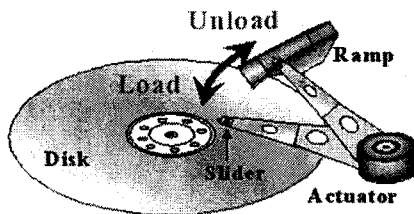


Fig.1 L/UL mechanism

2. 서스펜션(Suspension)의 동특성 해석

1 인치 마이크로 드라이브의 서스펜션은 베이스블럭(Baseblock), 로드빔(Loadbeam), 플렉서(Flexure), 슬라이더(slidebar) 그리고 플렉스케이블(Flexcable)등

으로 구성되어 있다. 본 연구의 궁극적인 목적은 1 인치 마이크로 드라이브의 서스펜션에 대한 동특성 해석을 통한 상태행렬(state matrix)등 여러가지 힘을 구하고 리프트오프 힘을 시뮬레이터를 이용하여 구한다. 정확한 서스펜션의 강성행렬을 위해서는 정확한 FE 모델을 생성하는 것은 중요한 부분이다. 이에 본 연구는 1 인치 마이크로 드라이브용 서스펜션에 대한 APDL화된 모델링을 수행하였고, 이를 바탕으로 서스펜션의 모드등에 대한 튜닝작업을 통하여 실제 서스펜션과 유사한 FE 모델을 구축하였다.

2.1 유한요소 해석

2.1.1 서스펜션 모델 및 물성치

FEM 구성요소는 서스펜션을 지탱해 주는 베이스블럭과 비틀림 모드의 강성 증가를 담당하며 플렉서와 연결을 가지는 로드빔 부분이 있다. 그리고 슬라이더의 부상과 운동이 자유로울 수 있도록 영향을 주는 플렉서 부분이 있다. 또한 공기부상력(air-bearing force)을 받으며, 디스크의 거칠기 등에 순응하면서 기록을 담당하는 슬라이더부분으로 나눌 수 있다. Table.1은 FE 모델화된 서스펜션의 재료적 특성 및 두께를 나타내고 있다. 로드빔과 베이스블럭 그리고 플렉서의 물성은 stainless steel 계의 재료가 사용되었다. 슬라이더는 AL203_TLC 재료가 제작되었다고 보았다.

Table.1 Material Properties

Component	Baseblock	Loadbeam	Flexure	Slider
Material	Stainless steel	Stainless steel	Stainless steel	AL203_TLC
Young's modulus (kg/mm ²)	1.93*10 ⁸	1.93*10 ⁸	1.93*10 ⁸	4.12*10 ⁹
Density (kg/mm ³)	8.03*10 ⁻⁶	8.03*10 ⁻⁶	8.03*10 ⁻⁶	4.25*10 ⁻⁶
Poission's ratio	0.3	0.3	0.3	0.27
Thickness	0.203mm	0.1016mm	0.025mm	

2.1.2 FE 모델링

베이스블럭은 0.203mm의 두께를 갖는 shell63 요소를 사용하여 모델링 하였고, 로드빔과 플렉서도 같은 shell63 요소를 사용하였고, 두께는 0.116mm, 0.027mm이다. 슬라이더의 모델링은 Solid45의 요소를 사용하였다.

