

# 열 보조 자기기록용 서스펜션의 PSA 허용오차에 대한 분석

## Analysis for PSA Tolerance of TAMR Suspension

김기훈\*, 이용현\*, 김석환\*, 이상직\*, 박노철\*, 박영필\*, 박경수 †

Ki-Hoon Kim, Yonghyun Lee, Seokhwan Kim, SangJic Lee,  
No-Cheol Park, Young-Pil Park and Kyoung-Su Park

(2010년 2월 25일 접수; 2010년 3월 10일 심사완료; 2010년 3월 11일 게재확정)

### Abstract

Thermally-assisted magnetic recording (TAMR) is a potentially promising approach to increase the storage density of hard disk drive (HDD). However, TAMR has some issues such as temperature effects, media problems, thermal deformation and light delivery. In this research, we focused on light delivery. One of the powerful methods to deliver the light from laser diode to recording medium is the use of an optical fiber and a specially designed prism. However, the TAMR with optical fiber may have some flyability problems induced by the mounted optical fiber and prism. Also, the TAMR suspension using an optical fiber has high vertical and pitch stiffness. Therefore, p-torque is greatly increased by the optical fiber. Also, flying height (FH) of the slider with TAMR suspension can be largely changed by p-torque. Therefore, in this paper, we focus on the pitch static attitude (PSA) tolerance and the FH by PSA of the TAMR suspension. The FH is investigated using various errors and the PSA tolerance for TAMR suspension is proposed.

**Key Words :** light delivery, pitch static attitude (PSA), suspension stiffness, thermally-assisted magnetic recording (TAMR)

### 1. 서론

정보의 양이 증가함에 따라 고용량의 자기기록장치의 수요는 점점 증가하고 있으며 고용량의 정보저장장치의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 저장용량을 증가시키기 위한 많은 연구들이 수행되고 있는데 특히 차세대 정보저장 기술로 패턴미디어(patterned media) 기술과 열 보조 자기기록(thermally-assisted magnetic recording, TAMR)기술에 대한 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다. 미디어(media)의 저장용량을 증가시키기 위해서는 미디어내의 그레인(grain) 크기를 줄여 저장용량을 증가시킬 수 있는데

그레인 크기를 줄이면 초상자성한계(superparamagnetic limits)라고 불리는 현상이 발생하게 된다. 초상자성한계란 열적인 불안정성으로 미디어의 자기극성이 바뀌는 현상을 말한다. 초상자성한계를 극복하기 위한 방법 중에 하나가 패턴미디어 기술이다. 패턴미디어 기술은 각각의 도메인을 서로 분리시켜 각각의 도메인이 인접한 도메인에 영향을 주지 못하도록 강제적으로 미디어의 간격을 분리하는 방법이다.

다른 방법 중에 하나는 본 연구에서 수행한 열 보조 자기기록기술이다. 열 보조 자기기록방식은 보자력(coercive force)이 큰 미디어를 사용하여 그 미디어에 열을 가함으로써 순간적으로 보자력을 떨구고 그 순간 정보를 기록하고 바로 냉각을 시키는 방식이다. 여기서 보자력이란 자화된 자성체의 자화도를 없애기 위해 걸어주는 역 자기장의 세기이다. 이러한 열 보조 자기기록기술은 반드시 해결해야 할 많은

