

마이크로 광디스크 드라이브용 4x1 근접장 탐침 어레이를 위한 슬라이더와 서스펜션의 설계

Design of the Slider and Suspension for 4x1 Near-field Probe Array in Micro Optical Disk Drives

홍어진*·정민수**·오우석*·박노철**·양현석***·박영필***

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

Key Words : Near-field probe array(근접장 탐침형 어레이), Slider(슬라이더), Suspension(서스펜션)

ABSTRACT

The near-field scanning micro scope (NSOM) technique is in the spotlight as the next generation storage device. Many different types of read/write mechanism for NSOM have been introduced in the literature. In order for a near-field probe to be successfully implemented in the system, a suitable slider and suspension are needed to be properly designed. The optical slider is designed considering near-field optics and probe array. The suspension generally supports slider performance, and tracking servo capacity in HDD. Moreover, the suspension for optical slider also should meet the optical characteristics, and is also required to satisfy shock performances for the mobility for the actuator. In this study, the optical slider and the suspension for near-field probe array are designed and analyzed.

1. 서 론

디지털 정보화가 가속화 됨에 따라 정보화 사회에서 요구되는 정보량은 매년 폭발적으로 증가하고 있다. 실제로 개인이 보유하는 정보량은 1997년에 4.7GB에서 현재 36GB로 증가하였고, 2010년에는 1TB까지 증가가 예상되고 있다. 앞으로의 정보저장기기는 네트워크의 정보량 증가 및 고속화로 고 용량, 고 전송 량이 요구되며, 휴대용 저장기기의 수요급증으로 인하여 시장은 휴대성이 강조되는 초소형 정보저장기기를 요구하고 있다. 반면에, 기존의 자기와 광을 기반으로 했던 정보저장기기의 기술적 한계에 도달하고 있다. 이러한 이유로, 차세대 정보저장기기는 연구되고 있으며, 그 중 유력한 대안으로 근접장 광기록(near-field recording) 저장장치가 연구되고 있고, 그 중에서 탐침 프루브(near-field probe)를 이용한 방식이 있다. 이는 탐침 프루브 끝단 부분에 90-100nm 크기의 아주 작은 지름의 개구(aperture)를 통하여 빛을 통과시키고 빛의 산란을 막아 근접광을 발생시키게 된다[1]. 이때 기록 매체와 개구 사이의 간격은 사용되는 빛의 파장의 1/2 이하가 되어야 하며, 또한 개구의 지름

보다도 작게 유지되어야 한다. 본 논문에서는 일반적인 하드디스크(hard disk drive)에서 사용되는 공기 베어링을 이용하여 근접장 탐침형 어레이(near-field probe array)와 매체 사이의 간격을 유지하고자 하였다. 이러한 방식은 공기 베어링을 이용하여 별도의 구동기나 센서 없이 데이터를 탐색할 수 있기 때문에, 탐침 기반 정보저장장치에서 가장 큰 문제인 센서 구조가 이 방식에서는 필요 없으며, 구조가 단순해지게 된다. 하드디스크의 기술력은 이미 수 나노 단위의 부상 높이(flying height)유지에 도달해 있기 때문에 근접장 탐침 어레이 방식에 적용 시키는 것이 가능하다.

본 논문에서는 1TB를 목표로 하는 차세대 정보저장기기 기술의 적용을 위한 4x1 근접장 탐침 어레이를 위한 주요 기계적 구동 구조인 슬라이더와 이를 지지하는 서스펜션을 설계하는 것이다. 이를 위하여 탐침 어레이를 보호하고, 20nm의 목표 부상 높이를 유지하며, 탐침 어레이의 각 끝단에서의 높이차를 최소화하는 슬라이더의 설계와 이를 지지할 수 있는 수직방향의 순응성과 구동방향의 강건성을 갖는 서스펜션의 최적 설계과정이 이뤄질 것이다. 또한, 슬라이더에 구동시 영향을 주는 강성 요소와 디스크의 진동량(flutter)을 고려하여 슬라이더의 동적 거동 특성에 대한 분석도 함께 다룰 것이다.

