

# 첨단 레이저가공용 고속 장행정 이송을 위한 보이스 코일 모터 기반의 구동기 설계

## Design of Actuator based on Voice Coil Motor with High Speed and Long Stroke Movement for Advanced Laser Micro-Fabrication

고등기술연구원 로봇/생산기술센터 이광일  
아주대학교 기계공학부 이문구  
고등기술연구원 로봇/생산기술센터 김호상  
고등기술연구원 로봇/생산기술센터 이경돈

### ABSTRACT

In this paper, actuator based on voice coil motor is designed and estimated to check the capability whether that system is in design specification or not. Design specification is moving range as  $20 \times 20 \text{mm}^2$  along  $XY$  axis in plane and maximizes bandwidth for high speed. The type of voice coil motor is selected with regarding design specification and minimizes the size of actuator. Flux density of designed voice coil motor is simulated. And PI controller is designed to maximize bandwidth of actuator. Finally, characteristic of designed actuator is simulated and that result reveals the validity of presented design.

Key Words : Vice coil motor (보이스 코일 모터), Maximized bandwidth (최대 대역폭), Flux density (자속 밀도), PI controller (PI 제어기)

### I. 서론

일반적으로 가공과 측정에서 구동기에 요구되는 주요사항은 제어기에서 내린 명령의 자세와 실제 작업에서 구동기의 자세를 정확하게 일치시키는 자세 결정 능력이다. 특히 공구와 가공 소재의 상대운동에 의하여 진행되는 가공에서는 생산성을 극대화하기 위하여 구동기에 고속 이송 능력이 추가로 요구된다. 또한 산업의 고도화에 의하여 가공 현장에서는 전체 가공 영역에서 마이크론 단위 이하의 가공 정밀도를 절실하게 필요로 한다. 이와 같이 구동기에 주어지는 요구사항을 충족시키기 위한 하나의 해결 방안으로써 이중서보 (dual servo)가 대두되고 있다. 이중서보는 전체 가공영역에서 이송부의 고속 장행정 이송을 담당하는 조동 구동기 (coarse actuator)와 제한된 가공영역에서 이송부의 정밀한 이송을 담당하는 미세 구동기 (fine actuator)로 구성된다. 이러한 이중서보의 구성 형태에는 PZT와 선형 모터, 보이스 코일 모터 (voice coil motor; VCM)와 선형 모터 등이 있다. [1] 본 논문에서는 첨단 레이저 가공을 위하여 보이스 코일 모터와 PZT로 구성된 이중 서보의 조동 구동기를 설계한다.

## II. 보이스 코일 모터 기반의 구동기 설계

본 논문에서 설계하고자 하는 구동기의 설계 조건은 다음과 같다. 평면 2축의 XY직선운동으로 이송영역  $20 \times 20 \text{mm}^2$ 를 충족시켜야 한다. 또한 구동기 이송부의 고속이송을 위하여 제어 대역폭을 최대화하여야 한다. 이를 위하여 주어진 설계한계 내에서 최대한의 추종 주파수를 가지도록 설계한다. 이와 관련하여 Abbott의 연구에서는 x축 직선운동으로 이송거리  $15 \text{mm}$ 를 충족시키며 약  $32 \text{Hz}$ 의 공진주파수를 보이고 있다. [2]

### 1) 보이스 코일 모터의 형태

본 절에서는 설계하고자 하는 구동기를 구성하는 보이스 코일 모터의 형태를 결정한다. 보이스 코일 모터의 기본 구동 원리는 플레밍의 왼손 법칙에 의하여 설명되며 다음과 같다. 전류  $I[A]$ 가 흐르는 길이  $l[m]$ 인 도체에 그림 1에 나타낸 바와 같이 협각  $\theta$ 의 자속밀도  $B[T]$ 가 주어지는 경우에 발생하는 힘  $F[N]$ 은 식 (1)과 같이 결정된다. [3]

$$F = B \times I \times l \sin \theta \quad (1)$$

이러한 경우에 힘  $F$ 에 의하여 자석부와 코일부에 상대 운동이 발생한다. 여기서 보이스 코일 모터의 형태는 이송부의 종류에 의하여 다음과 같이 구분된다. [4]

