

## 다중 빔 광디스크 시스템을 위한 자기 구동형 빔 회전 구동기의 개발

이청희\*, 김수현\*\*, 곽윤근\*\*

### Development of Beam Rotating Actuator Based on Voice Coil Motor Type for Multi-beam Optical Disc System

Cheong Hee Lee\*, Soo Hyun Kim\*\*, Yoon Keun Kwak\*\*

#### ABSTRACT

A multi-beam optical disc drive is a method to improve the data transfer rate for the optical disc systems by parallel recording and reading on neighboring multi-tracks. In this paper, the beam rotating actuator, which is necessary for the multi-beam optical disc drive to form beam spots on multi-tracks simultaneously, has been developed. The Voice Coil Motor is used as a drive mechanism for high resolution and small size of the actuator. And rotating guide based on link structure is designed for frictionless and axisless rotation of rotating part including dove prism and for rotating in axis of geometric center of dove prism. The characteristics of the actuator are experimented by laser vibrometer, Polytec OFV1102 and a dynamic analyzer, HP35670A. It shows that the actuator has good linearity, rotating range  $\pm 0.34^\circ$ , minimum rotating angle  $0.0066^\circ$  and natural frequency 113.9Hz. Therefore the actuator can be applied in a multi-beam optical disc system.

**Key Words :** Multi-beam System(다중 빔 픽업), Beam Rotating Actuator(빔 회전 구동기), Dove Prism(도브 프리즘), Link Structure(링크 구조)

#### 1. 서 론

현대의 정보화 사회에서 필수품인 정보 기록 장치는 급속도로 대용량화와 고속화 되어 가고 있다. 레이저를 이용하여 디스크 상의 트랙에 정보를 기록하고 재생하는 광디스크 시스템은 최근의 기록 매체 중 가장 많이 사용되고 있는 것 중의 하나로, 많은 양의 정보를 기록할 수 있으며, 잡음에 강하고, 반영구적인 장점이 있다.

이러한 광디스크 시스템의 고속화를 위해 데

이터 전송 속도와 기록 밀도를 높여 정보를 빠르게 재생하는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 하나의 광원을 이용해 구동계와 제어계 자체의 성능을 향상시키는 방법은 어느 정도 한계에 와 있다. 이러한 시점에서 광디스크 고속화를 위한 최근의 연구 추세는 기존의 하나의 광원 대신 여러 개의 광원을 사용함으로써 데이터 재생 능력을 향상시키는 것이다.

이러한 다중 빔 광디스크 시스템에서 광원을 여러 개 사용하기 위해서는, 다중 빔이 디스크의

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

정보가 기록된 다중 트랙 위에 정확히 주사되어야 한다. 그러나 디스크의 반경 방향 편심과, 내주와 외주의 곡률 차이 등에 의해 다중 빔이 디스크 상의 다중 트랙에 동시에 정확히 일치되지 않는다. 따라서 이를 보상하기 위해 궤적 추적 구동기 외에 빔 회전 구동기가 필요하게 된다.<sup>[11-13]</sup>

이를 위해 빔 회전을 위한 광학 부품인 도브 프리즘을 이용한 빔 회전 구동기를 설계하고, 이에 대한 제어계를 구성한다. 기존에 제안되었던 빔 회전 구동기는 외팔보 형태로 빔의 회전과 트랙킹이 연계되는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 도브 프리즘의 기하학적 중심을 축으로 회전시켜 이를 보완하고, 구동 방식은 고 분해능과 소형화가 가능한 VCM(Voice Coil Motor)방식을 채택한다. 또한 다중 빔 시스템의 특성을 분석하고 이를 바탕으로 하여, 광디스크에 사용할 정도의 빠른 응답성과 높은 정밀도를 가지는 구동기를 개발한다.

