

# 열안정성을 고려한 초소형 정보저장기기용 액추에이터 구조설계

## Structural design of small form factor swing arm type actuators with thermal stability

박철\*, 유정훈†, 박노철\*, 박영필\*, 島野 健\*\*, 中村滋男\*\*\*  
Chul Park\*, Jeonghoon Yoo†, No-Cheol Park\*, Young-Pil Park\*,  
Takeshi Shimano\*\* and Shigeo Nakamura\*\*\*

### Abstract

The present state of the design of swing arm actuators for optical disc drives is to obtain the high efficient dynamic characteristics within a very compact volume. As a necessary consequence, the need of the small form factor (SFF) storage device has been arisen as major interests in the information storage technology. In this paper, we suggest the miniaturized swing arm type actuator that has high efficient dynamic characteristics for SFF optical disk drive (ODD). For the operating mechanism, it uses a tracking electromagnetic (EM) circuit for a focusing motion together. Moreover, due to the size constraint, the thermal stability of optical head is important. Therefore, the actuator is designed to emit the heat, which is generated by optical pick-up, along the actuator body easily. Initial model is designed based on the topology optimization method considering the thermal conductivity. Then, the structural parts of the actuator are modified to maintain the high sensitivity and to have wide control bandwidth by the design of experiments method (DOE) and new concept of decreasing mass and inertia. Finally, a swing arm type actuator for SFF ODD is suggested and its dynamic characteristics are verified.

**Key Words:** Swing arm type Actuator, Small form factor, Thermal stability, Topology Optimization, Design of Experiments

### 1. 서 론

정보화 사회의 도래로 엄청난 양의 정보가 저장, 이동되고 있다. 정보통신, 멀티미디어의 발달로 많은 양의 데이터가 신속, 정확하게 전달되어야 하며, 정보의 보관 및 저장에 따른 정보저장기기의 수요가 크게 증가되고 있다. 기존의 PC나 대용량 자기 기록 장치뿐만 아니라, 정보, 통신, 가전기기를 융합하는 디지털 컨버전스 시대를 맞아, 모바일 정보저장 장치가 크게 요구되고 있다. 이러한 이동형 정보기기는 단순 통신뿐만 아니라

정보처리, 엔터테인먼트 등 다양한 기능을 필요로 한다. 특히 대량의 고급 정보를 검색, 처리 및 활용하기 위해서는 대용량의 저가격 모바일 정보저장 장치를 요구하고 있는 시점에서 현재의 주류를 이루는 메모리에 대한 대체로써 다양한 형태의 모바일 저장장치가 등장할 것으로 기대되고 있다. 따라서 현재의 정보저장기기의 추세를 휴대용, 초소형, 고밀도화, 경량화 등으로 정의할 수 있을 것이다.

이러한 관점에서 가장 대중적인 광정보저장 장치는 미디어의 착탈성이라는 이점을 활용하면서, 소형화를 지향하고 있다. 소형화에 따라서 제어에 필요한 동특성을 확보하는 것, 제한된 구조와 힘을 바탕으로 원하는 성능을 얻어내는 것이 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 또한 광정보저장 장치의 기록 재생 메카니즘의 기본이 되는 픽업의 레이저 다이오드(Laser Diode, LD)의 경우, 필수적인 요소이지만 시스템 전체에 열원으로 작용하여 픽업의 오작동을 유발하는 요인이 된다. 따라서 열적 안정성을 확보하는 것 또한 소형화 추세에

† 연세대학교 정보저장기기 연구센터,  
E-mail : yoojh@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-2859

\* 연세대학교 정보저장기기 연구센터  
\*\* Optical Drive Technology Research Unit,  
Storage Technology Research Center,  
Hitachi Ltd., Japan

\*\*\* Mechanical Engineering Research Laboratory  
Hitachi, Japan  
논문접수일 (2006년 6월7일)

