

와전류의 영향을 고려한 솔레노이드 액츄에이터의 동작특성 해석

성백주 이은웅* 김형의
한국기계연구원 충남대학교

Analysis of Operational Characteristic for Solenoid Actuator Considering Eddy Current Effects

Baek-Ju, Sung Eun-Woong, Lee* Hyoung-Eui, Kim
Korea Institute of Machinery & Materials Chung Nam National University*

Abstract - Solenoid actuator's operating speed is affected by magnetic motive force, plunger mass, inductance, return spring constant, and eddy current. Recently, non-magnetic ring is generally used for improving the operational speed, because it is impossible that changing of any specified design factor and stacking of plunger steel.

This paper represents the dynamic equations of solenoid actuator, simulations for the response characteristics, analysis of eddy current effect by using the induced time constant. And, we experiment for the operating characteristics in case of non-magnetic ring is exists and not exists in the plunger.

그림1은 본 연구에서 사용한 고속 솔레노이드 액츄에이터의 모델이다. 그리고, 그림2는 직류 저항성분 R과 인덕턴스 L, 전압 Vs로 나타낸 전기적 등가회로이고, 그림3은 플런저 질량 M, 마찰저항 Rv, 스프링 상수 k로 나타낸 기계적 등가회로이다.⁽¹⁾⁽²⁾

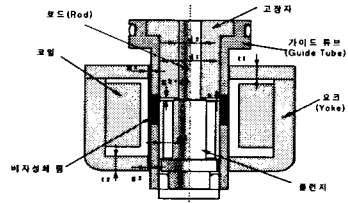


그림1 고속 솔레노이드 액츄에이터 모델

1. 서 론

솔레노이드 액츄에이터의 속도를 증가시키기 위해서는, 기자력을 크게하고, 플런저 질량, 인덕턴스, 복원 스프링 상수가 작게되도록 설계해야 한다. 그러나, 이들 상수들은 설계목표치에 부합되게 고정되고, 서로 독립적인 관계가 아닌 상호 연관성을 가지고 있기 때문에, 특정 상수값을 변경하면 다른 값도 연계해서 변하게 되어 이들 값을 변경하여 플런저 속도를 상승시키는 것은 사실상 불가능하다⁽¹⁾

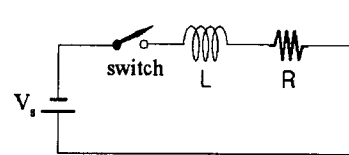


그림2 전기적 등가회로

그리고, 솔레노이드 액츄에이터 회로에서 전압의 크기가 변하거나 스위치의 ON, OFF 동작이 반복되면, 자속의 점진적 증감과 함께 플런저에 와전류(Eddy Current)가 발생하고 솔레노이드 액츄에이터의 작동속도를 감소시키는 하나의 인자로서 작용한다. 와전류의 영향을 저감시키기 위해서는 플런저를 적층해야 하는데 이것은 플런저의 무게 상승과 크기의 증가, 그리고 제작단가를 높이는 결과를 초래하므로 소형 액츄에이터에서는 현실적으로 적용하기 어렵다.

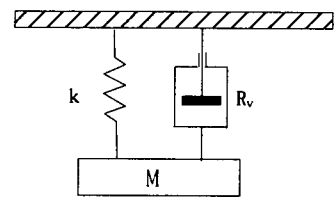


그림3 기계적 등가회로

이러한 설계상의 어려움과 하드웨어 적용의 문제점 때문에, 현재에는 비자성체 링을 사용하여 누설자속을 최소화시키고 자속을 집중시킴으로서 플런저 이동속도를 증가시키는 방법을 주로 사용한다.

본 연구에서는 솔레노이드 액츄에이터의 동특성 방정식을 유도하고 응답특성을 시뮬레이션 하였으며, 원형 단면적 코어에서의 와전류 지속시간을 산출하는 시정수 계산식을 유도하여 흡인시와 복귀시에 발생하는 와전류의 영향을 분석하였으며, 실험을 통하여 비자성체 링이 있는 경우와 없는 경우의 동작 특성을 비교하여 보았다.

