

온도 영역에 대한 선형 액추에이터의 실험적 고찰과 유한차분 방정식

(An Experimental Approach to the Linear Actuator with a Finite Difference Equation on the Temperature Domain)

김양호* · 손용태 · 황석영

(Yang-Ho Kim · Woong-Tae Son · Seuk-Yong Hwang)

요 약

본 논문에서는 선형 액추에이터의 권선부에 구형과 전압을 인가시 권선부의 표면에 나타나는 온도의 변화에 대해서 고찰하였다. 또한 테일러급수로부터 구할 수 있는 유한차분 방정식을 유도하였고, 이를 바탕으로 직선형 피스톤 액추에이터의 권선에서 일어나는 온도 변화에 대한 결과를 고찰하였다. 그 결과 액추에이터 표면의 온도가 주위 온도에 비해 시간에 따라 증가하는 에너지 표출 현상을 확인 하였으며 이를 바탕으로 선형 액추에이터의 동작시 온도 특성을 실제 시스템에 고려하여 적용할 수 있는 실험적 자료를 도출할 수 있었다. 이에 관한 결과는 액추에이터 뿐만 아니라 권선을 사용하는 전동기나 변압기와 같은 전기기기와 전자기력을 이용하는 분야에 참고자료로 활용될 수 있으리라 사료되며, 앞으로는 여러 조건하에서 권선의 내부와 외부에서 일어나는 온도 및 동작 특성의 정밀한 해석 결과를 구하기 위해 좀더 구체적인 계산 방법과 개선이 필요하다.

Abstract

In this paper, the energy conversion theory of the linear actuator deals with the temperature characteristic analysis with verifying temperature of Linear Actuator system. This model of linear actuator has winding part and mechanical spring, and a plunger.

This paper proposed and experimented the Linear Actuator(LA) by using finite difference equation(FDE). The experimental result represented the temperature T1 and T2 which remarks T1 is a center of magnetic road inside of actuator winding part, and T2 is a surface of actuator winding part. And the temperature characteristic of the actuator winding part are experimented by the digital temperature meter TECPEL 322.

Key Words : Linear Actuator(LA), FDE(Finite Difference Equation)

* 주저자 : 경원 전문 대학 전자정보과 겸임교수
Tel : 031-750-8750, Fax : 031-750-8759
E-mail : yhkim@kwc.ac.kr
접수일자 : 2004년 2월 9일
1차심사 : 2004년 2월 11일, 2차심사 : 2004년 3월 2일
심사완료 : 2004년 4월 6일

1. 서 론

전자기 유도 가열은 1831년 패러데이의 전자기 유도 현상, 1884년 Oliver Heviside, 1892년 J.J. Thomson 의 와전류 현상론에 바탕을 둔다.

즉 교류 솔레노이드의 철심에서 와전류에 의해 전자기 에너지가 열로 변환되는 현상을 이용한다[1].

또한 전자기력 가동 코일형 리니어 왕복 액추에이터(Linear oscillatory actuator, LOA)는 리니어 왕복 운동을 위한 추진력 발생 장치이다[2].

직선형 변위에 대한 왕복 운동이 요구되는 시스템에 있어서 주로 사용되고 있는 회전형 전동기의 경우, 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위해 스크류 너트, 랙-피니언, 기어-체인 등과 같은 별도의 기계적 변환장치가 필요하게 되므로 액추에이터로 시스템을 구성하여 사용하게 된다. 한편 이러한 선형기 기준 리니어 액추에이터는 간단한 기계적 구조와 뛰어난 속응성으로 인해 소변위 왕복 직선운동을 필요로 하는 시스템에 적합하다[3]. 다만 이러한 액추에이터중에서 전자석을 이용하여 구성하는 경우 장시간 여자될때 플런저에 포화된 자속의 영향으로 권선에 열이 발생하고 그로 인한 저항의 증가로 동작 성능이 다소 떨어지거나 반복 운동시 운동이 지연되는 경우가 발생하게 된다.

본 논문에서는 선형 액추에이터의 권선부에 구형과 전압을 인가시 권선부의 표면에 나타나는 온도의 변화에 대해서 고찰하였다. 또한 테일러급수로부터 구할 수 있는 유한차분 방정식을 유도하였고, 이를 바탕으로 선형 액추에이터의 권선표면과 자로에서 일어나는 온도 변화를 고찰하였다.