있어 해결해야 할 문제점으로 예상된다. 기존의 연구경향으로는 소형화라는 제한 조건아래서 안정한 제어를 위한 비틀림 모드의 고유 주파수에 초점을 맞추는 것과 같은 동특성에 주안을 둔 연구들이 주를 이루었으며, 열문제의 경우, 안정성 보다는 픽업의 발열의 의한 열응력 및 열 변형 문제 또는 동특성에 대한 고려 없이 가정된 열대류 계수를 이용한 픽업의 안정성 확보에 대한 연구들이 이루어졌다[1]. 본 연구에서는 주어진 DC 민감도를 만족하면서, 비틀림 모드의 고유 주파수를 최대화 하고, LD에서 발열된 열이 서스펜션을 통하여 잘 빠져나가서, 궁극적으로 열적 안정성을 확보하는, 열특성과 동특성을 동시에 만족하는 액추에이터 구조를 제안하고자 한다. 이를 위하여 순차적 최적화 방법을 이용하여 최적화된 모델을 제시하고자 한다. 각각의 수치해석을 위한 상용 패키지로 동특성 해석에는 ANSYS 10.0을, 열해석은 Fluent 6.2.16을 사용하였다.

## 2. 설계 요구 사항

본 논문에서 달성하고자 하는 모델의 동특성과 열 안정성은 Table 1과 같다. 동특성의 경우, 시스템의 제어에 있어서 가장 중요한 트래킹(tracking) 방향에 있어서의 비틀림 모드의 고유 주파수를 10kHz 이상, DC민감도 0.19mm/V이상으로 만족하는 것을 요구한다. 그 외의 동특성은 상정한 모델에서는 디자인 요구사항을 모두 만족하는 것으로 나타났으므로 동특성을 위한 설계에서는 위의 두 조건을 만족시키는 디자인을 중점적으로 구현하고자 하였다. 열안정성을 위해서는 픽업의 최고 온도가 70℃ 이상이 되면 기능이 정지되므로, 픽업의 발열부 최고 온도를 70℃이하를 유지하는 제한조건이 요구된다.

Table 1 Design Specification

| Item                    | Unit | Specification     |       |
|-------------------------|------|-------------------|-------|
| DC Sensitivity          | mm/V | Focusing at 5Hz   | >0.19 |
|                         |      | Tracking at 25Hz  | >1.2  |
| AC Sensitivity          | μm/V | Focusing at 200Hz | >50   |
|                         |      | Tracking at 200Hz | >20   |
| 2nd Resonance Frequency | kHz  | Focusing          | >5.3  |
|                         |      | Tracking          | >10   |
| Maximum Pick up Temp.   | ℃    | at Laser Diode    | <70   |

## 3. 초기 설계

### 3.1 Proposal and Behavior of L-shaped model

초기단계에서는 PC-II 카드 사이즈에 맞추어서 액추에이터 디자인을 수행하였다. 액추에이터의 서스펜션은 Fig. 1에서와 같이 질량-강성비를 고려하여, 0.04mm 위 철판, 1mm 알루미늄, 0.04mm 아래철판의 세 개의 금속판을 접착시키는 형태를 가지고 있으며, 힌지(hinge)를 중심으로 트래킹 코일이 있는 뒷부분과 포커싱코일과 픽업이 있는 앞부분으로 나누어진다. 그러나 CF-II 카드 사이즈로 규격이 변경됨에 따라 기존의 디자인은 Fig.1과 같이 포커싱 자기부와 스피들 모터 사이에 간섭효과가 발생하였다. 이를 고려하여 Fig.2에서와 같이 L자 형으로 힌지 앞부분이 꺾여, 액추에이터 전체 길이를 줄이는 형태로 디자인을 변경하였다.

본 디자인의 경우, 픽업의 위치에 따라 동특성이 변화하게 된다. 서스펜션의 무게 중심과 픽업의 무게 중심을 맞춘 모델의 경우 Fig. 3(a)와 같이 9854Hz의 비틀림 모드의 고유 주파수와 0.538mm/V의 DC 민감도를 가진다. 픽업의 위치를 이 모델을 기준으로 하여 상하로 조정할 경우 DC 민감도에는 변화가 없었지만, 주파수의 저하가 발생하므로, Fig. 3(b)와 같이 질량 균형을 맞춘 모델을 초기 모델로 선정하였다.

