

2축 선형 액츄에이터의 전류 PI제어기 설계

전찬용*, 김재한*, 목형수*, 최규하*, 이정민**, 김상훈***, 김태훈****
*건국대학교, ** (주)효성, ***강원대학교, ****LIG Nex1

Design of Current PI Controller for 2-Axis Linear Actuator

Chanyong Zun*, Jaehan Kim*, Hyungsoo Mok*, Gyuha Choe*, Jungmin Lee**
, ***Sanghoon Kim, ****Taehoon Kim
*Konkuk Univ., **Hyosung Corp., ***Kangwon Univ., ****LIG Nex1

ABSTRACT

The actuators of anti-vibration system(AVS) can be separated into several types: piezoelectric actuators, pneumatic springs, cylinders, rotating motor and linear motor. The last one has some advantages, such as low noise, low vibration, simpler configuration and possibility of direct drive. The voice coil motor(VCM) is one type of linear motor, originally used in speaker system. VCM actuators are usually used in occasions that rapid and controlled motion of devices are required.

In this paper, a controller which satisfies system specification(e.g. current controller bandwidth) within whole operation range is designed. For that objective, parameters as position were initially obtained with 3D FEM analysis and motor modeling was performed. A current controller in 2-axis VCM drive system was designed and then performance of the proposed controller was verified with simulation using Simplerer and an experimental result.

VCM에서처럼 영구자석의 크기가 코일의 면적보다 작은 경우 무빙코일의 위치에 따라 코일을 통과하는 자속이 코일의 위치에 따라 변화하는 특성을 갖고 있다. 코일의 위치에 따라 자속의 세기가 변화하는 경우에는 VCM의 파라미터(인덕턴스, 토크상수, 역기전력상수)가 위치에 따라 변화할 가능성이 존재하기 때문에, 이에 대한 해석이 필요하다^[3].

일반적인 토크(전류)제어시스템에서의 대역폭은 스위칭 주파수 및 용도에 따라 수십~수백 Hz 정도이지만, AVS에서는 기계적인 진동을 억제해야 하기 때문에 수 kHz의 대역폭을 요구한다. 따라서 20kHz 이상의 스위칭 주파수를 요구하며, VCM의 파라미터를 정확히 산출하여 토크(전류)제어기를 설계해야 한다. 본 논문에서는 VCM의 전 운전 영역에서 시스템의 사양을 만족하는 고 대역폭을 갖는 토크(전류)제어기를 설계한다. 이를 위해 우선 3차원 FEM 해석을 통해 위치에 따른 parameter를 추출하고, 전동기 모델링을 수행한다. 2축 VCM 구동시스템에서의 전류PI 제어기를 설계한 후 설계한 제어기의 특성을 Simplerer를 이용한 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증한다.

1. 서론

정밀 측정장비의 운전 및 정밀공정에서 기계적 구조에 의한 진동 혹은 원하지 않는 진동에 민감하게 동작하기 때문에 정확도에 영향을 줄 뿐만 아니라 기계 자체의 수명에도 영향을 미친다. 이러한 진동을 제어하는 시스템을 Anti-Vibration System(AVS) 이라하고, 여러 형태의 원하지 않는 진동을 감소시키는 역할을 수행한다. AVS에서 사용하는 액츄에이터(actuator)에는 압전형액츄에이터, 공압형 스프링, 실린더, 회전형 전동기, 선형전동기등이 있는데, 그 중 선형전동기가 노이즈 발생이 적고, 자체의 진동이 작다는 장점이 있고, 비교적 간단한 구조일 뿐 아니라, 직접구동(Direct drive)가 가능하기 때문에 AVS용으로 많이 사용되고 있다. VCM은 스피커 시스템에 주로 사용되고 있는 선형전동기의 한 종류이고, 제어가 쉽고, 제어속도가 빠른 특성을 갖고 있다^{[1],[2]}.

