

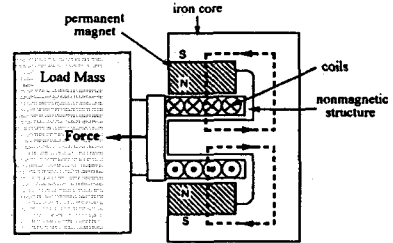
보이스코일형 LOA의 제어정수 산정을 위한 특성 해석 및 시험

장석명*, 정상섭*, 박희창**, 문석준**, 박찬일**, 정태영**
 *충남대학교 전기공학과, **한국기계연구원

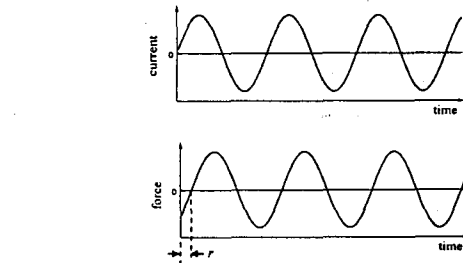
Characteristic Analysis and Test of a Voice-Coil-Type LOA for Determination of Control Parameters

S.M.Jang*, S.S.Jeong*, H.C.Park**, S.J.Moon**, C.I.Park**, T.Y.Chung**
 *Chungnam National Univ. **KIMM

Abstract - A voice-coil-type LOA consists of the NdFeB permanent magnets with high specific energy as the stator, a coil-wrapped nonmagnetic hollow rectangular structure, and an iron core as a pathway for magnetic flux. When applying a voice-coil-type LOA to the control system, we have to obtain the control parameters and circuit parameters, such as mass, coil inductance, coil resistance, thrust voltage & stroke, frequency & stroke and so on. Therefore, these parameter were determined from the analytical and experimental method.



(a)



(b)

그림 1 보이스코일형 LOA

$$F_x = 2INB_m i = k_E i \quad (1)$$

여기서 i 은 공급자계속에 있는 가동코일의 축방향 유효 길이, N 은 공급자계속에 있는 가동자 코일에서의 유효 권선수, B_m 은 영구자석 동작점에서의 자속밀도, i 는 가동자 코일에 흐르는 전류, k_E 는 추력 및 유기전압 상수로 $2INB_m$ 이다.

2.1.2 제작된 모델과 주요 사양

보이스코일형 LOA는 그림 2과 같이 NdFeB계열의 영구자석에 의한 고정자와 플라스틱 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성되며, 그 주요 사양은 표 1과 같다.

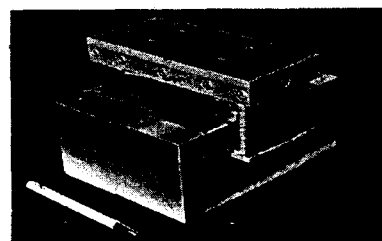


그림 2. 보이스코일형 LOA의 실제 제작 사진

1. 서 론

리니어 진동 액츄에이터(LOA)는 정현파 또는 펄스형 구형파의 교번전압을 공급하여 일정 스트로크로 왕복운동을 하는 리니어모터이다. 그 중에서도 보이스코일형 LOA는 영구자석으로 이루어지는 계자와 보빈에 코일을 감은 가동체로 구성되며, 선형성과 고정밀제어성 등에서 특별히 우수한 장점을 갖는 액츄에이터이다. 따라서 스피커, 마이크로 폰 등은 물론이고 컴퓨터 드라이브, 위치제어 시스템 등의 초정밀 서보시스템 분야에서 구동원으로 널리 사용되고 있다. 그러나 지금까지는 영구자석 재료로 페라이트, 사마륨코발트 등이 사용되었기 때문에 소형 시스템으로만 응용 개발이 되었으나, 최근 잔류자속밀도가 1.0T이상의 합금재료인 NdFeB가 개발됨에 따라 고밀도 영구자석을 이용한 고출력 대형 시스템의 제작이 가능해졌다.

본 논문에서는 전자기력 액츄에이터인 보이스코일형 LOA를 제어시스템에 이용하기 위한 전달함수를 구하고 이를 위해 선형성과 고정밀성을 특성 시험을 통해 확인하였다. 또한, 추력발생의 속응성에 관계된 제어정수 중에 코일 인덕턴스를 FEM 해석과 전류의 턴-온 특성 시험을 통해 구했다.

