

고속 솔레노이드 액추에이터의 특성 해석

성백주\* 이은웅\*\* 김형의\*  
 \*한국기계연구원 \*\*충남대학교

Characteristics Analysis of High-Speed Solenoid Actuator

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

**Abstract** - The plunger speed of solenoid actuator is affected by mass of plunger, magnetic motive force, inductance, and return spring. These factors are not independent but related with each other according to design characteristics of solenoid actuator. So, it is impossible to change the designed value for the purpose of increasing plunger speed. In this study, we have analyzed the characteristics of high-speed solenoid actuator having a non-magnetic ring which plays a role to concentrate the effective magnetic flux into plunger. For more detailed analysis, we have induced characteristic equations and performed FEM analysis and simulation for dynamic characteristics of plunger, and proved the propriety of these by experiments.

$V_s$ 로 나타낼 수 있으므로 등가 전기회로는 그림2(a)와 같다<sup>[1][2]</sup>. 그리고,  $M$ 은 플런저 질량,  $R_v$ 는 마찰저항,  $k$ 는 스프링 상수인 기계적 등가회로는 그림3(b)로 나타내진다<sup>[3]</sup>.

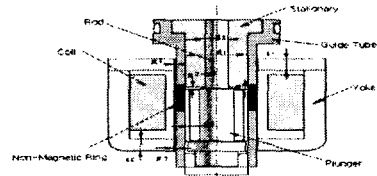


그림1. 고속 솔레노이드 액추에이터 모델

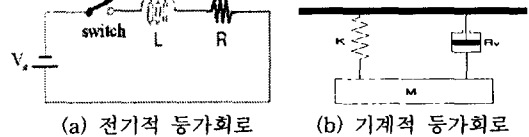


그림2. 등가회로

1. 서 론

솔레노이드 액추에이터는 가격이 저렴하고 오염이나 온도 및 습도에 대한 내환경성이 강하지만 작동속도가 늦다는 특징이 있기 때문에, 기존의 개폐식 솔레노이드 액추에이터의 응답특성을 개선한 형태인 고성능의 고속형 솔레노이드 액추에이터 개발의 필요성이 대두되고 있다.

솔레노이드 액추에이터의 플런저 속도는 플런저 질량, 기자력, 인덕턴스, 복원스프링 등에 의하여 영향을 받는데, 속도를 증가시키기 위해서는 기자력을 크게하고 플런저 질량, 인덕턴스, 복원 스프링 상수를 작게해야 한다. 그러나, 이러한 솔레노이드 액추에이터의 설계변수들은 설계목표치에 부합되게 고정되고 서로 독립적인 관계가 아닌 상호 연관성을 가지고 있기 때문에, 특정 상수 값을 변경하면 다른 값도 연계해서 변하게 되어 이들 값을 변경하여 플런저 속도를 상승시키는 것은 사실상 불가능하다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서는 플런저 작동 속도를 상승시키기 위한 방법으로서 비자성체 링이 삽입된 가이드 튜브를 갖는 솔레노이드 액추에이터의 동작 특성을 해석하기 위하여, 비자성체 링의 위치 및 길이 변화에 따른 FEM 해석과 솔레노이드 액추에이터의 동적특성에 대한시뮬레이션을 실시하였으며, 시작기의 실험을 통하여 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 특성 방정식

그림1은 본 연구에서 사용한 고속 솔레노이드 액추에이터의 모델이다. 고속전자밸브의 구동부인 솔레노이드 액추에이터는 직류저항 성분  $R$ 과 인덕턴스(Inductance)  $L$ 로 이루어져 있으며, 솔레노이드를 자화시키는 기전력은 직류저항 성분  $R$ 과 인덕턴스  $L$ 에 의한 전압 강하량

그림1에서,  $g_1$ 은 고정자 측에서의 요크와 가이드 튜브 사이의 공극,  $g_2$ 는 고정자와 플런저 사이의 공극,  $g_3$ 는 플런저 측에서의 요크와 가이드 튜브 사이의 공극을 각각 나타낸다. 이들 공극에서의 릴럭티스를 각각  $R_1, R_2, R_3$ 라 하면, 전 릴럭티스  $R$ 은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{g_1 t_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4 d_3^2) + 4 (g_2 - x) d_1 t_1 t_2 + g_3 t_1 (d_1^2 - d_2^2 - 4 d_3^2)}{\mu_0 \pi d_1 t_1 t_2 (d_1^2 - d_2^2 - 4 d_3^2)} \quad (1)$$

그리고, 인덕턴스  $L$ 은 식(2)로 나타내진다.

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

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..

$$F_{fld} = \frac{\partial W'_{fld}(i, x)}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \quad (5)$$

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<sup>[5][6]</sup>.

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

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

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

여기서,  $x_1 = x$ :플런저 위치,  $x_2 = \dot{x}$ : 플런저 속도  
 $x_3 = i$ :솔레노이드 전류,  $F_m$ :흡인력

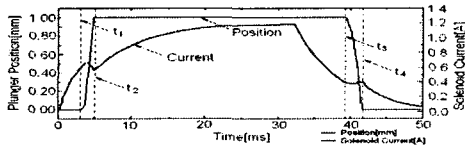
### 2.2 동작특성 시뮬레이션

식 (7)과(8)을 이용하여 솔레노이드 액츄에이터의 전류와 플런저 위치 특성을 시뮬레이션 했을 때의 그래프를 그림 3에 나타내었다. 그리고, 이때 사용한 솔레노이드 액츄에이터의 사양은 표1과 같다.