2. 액추에이터의 구성과 유한 차분 방정식

2.1 선형 액추에이터의 구성

액추에이터의 등가회로 모델은 그림 1과 같이 구성되며 권선 부분에 흐르는 전류로 인한 자계 세기의 변화로 인한 자기력에 의해 자기로드로 플런저를 끌어 당겨서 직선 변위를 일으키는 일종의 전기력을 기계력으로 변환하는 장치이다. 직선형 변위가 필요한 펌프 계통이나 자동화 시스템에 사용될 수 있는 리니어 액추에이터(이하 LA)시스템은 기본적으로 전자석을 이용한 것이다[1],[5].

그림 1은 등가회로로 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.

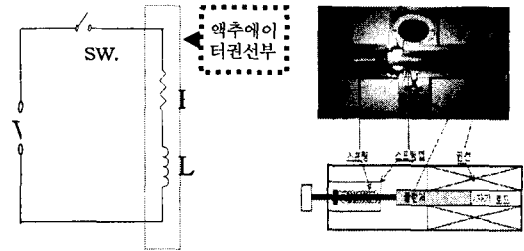


그림 1. 직선형 피스톤 액추에이터의 등가 회로
Fig. 1. Equivalent circuit of SPA

2.2 테일러 급수 이용한 유한 차분 방정식

유한차분법은 일반적으로 Taylor급수를 이용하므로 여기서도 Taylor급수를 이용하여 여러 가지 미분항을 표현하기로 한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서 T : 온도(Temperature),

α : 열확산계수(Coefficient of thermal diffusivity)이다.

식 (1)의 좌변인 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 를 Taylor급수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$T(t + \Delta t, x) = T(t, x) + \Delta t \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{(t,x)} + \frac{\Delta t^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right|_{(t,x)} + \dots + \frac{\Delta t^N}{N!} \left. \frac{\partial^N T}{\partial t^N} \right|_{(t,x)} + \dots + \infty \quad (2)$$

식 (2)를 $\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{(t,x)}$ 에 대하여 정리하면

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{(t,x)} = \frac{T(t + \Delta t, x) - T(t, x)}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2} \left. \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right|_{(t,x)} - \dots - \infty \quad (3)$$

와 같고 여기서 식 (3)의 우변의 첫번째항만 고려하면

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{(t,x)} \approx \frac{T(t + \Delta t, x) - T(t, x)}{\Delta t} \quad (4)$$

으로 근사화할 수 있다.

다음으로 식 (1)의 우변을 유한 차분화하기 위하여 Taylor급수를 영역 x 에 대해 전개한 다음,

온도 영역에 대한 선형 액추에이터의 실험적 고찰과 유한차분 방정식

$$T(t, x + \Delta x) = T(t, x) + \Delta x \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{(t, x)} + \frac{\Delta x^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{(t, x)} + \frac{\Delta x^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right|_{(t, x)} + \dots + \infty \quad (5)$$

$$T(t, x - \Delta x) = T(t, x) - \Delta x \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{(t, x)} + \frac{\Delta x^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{(t, x)} - \frac{\Delta x^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right|_{(t, x)} + \dots + \infty \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 더하여 나온 식을 $\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{(t, x)}$ 에 대

하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{(t, x)} = \frac{T(t, x + \Delta x) - 2T(t, x) + T(t, x - \Delta x)}{\Delta x^2} - \frac{2\Delta x^2}{4!} \left. \frac{\partial^4 T}{\partial x^4} \right|_{(t, x)} + \dots + \infty \quad (7)$$

식 (7) 역시, 첫 번째 항만 취하여 근사화시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{(t, x)} \approx \frac{T(t, x + \Delta x) - 2T(t, x) + T(t, x - \Delta x)}{\Delta x^2} \quad (8)$$

식 (4)와 (8)을 식 (1)에 대입하면 식 (9)와 같고

$$\frac{T(t + \Delta t, x) - T(t, x)}{\Delta t} = \alpha \frac{T(t, x + \Delta x) - 2T(t, x) + T(t, x - \Delta x)}{\Delta x^2} \quad (9)$$

이 식을 $T(t + \Delta t, x)$ 에 대하여 정리하면 식(10)을 얻을 수 있다.