## 2. 구동기 설계

### 2.1 도브 프리즘

도브 프리즘은 영상을 일정 각도 만큼 회전시켜 주는 광학 부품으로, 다중 빔을 프리즘에 주사한 후, 프리즘을 회전 시킴으로써 입사 된 일렬의 다중 빔을 회전 시킬 수 있다. 프리즘의 크기는 통과하는 빔의 광 단면 유효 직경에 의해 결정된다. 본 논문에서 사용되는 도브 프리즘의 재질은 BK7 이며 크기는 Fig.1 에 나타나 있다.<sup>[4]</sup>

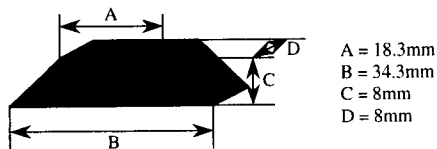


Fig. 1 Dove Prism

### 2.2 구동기의 사양

**회전정밀도.** 디스크 상에 기록된 정보를 원활히 재생하기 위해서는 트랙킹 오차가  $0.03\mu\text{m}$  이내여야 한다. 그러므로 궤적 추종 구동기에 의한 오차를  $t_e$ , 회전 구동기에 의한 오차를  $\Delta t_e$ 라 하면 다중 빔의 트랙킹 오차  $T_e$ 는 식 1 과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = t_e + \Delta t_e \leq 0.03\mu\text{m} \quad (1)$$

빔의 회전  $\Delta\theta$ 과 그에 따른 트랙 벗어남  $\Delta t_e$ 는,  $\theta$ 와  $\Delta\theta$ 값이 미소하므로 식 2 와 같은 관계를 갖는다. 여기서  $d_b$ 는 빔간 간격으로  $20\mu\text{m}$ 이다.

$$\Delta t_e = d_b \times [\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta] \approx d_b \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

궤적 추종 구동기에 의한 오차  $t_e$  값은 센서와 제어기 등의 문제로 일정치 이하로 줄일 수 없다. 전체적인  $t_e$  이  $0.025\mu\text{m}$  정도이므로, 구동기의 회전 정밀도는 식 3 과 같이  $0.014^\circ$ 이하가 되어야 한다.

$$\Delta\theta \leq \frac{(T_e - t_e)}{d_b} = 0.014^\circ \quad (3)$$

**회전범위.** 다중 빔의 회전 원인은 디스크의 편심, 외주와 내주의 곡률 반경 차이, 광축 조절을 위한 초기 회전각 등이 있다. 이를 보상하기 위한 빔의 회전 각을 식 4 에 나타내었다.

$$\theta_b = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (4)$$

디스크의 편심을 보상해 주기 위한 빔의 회전은 디스크의 중심과 회전 중심이 일치하지 않기 때문이다. 이를 위한 빔의 회전각  $\theta_1$ 은 식5와 같이 계산된다. 여기서  $e_t$ 는 편심량,  $r$ 은 트랙의 반경이다.

$$\theta_1 \approx \frac{e_t}{r} \leq \frac{100 \times 180}{25000 \times \pi} = 0.23^\circ \quad (5)$$

또한 바깥 트랙과 안쪽 트랙의 곡률 반경 차이에 의한 트랙 벗어남을 보상해 주기 위한 빔의 회전량  $\theta_2$ 는  $0.026^\circ$ 이고, 광축 조절을 위한 회전각  $\theta_3$ 는  $0.3^\circ$  이내로, 전체적인 다중 빔의 회전각  $\theta_b$ 는  $0.56^\circ$  이내이다. 따라서 빔 회전 구동기의 회전 범위는  $\pm 0.28^\circ$  이상이 되어야 한다.

**고유주파수.** 다중 빔의 트랙 벗어남은 디스크의 회전 편심에 의해 주기적으로 발생하고, 이 주기는 디스크의 회전 주기와 같다. 따라서 회전 구동부의 고유주파수는 디스크의 회전주파수보다 커야 한다. 본 논문에서는 디스크의 최고 회전속도를  $3000\text{rpm}$ 으로 간주하고, 빔 회전 구동기의 고유주파수를  $50\text{Hz}$  이상으로 설계한다.