† 연세대학교 기계공학과

E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr

TEL : (02) 2123 - 4677

\* 연세대학교 기계공학과

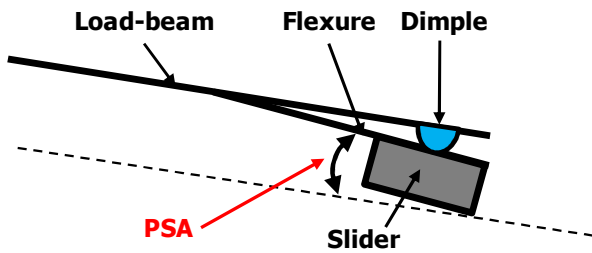


Fig. 1 Pitch static attitude (PSA) of suspension

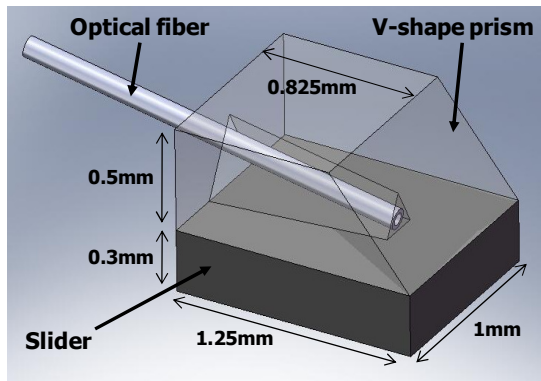


Fig. 2 Components of TAMR suspension

Table 1 Comparison FE model with experiment

Mode	Cantilever	Slider Pitch	Slider Roll	1 <sup>st</sup> Bending
Experiment	264.1 Hz	2397 Hz	2855 Hz	3075 Hz
FE Model	263.5 Hz	2314.1 Hz	2918.2 Hz	3023.3 Hz
Error	-0.23 %	-3.46 %	2.21 %	-1.68 %

기술적인 이슈(issue)들이 있다. 예를 들어, 열을 사용함에 따른 온도 문제, 열을 받은 미디어에서의 열 문제, 열에 의한 열 팽창 및 열 변형 문제 그리고 열을 발생시키기 위한 빛의 전달(light delivery) 문제 등이 있다. 본 연구에서는 빛의 전달 문제에 초점을 맞추었다. 빛의 전달을 위해 많은 방법들이 연구되고 있는데 직접적으로 빛을 전달하는 방법과 레이저 다이오드를 이용한 빛의 전달 그리고 광섬유를 이용한 빛의 전달 등이 있다 [1-8]. 본 연구에서는 광섬유(optical fiber)를 이용한 빛의 전달에 있어서 광섬유를 서스펜션 (suspension)에 부착하여 빛의 반사를 위해 특별히 제작된 프리즘(prism)에 연결하여 빛을 전달하기 위한 열 보조자기기록용 서스펜션을 구축한다. 하지만 광섬유를 이용한 열 보조 자기기록용 서스펜션은 수직(vertical) 및 피치(pitch)강성이 매우 크게 증가하는 현상이 발생한다. 이렇게 증가된

강성에 의해 피치토크(p-torque)가 발생하게 된다. 피치토크는 슬라이더(slinder)의 부상높이(flying height, FH)에 크게 영향을 미친다. 따라서 열 보조 자기기록용 서스펜션의 강성 및 pitch static attitude(PSA)에 따른 부상높이를 검토한 후, 각 모델에 대한 PSA 의 허용오차를 분석한다. Fig.1 은 서스펜션의 구성요소와 PSA 를 보여준다. 서스펜션의 로드빔(load-beam)과 플렉서(flexure)의 사이각으로 정의되는 PSA 는 슬라이더의 부상성능뿐 아니라 동적인 현상에 많은 영향을 준다. 열 보조자기기록용 서스펜션의 제작에 있어서 PSA 의 허용오차는 매우 중요하기 때문에 각 모델에 대한 PSA 허용오차를 해석하여 열 보조 자기기록용 서스펜션의 특성을 분석하고자 한다.

## 2. 열 보조 자기기록용 서스펜션

### 2.1 열 보조 자기기록용 서스펜션의 구성요소

본 연구에서 제안된 열 보조 자기기록용 서스펜션은 광섬유와 특별히 제작된 프리즘을 사용하기 때문에 일반용 서스펜션과는 다른 형상을 하고 있다. Fig.2 는 열 보조 자기기록용 서스펜션의 구성요소와 크기를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 슬라이더가 프리즘에 부착되고 그 프리즘의 윗면이 플렉서와 부착된다. 또한 프리즘의 구멍 안쪽으로 광섬유가 삽입되어 열 보조 자기기록용 서스펜션을 구성한다. 이렇게 구성된 열 보조 자기기록용 서스펜션은 광섬유에 의해 강성이 증가하게 되며 프리즘에 의해 슬라이더의 높이 및 질량이 증가하게 된다.