* 연세대학교 기계공학과 대학원
E-mail: hongejin@yonsei.ac.kr
Tel: (02) 2123-4677, Fax: (02) 365-8460

** 연세대학교 정보저장기기 연구센터

*** 연세대학교 기계공학과

2. 정적 상태에서의 슬라이더 설계

2.1 설계목적 및 초기모델

근접장(near-field) 광 기록을 위한 4×1 탐침형 어레이(probe array)는 슬라이더 뒷 단(trailing edge)에 위치하여 기록 매체와 근접광(near-field optics)을 발생시키는 부상 높이(flying height)를 유지하고, 탐침간의 높이 차이를 최소화 하여야 한다. 따라서 탐침형 광학헤드와 매체 사이의 간격을 20nm 이하로 유지하고, 각 탐침 어레이 사이의 부상 오차는 부상 높이의 5%이내로 설계 목표로 선정하였다. 본 논문에서는 탐침형 어레이를 위한 슬라이더로서 앞 단(leading edge)부분에 공기유동을 제한하는 형태와 제한하지 않는 형태의 두 가지 모델 제안 하였다. 일반적인 하드디스크(hard disk drive)의 슬라이더와는 구별되는 구조로 언덕 구조(bank structure)가 있다. 탐침 어레이는 광학 경로를 포함해서 0.45(mm)×0.25(mm)의 공간이 필요하며, 언덕 구조는 디스크 구동에 의해 발생하는 공기 유동과 먼지(particle)로부터 탐침형 어레이를 보호하는 역할을 하게 된다. 슬라이더의 부상 여부와 언덕 구조를 감안하여 슬라이더의 크기는 기존의 하드디스크에 사용되는 피코 슬라이더(pico slider)에서 높이가 증가된 1.25(mm)×1.0(mm)×0.5(mm)로 정하였다. 또한 탐침형 어레이의 데이터 전송 속도를 고려하여, 디스크 반지름 10mm 에서, 최저 선속도로 부상 할 수 있는 0.5m/s 로 선정 하였다. 제안된 두 가지 모델에 대하여 각각의 설계 변수가 목적함수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 설계변수에 대한 부상 높이, 피치각(pitch angle), 롤각(roll angle)에 대한 파라미터 스터디(parameter study)를 시행하였고, 결과를 Table 1 에 나타내었다. 부상 높이의 기준은 최 외곽의 탐침 프루브의 부상 높이로 정하였다.

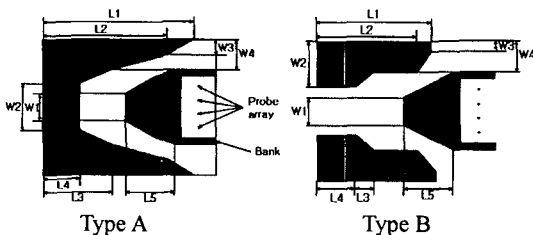


Fig. 1 Design parameter for rail shape

Table 1 Sensitivities of design parameters

Design Parameters	Type A		
	Flying Height	Pitch angle	Roll angle
L1	-1.13nm/mm	0.40urad/mm	0.01urad/mm
L2	6.00nm/mm	-8.21urad/mm	3.55urad/mm
L3	11.10nm/mm	70.76urad/mm	2.49urad/mm
L4	2.80nm/mm	121.65urad/mm	8.60urad/mm
L5	28.00nm/mm	-27.05urad/mm	2.16urad/mm
W1	17.10nm/mm	-19.21urad/mm	0.09urad/mm
W2	-1.40nm/mm	-55.28urad/mm	-2.20urad/mm
W3	32.50nm/mm	-28.18urad/mm	1.20urad/mm
W4	46.80nm/mm	173.45urad/mm	4.42urad/mm
Crown	0.33nm/nm	0.88urad/nm	0.01urad/nm
Camber	-0.12nm/nm	-0.48urad/nm	-0.01urad/nm
Taper length	15.40nm/mm	-245.5urad/mm	-5.85urad/mm
Taper angle	0.04nm/mrad	-0.88urad/mrad	-0.03urad/mrad
Load	-9.78nm/gf	28.76urad/gf	-1.32urad/gf
Base recess	0.19nm/um	0.92urad/um	0.05urad/um

