

# 근접장 광기록 시스템용 전자기구동 액추에이터의 설계 및 평가

김석중\* · 이용훈\*\* · 이철우\*\* · 서중언\*\*  
(1999년 12월 21일 접수)

## Design and Evaluation of An Electromagnetic Driven Actuator for Near-field Optical Recording System

SeokJung Kim, YongHoon Lee, ChulWoo Lee and JoongEon Seo

**Key Words :** electromagnetic driving(전자기구동), actuator(액추에이터), modal analysis(모달해석), magnetic circuit analysis(자기회로해석), Near-field optical recording(근접장 광기록)

### Abstract

Combination of magnetic recording technology and optical recording technology such as Near Field Optical Recording is watched recently. In order to accomplish this technology, the development of an electromagnetic driven mm-sized mirror shifting laser beam in track direction have to needed. In Near Field Optical Recording System, shifting laser beam in track direction means as fine tracking and means as coarse tracking. Therefore in Near Field Optical Recording, 2-stage actuator is composed of servo controller in reading or recording information on disc layer. In our research, through design and simulation process of driven mm-sized mirror, we arrange systematically design process of driven mm-sized mirror having good frequency transfer characteristics. Design and simulation processes include modal analysis of spring, calculation of magnetic moment according to the number of turns and geometric configuration of coil and magnetic circuit analysis meaning that calculation of magnetic flux density in air gap of magnetic circuit. After that we design and make parts of driven mm-sized mirror, assemble and evaluate our electromagnetic driven mm-sized mirror. We compare design values with actual characteristic values and present solution scheme. Through these processes we performed manufacturing of an electromagnetic driven mm-sized mirror having good frequency-domain characteristics and high sensitivity characteristics.

### 기호설명

- $\frac{dB}{dx}$  : 자기장(magnetic field)의 구배(gradient)
- $m$  : 자기 모멘트(magnetic moment)
- $G$  : 전단 탄성계수(Shear modulus)
- $a$  : 힌지부와 코일 중심부간의 거리
- $\tau_{max}$  : 최대 전단응력(max. shear stress)
- $\phi$  : 비틀림각(torsional angle)
- $\alpha, \beta$  : 직사각형의 가로/세로비에 의해 결정되는 변수

### 1. 서론

새로운 디지털 시대의 도래와 함께 동영상을 포함한 다양한 정보의 대용량, 고속전송은 필수 불가결한 현실로 다가서고 있으며, 이러한 현실에 부합하기 위한 정보저장 장치의 대용량화 및 고속전송 그리고 저가격화 등은 매우 중요한 기술적인 의미를 가지게 된다. 특히 인터넷의 대중화를 계기로 전세계에 퍼져있는 숫자와 문자정보 뿐만 아니라 음성과 화상 정보를 쉽게 접하고 얻을 수 있게 됨에 따라, 대용량 및 고속 전송이 가능한 정보저장 기기에 대한 폭발적인 수요가 발생하고 있는 실정이다. 현재 활발한 기술개발과 시장 출시

\* 회원, 삼성전자(주) 중앙연구소 광메카 Lab  
E-mail : sjkim95@hanmir.com  
TEL : (031)200-3495 FAX : (031)200-3144  
\*\*삼성전자(주) 중앙연구소 광메카 Lab

가 이루어지고 있는 대표적인 정보저장 기기에는 자기기록 매체인 하드디스크 드라이브(HDD)와 CD-ROM, DVD-ROM, HD-DVD 등의 광기록재생 시스템이 있고, 자기기록 매체와 광기록 매체간의 정보저장기기의 시장 주도권을 쥐기 위한 치열한 연구경쟁이 이루어져 향후 3~5년 이내에 100GB/in<sup>2</sup> 수준의 정보 저장기기가 대중화될 수 있을 것으로 예측되고 있다. 그리고 최근에는 자기기록·재생이 가지는 초상자성 한계(superparamagnetic limit)에 의한 고밀도 기록재생의 한계를 극복함과 함께 향후 고밀도의 대용량 저장기기 시장을 주도할 수 있는 가능성이 큰 기기로 기존의 하드디스크 드라이브로 대변되는 자기기록 기술과 DVD-ROM 등으로 대변되는 광기록 기술간의 접목에 의한 근접장 광기록(Near-field optical recording) 방식이 관련 업계의 주목을 받고 있는 실정이다. 근접 광기록 방식은 기존의 하드디스크 드라이브의 구동계를 대부분 채용하면서 자기헤드 대신 광기록재생을 위하여 광부품과 레이저 다이오드를 채택한 구성으로 Fig. 1에 나타내었다. 그런데 기존의 근접광 기록 시스템의 경우에는 주로 레이저 다이오드 등 대부분의 광부품을 별도의 고정된 장소에 설치하며, 레이저로부터 출사된 빔은 광파이버를 통해 헤드의 역할을 수행하는 SIL(Solid Immersion Lens)까지 도달하여 디스크에 근접광 효과에 의한 신호의 기록 또는 재생을 수행하게 된다. 이 경우에 빔의 미세추종은 주로 광파이버를 움직이는 구조로 되어있기 때문에 구동시키기 위한 구조가 매우 복잡하고 큰 추력을 필요로 하게 된다.<sup>(1,2)</sup> 그런데 본 연구와 관련된 근접 광기록 시스템의 경우에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 대부분의 광부품들을 조동 구동기(coarse actuator) 부분인 E-Block에 탑재하고 헤드의 역할은 기존의 SIL 대신에 대물렌즈 기술기 특성이 양호한 SIM(Solid Immersion Mirror)에 의해 이루어지기 때문에 광경로의 변경과 빔의 미세추종이 동시에 가능하도록 하기 위한 목적으로 회전구동이 가능한 소형거울이 반드시 필요하다고 할 수 있다.<sup>(3)</sup> 이 경우에는 광파이버와 관련하여 조립 과정에서의 조정상 어려움이 크게 해소될 수 있으며, 빔의 미세추종을 위한 구동 구조가 매우 간단하게 구성될 수 있을 뿐 아니라 원하는 수준의 추력 발생이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 즉, Fig. 1에서 보는 바와 같이 레이저로부터 출사된 빔이 광경로를 수평방향에서 수직방향으로 변경하도록 하며 디스크의 트랙열을 따라 광기록, 재생을 담당하는 미소 광학렌즈에 입사되는 광을 트랙에

