

초소형 광자기 드라이브용 HGA의 신뢰성 및 충격 해석

Probabilistic and Shock Analysis of Head-gimbal Assembly in Micro MO Drives

홍 어 진[†] · 오 우 석* · 박 노 철** · 양 현 석*** · 박 영 필****

Eo-Jin Hong, Woo-Seok Oh, No-Cheol Park, Hyun-Seok Yang and Young-Pil Park

(2004년 9월 10일 접수 : 2004년 11월 22일 심사완료)

Key Words : OFH Slider(광학 부상 헤드 슬라이더), Suspension(서스펜션), Micro MO Drives(마이크로 엠오 드라이브), Shock Performance(충격성능), ANSYS/LS-DYNA(엔시스/엘에스-다이나)

ABSTRACT

With respect to the researches of the optical flying head(OFH), the head-gimbal assembly should be analyzed to guarantee the stable fabrication and the characteristics of shock resistance. The suitable design is proved through the probabilistic analysis of the design parameters and material properties of the model. Probabilistic analysis is a technique that be used to assess the effect of uncertain input parameters and assumptions on your analysis model. Using a probabilistic analysis you can find out how much the results of a finite elements analysis are affected by uncertainties in the model. Another factor is analysis of the dynamic shock analysis. For the mobile application, one of the important requirements is durability under severe environmental condition, especially, resistance to mechanical shock. An important challenge in the disk recording is to improve disk drive robustness in shock environments. If the system comes in contact with outer shock disturbance, the system gets critical damage in head-gimbal assembly or disk. This paper describes probabilistic and dynamic shock analysis of head-gimbal assembly in micro MO drives using OFH slider.

1. 서 론

인터넷의 발전과 캠코더, 카메라나 MP3 플레이어 등과 같은 휴대 기기의 폭발적인 수요 증가로 인하여 그에 대응 할 수 있는 정보 저장 기기의 고용량화, 초소형화가 요구되고 있다. 하지만 기존의 자기와 광을 이용한 전통적인 방식의 정보 저장 방법은 근원적인 기술의 제한으로 인해 발전의 한계에 이르렀다는

것이 중론이다. 이러한 한계를 극복하기 위해 기존의 기술을 대신할 수 있는 새로운 형태의 광 혹은 자기 기록장치들이 연구되고 있다. 이에 따른 연구의 한 동향으로써, 광 기록 방식을 위주로 살펴보면, 크게 블루 레이저 다이오드를 이용하는 것과 고도의 NA를 가진 렌즈를 개발하는 방식으로 나눌 수 있다.^(1, 2) 이러한 기술의 적용으로써, 최근 광학 부상 헤드(optical flying head, ofh)에 대한 연구가 많은 부분 진행되고 있다.^(3, 4)

이 논문에서는 광학 부상 헤드를 위한 구동기로서, 스윙 암 타입 로터리 구동 방식을 제안하였다. 이러한 구동기의 기계적인 구동부는 부상 광학 헤드를 포함하는 슬라이더와 이를 지지하는 서스펜션, 그리고 광학계와 서스펜션을 연결하는 스윙암, 그리고 VCM(voice coil motor)로 구성될 것이다.^(5, 6)

스윙 암 타입의 구동기는 기존의 광학 드라이브에

[†] 책임저자 : 정회원, 연세대학교 대학원 기계공학과
E-mail : hongeojin@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 연세대학교 정보저장기기 연구센터

*** 연세대학교 기계공학과

**** 정회원, 연세대학교 기계공학과

사용 되던 선형 구동기에 비하여 빠른 접근 속도와, 초박형 구조가 가능하며, 외부의 충격에 비교적 강건하여 휴대용 저장 장치에 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이 논문에서 언급되고 있는 구동기는 Compact Flash Type II 드라이브 사이즈를 맞추었고, 디스크는 1인치 MO용 디스크를 적용하였다. 이 논문에서는 부상 광학 헤드의 광학적 요구 조건을 만족시키는 설계된 서스펜션에 대한 분석이 두 가지 방향에서 이루어 질 것이다. 하나는 신뢰성에 대한 부분이고, 다른 하나는 외부의 충격에 대한 응답 분석이다.

