

# 에너지 변환론에 의한 직선형 피스톤 액추에이터의 동작 특성 해석에 관한 연구

(Analysis of Serial Piston Actuator on the Dynamic Characteristics by Electromechanical Energy Conversion)

이해경 · 김양호\* · 황석영

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

## 요 약

본 논문에서는 직선형 피스톤 액추에이터의 해석을 위해서 패러데이 법칙으로부터 기본 방정식을 유도하였고, 이를 바탕으로 소형, 경량, 고속 응답을 요구하는 시스템에 응용될 수 있는 실험적 자료를 얻었다. 본 논문에서는 자계로부터 일반적으로 구할 수 있는 전자기력을 기계 방정식과 결합하여 에너지 변환 이론에 의한 직선형 피스톤 액추에이터의 운동시 플런저의 동특성을 구하였다. 이러한 기존의 방법들을 구조적으로 단순화하면서 용수철의 탄성력을 활용하여 시스템에 적용할 수 있는 직선형 피스톤 액추에이터(Serial Piston Actuator, SPA)를 제안하고, 소규모 직선형 변위를 요구하는 시스템에서 유(공)압식 피스톤을 대체하거나 호환할 수 있는 목적을 가지며, 추후 이와 관련한 연구에 참고될 수 있는 실험용 모델을 구현하고 이를 해석하였다.

## Abstract

This paper deals with the dynamic characteristic analysis of linear actuator(LA) considered with coupling of mechanical spring system. This application of linear actuator is increasing due to simple mechanical structure, a high efficiency, and a stable motional action.

This paper proposed and analyzed the Serial Piston Actuator(SPA) by using mechanical spring system coupled with linear actuator through the simplified structure which was verified practical experiments.

Key Words : Linear Actuator, SPA(Serial Piston Actuator)

## 1. 서 론

직선형 변위에 대한 왕복 운동이 요구되는 시스템에 있어서 주로 사용되고 있는 회전형 전동기의 경우, 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위해 스크루

너트, 랙-피니언, 기어-체인 등과 같은 별도의 기계적 변환장치가 필요하거나 공압식 피스톤을 사용하게 되므로 전체 시스템을 구성함에 있어서 복잡성과 유지 보수의 어려움을 수반하게 된다. 한편 이러한 선형기기중 리니어 액추에이터는 간단한 기계적 구조와 뛰어난 속응성으로 인해 소변위 왕복 직선운동을 필요로 하는 시스템에 적합하다[3].

특히 소규모 시스템에 리니어 액추에이터를 적용할 경우 복잡한 기계적 변환 장치들이 필요 없으므로 시스템 구조가 간단해 질 뿐 아니라 효율적인

\* 주저자 : 경원 전문 대학 전자정보과 겸임교수  
Tel : 031-750-8750, Fax : 031-750-8759

E-mail : yhkim@kwc.ac.kr  
접수일자 : 2003년 9월 25일  
1차심사 : 2003년 10월 9일  
심사완료 : 2003년 12월 1일

시스템의 구성이 가능해진다. 최근 산업 현장에서 자동화가 가속화되면서 소규모 직선형 운동과 신속한 응답이 필요한 시스템에서 유압(또는 공압식) 피스톤과 병행하거나 대체하여 사용할 수 있는 선형 액추에이터(Linear Actuator)를 구현하기 위한 기술적 접근들이 시도되어져 왔다. 그러한 배경에는 오일펌프를 위한 전자 오일 펌프 시스템이나 용수철의 탄성력을 이용한 선형 액추에이터들이 대표적인 방법들이라 할 수 있다[3-5].

본 논문에서는 이러한 기존의 방법들을 구조적으로 단순화하면서 용수철의 탄성력을 활용하여 시스템에 적용할 수 있는 직선형 피스톤 액추에이터(Serial Piston Actuator, SPA)를 제안하고, 소규모 직선형 변위를 요구하는 시스템에서 유(공)압식 피스톤을 대체하거나 호환할 수 있는 목적을 가지며, 추후 이와 관련한 연구에 참고될 수 있는 실험용 모델을 구현하고 이를 해석하였다.

## 2. 직선형 피스톤 액추에이터의 모델링

직선형 변위가 필요한 펌프 계통이나 자동화 시스템에 사용될 수 있는 리니어 액추에이터 시스템은 기본적으로 전자석을 이용한 것이다[2]. 아래 그림 1은 직선형 피스톤 액추에이터의 구조를 나타낸 것이다.

