

에너지 변환 이론에 의한 직선형 피스톤 액추에이터의 권선부 인가 전압의 특성 해석

(Analysis of the Voltage Characteristics Applied to a Actuator Winding by Electromechanical Energy Conversion Theory)

김 양 호* · 손 응 태 · 황 석 영

(단국대)

Yang - Ho Kim* · Woong - Tae Son · Seuk - Young, Hwang (Dankook University)

요 약

본 논문에서는 직선형 피스톤 액추에이터의 응용모형을 제안하고 이를 구현하였다. 구성된 액추에이터의 해석을 위해서 패러데이 법칙으로부터 기본 방정식을 유도하였고, 이를 바탕으로 소형, 경량, 고속 응답을 요구하는 시스템에 적용 가능한 실험적 자료를 얻었다. 또한 본 논문에서는 자계로부터 일반적으로 구할 수 있는 전자기력을 에너지 변환 이론적 관점에서 기계 방정식과 결합하고 전원 공급부의 인가 전압의 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. 이 결과를 바탕으로 Linear Actuator Model 시스템과 구현된 직선형 피스톤 액추에이터의 동작이 실제 시스템에 활용될 수 있는 방법으로 가능성을 검증할 수 있었다.

Abstract

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. The input voltage characteristics of a linear actuator are analyzed on the structure of the Linear Actuator Model System. Simulation and experimental result have been performed for the verification of the proposed system and the voltage characteristics applied to a actuator winding by electromechanical energy conversion theory.

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 word: Linear Actuator, SPA(Serial Piston Actuator), electromechanical energy conversion(EEC)

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.

특히 소규모 시스템에 리니어 액추에이터를 적용할 경우 복잡한 기계적 변환 장치들이 필요 없어지므로 시스템 구조가 간단해 질 뿐 아니라 효율적인 시스템의 구성이 가능해진다. 최근 산업 현장에서 자동화가 가속화되면서 소규모 직선형 운동과 신속한 응답이 필요한 시스템에서 유공압식 피스톤과 병행하거나 대체하여 사

용할 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.[1-3]

본 논문에서는 직선형 피스톤 액추에이터의 응용모형을 제안하고 이를 구현하였다. 구성된 액추에이터의 해석을 위해서 패러데이 법칙으로부터 기본 방정식을 유도하였고, 이를 바탕으로 소형, 경량, 고속 응답을 요구하는 시스템에 적용 가능한 실험적 자료를 얻었다. 또한 본 논문에서는 자계로부터 일반적으로 구할 수 있는 전자기력을 에너지 변환 이론적 관점에서 기계 방정식과 결합하고 전원 공급부의 인가 전압의 변화로부터 액추에이터에 나타나는 현상을 Matlab 프로그램을 활용하여 간접적 방법으로 고찰하였다.

2. 에너지 변환 이론과 제안된 모델

에너지 변환 이론을 선형 액추에이터에 적용하면 플런저에 결합된 스프링의 기계적 합성력과 권선부의 전자기력간의 방정식은 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$F_i + F_f + F_s = F_e \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_i : \text{관성력} \\ F_f : \text{제동력} \\ F_s : \text{탄성력} \\ F_e : \text{전자력} \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} M : \text{플런저의 질량} \\ D : \text{감쇠계수} \\ k_s : \text{스프링상수} \\ x : \text{플런저의 변위} \\ v : \text{플런저의 속도} \end{cases}$$

식(1)을 시간함수인 전압원으로 표현하면

$$V_t = ri + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

$$\begin{cases} V_t : \text{순시전압} \\ r : \text{저항}(R\text{로도 표현}) \\ L : \text{인덕턴스} \\ i : \text{전류} \end{cases}$$

이 고 한 개의 코일에 전압이 인가되는 등가 회로로 표현하면

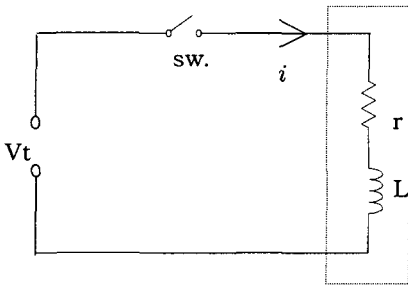


그림 1. 직선형 피스톤 액추에이터의 등가 회로
Fig. 1. Equivalent circuit of Serial Piston Actuator (SPA)