그림1에서, g1은 고정자 측에서의 요크와 가이드 튜브 사이의 공극, g2는 고정자와 플런저 사이의 공극, g3는 플런저 측에서의 요크와 가이드 튜브 사이의 공극을 각각 나타낸다. 이들 공극에서의 릴럭턴스를 각각 R1, R2, R3라 하면, 전 릴럭턴스 R은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$= \frac{g_1 l_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4 d_3^2) + 4 (g_2 - x) d_1 l_1 l_2 g_3 l_1 (d_1^2 - d_2^2 - 4 d_3^2)}{\mu_0 \pi d_1 l_1 l_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4 d_3^2)} \quad (1)$$

2. 본 론

2.1 특성 방정식

그리고, 인덕턴스 L은 식(2)로 나타내진다.

$$L = \frac{N^2}{R} = \frac{\mu_0 \pi d_1 t_1 t_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4d_3^2) N^2}{g_1 t_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4d_3^2) + 4(g_2 - x) d_1 t_1 t_2 + g_3 t_1 (d_1^2 - d_2^2 - 4d_3^2)} \quad (2)$$

코일내에 유도되는 기전력 e 는 식(3)과 같이 된다.

$$e = \frac{d}{dt}(L \cdot i) = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

시간에 따른 전압의 변화 특성은 식(4)와 같다.

$$V(t) = iR + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

그리고 솔레노이드 액츄에이터 변위에 따른 동적인 힘의 변화는 식(5)로 나타내어진다..

$$F_{\mu d} = \frac{\partial W_{\mu d}(i, x)}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \quad (5)$$

여기서,

$$\frac{dL}{dx} = \frac{\mu_0 \pi d_1 t_1 t_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4d_3^2) \cdot 4 d_1 t_1 t_2 N^2}{[g_1 t_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4d_3^2) + 4(g_2 - x) d_1 t_1 t_2 + g_3 t_1 (d_1^2 - d_2^2 - 4d_3^2)]^2}$$

그림2와 그림3을 참조로 하면, 솔레노이드 액츄에이터의 동특성은 1차 비선형 미분 방정식 (6),(7),(8)로 모델링이 가능하다^{[3][4]}.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M} [(F_m - (R_v \cdot x_2) - (k \cdot x_1))] \quad (7)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{L(x_1)} [(V(t) - x_3 \cdot R - x_3 \cdot \frac{dL(x_1)}{dx_1} \cdot x_2)] \quad (8)$$

여기서,

$x_1 = x$: 플런저 위치, $x_2 = \dot{x}$: 플런저 속도

$x_3 = i$: 솔레노이드 전류, F_m : 흡인력

2.2. 와전류의 시정수

J를 전류밀도, H를 자계의 세기, B를 자속밀도라 하면, 맥스웰 방정식에서, 식(9)와 식(10)의 관계가 성립한다.

$$\text{Curl } H = J \quad (9)$$

$$\text{Curl } E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (10)$$

여기에서, 코어(Core) 재질의 투자율을 μ , 도전율 σ 가 일정하다고 가정하고, 옴의 법칙(Ohm's Law)을 적용하면, 식(11)이 된다.

$$\nabla^2 B = \mu\sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (11)$$

그리고, 플런저의 단면적이 원형이므로, 그림4의 원통형 좌표계를 적용하는 것이 적합하고, 여기에서는 반경 r 방향만을 고려하므로 식(11)은 식(12)와 같이 된다^[5].

$$\frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial r} = \mu\sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (12)$$

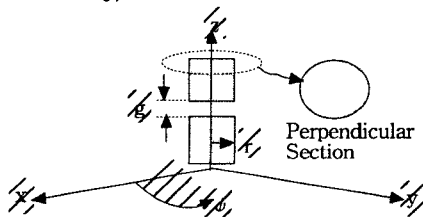


그림4 원통 좌표계

따라서, 자속밀도는 식(13)과 같이 구해진다.

$$B = B_0 e^{-\frac{t}{\tau}} J_0 \left[\sqrt{\frac{\mu\sigma}{\tau}} r \right] \quad (13)$$

회로를 차단하자마자 단면적 가장자리의 자속밀도는 0으로 감소한다. 즉, $t=0$ 일 때 $r=r_0$ 인 원통 표면에서의 자속밀도는 0이 되어야 한다. 이 관계로 부터, 식 (14)를 얻을 수 있다.