VCM은 설치 공간의 제약 때문에 모터자체의 구조가 영향을 받을 수 있다. 영구자석의 크기가 코일의 이동반경보다 큰 경우 코일을 통과하는 자속의 크기가 코일의 위치와는 무관함으로 토크상수, 역기전력 상수가 일정하지만, 그림1에 제시한

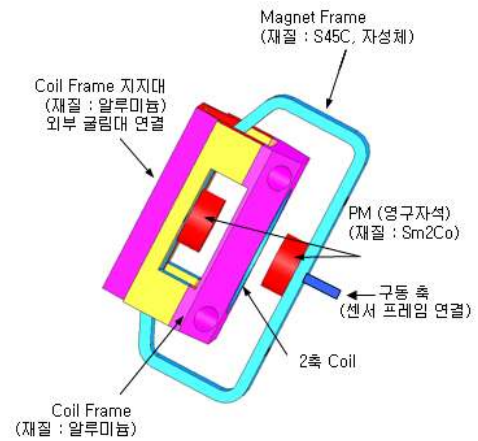


그림 1 Voice-coil motor(VCM)의 형상
Fig. 1 A feature of a voice-coil motor (VCM)

2. VCM의 3D FEM 해석 및 모델링

2.1 VCM의 3D FEM 해석

본 논문에서 사용한 VCM의 제원은 그림 2와 같고, VCM의

특성을 파악하기 위해 3D FEM 해석을 수행하였다. 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 코일 면적은 160mm², 점적율 61%(구리 동선), 403Turns, 코일직경 0.55mm², 정격전류 1.30의 값을 갖는다.

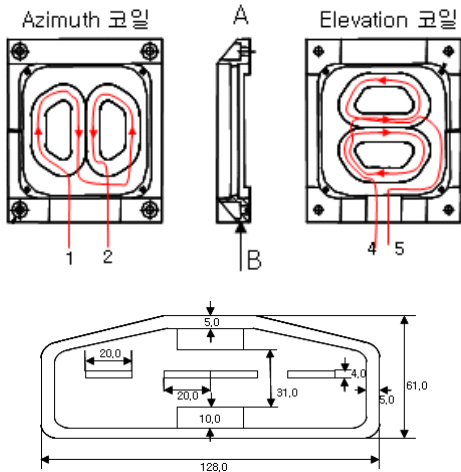


그림 2 VCM의 제원
Fig. 2 Mechanical specification of VCM

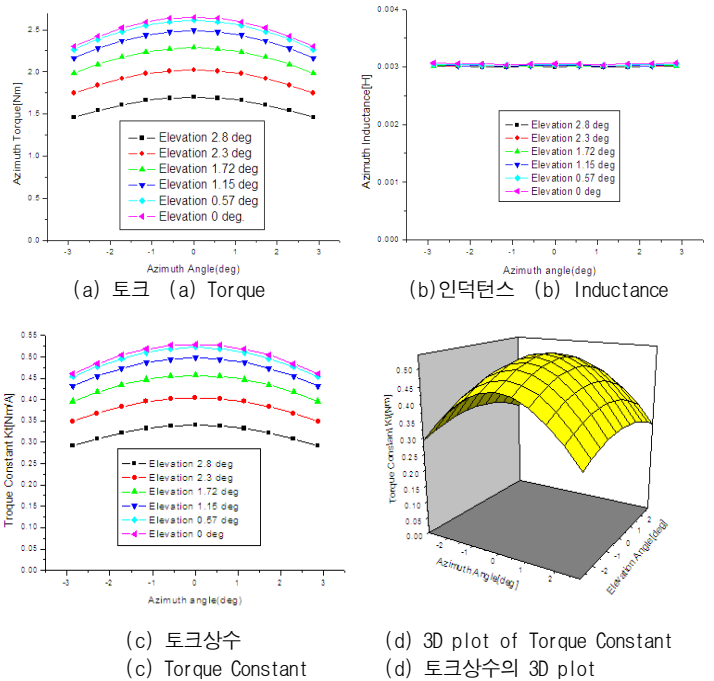


그림 4 위치에 따른 VCM 파라미터의 변화
Fig. 4 Variation of VCM parameters as position

그림 4에는 위치에 따른 토크와 인덕턴스 값을 나타내었다. 토크의 크기는 자속의 크기에 비례하여 변화하지만, 인덕턴스는 위치에 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 VCM이 다른 전동기와는 달리 공극이 매우 크기 때문이며, 따라서 선형 전류제어기를 설계가 가능함을 알 수 있다. VCM의 역기전력상수 K_e 와 토크상수 K_t 는 그림 4에서와 같이 위치에 따라 변화함을 알 수 있다. 방위각 0°이고 높이 0°일때 최대의 K_t 값을 갖고, 방위각 0°이고 높이 0°일때 최소의 K_t 값을 갖는다. 따라서 토크상수는 위치에 따른 비선형성을 갖게되고, 이의 보상은 자이로스코프와 같은 위치센서를 이용하여, 이에 대한 보상을 수행한다.