- 1) 코일부가 고정되고 자석부가 이송하는 형태이다. 이러한 형태의 보이스 코일 모터는 이송부에 주어지는 구동력의 작용점이 항상 고정되어 평면 3축  $(x, y, \theta)$  운동에서 제어가 용이하지만, 자석부의 큰 무게에 의하여 상대적으로 낮은 추종 주파수를 나타낸다.
- 2) 자석부가 고정되고 코일부가 이송하는 형태이다. 이는 구동력의 작용점이 고정되지 않기에 평면 3축  $(x, y, \theta)$  운동에서는 제어가 복잡하지만, 상대적으로 적은 코일부의 무게에 의하여 높은 추종 주파수를 나타낸다.

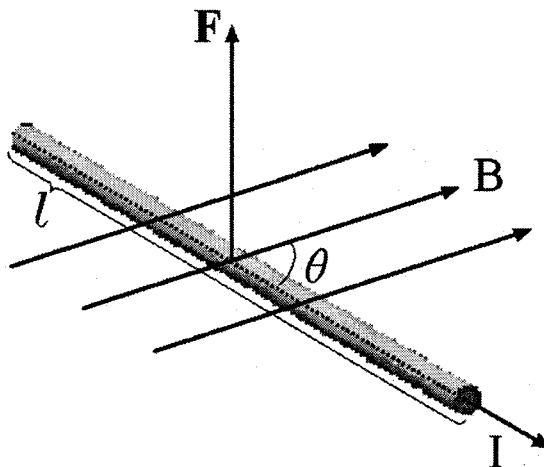


그림 1 보이스 코일 모터의 구동 원리

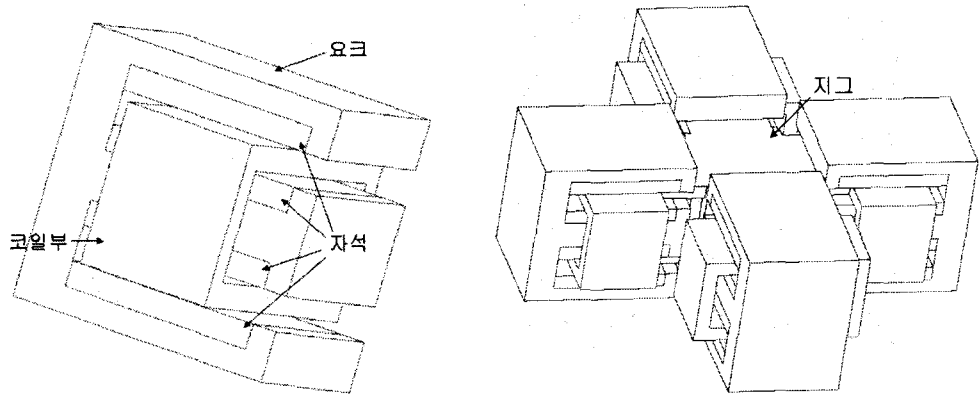


그림 2 (a) E-block 형태의 보이시 코일 모터, (b) 보이시 코일 모터로 구성된 구동기

이와 같은 경우에 본 논문의 설계 조건에 부합하는 보이시 코일 모터의 형태는 자석부가 고정되고 코일부가 이송하는 것이다. 평면 2축 XY직선운동의 경우에는 코일부의 각도 변화가 없으므로 제어가 복잡하지 않다. 또한 보이시 코일 모터의 특징은 전체 시스템의 크기에 비하여 상대적으로 적은 이송영역을 나타내는 것이다. 기존 연구는 전체 시스템의 크기의 약 2%에 해당하는 이송영역을 나타낸다. [5] 이러한 문제는 코일부의 이송방향과 직선운동 축의 일치를 통하여 해결된다. [6] 따라서 그림 2의 (a)에 나타낸 바와 같이 코일부의 이송방향이 직선운동 축과 일치하는 E-block 형태의 보이시 코일 모터를 설계하고 해석한다. 여기서 4개의 자석, 자석의 자기력선을 보존하는 요크 (yoke)와 구동력을 발생하고 이송되는 코일부를 나타낸다. 그리고 그림 2의 (b)는 4개의 보이시 코일 모터와 지그로 구성된 구동기를 나타낸다. 4개의 코일부와 지그로 구성된 이송부에는 표면과의 마찰에 의한 에너지 손실과 외란의 발생을 방지하기 위하여 공기 베어링을 사용한다.

