

보이스 코일 모터의 정밀위치 제어를 위한 수학 모델링 및 검증

황진동*(부산대 대학원), 김주현(부산대 대학원), 곽용길(부산대 대학원)
김선호(동의대 메카트로닉스공학과), 안중환(부산대 기계공학부)

Mathematical modeling and experimental verification
for Precision Positioning Control of VCM

J. D. Hwang(Mech. Eng. Dept., PNU), J. H. Kim(Mech. Eng. Dept., PNU), Y. K. Kwak(Mech. Eng. Dept., PNU), S. H. Kim(Mechatronics Eng. Dept, Dongeui Univ.), J. H. Ahan(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

Voice Coil Motor is used linear motion actuator system that require precision positioning control. In order to control precision positioning of voice coil motor, Mathematical model of voice coil motor is needed. Mathematical model is obtained by combining voice coil motor's equation of motion with the equation of circuit and characteristic of voice coil motor. The induced model can predict output displacement according to duty ratio and amplitude. The model is verified by experimental test. Simulated results have tracking errors of less than 10 percent of experimental results

Key Words : 보이스 코일 모터(Voice Coil Motor), 모델링(Modeling)

1. 서론

산업용 기계 시스템의 구동원으로 70% 이상이 직선 왕복운동기구가 사용되고 있다. 직선 왕복운동기구는 서보모터의 회전운동을 직선운동으로 변환하는 복잡한 메카니즘이 일반적으로 사용되어 왔다. 이러한 시스템은 구성 부품이 갖는 높은 관성력 때문에 고속화에 한계가 있으며 기구적인 문제로 초정밀 위치제어에는 많은 어려움이 있었다.

운동 시스템을 좀 더 단순화하기 위해 리니어 모터(Linear Motor)가 개발되어 적용되었으나 이 경우에도 운동기구의 구조는 간단해졌으나 전기적인 시스템이 복잡하고 전기장치가 커지는 단점을 가져 소형 운동기구에 적용하기에는 어려움이 있었다.

그리고 정밀한 위치제어를 위해서 피에조 액츄에이터(Piezoelectric Actuator)가 적용되었지만, 비선형성에 대한 제어가 어렵고 출력이 약한 단점이 있다.^{1,2}

이러한 문제점을 해결하기 위해 보이스 코일 모터(Voice Coil Motor)를 고속 정밀 소형 운동기구에 적용하고자 하는 연구가 시도되고 있다.^{3, 4, 5, 6} 초기에는 부하가 비교적 적은 광 디스크 드라이브 시스템에 주로 적용이 되었으나, 최근에는 그 응용

범위가 반도체 공정용 미세 스테이지와 같은 전자 장비, 방전가공기, 미세 구멍 가공용 드릴 머신과 같은 공작기계로 확대되고 있는 추세이다.⁷

이러한 시스템에서 사용되는 보이스 코일 모터의 제어는 펄스폭 변조 방식에 의해 이루어지고 있지만, 펄스폭 변조 시 듀티비(Duty ratio)와 진폭에 따른 출력변위를 예측하는 구체적인 모델링 기법은 제시되지 않았다. 이러한 기법을 통한 수학적 모델은 구동시스템에서 발생하는 오차에 대응되는 듀티비와 진폭에 대한 정확한 값을 얻을 수 있으므로 제어성능의 향상을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 보이스 코일 모터의 정밀 위치제어를 위해 모터의 구동 특성을 고려한 듀티비와 진폭에 따른 변위 출력을 예측하기 위한 수학적 모델링을 제시하였다 그리고 수학적 모델링의 타당성 검증을 위한 평가 실험이 이루어졌다.

2. 보이스 코일 모터

2.1 보이스 코일 모터의 구조

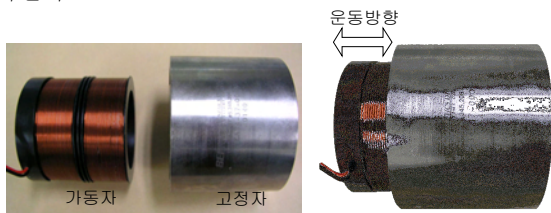
Fig. 1은 본 연구에 사용된 보이스 코일 모터의 모습이다. 보이스 코일 모터는 크게 가동자와 고정자로 구성된다.

고정자는 강자성체의 원통형으로 한쪽은 열려있고 반대쪽은 닫혀있고 영구자석이 서로 같은 극을 마주보도록 설계되어 있으며, 가동자는 비자성체 재료로 원통형으로 만들어졌으며, 코일이 원통 주위에 서로 반대 방향으로 감겨있다.