신뢰성에 대한 분석은 각 설계 변수에 대한 민감도 및 제작시에 요구되는 공차 및 결과물에 대한 신뢰도를 보여주는 분석이다. 따라서, 이와 같은 분석은 필요 이상의 공차를 막아주는 한편, 결과물에 대한 통계학적 신뢰를 얻을 수 있을 것이다. 또한, 외란의 대한 충격 분석은 이 서스펜션이 휴대용 저장장치를 위한 것이기에 더한 강조된다. 최근의 경향에 따라 가장 집중이 되는 이러한 충격 외란에 대한 응답 특성은 시스템에 대한 강건성에 가장 큰 요소라 생각된다. 앞으로 이 논문에서는 신뢰성에 대한 분석과 외란에 대한 응답에 대한 해석이 이루어질 것이다.

2. OFH용 구동기 및 서스펜션의 구조

2.1 스윙암 타입 로터리 구동기

이 논문에서 적용한 광디스크 드라이브 구동 시스템은 스윙암 타입 로터리 구동기와 슬라이더-서스펜션으로 크게 나누어진다. 스윙암 타입 구동기에는 광학 요소인 LD와 PD가 블록 형태로 탑재되어있으며, 끝단에는 광학 부품으로부터 발산 된 레이저의 방향을 바꿔주는 반사 거울이 탑재되어 있다. 한편, 서스펜션은 광학 헤드를 부착한 슬라이더를 지지하고, 슬라이더의 안정적인 부상 및 정밀 위치를 결정한다. 스윙암(swing arm)은 소형화를 위해 얇은 두께의 외팔 보 형태를 가지고 있으며, 초박형 구조에 적합한 구조로 설계가 가능하므로 휴대용 정보저장기에 적합하다. 또한, 로터리 방식의 구동기를 사용함으로써 기존의 광디스크 드라이브에서 사용되고 있는 선형(linear) 구동기를 이용한 시스템에 비하여 데이터 접근시간이 빨라지며 임의의 데이터에 대한 접근 시간도 최소화 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이와 같

은 공기 부상 헤드를 이용한 로터리 구동기는 피봇 베어링에 의하여 회전운동이 전달되고, 스윙암의 하단에는 서스펜션/플렉서 구조가 부착되며 이것들은 광학 부상 슬라이더의 정확한 위치결정 시스템에 중요한 역할을 담당하게 된다. Fig.1은 스윙암 타입 구동기의 개략도이다.

2.2 서스펜션

서스펜션 어셈블리는 기본적으로 로드 빔(load beam), 플렉서(flexure), 힌지(hinge), 베이스 플레이트(base plate)의 네 부분으로 구성되어 있고 광학 부상 헤드가 디스크 표면에서 일정한 부상 높이를 유지하고 원하는 트랙을 추종하는 역할을 한다. 광학 부상 헤드는 이 서스펜션 초기하중에 의한 작용력과 헤드 밑의 공기 유동 압력이 평형을 이루면서 부상 높이를 유지한다. Fig.2는 설계된 광학 부상 헤드를 위한 서스펜션이다.

광학 부상 헤드용 서스펜션은 고용량화를 실현하고 내충격성을 높이기 위하여 로드/언 로드(load/unload)방식을 채택하였고, 이를 위하여 엔드-리프터(end-lifter)와 티바 리미터(T-bar limiter)를 설계하였다. 또한 광학 경로를 확보하기 위하여 로드빔의 앞부분에 사각 홈을 두었다. 플렉서는 슬라이더에 축 방향 강성을 강화하기 위하여 설계되었다. 힌지 구조는 축 방향으로의 강건하며 수직 방향의 순응성은 높아야 하는 서스펜션의 모순된 특성을 만족시키기 위하여, 로드빔에 비하여 매우 얇게 설계 되었다.