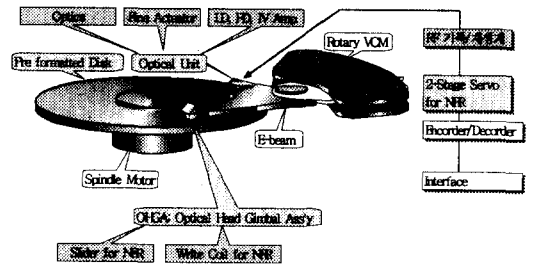


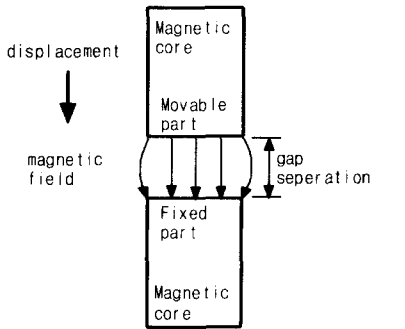
Fig. 1 Near-field optical recording system

수직인 방향으로 이동시켜 디스크에 집속되는 빔의 미세추종(fine tracking)이 가능하도록 회전 구동이 가능한 소형거울이 필요하게 된다. 이러한 소형거울의 설계 및 제작은 현재 광스위치, 홀로그래피 원리를 활용한 정보 저장용 주사용 거울(scanning mirror) 등으로 활발한 연구가 진행중이지만 일반적인 크기가 매우 작아 주로 MEMS(Micro Electro-Mechanical System) 제작 기법에 의한 접근이 이루어지고 있는 실정이다.<sup>(4,5,6)</sup> 그러나 본 연구에 관련된 근접광 기록 시스템에 적용되기 위한 소형거울의 경우에는 이 경우보다 크기가 상대적으로 커서 주로 mm 수준의 크기를 가지고 있으므로 설계 및 제작과정에서 일반적인 기계 가공과 MEMS 제작 기법에 의한 부품가공의 중간 단계에 놓여 있다고 할 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 설계 및 제작 과정에 대한 개념 및 제작 프로세스의 정립이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 현재 활발한 연구가 진행중인 차세대 정보저장 기술인 근접 광기록 기술과 밀접한 관련을 갖고 있는 미세기구동 액추에이터(fine actuator), 즉 전자기 구동방식 소형거울에 대해서 체계적인 설계, 제작 및 평가를 수행하여 우수한 주파수 특성과 감도특성을 갖는 mm 크기의 소형 액추에이터를 구현한 결과를 제시하고자 한다.

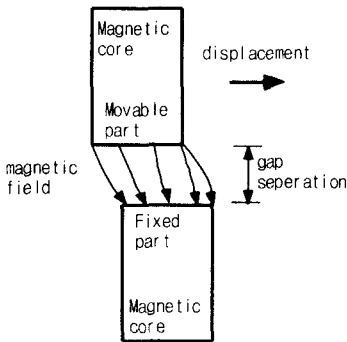
## 2. 전자기구동 액추에이터 설계

2.1 전자기 구동 액추에이터 구조 및 원리  
 매크로(Macro) 영역에서 전자력 구동은 가장 보편적으로 사용되고 있는 구동원리라고 할 수 있다. 전자력 구동이 필요한 곳에서 원하는 수준의 추력을 얻기 위해서는 전자력 구동 마이크로 액추에이터를 구성하는 필수 구성요소로 집적 인덕터 소자가 필요하게 된다. 그런데 현실적으로는 적절한 평면 집적 인덕터 소자를 실현하기가 매우 어렵기 때문에 원형의 나선(spiral)형태의 코일이 인덕터 소자로 가장 널리 활용되고 있다. 원형의 나선형

태 코일에 전류를 인가하게 되면 자기장(magnetic field)이 고정부인 코어(core)와의 간격(gap)에 형성되게 되어 가동부는 변위를 발생할 수 있도록 되어 있다. 일반적으로 전자력 구동의 경우 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 두 가지 방법의 구동방식이 있을 수 있다. 첫번째 방식의 경우 액추에이터의 가동부에 가해진 자기력으로 인한 움직임이 간격분리(gap separation)의 방향으로 나타나는 것이다. 이 경우에 초기의 간격분리는 액추에이터에서 원하는 가동범위의 크기에 의해 결정되게 되며 최대힘을 발생시키기 위해서는 간격 부분과 코어 부분의 자기저항이 동일하게 하여야 하므로 간격 부분의 면적을 적절하게 설계하여야 한다. 두번째 방식의 경우에는 가동부와 고정부간에 발생하는 자기력으로 인한 움직임이 간격분리의 방향에 수직인 부분으로 나타나는 것이다. 이 경우에는 설계로부터 초기의 간격 면적이 액추에이터의 가동범위에 의해 결정되게 되면 간격 부분과 코어 부분의 자기저항이 동일하게 하기 위해 간격이 분리되는 면적이 조절될 수 있도록 하여야 한다.



(a) Movement in direction of gap separation



(b) Movement in normal direction of gap separation

Fig. 2 Driving principle of electromagnetic actuator

본 연구에 의한 전자기 구동 액추에이터의 구동원리는 첫번째 방식으로 액추에이터의 가동부에 가해진 자기력으로 인한 움직임이 간격분리의 방향으로 나타나 간격의 크기를 줄이게 되어 있다. 이와 같은 구동원리에 의해 가동부가 움직일 수 있는 미세구동 액추에이터의 일례는 Fig. 3에 실제의 형태를 보여주고 있는데 미러, 스프링, 코일, 자석, 요크 등으로 구성되어 있다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 소형거울의 회전방향 구동이 가능하도록 되어있는 액추에이터는 광경로상의 주변환경으로부터 왜곡된 광신호를 자동적으로 보정함으로써 보다 왜곡되지 않은 광 빔 및 영상신호를 얻도록 하는 적응 광시스템이나 패턴인식이 가능하도록 하는 광학적 상관기(optical correlator) 등과 같이 광 응용 기기의 매우 중요한 부품으로 그 위치를 굳혀가고 있는 중이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 액추에이터에서 가동부는 스프링의 상면에 부착된 미러와 스프링의 하면에 부착된 코일로 구성되어 스프링의 양단 힌지 부분을 중심으로 회전운동이 가능하도록 되어 있고, 고정부는 스프링의 외곽 테두리 부분이 요크 상면에 부착되어 고정되어 이루어지도록 함으로써 가동부를 지지하는 역할을 할 수 있도록 되어 있다.