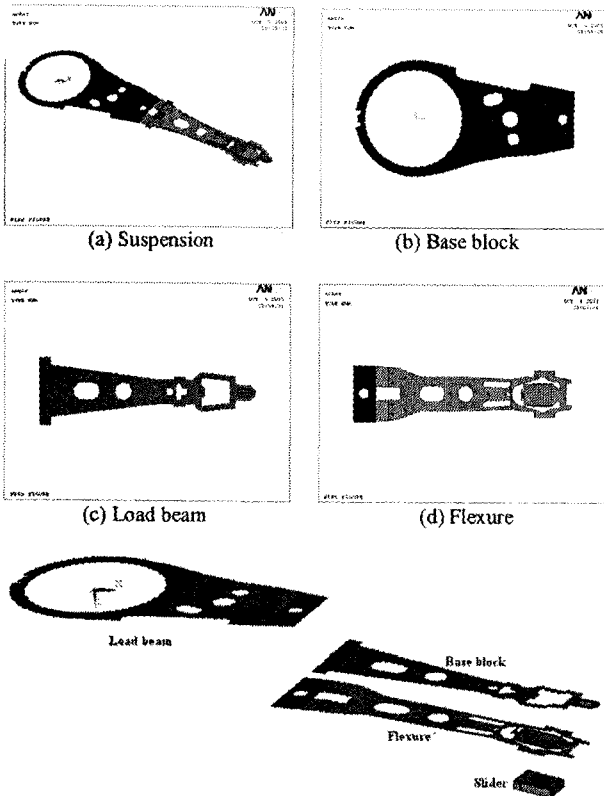


Fig.2 Suspension elements

자유 상태의 해석을 위해서 FE 모델의 베이스블럭의 모든 부분의 자유도를 구속시켰다. 그리고 슬라이더와 플렉서의 경계 조건은 같은 메쉬(mesh)를 만들어 공유(merge)기능을 사용하여 서로의 모드(mode)를 구속시켰으며, 플렉서와 덤플(dimple)과의 경계조건은 한 점에 대해서 서로의 노드를 커플링(coupling)하였으며 그 경계조건으로 z 방향의 구속조건만을 같게 하였다. 그리고 용접(welding)점에 대한 경계 조건은 각 shell들에 용접점과 같은 크기의 요소를 만들었으며, 그 부분에 대해서는 공유기능을 사용하여 경계조건을 구속시켰으며, 그 근처에 대해서는 커플링 기능을 사용하여 z방향에 대해서 노드들을 구속시켰다.

2.1.3 모달 해석 결과 (Modal Analysis Results)

FE 모델에 대한 모드 해석은 1 차 비틀림 모드까지 5 가지 주파수 범위에 대해서 수행되었다. 이는 로드/언로드의 동특성에 영향을 미치는 서스펜션의 강성들이 이들 5 개의 모드 등에 의해서 결정되기 때문이다. Table.2 에서 보는 것과 같이 캔틸레버 모드는 약 198Hz 를 가지고 슬라이더 피칭 및 롤링 주파수는 약 1.9kHz, 3.0kHz 를 가진다. 또한 1 차 굽힘 모드와 1 차 비틀림 모드의 값은 3.45kHz, 6.03kHz 로 해석되었다.

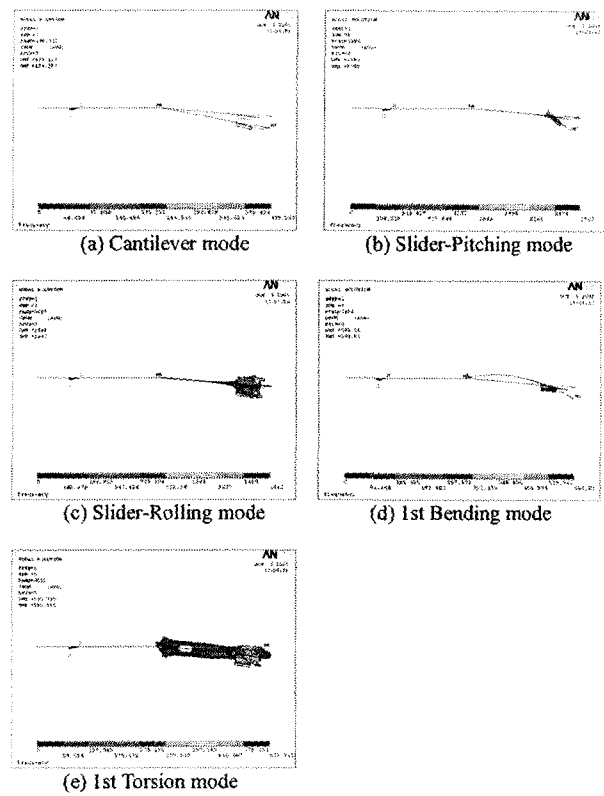


Fig.3 Natural frequencies and mode shapes

Table.2 Comparison between FEM and EXP Mode Frequency

Mode Shape	EXP	FEM	Error(%) =(EXP-FEM)/EXP*100
Cantilever	195.3 Hz	198.5 Hz	-1.64
Slider-Pitching	2.07 kHz	1.89 kHz	8.69
Slider-Rolling	2.99 kHz	3.00 kHz	-0.33
1 st bending	3.48 kHz	3.45 kHz	0.86
1 st torsion	6.09 kHz	6.03 kHz	0.99

2.2 상태행렬 (State Matrix)

