

실험계획법을 이용한 초소형 스윙암 액추에이터의 설계

Design of a Small Form Factor Swing Arm type Actuator using Design of Experiments

박 철* · 유 정 훈** · 박 노 철***
Park, Chul · Yoo, Jeong-Hoon · Park, No-Ceol

ABSTRACT

The state of the art for the design of swing arm actuators for optical disc drives is to obtain the high efficient dynamic characteristics, especially for the small size for the mobile information devices. It is affected by the need of consumers who wants the portable digital storage devices maintaining highly functional and removable characteristics of the optical disk drive (ODD). As a necessary consequence, the need of the small form factor (SFF) storage device has been considered as an important part in the information storage technology. In this paper, we suggest a new conceptual miniaturized swing arm type actuator that has high efficient dynamic characteristics as well as satisfies the sensitivity and the heat emission requirements for the SFF-ODD. It also uses a tracking electromagnetic (EM) circuit for a focusing motion. Due to the size constraint, the thermal problem of optical head arises: therefore, we design an efficiently heat emitted structure for the actuator.

keywords: *Small Form Factor(SFF) Optical disk drive(ODD), Swing arm type Actuator, Design of Experiment(DOE)*

1. 서론

정보화 사회의 도래와 함께 엄청난 양의 정보가 저장 및 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 장치 뿐만 아니라, 정보, 통신, 가전기기를 융합하는 디지털 컨버전스 시대를 맞아, 휴대용 모바일 정보저장 장치가 크게 요구되고 있다. 이러한 이동형 정보기기는 단순한 통신뿐만 아니라, 정보처리, 엔터테인먼트 등의 다양한 기능을 필요로 하고 있다. 특히 대량의 고급 정보를 검색, 처리 및 활용하기 위해서는 대용량의 저가형 모바일 정보저장 장치를 요구하고 있는 시점에서 현재의 주류를 이루는 메모리에 대한 대체로써 다양한 형태의 모바일 저장장치가 등장할 것으로 기대되어지고 있다. 따라서 현재의 정보저장기기의 추세를 휴대용, 초소형, 고밀도화, 경량화 등으로 정의할 수 있을 것이다.

* 연세대학교 대학원 기계공학과 석사과정

** 정희원 · 연세대학교 기계공학과 교수 E-mail: yoojh@yonsei.ac.kr

*** 연세대학교 대학원 정보저장공학 협동과정 교수

이러한 관점에서 가장 대중적인 광정보저장장치는 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 요소이기는 하지만, 시스템 전체에 열원으로 작용하여서 픽업의 오작동을 유발하는 요인이 된다. 따라서 열적 안정성을 확보하는 것 또한 소형화의 추세에 있어서 해결해야 할 문제점으로 예상된다.

2. SFF ODD Actuator의 동특성을 고려한 모델 제안

초소형 광정보저장장치의 액추에이터에 있어서 가장 중요한 동특성은 포커싱 메카니즘과 트랙킹 메카니즘에 영향을 미치는 고유주파수를 높여 충분한 gain margin을 확보하는데 있으며, electromagnetic (EM) 회로를 이용하여 산출된 구동력 하에서의 충분한 DC 민감도의 확보가 요구된다. 본 논문에서 제안하는 액추에이터의 경우, 트랙킹 방향으로 영향을 주는 비틀림 모드의 고유주파수를 10kHz 이상, DC 민감도의 경우 0.19mm/V 이상을 설계의 목표로 하였다. DC 민감도를 구하기 위해서 사용되는 구동력은 그림 1에 나타난 자속에 의해 자기부 회로에서 발생하는 힘 $0.025486N/V$ 를 사용하였다.