$$J_0 \left[\sqrt{\frac{\mu\sigma}{\tau}} r_0 \right] = 0 \quad (14)$$

식(14)의 성립조건은,

$$\sqrt{\frac{\mu\sigma}{\tau}} r_0 = 2.405 ; 5.520 ; 8.654 \dots \dots$$

일 때 만족된다. 최대 시정수는 첫 번째 근을 사용하여 결정하고, 이것은 식(15)와 같다.

$$\tau_0 = \mu\sigma \left(\frac{r_0}{2.405} \right)^2 \quad (15)$$

여기에서, 고정자와 플런저 사이의 공극(Air Gap)을 x , 플런저의 길이를 l 이라 하고, 철심회로에서의 자기저항을 무시하면, 공극의 영향은 투자율만을 바꿈으로서 식(16)과 같은 관계식으로 된다.

$$\mu' = \frac{l}{x} \mu \quad (16)$$

2.3 동작특성 시뮬레이션 및 와전류 시정수 계산

2.3.1 동작특성 시뮬레이션

식(7)과 (8)을 이용하여 솔레노이드 액츄에이터의 전류와 플런저 위치 특성을 시뮬레이션 했을 때의 그래프를 그림5에 나타내었다. 그리고, 이때 사용한 솔레노이드 액츄에이터의 사양은 표1과 같다.

표1 솔레노이드 액츄에이터의 사양

항 목	사 양
코일저항 (Ω)	20
입력전압 (V)	DC24
플런저 질량 (g)	6.15
스트로크 (mm)	0.3
복원스프링 상수 (g/mm)	387
플런저 반경 r(mm)	4.45
플런저 길이 l (mm)	15
투자율 μ (Wb/A.T)	1.91×10^{-4}
도전율 γ (1/ Ω .m)	1.09×10^9

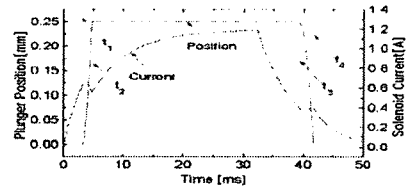


그림5 솔레노이드 전류와 플런저 위치(시뮬레이션)

그림5에서, $t_1 \sim t_2$ 구간은 플런저가 최초로 기동을 시작하여 고정자에 완전히 흡착되기 까지의 시간이고, $t_3 \sim t_4$ 구간은 플런저가 고정자에서 떨어지기 시작한 시점부터 복원 스프링의 초기 압축상태로 되돌아 오는데 까지의 시간 영역을 나타낸다^[6].

2.3.2 와전류 시정수 계산

솔레노이드가 ON 되는 시점에는, 스트로크에 해당하는 공극이 있으므로 최대 시정수는 식(15)와 식(16)을 사용하여 구한다.

$$\tau_{0,on} = \left(\frac{15 \times 10^{-3}}{0.3 \times 10^{-3}} \right) 4\pi \times 10^{-7} \times 1.09 \times 10^6 \left(\frac{4.45 \times 10^{-3}}{2.405} \right)^2 = 0.126 \text{ (ms)}$$

그리고, 솔레노이드가 OFF되는 시점에는, 고정자와 플런저가 흡착되어 있는 상태로서 공극이 없으므로 식(15)만을 사용하여 최대 시정수를 구한다.

$$\tau_{0,off} = 1.91 \times 10^{-4} \times 1.09 \times 10^6 \left(\frac{4.45 \times 10^{-3}}{2.405} \right)^2 = 0.385 \text{ (ms)}$$

2.4 실험 결과

그림6은 비자성체 링이 없는 가이드 튜브를 장착한 솔레노이드 액추에이터의 실험 결과로서, 그림6(a)는 입력 신호와 전류파형, 그림6(b)는 전류파형과 가속도계 출력파형을 나타낸 것으로 플런저의 작동시간이 약 10ms인 것을 알 수 있다.