$$T(t + \Delta t, x) = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \{ T(t, x + \Delta x) - 2T(t, x) + T(t, x - \Delta x) \} + T(t, x) \quad (10)$$

본 식의 표기를 간명하게 하기 위하여 다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} T(t, x) &= T_i^n \\ T(t + \Delta t, x) &= T_i^{n+1} \\ T(t, x + \Delta x) &= T_{i+1}^n \\ T(t, x - \Delta x) &= T_{i-1}^n \end{aligned} \quad (11)$$

정의된 식을 식 (10)에 적용하고 정리한 후, $\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$ 을 d 로 정의하면

$$T_i^{n+1} = T_i^n + d(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) \quad (12)$$

를 얻는다. 이 식을 바탕으로 전자기 해석방법중 축차법(逐次法)이나 반복법(反復法)을 사용하여 수작업이나 전자계산기를 이용하면 정확도가 높은 전위차를 구할 수 있다[6].

이 식을 FDE(Finite Difference Equation, 유한차분 방정식)이라고 부르며, 본 논문에서는 우선 실험적 검토를 중점적으로 다루기로 한다.

3. 온도 변화 실험 결과 검토

3.1 액추에이터 권선부의 사양

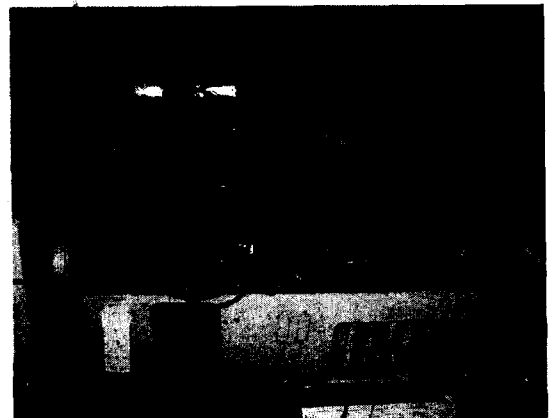
본 논문에서 실험에 사용된 액추에이터 권선부의 사양은 다음과 같다.

표 1. 액추에이터 권선부의 사양
Table 1. Specification of Actuator Winding Part

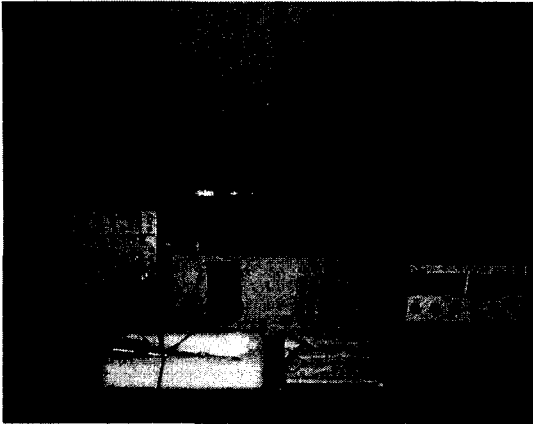
항 목	수 치[단위]	비 고
인가 전원[V]	DC 10[V], Square Wave 10[Hz]	
저 항[R]	125.7 [Ω]	주위온도 =20도(섭씨)
길이[l]	50[mm]	
내경[d ₁]	15[mm]	
외경[d ₂]	30[mm]	

3.2 액추에이터 시스템의 표면온도 측정 실험

액추에이터 권선부의 표면과 외부 온도를 측정하기 위하여 구성된 실험장치의 사진은 다음과 같다.



(a) 온도 실험 장치



(b) 전체 실험 장치

그림 2. 액추에이터 시스템의 실험 사진
Fig. 2. Experimental Photograph of Actuator System

표 1과 위 그림 2로부터 얻은 실험 결과는 아래 표 2와 같다.

표 2. 동작상태와 시간에 따른 온도 및 저항 변화 (주변 온도 = 15 °C)

Table 2. Experimental result of resistance and temperature by the variable time and operating condition (Circumference temperature = 15(°C))

측정 부위 \ 온도, 저항	초기 온도 [°C]	최종 온도 [°C]	초기 저항 [Ω]	최종 저항 [Ω]
T1 (고정자 자로)	15.9	17.2		
T2 (권선 표면)	15.6	17.5	123	124.5
T2-T1 (온도 변화량)	-0.3	+0.3		

표 2에 나타난 바와 같이 액추에이터 권선부 자료의 온도 T1(플런저의 이동 경로)에 비하여 권선 표면의 온도 T2가 시간에 따라 증가함을 알 수 있다.