표 1 보이시 코일 모터의 설계 변수 (단위: mm Ω N/A kg)

변수명	변수값
코일의 직경 $d_c$	0.600
코일의 turn 수 $n$	1403
코일의 저항 $R$	24.580
역기전력 상수 $k_b$	97.301
코일부와 자석사이의 공극 $t_a$	2.000
자석의 크기 $w_m \times h_m \times t_m$	80×80×10
요크의 크기 $w_y \times h_y \times t_y$	110×80×108
전체 이송부의 무게 $m_{total}$	7.000
구동기의 크기 $w_s \times h_s \times t_s$	315×315×108

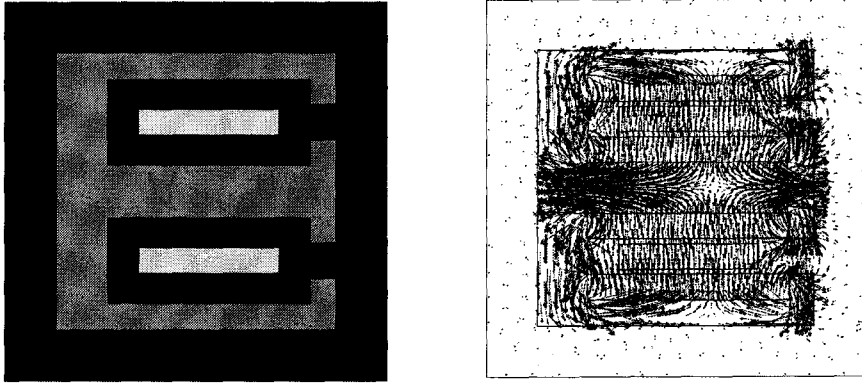


그림 3 (a) 보이스 코일 모터의 자기장 해석 모델, (b) 자기장 해석 결과

## 2) 보이스 코일 모터의 설계 및 해석

보이스 코일 모터의 설계 변수는 코일의 직경  $d_c$ , 코일의 turn 수  $n$ , 코일의 저항  $R$  역기전력 상수  $k_b$ , 코일부와 자석사이의 공극  $t_d$ , 자석의 크기  $w_m \times h_m \times t_m$  그리고 요크의 크기  $w_y \times h_y \times t_y$ 이다. 여기서 최대한 소형의 구동기 구조를 위하여 자석의 가로 길이와 세로 길이는 동일 ( $w_m = h_m$ )하다고 가정한다. 또한 코일의 제조 공차를 고려하여 코일부와 자석사이의 공극  $t_d$ 은  $2mm$ 로 결정한다. 그리고 이송부의 경량화를 위하여 코일부 지그의 재질은 베이클라이트 (bakelite, 비중: 1.4)를 이용하였다. 이러한 경우에 보이스 코일 모터의 설계 변수, 전체 이송부의 무게  $m_{total}$ , 구동기의 크기  $w_s \times h_s \times t_s$ 는 표 1에 나타낸 바와 같이 주어진다. 또한 코일부에 주어지는 자속밀도  $B$ 를 계산하기 위하여 상용프로그램 Flux2D를 사용하는 경우에 해석 모델은 그림 3의 (a)와 같이 결정되며, 해석 결과는 그림 3의 (b)에 나타낸 바와 같다. 여기서 코일부의 이송영역에서 발생하는 최대 자속 밀도  $B_{max}$ 는  $0.516T$ 이며 평균 자속 밀도  $B_{ag}$ 는  $0.433T$ 을 나타낸다. 따라서 보이스 코일 모터의 최대 추종 주파수를 결정하는 경우에는 평균 자속 밀도  $B_{ag}$ 를 사용한다.

