

# 에너지 변환 이론에 의한 액추에이터 권선부의 주파수 특성 해석에 관한 연구

(Analysis of the Actuator Winding to a Frequency Characteristic based on Energy Conversion Theory)

김양호\* · 이해경 · 황석영

(Yang-Ho Kim · Hae-Kyung Lee · Seuk-Yong Hwang)

## 요 약

본 논문에서는 Magnetic Levitation Model 시스템을 이용하여 선형 액추에이터의 기본모델을 제안하고 전원 공급부의 입력 주파수의 변화로부터 액추에이터에 나타나는 현상을 Matlab 프로그램을 활용하여 간접적 방법으로 고찰하였다. 그 결과는 실제적인 설계에 적용할 경우 설계 프로그램의 자료나 부분적 변경시 참조 할 수 있으리라 사료된다. 본 논문에서 제안한 에너지 변환을 고려한 Linear Actuator Model 시스템의 출력은 입력 주파수의 변화로부터 액추에이터가 고주파보다는 저주파에서 권선부에 나타나는 파형의 응답이 기준 입력파형에 더 근접함을 알 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 Linear Actuator Model 시스템의 동작시 특성이 실제 시스템에 활용할 때 간접적 방법으로 상당히 유용함을 확인 할 수 있었다.

## Abstract

In this paper, an electrical equivalent circuit is derived by solving system equations. A frequency characteristics graph is calculated and the characteristics curve of the Linear Actuator Model System are simulated by the Matlab program. The frequency characteristics of a linear actuator are analyzed on the structure of the Linear Actuator Model System.

This paper proposed and analyzed the Linear Actuator Model(LAM) by using Matlab program with linear actuator was verified computer simulation based on the energy conversion theory.

Key Words : Energy Conversion Theory, Linear Actuator Model, Frequency Characteristics

## 1. 서 론

전기기기는 자연 현상의 일종인 전기 현상중 전자

유도 현상이나 정전 유도 현상을 이용하는 장치이다. 이러한 전기기기중 리니어 액추에이터는 간단한 기계적 구조와 뛰어난 속응성으로 인해 소변위 왕복 직선운동을 필요로 하는 시스템에 적합하다[1].

또한 액추에이터를 구동하기 위해서는 구동 전원을 필요로 하게 되는데 대부분의 직류전원 장치는 직류 출력전압의 안정화뿐만 아니라 과부하 또는 단락부하에 대한 보호 기능을 갖는다[2].

\* 주저자 : 경원전문대학 전자정보과 겸임교수  
Tel : 031-750-8750, Fax : 031-750-8759

E-mail : yhkim@kwc.ac.kr

접수일자 : 2004년 2월 27일

1차심사 : 2004년 3월 9일, 2차심사 : 2004년 4월 6일

심사완료 : 2004년 7월 1일

부하가 단락되면 단락보호 동작에 의해 장치의 스위칭 소자는 턴 오프되어 장치의 입력단과 스위칭 소자로는 전류가 신속히 차단되어 소멸되지만, 출력단의 필터 커패시터부에 충전된 에너지는 단락부하로 방전하게 된다. 이러한 경우에 직류 전원 장치의 출력 필터 커패시터가 완전히 방전된 후 다시 충전되기까지 회복 시간이 소요되므로 이러한 부하에 적합한 전원 장치가 여러 가지 방식으로 제안되어져 왔다[3].

본 논문에서는 선형 액추에이터의 기본모델을 제안하고 전원 공급 방법의 변화로부터 액추에이터에 나타나는 현상을 Matlab 프로그램을 활용하여 선형 액추에이터의 권선부에 나타나는 주파수 변화에 따른 변화에 대해서 고찰하고 시뮬레이션하였다.