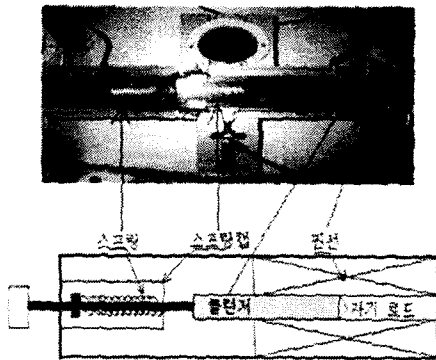


그림 1. 직선형 피스톤 액추에이터(SPA) 시스템과 실험 장치  
Fig. 1. Experimental system and Serial piston actuator(SPA)

그림 1은 실제 모델을 나타낸 것으로 전원은 직류 전원으로 코일에 인가된다. 코일에 전류가 인가되면 자장이 플런저(plunger) 주위에 형성되어 플런저가 전자기력을 받게 되어 이동한다. 전류가 끊어지면 스프링의 복원력에 의해 제자리로 돌아오는 직선형 행정이 이루어진다. 그림 2는 직선형 피스톤 액추에이터(SPA)의 전체 등가 회로이다.

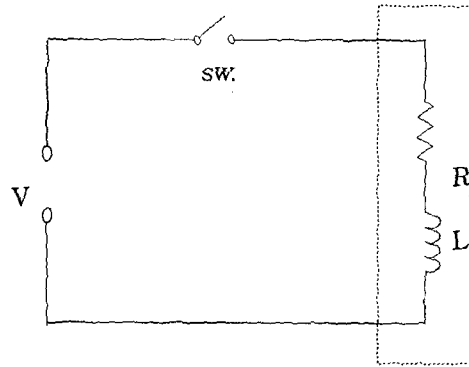


그림 2. 직선형 피스톤 액추에이터(SPA)의 등가 회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of Serial piston actuator(SPA)

## 3. 에너지 변환 해석 이론

선형 액추에이터는 플런저에 결합된 스프링의 합성력과 플런저의 전자력간의 방정식은 식 (1)과(2)로 나타낼 수 있다.

$$F_{\text{ertia}} + F_{\text{friction}} + F_{\text{spring}} = F_e \quad (1)$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + k_s x = F_e \quad (2)$$

- $M$  : 플런저의 질량
- $D$  : 감쇄계수
- $k_s$  : 스프링상수
- $x$  : 플런저의 변위
- $v$  : 플런저의 속도
- $F_i$  : 관성력
- $F_f$  : 제동력
- $F_s$  : 탄성력
- $F_e$  : 전자력

이러한 시스템의 운동특성을 해석하기 위해서는 시간 영역에서 플런저의 위치  $x$  와 속도  $v$  를 구하면 되는데, 이는 식(2)의 미분 방정식을 풀면 된다.

$$\frac{d}{dt} x = v \quad (3)$$

위 식(2)에서 감쇄 계수항을 무시하고 정리하면

$$\frac{d}{dt} v = -\frac{k_s}{M} x + \frac{1}{M} F_e \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{M} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F_e}{M} \end{bmatrix} \quad (5)$$

이 연립 방정식은 우선 초기 변위와 속도를 지정한 다음 운동 방정식에서 다음 상태의 속도와 위치를 구하여 나가는 순차적인 방법을 채택(採擇)하는 것이 일반적으로 알려진 방법이며, 식 (5)의 우변 두 번째 항에 식(2)에서 계산된 결과를 대입하여 4차 Runge-Kutta 법을 이용하여 다음 시간의 위치와 속도를 계산한다[2]. 여기서 전자력  $F_e$  는 자장과 도체에 흐르는 전류의 곱으로 표현된다.