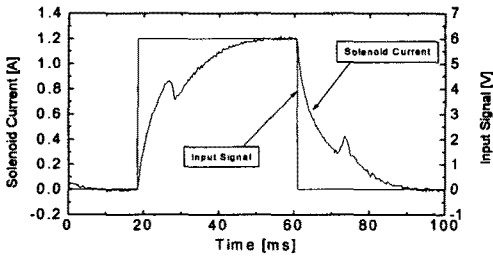


그림6(a) 스텝입력과 솔레노이드 전류

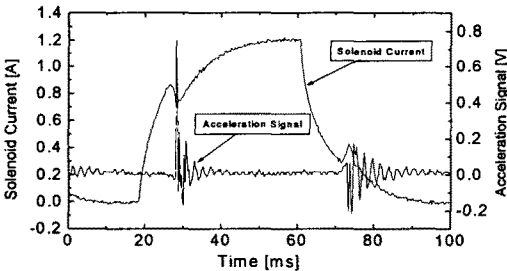


그림6(b) 솔레노이드 전류와 가속도계 출력
그림6 비자성체 링이 없는 솔레노이드 액추에이터의 동작특성

그림7(a)는 비자성체 링이 있는 가이드 튜브를 장착한 솔레노이드 액추에이터의 입력 신호와 전류 파형을, 그림7(b)는 전류파형과 가속도계 출력파형을 나타낸 것으로 플런저의 작동시간이 약 3ms로서 그림6과 비교하여 작동시간이 단축된 것을 알 수 있다.

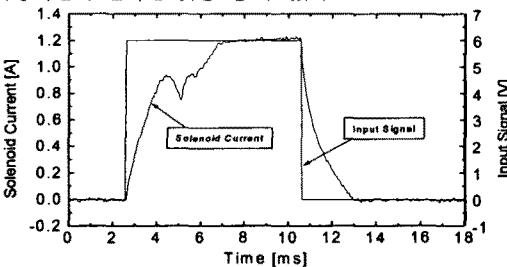


그림7(a) 스텝입력과 솔레노이드 전류

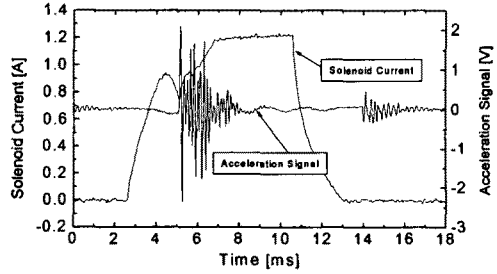


그림7(b) 솔레노이드 전류와 가속도계 출력
그림7 비자성체 링이 있는 솔레노이드 액추에이터의 동작특성

3. 결 론

본 연구에서는 솔레노이드 액추에이터를 고속화 하기 위한 중요 변수인 비자성체 링의 유무에 따른 작동시간을 실험적으로 비교하고, 솔레노이드 액추에이터의 동특성 시뮬레이션과 동특성에 영향을 미치는 와전류의 지속시간을 계산하여,

- (1) 비자성체 링이 솔레노이드 액추에이터의 작동속도에 미치는 효과를 실험적으로 증명한 그림(6)과 그림(7)로부터, 비자성체 링이 있는 경우의 작동속도가 없는 경우보다 3배 이상 빠르다는 사실을 알 수 있었고,
- (2) 와전류에 대한 시정수 계산결과로부터, 솔레노이드 액추에이터에서 발생하는 와전류는 코일의 초기여자 시점과 플런저 복귀 초기시점에 집중되어 발생한다는 사실을 알 수 있었고, 비록 와전류의 지속시간은 짧으나 액추에이터의 작동속도가 고속화 될 수록 동작에 미치는 영향이 커질 수 있음을 예측할 수 있었으며,
- (3) 시뮬레이션 해석과 실험결과가 잘 일치함을 확인하였고, 이 해석기법을 사용함으로써 솔레노이드 액추에이터의 동작 특성을 비교적 정확히 예측할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. Roters, "Electro Magnetic Device", John Wiley & Sons, Inc, 1970
- [2] T. Kajima, "Dynamic Model of the Plunger Type Solenoid at Deenergizing State", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31, No.3, pp2315~2323, May 1995
- [3] 강보식, 윤소남, 성백주, 김형의, "PWM 제어용 고속전자석의 특성에 관한 연구", 한국기계연구원 연구논문집, 제 27집, pp141~151, 1997. 12
- [4] K. Ogata, "System Dynamics", Prentice Hall, 1998. 1
- [5] T. Kajima, S. Satoh, R. Sagawa, "高速電磁弁の開発", 日本電氣學會 論文集(C編) 60권 576호, pp254~261, 1994. 8
- [6] 성백주, 이은용, 김형의, "개폐식 솔레노이드 액추에이터용 설계 프로그램 개발", 2002 대한전기학회 회계학술대회 논문집B, pp929~931, 2002. 7. 10