

NFR 서스펜션의 동특성을 고려한 형상설계에 관한 연구

A Study on Shape Design of NFR Suspension for Optimal Dynamic Characteristics

은길수*·김노유**

GILSOO EUN, NOHYU KIM

Key Words : Near Field Recording(NFR), optimal shape design, homogenization method, suspension

ABSTRACT

Optimal shape of the NFR suspension is studied and developed to improve the dynamic performance and reduce the vibration of the suspension system including a optical head slider. Since accurate position control and stability of the slider motion are highly required in NFR due to the narrower track width and the heavier slider than HDD slider with the low flying height, the dynamic characteristics of the suspension are very important to the mechanical performance of the system. The first natural frequencies in flexural and lateral motion of the suspension are critical factors affecting the dynamics and stability of the flying head, so that the dynamic parameters should be designed properly to avoid an excessive vibration or a crash of the slider on the disk. This paper optimizes the shape of the suspension based on homogenization method in NASTRAN and develops a new suspension shape for NFR system. The suspension is tested on experiment to verify the improvement of the dynamic characteristics.

1. 서론

컴퓨터의 고속화, 대용량화가 급속히 발전함에 따라 컴퓨터 정보저장기술의 향상 또한 급속하게 이루어졌다. 정보저장 기록장치는 크게 자기기록 방식과 광기록방식으로 분류된다. 광기록방식은 집속된 광을 이용하기 때문에 자기기록방식에 비해 선형밀도면에서 고집적의 저장능력을 갖고, 슬라이더와 디스크간의 부상높이가 수 mm 까지 가능하기 때문에 슬라이더와 디스크의 충돌과 마모의 문제점을 개선할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 광기록방식이 자기기록방식에 비해 저장능력면에서 향상되었지만 광의 회절한계로 인해 최대기록밀도에 있어서 한계가 있었다. 회절한계로 인한 최대기록밀도의 한계를 극복하기 위해 최근 광기록 분야에서 각광받는 기술이 NFR(Near Field Recording)방식인데 기존의 광기록방식(Far Field Recording)에서 수 mm 였던 슬라이더의 부상높이를 수백 nm 정도로 낮게 유지하면서 광섬유(Optical fiber), SIL(Solid Immersion Lens),

SIM(Solid Immersion Mirror)등을 이용해 광의 출구(Aperature)의 크기를 좁게 하여 광을 집속시켜 줌으로써 회절한계를 극복한 방식이다. 광의 집속과 제어를 위한 렌즈 및 미러(mirror)와 같은 광학장치의 부착으로 인해 슬라이더 자체의 무게가 기존의 하드디스크 슬라이더의 무게보다 많이 증가하게 되는데 특히 NFR 방식 중 SIM, SIL 을 이용한 방식들은 기존의 슬라이더 질량(5-6mg)에 비해 30mg 정도로 훨씬 큰 질량을 갖는다. 이러한 슬라이더 질량의 증가는 슬라이더를 지지하고 있는 서스펜션 로드빔의 동특성에 큰 영향을 주게 되어 슬라이더의 불안정한 운동을 발생시킨다. 슬라이더의 운동이 불안정하면 디스크로부터의 데이터의 입/출력에 큰 영향을 줄뿐만 아니라 디스크와의 충돌로 디스크에 손상을 주어 저장된 정보의 손실이 있을 수 있다. 디스크의 손상은 없더라도 잦은 접촉으로 인해 슬라이더가 마모되어 수명단축의 원인이 된다. 또한 슬라이더의 트랙제어에도 영향을 주게 되어 트랙밀도의 증가에 영향을 끼친다. 트랙밀도의 증가는 슬라이더의 위치제어 정밀도에 의해 결정되기 때문에 슬라이더를 지지해주는 서스펜션 로드빔(suspension load beam)의 동특성은 트랙킹 제어의 정밀도에 매우 중요하다. 서스펜션 로드빔의 진동모드는 크게 트랙오차에 거의 영향을 미치지 않는 순응도 모드(Compliance mode)와 트랙오차에 영향을 미치는 트랙킹 강성모드(Tracking stiffness mode)로 나뉘어지는데

