

자기적 비선형을 고려한 Moving Magnet Linear Actuator의 설계 및 동특성 해석

황규환, 김철한*, 전계록*, 조윤현
 동아대학교 전기공학과, *부산대학교

Design and Dynamic Characteristics analysis of Moving Magnet Linear Actuator Considering the Magnetic Nonlinear phenomena

Kyu-Hwan Hwang, *Chul-Han Kim, *Kyeo-Lock Jeon, and Yun-Hyun Cho
 Department of Electrical Engineering, Dong-A Univ. *Busan National Univ.

ABSTRACT

This paper is proposed a new linear actuator with the permanent magnet on the mover. This linear actuator is designed to produce the vibration of a oscillator. In order to evaluate its dynamic performance, the equivalent coupling parameter between mechanical and electromagnetic equations of the linear actuator, which is considered the magnetic nonlinear phenomena, is analyzed by the finite element method and estimated the thrust, displacement and acceleration with the simulation values and the experimental ones.

1. 서론

리니어 액추에이터 (Linear Actuator)는 부가적인 기계적 변환장치 없이 직선운동을 얻을 수 있고 유지보수가 쉽다는 장점 때문에 스틸링 엔진, 콤프레서, 섬유기기, 능동제어, 초 정밀 위치제어와 같이 짧은 스트로크의 리니어 왕복운동 시스템에 광범위하게 응용되고 있다^[1]. 리니어 액추에이터는 NdFeB 부분의 자기회로와 가동코일 부분의 전기회로로 이루어진 아주 간단한 구조이다. 리니어 액추에이터 중에서도 가동 마그네틱형 리니어 액추에이터는 가동자의 관성이 적어 고속의 소 변위 왕복운동에 적합하며, 잔류 자속 밀도가 높은 영구자석을 사용함으로써 고 에너지밀도의 자기회로 구성도가 가능하여 대용량에 이르기까지 그 응용 범위가 확대되고 있다^[2]. 리니어 액추에이터는 미소변위를 갖는 서보 액추에이터로써 가.감속 및 정지 운동을 빠른

속도로 반복하므로, 추력 특성 뿐 아니라 과도상태 특성 및 각종 정수의 정밀한 파악이 가장 중요하다. 따라서 본 논문에서는 리니어 액추에이터의 설계 및 정.동 특성 해석을 하였고, mover에 대한 최대 추력특성은 정 특성에서 얻었다. 동 특성 해석에서는 주파수에 대한 mover의 변위, 속도, 가속도의 변화를 고찰하였고, 시뮬레이션으로 결과 값과 비교하였다.

2. Linear Actuator의 구조와 모델링

그림 1은 permanent magnet와 mover에 권선이 감겨진 liner actuator의 구조를 보여주고 있다. Core 형태의 액추에이터가 아닌 양측이 개방된 형태임을 알 수 있다. mover가 움직이는 변위는 자기적 흡인력을 이용하여 최대 Stroke Length를 넘지 못하도록 하였다. 그림 1은 효율적으로 자기적 흡인력을 사용하기 위한 Magnet 배열을 보여준다.

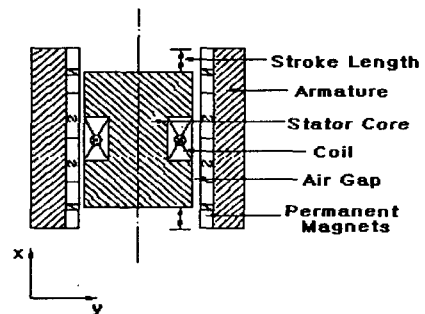


그림 1 Moving magnet type linear actuator의 단면도
 Fig. 1 Section view of a moving magnet type linear actuator

일반적으로 움직이는 아마추어에는 2가지 경우의 힘이 작용한다. 하나는 코일 양단에 인가된 전류에 의한 자속과 Permanent Magnet에 의한 자속의 상호작용에 의해 힘이 발생한다. Lenz's 의 법칙에 의해 다음과 같이 표현 할 수 있다^[2].

$$F_N = N(\vec{iL} \times \vec{B}) \quad (1)$$

여기서 N 은 length/turns의 평균값, B 는 자속밀도이다. 자속밀도 B 는 magnet의 물질과 자기저항에 의하여 결정된다. 이것은 mover의 움직임에 많은 영향을 주지 못한다. 그러므로 자속밀도를 일정하다고 가정했을 때 발생하는 힘 F 는 전류에 비례한다고 할 수 있다. 시뮬레이션을 위하여 리니어 액추에이터를 수학적으로 모델링하면 다음과 같다. 식 (2)는 액추에이터의 비 선형을 고려한 전압 방정식이다.