Design Parameters	Type B		
	Flying Height	Pitch angle	Roll angle
L1	5.65nm/mm	-4.00urad/mm	1.36urad/mm
L2	4.00nm/mm	0.31urad/mm	-0.01urad/mm
L3	-3.90nm/mm	60.37urad/mm	0.03urad/mm
L4	-3.85nm/mm	87.76urad/mm	2.50urad/mm
L5	41.60nm/mm	-54.22urad/mm	0.48urad/mm
W1	11.95nm/mm	-16.80urad/mm	0.15urad/mm
W2	-4.90nm/mm	45.41urad/mm	1.40urad/mm
W3	4.00nm/mm	-3.21urad/mm	0.46urad/mm
W4	17.20nm/mm	254.33urad/mm	4.93urad/mm
Crown	0.31nm/nm	0.99urad/nm	0.005urad/nm
Camber	-0.10nm/nm	-0.68urad/nm	0.006urad/nm
Taper length	3.00nm/mm	-171.24urad/mm	-3.38urad/mm
Taper angle	0.001nm/mrad	-0.58urad/mrad	-0.02urad/mrad
Load	-14.37nm/gf	-30.50urad/gf	-1.19urad/gf
Base recess	-0.03nm/um	-0.38urad/um	-0.005urad/um

Table 1 에서 구한 각 설계변수에 대한 민감도 절대값이 클수록 해당 설계변수에 대한 목적 값의 변화가 크다는 것을 뜻하며, 이를 바탕으로 최적해를 도출하여 초기모델을 얻고, 정적 해석(static analysis)결과는 Table 2 에 표기하였다. 초기모델에 대한 레일의 형상과 공기 압력(air pressure)의 분포는 각각 Fig. 2 와 Fig. 3 에 나타내었다.

Table 2 Result of static analysis

	Type A	Type B
Flying height	19.96 nm	19.98 nm
Pitch angle	63.98 urad	51.89 urad
Roll angle	-0.63 urad	-0.49 urad

정적 해석(static analysis)결과 20nm 에서 0.05nm 의 오차범위내의 부상 높이를 가질 때 상대적으로 Type A 는 피치 각이, Type B 는 롤 각

이 좋은 결과를 나타내었다. 이는 양쪽 레일에서 생기는 양압과 언덕 구조 전면에서 생기는 양압차가 Type A 에서 Type B 보다 크게 나타나기 때문에 피치 각과 롤 각이 커진 것으로 해석된다.

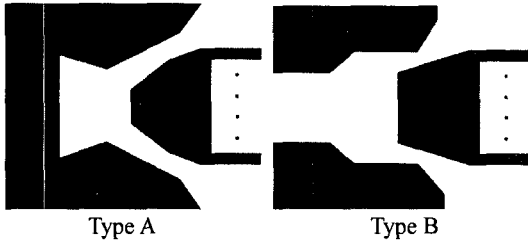


Fig. 2 Initial model of slider type A and type B

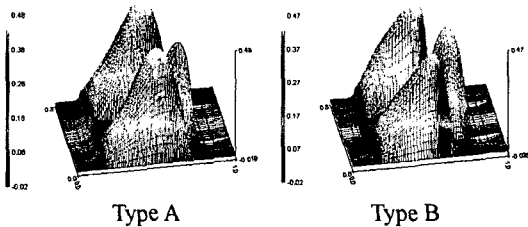


Fig. 3 Air pressure distribution for initial model

두 가지 모델에 모두 적용된 언덕 구조 전면에서 있는 구조물은 공기 유동을 탐침형 광학헤드부의 양쪽방향으로 유도하는 동시에 헤드부의 공기 배어링(air bearing)의 강성(stiffness)을 높여주는 역할을 한다.