* 한국기술교육대학교 기계공학과 대학원

E-mail : gseun@orgio.net

Tel : (041) 560-1120, Fax : (041) 560-1253

** 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

cantilever 모드나 슬라이더의 pitch, roll 모드가 순응도 모드에 속하며 1 차 bending 모드 이상의 진동모드가 트래킹 강성모드에 속한다. 서스펜션의 트랙오차에 큰 영향을 미치는 것은 스웨이(sway) 모드인데, 트래킹방향운동을 발생시켜 슬라이더가 트랙 방향으로 진동하기 때문이다. 일반적으로 서스펜션 로드빔의 설계는 디스크의 운동을 따라가도록 순응도 모드의 주파수는 충분히 낮은 반면 트래킹 강성모드의 주파수를 높게 설계함으로써 공진으로 인한 슬라이더의 진동을 회피하는 것이 좋기 때문에 두개의 조건을 만족할 수 있게 설계되어야 한다[1,2,3].

본 논문에서는 NFR 방식에 있어서 서스펜션-헤드 시스템의 질량증가로 인한 진동특성 저하를 방지하기 위해 균질화법(Homogenization Method)을 이용한 위상 최적화(topology optimization method)를 통해 새로운 형상의 서스펜션 로드빔을 설계, 제작하였으며 새로운 형상에 대해 FEM 모드 해석과 실험을 통한 모드해석을 통해 검증하였다.

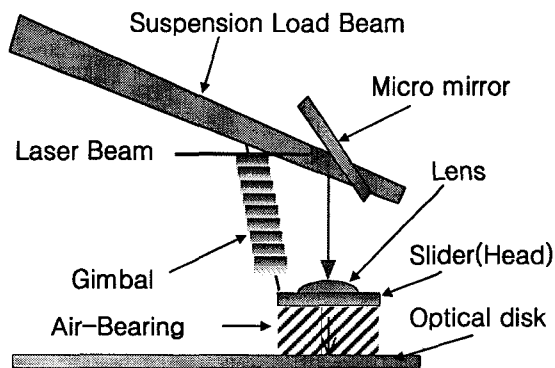


그림 1. NFR 방식의 개략도

2. 서스펜션 로드빔의 최적형상설계

2.1 서스펜션 로드빔 형상의 최적설계

서스펜션 로드빔의 형상최적화는 Optishape 상용화 해석 프로그램으로 수행되었으며 모델은 MSC-patran 에서 모델링되었다. Optishape 에서 위상최적화(Topology optimization method)를 통해 형상이 최적화 되었는데 구조물을 구성하는 구멍의 크기와 위상을 설계변수로 하여 최적화하는 방법으로 해석 과정 중에 재료가 추가되거나 제거되므로 해석 모델과 설계변수가 바뀌게 되어 복잡하지만 초기 설계가 없이도 목적함수를 만족시키는 형상으로 최적화할 수 있는 방법이다. 또한 위상최적화는 균질화법(Homogenization method)이 이용되는데 이는 해석하고자 하는 대상체를 작은 구

멍이 있는 미세구조의 다공질체라고 가정하고 구조상 필요한 부분은 구멍의 크기를 작게 하여 재료가 존재하도록 만들고, 불필요한 부분은 구멍의 크기를 크게 하여 재료가 없는 것처럼 만드는 방법이다.

(1) 형상 최적설계의 기본 개념

서스펜션 로드빔의 설계에 있어서 진동문제는 가장 중요하다고 할 수 있다. 디스크로부터 정보를 읽고, 기록할 때에는 수직방향의 bending 모드가 중요하며, seek 할 때나 loading/unloading 시에는 수평방향의 lateral bending 모드가 큰 영향을 준다. 이 두 가지의 진동 모드는 서스펜션 로드빔의 끝단에 위치한 슬라이더의 변위에 절대적인 영향을 미치므로 이를 적절히 설계하는 것은 정보저장 속도와 데이터의 에러를 최소화하고, 안정적인 시스템 동작에 필수적이다. Bending 모드와 lateral bending 모드 두 개의 진동모드가 슬라이더의 운동과 공진을 일으키는 것을 회피하는 것이 서스펜션 로드빔 최적설계의 기본개념이라고 할 수 있는데 이러한 공진 회피 설계의 개념을 기초로 서스펜션의 형상을 최적화하였다.