### 3. 1 에너지 변환 이론에 의한 전자석 피스톤의 동특성 해석

식(1)을 시간함수인 전압원으로 표현하면

$$V_t = R i + L \frac{di}{dt}$$

- $V_t$  : 순시전압
- $R_i$  : 저항
- $L$  : 인덕턴스
- $\Phi$  : 자속
- $i$  : 전류

이 고 한 개의 코일에 전압이 인가되는 단순 자기

회로에 적용하면  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$  이므로

$$V_t = R i - e$$

$$V_t = R i + \frac{d\Phi}{dt} \quad (6)$$

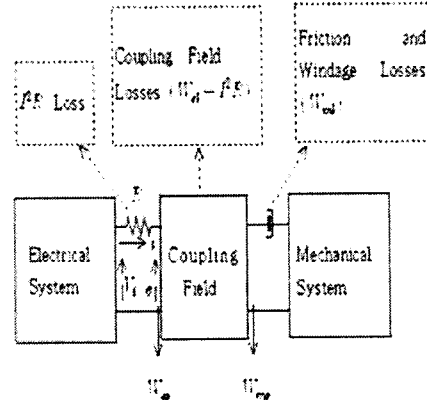
위 식 (6)의 양변에  $i dt$  를 곱하여 정리하면

$$V_t i dt - R i^2 dt = i d\Phi$$

$$(V_t - R i) i dt = i d\Phi$$

$$e i dt = -i d\Phi \quad (7)$$

이 되며 에너지 변환 장치에서 총 입력 에너지는 저장 에너지와 손실 에너지의 합으로 구성된다.[1]



- $W_{ei}$  : 전기적 입력에너지
- $W_{es}$  : 전기적 저장에너지
- $W_{el}$  : 전기적 손실에너지
- $W_{mi}$  : 기계적 입력에너지
- $W_{ms}$  : 기계적 저장에너지
- $W_{ml}$  : 기계적 손실에너지

그림 3. 전기기계적 에너지 변환 모델  
Fig. 3. Electromechanical energy conversion model

위 그림 3 에서 시간 미분된 전기적 입력 에너지는

$$dW_{ei} = V_t i dt \quad (8)$$

와 같고 저항손은  $i^2 r$  이므로 전기적 에너지의 변화량은

$$dW_{elec} = (V_t - i r) i dt \quad (9)$$

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

$$dW_{elec} = e i dt, \quad e i dt = (V_t - i r) i dt = i d\Phi \quad (10)$$

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

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

$$dW_{elec} = i d\Phi = i N d\phi = F d\phi \quad (11)$$

를 얻는다[1].

### 3. 2 에너지 변환 이론에 의한 액추에이터의 동특성 해석

에너지 변환이론으로부터 직선형 변위를 가진 액추에이터의 변위  $x$  를 구하면, 플런저가 전자력의 영향으로 전자석과 플런저간의 간격  $g$  사이에서 변위  $x$  로 움직일때 전자석의 단면적  $A$  에서 자기 저항은

$$Rel = \left( \frac{g-x}{\mu_0 A} + \frac{2d}{\mu_0 A} \right) \quad (12)$$

- $R_{el}$  : 자기저항
- $\mu_0$  : 진공중의 투자율
- $g$  : 전자석과플런저간의 간격
- $d$  : 플런저와 캡간의간격

전자기력은 인가 전압  $V_i$  에서 정상상태 전류  $i$  로부터 자속  $\phi$  를 발생하므로

$$F_e = -\frac{1}{2} \phi^2 \frac{d}{dx} Rel = \frac{1}{2} \phi^2 \frac{1}{\mu_0 A} \quad (13)$$

이되고 가해진 전원이 직류이면 정상상태에서  $\phi$  는 일정하게 되어 상수처럼 다룰 수 있고, 가해진 전원이 교류일때는  $\phi = \phi_m \cos \omega t$  이 되고 전자력은

$$F_e = \frac{1}{2} \phi_m^2 \frac{1}{\mu_0 A} \cdot \cos^2 \omega t \quad (14)$$

$$= \frac{1}{4} \frac{\phi_m^2}{\mu_0 A} (1 + \cos 2\omega t)$$

전자력  $F_e$  가 스프링(용수철)과 마찰력, 그리고 관성 모멘트의 합보다 커질때, 여기서  $k_s$  는 스

프링 상수이며 임의의 변위  $x$  에 대하여 역학적 평형 방정식은 식(1)과 같이

$$F_i + F_f + F_s = F_e$$

이고 마찰력을 무시하고 각 식을 대입하여 정리하면

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + k_s x = \frac{\phi_m^2}{4\mu_0 A} (1 + \cos 2\omega t) \quad (15)$$

여기서, 변위  $x$  에 대한 식을 연산자  $P$  와  $Q$  를 도입하여 간소화 하면

$$x = P + Q \cos 2\omega t \quad (16)$$

$$\frac{dx}{dt} = -2\omega Q \sin 2\omega t \quad (17)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -4\omega^2 Q \cos 2\omega t \quad (18)$$

이고 식(15)에  $\frac{\phi_m^2}{4\mu_0 A} = C$  라 두고 대입하여

정리하면

$$M(-4\omega^2 Q \cos 2\omega t) + k_s(P + Q \cos 2\omega t) = C(1 + \cos 2\omega t) = C(1 + \cos 2\omega t) \quad (19)$$

$$-4\omega^2 Q M \cos 2\omega t + k_s P + k_s Q \cos 2\omega t = C + C \cos 2\omega t = C + C \cos 2\omega t \quad (20)$$

$$k_s P - 4\omega^2 Q M \cos 2\omega t + k_s Q \cos 2\omega t = C + C \cos 2\omega t \quad (21)$$