2. 본 론

2.1 보이스코일형 LOA

2.1.1 구동원리

보이스코일형 LOA는 그림 1(a)와 같이 영구자석에 의한 고정자와 플라스틱 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성된다. LOA의 추력은 플레밍의 왼손법칙에 따라 영구자석에 의한 공급자속밀도 B (T)와 가동자코일에 흐르는 전류 I (A)의 상호작용에 의해 발생한다. 따라서 전류와 주파수에 따라 추력의 방향 및 크기가 결정되고, 그림 1(b)에서처럼 코일에 정현파 또는 구형파의 교번전류를 인가하면 가동자는 왕복운동을 하게된다.

만약 코일 가동자가 x방향으로만 운동하고 LOA 길이, 권선수 등의 설계사양을 고려하면 발생 추력 F (N/m)은 다음 식(1)과 같다.

표 1 보이스코일형 LOA의 설계 사양

항 목	사 양
부하 질량 (가동자질량 포함)	23 [kg]
코일당 턴수	55 turns/layer × 9 layers
코일 직경	1.0 [mm]
유효길이	150 [mm]
동작자속밀도	0.3 [T]
전류밀도	5×10^6 A/m ²
공극	15 [mm]

2.2 특성방정식과 제어정수 및 전달함수

제어 시스템에의 응용을 위한 보이스코일형 LOA는 한 편으로는 직류 서보 액츄에이터로써 범용과는 달리 빈번 한 가속, 감속, 정지에 사용된다. 따라서 발생 추력 외 에 과도상태에서의 제정수가 중요한 의미를 갖는다. 다음에 운동방정식과 함께 서보 모터의 정수에 대하여 설명한다. 또한 서보모터의 응답성을 나타내는 전기적 시 정수, 기계적 시정수에 대하여 설명한다.

2.2.1 전압방정식과 운동방정식

코일에 대한 전압방정식은 다음 식(2)과 같다.

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + k_E \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

여기서 R:코일의 저항, L:코일의 인덕턴스, dx/dt:가동자의 속도이다. (2)식의 오른쪽 세 번째 항은 자계 속에 코일의 운동에 의해 유기전력이다. 기계적 인 운동방정식은 다음 식(3)와 같다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = k_E i - C_d \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

여기서 M:가동부의 질량, C_d:마찰계수, d²x/dt²:가동자의 가속도이다. 만약 가동자와 부하의 제동을 무시하면 식(3)과 (4)로부터 다음 식(4)를 얻을 수 있다.

$$M \frac{L}{k_E} \frac{d^3x}{dt^3} + M \frac{R}{k_E} \frac{d^2x}{dt^2} + k_E \frac{dx}{dt} = e \quad (4)$$

2.2.2 전달함수와 제어 정수

식 (1)와 (2),(3)를 라플라스 변환하여 인가전압 e와 속도 v사이의 전달함수 G_{v-e}(s)를 구하면 다음 식 (5)과 같다.

$$G_{v-e}(s) = \frac{v(s)}{e(s)} = \frac{k_E}{s^2 LM + s(RM + LC_d) + k_E^2} \approx \frac{k_E}{s^2 LM + sRM + k_E^2} \quad (5)$$

여기서 마찰저항은 매우 작다고 가정 (C_d ≈ 0)하였다. 분모를 인수분해하기 위해 분모=0으로 하여 근을 구하면 다음 식(6)과 같다.

$$s \approx \frac{-R \pm R \left(1 - \frac{2Lk_E^2}{R^2M}\right)}{2L} \quad (6)$$

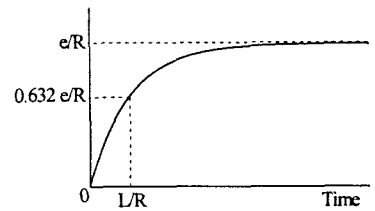
즉,

$$s = -\frac{k_E^2}{RM}, \quad s \approx -\frac{R}{L} \quad (7)$$

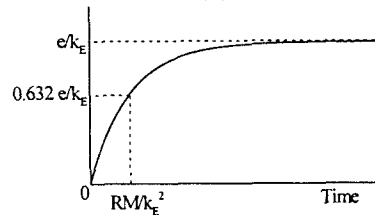
따라서 전달함수는 다음 식(8)과 같다.

