

## 근접장 광기록용 서스펜션의 최적설계

### Optimal Design of a Near-field Optical Recording Suspension

조 태 민\* · 임 경 화†

Tae-Min Cho and Kyung-Hwa Rim

(2003년 8월 14일 접수 : 2004년 3월 8일 심사완료)

**Key Words** : Optical Disk Drive(광디스크 드라이브), NFR(근접장 기록), Suspension(서스펜션), Optimal Design(최적설계), Finite Element Method(유한요소법)

#### ABSTRACT

In this study the optimization of a NFR suspension is performed using finite element method and experimental modal analysis. NFR suspensions are required to have low compliance modes to allow the slider to comply with the rotating disk, and high tracking stiffness modes to maximize the servo bandwidth of the tracking controller. First of all, the dual suspension model is designed based on the characteristics of NFR drives. And the parametric study on the sensitivities of compliance modes and tracking stiffness modes is investigated. Finally, the model satisfying static characteristics is selected and shape optimization is performed to improve dynamic characteristics. A prototype of a NFR suspension is made by etching and modal experiment in free state is performed. The results of experiment almost agree with those of finite element method.

#### 1. 서 론

최근 멀티미디어의 발달로 인하여 대용량 정보저장 기기가 요구되고 있다. 따라서 하드디스크 드라이브(HDD, hard disk drive)와 광디스크 드라이브(ODD, optical disk drive)등 다양한 보조 기억장치들의 고밀도화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 초고밀도 광디스크 시스템에 대한 기술개발도 다양하게 연구되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 그동안 HDD의 기록밀도를 증가시키기 위하여 서스펜션(suspension)의 개선에 관한 많은 연구가 수행되었다. Miu 등<sup>(4,5)</sup>은 선형(linear)

액추에이터(actuator)에서 사용되던 HDD용 서스펜션을 회전형(rotary) 액추에이터에 적용하여 유한요소법과 실험을 통하여 비교하였으며, Bogy 등<sup>(6,7)</sup>은 공기베어링 강성을 적용하여 HDD용 서스펜션을 유한요소법으로 모델링하여 분석하였다. Jeans<sup>(8)</sup>와 김정주 등<sup>(9)</sup>은 HDD용 서스펜션 유한요소모델의 동특성을 실험적으로 검증하고, 설계치수를 변경하여 민감도 분석을 수행하였다.

한편 HDD의 슬라이더 부상기술을 기존의 광디스크 드라이브에 접목시킨 근접장 광기록방법(NFR, near-field optical recording method)도 많은 관심을 끌고 있다. 근접장 광기록방법은 기존 광디스크 드라이브의 원거리 광기록방법(far-field optical recording method)과 HDD의 밀착 기록방법(proximity recording method)이 조합된 형태로 광픽업(optical pick-up)을 약 100 nm 내외 정도로 광디스크에 인접되게 위치시켜 초고밀도로 기록 및 재생시키는 방법이다. 따라서 기록 밀도를 증가시킬 수 있으며, HDD에 비하여 높

† 책임저자 : 정회원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

E-mail : rim@kut.ac.kr

Tel : (041) 560-1147, Fax : (041) 560-1253

\* 한국기술교육대학교 대학원

은 부상 높이를 유지하므로 디스크와 슬라이더간의 초미세 간격으로 야기되는 문제들을 회피할 수 있다. 그동안 근접장 광기록에 관하여 여러 연구들이 이루어졌다. 안채현 등<sup>(10)</sup>은 NFR용 서스펜션의 구조를 제안하였으며, 슬라이더의 모달 매개변수(modal parameter)를 추출하여 동특성을 분석하였다. 김기현 등<sup>(11)</sup>은 NFR용 트래킹 구동기의 설계 및 실험을 수행하였다. 그러나 HDD용 서스펜션이 꾸준히 연구되어 많은 개선이 이루어진 반면에, NFR용 서스펜션에 관한 연구는 충분치 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 NFR용 서스펜션의 최적설계(optimal design) 기법을 확립하고자 하였다. 먼저 NFR 드라이브의 특성을 고려하여 기본적인 NFR용 서스펜션의 형상을 고안하였다. 그리고 주요 설계변수의 변화에 관한 동특성(dynamic characteristics)의 민감도(sensitivity) 분석과 굽힘영역의 응력해석을 수행하였다. 이러한 결과를 바탕으로 NFR용 서스펜션의 정특성(static characteristics)을 만족시키는 형상을 선정하였으며, 동특성을 개선하기 위하여 형상최적화(shape optimization)를 수행하였다. NFR용 서스펜션의 동특성을 검증하기 위하여, 최적상태에 가까운 모델을 에칭(etching)으로 제작한 후, 자유상태의 모드해석 실험을 수행하여 유한요소법으로 구한 결과와 비교 검토하였다.