Fig.4 는 덤플과 T 바 리미터(limiter)를 가진 서스펜션의 로드/언로드 과정을 보여주고 있다. 상태 1 은 회전하는 디스크에서 공기 부상력에 의해서 정상상태의 운동을 하고 있는 부분이며, 상태 2 는 로딩 과정 중에서 아직 리미터가 결합하지 않은 상황에서 로드빔의 탭(tap)이 램프(ramp)와 접촉을 시작하는 상태를 보여준다. 그리고 상태 3 은 흡입력(negative force)과 탭에서 서스펜션을 들어 올리는 힘에 의해서 덤플과 떨어진 상태이며 계속해서 탭은 로딩과정을 진행해 가는 상태이다. 마지막 단계인 상태 4 에서는 흡입력에 의해서 플렉서의 손상을 방지하기 위해서 개발된 리미터에 의해서 슬라이더가 들어올려지는 단계이며, 이후부터는 계속적인 상승을 통해서 로딩과정이 마무리되게 된다. 이과정의 역순이 언로딩 단계를 나타낸다.

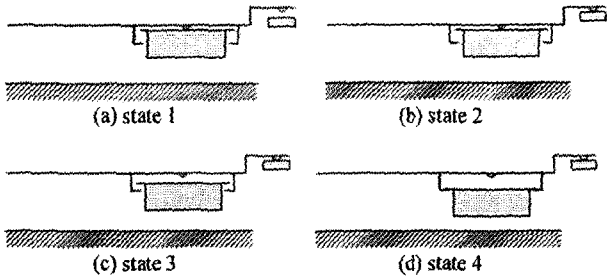


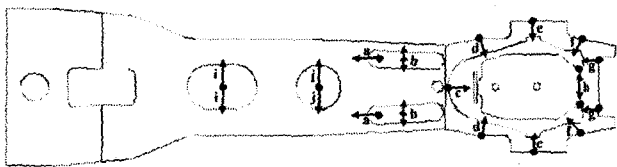
Fig.4 Unloading states

위의 단계의 경계조건의 변형에 의해서 4 자유도로 모델링된 서스펜션의 강성 또한 변화하게 된다. 그래서 이러한 강성의 변화를 시뮬레이터에 추가 시킴으로써 더욱 실제와 비슷한 형태의 L/UL 시뮬레이션이 가능하게 된다. 따라서 위의 각 단계의 경계조건을 통해서 슬라이더의 Z 방향의 강성과 롤, 피칭강성과 탭 강성을 구하였다.

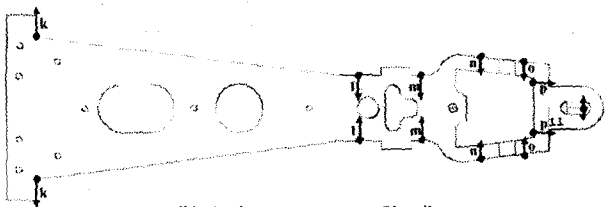
Table.3 각 상태에 대한 4자유도 강성 행렬

State No.	Stiffness Matrices			
2	0.1167e+4	-0.1402e+4	0.1233e+1	0.7919e-3
	-0.1402e+4	0.1898e+4	-1.663e+1	-0.1070e-2
	0.1233e+1	-1.663e+1	0.4312e-4	0.2735e-7
	0.7919e-3	-0.1070e-2	0.2735e-7	0.8579e-4
3	0.3259e+2	-0.3184e+2	0.9303e-2	0.5727e-4
	-0.3184e+2	0.4211e+2	-0.6162e-2	-0.6758e-4
	0.9303e-2	-0.6162e-2	0.4810e-4	0.5159e-7
	0.5727e-4	-0.6758e-4	0.5159e-7	0.8579e-4
4	0.7313e+3	-0.1082e+4	-0.8432e+0	-0.1145e-1
	-0.1082e+4	0.1622e+4	0.1276e+1	0.1708e-1
	-0.8432e+0	0.1276e+1	0.1088e-2	0.1343e-4
	-0.1145e-1	0.1708e-1	0.1343e-4	0.1993e-2

2.3 디자인 변수 (Design parameters)