## 2. 에너지 변환 이론과 선형 액추에이터

### 2.1 에너지 변환 이론

단일 전원에 의해 여자되는 환상코일(toroidal coil)의 등가회로에서 입력 전원을  $V_t$ , 저항을  $r$ , 전류를  $i$  라 두고, 코일의 전압강하를  $e$  라 할때 그림 2의 (a) 와 같은 선형 액추에이터에 인가되는 전원은 다음 식 (1)로 나타낼 수 있다[5][6].

$$V_t = ri - e \tag{1}$$

식(1)을 시간함수인 전압원으로 표현하면

$$V_t = ri + L \frac{di}{dt} \tag{2}$$

이고 한 개의 코일에 전압이 인가되는 단순 자기 회로에 적용하면

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \tag{3}$$

그러므로 위 식 (1)은

$$V_t = ri + \frac{d\Phi}{dt} \tag{4}$$

위 식 (3)의 양변에  $idt$  를 곱하여 정리하면

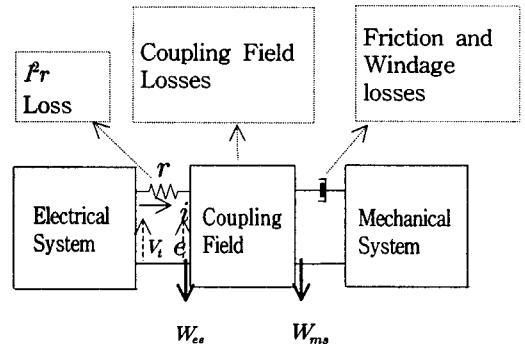
$$V_t idt - ri^2 dt = id\Phi \tag{5}$$

$$(V_t - ri) idt = id\Phi \tag{6}$$

$$- e idt = id\Phi \tag{7}$$

이 된다. 에너지 변환론에서 총 입력 에너지는 저장된 에너지와 소실된 에너지의 합으로 구성되며 직선형 변위가 필요한 펌프 계통이나 자동화 시스템에 사용될 수 있는 리니어 액추에이터 시스템은 기본적으로 이러한 전자석을 이용한 것이다.

또한 전기기계계가 복합적으로 구성된 시스템을 전자기시스템, 결합계와 기계적 출력 시스템으로 구분하여 저장된 에너지와 손실된 에너지로 표현하면 다음 그림과 같다.



$$\begin{cases} W_{es} : \text{전기적 저장에너지} \\ W_{ms} : \text{기계적 저장에너지} \end{cases}$$

그림 1. 전기 기계적 에너지 변환 모델  
Fig. 1. Electro-mechanical energy conversion model

위 그림 1. 에서 시간 미분된 전기적 입력 에너지는

$$dW_{ei} = V_t idt \tag{8}$$

와 같고 저항손은  $i^2 r$  이므로 전기적 에너지의 변화량  $dW_{elec}$  는

$$dW_{elec} = (V_t - ir) idt \tag{9}$$

식(9)의  $(V_t - ir)$  은 전압강하  $e$  이므로 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} dW_{elec} &= e idt, \\ e idt &= (V_t - ir) idt = id\Phi \end{aligned} \tag{10}$$

식(7)과 식(10)에서 전자속  $\Phi = N\phi$  이고, 기자력  $F = iN$  이므로

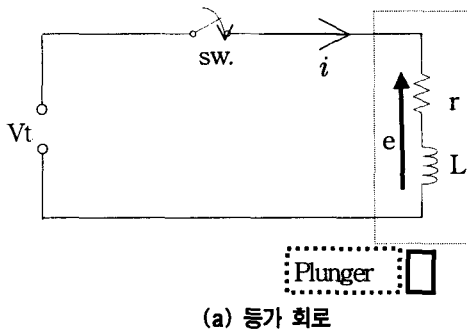
$$dW_{elec} = e i dt = id\Phi \text{ 로부터}$$

$$dW_{elec} = id\Phi = iNd\phi = Fd\phi \quad (11)$$

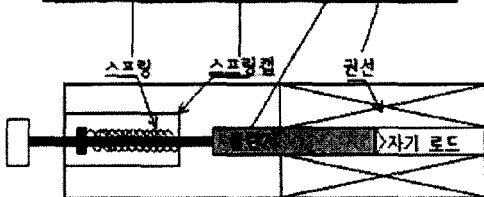
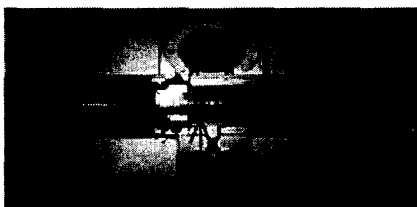
를 얻는다.