2.2 내주와 외주의 균형을 고려한 설계

일반적인 하드디스크에서는 일정한 각속도로 디스크를 회전시키므로, 내주에서 외주로 갈수록 디스크의 선속도는 증가한다. 또한 슬라이더가 내주, 외주의 위치에서 공기 유동은 슬라이더의 길이방향 축과 각을 이루게 되는데 이러한 각을 스큐각(skew angle)이라 정의하며, 이때 슬라이더 앞 단에 유입되는 공기 유동 방향의 변화가 슬라이더의 부상특성에 영향을 주게 된다. 따라서 선속도와 스큐각의 영향을 고려하여 내주와 외주의 부상 높이를 안정적으로 유지하는 설계가 요구된다[2], [3],[4]. 또한 탐침 프루브 어레이의 광학적 특성을 감안하면 프루브 사이의 부상 높이 오차가 원하는 부상 높이의 5%이내로 만족되어야 한다. 1 인치 마이크로 광학 드라이브에서 액추에이터의 구동 중심 위치를 고려하여 반지름 10.14mm 을 스큐각이 0 기준점으로 하고 이 지점에서의 선속도를 0.5m/s 로 설정하면 반지름/스큐각의 범위는 5.03mm/-14.7deg 에서 12.7mm/7.3deg 가 되고 RPM 은 470.87 이 된

다. 앞 절에서 시행한 파라미터 스터디의 결과를 이용하여 제한된 롤 각의 범위 내에서 최적화된 모델을 구하였고, 그 결과 모델은 Fig. 4 에 나타내었다.

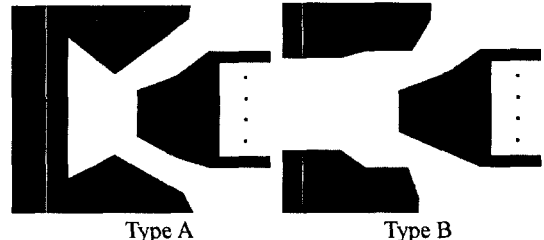


Fig. 4 Modified model of slider type A and type B for radius and skew angle

Fig.5 에서는 초기모델과 수정된 모델간의 디스크 반지름에 따른 부상 높이의 변화를 비교하였다. 수정된 모델의 부상 높이 변화는 Type A, B 모델의 목표 부상 높이에 각각 4.3%, 3.8%에 해당되어 목표치인 5%이내를 만족시킨다. 탐침 어레이 간의 높이 오차를 나타내기 위하여 프루브 어레이의 최대 부상 높이와 최소 부상 높이 차이를 부상 높이 델타(flying height delta)로 정의하고 결과값을 Table 3 에 나타내었다. 이 수치는 부상 높이의 4.1% ~ 5.8%범위에 존재하며 캠버(camber)를 고려할 때 부상 높이에 비하여 상당히 작은 수치임을 알 수 있다.

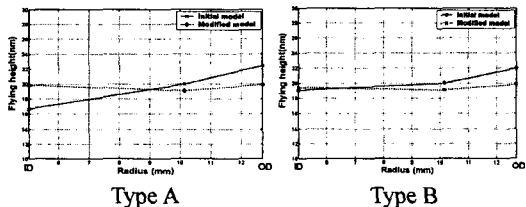


Fig. 5 Comparison of fly height variation for initial model and modified model

Table 3 Result of static analysis of modified model

Radius (mm)	Type A		
	Flying height delta	Pitch angle	Roll angle
5.024 (ID)	1.17 nm	45.43 urad	1.86 urad
10.14 (MD)	1.17 m	71.35 urad	-1.86 urad
12.7 (OD)	1.15 nm	81.74 urad	-1.77 urad
Radius (mm)	Type B		
	Flying height delta	Pitch angle	Roll angle
5.024 (ID)	1.14 nm	49.90 urad	1.68 urad
10.14 (MD)	0.96 nm	77.77 urad	-1.59 urad
12.7 (OD)	0.81 nm	89039 urad	-0.06 urad