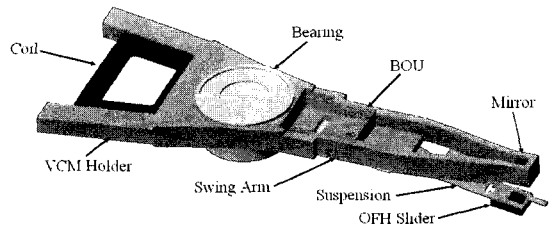


Fig. 1 Schematic of rotary type actuator

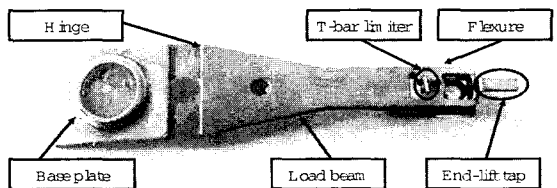


Fig. 2 Structure of suspension

3. 서스펜션의 신뢰성 분석

이 장에서는 설계된 서스펜션에 대한 설계 변수에 대한 영향도 및 공차를 고려하여 목적에 맞게 양질의 그리고 신뢰할 수 있는 결과 값을 얻기 위한 해석을 할 것이다. 이를 위해서 통계적 설계 시스템(probabilistic design system: PDS)을 이용하여 서스펜션을 분석하였다. 확률적 분석 방법은 기본적으로 입력 값에 대한 불확실성(혹은 산포, scatter)에 근거하여 출력 값에 대한 분포를 예측하는 것이다. 이러한 불확실성에 대한 예측은 필요 이상의 공차를 줄이며, 재료 관리 차원에서의 중요도, 혹은 환경적인 영향에 대한 민감도를 판단하여, 가장 적절한 설계치를 구현하는 것이다. 이러한 분석을 통해서 제작비를 줄일 수 있으며, 제품에 대한 신뢰도를 수치적으로 얻을 수 있다.

일반적으로 입력 값의 불확실성으로는 재료의 물성, 설계된 형상 값, 그리고 경계 조건들이 있다. 한편, 이로 인하여 영향을 받을 수 있는 결과에는 그 목적에 따라 변형, 응력 및 변형률 분포, 피로에 의한 파괴 등이 있을 것이다. 우리는 이러한 신뢰성을 확보하기 위한 도구로써 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 서스펜션의 특성에 영향을 주는 주요 주파수를 대상으로 결과를 확률적으로 살펴보았다.

먼저, 입력 값에 대한 불확실성의 요소로써, 로드 빔과 플렉서의 형상 변수 값과 재료의 물성치 및 치수에 대한 고려를 하였다. 그리고, 목적 결과 값으로는 최적 설계시에 목표가 되었던 주파수에 근거하여 목적 공진 주파수에 대한 영향을 확률적으로 분석하였다. 입력 값은 형상 변수에 대한 변화 폭은 서스펜션의 제작시 공차로 설정하였던 $\pm 20 \mu\text{m}$ 을 기준으로 임의의 입력 값을 가지도록 설정하였으며, 재료의 물

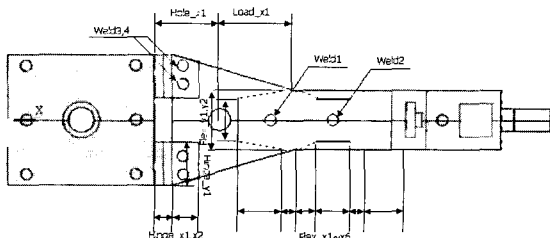
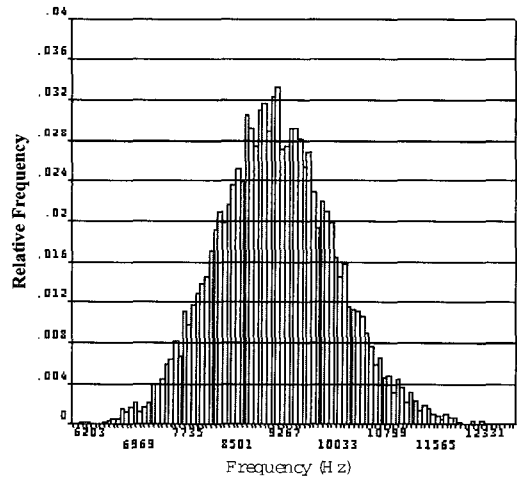


Fig. 3 Design parameters for probabilistic analysis

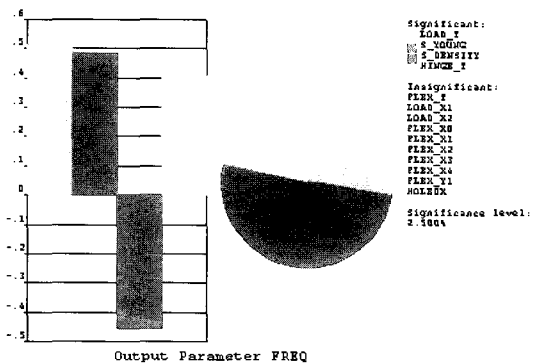
성 및 치수에 관한 분포는 재료의 물성이 5%의 가우시안(Gaussian) 분포 내에서 조정이 가능할 것이라는 가정하여 입력 분포를 정하였다. 또한 통계적 방법으로는 몬테카를로 방법과 표면 반응법을 기반으로 설정하였다.