최초로 적용된 모델은 그림 2에서 보는 바와 같이 액추에이터 자체의 무게 대 강성비를 고려하여, 액추에이터 자체 무게를 최소화 하면서 원하는 강성을 얻기 위한 철, 알루미늄, 철의 3개의 복층구조를 가지고 있다. 위 철판의 경우 0.04mm, 가운데 알루미늄 판의 경우 1mm, 아랫부분의 철판의 경우 0.04mm를 가진 형태로 설계하였다. 포커싱 메카니즘에 있어서는 액추에이터 중심부의 슬레노이드와 자기부에서 발생한 힘을 힌지를 이용하여 구동하는 형태이고, 광학부품인 픽업은 복층구조의 선단에 두 개의 지지대를 두고 그 사이에 접착하는 방식을 이용하여 끼워 넣은 형태를 가지고 있다. 그러나 초기 제안된 모델의 경우 개발과정에서 전체 ODD 시스템 크기제한의 문제로 인하여 전체적인 액추에이터의 길이를 감소시킬 필요가 있어 그림 3과 같이 액추에이터의 스펙션이 L자형으로 꺾인 새로운 모델을 제안하였다. L자로 꺾인 모델의 경우 동특성, 특히 전체적인 시스템의 고유주파수에 있어서 현저한 저하가 일어났으며, 모델의 복잡성으로 인하여 동특성에 영향이 있는 인자를 정확하게 추출하는데 어려움이 있다. 이 문제점을 해결하기 위하여 우선, 가용한 설계변수들을 고려하여, 제안된 구조 내에서 트랙킹 방향으로 영향을 주는 고유주파수를 최대화하는 방향으로 실험계획법을 수행하였다.^(1,2)

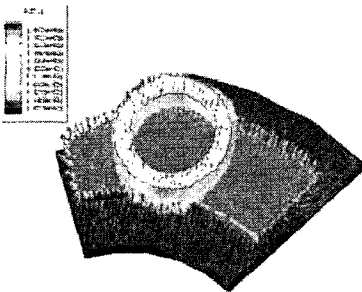


그림 1. EM 회로의 자속 분포

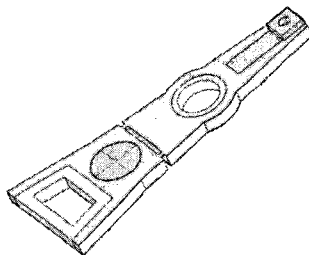


그림 2. 초기 모델

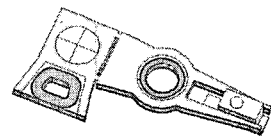


그림 3. 크기 제한을 고려한 개량 모델

고유주파수에 가장 영향을 미칠 것이라고 예상되는 여섯 개의 설계변수를 표 1과 같이 도출하였다. 도출한 설계변수는 위 철판의 두께, 알루미늄판의 두께, 아래 철판의 두께, 힌지의 길이, 힌지의 너비, 그리고 힌지를

보강하기 위한 보강재를 선정하였다. 위 철판의 두께의 경우, 힌지가 위 철판에 포함되므로 위 철판의 두께는 곧 힌지의 두께와 같아진다. 여섯 개의 설계변수는 3수준으로 정하고 표 2와 같은 L27 직교배열표를 바탕으로 실험계획법을 실시하였다.

표1. 첫 번째 실험계획법을 위한 설계변수와 수준

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	0.06mm

표2. 첫 번째 설계안의 직교배열표

Exp	Hinge_w	Hinge_l	Hinge_t	Al	Reinforce	dn_steel
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	3	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