본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 전자기 구동 액추에이터를 설계, 제작 및 평가하여 원하는 주파수 특성과 감도 특성을 갖는 액추에이터를 구현하고자 하였다. 따라서 설계과정에서는 먼저 가동부와 고정부를 구분하는 역할과 함께 액추에이터의 1차 공진주파수, 지역감도를 결정하는 스프링의 강성계수를 스프링의 형태 및 치수 변화에 따라 계산하여 액추에이터의 지역 주파수 특성에 대한 결정을 하였다.

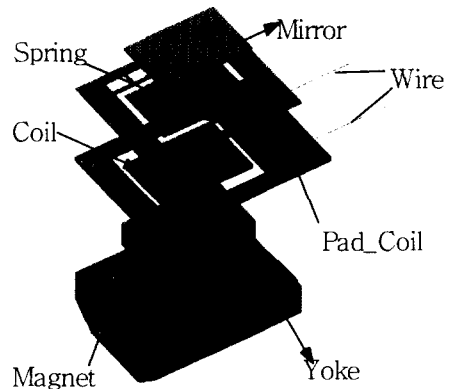


Fig. 3 Electromagnetic fine actuator

그리고 고역 주파수 특성을 파악하기 위하여 가동부를 3 차원 모델링하여 정확한 가동부 무게를 체크하고 모달 해석을 통해 불필요한 고차 공진 모드가 발생하지 않도록 구조 변경을 시도하였다. 그리고 소형거울을 회전 운동할 목적으로 제작된 액추에이터는 저주파수 대역에서 충분한 가동범위의 확보, 고역주파수 대역에서 충분한 가속도 추종 능력의 확보가 가능하도록 하기 위해 추력 확보 수준을 검증하고 더 큰 추력을 확보하기 위한 목적으로 자기회로 해석 및 자기 모멘트의 최적 계산이 이루어지게 되었다. 이상과 같은 설계과정에 의해 충분한 수준의 주파수 특성과 감도 특성이 달성된 다음에 미세기구동 액추에이터를 구성하는 각 부품에 대한 제작 및 조립과정을 거쳐 보드선도 및 히스테리시스 선도를 측정함으로써 소형 거울의 회전운동이 선형성과 주파수 전달특성, 감도특성을 확보하고 있음을 제시하고자 한다.

2.2 구조해석 및 모델링

전자기 구동에 의해 반사 거울(mirror)을 회전시킬 수 있도록 고안되어 있는 소형 액추에이터의 경우에는 현재 활발한 연구가 진행중인 근접장 광기록(Near-field optical recording) 시스템에 적용되고 있는데 Fig. 3 과 같이 구성되어 있다. 가동부는 대칭으로 힌지 형상을 가지는 스프링의 가동부 양측면에 코일과 반사 거울이 부착되어 있고, 코일과 대향으로 자석 및 요크가 배치되어 있다. 따라서 코일에 전류가 인가되게 되면 코일에 흐르는 전류와 자석에서 발생하는 자기장(magnetic field)의 구배(gradient)간 상호작용에 의해 야기되는 전자기력이 반사 거울을 포함한 가동부를 회전 운동시킬 수 있도록 되어 있다. 이때 마이크로 미러를 구동하는 전자기력은 구체적으로 코일에 인가되는 전류와 자석 혹은 전자석에서 발생하는 자기장의 구배간의 상호작용에 의해 발생하게 되므로 식 (1) 과 같다.

$$F_c = m \frac{dB}{dz} = I_c A \frac{dB}{dz} \tag{1}$$

따라서 자기 모멘트 m 은 코일전류와 전체 코일권선에 의해 둘러싸인 면적의 곱으로 이루어진다. 그런데 마이크로 거울은 코일과 판 스프링을 포함하여 하나의 가동부를 구성하고 있으며 이 가동부는 판 스프링에 형성된 힌지부분(hinge part)에 의해 지지되어 있다. 가동부에는 중력이 작용하게 되는데 그 힘은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_g = g(\rho_{coil}V_{coil} + \rho_{spring}V_{spring} + \rho_{mirror}V_{mirror}) \tag{2}$$

따라서 가동부에는 전자기력과 중력이 동시에 작용하게 되고 이로 인해 가동부는 판 스프링의 힌지부를 중심으로 회전할 수 있게 되어 있다. 그 결과 마이크로 거울에 작용하는 전체 힘과 모멘트는 각각 식 (3), 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$F_{total} = F_c - F_g \tag{3}$$

$$T = (F_c - F_g) \cdot a \tag{4}$$

그리고 단면이 직사각형 형태인 빔이 모멘트를 받을 때 최대 전단응력(maximum shear stress) 및 비틀림각(angle of twist)은 각각 식 (5), 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\tau_{max} = \frac{T}{abr^2} \tag{5}$$

$$\phi = \frac{TL}{\beta br^3 G} \tag{6}$$

식 (5), (6)식에서 a 와 β 는 직사각형의 가로/세로 비(aspect ratio)에 의해 결정되는 변수로 Table 1 과 같이 주어진다.