Fig. 4(a)는 입력 값의 변화에 대한 1차 비틀림 모드의 결과 분포를 보였으며, Fig. 4(b)는 이 모드에 대한 각 변수의 민감도를 보여주고 있다.

Fig. 4에서 보는 것처럼 입력 값의 분포에 대한 1차 비틀림 모드의 결과는 평균 9371 Hz이며, 표준편차는 926 Hz로 나타났다. 이는 1차 비틀림 모드에 대한 목표 값인 9450 Hz에 비하여 1% 이내에서의 변화이다. 그리고, Fig. 4(b)에서 보는 것처럼 대부분의 민감도는 로드 빔과 플렉서의 재료측면의 영향이 큰 것으로 나타났다. Fig. 5는 수직 방향의 순응성에 영향



(a) Histogram for the 1st torsion mode



(b) Sensitivity for the 1st torsion mode

Fig. 4 Distribution of 1st torsion frequency

을 줄 수 있는 외팔보 모드에 대한 영향 분석을 동일한 조건하에서 수행한 결과이다.

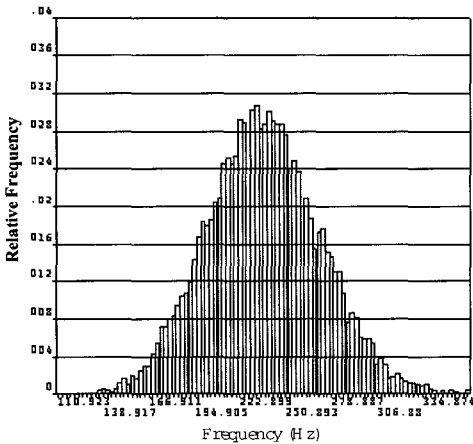
Fig. 5에서 보는 것처럼 캔틸레버 모드에 대한 평균 237.3 Hz에 표준 편차 34.7 Hz의 변화를 보이고 있다. 이는 목표 값인 235 Hz에 비하여 1% 정도의 변화를 보이고 있는 것으로 나타나 있다. 민감도 측면에서도 로드 빔과 플렉서의 물성치와 재료의 두께가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 다른 목표 주파수인 슬라이더 피치와 롤 모드, 그리고 스웨이 모드에서도 유사한 결과를 보이고 있다.

다음은 재료적인 측면에서 제작시 발생할 수 있는 형상에 대한 부분만을 고려한 해석이다. Fig. 6은 형상 변수에 대한 1차 비틀림 모드에 대한 신뢰성 분석의 결과를 보여주고 있다.

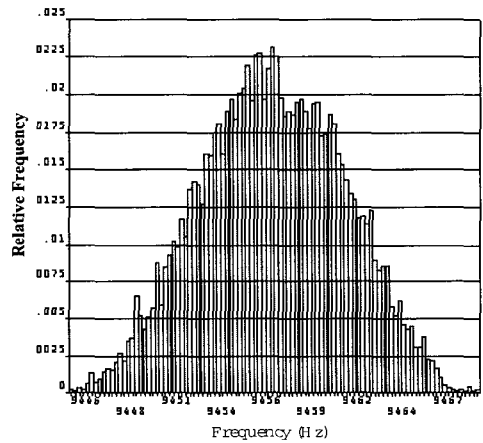
Fig. 6에서 보는 것처럼 1차 비틀림 모드에 대한 형

상 변수에 대한 영향은 평균 9458 Hz에 표준편차 4.2 Hz로 거의 평균값에 준 하는 결과를 얻을 수 있었다. 상대적으로 재료적인 변화에 대해서 훨씬 더 민감한 결과를 나타냈으며, 1차 비틀림 모드의 경우, 로드 빔의 형상 변수가 더 영향을 미치는 것으로 나타났다.