### 2.2 선형 액추에이터의 구성과 등가 회로

액추에이터의 등가회로 모델은 그림 2와 같이 구성되며 권선 부분에 흐르는 전류로 인한 자계 세기의 변화로 인한 자기력에 의해 자기로드도 플런저를 끌어 당겨서 직선 변위를 일으키는 일종의 전자기력을 기계력으로 변환하는 장치이다.



(a) 등가 회로



(b) 실제 모델과 구성요소

그림 2. 직선형 피스톤 액추에이터의 등가 회로와 실제 모델과 구성요소  
Fig. 2. Equivalent circuit and Real equipment Model of Serial Piston Actuator

그림 2는 (a)등가회로와 (b)실제모델과 구성요소를 나타낸 것으로 선형 액추에이터 시스템은 전원부와 부하부(액추에이터와 주변 장치)로 나뉜다. 전원부는 직류 전원으로 액추에이터 권선부 코일에 인가된다. 코일에 전류가 인가되면 자장이 플런저(plunger) 주위에 형성되어 플런저가 전자기력을 받게 되어 이동한다. 전류가 끊어지면 스프링의 복원력에 의해 제자리로 돌아오는 전기적 흡입력과 기계적 배출력으로 반복하며 동작하는 직선형 행정이 이루어진다.

### 2.3 Linear Actuator Model 시스템의 등가 해석 모델링

Matlab 프로그램 툴에서 제공하는 Magnetic Levitation Model 을 응용한 Linear Actuator Model 시스템은 다음과 같다.

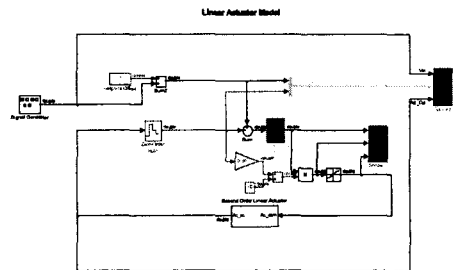


그림 3. Linear Actuator Model시스템의 구성도 (Matlab 프로그램 자료)  
Fig. 3. Block diagram of the Linear Actuator Model System(Matlab Program)

위 그림 3에서 Linear Actuator Model내부의 구성요소의 정수표는 다음 표 1과 같다.

표 1. Linear Actuator Model 구성요소 정수표 (Matlab 프로그램 자료)  
Table 1. Parameter of the Linear Actuator Model(Matlab Program)

Parameters	Data	비고
Natural Frequency	50	
Damping ratio	1	
Initial Position	0	

### 3. Linear Actuator Model 시스템에서의 주파수에 따른 특성

제안된 액추에이터 모델의 모의 실험은 Matlab의 Toolbox 프로그램을 이용하여 구현하였다. 모의 실험 모델은 크게 액추에이터부와 전원부, 제어기와 부하부로 구분되어 있으며 제어기는 이산 시간 PID를 활용하였고, 액추에이터 모델은 Matlab 프로그램에서 지원되는 Second Order Linear Actuator 모델을 사용하였다[8].