(a) Design parameters of flexure



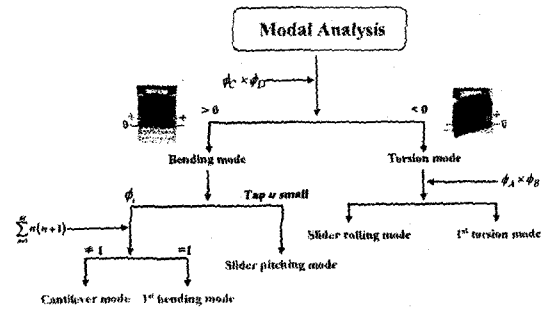
(b) Design parameters of loadbeam

Fig.5 Design parameters

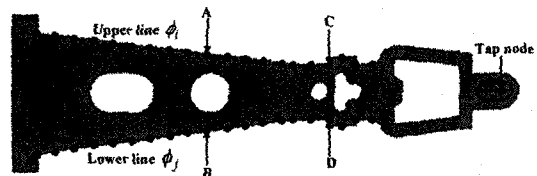
Table.4 Design variable constraints of flexure & loadbeam

Variables	Minimum	Default	Maximum
a	-0.5	0	0.5
b	-0.01	0	0.25
c	-0.05	0	0.15
d	-0.05	0	0.2
e	-0.1	0	0
f	0	0	0.1
g	0	0	0.2
h	-0.07	0	0.25
i	0.1	0.4	0.5
j	0.1	0.4	0.5
k	-0.3	0	0.2
l	-0.1	0	0.2
m	-0.1	0	0.2
n	-0.2	0	0.2
o	-0.2	0	0.2
p	-0.2	0	0.2
q	0.1	0.2	0.2

2.3.1 모드트래킹 (mode tracking)



(a) Mode tracking procedure



(b) Nodal points

Fig.6 Mode tracking

최적화 수행과정에서 서스펜션의 변수들의 변화에 의해서 모드가 바뀌는 현상이 발생할 수 있기 때문에 본 연구에서는 FEM 해석을 통하여 구한 모드순서(cantilever, slider-pitching, slider-rolling, 1st bending, 1st torsion)를 유지하기 위해 모드트래킹 방법을 사용하였다. 위의 프로그램은 먼저 로드빔의 위쪽경계(upper line)와 아래쪽경계(lower line)를 총 20 개의 노드로 나누었다. 먼저 굽힘 모드와 뒤틀림 모드를 나누기 위하여 위쪽경계와 아래쪽 경계 중에 슬라이더 근처의 로드빔의 노드를 위쪽(C)과 아래쪽(D) 각각을 하나씩 잡았다. 그런 후 각각의 모드에 대하여 고유벡터 ϕ_c , ϕ_D 를 서로

곱하여 곱한 값이 양수면 곱힘 모드로 나누고 곱한 값이 음수면 뒤틀림 모드로 나누었다. 뒤틀림 모드 중에서 슬라이더 롤링 모드와 1 차 비틀림 모드를 나누기 위하여 로드빔의 중간쯤에서 위(A)와 아래(B)쪽에 각각 하나의 노드를 잡은 후 두 개의 고유벡터 ϕ_A, ϕ_B 을 서로 곱하여 그 수가 크면 1 차 비틀림 모드로 나누고 작으면 슬라이더 롤링 모드로 나누었다. 곱힘 모드 중에서 캔틸레버 모드, 슬라이더 피칭 모드 그리고 1 차 곱힘 모드를 나누기 전에 먼저 탭의 고유벡터가 가장 작은 값을 가지는 모드를 슬라이더 피칭 모드로 나누고 캔틸레버 모드와 1 차 곱힘 모드는 로드빔의 위쪽경계에서 잡은 노드들의 고유벡터 값을 순서대로 하나씩 곱하여 음수의 갯수가 1 이면 1 차 곱힘 모드로 나누었고 그렇지 않으면 캔틸레버 모드로 나누었다.

Table.5 Stiffness values of FEM model

	Off ramp, Dimple closed	On ramp, Dimple closed	On ramp, Dimple separated	On ramp, Limiters engaged
Tap stiffness [N/m]	-----	0.17e+4	0.32e+2	0.73e+3
Vertical stiffness [N/m]	14.63	0.21e+4	0.42e+2	0.16e+4
Pitch stiffness [Nm/rad]	0.455e-4	0.48e-4	0.48e-4	0.11e-2
Roll stiffness [Nm/rad]	0.86e-4	0.85e-4	0.86e-4	0.2e-2

3. 최적화 프로세스

3.1 민감도 해석 (sensitivity analysis)