**DC 민감도.** 본 논문에서 설계하는 빔 회전 구동기는 VCM 타입으로, 입력은 가해주는 전류가 되고 출력은 프리즘의 회전 각도가 된다. 구동기의 최대 허용 전류가  $0.2\text{A}$ 이므로, 구동기의 DC 감도는 식 6 과 같이  $1.4^\circ/\text{A}$  이상이 되어야 한다.

$$\frac{\theta}{i} \geq \frac{0.28}{0.2} = 1.4^\circ/\text{A} \quad (6)$$

### 2.3 구동기의 기본구조

회전 구동기의 구성은 도브 프리즘과 이를 감싸고 있는 보빈이 있고, 보빈은 양끝에 회전 안내부에 끼워져 회전하게 되어 있다. 회전 안내부는 구속된 평면 운동의 설계에 많이 이용되는 링크 구조를 바탕으로 설계된다. 회전력은 보빈의 가장 자리에 코일을 감고 자석을 근접시켜 얻는다. 또한 모든 부품은 알루미늄 케이스에 내장된다. 개략적인 구동기의 형태를 Fig.2 에 나타내었다.

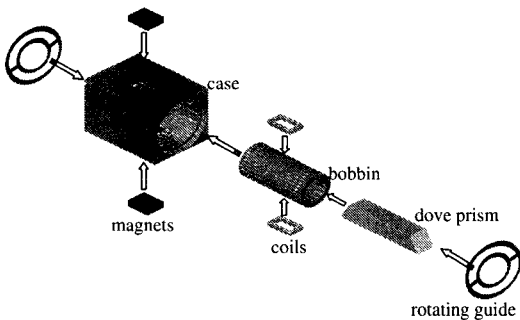


Fig. 2 Basic Structure of Actuator

### 2.4 자석-코일부

회전부를 회전시킬 힘을 생성하기 위해 높은 정밀도와 소형화가 구현 가능한 VCM 을 사용한다. VCM 은 하드디스크의 헤드 구동기로 개발되면서 발달하기 시작했고, 광디스크의 추적 추종 구동기 (Tracking Actuator)와 초점 구동기(Focusing Actuator)에도 사용된다.

자석을 Fig.2 와 같이 케이스의 양쪽에 배치하여 회전부의 상하에서 자기장의 방향을 반대로 하고 전류의 방향을 같게 하면, 플라밍의 왼손법칙에 의해 크기가 같고 방향이 반대인 짝힘이 코일부에서 생성되어 프리즘을 포함한 회전부를 돌리게 된다.

코일부에서의 자기력의 크기를 알기 위해 자석부를 시뮬레이션해 보면, 유효코일부의 길이가 길도록 선택된 자석에 대해 Fig.3 과 같은 자속밀도 분포를 나타낸다. 자석면으로부터의 일정한 거리에서의 자속밀도를 나타낸 것으로, 코일이 위치하는 자석의 중간에서의 거리에  $i_{mc}$  대한 자속밀도 B 값은 표 1 과 같다.

회전 안내부의 부담을 줄이기 위해서는 B 값이 최대한 커야 한다. 표1에서 자석과 코일 간의

간격  $i_{mc}$  를 1.5mm 이내로 하면, 자속밀도  $B=0.2T$  를 확보할 수 있다.

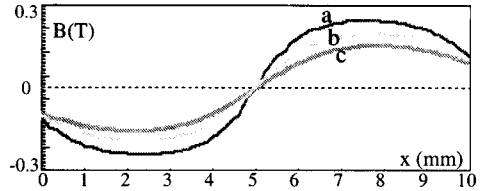


Fig. 3 Magnetic Flux Density Distribution

Table 1 Magnetic Flux Density

자석-코일 간격 $i_{mc}$ (mm)	자속 밀도 B(T)
2	0.16(c)
1.5	0.2(b)
1	0.24(a)