## 2. NFR용 서스펜션의 기본형상

NFR용 서스펜션은 기존의 HDD용 서스펜션과 유사한 구조를 지니지만, 슬라이더의 중앙부에 렌즈가 위치하여 슬라이더의 질량이 증가되며, 정보전달 매체인 레이저를 전달하는 초소형 구동기(micro actuator)가 렌즈의 수직방향 상부에 위치해야 하는 특성을 지닌다. 이러한 특성을 고려하여 Fig. 1과 같

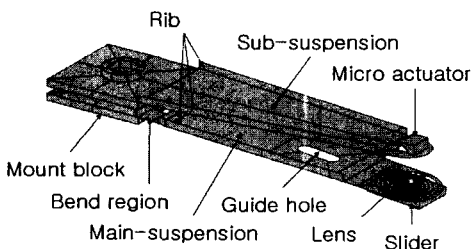


Fig. 1 Dual suspension model for a NFR

은 이중 서스펜션(dual suspension) 형태를 이용하여, 광경로를 제어하는 초소형 구동기를 슬라이더의 부상과 직접 연관이 적은 보조 서스펜션(sub-suspension)에 부착함으로써 질량 증가로 인한 고유진동수의 감소를 방지하였다.<sup>(10)</sup>

또한 양산의 효율성 및 경제성을 고려하여 주 서스펜션(main-suspension)은 로드빔(load beam)과 플렉서(flexure)의 역할을 겸하는 일체형 서스펜션(integrated type suspension)을 적용하여 HDD용 슬라이더에 비하여 상대적으로 무거운 NFR용 슬라이더를 장착하게 하였다. 현재 HDD용 서스펜션의 경우 데이터의 전송속도 증가, 조립오차 감소 및 경제성의 측면을 고려하여 신호선이 서스펜션에 패턴(pattern)으로 설치되고, 플렉서가 없는 일체형 서스펜션을 채용하는 것이 보편화되어 있으며 이에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다.<sup>(12,13)</sup> NFR용 서스펜션의 정특성과 동특성을 분석하기 위하여 Fig. 2와 같이 주 서스펜션과 슬라이더, 마운트 블록(mount block)의 유한요소모델을 구성하였다. 마운트 블록은 왼쪽 끝단이 완전 고정되었으며 재질은 서스펜션과 같은 스테인리스강(stainless steel)을 이용하였다. 주 서스펜션은 마운트 블록 위에 장착되는데 일치하는 절점(node)을 병합(merge)시켜 이를 표현하였다.

주 서스펜션의 양쪽 측면에는 리브(rib)가 부착되는데, 리브의 영향으로 굽힘 모드의 고유진동수는 증가되지만 디스크의 회전에 의한 공기베어링에 대한 순응도는 떨어지게 된다. 이를 보완하기 위하여 리브가 부착되지 않은 굽힘영역(bend region)을 설치하였다. 그리고 굽힘영역에는 슬라이더의 수직방향 강성을 감소시키기 위하여 홈(groove)이 가공되어 있다. 한편 슬라이더가 적절히 부상하기 위하여 서스펜션이 슬라이더에 지지하는 힘을 예비하중(pre-load)이라고 한다. 예비하중의 크기는 5 g중으로 가정하였으며

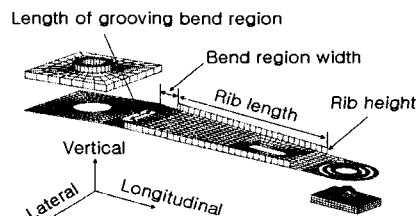


Fig. 2 Finite element model of a NFR suspension

이를 부여하기 위하여 주 서스펜션의 굽힘영역에 5°의 굽힘각(bend angle)을 부여하였다.

Fig. 3은 NFR용 서스펜션의 플렉서 부분을 확대한 것이다. 플렉서 부분에서 원형의 구멍은 반구형 렌즈가 있는 슬라이더를 부착하기 위해서 고안되었으며, 홈 주위로 열십자 형태로 배치된 띠 모양의 폭은 슬라이더의 피치(pitch) 방향과 롤(roll) 방향의 자유도를 부여하기 위함이다. 플렉서 부분의 원형의 구멍 주위의 절점들과 슬라이더 반구형 렌즈 주위의 절점들은 서로 병합하여 플렉서와 슬라이더를 조립하였다. 슬라이더는 반경 0.8 mm의 반구형 렌즈가 가로, 세로, 높이가 4×3×0.54 mm 크기인 직육면체 위에 부착된 형태로 재질은 세라믹(ceramic)을 이용하였으며, 슬라이더 전체 질량은 30 mg으로 하였다.