초기 설계안의 경우 8700Hz의 비틀림 모드의 고유 주파수와 0.539mm/V의 DC민감도를 가진다. 실험계획법 실시 결과, 최적 모델은 0.05mm의 힌지 너비, 힌지 길이 0.3mm, 힌지 두께(위 철판 두께) 0.08mm, 알루미늄 판 두께 1.2mm, 보강재 0.08mm, 아래 철판 두께 0.04mm를 얻을 수 있다. 이때 최적화된 고유주파수는 10869Hz이며 DC 민감도는 0.048mm/V로 요구 수준의 26%에 그쳤다. 여기서 주의해야 할 점은 보강재의 적용으로 이 경우 접촉을 이용하여 힌지의 두께에만 영향을 주는 형태로 설계되었지만, 실제 시제품을 만들 경우 접촉이 용이하지 않아서 적용모델에 있어서는 이를 무시하였다. 이 경우의 주파수는 10543Hz로서 최적화모델에 비하여 320Hz정도의 주파수 저하를 가져왔으며, DC민감도에는 거의 영향을 주지 않고 0.048mm/V를 유지하였다. 고유주파수와 DC민감도는 서로 trade-off관계에 있기 때문에, DC 민감도의 손실을 감안하고 고유주파수가 극대화가 이루어졌으므로 이 최적화 모델을 이용하여 열해석을 수행하였다.

3. SFF ODD Actuator의 열해석

상술한 바와 같이 광정보저장기기의 경우 열적 안정성을 가지고 시스템이 구동되는 것이 매우 중요하다. 특히 초소형 광정보저장기기의 경우에는 기존의 광정보저장기기가 가지고 있는 대부분의 열원이 더 작은 크기 안에 집적되어 있는 형태가 되므로, 열에 더욱 민감하게 된다. 픽업의 LD에서 발열되는 열량을 비롯하여, 트랙 코일의 열화 현상, 솔레노이드의 열화 등의 문제점도 있지만, 핵심은 시스템의 열적 안정성에 가장 중요한 열원인 픽업의 열안정성에 있다. 픽업에서 발산되는 열량의 경우, 광정보저장기기의 기록 및 재생의 원리의 기본이 되며, 70℃를 넘어서게 되면, 픽업이 다운되어서 정보저장장치로서의 기능을 수행하지 못하게 된다. 따라서 열적 안정성을 유지하는 것 역시 SFF ODD에 있어서는 매우 중요한 이슈가 된다. 열문제의 경우 주목해야 할 점은 주어진 설계안이 매우 작은 크기이며, 사용되는 재질이 복잡적이고, 가동되는 환경을 정확하게 예측할 수 없으며, 예측하여 적용한 환경에 따라서 큰 차이를 보인다.⁽³⁾

본 논문에서는 열해석을 수행하기 위해서는 상용 프로그램인 Fluent를 사용하였으며, 유동을 고려하여 전체적인 시스템을 해석하기 보다는, 주어진 설계내에서 구조적인 열해석을 수행하였다. 즉, 일정한 작동 온도 하에서 시스템 전체적으로 자연대류가 일어나며 LD에서 계속하여 일정한 열량을 발열하는 경계조건을 가지는 Quasi-static 해석을 수행하였다. 실제적으로 정보저장기기와 같이 시스템이 작아질 경우에는 그 내부의 정확한 공기 유동이나 정확한 열대류 계수를 측정하기가 매우 힘들기 때문에, 본 논문에서는 가정할 수 있는 가장 가혹조건으로 채택하여 해석과 설계를 수행하였다.

열해석은 두 단계로 이루어졌는데, 우선 첫 번째 단계에서는 전체 시스템이 복합재로 이루어졌기 때문에, 열적 안정성의 경향을 파악하기 위하여 픽업을 제외한 서스펜션 자체가 하나의 재질로 이루어졌다는 가정으로 액츄에이터 전체를 해석하였으며, 두 번째 단계에서는 복합재로 모델을 구성하여 열해석을 수행하였다. 두 해석 모두에 있어서는 동일한 가정과 경계조건을 주었으며, 같은 물성치를 사용하였다. 해석을 수행하기 위한 가정으로는 자연대류를 설정하였으며 실제 시스템의 경우에는 강제대류가 발생하므로, 자연대류의 경우보다 열대류계수가 크다. 자연대류의 경우 열대류 계수는 3~25W/m²K이고 강제대류는 10~200W/m²K를 가진다.⁽³⁾ 본 해석에서는 자연대류로 해석환경을 설정하여 그 신뢰성을 높이고자 한다. 픽업과 몸체를 제외한 짐작부분과 베어링과 같이 자세한 부분은 해석모델에서 제외하였고, 픽업의 최대 발열량을 이용하여 열원을 가정하였다. 경계조건 및 물성치는 아래 표 3 및 표 4와 같다.