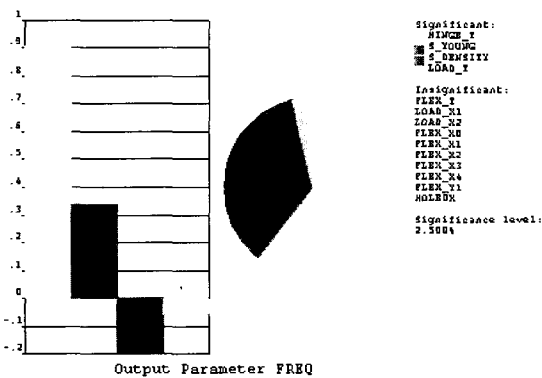
이와 같은 형상 변수에 대한 공차 20 μ m이 적절했으며, 재료적인 영향을 5%의 가우시안 분포에 대한 영향을 조사한 결과 약 1% 정도의 평균값의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 이 정도의 공차와 재료관리가 된다면, 원하는 목적 값에 신뢰할 만한 결과 출력물을 얻을 수 있을 것이다. 이러한 분석에 대한 결과로써, 우리는 좀더 신뢰할 수 있는 결과 값을 얻을 수 있었고, 향후 이러한 분석을 통해서 특별히 관리해야 하는 결과에 대한 영향도를 확보할 수 있을 것이라 생각된다.



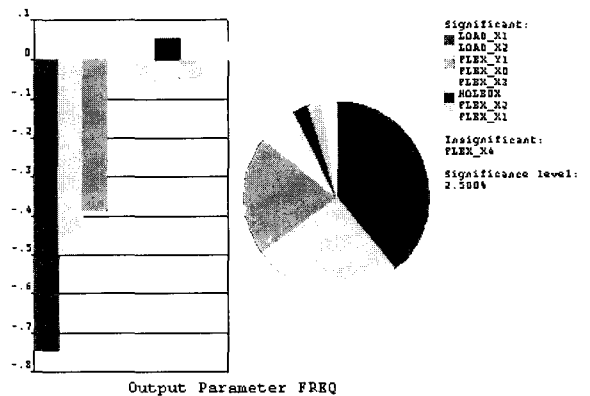
(a) Histogram for the cantilever mode



(a) Histogram for the 1st torsion mode



(b) Sensitivity for the cantilever mode



(b) Sensitivity for the 1st torsion mode

Fig. 5 Distribution of cantilever frequency

Fig. 6 Distribution of 1st torsion frequency for materials

4. 광자기 드라이브용 HGA의 동적 충격 시뮬레이션

4.1 외부 충격의 모사

기존의 하드 디스크 드라이브의 충격에 관한 연구는 데스크톱용 하드 디스크 드라이브에 대한 것이 다수였다. 데스크톱용 하드 디스크 드라이브의 주된 충격원은 비구동 상태인 제조공정 또는 제품 이송 시 발생되었다. 따라서 충격에 대한 해석 역시 비구동 상태를 중심으로 수행되어 왔다.^(7,8) 하지만 휴대용 저장장치의 연구와 개발이 활발해지면서 최근에는 구동 상태의 충격 해석이 보다 중요시되고 있다. 이 논문의 충격 해석에 사용된 서스펜션도 로드/언 로드 방식을 채용하였으나, 기존의 충격의 응답에 관한 연구들과 그 경향을 비교하기 위하여 비구동 상태와 구동 상태 모두에서 충격 해석을 수행하였다.

하드 디스크 드라이브에서 발생하는 충격의 현상은 하드 디스크 드라이브의 베이스가 충격 하중을 받고 이 충격이 스피들 모터와 구동기의 피벗 중심을 통하여 헤드와 디스크 허브에 전달되어 발생된다. 이러한 외부 충격은 매우 짧은 시간에 크기가 큰 가속도가 가해짐으로써 발생한다. 이러한 형태의 충격은 식 (1) 및 (2)의 반정현파 형태의 충격가속도로 가정할 수 있다.