$$G_{v-e}(s) = \frac{1}{\frac{k_E}{s} \left(1 + \frac{sRM}{k_E^2}\right) \left(1 + \frac{sL}{R}\right)} \quad (8)$$

여기서 RM/k_E²: 기계적 시정수, L/R: 전기적 시정수라고 정의한다. 즉 LOA에 전압 e를 스텝모양으로 인가했을 때 L/R의 시정수에서 모터 전류값이 확립된 후, RM/k_E²의 시정수이며 모터 속도가 상승된다는 것을 의미한다. 따라서 L, R, M, k_E의 정수가 모터의 응답에 영향하는 것이 된다. 그림 3은 이들 정수와 전류 및 속도의 확립 곡선을 보여준다.



(a)



(b)

그림 3. 전류 및 속도의 확립

2.3. 전달함수 및 제어정수 산정을 위한 특성 시험

2.3.1 특성 시험

(1) 전압-스트로크 특성

그림 4는 입력전압의 주파수가 5Hz ~ 20Hz일 때 입력전압에 따른 가동자의 스트로크를 보여준다. 코일에 입력되는 전압이 증가시키면, 가동자의 변위는 비례적으로 증가한다. 즉, 전압이 증가함에 따라 스트로크는 선형적인 증가를 보이므로 보이스코일형 LOA는 선형성이 매우 뛰어남을 알 수 있고 전압에 따른 제어를 효과적으로 할 수 있음을 알 수 있다.

그림 5은 주파수에 따른 발생 스트로크의 기울기와 그 fitting 함수를 표시한 것이다. 주파수에 따라 지수 함수적으로 감소한다.

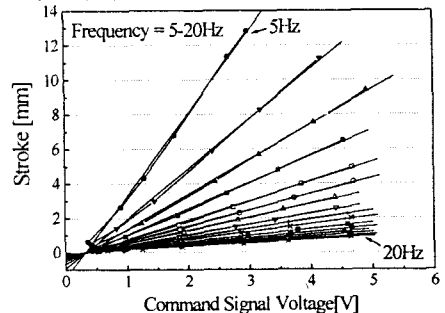


그림 4. 입력 주파수에 따른 전압-스트로크 특성

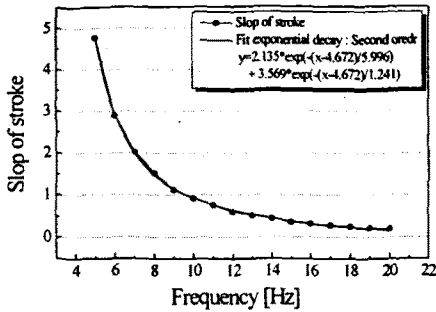


그림 5. 주파수-스트로크의 기울기 특성

(2) 주파수-스트로크 특성

그림 6은 입력 전압을 일정하게 하고 주파수를 5~20Hz까지 변화시키는 경우의 스트로크의 변화를 측정한 결과를 보여준다. 그림에서와 같이 전류 및 전압을 고정시킨 경우, 주파수의 변화에 따라 스트로크는 지수 함수적으로 감소함을 볼 수 있다.

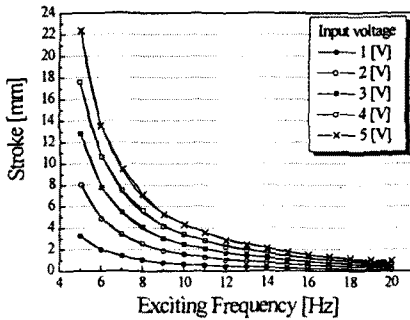


그림 6. 입력전압에 따른 주파수-스트로크 특성

2.3.3 코일 인덕턴스

가동자 코일의 인덕턴스는 제어시스템 설계에 있어서 중요한 파라미터가 된다. 즉 보이스코일형 LOA를 진동 제어시스템이나 서보시스템에 이용할 경우 가능한 인덕턴스가 작아야 한다. 이는 추력발생의 속응성을 향상시켜주기 때문이다. 보이스코일형 LOA는 영구자석이 발생하는 자계 속에 가동코일이 들어있다. 따라서 일반적인 방법, 즉 RLC 기기를 통해 인덕턴스를 측정하는 것은 부정확하다. 따라서 본 시험에서는 가동코일의 인덕턴스를 전류의 턴-온 파형을 통해 구하였다. 즉 전류의 시정수를 구하여 인덕턴스 L을 계산하는 것이다.