2.2 형상 최적설계를 위한 목적함수

식 (1)은 위상최적화를 통한 고유치문제해석 과정에서 사용된 목적함수를 나타낸다.

$$\text{Minimize } \Lambda \text{ subject to } \int_{\Omega} \rho \, d\Omega \leq V_c, \Lambda = \left[\begin{array}{c} \sum_{i=1}^m \omega_i \\ \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i}{\lambda_i} \end{array} \right]$$

여기서

- Λ : 목적함수(objective function)
- ω_i : 각 지정차수에 대한 weighting factor
- λ_i : 지정차수의 고유주파수
- m : 최대화 할 고유주파수의 개수
- ρ : 미세요소 한 개의 밀도
- Ω : 해석 대상체(Analysis domain)
- V_c : 제약 체적(제약조건)

목적함수는 지정된 모드의 고유진동수를 최대화하는 형상으로 최적화하였다. 최초의 모델형상으로부터 제약조건 Volume(mass)을 조금씩 감소시키면서 그 체적을 갖는 형상 중 목적함수를 만족시키는 형상으로 최적화되어 수렴된다. 고유진동수

의 최적화문제에서 1 개의 고유진동수만을 주목해서 최적화를 수행할 경우 최적화의 반복과정에서 진동모드의 순서가 바뀌어서 최적화 문제가 수렴하지 않는 문제가 발생한다. 이를 위해 식(1)에서 분자가 각 지정된 모드들에 부여되는 weighting factor 의 합으로 이루어져 있고, 분모는 매번 계산되는 최적화 형상에 대한 지정된 고유주파수에 대한 가중치(weighting facto)의 비(ratio)의 합으로 표현되었다. 예를 들어 해석 대상물의 진동 모드 중 1 차와 2 차를 최대화 하는 형상으로 최적화하고자 할 때 해석 과정동안 형상의 변화로 인해 최초모델의 1 차와 2 차 모드의 순서가 바뀌지 않으면서 최적화할 수 있다.

2.3 서스펜션 로드빔의 최적형상

마이크로 미러와 슬라이더를 고려한 서스펜션 로드빔의 설계에 있어서 충분히 고려되어야 할 점은 재질이 실리콘인 마이크로 미러의 질량(약 30mg)과 마이크로 미러를 부착할 공간(2.5mm×3.0mm×70μm)을 서스펜션 로드빔의 끝단에 확보해야 한다. 그림 2 는 마이크로 미러를 고려한 서스펜션 로드빔의 최초 모델을 나타낸다.

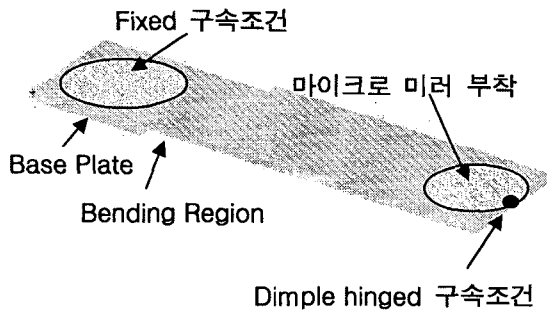


그림 2 최적화 초기 모델

그림 2 에서 최초모델에는 순응도 모드인 cantilever 모드를 고려한 bending region (2.5mm)이 포함되어 있으며 최초형상의 기본 치수(길이)는 HDD(Hard Disk Drive)의 Hutchinson 850 type 과 같 이 모델링되었다. 슬라이더가 작동 중인 디스크 위에 부상되어 있을 때 슬라이더와 디스크의 사이의 공기베어링(air bearing)에 의해 발생하는 부상력이 슬라이더에 작용되며 슬라이더에 작용된 부상력은 dimple point 를 통해 슬라이더에서 서스펜션 로드빔에 작용하게 된다. 이 때 서스펜션 로드빔의 강성은 슬라이더 공기베어링의 강성에 비해 훨씬 작기 때문에 서스펜션 로드빔이 공기베어링에

부착되어 있는 상태가 된다. 따라서 디스크 작동 중의 서스펜션 로드빔의 최적화를 위한 구속조건은 dimple point 가 수직변위 방향으로 구속이 되는 hinge 조건으로 가정하였다. 그리고 다른 한쪽 끝단은 고정단으로 가정되었다. 재질은 스테인레스강으로 영계수가 1.96×10^{11} Pa, 밀도는 8.2×10^3 kg/m³, 프아송 비는 0.32 이다.