### 2.5 회전 안내부

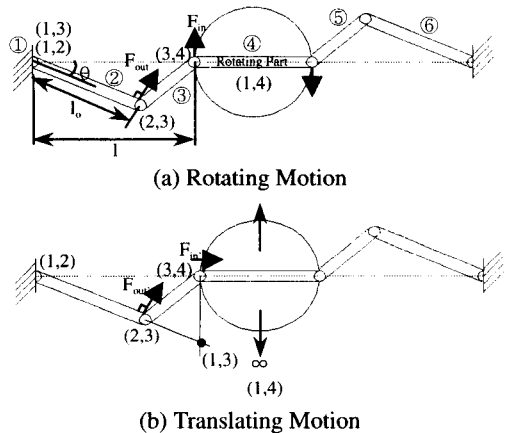


Fig. 4 Comparison between Rotation and Translation

6 링크 구조에 대해 회전 운동과 병진 운동을 비교해 보면 Fig.4 와 같다. 링크를 8 개 이상 이용하면 구조가 복잡하고 시스템의 크기가 커지기 때문에 좋지 않다. 각 방향으로 가해지는 힘  $F_{in}, F_{in}$  와 1 번 링크와 2 번 링크를 연결하는 조인트의 구동원이 되는 힘  $F_{out}, F_{out}$  의 관계를 순간 중심을 이용해 계산한다.

Fig.4(a)의 경우 링크 ④가 자신의 중심을 축으

로 회전하므로, 링크 ①과 ④의 순간 중심 (1,4)가 링크 ④의 중심점이 된다. 따라서 순간 중심 (1,3)은 (1,2)와 (2,3)을 이은 선과 (3,4)와 (1,4)를 이은 선의 교점인 (1,2)가 된다. 링크 ④에 회전을 위한 힘  $F_{in}$ 이 가해질 경우 링크 ②, ③에 대해 식 7과 같이 된다. 여기서  $r_{in}$ ,  $r_{out}$ 은  $F_{in}$ ,  $F_{out}$ 과 링크의 순간 중심 간의 거리,  $\omega$ 는 링크의 각속도이다.

$$\frac{F_{out}}{F_{in}} = \frac{r_{in}}{r_{out}} \cdot \frac{\omega_3}{\omega_2} = \frac{(1,3) - (3,4)}{(1,2) - (2,3)} \cdot \frac{(1,2) - (2,3)}{(1,3) - (2,3)} = \frac{l}{l_0} \quad (7)$$

Fig.4(b)의 경우 링크 ④가 좌우로 병진 운동하므로 (1,4)는 링크 ④에 수직인  $\infty$ 에 위치한다. (1,3)은 위와 마찬가지로 정해지고, 병진 운동을 위한 힘  $F_{in}$ 가 가해지면 식 8과 같이 구해진다.

$$\frac{F_{out}}{F_{in}} = \frac{(1,3) - (3,4)}{(1,3) - (2,3)} = \frac{l \cdot \sin\theta}{l - l_0 \cdot \cos\theta} \quad (8)$$

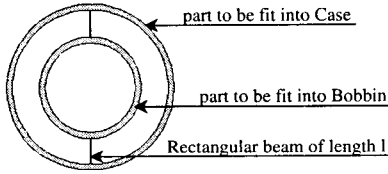


Fig. 5 Configuration of Rotating Guide

회전 방향보다 병진 방향의 강성이 커야 하므로  $\theta$ 가 작아야 한다. 따라서  $\theta=0$ 인 일직선 형태가 적합하다. 이렇게 하여 결정된 회전 안내부의 형태는 Fig.5와 같다. 보빈과 연결되는 작은 원이 Fig.4의 회전부에 해당하고, 상하에 위치한 길이 l의 사각 빔은 회전부 좌우의 2 links의 일직선 구조에 해당한다. l은 전체적인 구동기의 크기를 고려하여 4.5mm로 하고, 회전 가이드부의 재질은 스프링의 재료로 많이 쓰이는 베릴륨동(Be-Cu)을 사용한다.

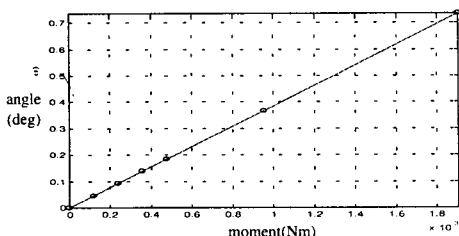


Fig. 6 Stiffness for Rotation by FEM Analysis

이러한 회전 안내부의 강성을 알아 보기 위해 유한 요소법 해석을 시행하였다. 폭과 두께가 가공 최소치 0.1mm인 빔과 회전부가 접하는 점에 회전을 일으킬 수 있는 짝힘을 인가하고, 모멘트에 따른 회전부의 회전각을 Fig.6에 나타내었다.