$$\ddot{u}(t) = \ddot{u}_0 \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) \quad [0 < t < \tau] \quad (1)$$

$$\ddot{u}(t) = 0 \quad [\text{when } t < 0 \text{ and } t > \tau] \quad (2)$$

4.2 비구동 시스템의 유한요소 모델링

유한 요소 해석은 상용 해석 프로그램인 ANSYS/LS-DYNA를 이용하여 이루어졌다. 전체 모델은 광학 부상 헤드용 서스펜션과 1인치 MO 디스크로 구성하였다. 베이스와 스윙암 타입 구동기는 상대적으로 외부 충격에 강건하기 때문에, 전체 모델에서 베이스와 스윙암 타입 구동기는 제외시켰다. 유한 요소 모델링 과정 중, 두께가 각각 1.2 mm와 0.5 mm로 상대적으로 두꺼운 MO디스크와 광학 부상 헤드용 슬라이더는 SOLID164 요소가 사용되었다. 반면에 두께가 0.1 mm로 얇은 서스펜션은 SHELL163 요소로 모델링 하였다. 또한 SHELL163 요소는 탄성 변형으로 설정하였다. 유한요소 모델은 9870개의 요소로 구성

되었으며 Fig. 7과 같다.

해석에 사용된 시스템 각 부분의 물성치는 Table 1과 같다.

4.3 서스펜션의 충격 응답 특성

디스크와 슬라이더의 접촉을 고려한 비구동 상태와 구동 상태의 충격해석에 앞서 충격의 크기(amplitude)와 외란 적용 시간(duration)을 변화시켜가면서 서스펜션의 충격 응답 특성을 파악해 보았다. 이 때의 반정현파의 크기는 외란의 크기와 관련이 있으며, 충격 적용 시간은 중요 공진 주파수의 영역과 관련이 있다. 충격의 크기는 시스템에 주어지는 절대적인 크기의 양의 영향을 주기 때문에, 충격의 크기가 클수록 최대 변위의 값이 함께 증가할 것으로 예상된다. 한편, 충격 적용 시간에 대한 영향은 시스템의 구조물에 미치는 공진주파수에 영향을 주어, 반응하는 임계 주파수에 대한 영향과 충격의 크기와 적용시간의 곱으로써, 표현되는 충격 에너지 관점에서 함께 고려되어야 할 것이다. 충격의 크기는 50 G부터 1000 G까지 변화를 주었으며, 적용 시간은 0.2 ms부터 3 ms까지 변화를 주었다. 충격의 크기와 적용 시간이 증가할수록 슬라이더의 변위가 증가함을 Fig. 8을 통해 확인하였다. 최대 변위는 충격의

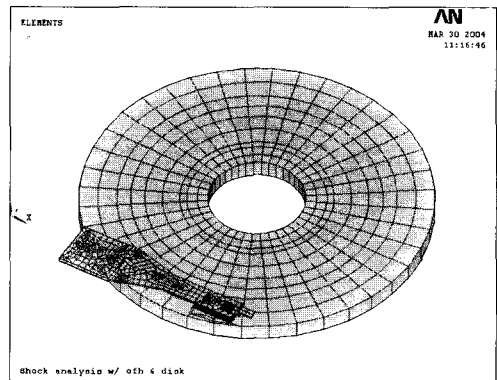


Fig. 7 Finite element model of a disk drive

Table 1 Material property

	Suspension	Slider	Disk
	Stainless steel	Silicon	Poly carbonate
Young's modulus (GPa)	190	393	3.2
Density (kg/m ³)	8000	18141	1190
Poisson ratio	0.32	0.23	0.3

크기와 적용 시간이 각각 최대인 1000 G와 3 ms에서 발생하였다.

이러한 충격 크기와 적용시간에 대한 분석을 통하여, 향후의 발전적 설계에 있어 외란에 의한 공진 영역을 고려한 설계에 대한 고려가 병행되어야 할 것이다.

4.4 구동 상태의 유한 요소 모델링

구동 시스템의 유한 요소 모델은 추가적으로 슬라이더와 디스크 사이에 발생하는 공기 베어링으로 인한 유체 역학적 강성이 고려되었다.^(10, 11) 본 해석에서는 공기 베어링을 Fig. 9와 같이 슬라이더의 네 꼭지점과 그에 각각 대응하는 디스크 사이에 z방향 선형 탄성 스프링이 각각 연결 된 것으로 가정하였다.