근접장 탐침 프루브를 보호하는 구조인 언덕 구조 내에서 압력 및 질량 유동을 최소화 하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 앞서 제시된 3corner 언덕구조 슬라이더에서 단힌 형태의 언덕구조 4corner 슬라이더를 제안하고 각각의 경우에서 언덕 구조내의 압력과 질량유동을 조사하였다. 3corner 슬라이더에 비해 4corner 슬라이더에서 질량 유동은 3corner 질량유동 대비 0.6% ~ 23%의 감소효과를 보이고 이는 특히 Type A 모델에서 더 크게 감소한다. 그러나 수직 압력에 대해서는 3corner 압력에 최고 67 배까지 상승시켜 전체적으로 언덕 구조 내에서 탐침형 프루브를 보호함에 있어서 더 좋지 않은 결과를 가져오게 되었다. 이는 3corner 에서 4corner 로 언덕구조를 변화시켜 슬라이더 끝 단에서 역 유입되는 공기유동을 막아 소량의 질량 유동을 줄이는 효과를 얻을 수 있었지만, 공기 유동이 언덕 구조 내에 갇히게 되어 앞 단에서 언덕 구조 내로 유입되는 공기의 흐름을 제안 함으로써 언덕구조내의 압력을 크게 상승시키게 되었기 때문이다.

2. 서스펜션 설계

2.1 서스펜션의 설계 개념

서스펜션의 기본 특징은 수직 방향의 순응성과 수평 방향의 강건성으로 평가되는 모순된 (trade-off) 운동이라 할 수 있다. 또한, 구동 방향으로 강건성을 확보하여, 트랙방향의 안정적인 구동과 함께, 슬라이더의 부상 안정성을 확보해 주기 위해서, 별도의 플렉서(flexure) 구조(혹은 김발(gimbal))를 두어 충분히 낮은 강성으로써 슬라이더에 높은 자유도를 부여해야 한다. 이는 수직 방향의 디스크의 큰 진동(fluctuation)에 잘 순응(compliance)하는 특성과 함께, 수평 방향의 강성을 높임으로써 외란에 강건하게 하여 트랙 방향의 명령 추종성을 우수하게 하는 것이다. 이러한 서스펜션의 모순된 특성을 만족시키기 위해서 반드시 최적화된 설계가 요구되어진다.

최적설계를 위해서 선행되어야 할 것은 바로 파라미터 스터디(parameter study)이다. 파라미터 스터디는 서스펜션의 구조상의 변수들이 목적 함수에 미치는 영향을 알아보는 작업으로서, 이 과정을 통하여 중요한 설계 변수와 간과해도 되는 설계변수로 구분이 된다. 이때의 설계 변수는 제작의 용이성과 공학적인 접근을 고려한 신뢰할 만한 범위에 정적인 값을 가져야 한다. 이러한 설계 변수에 대한 연구가 선행된 후에, 감도적인 측면

에서 중요한 설계 변수를 선정하고 이를 기반으로 최적화 작업이 진행 된다. 최적화의 목적 함수로 쓰는 구동기의 트랙 방향의 구동을 제한하는 주요 공진 모드인 스웨이 모드와 2 차 뒤틀림 모드의 공진주파수를 높이며, 슬라이더의 동특성에 영향을 주는 서스펜션의 수직 방향의 강성과 피치(pitch), 롤(roll) 강성을 그 목적함수로 한다. 뿐만 아니라, 광학적 수차를 발생시킬 수 있는 1 차 뒤틀림 모드에 대한 주파수를 높이는 작업도 함께 진행 될 것이다. 최적 해를 구하기 위하여, 1 차적으로 파라미터 스터디를 통하여 초기 모델을 선정할 것이며, 위상 최적화 방식(topological optimization)과 형상 최적화 방식(shape optimization)을 적용하여 최적해를 도출할 것이다[5].