회전 범위 안에서 선형적인 관계를 갖음을 알 수 있다. 회전부의 양쪽에서 지지하므로 전체 회전 가이드부의 회전 강성  $K_I$ 를 계산해 보면 식 9와 같다.

$$K_I = \frac{2 \times 0.119}{1000 \times 0.0458} = 0.0052 \text{ N} \cdot \text{m/deg} \quad (9)$$

### 2.6 구동기의 특성 해석

회전부와 안내부의 연결 형태를 가해지는 힘과 함께 나타내면 Fig.7과 같다. 코일부에서 발생하는 짝힘  $F_c$ 에 의해 회전부를 돌리게 되고, 그에 따라 가이드부에서 반대 방향의 모멘트  $M_s$ 가 생기게 된다.

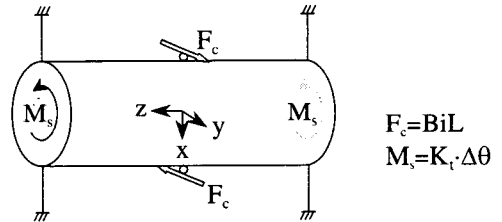


Fig. 7 Free Body Diagram of Actuator

이에 대한  $\theta$ 방향의 운동 방정식은 식 10과 같고, 여기에서 회전 방향 고유주파수  $f_\theta$ 는 식 11과 같이 구해진다.  $J$ 는 회전부의 질량 관성 모멘트(Mass Moment of Inertia)로 회전부를 원통으로 가정하고 계산한다.  $C_f$ 는 감쇠 계수이고,  $d$ 는 회전 중심축에서 코일부까지의 거리이다.

$$J\ddot{\theta} + C_f\dot{\theta} + K_I\theta = BLd_j i \quad (10)$$

$$f_\theta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_I}{J}} \quad (11)$$

또한 DC 민감도는 식 12에 나타난 힘의 평형식에 의해 식 13과 같이 표현된다. 여기에서  $L$ 은 총 유효코일 길이로, 보빈의 양쪽에 각각 코일 100turn을 감을 경우  $L=0.012 \times 100 \times 4=4.8\text{m}$ 가 된다.

$$BiLd_j = K_I\theta \quad (12)$$

$$\frac{\theta}{i} = \frac{BLd_j}{K_I} \quad (13)$$

앞에서 구한 자속밀도와 강성을 적용하면 구동기의 특성은 식 14 와 같다. DC 감도가 설계 사양의 1.3 배 이므로 회전 가이드의 두께를 키우는 것은 좋지 않다.

$$f_0=136.5\text{Hz}, \quad \theta/i=1.83^\circ/\text{A} \quad (14)$$

### 3. 구동기 제작

Fig.8 은 제작된 빔 회전 구동기의 전체적인 형상이다. 자석은 자성이 강하고 소형 구동기에 많이 쓰이는 네오지움(NdFe<sub>2</sub>)을 사용하였고, 보빈은 회전체의 질량을 줄이기 위해 경량의 폴리카보네이트(PC)를 사용하였으며, 회전 가이드는 베릴륨동(BeCu)판을 에칭하여 제작하였다. 코일은  $\phi 0.08$  을 상하 각각 100 회씩 감았고, 보빈과 가이드, 가이드와 케이스는 서로 본딩으로 연결된다.

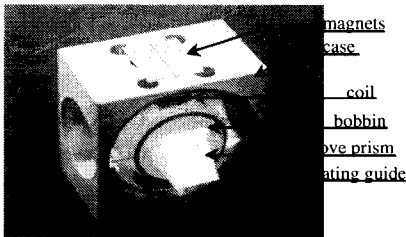


Fig. 8 Beam Rotating Actuator

전체 크기는 30×30×19(mm)이고, 회전부의 질량은 8.5g, 감겨진 코일의 저항은 37.5Ω이다. 힘이 발생되는 방향을 빔의 강성이 큰 길이 방향과 맞추기 위해 빔과 구동부를 수직으로 배치한다.