### 2.2 모드 해석 및 실험결과

열 보조 자기기록용 서스펜션의 강성 및 PSA 에 대한 허용오차를 계산하기 위해서는 실제 모델(model)과 매우 흡사하며 같은 특징을 가지게 모델링(modeling)을 하는 것이 반드시 필요하다. 따라서 일반용 서스펜션의 모드해석(modal analysis)을 통하여 모델링에 대한 정확도를 높인 후 해석을 수행한다. Table 1 은 모드해석을 수행한 서스펜션의 진동수와 유한요소 모델로부터 구한 진동수를 보여준다. Table 1 에서 보는 바와 같이 실험값과 해석값에 대한 오차가 5%이내로 매우 유사함을 볼 수 있다. 이와 같은 방법으로 모델에 대한 신뢰도를

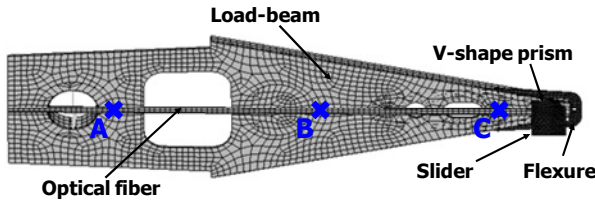


Fig. 3 TAMR suspension for glue position

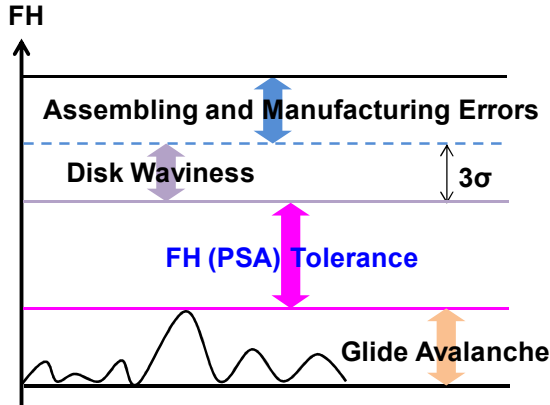


Fig. 4 FH loss for various errors

검증하고 해석을 수행하게 된다.

### 2.3 다양한 열 보조 자기기록용 서스펜션

본 연구에서 제안된 열 보조 자기기록용 서스펜션은 광섬유를 사용하므로 광섬유가 처지는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 서스펜션과 광섬유의 고정위치(glue position)에 대한 해석이 반드시 필요하다. 고정위치에 따라서 서스펜션 및 슬라이더의 동특성이 바뀔 수 있기 때문에 고정위치에 따라서 열 보조 자기기록용 서스펜션을 나누어 해석을 수행한다. 우선 첫 번째 모델(Model A)은 일반용 서스펜션 모델 즉, 광섬유와 프리즘을 사용하지 않은 모델이고 해석을 위한 모델은 Fig.3 에서 보는 바와 같다. Fig.3 은 고정위치에 따른 열 보조 자기기록용 서스펜션을 보여준다. 두 번째 모델(Model B)은 A 점과 B 점 그리고 프리즘을 연결한 모델, 마지막 모델(Model C)은 A 점과 C 점 그리고 프리즘과 연결한 모델로 각 3 개의 모델에 대하여 해석을 수행한다.

## 3. 연구 개요 및 선형 방정식

### 3.1 연구 개요

열 보조 자기기록용 슬라이더의 부상높이는 다양한 오차 및 외부환경에 의해 변화될 수 있다.

Fig.4 는 외부환경을 제외한 오차들에 의한 부상높이 감소를 보여준다. Fig.4 에서 보는 바와 같이 프리즘과 슬라이더의 부착 그리고 프리즘과

Table 2 Vertical and pitch stiffness

Stiffness	Model A	Model B	Model C
Vertical (N/m)	29.55	43.40	58.80
Pitch (N-m/rad)	5.46E-05	1.14E-04	1.65E-04

플렉서의 부착에서 발생할 수 있는 조립 및 제작(assembly and manufacturing)오차, 실제 슬라이더의 부상높이 측정에 의한 오차, 프리즘의 높이를 보상하기 위한 Z 방향 높이(Z-height)에 의한 측정오차, 디스크(disk)의 표면굴곡(waviness)에 대한 고려와 최소부상높이(glide avalanche) 등을 모두 고려하여 열 보조 자기기록용 슬라이더의 최종부상높이를 구한다. 최종부상높이로부터 부상높이와 PSA의 관계를 이용하여 PSA의 허용오차를 계산한다. 여기서 각 오차에 대한 값들은 실제 열 보조 자기기록용 서스펜션을 제작하면서 발생하거나 발생할 수 있는 값이다.