$$v = Ri + \frac{d\lambda(x, i)}{dt} \quad (2)$$

여기서 R , λ 는 각각 권선의 단자전압, 전류, 자속이다. λ 는코일의 합성 자속이다. λ 는 변수 x 와 i 의 함수이므로 그림 1의 액추에이터의 위치에 따라 식 (3)과 같이 놓을 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= Ri + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial i}\right) \frac{di}{dt} + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial x}\right) \frac{dx}{dt} \\ &= Ri + K_i(i, x) \frac{di}{dt} + K_x(i, x)v \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $R, K_i(i, x), K_x(i, x)v$ 는 각각 코일저항, 인덕턴스, 속도, 역기전력이다. 식 (3)에서 오른쪽의 두 번째 항과 세 번째 항은 각각 변압기 기전력항과 속도 기전력항이다. 식 (3)의 parameters의 값들은 정상상태 유한요소방법으로 구한다. 그림 2는 식 (3)의 전압방정식을 등가회로 나타낸 것이다.

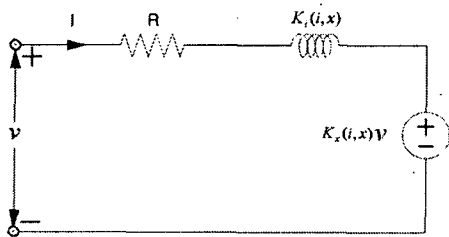


그림 2 Linear actuator의 전기적 등가 회로도

Fig. 2 Equivalent circuit of the Linear actuator

자속에 의해 발생하는 힘 방정식은 coenergy법으로부터 식 (4)로 표현된다^[3].

$$F_d(i, x) = \frac{\partial W_c}{\partial x} \quad (4)$$

여기서 W_c 는 coenergy이다. 비선형 해석 시에는 전압과 힘의 방정식에서 변위에 따른 쇄교자속의 변화분을 고려하여 식 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$F_d = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x} \quad (5)$$

여기서, x = 변위
 L = 쇄교자속

기계적 운동방정식은

$$F_d = M\ddot{x} + C_d\dot{x} + kx \quad (6)$$

여기서, $M, F_d, C_d, k, \dot{x}, \ddot{x}$ 는 각각 질량, 힘, 마찰계수, 탄성계수, 속도, 가속도이다. 상태방정식은 식 (3)과 (6)을 이용하여 다음과 같이 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\dot{x}} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{M} & -\frac{C_d}{M} & \frac{K_T}{M} \\ 0 & -\frac{K_x}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{V}{L} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 상태변수는 변위와 전류이다. 시스템 출력은 mover 속도 $y = Cx + D\dot{x}$ 이용하면 식 (8)과 같이 표현된다.

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. 시스템 구성 및 설계 사양

그림 3은 리니어 액추에이터 제어기의 블록도를 나타낸다. 본 논문에서는 입력 주파수에 따른 리니어 액추에이터의 제어 특성을 고찰하기 위하여 드라이버의 제어기는 TI사의 TMS320C2407A 16bit 마이크로프로세서를 사용하였다. 제어기의 기본 동작은 LVDT와 홀 CT를 통해 얻은 전압과 전류의

값을 기준 값과 비교, 연산하여 PWM출력을 발생하며, 이 PWM 파형은 전용드라이브를 거쳐 H-Bridge 회로에 공급된다. PC를 통한 보다 유연한 사용자 인터페이스와 제어프로그램 개발의 편의성을 위해 RS232 직렬통신을 이용하여 데이터를 주고받을 수 있도록 설계, 제작하였다.

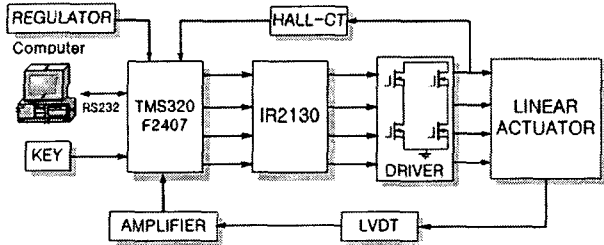
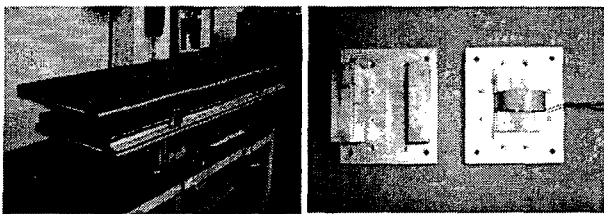
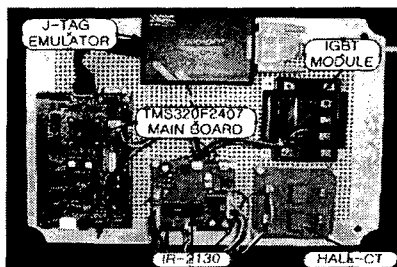