2.2 서스펜션의 최적 설계

1 인치 디스크 드라이브에 적용시킬 수 있는 서스펜션을 설계하는 것이므로, 상용화된 IBM 사의 마이크로 드라이브를 참고하여, 서스펜션이 전체 길이는 11mm 로 제한하였다. 슬라이더 부분은 일반적인 피코 슬라이더 크기에 광학 경로를 위한 사각홀이 위치해 있다. 제작의 용이성과 설계상의 구조적인 특성을 고려하여 일반적으로 설계되는 플렉서 구조를 로드빔에 심는 형태로 일체형 구조의 서스펜션을 고려하였다. Fig.6 은 서스펜션의 초기 모델을 보여주고 있다.

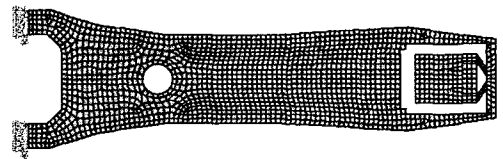


Fig. 6 Initial model of the suspension

Fig. 6 에서 보는 것처럼, 플렉서 부분은 T-바 형태의 변형으로써, 광학 경로를 위한 사각홀을 위해서 Y-자 형태로 설계하였다. 파라미터 스터디를 통한 감도를 고려하여 형상에 대한 초기 설계를 하였으며, 가공을 위하여 톨링홀(tolling hole)을 뚫었다. 1 차적인 접근을 위하여 초기 모델에 위상 최적화를 적용하였다. 상용화된 유한요소 프로그램인 엔시스(ANSYS)를 통해 수행하였으며, 서스펜션의 끝단에 단위힘을 토크로 적용시켜서, 이에 대한 지지력을 강화하면서, 전체 서스펜션의 유효 질량을 약 25% 낮추는 방향으로 진행되었다. 지지력에 대한 강화는 뒤틀림 모드에 대한 강성을 증가시키며, 유효질량을 낮춤으로써, 외충격

에 보다 강건한 설계가 이뤄질 것이다. Fig. 7 은 위상최적화를 통해 얻어진 모델을 보여주고 있다.

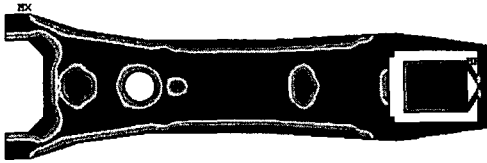


Fig. 7 Topological model of the suspension

Fig. 7 에서 보인 위상 최적화 모델은 질량의 밀도를 이용한 것으로서, 상대적으로 검은 부분은 제거할 수 있는 영역, 그리고 상대적으로 흐린 부분은 반드시 고려되어야 할 영역으로 나뉘게 된다. 이렇게 1 차 위상최적화를 거친 모델의 스웨이 주파수를 증가시키기 위해서 2 차적으로 형상 최적화를 진행하였다. 형상 최적화는 퍼스트 오더 방식(first order method)과 서브 프로그램 방식(sub problem method)을 혼합함으로써 적용하였다. Fig. 8 은 형상 최적화에서의 반복과정을 보여주고 있다.