2.2 VCM의 모델링

VCM의 기계적인 방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = K_t \cdot i - B \cdot \omega_m \quad (1)$$

여기서, J 와 K_t 는 각각 액츄에이터의 관성계수와 토크상수이며, ω_m 은 각속도이다.

한편, 액츄에이터에 대한 전기적 등가회로의 수식은 다음과 같다.

$$v = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + K_E \cdot \omega_m \quad (2)$$

여기서, v 와 K_e 는 액츄에이터에 공급되어지는 전압과 역기전력상수이며, R 과 L 은 각각 코일의 저항과 인덕턴스이다.

3. 전류 PI 제어기의 설계^[4]

일정 스위칭 주파수를 갖는 전류제어형 PWM 인버터 시스템에서, 측정된 인버터의 출력전류 i 와 기준전류 i^* 간의 오차

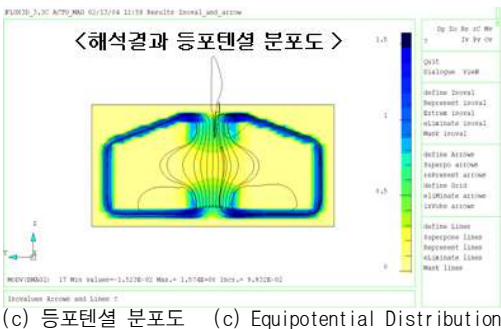
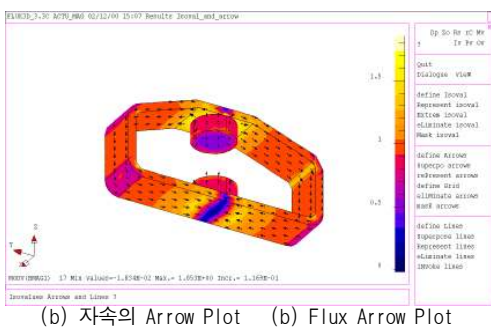
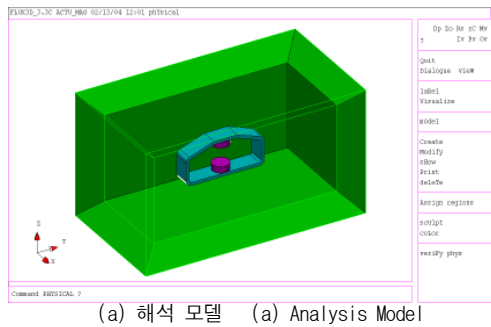


그림 3 VCM의 3D FEM 해석결과
Fig. 3 Analysis result by 3D FEM

는 제어기를 이용하여 제어전압 V_c 를 출력하여 제어하는 전류 피드백제어기에 의해 조절된다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 피드백제어기 G_c 는 PI제어기이다.

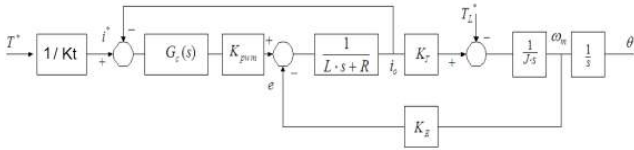


그림 5 전류제어기의 블록다이아그램의 구성
Fig. 5 A configuration of a block diagram of current control system

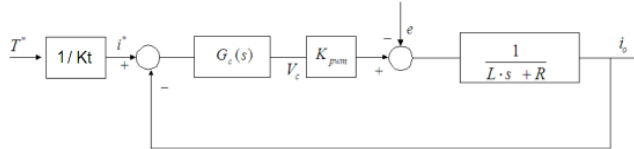


그림 6 전류제어기의 등가 블록다이아그램의 구성
Fig. 6 A configuration of an equivalent block diagram of current control system

그림 6.의 전동기구동시스템에서 PI제어기 이득의 선정은 개루프 전달함수(Open loop transfer function)에 Pole-zero cancellation 방법을 일반적으로 사용한다. 먼저 전동기의 전기적인 시정수 τ_e 발생하는 개루프 전달함수의 극점 $1/\tau_e$ 을 PI 제어기의 영점 k_i/k_p 로 상쇄시키면 식(5)와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$k_p = \tau_e \cdot k_i \quad (5)$$

이 때 Pole-zero cancellation 이후의 개루프함수는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{OL}(s) = k_{OL}/s \quad (6)$$

$$\text{여기서, } k_{OL} = k_i \cdot k_{pwm}/R \quad (7)$$

교차주파수(cross frequency) $\omega_c = k_{OL}$ 의 관계로부터 PI 제어기의 적분이득을 식(8)로부터 구한다.

$$k_i = \omega_c \cdot R/k_{pwm} \quad (8)$$

교차주파수 $\omega_c = k_{OL}$ 의 선택은 스위칭에 의한 간섭을 피하기 위해 스위칭 주파수의 1/5~1/10이하로 선정한다. 본 논문에서 사용한 선형 액추에이터의 파라미터와 선정된 PI 전류 제어기의 이득은 표 1과 같다.