### 3. 동특성에 대한 민감도 분석과 굽힘영역의 응력해석

#### 3.1 동특성에 대한 민감도 분석

동특성에 대한 민감도 분석을 수행하기 전에 기본 모델의 자유상태(free state) 주파수 응답함수(FRF, frequency response function)를 구하여 동특성을 살펴보았다. Fig. 4의 주파수 응답함수는 슬라이더 반구

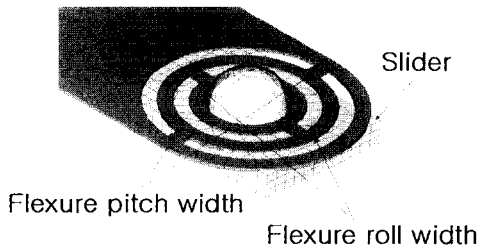


Fig. 3 Shape of a NFR suspension flexure

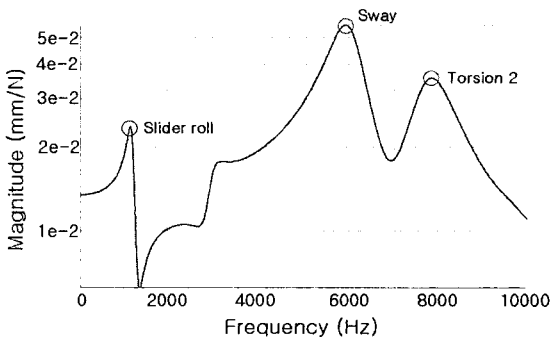


Fig. 4 FRF of a base model in free state: (track)/(track)

형 렌즈의 밑면 중앙에 트랙방향으로 정현파를 가진 하여 슬라이더의 끝단 중심의 트랙방향 변위를 구한 것이다. 1150 Hz 근처의 모드는 슬라이더 롤 모드로서 작동상태(working state)에서 사라지는 순응도 모드이다. 트랙방향으로 큰 오차를 일으키는 스웨이 모드는 6000 Hz 근처에 위치하였으며, 7800 Hz 근처의 2차 비틀림 모드도 트랙방향으로 많은 오차를 유발시키는 것을 알 수 있다.

일반적으로 서스펜션의 동특성은 기하학적 형상에 많은 영향을 받는다. NFR용 서스펜션의 경우, 플렉서의 폭, 굽힘영역의 폭과 홈의 크기, 리브의 높이와 설치 구간 그리고 서스펜션 안내 홈의 존재 여부가 주요 설계변수가 된다. 따라서 주요 설계변수의 변화에 대한 순응도 모드와 트랙킹 강성 모드의 변화량에 대한 민감도 분석을 MSC/NASTRAN을 이용하여 수행하였다. 외팔보 모드, 슬라이더 피치 모드, 슬라이더 롤 모드는 순응도 모드로서 슬라이더가 회전하는 디스크 위의 공기베어링에 원활히 순응하기 위하여 가능한 낮을수록 유리하다. 반면에 스웨이 모드와

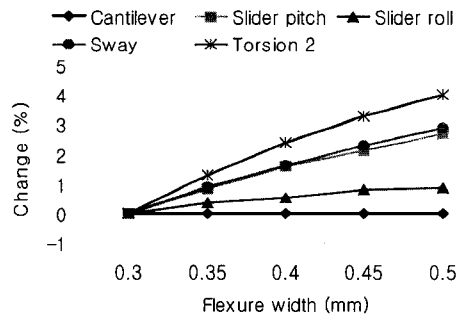


Fig. 5 Changes in natural frequencies as variation of flexure width

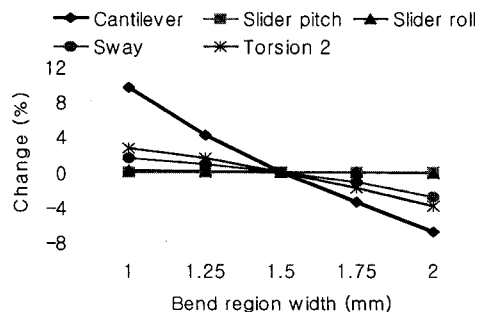


Fig. 6 Changes in natural frequencies as variation of bend region width

2차 비틀림 모드인 트랙킹 강성 모드는 슬라이더의 트랙방향 이동시 큰 오차를 유발시키므로 가능한 높을수록 좋다. Fig. 5~9는 주요 설계변수의 변화에 대한 순응도 모드와 트랙킹 강성 모드의 변화량을 나타낸 것이다.