### 3.2 선형 방정식 및 최소 부상높이

다양한 오차를 고려하여 최종 부상높이에 대한 허용오차를 계산한 후, 각 모델에 대한 PSA와 부상높이와의 관계를 설정하여 PSA에 대한 허용오차를 구한다. 우선 부상높이에 크게 영향을 미치는 피치토크에 관한 식을 살펴보면 식(1)과 같다 [9].

$$P_t = -P_s \times (P_a - PSA) \approx P_s \times PSA \quad (1)$$

여기서  $P_t$  는 피치토크,  $P_s$  는 서스펜션의 피치강성,  $P_a$  는 슬라이더의 부상 시의 피치각을 나타낸다. 그러나  $P_a$  는 약  $100\mu rad \sim 300\mu rad$ 의 값을 가진다. 또한  $1^\circ$  는 약  $17453.3\mu rad$  이다. 따라서  $P_a$  는 PSA에 비해서는 매우 작은 값을 가지므로 피치토크는 서스펜션의 피치강성과 PSA와의 곱으로 표현할 수 있다. 우선 PSA와 서스펜션의 피치강성이 증가함에 따라 피치토크가 증가하게 되고, 이렇게 증가된 피치토크는 슬라이더가 부상할 때 슬라이더의 설계 값인 피치각에 저항하는 역할을 하기 때문에 부상성능이 떨어지게 된다.

우선 각 모델에 대한 강성을 구한다. Table 2 는 각 모델에 대한 수직 및 피치강성을 보여준다. Table 2 에서 보는 바와 같이 광섬유의 고정위치

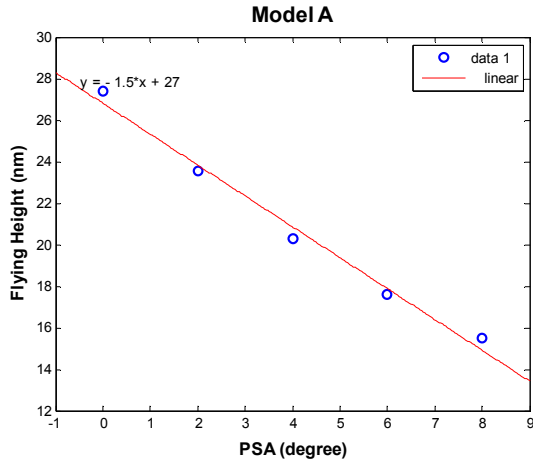


Fig. 5 FH versus PSA

Table 3 Linear equation of FH versus PSA

Model	Linear Equation for FH (nm)
A	FH = -1.5xPSA + 27
B	FH = -2.3xPSA + 26
C	FH = -3.3xPSA + 26

가 슬라이더와 가까워 질수록 수직 및 피치강성이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 각 모델에 대한 부상높이와 PSA 에 대한 관계식을 도출한다. Fig.5 는 Model A 에서 PSA 에 대한 부상높이 감소를 보여준다. Fig.5 에서 보는 바와 같이 PSA 가 증가함에 따라 슬라이더의 부상높이는 감소하게 되며 선형적인 관계를 보여준다. Model B 와 Model C 역시 같은 현상을 보이며 위와 같은 방법으로 선형관계식을 도출한다. Table 3 는 각 모델에 대한 부상높이와 PSA 에 대한 선형관계식을 보여준다. 즉, 피치강성이 클수록 PSA 에 더욱 민감하게 작용한다. 이는 식(1)에서도 확인할 수 있다.