이 되며 Φ 를 전자속이라고 하면 패러데이 법칙으로부터

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

$$V_t = ri - e \quad (5)$$

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

위 식 (6)의 양변에 idt 를 곱하여 정리하면

$$V_t idt - ri^2 dt = id\Phi$$

$$(V_t - ri) idt = id\Phi$$

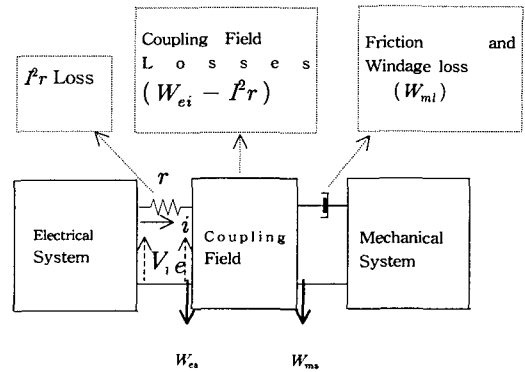
$$- e idt = id\Phi$$

$$id\Phi - e idt = 0 \quad (7)$$

이 되며 에너지 변환 장치에서 총 입력 에너지는 저장 에너지와 손실 에너지의 합으로 구성된다.[5]

2.1 전기기계적 에너지 변환 모델과 구동특성

전기기계적 에너지 변환 과정을 그림으로 표현하면 다음과 같다.



$$\begin{cases} W_{ei} : \text{전기적 입력에너지} \\ W_{es} : \text{전기적 저장에너지} \\ W_{el} : \text{전기적 손실에너지} \\ W_{mi} : \text{기계적 입력에너지} \\ W_{ms} : \text{기계적 저장에너지} \\ W_{ml} : \text{기계적 손실에너지} \end{cases}$$

그림 2. 전기기계적 에너지 변환 모델

Fig. 2. EEC energy conversion model

위 그림 2 에서 시간 미분된 전기적 입력 에너지는 $dW_{ei} = V_t idt$ (8)

와 같고 저항손은 $i^2 r$ 이므로 전기적 에너지의 변화량은

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

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

$$dW_{elec} = e i dt,$$

$$e i dt = (V_i - i r) i dt = i d\Phi \quad (10)$$

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

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

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

를 얻는다.[5] 또한 에너지 변환이론으로부터 직선형 변위를 가진 액추에이터의 변위 x 를 구하면, 플런저가 전자력의 영향으로 전자석과 플런저간의 간격 g 사이에서 변위 x 로 움직일때 권선부 전자석의 자기 저항은

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

- R_{el} : 자기저항
- μ_0 : 진공중의 투자율
- g : 전자석과플런저간의 간극
- d : 플런저와 캡간의간격
- A : 단면적

전자력은 인가 전압 V_i 에서 정상상태 전류 i 로부터 자속 ϕ 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 ϕ 는 일정하게 되어 상수처럼 다룰 수 있고, 가해진 전원이 교류일때는 $\phi = \phi_m \cos \omega t$ 이 되고 전자력은

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{2} \phi_m^2 \frac{1}{\mu_0 A} \cdot \cos^2 \omega t \\ &= \frac{1}{4} \frac{\phi_m^2}{\mu_0 A} (1 + \cos 2\omega t) \end{aligned} \quad (14)$$

전자력 F_e 가 스프링(용수철)과 마찰력, 그리고 관성 모멘트의 합보다 커질때, 여기서 k_s 는 스프링 상수이며 임의의 변위 x 에 대하여 역학계 평형 방정식으로부터 마찰력을 무시할 경우 각 식을 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 대입하면

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

$$= C(1 + \cos 2\omega t) \quad (19)$$

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

$$= C + C \cos 2\omega t \quad (20)$$

$$k_s P - 4\omega^2 Q M \cos 2\omega t + k_s Q \cos 2\omega t$$

$$= C + C \cos 2\omega t \quad (21)$$

이 된다. 위 식 (21)로부터 좌우 항을 비교하면

$$k_s P = C,$$

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

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

을 구하여 식(17)에 대입하면, 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.

2.2 제안된 직선형 피스톤 액추에이터

본 논문에서 제안된 직선형 피스톤 액추에이터(이하 SPA)의 형상을 나타내면 다음 그림과 같다.

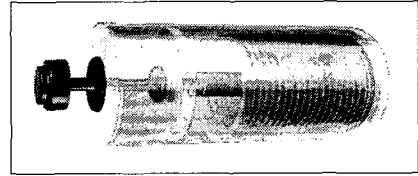


그림 3. 제안된 직선형 피스톤 액추에이터 모델
Fig. 3. Proposed Serial Piston Actuator Model

권선부의 입력단에 전압을 측정할 수 있는 디지털 오실로스코프(LeCroy LC 334A)를 부착하고, 직류 전원 장치와 파형 함수발생기(KENWOOD FG-273A)를 사용하여 전원전압을 구형파로 인가하고 측정하였다. 실험 장치도를 사진으로 나타내면 다음과 같다.