플렉서 폭의 영향을 알아보기 위하여 피치 폭과 롤 폭의 치수를 동시에 0.3~0.5 mm로 변경시키면서 동특

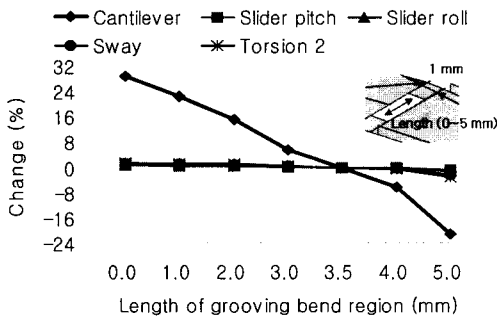


Fig. 7 Changes in natural frequencies as variation of grooving bend region

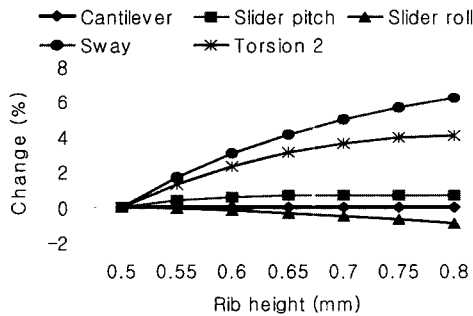


Fig. 8 Changes in natural frequencies as variation of rib height

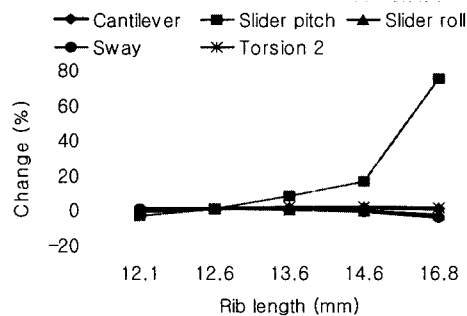


Fig. 9 Changes in natural frequencies as variation of rib length

성에 미치는 영향을 해석하여 Fig. 5에 정리하였다. 해석결과 플렉서의 폭이 증가할수록 외팔보 모드를 제외한 모든 모드들이 증가함을 알 수 있다. 트랙킹 강성 모드의 증가는 트랙방향으로 좋은 동특성을 보장하지만 순응도 모드도 같이 높아지므로 슬라이더의 부상에는 불리하다. 따라서 동특성 전체를 만족시키는 적절한 값의 조절이 최적화 과정에서 필요하다.

굽힘영역의 폭에 대한 영향을 알아보기 위하여 치수를 1~2 mm로 변경시키면서 동특성에 미치는 영향을 해석하여 Fig. 6에 정리하였다. 해석결과 외팔보 모드의 민감도가 큰 것을 알 수 있다. 순응도 모드 입장에서는 굽힘영역이 넓을수록 좋으나 트랙킹 강성 모드가 감소하므로 적절한 조절이 필요하다.

굽힘영역에 설치되어 있는 홈의 크기의 영향을 살펴보기 위하여 치수를 길이방향으로 1 mm로 고정하고, 횡방향으로 0~5 mm로 변경시키면서 동특성에 미치는 영향을 해석하여 Fig. 7에 정리하였다. 해석결과 외팔보 모드의 민감도는 매우 크지만 나머지 모드들의 민감도는 매우 적었다. 굽힘영역에서 홈이 커질수록 트랙킹 강성 모드의 큰 감소 없이 외팔보 모드의 개선에 도움이 되지만 예비하중에 의하여 굽힘영역에서 응력집중이 예상된다. 따라서 굽힘영역에서의 홈의 크기는 예비하중에 의한 응력해석을 함께 고려하여 결정해야 한다.

리브의 영향을 살펴보기 위하여 리브의 높이를 0.5~0.8 mm로 변경시키면서 동특성에 미치는 영향을 해석하여 Fig. 8에 정리하였다. 해석결과 리브의 높이가 증가할수록 순응도 모드의 큰 손실 없이 트랙킹 강성 모드가 증가하였다. 따라서 리브 높이의 증가가 NFR용 서스펜션의 동특성에 좋은 효과를 나타낼 수 있다.

리브가 설치된 구간의 영향을 살펴보기 위하여 리브의 설치 구간의 길이를 12.1~16.8 mm로 변경시키면서 동특성에 미치는 영향을 해석하여 Fig. 9에 정리하였다. 해석결과 슬라이더 피치 모드의 민감도가 매우 큰 것을 알 수 있다. 리브의 구간이 감소할수록 슬라이더 피치 모드가 크게 감소하지만 서스펜션의 1차 굽힘 모드와 연성이 되므로 과도하게 리브 구간을 제거해서는 안 된다.

보통 HDD용 서스펜션의 경우, 중앙부에 작은 크기의 안내 홈이 가공되어 있다. 이것은 서스펜션과 슬라이더의 조립효율성 등 여러 측면이 고려된 결과이

다. NFR용 서스펜션에서 안내 홈의 영향을 살펴보기 위하여 홈이 있을 때와 없을 때에 대하여 동특성에 미치는 영향을 해석하였다. 해석결과 서스펜션 안내 홈의 존재 여부에 대한 민감도가 매우 낮은 것을 확인하였다. 따라서 조립의 효율성 등을 감안할 때 안내 홈이 있는 것이 유리하다.