그림 3 전체 시스템의 구성
Fig. 3 Configuration of the linear actuator driving system

그림 4의 (a)는 본 연구에서 개발한 리니어 액추에이터의 외형도를 나타낸다. (b)는 PM이 부착된 mover와 coil이 감겨있는 stator를 나타낸다. (c)는 리니어 액추에이터의 드라이브를 나타내고 있다.



(a) The system applied a linear actuator (b) PM mover and stator



(c) Linear actuator drive

그림 4 Linear actuator 및 제어기
Fig. 4 Linear actuator and controller

본 논문에서 제작된 리니어 액추에이터에 대한 기계적인 사양과 전기적인 사양은 표 1과 같다. 30Hz에서 100kg의 질량을 최대 스트로크 ± 1.5 mm까지 왕복 가능하게 설계하였다. NdFeB의 영구자석의 크기는 제작의 용이성을 고려하여 상품화

된 제품을 선정하였다. LA의 불필요한 진동을 제거하기 위하여 가능한 높이는 낮고 폭이 넓은 구조를 갖도록 설계하였다.

표 1 리니어 액추에이터 설계 사양
Table 1 Design specification of linear actuator

항목		사양
Rated Current[A]		3
Maximum Stroke[mm]		± 1.5
Mover Shape	Magnet	NdFeB
	Length \times Height	30 \times 50
	Length \times Height	30 \times 50
Stator Shape	Type	solid
	Length \times Height	126 \times 90
Number of Coil [turns]		600
Diameter of Coil [mm]		0.5

4. 시뮬레이션 및 실험결과

4.1 정추력 특성 해석

그림 5는 F.E.M 및 정추력 측정장치를 이용하여 실험한 값을 비교하였다. 실험 파형은 정추력 측정 장치에서 x 변위에 따라 측정된 정추력을 인디케이터(Indicator)로 받고, Labview를 이용하여 PC에 나타낸다. 정추력 측정은 먼저 리니어 액추에이터에 3A의 전류를 인가시킨 후, mover를 2mm/s의 속도로 DC 모터가 밀어주고, 이 때 리니어 엔코더의 변위값(X 축)과 로드셀의 정추력 값(Y 축)을 X-Y 그래프로 나타내었다. 정추력 곡선이 시작 부분에서는 zero가 되지 않는 것은 mover와 stator를 일치 시켰을 때 흡인력이 작용하는 부분이기 때문이다. 끝 부분은 stator와 mover가 어긋난 상태에서 반반력이 작용하여 추력이 최소가 됨을 나타내고 있다.

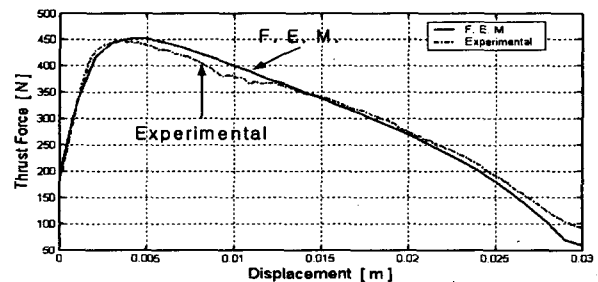


그림 5 Linear Actuator의 정추력 특성곡선
Fig. 5 Thrust of Linear Actuator

4.2 동특성 시뮬레이션 블록도

블록도는 식 (3)과 (4)의 상태방정식에 근거하여 그림 6과 같이 구성하였다. 시뮬레이션 시 전원은 고조파성분을 고려하지 않은 정현적인 가변 주파수 전압원으로 모델링하였다. 코일 위치에 따른 인덕턴스의 비선형적인 변화를 고려하기 위해 lookup table를 사용하였다. lookup table에 사용된 인덕터스 데이터는 F.E.M에 의해 구해진 것이다. 시뮬레이션은 MATLAB/SIMULINK를 이용하였다.