#### 4. 다양한 오차에 의한 부상높이 감소

##### 4.1 조립 및 제작 오차

제작 및 조립오차에 의해 발생할 수 있는 PSA 는 약  $0.2^\circ$  이다. 따라서 Table 3 의 관계식을 적용하여 부상높이 감소를 구하면 Table 4 와 같다. 즉, 피치강성이 클수록 부상높이의 감소가 더욱 증가하게 된다.

##### 4.2 부상높이의 허용오차

실제 열 보조 자기기록용 서스펜션을 제작하여 부상높이를 측정할 때 발생할 수 있는 부상높이 Table 4 FH loss by assembling and manufacturing error

Model	FH loss by assembling and manufacturing error
A	0.30 nm
B	0.46 nm
C	0.64 nm

Table 5 FH loss by Z-height error

Model	FH loss by Z-height error
A	0.015 nm
B	0.023 nm
C	0.033 nm

에 대한 허용오차는 약  $1.3nm$  이다. 즉, 실험에 따라서 약  $1.3nm$  의 오차를 가질 수 있다는 것이다. 따라서 각 모델에서 부상높이 허용오차인  $1.3nm$  를 고려하여야 한다.

##### 4.3 Z 방향 높이의 오차

프리즘을 사용함에 따라 Z 방향 높이를 고려하여 부상높이를 측정하여야 한다. 왜냐하면 프리즘의 높이가  $0.5mm$  이기 때문에 기존장비의 Z 방향 높이를 변경하여야 한다. 하지만 Z 방향 높이를 조절할 시에 약  $0.05mm$  의 오차가 발생할 수 있다. 따라서 각 모델에서 Z 방향 높이의 오차인  $0.05mm$  를 고려하여야 한다. 우선 Z 방향 높이오차와 PSA 와의 관계를 해석하기 위해 서스펜션의 수직항력(pre-load)을 계산하여야 한다. 여기서 수직항력은 서스펜션의 수직강성과 Z 방향 높이의 곱으로 표현된다. 따라서 Table 2 에서 구한 수직강성과 Z 방향 높이 오차인  $0.05mm$  를 곱하여 각 모델에 대한 수직항력을 구한다. 이렇게 구해진 수직항력을 적용하여 각 모델에 대한 부상높이 감소를 구한다. Table 5 는 Z 방향 높이의 오차에 의한 부상 높이 감소를 보여준다. Table 5 에서 보는 바와 같이 모델의 강성이 증가할수록 Z 방향 높이의 오차에 의한 부상 높이 감소가 증가하게 된다.

##### 4.4 디스크의 표면굴곡 오차

실제 디스크의 표면굴곡을 적용하여 슬라이더의 부상높이 감소를 고려한다. 여기서 디스크의 표면굴곡의 진동수는 약  $57kHz$  이며 표면 굴곡에

대한 표준편차는 약 1.12nm 이다 [10]. 따라서 디스크의 표면굴곡에 대한  $3\sigma$  를 적용하여 디스크의 표면굴곡에 대한 부상높이의 값을 구하

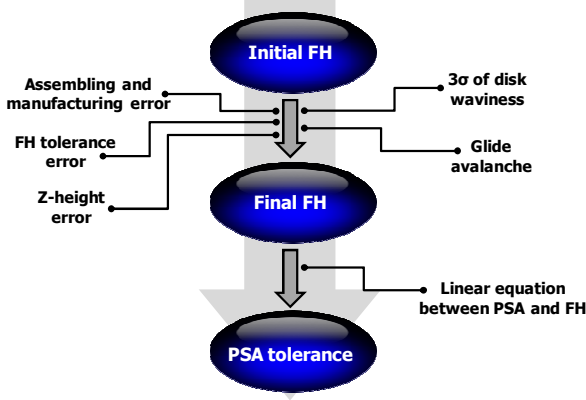


Fig. 6 Procedure for PSA tolerance

Table 6 PSA tolerance considering various errors

Model	IFH (nm)	AM (nm)	FH (nm)	Z (nm)	DW (nm)	GA (nm)	FFH (nm)	PSAT (°)
A	27.0	0.30	1.30	0.015	3.37	3	19.02	12.68
B	26.0	0.46	1.30	0.023	3.36	3	17.86	7.76
C	26.0	0.64	1.30	0.033	3.36	3	17.67	5.35