그림 7은 오실로스코프로 측정한 파형으로 인가 전압과 전류의 턴-온 파형이다. 위쪽 파형은 전압, 아래는 전류파형이다.

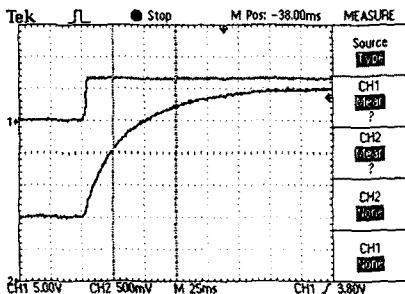


그림 7. 전압과 전류의 턴-온 파형

코일 인덕턴스는 코일 위치에 따라 달라진다. 따라서 그림 8에서 보여지듯이 전류의 턴-온 파형이 가동코일이 밖으로 나갈수록 전류가 늘어짐을 알 수 있다. 즉

시정수가 커지고 인덕턴스가 증가함을 알 수 있다.

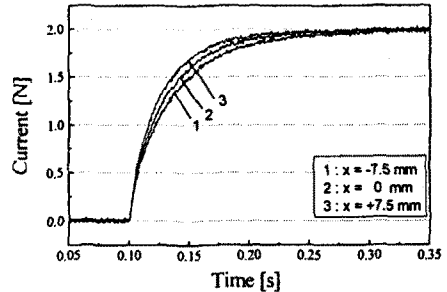


그림 8. 코일위치에 따른 전류의 턴-온 파형

그림 9는 턴-온 전류의 시정수와 FEM 해석에 의한 코일 인덕턴스를 비교한 그래프이다. 가동코일이 밖으로 나갈수록 인덕턴스는 감소하는 경향을 보이며 그 값도 비교적 일치함을 알 수 있다.

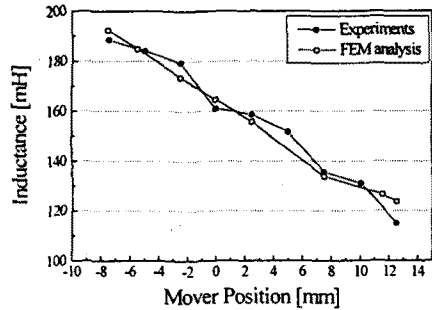


그림 9. 가동자 위치에 따른 코일의 인덕턴스

3. 결 론

보이스코일형 LOA는 영구자석으로 이루어지는 계자와 보빈에 코일을 감은 가동체로 구성되며, 선형성과 피정밀제어성 등에서 특별히 우수한 장점을 갖는 액츄에이터이다. 이는 전압에 따른 스트로크 발생의 선형 특성에 의해 증명되었으며, 보이스코일형 LOA이 전압에 따른 제어를 효과적으로 할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 주파수에 따라 발생 스트로크의 기울기는 지수 함수적으로 감소하였다.

또한, 제어시스템에서 가동자 코일 인덕턴스는 추력발생의 속응성과 관계하는 중요한 파라미터가 된다. 따라서 본 시험에서는 가동코일의 인덕턴스를 전류의 턴-온 파형, 전류의 시정수를 통해 구하였다.

따라서 본 논문에서는 전자기력 액츄에이터인 보이스코일형 LOA를 제어시스템에 이용하기 위한 특성과 제어정수 중 하나인 코일 인덕턴스를 특성 해석과 시험을 통해 구했다.

(참고 문헌)

[1] S.A. Nasar, I. boldea, "Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Application", Prentice-Hall, Inc. , 1987
 [2] S.M. Jang et al. "The application of a voice coil stype LOA for the active vibration control system", Trans., KIEE, Vol.46, No.6, JUN. 1997