특히 Linear Actuator Model에서 사용된 Discrete PID controller는 선형 제어에서 Second order transfer function에 의해 설명할 수 있는 Standard PID controller로부터

$$G_r(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

$$= K \frac{(T_{z1}s + 1)(T_{z2}s + 1)}{s} \quad (12)$$

$G_r$ : controller transfer function  
 $K_p$ : 제어기 비례(P) 상수  
 $K_i$ : 제어기 적분(I) 상수  
 $K_d$ : 제어기 미분(D) 상수  
 $K$ : 제어기이득  
 $T_{z1}, T_{z2}$ : time constants corresponding with controller zeros

이다. 제어기에 사용하기 위해 수정된 형태는

$$Y_r(s) = (K_p + \frac{K_i}{s})E(s) + K_d s Y(s) \quad (13)$$

이며, 이 표준형태의 변형은 여러 신호가 아니라 단지 시스템의 출력에 의해서 미분항이 진행되어짐을 뜻한다. 또한 이산 시간 PID 제어기에서 간접법은 두 단계를 가지는데 첫단계는 PID 상수들을  $s$  연산자의 다항식으로 변환하는 것이고, 그 다음  $s$  연산자의 다항식들로부터  $z$  연산자의 다항식으로 변환하는 것이다. 즉 주어진 회로 정수로부터 라플라스 변환을 취하여  $s$  변환을 하고 이산제어를 위하여 이른바  $z$  변환을 하는 것이다. 다음으로  $T_s$ 를 샘플링 간격(기간)이라 하고, 직접법을 사용하여 적분항  $K_i$ 를 구하기 위해 직교 근사를 적용하면

$$I(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (14)$$

$$I(kT_s + T_s) = I(kT_s) + K_i T_s e(kT_s) \quad (15)$$

그리고 미분항을 구하기 위해 후향 차분 근사화하면

$$D(t) = K_d \frac{dy(t)}{dt} \quad (16)$$

$$D(kT_s) = \frac{y(kT_s) - y(kT_s - T_s)}{T_s} \quad (17)$$

를 얻을 수 있고, 연속제어형태와 동일하게  $P$  항은 다음식 (18)로 구할 수 있다[9][10].

$$P(t) = K_p e(t) \quad (18)$$

이 결과를 제어기의 방정식에 맞게 표현하면

$$u(kT_s) = P(kT_s) + I(kT_s) + D(kT_s) \quad (19)$$

간접법의 첫단계는 위의 식(13)으로 이미 알 수 있고, 일반적인 zero order hold 법을 사용하여 치환하면  $s = \frac{z-1}{zT_s}$  이므로 직접법에 의하여 이 접근법은 아래식 (20)과 같은 결과를 구하여 준다.

$$G_r(s) = K_p + K_i \left( \frac{zT_s}{z-1} \right) + K_d \left( \frac{z-1}{zT_s} \right)$$

$$= \frac{K_p z(z-1) + K_i T_s z^2 + K_d / T_s (z-1)^2}{z(z-1)} \quad (20)$$

그림 4와 그림 5는 Linear Actuator Model 과 그에 따른 출력 파형이다.

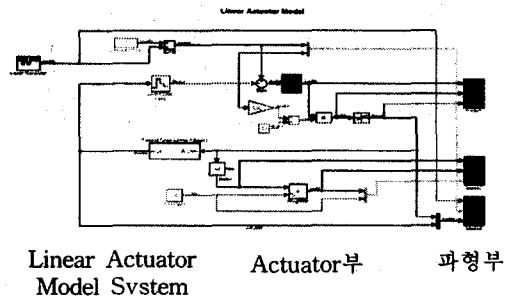
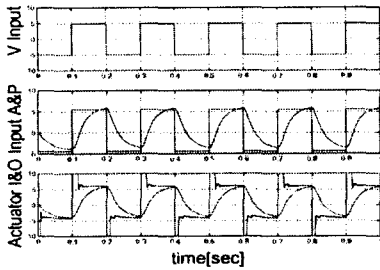


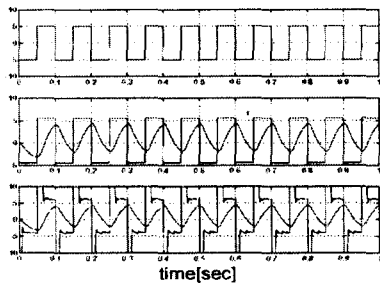
그림 4. Linear Actuator Model 시스템과 파형부 모델

Fig. 4. Linear Actuator Model System and Waveform model

전원부 입력은 구형파의 경우에 대하여 모의 실험 하였으며 그 결과는 다음과 같다.