최적화 과정에서의 제약조건은 초기 형상의 최초 Volume(mass)의 30%만큼 감량하면서 최적화를 수행하였다. 그림 3 은 최적화 후의 형상이다. 그림 3 에서 최적화 형상은 bending region 이후에 작은 삼각형 모양의 구멍이 형성되었으며 다음에 이어지는 중간부분은 양측면이 제거되어 약간 잘못된 모양이며 끝단부분은 마이크로 미러를 부착할 수 있도록 공간이 확보되어 있음을 알 수 있다. 해석 결과의 형상은 위상최적화를 통해 최적화된 형상이지만 실제로 사용하기에는 부적절하기 때문에 실제 서스펜션 로드빔 제작상의 용이함과 효과적인 기능성을 부여하기 위해서는 해석결과의 형상을 리모델링할 필요가 있다.

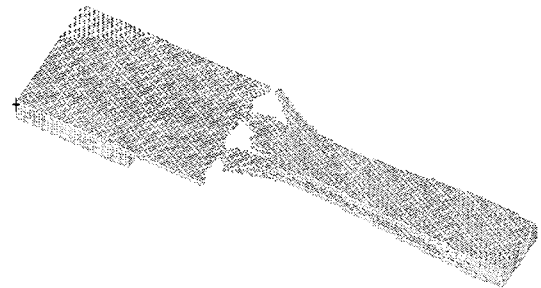


그림 3. 최적화 형상

그림 4 는 해석결과의 형상을 반영해 리모델링된 서스펜션 로드빔을 나타낸다. 여기서 서스펜션 로드빔을 고정시켜 주는 base plate 부분은 제외되어 리모델링되었다.

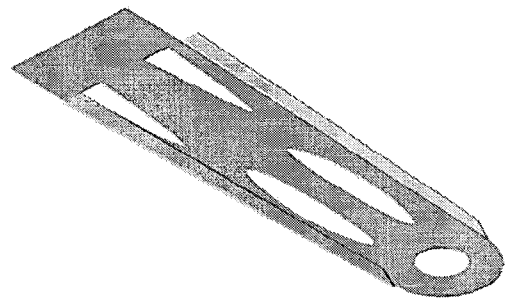


그림 4. 리모델링된 서스펜션 로드빔

그림 4 에서 마이크로 미러와 슬라이더의 부착으로 질량이 증가했을 때 수직방향으로의 강성을 높이기 위해 양쪽 측면에 수직으로 리브(Rib)가 추가 되었으며, 최적화 형상에서 bending region 직후에 나타났던 삼각형 모양의 구멍이 있고, 중간부분의 잘록했던 부분은 리브(Rib)의 추가로 인해 사라졌지만 두 개의 타원모양의 구멍을 길게 만들어 표현했다.그리고 끝단의 마이크로 미러가 부착될 부분에 슬라이더의 렌즈크기와 같은 구멍(1.6mm)을 만들어 미러와 렌즈사이의 광의 교환이 이루어질 수 있도록 리모델링하였다.

3. 서스펜션 모드해석

3.1 FEM 모드해석

위상최적화를 통해 최적화된 서스펜션 로드빔의 형상은 그림 2 의 초기모델의 진동모드 중 수직방향의 1 차 bending 모드와 수평방향의 1 차 lateral bending 모드를 1:1 의 weighting factor 로 부여해 두 개의 고유진동수를 동시에 최대화시킨 형상이다. 이 형상의 검증은 위해 FEM 모드해석 시뮬레이션과 실험적 모드해석을 수행하였다. FEM 모드해석 시뮬레이션은 MSC-NASTRAN 상용화 프로그램을 이용했으며, 실험적 모드해석을 통한 검증은 LDV 가 이용되었다. 그림 5 는 실제 제작된 서스펜션 로드빔의 사진이다. Base plate 부분이 길게 설계되었는데 이것은 실험적 모드해석 검증과정시 LDV 를 이용해 변위측정을 할 때 fixed 구속조건을 부여할 때 용이하게 하기 위함이다.