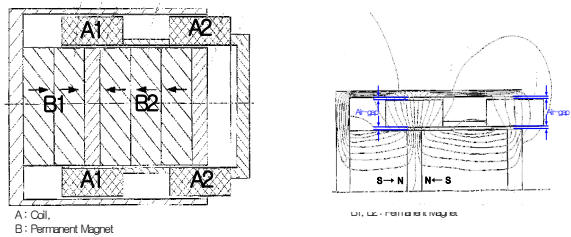
보이스 코일 모터의 가동자와 고정자를 조립하면 두 부분 사이에 코일에서 발생하는 열을 냉각하기 위한 에어 갭(Air-gap)이 존재한다. 이로 인하여 가동자를 지지하는 구조물이 없으면 중력에 의해 가동자와 고정자가 서로 접촉하게 되어 마찰이 발생한다. 이를 방지하기 위하여 가동자의 중심축과 고정자의 중심축을 동일 선상에 위치시켜주는 구조물이 필요하다. 리니어 가이드를 설치해서 고정자와 가동자의 동심도를 맞추었다.

2.2 보이스 코일 모터의 특성

Fig. 2의 (a)는 보이스 코일 모터의 내부 구조를 나타낸 것이며, Fig. 2의 (b)는 본 연구에 사용된 보이스 코일 모터의 자속경로를 시뮬레이션 한 그림이다. Fig. 2의 (b)에서 좌측으로 이동한 자속은 B1의 S극으로 들어가고, 우측으로 이동한 자속은 다시 에어 갭을 통과하여 코일 A2를 거쳐 자석 B2의 S극으로 들어간다. 여기서 코일 A1과 A2는 서로 반대방향으로 감겨있고 자속의 방향도 서로 반대이기 때문에 동일한 방향으로 힘이 생성된다. 이때 생성되는 힘은 축방향의 힘이다. 이 힘에 의해 보이스코일 모터의 가동자가 움직이게 된다. 여기서 고정부가 열린 쪽 즉, Fig. 2의 (b)에서 우측으로 이동한 자속은 2개의 에어 갭을 지나야 하기 때문에 좌측으로 이동한 자속보다 자속밀도가 약하게 된다. 이러한 자속밀도의 불균형을 해소하기 위하여 좌측 B1의 자석의 세기를 을 우측 B2의 자석보다 상대적으로 작게 한다.⁸ 구조적으로 가동자의 위치에 따라 자속밀도가 균일하게 분포하지 않기 때문에 가동자의 위치에 따라 힘의 비선형성이 나타난다.



(a) VCM Parts (b) Assembly of VCM
Fig. 1 Photograph of Voice Coil Motor



(a) Inner Structure of VCM (b) Magnetic flux paths of VCM
Fig. 2 Voice Coil Motor

3. 시스템 모델링

3.1 보이스 코일 모터의 모델링

보이스 코일 운동의 시스템의 동적 거동을 예측하기 위해 모델링을 수행하였다. 보이스코일 모터의 운동방정식은 식(1)로 표현된다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F \quad (1)$$

식(1)의 힘은 전기적인 방정식 즉 코일에 흐르는 전류의 항으로 표현 할 수가 있는데 힘 F는 로렌츠의 힘(Lorentz Force)에 의해 생성되므로 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$F = NBil = K_f \cdot i \quad (2)$$

N: 코일이 감긴 수, B: 자속 밀도

l: 도체의 길이, K_f : 비례 정수

보이스 코일 모터를 등가회로로 표현 했을 때 회로 방정식은 식(3)과 같다.

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K_b \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

L: 코일의 인덕턴스

K_b : 역기전력 정수

식(1), (3)을 라플라스 변화하여 보이스 코일 모터의 전달함수 G(s)를 구하면 식(4)와 같다.

$$\frac{X(s)}{V(s)} = \frac{K_f}{Lms^3 + (Lb + mR)s^2 + (Lk + bR + K_f K_b)s + kR} \quad (4)$$

3.2 PWM제어

보이스코일 모터를 제어하기 위하여 PWM방식의 제어를 사용하였다. 실제 변위제어에 대한 듀티비와 진폭의 관계를 구하기 위해 식(1), (3)을 라플라스 변환하여 정리하면 식(5), (6)과 같다.