### 3.2 굽힘영역의 최대응력에 대한 민감도 분석

예비하중에 의하여 NFR용 서스펜션이 받는 응력을 확인하였다. 예비하중의 크기는 슬라이더의 크기와 형상 등에 따라 달라지는데 본 논문에서는 5 g 중을 기준으로 하였다. 본 논문의 NFR용 서스펜션의 굽힘영역은 초기에 5° 굽혀져 있는데 이것은 예비하중을 받는 과정에서 퍼지게 된다. 예비하중에 의한 응력의 분포는 주로 굽힘영역의 형상에 의해서 결정된다. 따라서 굽힘영역에서, 홈의 치수를 길이방향으로 1 mm로 고정된 다음, 횡방향으로 0~5 mm로 변경시키면서 예비하중에 의하여 서스펜션이 받는 응력을 해석하였다. 예비하중에 의하여 NFR용 서스펜션은 수직방향으로 큰 변위를 가지므로 대변형에 의한 기하학적 비선형 해석(geometrically nonlinear analysis)을 수행하였다.

Fig. 10은 굽힘영역에서 홈의 폭이 변할 때 예비하중에 의한 서스펜션의 최대 von Mises 응력을 나타낸 것이다. 서스펜션에 사용되는 스테인리스강은 재료의 기계적 성질 개선을 위하여 냉간압연 되므로<sup>(11)</sup> 항복응력이 높아지게 된다. 따라서 현재의 최대 응력 수준은 재료의 특성이나 HDD용 서스펜션의 경우<sup>(15)</sup>와 비교할 때 적절하다.

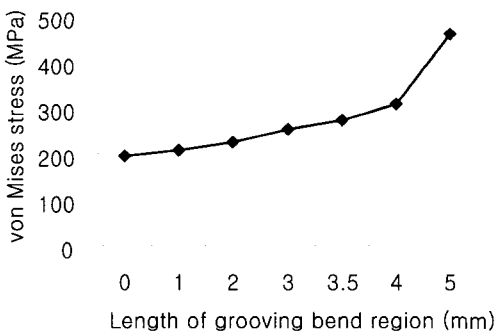


Fig. 10 Changes in von Mises stress as variation of grooving bend region

### 4. 형상최적화

형상최적화는 구조물의 형상을 설계변수로 하여 요구되는 구속조건을 만족하면서 주어진 목적함수를 최대화시키는 것을 말한다. NFR용 서스펜션은 주어진 예비하중에 의하여 안정된 응력상태를 유지하여야 하며 슬라이더가 적절한 수직방향 변위를 가져야 하는 정특성과 낮은 순운도 모드와 높은 트래킹 강성 모드를 가져야 하는 동특성이 요구된다. 특히 정특성의 경우 기하학적 비선형 해석을 수반하므로, 요구되는 서스펜션의 정특성과 동특성을 한꺼번에 만족시키기 어렵다. 다행히 민감도 분석에서 정특성과 동특성에 민감하게 미치는 설계변수가 달라서, 공학적인 관점에서 각각 분리하여 최적화를 하였다. NFR용 서스펜션의 정특성은 주로 굽힘영역의 형상에 영향을 받으며 동특성은 대부분의 설계변수에 영향을 받는다. 따라서 정특성을 만족시키는 굽힘영역의 형상을 결정한 다음, 나머지 설계변수를 변경시켜 동특성을 향상시키는 형상최적화를 수행하였다. 정특성을 만족하는 굽힘영역의 형상은 동특성에 대한 민감도 분석과 굽힘영역의 응력해석 결과를 참조하여 기본형상의 치수로 결정하였다. 정특성을 만족시키는 과정에서 굽힘영역의 형상이 결정되었으므로 나머지 설계변수의 변화에 대하여 외팔보 모드는 거의 변하지 않는다. 따라서 식 (1)과 같이 슬라이더 피치 모드, 롤 모드의 최소화과 트래킹방향으로 큰 오차를 발생시키는 스웨이 모드와 2차 비틀림 모드의 최대화를 목적함수로 선정하였다.

$$\text{Maximize} \left[ -a_1 \left( \frac{f_1^{(i)} - f_1^{(0)}}{f_1^{(0)}} \right) - a_2 \left( \frac{f_2^{(i)} - f_2^{(0)}}{f_2^{(0)}} \right) + a_3 \left( \frac{f_3^{(i)} - f_3^{(0)}}{f_3^{(0)}} \right) + a_4 \left( \frac{f_4^{(i)} - f_4^{(0)}}{f_4^{(0)}} \right) \right] \quad (1)$$

여기서  $f_1^{(0)}$ ,  $f_2^{(0)}$ ,  $f_3^{(0)}$ ,  $f_4^{(0)}$ 은 각각 기본 모델의 슬라이더 피치 모드, 롤 모드, 스웨이 모드 및 2차 비틀림 모드의 고유진동수이며,  $f_1^{(i)}$ ,  $f_2^{(i)}$ ,  $f_3^{(i)}$ ,  $f_4^{(i)}$ 는 각각 형상최적화 수행후의 고유진동수이다. 그리고  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ 는 각각의 모드에 대한 가중치이다. 형상최적화 과정에서 변경할 설계변수는 플렉서의 피치 폭과 롤 폭 및 리브의 높이로 결정하였으며, 굽힘영역