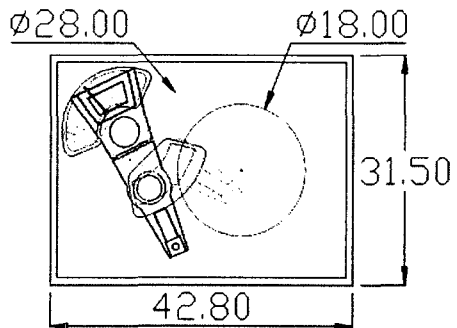


Fig. 1 Interference between focusing magnet and spindle motor in the CF-II card size system

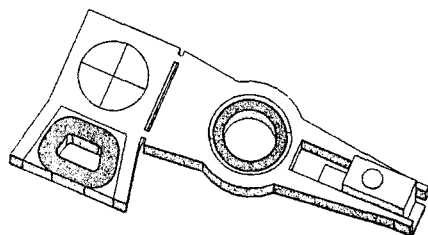


Fig. 2 New L-shaped model with pick-up

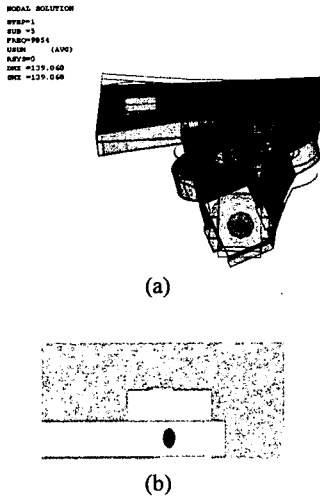


Fig. 3 Pick-up location and its torsional mode  
(a) torsional frequency and its mode shape  
(b) pick-up location

3.2 DOE for dynamic characteristics improvement

초기 모델의 동특성 향상을 위하여 6변수 3수준의 L27 직교배열표(orthogonal array)를 이용한 실험계획법을 적용하였다. 설계변수로는 위 철판의 두께(힌지의 두께), 알루미늄 판의 두께, 아래 철판의 두께, 힌지의 너비, 무게를 최소화하며 힌지의 두께를 늘리기 위한 보강재를 선정하였다 (Fig. 4). 각 변수의 수준과 직교배열표는 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 실험계획법 실시 결과 최적 모델은 0.05mm의 힌지 너비, 힌지 길이 0.3 mm, 힌지 두께(위 철판 두께) 0.08mm, 알루미늄 판 두께 1.2mm, 보강재 0.08mm, 아래 철판 두께 0.04 mm를 가진다. 최적화된 모델의 고유주파수는 Fig.5에 나타낸 바와 같이 11085Hz이며 DC 민감도는 0.048mm/V로 요구 수준의 26%에 불과하다. 설계 과정에서 보강재의 적용은 접착제를 이용하여 힌지의 두께에만 영향을 주는 형태로 고려되었지만, 실제 시제품을 만들 경우 접착이 용이하지

Table 2 Levels of design variables

| Level | Width | Length | Thick  | Al    | Re     | down   |
|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 1     | 0.5mm | 0.3mm  | 0.04mm | 1mm   | NO     | 0.04mm |
| 2     | 0.3mm | 0.4mm  | 0.06mm | 0.8mm | 0.04mm | 0.02mm |
| 3     | 0.7mm | 0.5mm  | 0.08mm | 1.2mm | 0.08mm | 0.08mm |

Table 3 Orthogonal array for DOE of initial model

| Exp | Width | Length | Thickness (Hinge) | Thickness (Al) | Reinforce | Thickness (down) |
|-----|-------|--------|-------------------|----------------|-----------|------------------|
| 1   | 1     | 1      | 1                 | 1              | 1         | 1                |
| 2   | 1     | 1      | 1                 | 1              | 2         | 2                |
| 3   | 1     | 1      | 1                 | 1              | 3         | 3                |
| 4   | 1     | 2      | 2                 | 2              | 1         | 1                |
| 5   | 1     | 2      | 2                 | 2              | 2         | 2                |
| 6   | 1     | 2      | 2                 | 2              | 3         | 3                |
| 7   | 1     | 3      | 3                 | 3              | 1         | 1                |
| 8   | 1     | 3      | 3                 | 3              | 2         | 2                |
| 9   | 1     | 3      | 3                 | 3              | 3         | 3                |
| 10  | 2     | 1      | 2                 | 3              | 1         | 2                |
| 11  | 2     | 1      | 2                 | 3              | 2         | 3                |
| 12  | 2     | 1      | 2                 | 3              | 3         | 1                |
| 13  | 2     | 2      | 3                 | 1              | 1         | 2                |
| 14  | 2     | 2      | 3                 | 1              | 2         | 3                |
| 15  | 2     | 2      | 3                 | 1              | 3         | 1                |
| 16  | 2     | 3      | 1                 | 2              | 1         | 2                |
| 17  | 2     | 3      | 1                 | 2              | 2         | 3                |
| 18  | 2     | 3      | 1                 | 2              | 3         | 1                |
| 19  | 3     | 1      | 3                 | 2              | 1         | 3                |
| 20  | 3     | 1      | 3                 | 2              | 2         | 1                |
| 21  | 3     | 1      | 3                 | 2              | 3         | 2                |
| 22  | 3     | 2      | 1                 | 3              | 1         | 3                |
| 23  | 3     | 2      | 1                 | 3              | 2         | 1                |
| 24  | 3     | 2      | 1                 | 3              | 3         | 2                |
| 25  | 3     | 3      | 2                 | 1              | 1         | 3                |
| 26  | 3     | 3      | 2                 | 1              | 2         | 1                |
| 27  | 3     | 3      | 2                 | 1              | 3         | 2                |