표 1 선형액추에이터의 파라미터와 PI 제어기 이득
Table 1 Linear Actuator Parameters & PI controller Gain

저항(Ohm)	4	L(mH)	2.8
ke(Vsec/rad)	1.770	관성계수(kgm ²)	0.5
시정수(msec)	0.7	ki	25132
kp	3.66	kpwm	24/5

4. 전류 PI 제어기의 아날로그 회로 구현

4.1 아날로그 PI 전류제어기의 구현

OP-Amp로 구현한 전류 PI 제어기의 구성은 그림 7과 같다.

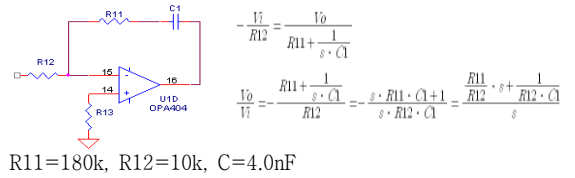
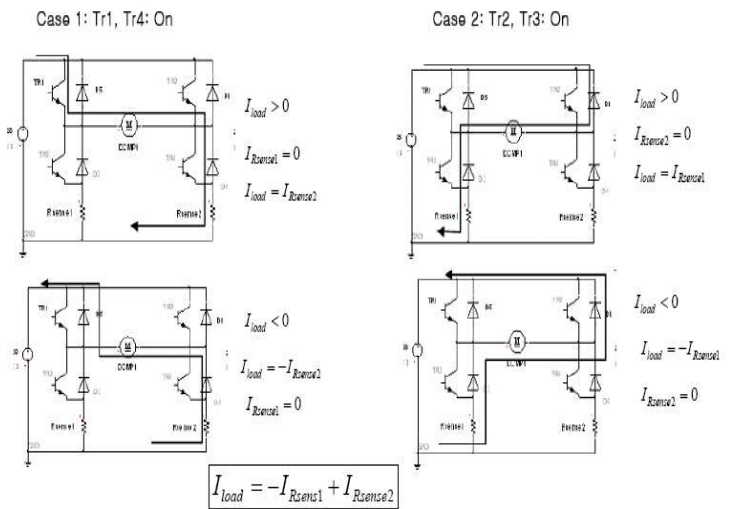


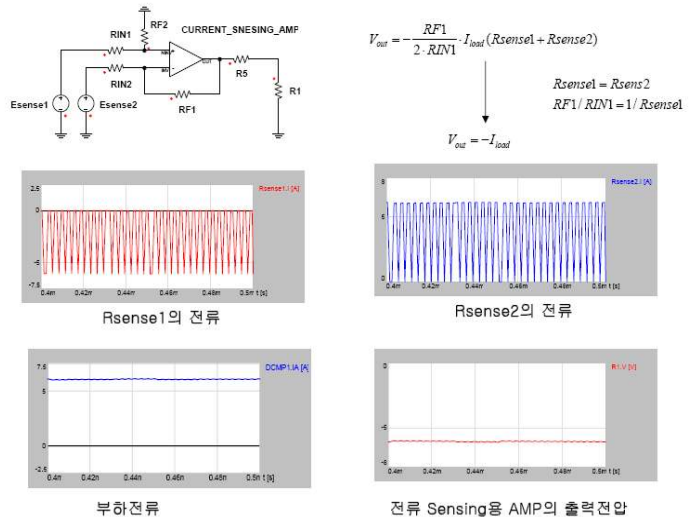
그림 7 OP-Amp로 구현한 아날로그 PI 전류제어기
Fig. 7 Analog PI current controller implemented with OP-Amp

4.2 저항을 이용한 전류측정법

고대역폭을 갖는 전류제어를 위하여 그림 8과 같이 저항을 이용하여 전류를 측정하는 방법을 사용하였다.