4. 실험값의 검토

온도 측정 장비(TECPEL 322)로 측정된 권선 표면의 온도 변화 그래프는 그림 3과 같다.

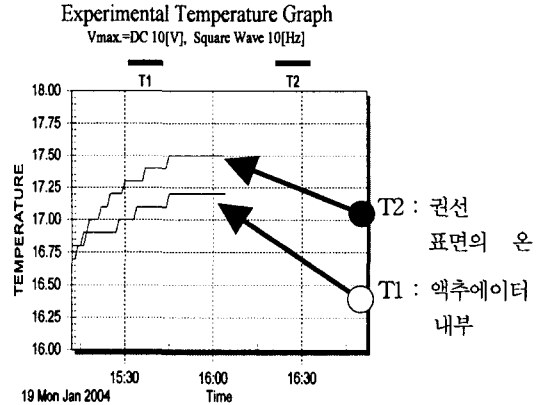


그림 3. 시간에 따른 온도 변화 그래프 (Vmax.=DC 10(V), Square Wave 10(Hz))

Fig. 3. Experimental result of temperature graph with time(Vmax.=DC 10(V), Square Wave 10(Hz))

5. 결 론

본 논문에서는 액추에이터에 일정 시간(약 한시간) 이상 여자시 권선부에 나타나는 온도의 변화에 대해서 고찰하였다. 또한 테일러급수로부터 구할 수 있는 유한차분 방정식을 유도하였고, 이를 직선형 피스톤 액추에이터의 여자시 권선에서 일어나는 온도의 변화에 실험적 방법으로 접근하고 그 결과를 고찰하였다. 그 결과 표 2와 그림 3에서 얻어진 바와 같은 실험 결과를 얻었으며, 이를 바탕으로 직선형 피스톤 액추에이터의 동작시 온도 특성을 실제 시스템에 고려하여 적용할 수 있는 실험적 자료를 도출할 수 있었다. 이에 관한 결과는 액추에이터뿐만 아니라 권선을 사용하는 전동기나 변압기와 같은 전기 기기와 전자기력을 이용하는 분야에 참고자료로 활용될 수 있으리라 사료되며, 앞으로는 여러 조건하에서 권선의 내부와 외부에서 일어나는 온도 및 동작 특성의 정밀한 해석을 구하기 위해 좀더 구체적인 계산 방법과 개선을 위한 연구가 필요하다.

References

- [1] 장석명 김송집, 차상도, 박찬일, 박희창, "유도 가열 인덕터의 특성 해석", 2000년도 전기학회 하계학술 논문지B권, pp. 594-596, 2000.
- [2] 장석명, 권철, 정상선, 성소영, 이봉래, 김봉수, "구동 방식을 고려한 가동코일형 LOA 의 동특성", 2000년도 전

온도 영역에 대한 선형 액추에이터의 실험적 고찰과 유안차분 방정식

- 기학회 하계학술 논문지B권, pp. 681-683, 2000.
- (3) 임상준, 임기재, 김덕현, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "인버터특성을 고려한 리니어 진동 액추에이터의 동특성 해석", 2000년도 전기학회 하계학술 논문지, pp. 897, 2000.
- (4) P.S. BAMBHA, "Generalized Circuit Theory of Electrical Machines", pp.399-420, 1975.
- (5) 김영선, 이준호, 이복용, 이기식, "유한요소법과 운동방정식의 결합에 의한 운동체의 특성 해석", 한국자기학회지, 제 6권 5호, pp. 281-286, 1996.
- (6) William Hayt 원저 박麒洙역, "전자기학" pp. 186-216, 1990.

손웅태 (孫雄泰)

1954년 4월 22일생. 1982년 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 단국대학교 대학원 전기공학과 박사 수료. 1997년~현재 경원 전문대학 전자정보과 강사. 1997년~현재 두원공과대학 강사.

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.

◇ 저자소개 ◇

김양호 (金養鎬)

1966년 6월 14일생. 1991년 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 박사 과정 수료. 1998년~현재 한영 전기공업(주) 기술연구소장. 2002년~현재 경원 전문대학 전자정보과 겸임교수.