식 (4)를 식 (6)에 대입하게 되면 전자기 구동 방식으로 구성되고 힌지부를 가지는 판 스프링에 의해 지지된 거울을 회전시킬 수 있도록 고안되어 있는 소형 액추에이터에 대한 비틀림 각 변위각 식 (7)로 정리될 수 있다.

$$\phi = \frac{TL}{\beta br^3 G} = (I_c A \frac{dB}{dz} - g(\rho_{coil}V_{coil} + \rho_{spring}V_{spring} + \rho_{mirror}V_{mirror})) \cdot a \cdot \frac{L}{\beta br^3 G} \tag{7}$$

Fig. 4 에 는 3 차원 모델링에 의해 계산된 가동부의 질량관성 모멘트와 식 (7)에 의해 계산된 비틀림 각 변위에 대한 식으로부터 구해진 고유진동수 변화를 나타내고 있다. Fig. 4 로부터 스프링 두께가 60 μm으로 일정할 때 폭 변화에 따른 고유진동수의 변화를 살펴본 결과 설계 목표인 고유진동수 450 Hz를 만족시키기 위한 스프링 폭은 80 μm으로 결정할 수 있다. 따라서 가동부가 힌지 형태의 스프링으로 고정되어 있고 스프링의 비틀림에 의해

Table1 Variables of beam having rectangular section

b/t	1.00	2.00	10.0	∞
a	0.208	0.246	0.312	0.333
β	0.141	0.229	0.312	0.333

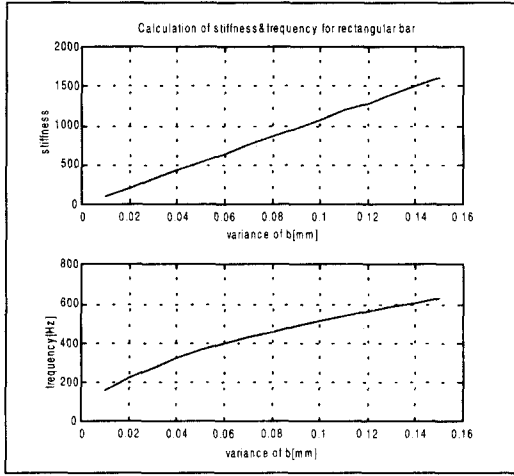
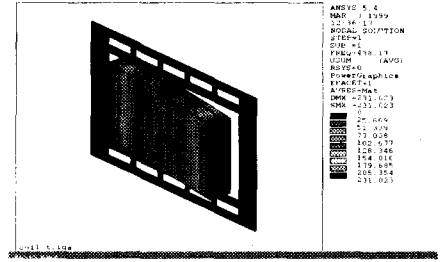


Fig. 4 Stiffness and Natural frequency variance due to width change at spring thickness,  $t=60 \mu\text{m}$

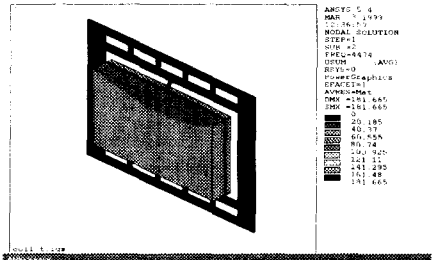
가동부가 회전 운동을 하는 경우 스프링의 길이, 두께 및 폭 변화에 의한 고유진동수의 예측이 가능하므로 설계의 기초자료로 활용이 가능해진다.

2.3 모달 해석

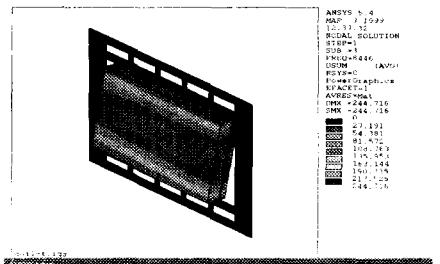
미세구동 액추에이터는 머리를 포함한 가동부가 원하는 주파수 특성과 감도특성을 가지도록 하여 광빔을 효과적으로 자동 보정하거나 광 경로를 능동적으로 변화시켜 미세추종(fine tracking)이 가능하도록 하는 역할을 수행하고 있는 근접 광기록 시스템의 핵심부품으로 매우 넓은 주파수 대역에 걸쳐 동특성이 양호할 것을 요구받고 있다. 일반적으로 진동해석은 가동부의 초기 공진주파수 및 정밀제어시 이득여유(gain margin)와 관련된 고차 공진주파수의 위치 및 피크량 파악, 재질 및 조립 조건의 최적화 등을 달성하기 위한 작업이라고 할 수 있다. Fig. 5 에 모드 해석 결과를 나타내고 있으며 해석 도구는 ANSYS/MECHANICAL 을 사용하였다. 근접장 광기록 시스템에서는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 필요한 정보들을 레이저 빔을 이용한 광학신호로 바꾸어 광디스크에 기록, 재생하는 광픽업이 절대적으로 필요하게 된다. 그런데 광픽업의 정밀위치 추종 기구인 미세구동 액추에이터는 조동 구동기인 VCM 과 2 단서보(2-stage servo)를 구성하여 광빔이 정확하게 디스크의 트랙 열을 추종할 수 있도록 되어있다. 2 단서보에서 VCM 은 500 Hz 미만의 저역주파수 대역을 담당하고 가속도 추종능력이 매우 커져야 하는 고역주파수 대역의 경우에는 가동부의 무게가 VCM 에 비해 상대적으로 매우 작은 미세구동 액추에이터를 적용하여 차단주파수가 3 kHz 이상 확보되는 고정



(a) first tilt mode(438 Hz)



(b) first translation mode(4474 Hz)



(c) second tilt mode(8446 Hz)

Fig. 5 Results of modal analysis in fine actuator

도 서보가 가능하도록 하고 있다. 기존의 하드디스크 드라이브에서는 1 단 서보시 VCM 을 이용하여 제어할 수 있는 최대한의 주파수 대역은 0 Hz ~ 2.0 kHz이며 고정도, 고밀도 기록이 가능하도록 하기위해 최소 제어대역을 3.0 kHz 이상으로 할 때 제어계에서 요구하는 이단 서보용 미세구동 액추에이터의 공진주파수는 500 Hz로 설정함이 타당하다는 결론을 가질 수 있다. 이와 같이 구성된 2 단 서보계의 개루프(Open loop) 주파수 특성은 Fig. 6 에 나타난 바와 같이 2 단 액추에이터로 구성되어 저주파수 대역의 경우 VCM 이 담당하도록 하고 300Hz 이상의 고주파수 대역은 미세구동 액추에이터가 담당하도록 되어 있다. Fig. 6 에 나타난 개루프 특성을 살펴보면 차단주파수는 3.2KHz 이고 최소 제어한계(control resolution)는 0.023 μm으로 되어 있어서 다양한 환경조건에 따른 광디스크의 혼

