한국소음진동공학회 2003년도 추계학술대회논문집, pp.898~901.

램프 로드-언로드 특성 향상을 위한 서스펜션강성 최적설계

Optimal design of the suspension stiffness in HDD for improving the load/unload performance

강태식*·김태수**·이철우***

Tae-Sik, Kang, Tae-Soo, Kim and Woo-Chul, Lee

Key Words : HDD, Load/Unload, Response surface method, Slider, Suspension, Stiffness matrix,

ABSTRACT

In order to get the drive reliability and low power-consumption characteristics, most of small form factor HDD has used the load/unload mechanism instead of CSS type. Compared with CSS mechanism, the load/unload system has little opportunity of head/media contact during the disk spin-up and down. However, the load/unload mechanism needs the precise integration technology with slider, suspension, ramp and load/unload velocity, and all of these component s should be designed simultaneously, not an individually.

In this paper, we focus the design of the suspension stiffness using the specified ABS design. We use the CML software to calculate the load/unload dynamic and use the RSM(Response surface method) to get the optimal condition of the suspension stiffness.

1. 서 론

HDD 용량이 최근 수년간 매년 약 60%이상으로 증가하고 있어, 이를 달성하기 위해 보다 정밀한 기술이 요구되고 있다. 특히 슬라이더의 부상높이는 최근 10nm이하로 낮아지면서 디스크와의 접촉에 의해 트라이볼로지 문제가 크게 이슈화 되고 있는 실정이다.

랩탑과 같은 휴대용 컴퓨터에 사용되는 HDD는 저전력소모와 신뢰성확보를 동시에 만족해야 하므로, 기존의 구동 방식인 CSS 대신 램프 로드-언로드 방식이 적용되고 있다. 램프 로드-언로드 방식은 CSS와는 달리 슬라이더가 디스크에서 직접 뜨고 내리지 않아 디스크와의 접촉을 크게 줄일 수 있을 뿐 아니라, 비작동시 충격에 매우 강한 장점을 가지고 있다.

그러나, 램프 로드-언로드에서는, 슬라이더가 디스크로 로딩(loading)되는 순간과 디스크로부터 언로딩(unloading)되는 순간에 충돌이 발생할 가능성이 있다. 이러한 충돌을 방지하기 위해서는 슬라이더의 air-bearing surface(이하 ABS), 서스펜션, 램프, 그리고 로드-언로드 속도를 모두 고려하여 최선의 설계안을 도출하여야 한다.

본 논문에서는 슬라이더가 디스크로 로딩할 경우와 디스크로부터 언로딩할 경우의 슬라이더 운동을 계산하고, 서스펜션 강성에 대한 민감도 해석을 통해 슬라이더와 디스크의 접촉을 최소화하는 최적의 서스펜션강성을 제안하였다.

* 삼성전자㈜ 스토리지 사업부
E-mail : ts.kang@samsung.com
Tel : (031) 200-2927, Fax : (031) 200-3536

** 삼성전자㈜

*** 삼성전자㈜

2. 로드-언로드 시뮬레이션

2.1 시뮬레이션 조건

로드-언로드시 슬라이더의 운동은 상용화되어 널리 사용되고 있는 CML 소프트웨어로 계산하였다[1]. 계산에 필요한 여러 가지 입력조건과 ABS 대한 입력조건을 표 1)과 같이 정리하였다.

2.2 시뮬레이션 결과

슬라이더가 디스크로 로딩할 때의 슬라이더 운동은 Fig. 1)과 같다. 일반적으로 로딩하면서 슬라이더는 피칭모션(pitching motion)과 롤링모션(rolling motion)이 다양하게 작용하나, 본 시뮬레이션에서는 피칭과 롤링모션이 없는 상태에서 로딩이 시작되는 것으로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 로딩시 슬라이더는 점진적으로 디스크에 도달하게 되며, 디스크와의 접촉은 발생하지 않음을 알 수 있었다.

한편 언로딩시의 슬라이더의 운동은 Fig. 2)와 같으며, 약 1.5msec가 지난 후에는 슬라이더 피치각이 커지면서 디스크와 접촉이 발생하게 됨을 확인하였다.

3. 서스펜션강성 최적화

3.1 서스펜션 강성

현재 구동조건 및 ABS 그리고 서스펜션의 조합에서는 슬라이더가 디스크로부터 언로드할 때 접촉이 발생함을 확인하였다.