표3. 열해석의 경계조건

조 건	조건치
작동온도	25℃
열대류계수	25W/m ² K
열원발열량	250mW

표4. 열해석에 사용된 재질의 물성치

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat(J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)
Steel	8300	468	13
Al	2702	903	237
Si	2330	712	148

첫 번째 열해석의 결과는 그림 4와 같다. 알루미늄으로만 이루어진 경우 픽업의 최고 온도는 61.5℃였고, 철만으로 이루어진 경우 85.5℃를 나타내었다. 따라서 복합재의 경우에는 이 두 온도 사이의 결과를 가질 것으로 예측되었다.

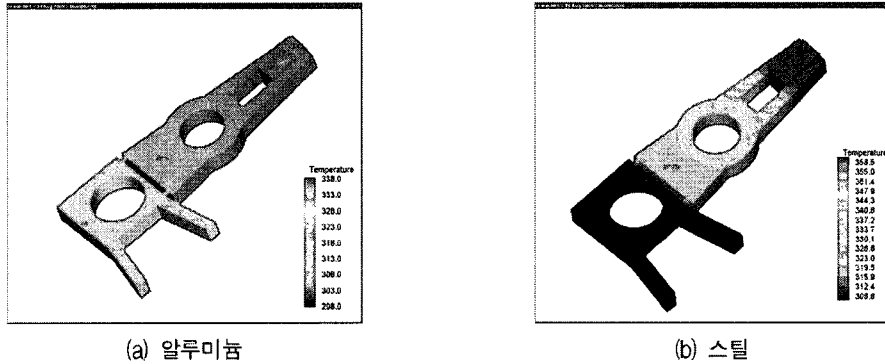


그림 4. 단일 재질 액추에이터모델의 열해석

전술하였다시피, 열해석의 경우에는 주위 온도나 열대류계수의 영향을 많이 받으므로, 이 경향성을 파악하기 위하여 다른 온도 조건 및 다른 열대류 계수에 대하여 해석을 실시하였다. 해석 결과, 픽업의 최대 온도는 주위 온도 및 열대류 계수와 선형적인 관계를 가지고 있어 주위 온도가 낮을수록, 열대류 계수가 높을수록 픽업의 온도는 떨어짐을 확인할 수 있었다.

두 번째 열해석은 복합재로 이루어진 간략화된 모델을 대상으로 실시되었는데, 그림 4에서 보면 힌지를 통해서 열이 전달이 되지만 힌지를 중심으로 앞부분과 뒷부분의 온도 차이가 많이 발생하므로 힌지 앞부분만을 복합재로 구성하여 해석을 수행하였다. 상술한 바와 같이 해석 조건 및 가정은 처음 해석과 동일하게 사용되었다.

그림 5에서 확인할 수 있듯이, 첫 번째 열해석 결과에서 예측하였던 대로 픽업의 최고 온도가 74.3℃인 것을 확인할 수 있었다. 결과상으로는 70℃를 넘어서지만, 대류계수와 주위 온도, 픽업의 발열량을 가혹조건 하에서 수행한 해석이어서 실제 실험상으로는 해석치 이하의 온도를 나타낼 것으로 예상된다.