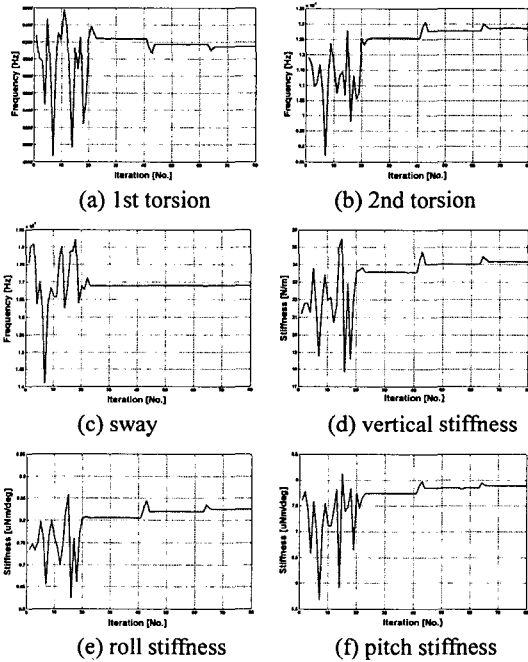


Fig. 8 Iterations during optimal process

Fig. 9 과 Table 4 는 최종 서스펜션의 모습과 특성을 보여주고 있다.

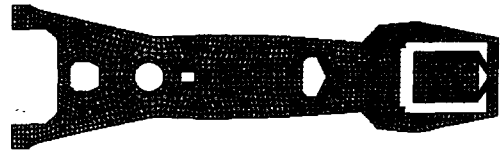


Fig. 9 Final suspension

Table 4 Characteristics of the suspension

Resonance Freq.		Stiffness Properties	
1 st Torsion (kHz)	6.21	Spring Rate (N/m)	24.23
Sway (kHz)	12.97	Pitch Stiffness (uNm/deg)	0.83
2 nd Torsion (kHz)	16.86	Roll Stiffness (uNm/deg)	7.79

3. 동적 상태에서의 슬라이더 해석

슬라이더와 서스펜션과의 동특성을 참고하여, 헤드 디스크(head disk interface: HDI)에서 슬라이더의 동특성에 관하여 시뮬레이션하였다. 서스펜션과 슬라이더 타입 A, 타입 B 의 정적 해석뿐만 아니라, 동적 거동을 확립함으로써 보다 나은 특성의 모델을 선택하는 것이 목적이다. 디스크의 진동량은 크기 10nm, 진동주파수는 100Hz 라 가정하였다. 또한, 최종 서스펜션의 강성값으로써, 수직방향의 강성은 24.23 N/m, 롤 방향의 강성은 7.79 uNm/deg, 피치 방향의 강성은 0.83 uNm/deg 이다.

Fig. 10 은 슬라이더 타입 A 와 서스펜션과의 관계를 고려한 동특성 해석 결과를 보여주고 있다. 서스펜션의 영향을 받는 각 방향의 강성 및 초기 하중을 고려한 시뮬레이션에서, 최소 부상 높이는 최외각 탐침에서 7.34nm 이며, 최대 부상 높이는 36.79 nm 를 보여주고 있다.

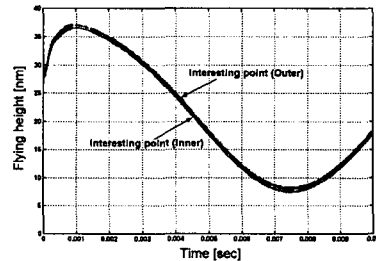


Fig. 10 Flying height variation

Fig. 11 은 디스크 구동시 피치와 롤각이 수렴하는 과정을 보여주고 있다. 피치 각의 경우, 70.12urad 의 값에 약 5.6msec 이후에 수렴하는

보여 주고 있으며, 롤 각의 경우에는 -1.90urad 의 값에 7.9msec 이후에 수렴하는 결과를 나타냈다.

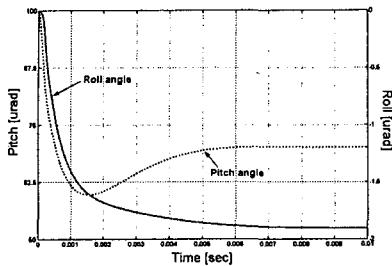


Fig. 11 Saturation of pitch and roll angles

Fig. 12는 슬라이더 타입 B와 서스펜션과의 관계를 고려한 동특성 해석 결과를 보여주고 있다. 서스펜션의 영향을 받는 각 방향의 강성 및 초기 하중을 고려한 시뮬레이션에서, 최소 부상 높이는 최외각 탐침에서 5.23nm이며, 최대 부상 높이는 35.54 nm를 보여주고 있다.