표 1) Operating condition & ABS parameters

	Parameters	Values
Operating condition	Disk RPM	5400
	Loading position Radius Skew	 30.6 mm 15.4 deg
	Loading velocity (Longitudinal)	2 ips
	Unloading velocity (Longitudinal)	4 ips
ABS	Size(L×W×T)	1.235×1.0×0.3 mm
	Crown	20 nm
	Camber	0 nm
	Twist	0 nm

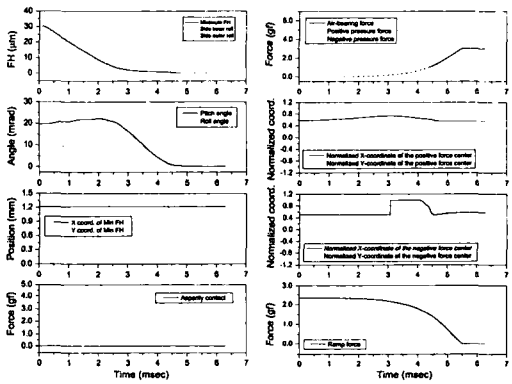


Fig.1) Loading dynamics

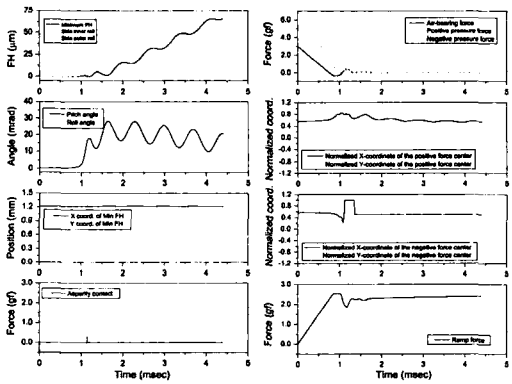


Fig.2) Unloading dynamics

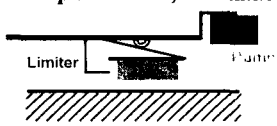
이와 같이 발생된 접촉력은 매우 작으나, 300,000회 이상의 로드-언로드 조건에서 드라이브 신뢰성이 반드시 확보되어야 하기 때문에, 이러한 접촉현상은 반드시 제거 되어야 한다.

본 연구에서는 언로드 할때의 슬라이더 운동을 보다 안정화 하기 위해, 서스펜션강성에 대한 최적화를 수행하려 한다. 우선 로드-언로드시의 각 단계별 서스펜션 강성은 표 2)와 같다.

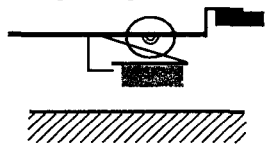
표 2) Original suspension stiffness matrix

State	Stiffness matrix
1	1.0286e+003 -1.3610e+003 9.9441e-004 1.0776e-004 -1.3610e+003 1.8206e+003 7.0778e-003 -1.4972e-004 9.9441e-004 7.0778e-003 5.3008e-005 -9.3487e-008 1.0776e-004 -1.4972e-004 -9.3487e-008 6.8795e-005
2	4.2001e+001 -4.5420e+001 -1.8370e-002 2.5222e-005 -4.5420e+001 6.6176e+001 3.1521e-002 -3.3300e-005 -1.8370e-002 3.1521e-002 4.2138e-005 -3.1404e-008 2.5222e-005 -3.3300e-005 -3.1404e-008 6.7522e-005
3	5.0636e+002 -7.7708e+002 -6.8711e-001 3.0398e-004 -7.7708e+002 1.2251e+003 1.1228e+000 -4.7355e-004 -6.8711e-001 1.1228e+000 1.2375e-003 -4.1104e-007 3.0398e-004 -4.7355e-004 -4.1104e-007 7.9170e-004

State 1 : Dimple is Closed, and limiters are open



State 2 : Dimple is separates, and limiters are open



State 3 : Dimple is separates, and limiters are engaged

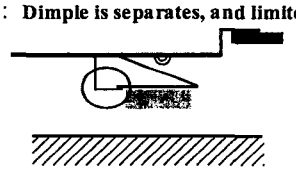


Fig.3) Status of suspension during load/unload

1단계는 서스펜션 탭이 램프에 닿아 있는 경우로써 플렉셔(flexure)가 서스펜션 딤플(dimple)과 접촉이 유지되는 상태이며, 2단계는 서스펜션 탭이 램프에 닿아 있고 플렉셔가 서스펜션 딤플에서 떨어져 있는 상태이다. 그리고 3단계는 플렉셔의 리미터(limiter)가 서스펜션과 접촉이 되는 상태를 나타낸다. 이를 그림으로 도시하면 Fig. 3)과 같다.