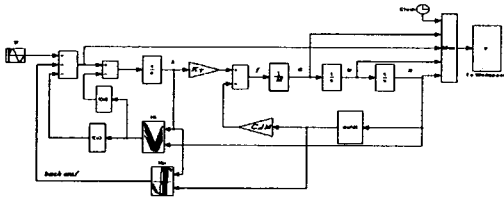


그림 6 자기적 비선형을 고려한 블록도
Fig. 6 Block diagram of simulation considering magnetic nonlinear phenomena

그림 7은 변위와 전류에 따른 자속부포도를 3차원으로 나타낸 그림이다. 자기적 비선형 시뮬레이션 시 필요한 K_f 값과 K_v 값을 이 데이터로 구하였다.

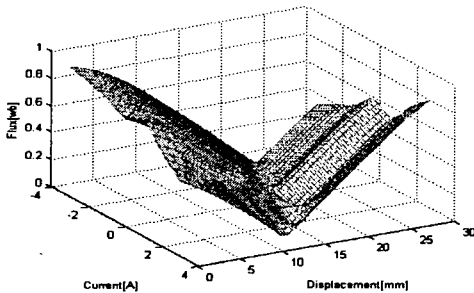
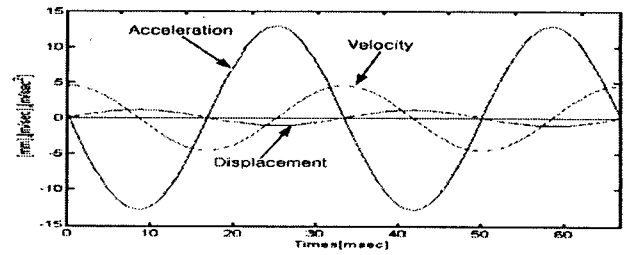


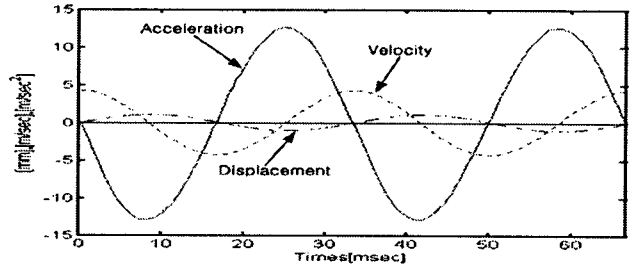
그림 7 변위와 전류에 따른 자속밀도곡선
Fig. 7 Flux density curve as functions of the current and the displacement

4.3 실험 결과 및 검토

인체 치료용에 가장 적합한 주파수인 30Hz로 그림 7(a)는 simulation 응답곡선을 나타낸 것이고, 그림 7(b)는 이를 비교하기 위해 실험 결과를 나타낸 것이다. (a)는 그림 6의 시뮬레이션에 대한 응답곡선이고, (b)는 LVDT에서 센싱된 변위값과 연산에 따른 속도, 가속도 파형을 나타낸다. 계수 값의 오차로 시뮬레이션 값이 실험 값과 정확히 일치하지 않으나 거의 실험값에 대응 됨을 나타낸다.



(a) Simulation



(b) Experiment

그림 8 시뮬레이션 및 실험결과
Fig. 8 Results of simulation and experiment

5. 결 론

본 논문에서는 의료용 리니어 액추에이터의 설계 및 제작과 정추력 특성 및 자기적 비선형 특성을 다루었다. 액추에이터는 불필요한 진동을 제거하기 위해서 높이는 길이를 고려하여 설계되어졌다. 자기적 비선형 특성을 고려하기 위해서는 F.E.M 해석에 의한 자속을 계산하고, 시뮬레이션 하였다. 일반적으로 stored field energy와 coenergy가 선형 부분에서 시뮬레이션 하지만 본 연구에 사용된 리니어 액추에이터는 의료용으로써 비선형 상태까지 고려되어졌다. mover의 정확한 위치제어를 위하여 변위센서인 LVDT와 TMS320 F2407A를 사용하여 변위, 속도, 가속도 특성을 고찰하였다. 연구 내용과 결과는 리니어 액추에이터를 의료 치료용 진동 제어에 응용 가능성을 확인했으며 본 연구는 이를 위한 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Lequesne, B. "Fast-acting, long-stroke solenoids with two springs", Industry Applications Society Annual Meeting, 1989., Conference Record of the 1989 IEEE , 1-5 . vol.1, pp: 195 -202, 1989, Oct.
- [2] Jin, B, "An integrated high-performance adaptive-control system with a linear actuator", Control Applications, 1992., First IEEE Conference on , 13-16, vol.2, pp: 1094 -1099, 1992, Sept.
- [3] 조운현, 김경호, 윤선기, "Static and Dynamic Analysis of Axial Flux Reluctance Motor Considering Magnetic Nonlinearity Phenomena" 大 學 院 論 文 集, Vol. 25 No. 1, 2000.