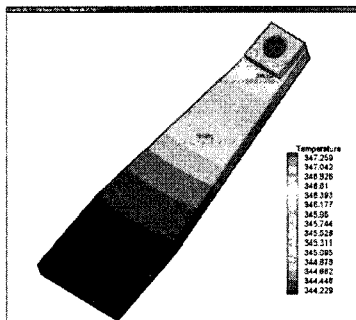


그림 5. 복합재로 이루어진 액추에이터의 열해석

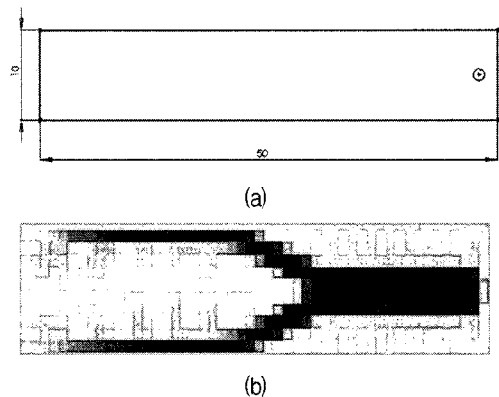


그림 6. 위상최적화 모델 및 그 결과

효율적인 열전달 능력을 발휘하기 위하여 위상최적화 기법을 이용하여 모델의 형상을 설계하였다. Matlab을 이용한 topology optimization을 적용한⁽⁴⁾ 액추에이터 몸체의 단순화 된 모델인 외팔보에 열원이 존재하는 경우에 대한 최적화의 결과는 그림 6과 같다.

그림 6에서와 같이 열전도가 가장 효율적으로 일어나는 모델은 두 개의 지지대를 가진 것 보다는 하나의 지지대를 이용하여 픽업을 받치고 있는 형태라는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 그림 7과 같은 형태의 열적 안정성이 높은 형태의 설계를 제안하였다.

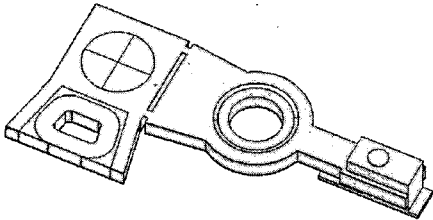


그림 7. 열적 안정성이 높은 형태의 설계안

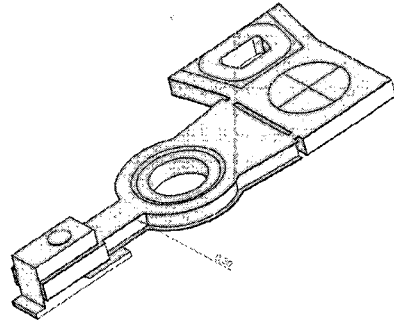


그림 8. I 빔 형태의 액추에이터 설계안

4. 동특성 개선을 위한 실험계획법의 적용

열적 안정성을 고려한 설계안의 경우, 또 다른 장점을 얻을 수 있었다. 하나의 지지대를 사용함으로써 기존 보다 무게가 줄어들고, 관성이 액추에이터의 몸체 중앙으로 모아지게 되고, 이로 인하여 고유진동수가 증가하였다. 그림 7에서 제안된 모델로 동특성 해석을 해 본 결과, 윗 스틸 판(힌지 두께)의 변화 없이 고유주파수가 10616Hz로서 기 제안된 최적화 모델보다 70Hz가 향상되었으며 DC 민감도는 0.607mm/V이었다. 이 모델에 대하여 고유주파수를 높여주기 위하여 그림 8과 같이 I 빔 형태의 구조를 적용하였다. I 빔형태란 힌지 앞부분에 있는 세 개의 복층을 알루미늄 부분에서 조금 파 들어가서 측면에서 보면 마치 I 빔처럼 단이 지어진 형상을 말한다. 이런 형상을 사용할 경우 트래킹 방향의 고유 주파수가 상승하는 것이 확인된 바 있다.^(5,6)

순차적으로 0.3mm에서 0.5mm까지 단을 주는 형태로 고유 주파수를 해석하였다. 0.3mm의 단을 준 경우에는 고유주파수가 10940Hz로 그림 7의 제안된 모델보다 330Hz의 증가를 보였으며, 0.5mm의 단을 준 경우 11kHz로 400 Hz의 증가를 보였으나 모드 변환이 일어남을 확인되었다. I 빔의 형태로 제안된 경우 모두 0.6mm/V이상의 DC 민감도를 가지게 된다.