이와 같은 서스펜션 강성은 다음 식1)에 의해 그 성분을 분리할 수 있다.

$$K = \Phi \cdot \Gamma \cdot \Phi^T \qquad (1)$$

where, Φ : *Eigenvector*
Γ : *Eigenvalue*
K : *Stiffness Matrix*

Γ 행렬에서 대각 행렬의 구성 요소는 각각 서스펜션 탭(tap) 강성, 수직강성, 피치강성 그리고 롤강성을 대표하는 고유값에 해당된다.

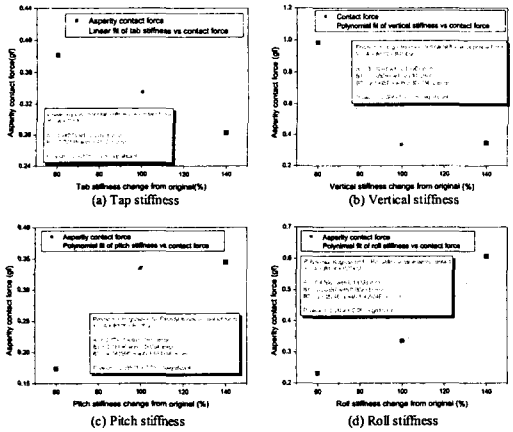


Fig.4) Sensitivity analysis of contact force according to the suspension stiffness

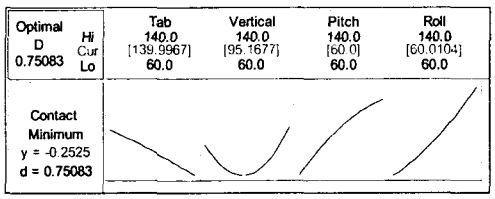


Fig.5) Response optimized results by RSM

표 3) Design of Experimental plan and results

StdOrder	RunOrder	Blocks	Tab	Vertical	Pitch	Roll	Contact F
1	1	1	80	80	80	80	0.32015
2	2	1	120	80	80	80	0.21922
3	3	1	80	120	80	80	0.33771
4	4	1	120	120	80	80	0.20870
5	5	1	80	80	120	80	0.37453
6	6	1	120	80	120	80	0.35657
7	7	1	80	120	120	80	0.31832
8	8	1	120	120	120	80	0.24510
9	9	1	80	80	80	120	0.90384
10	10	1	120	80	80	120	0.57314
11	11	1	80	120	80	120	0.44751
12	12	1	120	120	80	120	0.33828
13	13	1	80	80	120	120	0.58361
14	14	1	120	80	120	120	0.58744
15	15	1	80	120	120	120	0.33941
16	16	1	120	120	120	120	0.30786
17	17	1	60	100	100	100	0.38154
18	18	1	140	100	100	100	0.28240
19	19	1	100	60	100	100	0.98233
20	20	1	100	140	100	100	0.34640
21	21	1	100	100	60	100	0.17324
22	22	1	100	100	140	100	0.34431
23	23	1	100	100	100	60	0.23220
24	24	1	100	100	100	140	0.60627
25	25	1	100	100	100	100	0.33479

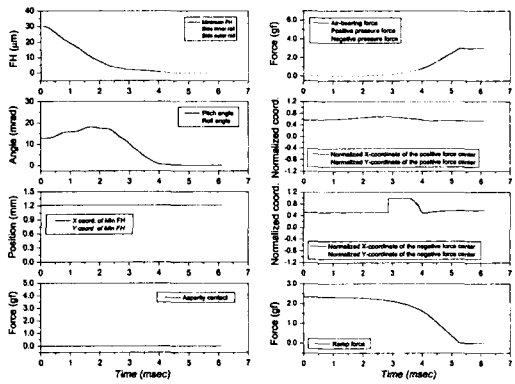
3.2 민감도 해석

서스펜션강성에 대한 영향을 분석하려면, Γ 행렬의 대각행렬 요소를 각각 변경하여 다시 식1)로부터 서스펜션강성을 재계산하여 로드-언로드 시뮬레이션에 적용하면 된다..

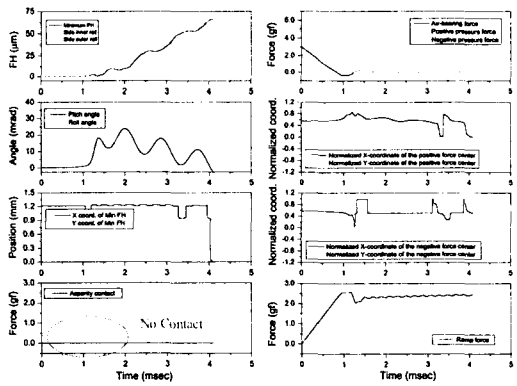
우선 Γ 행렬에서 각각의 대각행렬 요소들을 현재 값에서 60%, 80%, 120%, 140%로 변경하면서 로드-언로드시의 슬라이더의 접촉력을 계산한 결과 Fig.4)와 같으며, 탭 강성을 제외하고는 모두 곡률효과를 나타낸다.