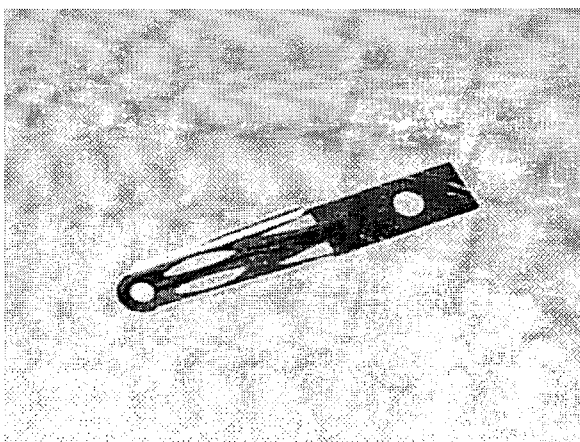


그림 5. 서스펜션 로드빔의 실물사진

그림 5 의 형상에 대한 FEM 모드해석 시뮬레이션을 위해 구속조건은 base plate 부분의 모든 노

드에 대해 fixed 구속조건을 적용했는데 이것은 실제 7 군테에 spot 용접으로 접합되어 있지만 제작된 서스펜션 로드빔에 대해 실험을 통해 모드해석을 할 경우 실제와 같이 spot 용접에 의한 fixed 구속조건을 구현하기가 어렵기 때문이다. Table 1 은 FEM 모드해석 시뮬레이션의 결과와 제어 조건이 비슷한 기존의 HDD 용 서스펜션인 Hutchinson 850 type 과의 고유주파수를 비교한 것을 나타낸다[3,4]. Table 1 에서의 모드형상은 서스펜션 로드빔이 자유상태일 때를 비교한 것으로 자유상태는 슬라이더가 디스크위에 부상되어 있지 않은 상태로 공기베어링의 부상력에 의해 영향을 받지 않으므로 구속조건은 base plate 부분은 fixed 조건이며 슬라이더와 미러가 부착되는 부분은 free 조건으로 가정했다.

| 모드 형상 | NFR서스펜션 로드빔(Hz) | Hutchinson 850 type (Hz) |
|--------------|-----------------|--------------------------|
| Cantilever | 254 | 173 |
| Slider Pitch | • | 1301 |
| Slider Roll | • | 1321 |
| Bending 1 | 3999 | 2498 |
| Torsion 1 | 1529 | 2380 |
| Sway | 9792 | 7321 |

Table 1. 모드해석의 결과 비교

Table 1 로부터 NFR 서스펜션 로드빔의 고유주파수의 해석 결과는 Hutchinson 850 type 의 고유주파수와 비교해 전반적으로 증가한 것을 알 수 있다. 특히 수직방향 모드인 1 차 bending 모드와 수평방향 모드인 sway 모드는 각각 60%와 34% 정도의 증가했다. 순응도 모드인 Cantilever 모드는 47% 증가되었다. Torsion 모드의 경우 고유주파수가 36% 정도 감소되었는데 이것은 위상최적화 과정에서 최대화하고자 했던 진동모드가 수직방향과 수평방향의 진동모드인 bending 모드와 lateral bending 모드에 대해서만 목적함수에 포함되었기 때문이다. Hutchinson 850 type 에서는 Slider 의 Pitch, Roll 모드의 순응도 모드가 나타났지만 NFR 서스펜션 로드빔에서는 나타나지 않았는데 이는 NFR 서스펜션 로드빔의 모드해석에서 슬라이더를 부착하지 않고 해석을 했기 때문이다. 그림 6-9 는 FEM 해석을 통해 구한 진동모드 중 Cantilever 모드, 1 차 bending, Torsion 모드와 Sway 모드를 나타

낸다.