## 3) 보이스 코일 모터의 PI 제어기 설계

보이스 코일 모터에 공기베어링을 사용하는 경우에는 저항 요소의 부재에 의하여 제한되지 않은 운동을 한다. 이를 제어하기 위하여 되먹임 제어기를 사용한다. 본 절에서는 PI 제어기를 설계하여 보이스 코일 모터의 최대 추종 주파수를 결정한다. 여기서 하나의 보이스 코일 모터에 주어지는 이송 무게는  $m = m_{total}/2$ 로 정의하자. 이러한 경우에 보이스 코일 모터의 입력 전압  $V(s)$ 와 출력 변위  $X(s)$ 의 관계인 전달 함수  $G_p(s)$ 는 코일의 인덕턴스를 무시하는 경우에 다음과 같이 결정된다. [7]

$$\frac{X(s)}{V(s)} = G_p(s) = \frac{k_b}{mR^2 + k_b^2 s} \quad (2)$$

표 2 보이스 코일 모터의 시스템 변수 (단위: V A)

변수명	변수값
비례 변수 $K_p$	$1.1959 \times 10^4$
적분 변수 $K_I$	$1.4052 \times 10^3$
최대 소비 전압 $V_{\max}$	239.180
최대 소비 전류 $I_{\max}$	9.731

또한 PI 제어기의 전달 함수  $G_c(s)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (3)$$

여기서 개루프  $G_c(s)G_p(s)$ 의 위상 여유  $\phi_m$ 은  $50^\circ$  이고 Routh-Hurwitz 안정도 기준을 충족하며 최대 추종 주파수  $\omega_{\max}$ 를 나타내는 PI 게인값을 결정하였다. [8] 또한 상용프로그램 matlab을 사용하여 보이스 코일 모터에 인가되는 최대 전압  $V_{\max}$ , 최대 전류  $I_{\max}$ 를 추정하였으며 표 2에 나타낸 바와 같다. 그리고 보이스 코일 모터의 공진 주파수는  $13.8\text{Hz}$ 이며, 대역폭 (bandwidth)은  $24.1\text{Hz}$ 이다. 이러한 결과는 평면 2축 XY직선운동과 상대적으로 장행정 이송 영역을 구현하였기에 기존 논문과 비교하는 경우에 충분한 타당성을 나타낸다. 추후 추종 주파수를 향상시키기 위하여 이송부의 경량화와 보이스 코일 모터의 최적 설계를 통한 평균 자속 밀도의 최대화를 진행한다.

### III. 결론

본 논문에서는 보이스 코일 모터 기반의 구동기를 설계하고 간단하게 검증하였다.

- 1) 설계 이송 영역을 충족시키고 최대 추종 주파수를 나타내기 위하여 합리적인 보이스 코일 모터의 형태를 결정하였다.
- 2) 보이스 코일 모터의 코일부에 주어지는 평균 자속 밀도를 모의실험을 통하여 결정하였다.
- 3) 보이스 코일 모터를 모델링하였으며, 최대 추종 주파수를 나타내기 위하여 PI 제어기를 설계하였다.

#### IV. 참고문헌

1. K. H. Kim : Design and Control of Ultra-precision Dual Servo Stage Using Voice Coil Motor and Halbach magnet array linear motor, Ph. D. Thesis, KAIST, pp. 7-14 (2006)
2. C. Abbott, R. Allott, B. Bann, K. Boehlen, M. gower, P. Rumsby, I. S. Beohlen and N. Sykes : New Techniques for Laser Micromachining MEMS Devices, Proceeding of SPIE, Vol. 4760, pp. 281-288 (2002)
3. D. C. Hanselman : Brushless Permanent-Magnet Motor Design, McGraw-Hill, Inc., pp. 46-47 (1994)
4. S. Q. Lee : Design and Continuous Gain Scheduling Control of High Precision XY $\theta$  Stage, Ph. D. Thesis, KAIST, pp. 18-20 (2001)
5. D. M. Kim : The Design and Control of XY $\theta$  Fine stage using VCM for Wafer stage, M. D. Thesis, KAIST (2002)
6. W. J. Kim, D. L. Trumper : High Precision Magnetic Levitation Stage for Photolithography, Pre. Eng., Vol. 22, No. 2, pp. 66-77 (1998)
7. Y. Koren : Computer Control of Manufacturing Systems, McGRAW-Hill, Inc., pp. 90-94 (1983)
8. C. L. Phillips, R. D. Harbor : Feedback control Systems, 4th Edition, Prentice Hall International, Inc., pp. 388-390 (2000)