2.3 에서 본 바와 같이 디자인 변수 17 개에 플렉서 두께 그리고 로드빔 두께까지 합하여 총 19 개의 디자인 변수를 선정하고 19 개의 변수에 대하여 민감도 해석을 하였다. 각각의 디자인 변수들에 대하여 상태 2 행렬, 상태 3 행렬 그리고 상태 4 행렬의 대각성분의 민감도를 구하였다. 그리고 딤플 힘과 리미터 힘에 대하여 민감도 해석을 하였으며 피치 관성과 톨 관성에 대한 민감도 해석을 하였다. 또한 수직, 피치 그리고 롤 강성에 대한 민감도 해석을 수행하였으며 마지막으로 각각의 5 개의 모드들에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석을 통하여 가장 민감하다고 생각되는 디자인 변수 10 개를 다시 선정하였다. 따라서 10 개의 변수에 대하여 DOE table 100 개를 선정하여 100 개에 대한 각각의 상태행렬, 관성, 강성, 힘 등을 구하여 로드/언로드 시뮬레이터를 실행하였다.

3.2 관계식

DOE table 을 통한 로드/언로드 시뮬레이터를 실행함으로써 리프트오프 힘을 구하였다. 이 때의 리프트오프 힘과 탭 강성, 슬라이더 강성과의 관계식을 만들었다. 따라서 우리가 구한 관계식을 목적함수로 두면 목적함수와 구속조건은 다음과 같다.

min $f(x_1, x_5) = \text{Lift-off force}$

$$f(x_1, x_5) = -1.355562 - 0.030162x_9 + 0.0175572x_{10} + 0.0001352(x_9 - 512.769)^2 - 0.000033(x_{10} - 1146)^2 - 0.065937x_1 + 0.0346158x_2 - 0.000052(x_1 - 790.623)^2 + 0.0000193(x_2 - 1446.77)^2 - 0.096469x_5 - 0.005792x_6 + 0.015937(x_5 - 29.2846)^2$$

Subject to

$$185.5\text{Hz} \leq \text{cantilever} \leq 205.065\text{Hz}$$

$$1.863\text{kHz} \leq \text{slider - pitching} \leq 2.277\text{kHz}$$

$$2.691\text{kHz} \leq \text{slider - rolling} \leq 3.289\text{kHz}$$

$$3.132\text{kHz} \leq 1^{\text{st}} \text{ bending} \leq 3.828\text{kHz}$$

$$5.481\text{kHz} \leq 1^{\text{st}} \text{ torsion} \leq 6.699\text{kHz}$$

여기서

$$x_2 = 47.621459 + 1.7690061x_1 \quad (1)$$

$$x_9 = 6.9358161 + 0.6395482x_1 \quad (2)$$

$$x_{10} = 59.663053 + 1.3735052x_1 \quad (3)$$

$$x_6 = -2.5009907 + 1.3791142x_5 \quad (4)$$

위의 식 (1), (2), (3), (4)는 95%이상의 근사화를 만족시키는 관계식을 뽑아 낸 것이다. 여기서 x_1, x_5, x_9 는 각각 상태 2, 상태 3, 상태 4 의 탭 강성이며 x_2, x_6, x_{10} 는 각각 상태 2, 상태 3, 상태 4 의 슬라이더 강성이다. 목적함수의 값은 3.026 에서 0.7744 까지 내려갔으며 그 때의 리프트 오프 힘의 값은 -1.74 에서 -0.88 이 되었다. 그 때의 시뮬레이션을 통한 리프트오프 힘의 값은 -0.90 이다.

Table.6 Comparison variables between Initial and Optimal Model

	Initial	Optimal	Improvement
Objective	3.026	0.7744 N/m	74.4%
x_1	1166.4 N/m	1300 N/m	-11.45%
x_2	2120.7 N/m	2347 N/m	-10.6866
x_5	32.5 N/m	26 N/m	20%
x_6	42.1 N/m	33 N/m	20.76%
x_9	731.3 N/m	838 N/m	-14.63%
x_{10}	1622.1 N/m	1845 N/m	-13.7538

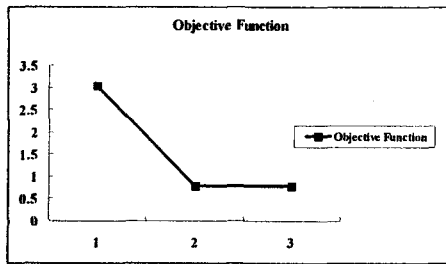
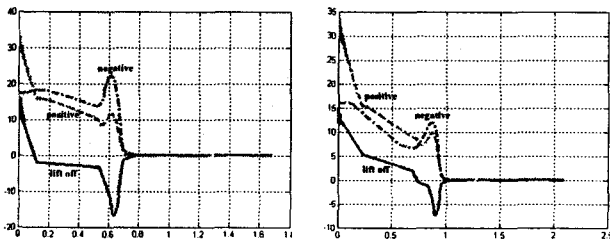