않으므로 적용 모델에 있어서는 보강재의 적용을 고려하지 않았다. 이 경우의 주파수는 10543Hz로서 최적화모델에 비하여 540Hz정도의 주파수 저하를 가져왔으며, DC 민감도는 0.048mm/V를 유지하였다. 고유주파수와 DC 민감도는 서로 trade-off 관계를 가지며, DC 민감도의 손실을 감안하고 고유주파수가 극대화가 이루어졌으므로 이 최적화 모델을 이용하여 열해석을 수행하였다.

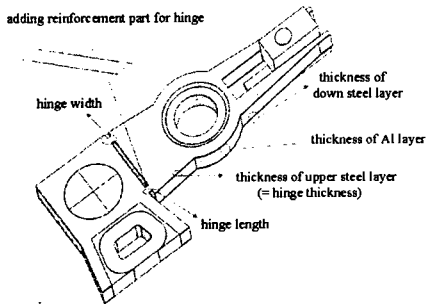


Fig. 4 Design variables selected for DOE

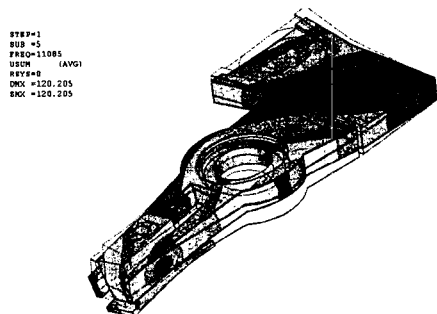


Fig. 5 Torsional frequency and its mode shape of the optimal model

### 3.3 Thermal Analyses

본 논문에서는 유동을 고려한 전체 시스템을 해석하지 않고, 주어진 설계 내에서 구조적인 열 해석을 수행하였다. 즉, 일정 작동 온도 하에서 시스템 전체에 자연대류가 일어나며 LD에서 계속하여 일정한 열량을 발열하는 경계조건을 가지는 Quasi-static 해석을 수행하였다. 실제 시스템이 작아질 경우에는 그 내부의 정확한 유동이나 정확한 열대류 계수를 측정하기가 매우 힘들기 때문에, 본 논문에서는 가정할 수 있는 가장 가혹 조건으로 해석과 설계를 수행하였다.

대류조건으로는 자연대류를 설정하였다. 실제 시스템은 강제대류가 발생하므로, 자연대류의 경우보다 열대류 계수(convection coefficient)가 크다. 자연대류의 경우 열대류 계수는 3~25W/m<sup>2</sup>K이고 강제대류는 10~200W/m<sup>2</sup>K이다. 해석 온도로는 27°C로 가정하였다. 픽업과 몸체를 제외한 접촉부분과 베어링과 같이 자세한 부분은 해석모델에서 제외하였고, 픽업의 최대 발열량인 231mW를 이용하였다. 사용한 물성치는 Table 4와 같다. 해석결과 픽업의 온도는 371.2K(98.2°C)로 제한조건보다 28°C 이상 높았다(Fig. 6). 이는 가혹조건하에서 이루어진 해석으로서, 강제대류 하에서 온도는 하락할 것으로 추측되었으며, 실제 제작 모델에 대해서 강제 대류 상태에서 픽업의 작동상태를 관찰하는 실험(Fig. 7)을 통하여 정상 작동됨을 확인하였다.