### 4. 개발된 구동기 실험

#### 4.1 정적 특성 실험

구동기의 회전 범위 등을 파악 하기 위해 회전 특성 실험을 시행하였다. 회전각이 미소하기 때문에 Fig.9 와 같이 도브 프리즘에 거울을 부착하고 광원으로부터의 레이저를 반사 시켜, 멀리 떨어져 있는 눈금자에 레이저가 맺히도록 한다. 맺힌 상의 이동 거리를 측정함으로써 프리즘의 회전 각도를 알게 된다.

회전각  $\theta$ 와 이동거리  $\Delta x$ 의 관계는 식15와 같다. 거울과 눈금자와의 간격  $l_m$ 은 4.33m이다.

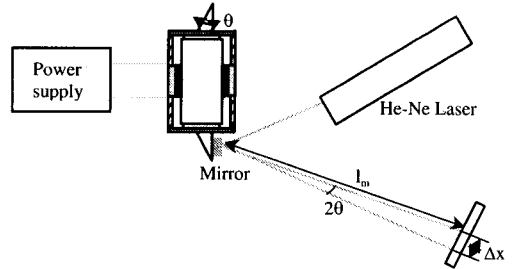


Fig. 9 Measurement of Rotating Angle of Dove Prism

$$\theta = \frac{l}{2} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\Delta x}{l_m} \right) \approx \frac{\Delta x}{2 \cdot l_m} \quad (15)$$

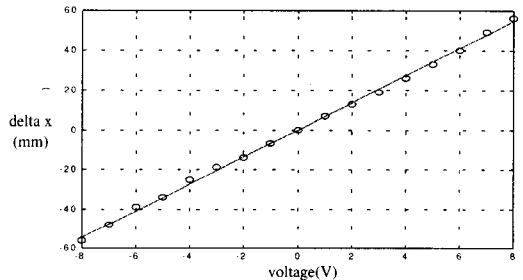


Fig. 10 Result of Prism Rotating Experiment

Fig.10 은 인가되는 전압  $V$ 와 이동거리  $\Delta x$ 의 결과로, 구동기가 선형적인 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 최소 제곱법을 이용하면 식 16 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta x}{V} = 6.83 \text{ mm/V} \quad (16)$$

이로부터 구동기의 DC 감도를 구해보면 식 17 과 같다. 해석적으로 구한 값과 7.7% 오차로 근사한 값을 갖는다. 최대 허용 전류가 0.2A 이므로 구동기의 회전 범위는  $\pm 0.338^\circ$ 로 설계 사양  $\pm 0.28^\circ$ 보다 넓다.

$$\frac{\theta}{i} = \frac{\Delta x \cdot R}{2 \cdot l_m \cdot V} = 1.69 \text{ }^\circ/\text{A} \quad (17)$$

눈금자에 맺힌 레이저의 최소 이동 거리를 측정하기 위해, 전압을 0에서부터 눈금자의 레이저가 최초로 움직일 때까지 증가시켰다. 입력  $V=150\text{mV}$ 에 대해 최소 이동 거리  $\Delta x_{\text{min}} \approx 1\text{mm}$ 이다. 식 15에 의해 구동기의 최소 회전각은  $0.0066^\circ$ 로 설계 사양  $0.014^\circ$ 보다 작다.

### 4.2 동적 특성 실험

구동기의 고유주파수와 전달 함수를 구하기 위해서 주파수 응답 특성을 실험하였다. 디지털 신호 분석기(HP35670A)를 이용해 구동기에 5Hz에서 1kHz사이의 sine파를 순차적으로 인가한다. 전압 드라이버로 최대 ±5A의 높은 출력 전류를 낼 수 있는 Power OP Amp를 사용하였으며, 레이저 바이브로미터(Polytec OFV1102)로 구동기의 회전을 센싱하였다. 전체적인 실험 장치는 Fig.11과 같다.