동작의 제어에서는 트래킹 방향으로 영향을 주는 고유주파수가 높으면 높을수록 gain margin이 크게 되어서 바람직하므로, 0.3mm의 단을 준 모델을 이용하여 두 번째 실험계획법을 실시하여 고유주파수를 높이고자 하였다. 첫 번째 실험계획법을 바탕으로 힌지의 너비와 길이, 보강재는 경향성이 파악되었으므로, 복층구조의 세 층의 두께만을 설계변수로 설정하였다. 각 설계변수들 간의 교호작용을 확인하기 위하여 3변수 3수준의 L27 full-factorial 직교배열표를 이용하였다. 설계변수와 수준은 표 5와 같다.

표 5. 두 번째 실험계획법을 위한 설계변수와 수준

Level	Up steel layer	Al layer	Down steel layer
1	0.04mm	0.9mm	0.03mm
2	0.06mm	1mm	0.04mm
3	0.08mm	1.1mm	0.05mm

실험계획법에 따라 실험을 실시해 본 결과, 알루미늄 판과 아래 철판에서 교호작용이 발견되었다. 또한 아래 철판의 경우, 0.04mm를 유지하는 경우에 가장 높은 고유진동수를 보나타내었으므로 위 스틸 판과 알루미늄 판에 있어서의 최적값을 잉요하여 최적 모델을 도출하였다. 가장 높은 고유주파수를 가지는 경우는 위 철판이 0.08mm, 알루미늄 판이 1mm일 때 11370Hz의 주파수를 가졌지만, DC 민감도에 있어서 0.0869mm/V로 원하는 스펙을 달성할 수 없었다. 이에 비하여 위 철판을 0.06mm, 알루미늄판을 1mm로 둔 경우 11245Hz의 고유주파수와 0.192mm/V의 DC민감도를 가지므로, 30%의 고유주파수 증가와 함께 설계 규격에 합당한 DC 민감도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 트래킹 방향의 고유주파수를 최대화하면서, DC민감도의 확보와 열적 안정성이 보장되는 새로운 개념의 스윙암 타입 액추에이터의 설계를 제안하였다. 크기 제한이 작용하는 SFF ODD의 경우에는 시스템의 크기에 맞추면서 원하는 동특성 및 열적 평형성을 갖추는 것이 중요한 문제이다. 액추에이터의 전체 질량을 줄이면서 원하는 강성을 얻어야하는 조건을 만족하기 위하여 복층 구조를 가진 형상을 제안하고, 요구된 설계 조건을 맞추기 위하여 실험계획법을 수행함으로써 자세한 설계 치수를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 박성현 (2003) 현대 실험계획법, 민영사
- (2) Fowlkes, W. Y and Creveling, C. M. (1995) Engineering Methods for Robust Product Design Using Taguchi Methods in Technology and Product development, Addison Wesley, USA
- (3) 이지나, 강신일 외 3인 (2006) 스윙암 타입 초소형 광 픽업 시스템의 방열설계, 정보저장시스템학회 논문집, Vol 2 No.1, pp.21~25
- (4) Bendsøe, M. P. and Sigmund, O (2002) Topology optimization Theory, Methods and Applications, Springer, Germany.
- (5) Min, S. and Yoo, J., (2006) Design of Micro-actuators using Compliant Mechanism, Key Engineering Materials Journal, Vol. 306-308, pp.1169-1174.
- (6) 이종진 (2005) Design of Micro Acuator using the compliant mechanism, 연세대학교 대학원 석사 학위 논문