해석을 위한 열대류 계수의 선정을 위해 균질한 재료(철, 알루미늄)로 이루어진 모델에 대하여 열대류 계수를 변화하면서 온도를 관찰하는 해석을 수행하였으며, 해석결과는 Fig. 8과 같이 열대류계수와 최고 온도는 대략적인 선형관계가 있음을 확인할 수 있으며, 이를 고려하여 허용 온도 70°C를 넘지 않도록 해석에 필요한 적절한 열대류 계수로 60W/m<sup>2</sup>K를 유추하였다.

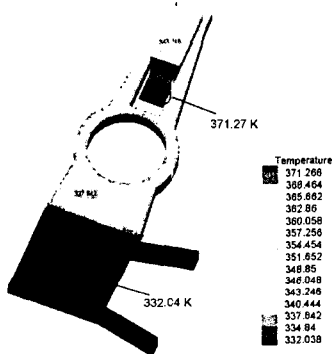


Fig. 6 Thermal analysis result of optimized model

Table 4 Material properties for thermal analysis

| Material | Density (Kg/m <sup>3</sup> ) | Specific Heat (J/kg·K) | Thermal conductivity(W/m <sup>2</sup> K) |
|----------|------------------------------|------------------------|--|
| Si       | 2330                         | 712                    | 148                                      |
| Glass    | 2640                         | 800                    | 1.09                                     |
| Steel    | 8030                         | 502.4                  | 16.27                                    |
| Al       | 2719                         | 871                    | 202.4                                    |

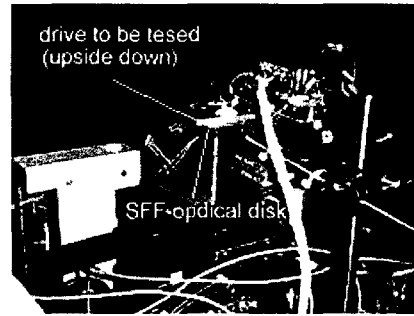


Fig. 7 Experiment equipments for forced convection

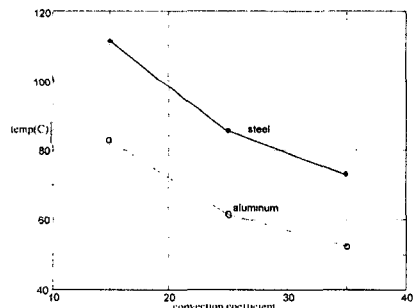


Fig. 8 Relationship between maximum temperature and convection coefficients

## 4. 새로운 개념 설계

### 4.1 New concept with topology optimization

SFF 액추에이터의 효율적인 열전달 능력을 발휘하기 위하여 위상최적화법을 이용하여 모델의 형상을 변경한 설계를 제안하였다. Bendsoe 와 Sigmund에 의하여 Matlab을 이용한 열전도 문제 위상최적화법이 제시되었으며[2], 본 논문에서는 이를 응용하여 액추에이터의 최적화된 형상을 구하고자 하였다.

Fig. 9는 액추에이터 몸체의 단순화 된 모델인 외팔보에 열원이 존재하는 경우에 대한 위상최적화의 결과이며, 이를 이용하여 설계안은 Fig. 10과 같이 하나의 픽업 지지대 형상을 가진 형태로 바뀌었다. 새로운 모델에 대하여, 3.3절과 같은 가혹조건하에서 열 해석을 수행한 결과, Fig. 11과 같이 최고온도는 368K(95°C)로 초기 모델보다 3°C 낮아졌다. Fig. 11

에 나타난 열해석에서는 철과 알루미늄 각 층이 각각 0.04mm, 1.0mm의 두께를 가지는 모델이 사용되었다. 픽업의 최고 온도는 열대류 면적에 영향을 받으므로 동특성 향상을 위한 최적화를 실시하여 각 층의 두께가 증가할 경우, 온도는 더 떨어질 것으로 예상된다.