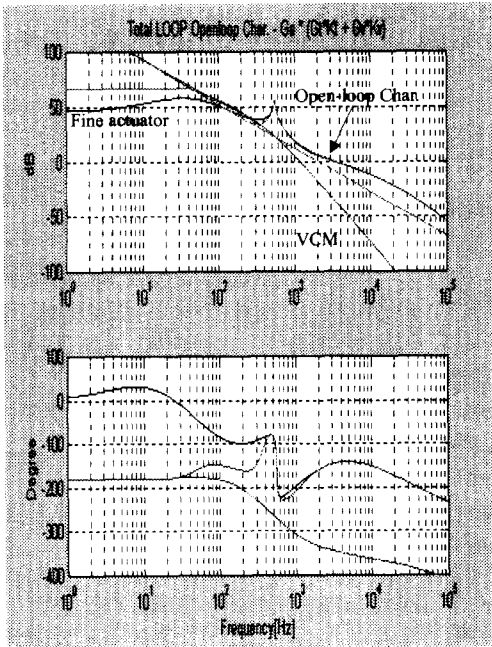


Fig. 6 Open-loop characteristics of 2-stage servo system

들림을 충분히 고정도로 보정하는 것이 가능함을 확인할 수 있다. 그 결과 두개의 액추에이터로 구성된 구동 시스템을 활용하여 정확한 위치추종(± 0.1 μm 오차 이내)을 할 수 있는 성능의 확보가 가능하며, 정밀제어의 특성상 미세추종 액추에이터의 경우에는 고역 주파수 대역까지 원하는 회전운동 이외의 불필요한 모드가 가진 되지 않는 정밀 부품 이어야 하므로 액추에이터 각 부품의 동적인 특성을 명확히 규명하고 진동특성을 파악하여야 할 필요가 있다. Fig 5 에서 나타내고 있는 모드 해석 결과는 원하는 회전운동 방향의 1 차 고유진동수가 438 Hz이며 불필요한 모드가 나타나는 주파수가 4.5 kHz, 8.4 kHz 등으로 나타나고 있음을 보여주고 있다. Fig 5 에서는 10 kHz 미만에 2 개의 불필요한 모드가 발생하고 있지만 이를 고역 주파수 대역으로 이동시키는 데는 치수 제한 때문에 여러 가지 제약조건이 따라 더 이상 고역 주파수 대역으로 이들 모드를 이동시키기 위한 형상 변경을 수행하기가 힘들다. 이 경우에 스프링의 양단 지지부의 형상은 두께가 60 μm이고 폭이 80 μm이며 길이는 0.3 mm로 결정하였다.

2.4 코일의 최적치수 계산

마이크로 미러를 구동하는 전자기력은 구체적으로 코일에 인가되는 전류와 자석 혹은 전자석에서 발생하는 magnetic field의 구배(gradient)간의 상호작용에 의해 발생하게 되므로 식 (8)과 같이 정리될 수 있으며, 자기 모멘트 m 은 코일전류와 전

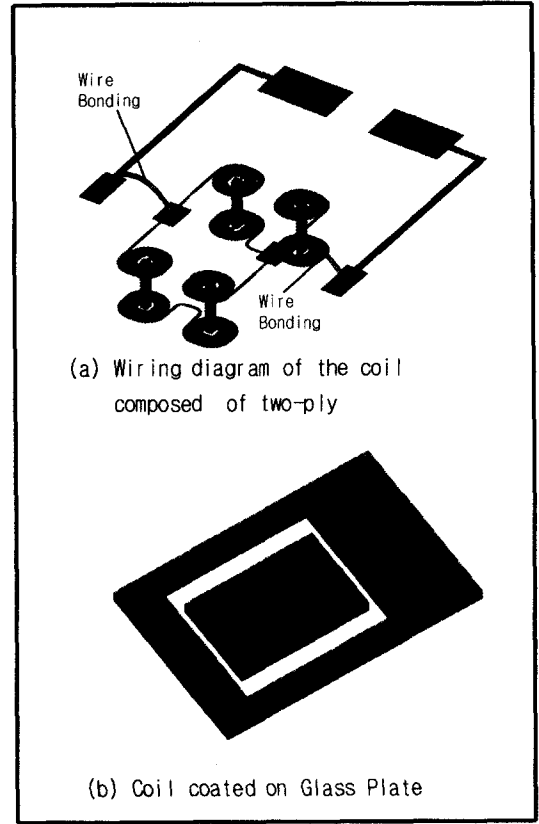


Fig. 7 Structure of coil in fine actuator

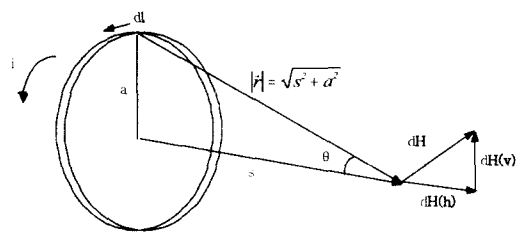


Fig. 8 Configuration of coil in Biot-Savart's law

체 코일권선에 의해 둘러싸인 면적의 곱으로 이루어진다. 코일의 배선 및 구조에 대해서는 Fig. 7 에 나타내었다. 그런데 전류구동이 아닌 전압구동의 경우에는 자기모멘트를 계산하는 과정에서 코일 면적이 커짐에 따라 저항이 같이 증가하게 되므로 제한된 크기에서 최대의 자기모멘트 값을 얻기 위해서는 최적의 코일 권선수가 결정되어야 할 필요가 있다.<sup>(7,8)</sup> 따라서 코일의 치수를 최적화하기 위한 목적함수는 자기장의 세기(field intensity)가 되며, Fig. 8 로부터 자기장의 세기는 식 (8)과 같이 계산된다.

$$H = \frac{I}{4\pi} \frac{l}{(s^2 + a^2)^{3/2}} \cdot 2\pi a = \frac{I}{2} \frac{a^2}{(s^2 + a^2)^{3/2}} [A/m] \quad (8)$$

따라서, 목적함수와 구속조건을 식 (9)와 같이 정의할 수 있다.