Fig.7 Optimization of Objection Function



(a) Initial (b) Optimal
Fig.8 Comparison lift-off force between Initial and Optimal Model

들을 구하고 그 힘들로부터 로드/언로드 시뮬레이터를 통하여 리프트오프 힘들을 구하였다. 시뮬레이션 중에 모드들의 순서가 변경될 수 있으므로 최적화 과정에서 모드트래킹 기법을 사용하여 이러한 변경에 대한 보상을 수행하였다. FE 모델로부터 얻어진 각 상태의 힘들과 시뮬레이션을 통한 리프트오프 힘과의 관계식을 구하고 이를 최소화하는 서스펜션의 모델을 구축하여 언로딩 특성이 향상되었음을 보였다. 관계식을 이용하여 리프트오프 힘을 쉽게 구할 수 있었으며 그 때의 서스펜션의 구조최적화 형상을 구할 수 있었다.

후기

본 연구는 한양대학교 최적신기술 연구센터[iDOT]와 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터[CISD] (R11-1997-042-11000-0)의 지원을 받아 이루어졌으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Q. H. Zeng, M. Chapin and D. B. Bogy, "Dynamics of the unloading process for negative pressure slider," IEEE Trans. Magn., Vol. 35, pp. 916-920, 1999.
- [2] Y. Hu, P.M. Jones and K. Li, "Air bearing dynamics of sub-ambient pressure sliders during dynamics unload," ASME/STLE, International Tribology Conference, Totonto, Canada, Oct. 25-28, 1998.
- [3] Q. H. Zeng and D. B. Bogy, "Slider air bearing designs for load/unload applications," IEEE Trans. Magn., Vol. 35, pp. 746-751, 1999.
- [4] Q. H. Zeng and D. B. Bogy, "A simplified 4-DOF Suspension Model for Dynamic Load/Unload Simulation and its Application," Technical Report No. 99-003, Computer Mechanics Laboratory, U. C. Berkeley, February 1999.
- [5] Q. H. Zeng and D. B. Bogy, "Reliability Criteria for Dynamics Load/Unload," Technical Report, Computer Mechanics Laboratory, U. C. Berkeley.
- [6] Q. H. Zeng and D. B. Bogy, "The CML Dynamics Load/Unload Simulator V4.21.10," Technical Report No. 98-008, Computer Mechanics Laboratory, U. C. Berkeley, March 1998.
- [7] 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

3.3 구조최적화

위에서 구한 관계식은 x_1, x_5 로 표현된다. 따라서 x_1, x_5 를 최소로 하는 서스펜션의 형상을 찾는다 면 그 때가 리프트오프 힘을 최소로 갖는 서스펜션의 구조최적화가 된다. 따라서 x_1, x_5 를 최소로 하는 값은 다음과 같은 목적함수와 경계조건을 갖는다.

$$\min f(x_1, x_5) = (x_1 - 1300)^2 + (x_5 - 26)^2$$

Subject to

$$185.5\text{Hz} \leq \text{cantilever} \leq 205.065\text{Hz}$$

$$1.863\text{kHz} \leq \text{slider - pitching} \leq 2.277\text{kHz}$$

$$2.691\text{kHz} \leq \text{slider - rolling} \leq 3.289\text{kHz}$$

$$3.132\text{kHz} \leq 1^{\text{st}} \text{ bending} \leq 3.828\text{kHz}$$

$$5.481\text{kHz} \leq 1^{\text{st}} \text{ torsion} \leq 6.699\text{kHz}$$

따라서 위의 결과에 따라 서스펜션의 형상을 구하면 그 때의 형상이 리프트오프 힘을 최소로 하는 서스펜션의 형상이 된다.

5. 결론

로드/언로드 시 슬라이더와 디스크의 충돌에 민감한 영향을 줄 것으로 생각하는 리프트오프 힘을 예측하기 위한 관계식을 언로딩 단계에서의 각 상태에서 작용하는 강성행렬의 식으로부터 설정하였다. 그 방법은 FE 모델로부터 디자인 변수를 정하고 민감도 해석을 통한 변수들을 재 정립한 후 DOE 방법을 통하여 각각에 대한 DOE table 를 구하였다. DOE table 에 의한 각각의 상태에 대한 힘