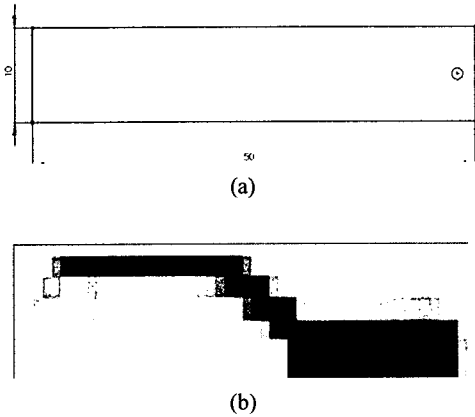


Fig. 9 Simple actuator model for applying topology optimization to heat conduction problem. (a) the simplified actuator; (b) the topology optimization result

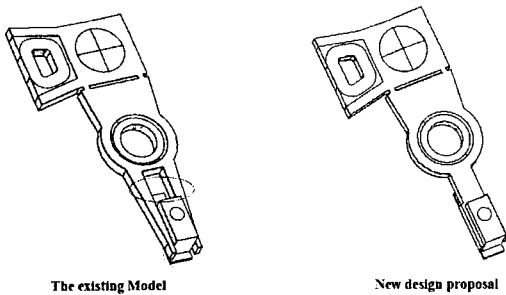


Fig. 10 New concept design using topology optimization

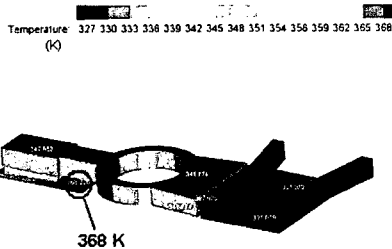


Fig. 11 Thermal analysis of new concept design

#### 4.2 Optimization for dynamic characteristics

새롭게 제안된 모델의 경우, 동특성은 하나의 지지대를 사용함으로써 기존보다 무게가 수십 mg 줄어들고, 관성이 액추에이터의 중앙으로 모아지므로, Fig. 12와 같이 비틀림 모드의 고유진동수와 DC감도가 각각 10616Hz, 0.607mm/V로 향상되었다. 새롭게 제안된 모델은 좋은 열 안정성을 확보하는 동시에 동특성이 향상되는 장점을 가지고 있다.

향상된 동특성을 얻기 위하여 Min 등[3]에 의해 제안된 I-빔 형상의 서스펜션 구조를 힌지 앞부분의 구조에 적용하였다. I-빔 형상을 채용할 경우, 트랙킹 방향의 고유주파수가 상승한다. Fig.13은 힌지 앞부분에 I-빔 형상을 적용한 설계이다. 순차적으로 0.3mm에서 0.5mm까지 단을 주는 형태로 해석한 결과, 0.3mm의 단을 준 경우 고유주파수가 10940Hz로 Fig. 12의 경우 보다 330Hz의 증가하였고, 0.5mm의 단을 준 경우 1100Hz로 400 Hz가 증가하였으나 트랙킹 모드의 고유진동수보다 낮은 고유진동수를 가지는 혼합 모드가 발생하는 모드 변환이 일어난다.

I-빔의 형태로 설계된 경우, 0.6mm/V이상의 DC 민감도를 가지게 된다. 동작의 제어에서는 트랙킹 방향으로 영향을 주는 고유주파수가 높을수록 gain margin이 커져서 바람직하므로 0.3mm의 단을 준 모델을 이용하여 실험계획법을 실시하여 동특성을 높이고자 하였다. 3.2절의 실험계획법을 바탕으로 힌지의 너비, 길이, 보강재의 경향성이 파악되었으므로 복층구조의 두께만을 설계변수로 설정하였다. 각 설계변수들 간의 교호작용을 확인하기 위하여 3변수 3수준의 L27 full-factorial 직교배열표를 이용하였다. 설계변수와 수준은 Table 5와 같다. 실험계획법의 실시 결과, 알루미늄 판과 아래 철판에서 교호작용이 발견되었다. 위 철판 두께가 0.08mm, 알루미늄판 두께가 1mm인 최적 모델의 경우, 11370Hz, 0.0869mm/V의 동특성이 확인되었다.