역의 형상은 정특성의 유지 측면에서 변경이 불가능하므로 설계변수에서 제외하였다. 그리고 리브의 설치구간은 최적상태에 가까운 12.6 mm 근처에서 동특성에 크게 영향을 주지 않으므로 최적화하는 과정에서 고정하였다. 한편 형상최적화 수행 시 유지되어야 할 구속조건은 Table 1과 같이 스웨이 모드와 2차 비틀림 모드의 고유진동수 하한치를 지정하였으며, 설계변수의 하한치와 상한치를 제한하였다. 플렉서의 피치 폭과 롤 폭의 하한치와 상한치는 에칭에 의한 가공오차와 플렉서의 형상을 고려하여 결정하였으며, 리브 높이는 리브의 굽힘 공정과 보조 서스펜션과의 간섭 등을 고려하여 결정하였다.

형상최적화 해석은 가중치를 동일하게 적용했을 때와 트래킹 강성 모드에 10배의 큰 가중치를 부여했을 때에 대하여 각각 수행하였다. 이산적(discrete) 최적화 알고리즘은 구속조건이 없을 경우 공액경사사도방법(conjugate gradient method)을 사용하며, 구속조건이 있을 경우 수정된 유용방향법(modified feasible direction method)을 사용한다. 이산적 최적설계의 해석조건은 설계변수의 최소변화량을 0.00125 mm로 하였으며, 절대수렴조건 0.001, 상대수렴조건 0.001을 지정하였으며, 최대 100회까지 반복계산을 수행하도

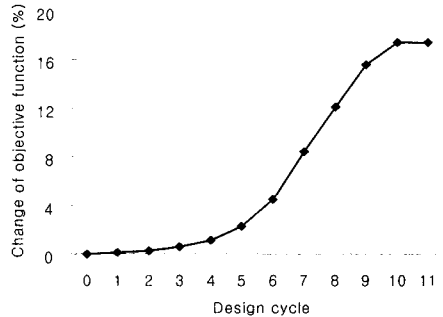
록 하여 MSC/NASTRAN을 이용하여 해석하였다. Table 2는 가중치에 따른 형상최적화 결과를 나타낸 것이다. 트래킹 강성 모드의 가중치를 크게 부여했을 때와 동일한 가중치를 부여했을 때보다 트래킹 강성 모드의 증가율이 큰 것을 알 수 있다.

**Table 1** Design constraints of shape optimization

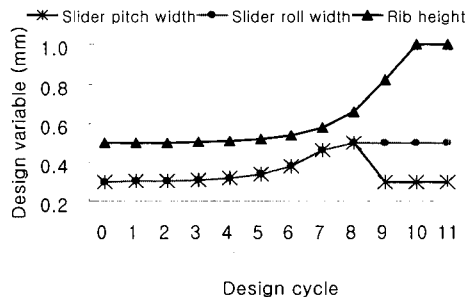
| Description              |                     | Initial value | Lower limit | Upper limit |
|--------------------------|---------------------|---------------|-------------|-------------|
| Natural frequencies (Hz) | Sway mode           | 6070.3        | 6300        | -           |
|                          | Torsion 2 mode      | 7740.2        | 7800        | -           |
| Design variables (mm)    | Flexure pitch width | 0.3           | 0.2         | 0.5         |
|                          | Flexure roll width  | 0.3           | 0.2         | 0.5         |
|                          | Rib height          | 0.5           | 0.2         | 1.0         |

**Table 2** Results of shape optimization

| Description              | Base model          | Optimized model                    |                                     |        |
|--------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------|
|                          |                     | $a_1 = a_2 = 1$<br>$a_3 = a_4 = 1$ | $a_1 = a_2 = 1$<br>$a_3 = a_4 = 10$ |        |
| Natural frequencies (Hz) | Slider pitch mode   | 1012.6                             | 1009.9                              | 1025.0 |
|                          | Slider roll mode    | 1160.4                             | 1148.5                              | 1149.4 |
|                          | Sway mode           | 6070.3                             | 6637.1                              | 6680.0 |
|                          | Torsion 2 mode      | 7740.2                             | 8270.1                              | 8322.4 |
| Design variables (mm)    | Flexure pitch width | 0.3                                | 0.3                                 | 0.5    |
|                          | Flexure roll width  | 0.3                                | 0.5                                 | 0.5    |
|                          | Rib height          | 0.5                                | 1.0                                 | 1.0    |