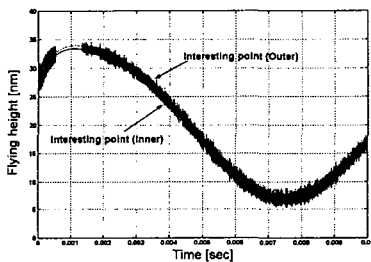


Fig. 12 Flying height variation

Fig. 13은 디스크 구동시 피치와 롤각이 수렴하는 과정을 보여주고 있다. 피치 각의 경우, 75.77urad 의 값에 약 6.3msec 이후에 수렴하는 보여 주고 있으며, 롤 각의 경우에는 -2.13urad 의 값에 8.7msec 이후에 수렴하는 결과를 나타냈다.

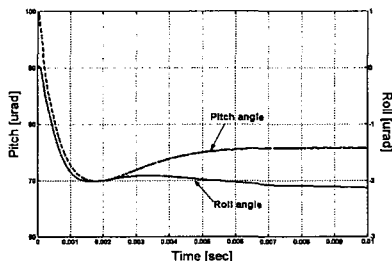


Fig. 13 Saturation of pitch and roll angles

4. 결론

본 논문에서는 1TB를 목표로 하는 차세대 정보저장기기의 기술의 적용을 위한 4x1 근접장 탐침 어레이를 위한 주요 기계적 구동 구조인 슬라이더와 이를 지지하는 서스펜션을 설계하였다. 슬라이더는 하드디스크에서 상용화된 나노 슬라이더 크기에 맞추었으며, 탐침을 보호하는 별도의 언덕 구조를 설계하였다. 목표 부상 높이는 20nm로 내주와 외주에서 5%이내의 변화와 각 탐침 사이에서의 부상 높이 차이를 5%이내로 목표로 설계하였으며, 앞 단 부분의 공기 유동을 제한할 경우와 그렇지 않은 경우의 2 가지 형태로 설계하였다. 서스펜션은 제작상의 용이성을 가장 큰 장점으로 한 일체형 타입의 설계를 하였다. Y자형태의 플렉서 구조와 6kHz 이상의 1차 뒤틀림 모드와 10kHz 이상의 구동 방향의 진동 주파수를 갖는 서스펜션을 설계하였다. 위상 최적화와 형상 최적화 설계 방식을 적용하여, 구동방향의 강건성과 수진방향의 순응성을 동시에 만족시키는 서스펜션을 설계하였다. 뿐만 아니라, 휴대용기기에서 강조되는 충격에 대한 지지력을 높이기 위해서 등가 질량을 낮추는 방향으로 설계하였다. 서스펜션의 강성과 디스크 진동을 고려한 동특성 해석을 통하여 슬라이더 타입 A가 좀 더 나은 성능을 보임을 확인하였다.

후기

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

참고 문헌

- (1) Ki-Bong Song et.al, 2003, "Fabrication of a high-throughput cantilever-style aperture tip by the use of the bird's-beak effect", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 42, pp. 4353-4356.
- (2) Dufresne M. A. and Menon A. K., 2000, "Ultra-Low Flying Height Air Bearing Designs", IEEE Trans. Magn., vol. 36, pp. 2733 ~ 2735.
- (3) 권순익 등, 2000, "액츄에이터 시스템의 수학적 모델이이용한 HDD 공기 베어링 슬라이더의 동특성 해석", 소음진동학술대회 논문집, pp 485 ~ 491.
- (4) Lu S. and Bogy D. B., 1996, "Air Bearing Design, Optimization, Stability Analysis and Verification for Sub-25nm Flying", IEEE Trans. Magn., vol. 32, pp. 103 ~ 109.
- (5) Jasbir S. Arora, 2001, "Introduction to optimum design", McGraw-Hill, New York, USA.