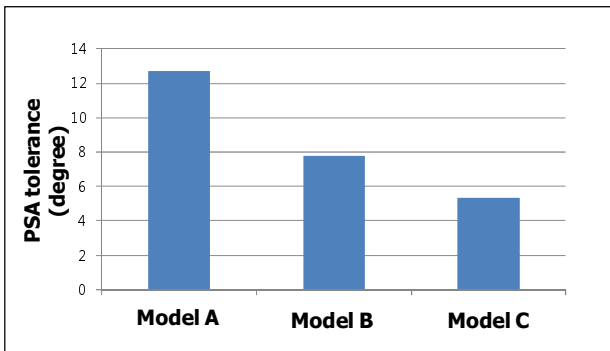


Fig. 7 PSA tolerance for model

면 약 3.36nm 이다. 따라서 각 모델의 디스크의 표면굴곡 오차인 3.36nm 를 고려하여야 한다.

#### 4.5 PSA 허용오차

다양한 오차를 고려한 열 보조 자기기록용 슬라이더의 부상높이 감소를 고려한 후, PSA 와 부상높이와의 선형관계식을 이용하여 PSA 의 허용오차를 구한다. Fig.6 은 PSA 허용오차를 구하기 위한 절차이다. Fig.6 에서 보는 바와 같이 우선 각 모델의 부상높이를 구한다. 다음은 각 모델에 다양한 오차를 적용하여 부상높이 감소를 고려한다. 그리고 마지막으로 슬라이더와 디스크 사이의 최소부상높이(3nm)를 적용하여 각 모델에 대한 최종 부상높이를 구한다. 마지막으로

PSA 와 부상높이의 선형관계식을 이용하여 PSA 의 값을 구한다. 이렇게 구한 PSA 가 각 모델의 PSA 허용오차가 된다. Table 6 은 열 보조 자기기록용 슬라이더의 부상높이와 다양한 오차에 대한 값들과 최종의 부상높이 및 PSA 허용오차를 보여준다. 여기서 IFH(initial FH)는 다양한 오차 및 최소부상높이를 고려하지 않았을 때의 부상높이, AM(assembling and manufacturing error)은 조립 및 제작오차, FH(FH tolerance error)은 부상높이의 허용오차, Z(Z-height error)는 Z 방향 높이의 오차, DW(3σ of disk waviness)는 디스크의 표면굴곡 오차, GA(glide avalanche)는 최소부상높이, FFH(final FH)는 다양한 오차와 최소부상높이를 고려한 최종 부상높이 그리고 마지막으로 PSAT(PSA tolerance) 는 PSA 허용오차이다. Fig.7 은 각 모델에 대한 PSA 허용오차를 보여준다. Fig.7 에서 보는 바와 같이 강성이 증가할수록 PSA 허용오차가 감소하는 것을 볼 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이 강성이 증가하면 피치토크가 증가하게 되고, 피치토크가 증가하게 되면 슬라이더의 부상높이를 감소시키기 때문이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 열 보조 자기기록용 서스펜션의 PSA 에 대한 허용오차를 연구하였다. 우선 열 보조 자기기록용 서스펜션을 광섬유와 특별히 제작된 프리즘을 이용하여 구성하였다. 이와 같은 시스템을 선택하고 해석하게 된 이유는 현재 사용하고 있는 시스템 및 실험 장비를 그대로 사용하면서 조금의 변형으로 열 보조 자기기록용 서스펜션을 제작할 수 있다는 것이다. 하지만 광섬유를 사용하면서 일반용 서스펜션과는 다르게 수직 및 피치강성이 크게 변하는 현상이 발생하게 된다. 또한 일반용 서스펜션을 기준으로 열 보조 자기기록용 서스펜션을 모델별로 구성하여 비교하였다. 광섬유의 고정위치가 슬라이더 쪽으로 갈수록 수직 및 피치강성이 증가하였다. 실제 열 보조 자기기록용 서스펜션을 제작할 시에 발생할 수 있는 다양한 오차들을 고려하였다. 예를 들어, 프리즘과 슬라이더의 부착 그리고 프리즘과 플렉서의 부착에서 발생할 수 있는 조립 및 제작오차, 실제 슬라이더의