**Fig. 11** Changes in objective function as variation of design cycle with same weight factor



**Fig. 12** Changes in design variable as variation of design cycle with same weight factor

**Table 3** Modal analysis results for the optimized model

| Mode shapes  | Free state (Hz) |                | Working state (Hz) |                |
|--------------|-----------------|----------------|--------------------|----------------|
|              | NFR             | Hutchinson 850 | NFR                | Hutchinson 850 |
| Cantilever   | 145.4           | 172.8          | -                  | -              |
| Slider pitch | 1009.9          | 1011.8         | -                  | -              |
| Slider roll  | 1148.5          | 1321.1         | -                  | -              |
| Bending 1    | 1873.9          | 2498.7         | 1257.6             | 2078.0         |
| Torsion 1    | 2924.2          | 2379.7         | 1983.2             | 2364.4         |
| Bending 2    | 5055.9          | 7069.1         | 4997.6             | 6339.4         |
| Sway         | 6637.1          | 7320.6         | 7019.9             | 6862.4         |
| Torsion 2    | 8270.1          | 7826.8         | 7405.2             | 7500.8         |

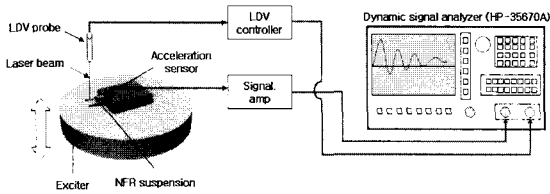


Fig. 13 Schematic diagram of modal test system

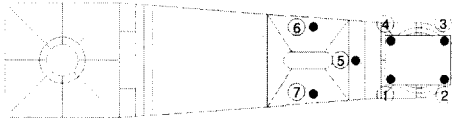


Fig. 14 Measurement points of a NFR suspension

Fig. 11, 12는 동일한 가중치를 주었을 때, 형상최적화가 수행되는 과정에서의 목적함수와 설계변수의 변화량을 각각 나타낸 것으로 목적함수는 17.5%가 개선되었다. 형상최적화 결과를 바탕으로 플렉서의 피치 폭은 0.3 mm, 롤 폭은 0.5 mm, 리브의 높이는 1.0 mm로 결정하였다. 최적화된 모델의 자유상태와 작동상태의 모드해석 결과를 Table 3과 같이 Hutchinson사의 서스펜션 850 LSF (laterally stiff flexure) 모델<sup>(9)</sup>과 비교하였다. 비교 결과 순응도 모드와 트랙킹 강성 모드가 적절한 성능을 가짐을 알 수 있다.

### 5. NFR용 서스펜션의 동특성 실험 및 고찰

NFR용 서스펜션의 동특성을 검증하기 위하여, 최적상태에 가까운 모델을 예칭으로 제작하여 자유상태의 모드해석 실험을 수행하였다.

#### 5.1 실험장치의 구성

제작된 NFR용 서스펜션을 Fig. 13과 같이 가진기(exciter)의 지그(zig)에 부착하였다. 그리고 100~3000 Hz 까지 정현파를 가진하여 발생하는 입력신호와 서스펜션의 응답에 대한 출력신호를 동적신호 분석기(dynamic signal analyzer)를 이용하여 가속도 입력에 대한 변위 출력의 주파수 응답함수를 구하였다. 입력신호는 가속도 센서를 이용하여 측정하였으며, 출력신호는 LDV(laser doppler vibrometer)를 사용하여 측정하였다.

NFR용 서스펜션의 자유상태 모드형상과 고유진동수를 구하기 위하여 Fig. 14와 같이 7 지점을 측정하였다.

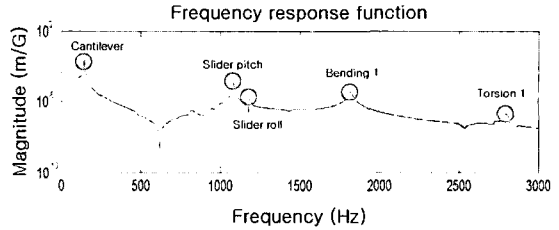


Fig. 15 Experimental FRF of a NFR suspension

Table 4 Mode shapes of experiment and FEM in free state

| Mode shapes  | Experiment (Hz) | FEM (Hz) | Difference (%) |
|--------------|-----------------|----------|----------------|
| Cantilever   | 147.0           | 145.9    | 0.75           |
| Slider pitch | 1086.0          | 1011.0   | 6.91           |
| Slider roll  | 1185.0          | 1159.3   | 2.17           |
| Bending 1    | 1824.0          | 1862.4   | -2.11          |
| Torsion 1    | 2799.0          | 2971.5   | -6.16          |

### 5.2 실험결과 및 분석

①번 지점에 대한 실험결과를 Fig. 15에 나타내었다. 100~3000 Hz 사이에 5개의 고유진동수가 존재함을 확인하였다.

같은 방법으로 7 지점을 모두 측정하여 구한 고유진동수와 모드형상을 유한요소법으로 구한 결과와 비교하여 Table 4에 나타내었다.

비교결과 실험과 유한요소법 결과가 거의 일치하였으며, 약간의 차이가 발생하는 이유는 서스펜션 제작과정에서의 오차로 판단된다.

### 6. 결론

본 논문에서는 광디스크 드라이브의 광픽업을 기존의 HDD 슬라이더 개발기술에 접목시킨 NFR용 서스펜션의 최적설계를 수행하였다.