(a) 저항을 이용한 전류 측정 원리
(a) Current measurement principle using resistance



(b) 전류측정을 위한 아날로그 회로 및 시뮬레이션 파형
(b) Analog circuit for current measurement and simulation waveform

그림 8 저항을 이용한 전류측정
Fig. 8 Current measurement using resistance

5. 시뮬레이션 및 실험

VCM에 대해 설계한 전류 PI제어기의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 그림 9에서와 같이 Simplorer를 이용하여 수행하였으며, 전류제어기의 Bandwidth는 4kHz로 설계하였다. 설계한 제어기의 특성시험은 1kHz의 정현파 전류기준치를 입력하여 전류제어의 특성을 파악하였다. 그림 10은 같은 조건에서 전류기준치(1.5A peak)와 실제전류값을 나타낸다. 이때 PWM H-Bridge MOSFET의 스위칭 주파수는 40kHz이며, MSK사의 75V, 10A 모듈을 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 1kHz의 전류지령에 대하여 잘 추종하고 있음을 알 수 있고, 그림 9의 시뮬레이션 결과와 그림 10의 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

과 실험을 통하여 검증하였다.

이 논문은 “산업자원부 전력IT 기술개발사업(R-2005-1-396-001)”의 지원으로 연구되었음

참고 문헌

- [1] T. H. Chen, K. C. Huang, C. M. Liaw, “High-frequency Switching-mode Power Amplifier for Shaker Armature Excitation,” IEE Proc. on Electr., Vol. 144, No. 6, pp. 415-422, November 1997
- [2] JYi-De Chen, Chyun-Chau Fuh, and Pi-Cheng Tung, “Application of Voice Coil Motors in Active Dynamic Vibration Absorbers,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 3, pp. 1149-1154, March 2005
- [3] A. Babinski and T. C. Tsao, “Acceleration feedback design for voice coil actuated direct drive,” in Amer. Control Conf., vol. 5, 1999, pp. 3713-3717.
- [4] 설승기, “전기기기제어론,” pp. 105-112.

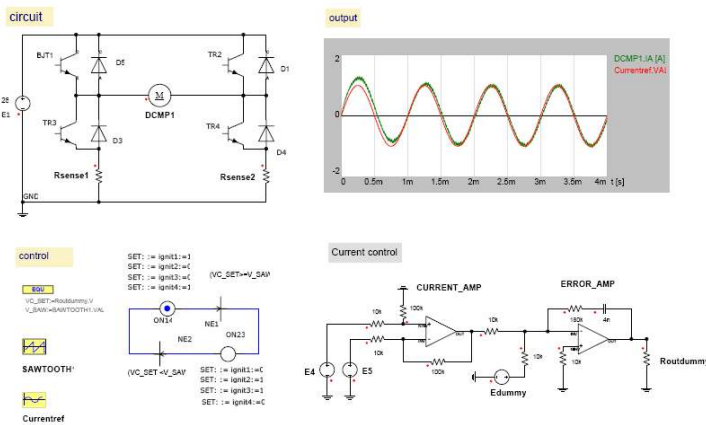


그림 9 Simplorer를 이용한 시뮬레이션 결과
Fig. 9 Simulation result using Simplorer

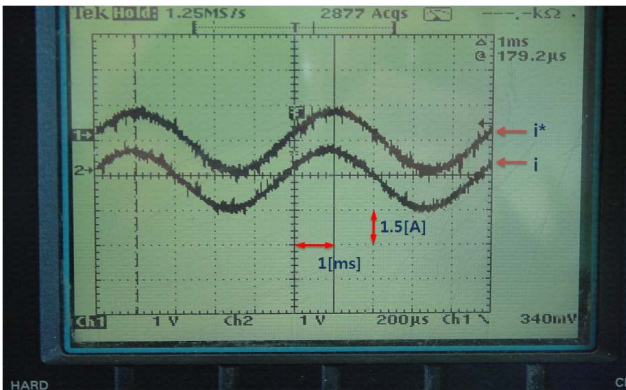


그림 10 실험파형 (종축:1.5A/Div, 횡축:1ms/Div)
Fig. 10 Experimental Result (y-axis:1.5A/Div, x-axis:1ms/Div)

6. 결론

본 논문에서는 Anti-Vibration System(AVS)를 위한 VCM의 전 운전 영역에서 시스템의 사양을 만족하는 고 대역폭을 갖는 토크(전류)제어기를 설계하였다. 이를 위해 우선 3차원 FEM 해석을 통해 위치에 따른 parameter를 추출하고, 전동기 모델링을 수행하였다. 2축 VCM 구동시스템에서의 전류PI 제어기를 설계한 후 OP-Amp를 이용한 아날로그회로로 구현하였다. 설계한 제어기의 특성을 Simplorer를 이용한 시뮬레이션