네 개의 선형 탄성 스프링은 ANSYS/LS-DYNA의 COMB1165 요소로 모델링 하였다. 선형 탄성스프링의 상성은 정상상태 기준으로 총 132 kN/m으로 가정하였으며, 감쇠의 영향을 5%로 고려하였고, 부상 시 상대적으로 앞 단에 비해 뒤 단의 양압이 크게 공기 베어링 시스템이 설계되었다.⁽¹²⁾ 이로 인하여 앞단과 뒤 단의 공기 베어링은 1 : 2.64의 강성비를 갖

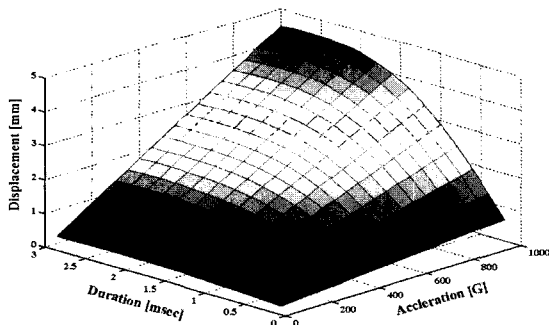


Fig. 8 The variations of maximum displacement at the tip of the optical slider

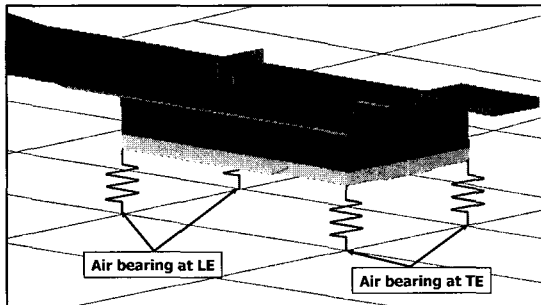


Fig. 9 Modeling of air bearing

는 것으로 모델링 하였다. 또한 충격해석에 앞서 외부 충격 시 발생하는 디스크와 슬라이더 헤드의 접촉(contact)에 대한 모델링이 추가적으로 있었다. 접촉에 대한 모델링은 ANSYS/LS-DYNA의 '요소 대면 접촉(node to surface contact)'을 이용하였다. 요소 대면 접촉은 접촉이 발생 하는 부분을 사전에 정확히 알고 있을 때 가장 빠르고 효율적인 해석 방법이다. 요소 대면 접촉 모델링을 하기 위해서는 접촉 요소와 목표면을 지정하여야 한다. 일반적으로 평탄하거나 오목한 면을 목표면으로 설정하고 볼록한 면을 접촉 요소로 설정한다. 본 충격 해석에서는 슬라이더의 모서리와 디스크의 평탄한 면이 접촉을 할 것으로 예상되므로 슬라이더를 접촉 요소로 디스크를 목표면으로 설정하였다.

4.5 구동 상태의 충격 해석

구동 상태에서는 외부의 충격을 데이터 플레이어의 최근 충격스펙을 참고하여 700 G의 반정현과의 형태로 0.5 ms 동안 가하였다. 디스크와 슬라이더 사이의 초기 높이는 200 nm이며, 0.5 ms부터 2 ms까지 천이 구간에서 슬라이더와 디스크의 변위를 살펴보았다. Fig. 10은 충격으로 인한 디스크 내주에서의 슬라이더 뒤 단과 앞 단의 디스크의 상대 변위를 보여주고 있다. 상대변위의 최대 값은 앞 단에서 5.88 um이다. 또한 Fig. 10에서 보는 것처럼 충격 적용 시간 이후에 디스크와 슬라이더가 접촉함을 알 수 있다. 또한, Fig. 8의 비구동 상태의 충격 해석 결과와 비교 하였을 때 구동 상태에서 발생하는 공기베어링이 충격 응답에 지배적인 역할을 한다는 것을 확인하였다.