3.2 실험적 모드해석

그림 10 은 실험을 통해 제작된 서스펜션 로드빔의 모드해석을 위해 구성된 실험장치를 나타낸다.[5,6]

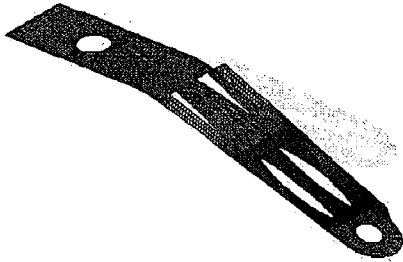


그림 6. Cantilever 모드(254 Hz)



그림 7. 1차 Torsion 모드(1529 Hz)

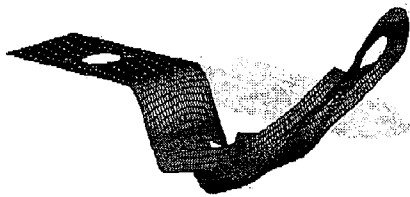


그림 8. 1차 Bending 모드(3999 Hz)



그림 9. Sway 모드(9792 Hz)

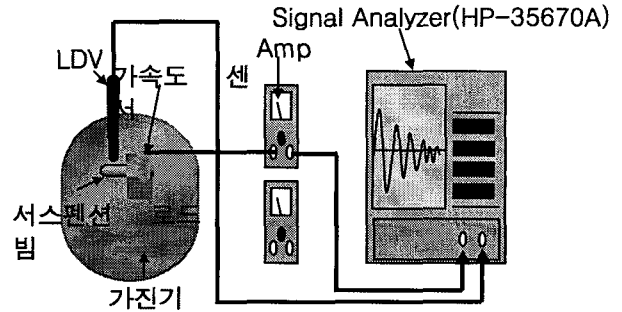


그림 10. 실험 장치 구성도

가진기로 정현파-이동(sine-sweeping)으로 가진하면서 서스펜션 로드빔을 가진기에 고정시키기 위해 제작된 지그 상단의 가속도 센서와 서스펜션 로드빔의 변위를 측정하는 레이저 변위센서(LDV)에서 나오는 신호를 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer)에 입력하여 주파수 응답 함수를 구하였다. 그림 11 은 레이저 변위센서로 측정된 측정 위치를 나타낸다. 실제의 서스펜션 로드빔을 가진기에 고정시키기 위해 지그가 제작되었는데 두 개의 알루미늄 판 사이에 서스펜션의 base plate 부분을 맞물린 후 알루미늄 판의 서스펜션 로드빔이 위치한 부분의 양쪽 측면과 후방의 3 곳에 구멍을 만들어 볼트와 너트를 이용해 결합하여 고정시켰으며 실험 도중 가진기의 가진으로 인해 맞물린 나사가 헐거워지는 것을 방지하기 위해 서스펜션 로드빔이 맞물려 있는 곳을 순간접착제를 이용해 접촉해 주었다.

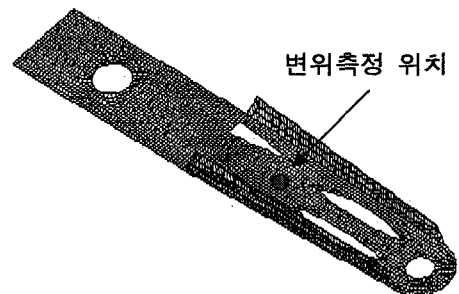


그림 11. 서스펜션 로드빔의 변위측정 위치

가진 주파수의 범위는 가진기성능의 한계로 인해서 5-2000 Hz 의 구간에서 sweeping 하면서 실험을 수행하였다. 그림 12 는 서스펜션 중심에서