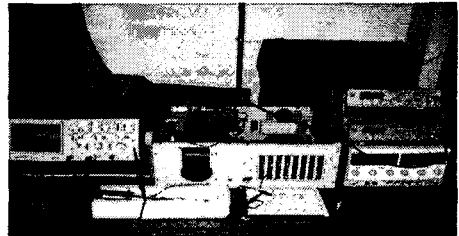


그림 4. 제안된 권선부 인가 전압 실험 장치도(사진)
Fig. 4. Proposed experimental system for input voltage with actuator winding (Photo)

2.3 실험 및 시뮬레이션 결과 검토

제안된 액추에이터 권선부에 사용된 Linear Actuator Model 내부 구성요소의 정수표는 다음 표와 같다.

표 1. Linear Actuator Model 구성요소 정수표 (Matlab 프로그램 자료)

Table 1. Parameter of the Linear Actuator Model (MatlabProgram)

Parameters	Data	비고
Natural Frequency	50	
Damping ratio	0.2	
Initial Position	0	

표 2. Signal Generator 구성요소 정수표 (Matlab 프로그램 자료)

Table 2. Parameter of the Signal Generator (MatlabProgram)

Parameters	Data	비고
Waveform	Square	
Amplitude	10	
Units	0.1	

입력 전원을 구형파로 인가하고 측정한 결과 파형과 시뮬레이션결과는 다음과 같다.

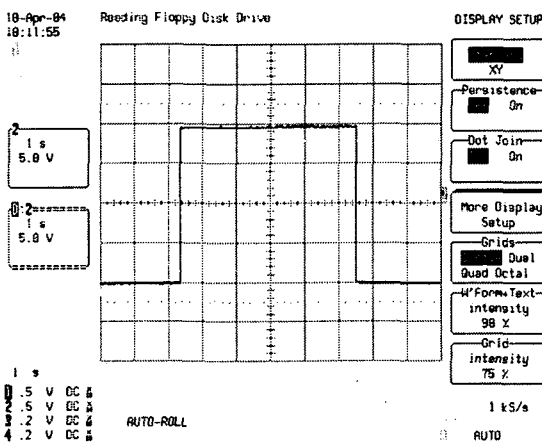


그림 5. 제안된 권선부 인가 전압 파형(실험)
Fig. 5. Experimental result for input Voltage with actuator winding part (Experimental)

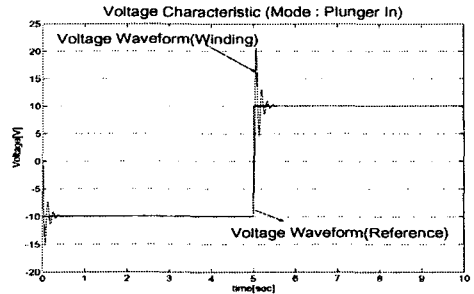


그림 6. 제안된 권선부 인가 전압 파형(시뮬레이션)
Fig. 6. Proposed experimental system for input voltage with actuator winding(Simulation)

실험 결과 파형과 시뮬레이션 결과치는 비교적 일치하였으며, 이를 통하여 실제 시스템에 활용될 수 있는 방법으로 가능성을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 직선형 피스톤 액추에이터의 응용모형을 제안하고 이를 구현하였다. 구성된 액추에이터의 해석을 위해서 패러데이 법칙으로부터 기본 방정식을 유도하였고, 이를 바탕으로 소형, 경량, 고속 응답을 요구하는 시스템에 적용 가능한 실험적 자료를 얻었다. 또한 본 논문에서는 자계로부터 일반적으로 구할 수 있는 전자기력을 에너지 변환 이론적 관점에서 기계 방정식과 결합하고 전원 공급부의 인가 전압의 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. 이 결과를 바탕으로 Linear Actuator Model 시스템과 구현된 직선형 피스톤 액추에이터의 동작이 실제 시스템에 활용될 수 있는 방법으로 가능성을 검증할 수 있었다.

Reference

- (1) 엄삼준, 임기채, 김덕현, 강규홍, 홍정표, 김규택, "인버터특성을 고려한 리니어 진동 액추에이터의 동특성 해석", 2000년도 전기학회 하계학술 논문지, pp. 897., 2000
- (2) 장석명, 정삼섭, 권철, 문석준, 정태영, "가동자 위치에 따른 가동 코일형 LOA 의 인덕턴스 변화와 Push/Pull 효과", 2000년도 전기학회 하계학술 논문지, pp. 900., 2000
- (3) 안창희, "전자 오일 펌프 시스템의 수치 해석", (기초 전력 공학 공동 연구소) 1995.
- (4) 김영선, 이준호, 이복용, 이기식, "유한요소법과 운동 방정식의 결합에 의한 운동체의 특성 해석", 한국 자기 학회 지, 제 6권 5호, pp. 281-286., 1996
- (5) P.S. BMBHRA, "Generalized Circuit Theory of Electrical Machines", pp.399-420, 1975