$$ms^2X(s) - msx(0) - m\dot{x}(0) = K_f I(s) \quad (5)$$

$$LsI(s) - Li(0) + RI(s) = v - K_b sX(s) + K_b \dot{x}(0) \quad (6)$$

듀티비 변화에 따른 보이스코일 모터의 변위출력 관계식을 얻기 위해서는 펄스 변환점에서의 위치, 속도 전류값을 고려하여야 한다. 초기조건을 고려하여 식(5), (6)을 정리하면 식(7)과 같다.

$$X(s) = \frac{1}{s}x(0) + \frac{Lms + \dots}{Lms^3 + s^2 + k_b k_f s} \dot{x}(0) + \frac{K_f}{Lms^3 + s^2 + K_b K_f s} V + \frac{LK_f}{Lms^3 + s^2 + K_b K_f s} i(0) \quad (7)$$

식(7)을 라플라스 역변환을 하면 식(8)과 같이 듀티비와 진폭에 따른 변위식을 구할 수 있다.

$$x(t) = x(0) + \left\{ c_{11} \left[e^{-at} \cos ut + \frac{c_{21}/c_{11} - a}{w} e^{-at} \sin ut \right] + c_{31} \right\} \dot{x}(0) + \left\{ c_{12} \left[e^{-at} \cos ut + \frac{c_{22}/c_{12} - a}{w} e^{-at} \sin ut \right] + c_{32} + c_{42}t \right\} V_1 + \left\{ c_{13} \left[e^{-at} \cos ut + \frac{c_{23}/c_{13} - a}{w} e^{-at} \sin ut \right] + c_{33} \right\} i(0)$$

$$\begin{aligned}
c_{11} &= -3.52 \times 10^{-3}, & c_{21} &= -1.59298, & c_{31} &= 3.52 \times 10^{-3} \\
c_{12} &= 1.395 \times 10^{-4}, & c_{22} &= 6.631 \times 10^{-2}, & c_{32} &= -1.395 \times 10^{-4}, \\
c_{42} &= 4.163 \times 10^{-2}, & c_{13} &= -7.911 \times 10^{-5}, & c_{23} &= -5.83 \times 10^{-2}, \\
c_{33} &= 7.9114 \times 10^{-5}
\end{aligned}
\tag{8}$$

$$i(t) = e^{-at} \sin ut \left\{ \frac{V_1 - k_b \dot{x}(0) - Lai(0)}{Lw} \right\} + e^{-at} \cos ut (i(0))
\tag{9}$$

시간 t 를 듀티비로 정의하면 $i(t)$ 와 $x(t)$ 를 통해 듀티비와 진폭에 대한 출력 변위 관계를 알 수 있다. 식(8)을 통해 PWM신호의 듀티비가 증가할수록 모터의 속도가 증가함을 알 수 있다. Fig. 3은 PWM의 듀티비를 50%로 고정하고 진폭을 다르게 했을 시 나타나는 수학적 모델의 변위 예측치를 나타낸다. 처음 PWM과가 입력될 때 약간의 변위 증가가 보였고 그 이후로 변위 변화없이 일정한 위치에 정지해 있는 것을 볼 수 있다. 초기에 변위가 증가하는 이유는 PWM 제어에서 펄스 입력 변화시의 가동자의 속도가 다르기 때문에 나타나는 현상이다.

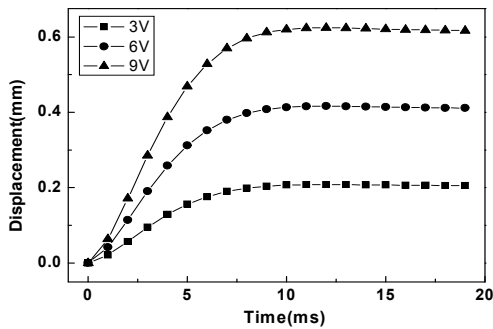


Fig. 3 Response of Duty ratio 50% according to input value

4. 실험 장치 및 제어 시스템

4.1 실험 장치 구성

시스템의 구성은 변위 지령을 주기 위한 PC와 제어를 위한 컨트롤러, PWM 신호를 전류로 변환하기 위한 전류드라이브, 그리고 보이스 코일 모터와 이송부의 변위를 측정하기 위한 리니어 엔코더(Linear Encoder)로 구성된다.

이 시스템에 사용된 보이스 코일 모터의 순간 최대 힘(Peak force)은 440N이다. 그리고 보이스 코일 모터의 구동 시 가동자의 변위량을 모니터링하기 위하여 리니어 엔코더를 사용하였다. 이 리니어 엔코더의 분해능은 0.5 μ m, 최대 측정 속도는 1 m/s이다. 전류드라이버는 최대 RMS 30V, 20A의 출력을 낼 수 있으며 입력에 대한 응답주파수는 최대 20kHz까지 가능하다.