먼저 NFR 드라이브의 특성을 고려하여 이중 서스펜션의 형태를 고안하였으며, 슬라이더를 지지하는 주 서스펜션은 양산의 효율성 및 경제성을 고려하여 로드빔과 플렉서의 역할을 겸하는 일체형 서스펜션을 적용하였다.

제안된 NFR용 서스펜션의 기본모델에서 주요 설계변수를 변경시키면서 서스펜션의 순응도 모드와 트랙킹 강성 모드의 변화를 살피는 민감도 분석을 수행

하였으며, 굽힘영역의 응력해석을 수행하였다. 이러한 결과를 바탕으로 두 단계로 나누어 최적설계를 하였다. 첫 번째 단계에서는 NFR용 서스펜션의 정특성을 만족시키는 굽힘영역의 형상을 결정하였고, 두 번째 단계에서는 동특성을 향상시키기 위한 나머지 형상을 최적화 하였다.

최적모델의 자유상태와 작동상태의 모드해석을 수행한 결과 동특성이 향상되어 기존의 HDD용 서스펜션과 비교할 때 만족할만한 특성을 지니는 것을 확인하였다. 그리고 NFR용 서스펜션의 동특성을 검증하기 위하여, 최적상태에 가까운 모델을 예칭으로 제작하여 자유상태의 모드해석 실험을 수행하였다. 실험 결과가 유한요소법으로 구한 결과와 거의 일치하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-1999-000-00260-0) 지원으로 이루어졌으며, 제단의 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 김현기, 장 혁, 김광선, 임경화, 2000, "광디스크 드라이브 공기베어링 슬라이더의 형상민감도 해석," *Journal of the Microelectronics & Packaging Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 37~42.
- (2) 임경화, 2000, "헤드간섭으로 인한 회전디스크의 안정성 분석," *한국소음진동공학회논문집*, 제 10 권, 제 5 호, pp. 865~872.
- (3) 송태선, 이문도, 전홍걸, 박노철, 박영필, 2001, "광 정보저장장치의 기술동향," *한국정밀공학회지*, 제 18 권, 제 4 호, pp. 25~36.
- (4) Miu, D. K., Frees, G. M. and Gompertz, R. S., 1990, "Tracking Dynamics of Read/Write Head Suspensions in High-performance Small Form Factor Rigid Disk Drives," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 112, pp. 33~39.
- (5) Chiou, S. S. and Miu, D. K., 1992, "Tracking Dynamics of In-line Suspensions in High-performance Rigid Disk Drivers with Rotary Actuators," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 114, pp. 67~73.
- (6) Ruiz, O. J. and Bogy, D. B., 1990, "A Numerical Simulation of the Head-disk Assembly in Magnetic Hard Disk Files: Part I-Component Models," *Transactions of the ASME*, Vol. 112, pp. 593~602.
- (7) Ruiz, O. J. and Bogy, D. B., 1990, "A Numerical Simulation of the Head-disk Assembly in Magnetic Hard Disk Files: Part II-Solution of the Coupled System," *Transactions of the ASME*, Vol. 112, pp. 603~613.
- (8) Jeans, A. H., 1992, "Analysis of the Dynamics of a Type 4 Suspension," *Transactions of the ASME*, Vol. 114, pp. 74~78.
- (9) 김정주, 전정일, 변용규, 노광춘, 정정주, 정태건, 1997, "고트랙밀도 HDD 서스펜션의 동특성 해석," *대한기계학회논문집(A)*, 제 21 권, 제 11 호, pp. 1885~1895.
- (10) 안채현, 임경화, 2003, "근접장 광기록용 슬라이더의 동특성 분석," *한국소음진동공학회논문집*, 제 13 권, 제 3 호, pp. 164~171.
- (11) 김기현, 이문구, 권대갑, 2001, "근접장 기록 장치들을 위한 트래킹 구동기의 설계 및 실험," *한국정밀공학회지* 제 18 권, 제 8 호, pp. 174~181.
- (12) Ohwe, T., Mizoshita, Y. and Yoneoka, S., 1993, "Development of Integrated Suspension System for a Nanoslider with a MR Head transducer," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 29, No. 6, pp. 3924~3926.
- (13) Jen, C. W., Frank, E., Ohwe, T. and Gordon, A., 1996, "On Suspension Dynamics for Pico-sliders," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 33, No. 5, pp. 3172~3174.
- (14) Singh, G. P., Brown, B. R., Werlich, H. and Kozlovsky, W., 2000, "Laser Processing to Adjust the Suspension Preload of Magnetic Recording Head Stack Assemblies," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 36, No. 5, pp. 2724~2726.
- (15) Yang, Y. P. and Kuo, C. C., 1997, "Passive and Active Design of Hard Disk Suspension Assemblies Using Multiobjective Optimization Techniques," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 145, No 1/2, pp. 147~166.