목적함수 :  $f = \max. \{H\}$

구속조건 :  $0.5\text{mm} \leq a \leq 1.0\text{mm}$

$0.2\text{mm} \leq s \leq 0.5\text{mm} \quad (9)$

여기서 a는 코일의 반경을 나타내며, s는 코일의 두께 혹은 코일의 층수를 나타낸다. 이와 같은 조건에서 목적함수와 구속조건을 동시에 달성하기 위한 코일의 최적치수 결정은 MATLAB을 이용한 간단한 프로그램을 작성하여 결정될 수 있었다. 구속조건 결정은 제작하고자 하는 미세구동 액추에이터에서 실제로 코일의 적용 가능한 치수들 기준으로 결정되었으며, 이와 같은 구속조건에서 코일직경과 층(layer), 권선수(turns)를 변화시키면서 원형코일의 최적치수를 계산한 결과 직경이 70  $\mu\text{m}$ , 1층이 14 권선수이며, 총 3층으로 구성되어 총 권선수가 42 권선인 코일이 최적치수로 결정되었고, 이에 대한 자계의 세기와 코일 저항을 계산한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 자계의 세기는 자기모멘트와 비례하는 관계를 가지고 있다. 따라서 전자기력이 가장 큰 경우를 만들기 위해서는 자계의 세기가 가장 크게 하기 위한 코일의 치수 결정이 이루어져야 한다. Fig. 9로부터 1층과 2층, 3층의 자계 세기를 계산한 결과 자계의 세기가 감지되는 위치로부터 거리가 가장 가까운 1층 코일의 자계세기가 가장 크며, 3층코일의 자계세기가 가장 작다는 것을 알 수 있다. 그리고 1층코일의 경우에는 코일반경이 커질수록 자계의 세기가 급격하게 줄어드는 반면에 3층코일의 경우에는 코일반경의 변화에 따른 자계 세기의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 코일 저항의 경우에는 2.7 $\Omega$ 으로 계산되었다.

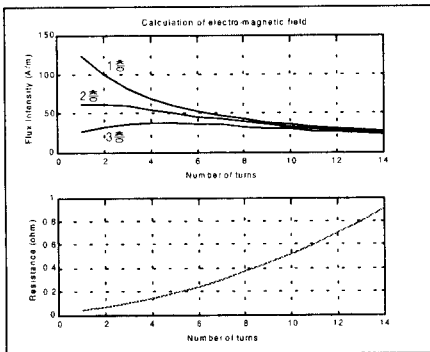


Fig. 9 Relationship of magnetic field intensity and coil resistance having optimum dimensions

2.5 자기회로 해석

마이크로 미러를 구동하는 전자기력은 구체적으로 코일에 인가되는 전류와 자석 혹은 전자석에서 발생하는 자기장의 구배간의 상호작용에 의해 발생하게 되므로 액추에이터가 필요한 추력을 확보하기 위해서는 자석에서 발생하는 자기장 (magnetic field)을 최대한 크게 할 필요가 있다. 자석, 요크 등으로 구성된 자기회로 내의 자속밀도 값은 통상 퍼미언스법(permeance method)에 의해 구해질 수도 있는데 요크와 자속의 비선형성, 영구자석 및 요크의 형상을 고려한 자기회로의 상세한 검토를 위해서는 유한요소법에 의한 자기회로 해석이 필요하다고 할 수 있다. 미세구동 액추에이터에서 자기회로는 Fig. 10과 같이 자석, 요크 등으로 구성되어 있다.

자기회로 해석에 사용된 영구자석의 재질은 희토류철계(NdFeCo) 자석으로 대략적인 특성은 잔류자속밀도값(residual magnetic flux density)이 13,600 Gauss, 보자력(coercive force)이 13,100 Oe이다. 요크의 재질은 순철로 되어 있으며 B-H 선도는 측정을 통해 구하여 적용하였다. 그리고 공기간극의 상대 투자율(relative permeability)은 1이다. 자기회로 해석에 사용된 프로그램은 상용 유한요소법 프로그램인 ANSYS/EMAG로 비선형 자기회로 해석이 가능한 도구(tool)로 알려져 있다. Fig. 11은 전체 자속밀도값 분포인  $B_{sum}$ 을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Fig. 11(a)에서 보는 바와 같은 초기에 설계된 자기회로 형상 중에서 요크의 형상 변경을 통해 Fig. 11(b)에서 보는 바와 같이 자석과 요크 사이에 공기간극(airgap)을 확보함으로써 누설자속이 줄어들고 자속밀도값 분포가 넓어진 결과 평균 자속밀도값은 개선전 5400 Gauss로부터 개선후 6150 Gauss로 향상된 결과를 확인하였다. Fig. 11로부터 코일이 놓이게 되는 공기간극의 자속 밀도 값을 알 수 있으므로 액추에이터가 확보할 수 있는 추력의 크기를 계산할 수 있고, 자속분포의 대칭성 여부를 확인하는 작업이 가능해진다. 이와 같이 자기회로 해석을 통해 설계 단계에서 액추에이터의 추력 크기를 예측할 수 있으며, 자속밀도 값의 균일한 분포 여부를 확인할 수 있게 된다.