측정한 주파수 응답 함수를 보여주고 있다. #

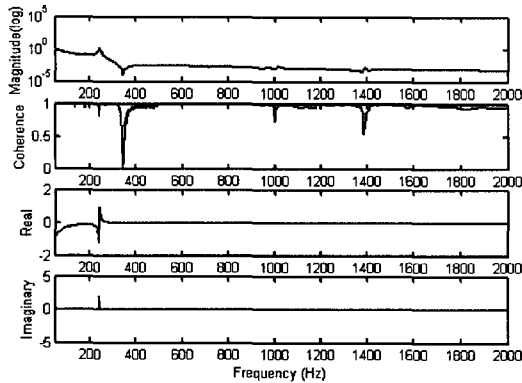


그림 12. 서스펜션 로드빔의 FRF

그림 12의 FRF 해석 결과 그래프로부터 주파수가 250 Hz, 1000 Hz, 1400 Hz 근처에서 진동모드가 나타나는 것을 볼 수 있는데 FEM 해석결과와 비교해 보았을 때 250 Hz 근처에서 나타나는 진동모드는 순응도 모드인 Cantilever 모드이며, 1400 Hz 근처에서 나타나는 모드는 1 차 Torsion 모드이다. Cantilever 모드의 고유주파수는 FEM 해석결과와 거의 맞는 것을 확인할 수 있다. 반면 1 차 Torsion 모드의 고유진동수가 FEM 해석결과와 고유진동수보다 약 130 Hz 정도 낮게 측정되었는데 이는 실제 서스펜션 로드빔의 bending region(2.5mm) 이후의 base plate 부분에 대해 fixed 구속조건을 주기위해 제작된 지그로 고정할 때 생긴 오차나 제작과정에서 생긴 오차로 추측된다. 마지막으로 FEM 해석결과에서는 나타나지 않았던 1000 Hz 근처에서 나타나는 진동모드는 가진기(지그포함)자체의 특성으로 나타난 것으로 추측된다. 가진기의 출력 주파수의 범위가 한정되었기 때문에 2000 Hz 이상에서 나타나는 진동모드들은 확인할 수 없었다. 그래서 2000 Hz 이하의 주파수 범위에서 나타나는 Cantilever 모드와 1 차 Torsion 모드만을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 근거리 광기록 저장방식인 NFR 방식의 서스펜션-헤드 시스템에서 광의 집속과 수렴 및 정밀한 제어를 위해 렌즈나 마이크로 미러와 같은 광학장치가 부착됨으로써 기존의 서스펜션-헤드 시스템에 비해 질량의 증가로 인해 슬라이더를 지지하고 있는 서스펜션 로드빔의 동특성

을 고려해 서스펜션 로드빔의 진동모드 중 슬라이더의 운동에 절대적인 영향을 미치는 수직방향의 1 차 bending 모드와 수평 방향의 1 차 lateral bending 모드의 고유주파수를 동시에 최대화 시키는 새로운 형상의 서스펜션 로드빔을 설계 및 제작 하였으며 설계의 적절함을 판단하기 위해 FEM 모드해석 시뮬레이션과 실험을 통한 모드해석을 수행해 그 효과를 검증하였다. 실험결과로부터 서스펜션선의 bending 1 차 고유진동수와 lateral bending 1 차 고유주파수가 동시에 30% 이상 상승되었음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구(과제번호 1999-1-304-007-3)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Q. J. Ruiz, and D. B. Bogy, 1990, A Numerical Simulation of the Head-Disk Assembly in Magnetic Hard Disk Files: Part I - Component Models, ASME, Journal of Tribology, Vol. 112, pp. 593-602
- (2) Quing-Hua Zeng, and D. B. Bogy, 1999, Dynamics of Suspension-Slider-Air Bearing System, ASME, Transactions on Mechatronics, Vol. 3, pp. 210-217
- (3) 김정주 등, 1997, 고트랙밀도 HDD 서스펜션의 동특성 해석, 대한기계학회논문집(A), 제 21 권, 제 11 호, pp. 1885-1895
- (4) C.J. Wilson, and D.B. Bogy, 1994, Modal Analysis of a Suspension Assembly, Journal of Engineering Industry, Vol. 116, pp. 377-386
- (5) C. J. Wilson, and D. B. Bogy, 1994, Experimental Modal Analysis of a Suspension Assembly Loaded on a Rotating Disk, ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 166, pp. 85-91
- (6) C. J. Wilson, and D. B. Bogy, 1996, An Experimental Modal Analysis Technique for Miniature Structures, ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 118, pp. 1-9