4.2 제어시스템

시스템을 제어하기 PC_NC기반의 제어시스템을

구성하였고, Fig. 4은 시스템의 제어프로그램의 흐름을 나타낸 블록선도이다.

시스템의 제어순서는 다음과 같다. 우선 PC를 이용하여 사용자가 원하는 변위 지령을 입력한다. 입력된 변위 지령은 시리얼통신을 이용하여 PWM신호를 고속으로 발생시킬 수 있는 컨트롤러로 넘어가게 된다.

컨트롤러의 내부에서의 제어프로그램의 흐름은 다음과 같다. 입력된 지령이 해석기(Interpreter)를 통하여 현재 축에 적합한 지령으로 변환되고, 변환된 지령에 대하여 보간기(Interpolation)를 거쳐서 제어 주기마다 지령할 속도 프로파일(Velocity Profile)을 생성한다. 생성된 속도프로파일은 연속적인 지령에 대해 부드러운 구동을 하기 위해 원형큐(Circle Queue)에 저장이 된다.

컨트롤러에는 미리 입력시켜둔 제어프로그램이 있어 이 제어 프로그램이 변위지령 입력받아 이를 제어 주기로 나누어 한 제어 주기에 가야할 변위를 계산하게 된다. 그리고 단일 제어 주기에 가야할 변위가 결정되면 그 변위의 크기에 따라 미리 입력시켜둔 속도 테이블에 의하여 PWM의 듀티비를 결정한다. 이 듀티비를 기초로 PWM과형을 생성하고 이를 변환 회로로 보내어 PWM신호를 변환한 다음 전류드라이브로 출력되도록 한다. 전류드라이브에서는 변환된 PWM신호를 입력받아 PWM신호에 해당하는 전류 신호를 보이스 코일 모터로 주어 보이스 코일 모터를 구동한다. 보이스 코일 모터가 움직이게 되면 리니어 엔코더를 이용하여 보이스 코일 모터의 변위를 측정하고 컨트롤러를 이용하여 변위측정값을 읽어 들인다. 컨트롤러에서는 측정된 변위와 입력변위와 비교하여 오차를 구하고 이 오차 값에 해당하는 듀티비를 가진 PWM신호를 다시 출력하게 된다. 그리고 위의 과정을 반복하여 위치 추종을 하게 된다

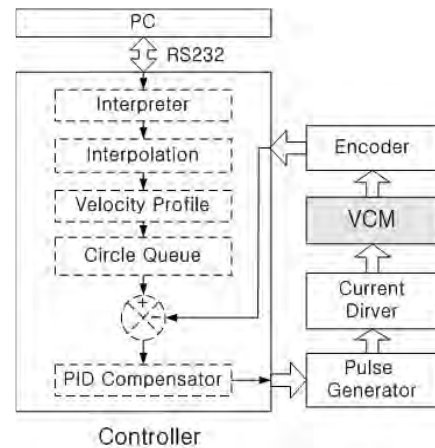


Fig. 4 Block diagram for control program of VCM

5. 실험결과 및 평가

보이스 코일 모터의 수학적 모델식(8)의 전달함수가 실제 시스템을 정확하게 표현하고 있는지를 알아보기 위하여 보이스 코일 모터에 구동 전류를

입력으로 주고 변위를 측정하였다. 그리고 식(8)의 전달함수를 이용하여 매트랩(Matlab)에서 동일한 입력을 주어 출력변위를 구하고 이를 실제 실험에서 측정한 변위와 비교하여 수학적 모델링의 타당성을 검증하였다.

Fig. 5는 보이스코일 모터에 스텝 입력을 주었을 때 속도 응답을 측정하여 수학적 모델식을 이용하여 구한 속도 응답을 비교한 것이다. 속도의 상승 시간이 수학적 모델보다 실제 시스템이 약간 지연되는 것을 그래프로부터 알 수 있다. 이는 리니어 가이드의 마찰을 수학적 모델링에서는 고려하지 않았기 때문에 나타나는 현상이다. 하지만 최종적인 결과 속도는 수학적 모델식과 실험 결과치가 유사하다.

Fig. 6은 보이스코일 모터에 사인(SIN)파 형태의 전류 신호를 입력으로 주었을 때 입력 주파수에 따른 수학적 모델의 변위 응답과 실제 실험시의 변위 응답을 비교한 결과이다.