이 된다. 위 식 (21)로부터 좌우 항을 비교하면

$$k_s P = C,$$

$$k_s Q - 4\omega^2 Q M = C$$

$$P = \frac{C}{k_s},$$

$$Q = \frac{C}{k_s - 4\omega^2 M}$$

을 구하여  $C = \frac{\phi_m^2}{4\mu_0 A}$  과 함께 식(17)에 대입

하면, 변위  $x$  는

$$x = \frac{\phi_m^2}{4\mu_0 A k_s} \left[ 1 + \frac{k_s \cos 2\omega t}{k_s - 4\omega^2 M} \right] \quad (22)$$

을 얻을 수 있다.

### 3. 3 모델링 및 실험장치의 구성

본 연구에서 제안한 장치를 실험을 통하여 구현하였다.

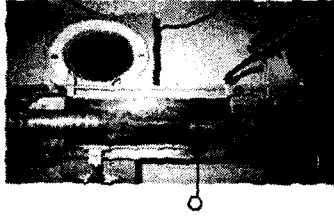


그림 4. 직선형 피스톤(SPA)의 실험사진(동작전)  
Fig. 4. Photograph of experimental result(Before)

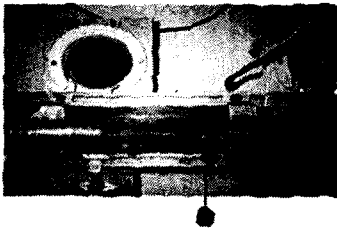


그림 5. 직선형 피스톤(SPA)의 실험사진(동작후)  
Fig. 5. Photograph of experimental result(After)

### 4. 실험 결과 분석

위 그림 4 와 그림 5 로부터 얻은 실험 결과는 아래 표 1 과 같다.

표 1. 동작상태에 따른 결과  
(권선의 저항 = 128.5 (Ω))  
Table 1. Test result of operating condition  
(Coil R = 128.5 (Ω))

	인가 전압 [V]	전류 [mA]	플런저의 변위량[mm]	기준점으로 부터 위치
동작전	0	0	0	11.0[cm]
동작후	27	200	+9	11.9[cm]
변위량	27	200	9	0.9[cm]

### 5. 결 론

직선형 피스톤 액추에이터의 해석을 위해서 패러

데이 법칙으로부터 기본 방정식을 유도하였고, 이를 바탕으로 소형, 경량, 고속 응답을 요구하는 시스템에 응용될 수 있는 실험적 자료를 얻었다. 본 논문에서는 자계로부터 일반적으로 구할 수 있는 전자기력을 기계 방정식과 결합하여 에너지 변환 이론에 의한 직선형 피스톤 액추에이터의 운동시 플런저의 특성을 구하였다. 위 표 1에서 얻어진 결과도 계산 결과와 비교적 잘 일치하였으며 이를 바탕으로 직선형 피스톤 액추에이터의 동특성을 실제 시스템에 적용할 수 있는 가능성을 얻었다. 또한 고려하지 못한 부분의 구체적인 실험과 보안을 통해 다양한 구조의 선형 액추에이터에 활용될 수 있도록 하는 것이 향후 과제이다.

### References

- (1) P.S. BAMBRA, "Generalized Circuit Theory of Electrical Machines", pp.399-420, 1975.
- (2) 김영선, 이준호, 이복용, 이기식, "유한요소법과 운동 방정식의 결합에 의한 운동체의 특성 해석", 한국 자기학회지, 제 6권 5호, pp. 281-286., 1996.
- (3) 임상준, 임기재, 김덕현, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "인버터특성을 고려한 리니어 진동 액추에이터의 동특성 해석", 2000년도 전기학회 하계학술 논문지, pp 897., 2000.
- (4) 장석영, 정삼성, 권철, 문석준, 정태영, "가동자 위치에 따른 가동 코일형 LOA 의 인덕턴스 변화와 Push/Pull 효과", 2000년도 전기학회 하계학술 논문지, pp. 900., 2000.
- (5) 안창희, "전자 오일 펌프 시스템의 수차 해석", (기초 전력 공학 공동 연구소) 1996.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 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.

#### 김양오 (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 겸임 교수.

#### 황석영 (黃錫永)

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