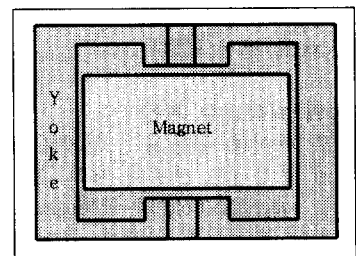


Fig. 10 Configuration of magnetic circuit

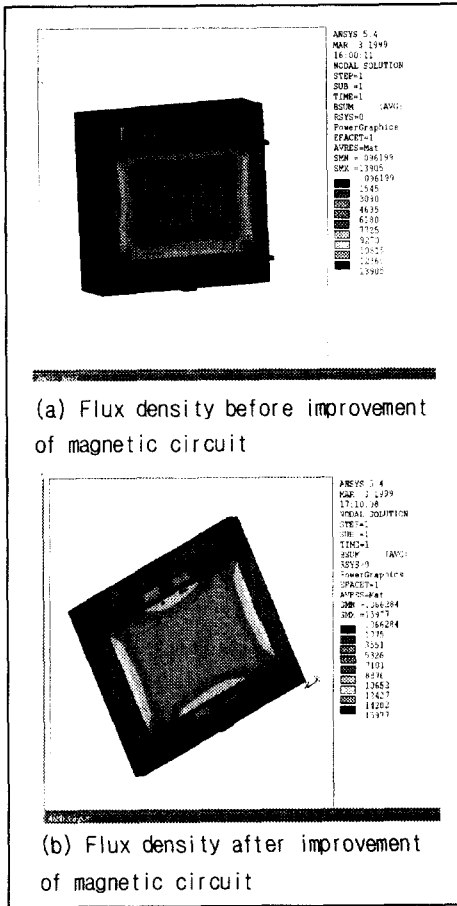


Fig. 11 Flux density distribution in magnetic circuit

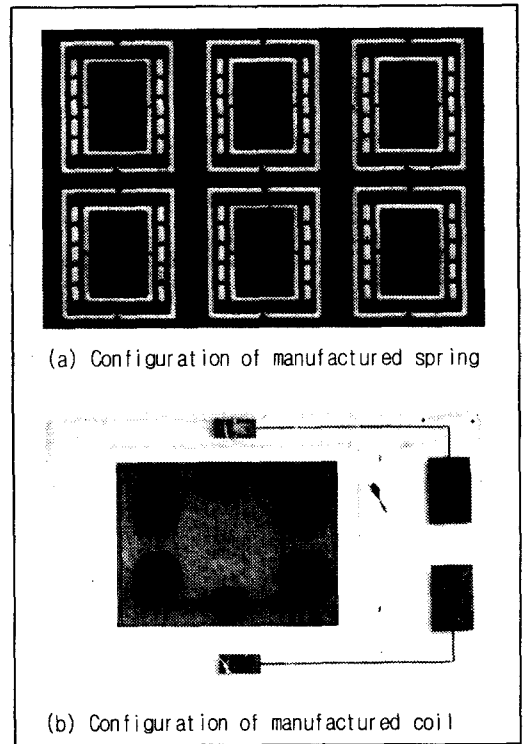


Fig. 12 Configuration of spring and coil

### 3. 전자기구동 액추에이터 제작 및 평가

#### 3.1 전자기구동 액추에이터 제작 및 조립

미세구동 액추에이터를 구성하는 부품은 요크, 자석, 판스프링, 코일, 반사 거울 등으로 구성되어 있다. 구성부품 중에서 요크는 냉간압연강판(SPCC)을 기계가공하여 제작하였고, 자석은 희토류철계(NdFeCo) 자석으로 제작 하였다. 판스프링의 경우에는 반복하중에 매우 강한 재질로 알려진 베릴륨 동판을 사용하여 에칭 공정으로 제작하였으며, 코일의 경우에는 작은 반사면(mirror) 면적내에 코일을 형성하기 위한 제작방법으로 유리(glass)면 위에 크롬(Cr)코팅후에 코일을 코팅하는 방법으로 제작하였다. Fig. 12에 실제 제작된 판스프링과 코일에 대해 나타내었다.

제작된 부품을 조립하는 과정은 먼저 자기회로를 구성하는 요크와 자석을 결합한 다음 스프링의 양 측면에 반사 거울과 코일을 부착하여 요크 상면에 부착하는 단계로 이루어져 있다. 그런데 이와 같이 미세구동 액추에이터를 조립하는 과정에서 나타난 문제점 및 향후 개선방안을 정리해 보면 다음과 같다. 첫째, 코일 및 반사 미러의 코팅면 구분이 난이하므로 이를 구분하기 위한 방안이 강구되어야 한다. 둘째, 판스프링에 가동부 코일과 반사 미러를 부착하는 공정이 난이하므로 우선적으로는 접착제의 적정량 Test 및 종류 선정작업에 의한 방법으로 개선하도록 하며, 장기적으로는 판스프링의 양면을 이용하여 자체에 반사미러 코팅과 코일 코팅 또는 도금하는 방법을 검토하여야 한다.

#### 3.2 전자기구동 액추에이터 성능평가

동특성 실험장치는 Fig. 13과 같이 구성되어 있다. 실험의 구체적인 방법은 신호 분석기(dynamic signal analyzer)에서 액추에이터에 모드실험 방법의 하나인 swept-sine 가진을 하여 레이저 도플러 속도계로 검출한 속도, 변위특성을 FFT 장치를 통



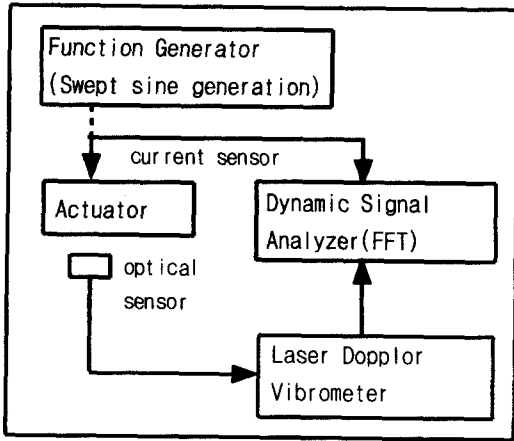


Fig. 13 Configuration of experimental apparatus

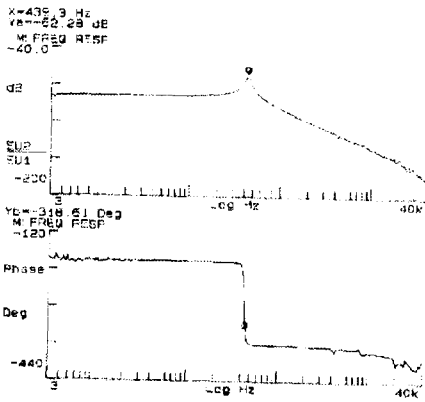


Fig. 14 Bode plot of fine actuator

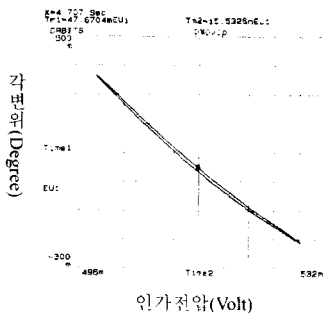


Fig. 15 Hysteresis loop of fine actuator

해 분석하는 것이다. 레이저 도플러 속도계의 원리는 측정대상에 레이저를 조사하여 반사광과 도플러 효과에 의해 속도특성을 검출하는 것이며 변위특성을 측정하기 위해서는 적분기를 통과해야 한다. 이 장치를 이용하여 액추에이터에서 포커스

Table 2 Comparison of design values and performance values

Item	Design value	Performance value
Natural Frequency(Hz)	550	414
DC Sensitivity(rad/V)	0.0189	0.0142
AC Sensitivity(rad/s/V)	186,000	134,609
Coil Resistance(Ω)	2.7	2.7

와 트랙 방향 전달함수를 구할 수 있다.