표 4) Optimal suspension stiffness matrix

State	Stiffness matrix
1	9.2802e+002 -1.2232e+003 2.9123e-003 9.5510e-005 -1.2232e+003 1.6398e+003 7.8840e-003 -1.3585e-004 2.9123e-003 7.8840e-003 3.4650e-005 -5.8267e-008 9.5510e-005 -1.3585e-004 -5.8267e-008 4.1277e-005
2	4.0029e+001 -3.9166e+001 -1.4691e-002 2.2582e-005 -3.9166e+001 6.0876e+001 2.9785e-002 -3.0061e-005 -1.4691e-002 2.9785e-002 3.1605e-005 -2.3484e-008 2.2582e-005 -3.0061e-005 -2.3484e-008 4.0513e-005
3	4.5912e+002 -6.9720e+002 -6.0750e-001 2.7402e-004 -6.9720e+002 1.1040e+003 1.0175e+000 -4.2591e-004 -6.0750e-001 1.0175e+000 1.1002e-003 -3.7339e-007 2.7402e-004 -4.2591e-004 -3.7339e-007 4.7502e-004



(a) Loading dynamics



(b) Unloading dynamics

Fig.6) Load/unload dynamics with optimal suspension stiffness

3.3 최적화 기법

서스펜션강성은 4개의 강성요소로 분리 표현이 가능하며, 이러한 4가지 요소는 슬라이더의 로드-언로드 운동에 영향을 모두 미치는 것을 확인하였다. 최적화를 위한 설계인자 및 목적함수 구성을 식 2)와 같이 표현할 있다.

$$Minimize\ F(x) \qquad (2)$$

where, $F = contact\ force\ during\ load\ /\ unload$

$x = component\ of\ tap, vertical, pitch, roll\ stiffness$

여기서, x는 4개의 강성요소를 표현하며, F는 언로드시의 슬라이더와 디스크간의 접촉력을 의미한다.

최적기법으로는 곡률효과를 효과적으로 처리할 수 있는 반응표면 최적화 기법(RSM)을 사용하였으며, 이를 효과적으로 적용하기 위해 상용화된 Minitab 통계 툴을 이용하였다[3].

3.4 최적설계 결과

반응표면 최적화에는 표 3)과 같이 총 25번의 시뮬레이션 결과가 필요하며, 각각은 4가지의 설계요소들에 대해 다양한 조합으로 구성되어 있다. 접촉력을 최소화하기 위해 통계 툴에서 제공하는 최적 알고리즘을 사용하였으며, 결과는 Fig. 5)와 같다. 즉 언로드시의 접촉력을 최소화하는 조건은 탭 강성이 현재값의 140% 수준, 수직강성이 95% 수준, 피치와 롤 강성이 60%수준으로 결정되었다. 이 값으로부터 식1)를 이용하여 최적화된 서스펜션강성을 계산하면 표 4)와 같다.

표 4)의 최적 서스펜션강성을 적용하여 슬라이더의 로드-언로드 운동을 계산하면 Fig. 6)와 같다. 이로부터 최적화된 서스펜션강성을 이용할 경우, 로드 및 언로드시 슬라이더와 디스크간의 접촉은 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

로드-언로드시 슬라이더와 디스크간의 접촉을 최소화하기 위해 서스펜션강성 최적화를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 서스펜션강성은 로드-언로드시 슬라이더 운동에 영향을 미치는 인자중의 하나이다.
2. 서스펜션강성은 고유벡터와 고유값으로 분리가능하며, 고유값을 변경하여 서스펜션강성을 변화시킬 수 있다.
3. 서스펜션강성의 각각의 고유값은 언로드시 접촉력에 영향을 미치는 주요 설계인자이다.
4. 최적화 수행결과, 탭 강성은 최대화하며, 수직강성은 현재 값 수준으로 유지하며, 피치와 롤강성은 최소화하는 것이 언로드 특성을 향상시키는 방향이다.

후 기

본 연구를 위해 서스펜션강성에 대한 이론적인 해석방법 및 응용에 대해 많은 지도를 해 주신 CISD의 조언에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Q.-H. Zeng and D.B. Bogy, 1999, The CML Dynamic Load/Unload Simulator (Version 421.40), CML report.

(2) Q.-H. Zeng and D. B. Bogy, 2000, A Simplified 4-DOF Suspension Model for Dynamic Load/Unload Simulation and Its Application, Transaction of the ASME.

(3) Mintab Inc, 2000, MINITAB™ STATITICAL SOFTWAR, MINITB INC, www.minitab.com.