(a)  $V_t = DC\ 5(V),\ 5(Hz)$



(b)  $V_t = DC\ 5(V),\ 10(Hz)$

그림 5. MatLab 결과 (구형파인 경우)  
Fig. 5. Matlab Result(Square Wave)

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Magnetic Levitation Model 시스템을 이용하여 선형 액추에이터의 기본모델을 제안하고 전원 공급부의 입력 주파수의 변화로부터 액추에이터에 나타나는 현상을 Matlab 프로그램을 활용하여 간접적 방법으로 고찰하였다. 그 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안한 Linear Actuator Model 시스템의 장점은 다음과 같다.

- 시스템의 변수들의 조정이 용이하다
- 실제 시스템의 동작 유추를 위한 모델링의 변경이 가능
- 대형이나 소형 시스템에의 응용시 실제 실험을 하기 전에 결과의 간접적 검토가 용이하다.

본 논문에서 제안한 에너지 변환을 고려한 Linear Actuator Model 시스템의 출력은 입력 주파수의 변화로부터 액추에이터가 고주파보다는 저주파에서 권선부에 나타나는 파형의 응답이 기준 입력파형에 더 근접함을 알 수 있었다.

이 결과를 바탕으로 Linear Actuator Model 시스템의 동작시 특성을 실제 시스템에 활용할 경우 간접적 방법으로 상당히 유용함을 확인 할 수 있었다.

#### References

- (1) 엄상준, 임기재, 김덕현, 강규홍, 홍정표, 김규탁, “인버터특성을 고려한 리니어 진동 액추에이터의 동특성 해석”, 2000년도 전기학회 하계학술 논문지, pp 897, 2000.
- (2) 김해중, 성기철, 조전욱, 배준한, 김석환, 심기덕, 이인용, 권영길, 류 경우, “SMES 용 초전도 코일 제작 및 특성”, 2003년도 11월 전기학회 논문지 제 52권 제11호, pp 557, 2003.
- (3) 안중수, 노의철, 김인동, “새로운 방식의 고속 펄스 모드 스위칭 기능을 갖는 고 역률 직류 전원 장치”, 2004년도 1월 전기학회 논문지 제 53권 제1호, pp 47, 2004.
- (4) William Hayt 원저 朴麟洙역, “전자기학” pp. 186-216, 1990.
- (5) 장석명, 정상섭, 권철, 문석준, 정태영, “가동자 위치에 따른 가동 코일형 LOA 의 인덕턴스 변화와 Push/Pull 효과”, 2000년도 전기학회 하계학술 논문지, pp. 900, 2000.
- (6) P.S. Bimbhra, “Generalized Circuit Theory of Electrical Machines”, pp.399-420, 1975.
- (7) 장석명, 권철, 정상섭, 성소영, 이불래, 김봉수, “구동 방식을 고려한 가동코일형 LOA 의 동특성”, 2000년도 전기학회 하계학술 논문지B권, pp 681-683, 2000.
- (8) 임종수 저, “MATLAB 6.X GUI Programming”, 2001.
- (9) Richard C.Dorf, Robert H. Bishop 저, 박홍배, 이균경 역 “Modern Control Systems”, pp 815-845, 2000.
- (10) 유인호, 오훈, 조현섭, 이성수, 김용욱, 박알서 “신경회로망-PID복합형 제어를 이용한 직류 전동기의 강인한 속도제어” 2004년도 조영·전기설비 학회 논문지, Vol. 18, No. 1, pp85-89, 2004.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 김양호 (金養鎬)

1966년 6월 14일생. 1991년 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 박사 수료. 2002년~현재 경원 전문대학 전자정보과 겸임교수.

##### 이해경 (李海景)

1941년 1월 6일생. 1966년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1986년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경원 전문대학 전자정보과 교수.

##### 황석영 (黃錫永)

1938년 5월 29일생. 1963년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1973년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1984년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년~현재 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 명예교수.