미세구동 액추에이터의 보드선도를 계측한 결과를 Fig. 14에 나타내었고, 가동범위 내에서 선형성 확보 여부를 확인할 수 있는 히스테리시스 선도를 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15에 나타낸 히스테리시스 선도는 향후 제어 알고리즘 구축시 비선형성의 영향을 고려하는데 유용하게 활용될 수 있다. 그리고 Table 2에 설계값과 평균 성능값의 비교를 나타내었다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 측정된 보드선도는 약 40 kHz까지 미세구동 액추에이터가 비교적 안정된 동특성을 가지고 있음을 보여주고 있다. 모달 해석에서 나타난 결과로부터 10 kHz 미만에 2개의 불필요한 모우드가 발생하고 있지만 자기회로 해석 등을 통해 누설자속의 영향을 최대한 배제하도록 하며, 조립상의 오차를 최대한 줄임으로써 스프링의 힌지부를 중심으로 발생하는 모멘트를 제외한 외력의 크기를 최소화하도록 하였다. 그 결과 본 연구에 의한 액추에이터는 불필요한 모우드의 가진이 없기 때문에 기울기(tilt)구동에 대한 안정된 동특성을 확보할 수 있게 되었다. 그리고 Table 2에서 설계값과 평균 성능값을 비교한 결과 감도가 다소 낮게 나타나고 있는데 그 원인은 주로 자기회로의 자속밀도값이 예상보다 낮는데 기인한다고 판단되며 설계값보다 낮은 감도로 인한 성능상의 문제점은 없는 것으로 판단된다. 고유진동수가 설계값보다 평균 성능값이 낮은 이유는 판스프링을 에칭하는 과정에서 힌지 부분의 폭이 설계값보다 약 10 μm 정도 작게 제작이 이루어진 데 기인한다고 판단된다.

이상과 같이 미세구동 액추에이터의 주파수 전달특성에 대한 평가 결과 매우 양호한 액추에이터가 제작되었음을 확인할 수 있었고 그 결과 고밀도의 기록·재생을 위한 근접 광기록 시스템에 다양하게 활용될 수 있는 전자기구동 소형 거울의 개발이 이루어질 수 있게 되었다.

#### 4. 결론

근접장 광기록 기술을 달성하기 위해서는 레이저로부터 조사되는 빔의 방향을 디스크의 트랙 방

향으로 이동시켜 미세추종(fine tracking)을 달성하기 위한 소형 구동 거울의 개발이 이루어져야 한다. 이러한 소형 구동거울의 개발을 위하여 다음과 같은 작업들이 수행되었다.

(1) 전자기 구동에 의한 소형 거울의 설계 및 시뮬레이션 과정을 거쳐 원하는 수준의 주파수 전달특성을 가지도록 하기위해 소형 거울의 설계 과정을 체계적으로 정리하였다. 설계 및 시뮬레이션은 반사거울을 지지하는 스프링의 모달해석, 가동부에 부착된 코일의 기하학적 형상과 권선수 등에 의해 결정되는 자기 모멘트의 계산, 코일의 하단부에 위치한 자석과 요크에 의해 구성되는 자기회로의 평균 자속밀도값 계산을 위한 자기회로 해석등을 포함하도록 하였다.

(2) 설계된 소형거울의 상세 부품설계를 통해 실제로 부품을 제작하였고, 이들 부품을 조립 및 평가하는 과정을 통해 특성값을 측정하여 설계값과 비교하였고, 조립과 평가 과정에서 발생된 문제점에 대한 분석 및 해결방안을 제시하였다.

(3) 이러한 과정을 거쳐 최종적으로 원하는 주파수 특성과 감도 특성을 갖는 전자기구동 소형 거울의 제작이 이루어지게 되었다.

### 참고문헌

- (1) Myong R. KIM, June-Hyoung PARK, Wonho JHE, 2000, "Near-Field Optical Recording by Reflection-Mode Near-Field Scanning Optical Microscope : Submicron-Sized Marks and Their Thermodynamic Stability," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.39(2000), pp. 984~985.
- (2) Kusato HIROTA, Tom D. MILSTER, Yan ZHANG, J. Kevin ERWIN, 2000, "Design of a Near-Field Probe for Optical Recording Using a 3-Dimensional Finite Difference Time Domain Method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.39(2000), pp. 973~975.
- (3) ChulWoo Lee et al., 1998, "A Catadioptric System For Near Field Application," *International Symposium on Optical Memory, Technical Digest*, pp. 156~157.
- (4) 민영훈, 김용권, 1999, "단층 다결정 실리콘 마이크로머서닝 기술로 제작된 정전형 마이크로 미러 어레이의 모델링 및 측정," 대한전기학회논문지, 제 48C 권 1 호, pp. 62~67.
- (5) Raanan A. Miller, Yu-Chong Tai, Guoda Xu, John Bartha, and Freddie Lin, 1997, "An Electromagnetic MEMS 2x2 Fiber Optic Bypass Switch," *Technical Digest, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '97)*, Vol.1, pp. 89~92.
- (6) Raanan A. Miller, Geoffrey W. Burr, Yu-Chong Tai, and Demetri Psaltis, 1996, "Electromagnetic MEMS scanning mirrors for holographic data storage," *Proceedings Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, pp. 183~186.
- (7) A. Feustel, O. Krusemark, J. Muller, 1998, "Numerical simulation and optimization of planar electromagnetic actuators," *Sensors and Actuators, A70*, pp. 276~282.
- (8) 권대갑, 이문구, 1997, "광픽업 미세 구동기의 최적설계," 대한기계학회논문집 A, 제 21 권 5 호, pp. 819~827.
- (9) Alan B. Marchant, 1990, "Optical Recording," Addison-Wesley Publishing Company, pp. 165~193.
- (10) Egor P. Popov, 1990, "Engineering Mechanics of Solids," Prentice-Hall International, Inc.