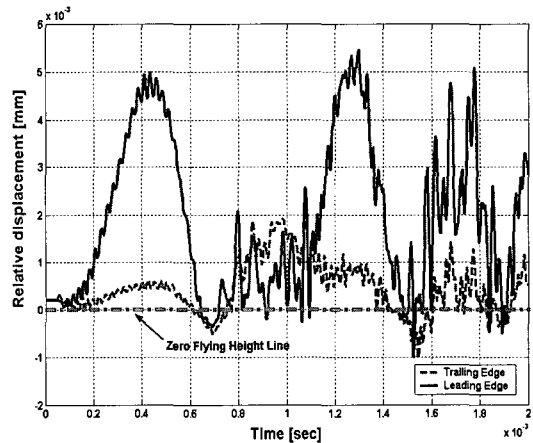


Fig. 10 Relative displacement at trailing edge

5. 결 론

이 논문을 통해서 초소형 광자기 드라이브를 위한 구동시스템에 대한 소개 및 신뢰성과 외부 충격에 대한 분석을 하였다. 초소형 광자기 드라이브의 구동 방식으로는 로터리 타입의 스윙 암 구동 방식을 이용하며, 광학 렌즈를 슬라이더에 탑재하여 디스크를 따라 구동하는 방식을 채택하였다. 설계된 서스펜션은 제작시 발생할 수 있는 형상 오차와 재료적인 측면에서의 다변성을 고려하여 신뢰성 분석이 이뤄졌다. 그 결과 공차는 20 μm , 재료의 물성과 두께는 5% 정도의 가우시안 분포를 유지할 때, 적절한 확률적인 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 휴대용저장기기로의 응용에 있어서의 가장 큰 이슈인 외 충격에 대한 분석이 이루어졌다. 이를 위하여 서스펜션과 디스크를 모델링 하였다. 구동 상태에서는 광학 부상 헤드 슬라이더와 디스크 사이에 생기는 공기 베어링으로 인한 유체역학적 강성은 선형 탄성 스프링으로 모사하였고, 외부 충격으로 인한 슬라이더 헤드와 디스크의 접촉을 고려하였다. 외부의 충격에 대해서는 반정현과 형태의 임펄스를 일정시간 간격 동안 변위의 형태로 가하였다. 충격 응답 해석은 효과적인 동적 해석을 위하여 ANSYS/LS-DYNA를 이용하였다. 구동 상태의 해석을 통하여 공기 베어링이 충격 응답에 지배적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 이러한 충격 해석과 분석을 통하여 차후에 외부의 충격에 강건한 서스펜션의 설계에 응용 할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 한국과학재단(R11-1997-042-11000-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Heong, J. H., Shim, J. Y., Lee, S. Q., Lee, J. H., Yoon, H. K. and Gwon, D. G., 2002, "Swing Arm Type Pick-up Actuator Design for Near Field Recording", ISOM/ODS Technical Digest, pp. 341 ~ 343.
 (2) Hata, S., Yamada, Y., Ichihara, J. and

Simokohbe, A., 2002, "A Micro Lens Actuator for Optical Flying Head", Optical Memory and Optical Data Storage Topical Meeting, International Symposium, pp. 40~42.

(3) 안채현, 임경화, 2003, "근접장 광기록용 슬라이더의 동특성 분석", 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 3 호, pp. 164~171.

(4) 윤상준, 김석훈, 최동훈, 정태건, 김수경, 2003, "근접장 기록을 위한 부상형 광학 헤드의 최적설계", 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 10 호, pp. 785~790.

(5) 조태민, 임경화, 2004, "근접장 광기록용 서스펜션의 최적설계", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 4 호, pp. 295~302.

(6) Hatem R. Radwan and Charles Kim, 1996, "Semi-optical Design of Actuator Voice Coil Motors in Disk Drives", Adv. Info. Storage Syst., Vol. 7, pp. 315~330.

(7) Jose L.Aristegui and Thomas L.Geers, 2000, "Shock Analysis of a Disk-drive Assembly", Journal of Information Storage and Processing Systems, Vol. 2 pp. 25~31.

(8) Lin, C., 2002, "Finite Element Analysis of a Computer Hard Disk Drive Under Shock", J. Mechan. Design, Vol. 124 No. 121.

(9) Eric M. Jayson, Paul W. Smith and Frank E. Talke, 2003, "Shock Modeling of the Head-media Interface in Operational Hard Disk Drive", IEEE Transactions of Magnetics, Vol. 39, No. 5, September.

(10) Zeng, Q. H. and Bogy, D. B., 2002, "Numerical Simulation of Shock Response of Disk-suspension-slider Air Bearing Systems in Hard Disk Drives", Microsystem Technologies, Vol. 8, pp. 289~296.

(11) Eric M. Jayson, James M. Murphy, Paul W. Smith and Frank E. Talke, 2002, "Shock and Head Slap Simulations of Operational and Nonoperational Hard Disk Drives", IEEE Transactions of Magnetics, Vol. 38, No. 5, September.

(12) Brian, H., David, and B. Bogy, 2004, "A Parametric Study of Head-disk Interface Instability Due to Intermolecular Forces", IEEE Transactions of Magnetics, Vol. 40, No. 1, pp. 337~344.