부상높이 측정에 의한 오차, 프리즘의 높이를 보상하기 위한 Z 방향 높이 측정오차, 디스크의 표면굴곡에 대한 고려 그리고 최소부상높이 등을 모두 고려하여 열 보조 자기기록용 슬라이더의 최종부상높이의 범위를 고려하였다. 이러한 절차를 통하여 각 모델에 대한 PSA 허용오차를 보면 Model A 의 PSA 의 허용오차는 약 12.68°, Model B 는 약 7.76° 그리고 Model C 는 약 5.35° 이다. 따라서 강성이 클수록 PSA 허용오차가 작아지는 것을 볼 수 있다. 따라서 광섬유를 이용한 열 보조 자기기록용 서스펜션을 제작할 시에는 슬라이더와 먼 곳에 고정위치를 잡는 것이 보다 많은 PSA 를 확보할 수 있으며, 제작 및 조립 시에 보다 쉽게 시스템을 구현할 수 있을 것이다. 차후에는 본 연구에서 해석을 수행한 모델에 대하여 실험적으로 본 연구를 검증할 것이다. 또한 본 연구에서 고려한 오차뿐 아니라 보다 더 많은 것들을 고려하여 해석을 수행할 것이다.

## 후 기

본 연구는 연세대학교 정보저장기기연구센터의 지원과 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2008-0060616)

## 참고문헌

- [1] L. Pan and D. B. Bogy, 2009, "Heat-assisted magnetic recording," *Nature Photonics*, Vol.3, pp. 189-190.
- [2] M. H. Kryder, E. C. Gage, T. W. McDaniel, W. A. Challener, R. E. Rottmayer, G. Ju, Y.-T. Hsia, and M. Fatih Erden, 2008, "Heat Assisted Magnetic Recording," *Proceedings of the IEEE*, Vol.96, No.11, pp. 1810-1835.
- [3] R. E. Rottmayer, S. Batra, D. Buechel, W. A. Challener, J. Hohlfeld, Y. Kubota, L. Li, B. Lu, C. Mihalcea, K. Mountfield, K. Pelhos, C. Peng, T. Rausch, M. A. Seigler, D. Weller, and X. M. Yang, 2006, "Heat-Assisted Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.42, No.10, pp. 2417-2421.
- [4] M. A. Seigler, W. A. Challener, E. Gage, N. Gokemeijer, G. Ju, B. Lu, K. Pelhos, C. Peng, R. E. Rottmayer, X. Yang, H. Zhou, and T. Rausch, 2008, "Integrated Heat Assisted Magnetic Recording Head: Design and Recording Demonstration," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.44, No.1, pp. 119-124.
- [5] T. W. McDaniel, W. A. Challener, and K. Sendur, 2003, "Issues in Heat-Assisted Perpendicular Recording," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.39, No.4, pp. 1972-1979.
- [6] K. Matsumoto, A. Inomata and S. Hasegawa, 2006, "Thermally Assisted Magnetic Recording," *Fujitsu Sci. Tech. J.*, 42, 1, pp.158-167.
- [7] S. R. Cumpson, P. Hidding, and R. Coehoorn, 2000, "A Hybrid Recording Method Using Thermally Assisted Writing and Flux Sensitive Detection," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.36, No.5, pp. 2271-2275.
- [8] W. A. Challener, T. W. Mcdaniel, C. D. Mihalcea, K. R. Mountfield, K. Pelhos and I. K. Sendur, 2003, "Light Delivery Techniques for Heat-Assisted Magnetic Recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.42, pp. 981-988.
- [9] Zhu, H and Bogy D.B., 2007, "Effects of Pitch Static Attitude and Roll Static Attitude on the Steady Performance of Air Bearing Sliders", *Journal of Tribology*, Vol.129, pp.689-694.
- [10] M. Honchi, H. Kohira and M. Matsumoto, 2003, "Numerical simulation of slider dynamics during slider-disk contact", *Journal of Tribology*, pp.235-240.