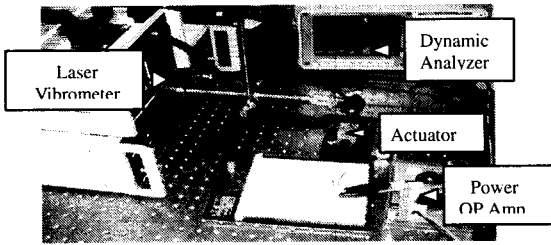


Fig. 11 Frequency Response Experiment Set

Fig.12는 결과적으로 얻어진 구동기의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 고유주파수는 113.9Hz 이고, 다른 방향의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 감쇠비는 식 18 과 같다.

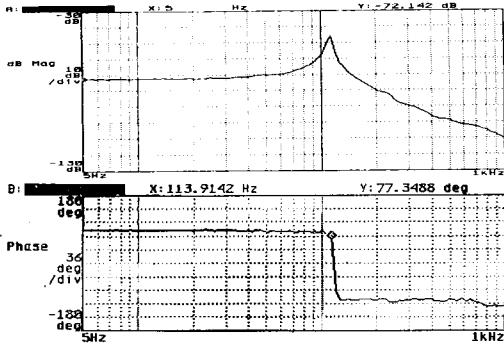


Fig. 12 Frequency Response of Actuator

$$\xi = \frac{1}{2 \cdot 10^{(72.1 - 45.7)/20}} = 0.024 \quad (18)$$

고유주파수, 감쇠비등과 앞에서 구한 DC 민감도를 이용해 전달함수를 구해보면 식 19 와 같다. 주 사용 영역인 50 Hz 이하에서 구동기는 평탄한 특성을 갖는다.

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{15164}{s^2 + 34.36s + 512288} \quad (19)$$

### 5. CONCLUSION

본 연구에서는 다중 빔 광디스크에서, 디스크의 편심과 트랙의 곡률 반경 차이 등에 의해 발생하는 다중 빔의 트랙 벗어남 현상을 보상해 줄 빔 회전 구동기를 개발하였다. 도브 프리즘을 사용하였고, 회전 구동부로서 소형화가 가능하고 높은 정밀도를 낼 수 있는 VCM 을 채택하였다. 발생하는 트랙 오차의 분석을 바탕으로 구동기의 필요한 사양을 정했으며, 회전부의 회전을 지지할 안 내부로 마찰이 없고 회전축이 프리즘의 기하학적 중심과 같도록 빔 구조의 스프링을 설계하였다.

제작된 구동기에 대한 정적 특성 실험을 통해 구동기가 입력 전압에 대해 선형적인 특성을 가지고 있고, 최대 입력 전류 0.2A 에 대해 ±0.338°의 회전 범위를 가짐을 확인했다. 또한 최소 회전각은 0.0066°로 높은 정밀도를 가지고 있다.

동적 특성 실험으로 구동기의 고유 진동수와 전달 함수를 구하였다. 고유 진동수는 113.9Hz 이고, 회전 방향 외의 방향에 대한 공진은 전달 함수에 영향을 주지 않는다. 결과적으로 개발된 빔 회전 구동기는 다중 광선 디스크 시스템에 적용 가능함을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

1. Ryuichi Katayama, Kazuhiro Yoshihara and Yutaka Yamanaka, "Multi-beam Magnet-Optical Disk Drive for Parallel Read/write Operation," Optical Data Storage Topical Meeting, Proc. SPIE, Vol. 1078, pp. 98~104, 1989.
2. Haruki Tokumaru, Kiyotaka Arai and Norikazu Kawamura, "Multi-beam optical system Incorporating a Microlens Array," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35, pp. 375~379, 1996.
3. 이정현, "Bimorph 피에조 소자를 이용한 빔 회전 구동기의 개발," 97' 추계학술대회, pp. 450~453, 1997.
4. Michael Bass, Eric W. Van Stryland, David R. Williams and William L. Wolfe, Handbook of Optics, McGraw Hill Inc. New York, 1995.