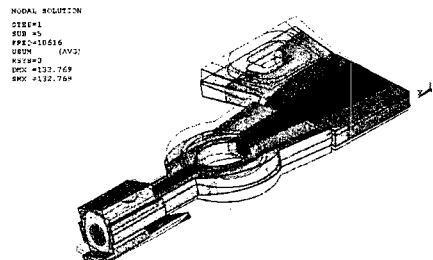


Fig. 12 Torsional frequency of new concept design

이 경우에 DC 민감도가 요구수준을 만족하지 않으므로, 모드 변환이 일어나지 않게 단의 변화를 주고, 위 철판 두께를 변화시키면서 동특성을 관찰한 결과, 0.4mm 단의 깊이와 위 철판 두께가 0.06mm인 경우에 11318Hz, 0.192mm/V의 동특성이 확인되었다(Fig. 14).

4.3 Verification of optimal model

최종모델인 Fig. 14의 모델, 즉 0.06mm와 0.04mm의 위-아래 철판 두께, 1mm 알루미늄 판 두께, 그리고 0.4mm의 단을 준 모델에 대하여 강제 대류하에서 열해석을 수행하여보았다. 열해석의 조건은 열대류 계수(60W/m<sup>2</sup>K)를 제외하고, 3.3절의 조건과 동일하다. 열해석 수행결과 Fig. 15에 나타난 바와 같이 최고온도가 339K(66.3℃)로 요구조건을 만족하였다.

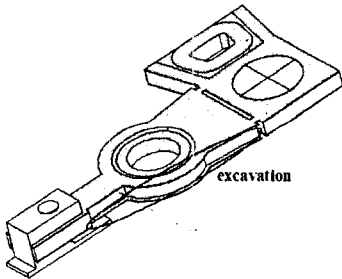


Fig. 13 I-beam shaped design

Table 5 Design variables and levels of full factorial experiment

| Level | Up steel | Al    | Down steel |
|-------|----------|-------|------------|
| 1     | 0.04mm   | 0.9mm | 0.3mm      |
| 2     | 0.06mm   | 1mm   | 0.4mm      |
| 3     | 0.08mm   | 1.1mm | 0.5mm      |

MODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB=5  
 FREQ=11318  
 DISP. (AMP)  
 REVE=3  
 MAX=0.393 1E7  
 MIN=0.224 1E7

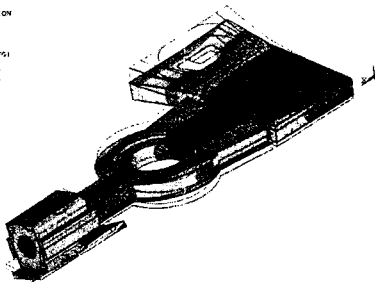


Fig. 14 Torsional frequency of modified optimal level model

Temperature: 300 310 312 314 317 319 321 323 326 328 330 332 335 337 339

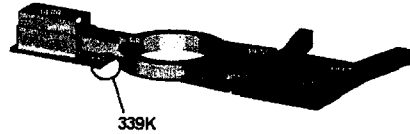


Fig. 15 Thermal analysis of the final optimal level model under forced convection

5. 결론

본 논문에서는 트랙킹 방향의 고유주파수를 최대화하면서, DC민감도의 확보와 열 안정성이 보장되는 새로운 개념의 스윙암 타입 액추에이터의 설계를 제안하였다. 크기 제한이 작용하는 SFF ODD의 경우, 크기 제약하에서 원하는 동특성 및 열적 안정성을 갖추는 것이 중요한 문제이다. 액추에이터 전체 질량을 줄이면서 원하는 강성을 얻기 위하여 복층 구조를, 요구된 설계조건을 만족시키기 위하여 열전도를 고려한 위상최적화를 이용하여 형상을 제안하였으며, 실험계획법을 수행함으로써 모델에 대한 자세한 설계 치수를 얻을 수 있었다.

참고문헌

[1] J. Lee, H. Kim, S. Kang, J. Sohn, M. Lee, 2006, "Micro thermal design of swing-arm type small form factor optical pick-up system", Trans on the SISS, Vol.2, No.1, pp.21-25.  
 [2] M. P. Bendsøe and O. Sigmund, 2002, Topology optimization Theory, Methods and Applications, Springer, Germany.  
 [3] S. Min and J. Yoo, 2006, "Design of Micro-actuators using Compliant Mechanism", Key Engineering Materials Journal, Vol.306-308, pp.1169-1174.