사인파의 주파수를 50Hz에서 300Hz까지 변화시키면서 입력을 주었을 때 보이스코일의 변위 응답도 사인파와 같은 형태를 가진다. 이때 사인파의 한주기의 최대, 최소값을 보이스코일 모터의 총 변위량으로 정의하고 이를 주파수별로 측정하였다. 그리고 수학적 모델식을 이용하여 동일한 사인파 입력을 주어 변위의 최대, 최소값을 구하고 총 변위량을 계산하여 그래프로 나타내었다. 두 결과의 오차는 최소 1%에서 최대 10% 이내로 나타났다. 이는 보이스코일 모터가 실제 시스템에 적용될 때 시스템에서 요구하는 사양이 만족되는지를 평가하는 기준이 된다. 즉 동일 조건에서의 수학적 모델의 결과와 실제 시스템에서 요구되는 사양의 오차가 10%이내에 있으면 보이스코일 모터가 실제 시스템의 요구사항을 만족하여 적용 가능성을 나타낸다.

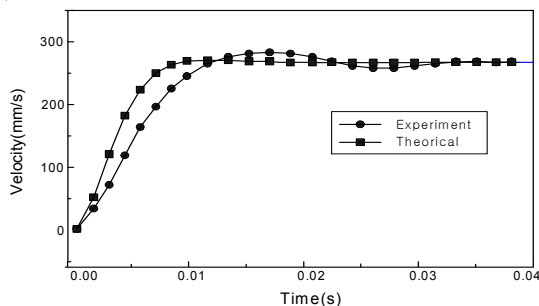


Fig. 5 Step Response of VCM

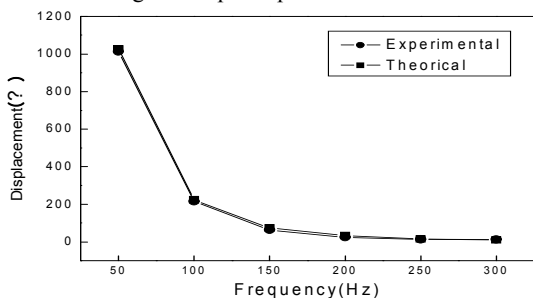


Fig. 6 Displacement of VCM according to frequency

6. 결론

본 논문에서는 보이스코일 모터 제어 시 PWM의 듀티비와 진폭에 따른 변위 출력을 예측하기 위한 시스템의 수학적 모델을 구하고 이를 실제 실험을 통해 평가하였다.

- (1) 보이스코일 모터의 PWM제어를 위하여 수학적 모델링으로부터 초기조건을 고려한 시간역 응답에 관한 식을 유도하였다.
- (2) 보이스코일 모터의 특성을 파악하기 위하여 수학적 모델링을 구하고 이를 실험결과와 비교하였을 때 최대 10% 오차 이내였다

후 기

본 연구는 2004년도 학술진흥재단 신진교수연구과제(2004-003-D00030)의 지원에 의해 연구된 결과물임

참고문헌

1. Kim, H. S. and Kim, E. J., "Feed-forward control of fast tool servo for real-time correction of spindle error in diamond turning of flat surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp.1177-1183, 2003.
2. Woronko, A. and Huang, J., "Piezoelectric tool actuator for precision machining on conventional CNC turning center," *Precision Engineering*, Vol. 27, pp.335-345, 2003.
3. Hwang, C. L., Wei, M. H. and Jieng, W. J., "Non circular cutting with a lathe using a three stage intelligent controller," *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 13, No. 3, pp. 181-191, 1997.
4. Hwang, C. L. and Shi, Y. D., "Noncircular cutting on a lathe using tool position and differential motor current," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp.209-227,1998.
5. Lu, Y. T., Fung, R. F. and Wang, C. C., "Precision position control using combined piezo-VCM actuators," *Precision Engineering*, Vol. 29, pp.411-422, 2005.
6. Peng, K., Chen, B. and Lee, T. H., "Design and implementation of a dual-stage HDD servo system via composite non-linear control approach," *Mechtronics*, Vol.148, pp.965-988, 2004.
7. Hwang, C. L., Shi, Y. D., "Noncircular cutting on a lathe using tool position and differential motor current," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 39, pp.209-227, 1999.
8. BEI Electronics, Inc "Moving Coil Actuator Utilizing Flux- Focused Interleaved Magnetic Circuit," United States Patent, Jun. 10, 1993.