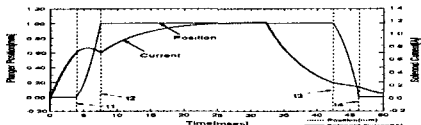
그림 3으로부터 솔레노이드에 흐르는 전류파형 만으로도 플런저가 어떻게 움직이는지를 예측할 수 있다. 즉,  $t_1 \sim t_2$  구간은 플런저가 최초로 기동을 시작하여 고정자에 완전히 흡착되기 까지의 시간이고,  $t_3 \sim t_4$  구간은 플런저가 고정자에서 떨어지기 시작한 시점부터 복원 스프링의 초기 압축상태로 되돌아 오는데 까지의 시간 영역이다.  $t_1$ 과  $t_2$  사이의 구간에서 전류가 급감하고,  $t_3$ 와  $t_4$  사이에서 전류가 급증하는 영역이 존재하는 것은 플런저의 흡착과 분리에 따른 자기저항의 감소 및 증가 때문에 발생하는 솔레노이드 액츄에이터의 전자기적 특징이다<sup>[7]</sup>.

표1 솔레노이드 액츄에이터의 사양

항목	코일 저항 R	입력 전압 V	플런저 질량 M	스트 로크 x	고정 공극 $g_f$	복원 스프링 상수 k
사양	20( $\Omega$ )	DC24(V)	6.15(g)	0.95(mm)	0.05(mm)	387(g/mm)



(a) 비자성체 링이 있는 경우



(b) 비자성체 링이 없는 경우

그림3. 솔레노이드 전류와 플런저 위치(시뮬레이션)

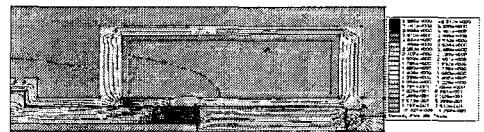
### 2.3 전자장의 FEM 해석

솔레노이드 액츄에이터에 대한 전자장 해석은, 솔레노이드의 유효기자력 사용효율을 최대화 할 목적으로 가이드 튜브 중간에 삽입한, 비자성체 링의 설치 위치와 길이에 따른 자기적 특성을 분석하기 위해서 실시하였다. 솔레노이드 액츄에이터의 형상이 축대칭이란 점을 고려하여 축방향 1/4 단면을 가정하여 해석하였다.

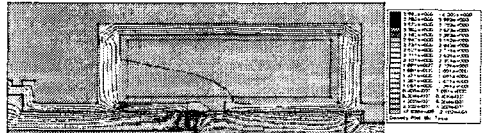
그림 4는 플런저의 변위를 0.3mm로 고정시키고 비자성체 링의 길이 중심을 고정자와 플런저의 중심과 일치시킨 경우와 일치시키지 않은 경우의 전자장 해석결과를 나타내고, 그림 5는 비자성체 링의 길이 변화에 대한 전자장 해석결과를 나타낸다.



(a) 중심이 공극 중심과 일치한 경우

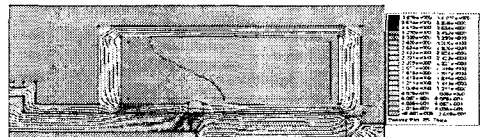


(b) 중심이 공극 중심 왼쪽에 위치한 경우

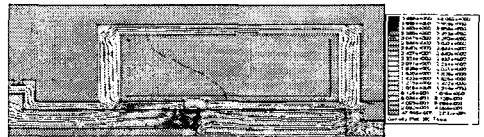


(c) 중심이 공극 중심 오른쪽에 위치한 경우

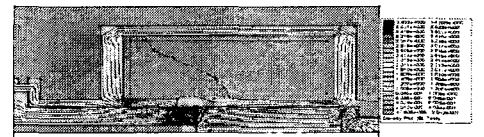
그림 4. 비자성체 링의 길이중심 위치에 따른 FEM 해석결과



(a) 길이 2mm의 경우



(b) 길이 3mm의 경우



(c) 길이 5mm의 경우

그림 5. 비자성체 링의 길이 변화에 따른 FEM 해석결과

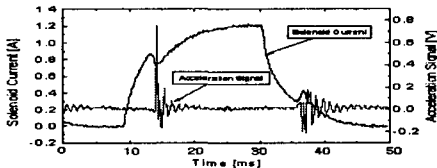
그림 4에서, 비자성체 링의 길이 중심이 플런저와 고정자의 중심과 일치할 경우의 플런저 지속 밀도가 중심이 왼쪽 혹은 오른쪽으로 치우쳤을 때 보다 높은 것을 알 수 있다.

그리고 그림 5에서, 비자성체 링의 길이 변화는 플런저 자속 밀도에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

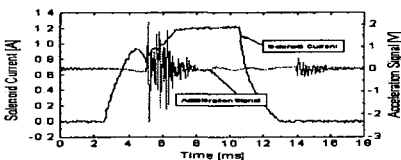
### 3. 실험

실험은, 비자성체 링의 유무에 따른 플런저의 작동시간과 비자성체 링의 위치 및 길이변화에 따른 흡인력을 측정하기 위하여, 동일 솔레노이드 액추에이터에 비자성체 링이 있는 가이드 튜브 1개와 비자성체 링이 없는 가이드 튜브 1개, 그리고 비자성체 부분의 길이가 각각 다른 가이드 튜브 3개를 사용하여 실시하였다. 그리고, 플런저 흡인 시점을 감지하기 위해서 가속도 센서를 사용하였다.

그림 6은 플런저의 작동시간 측정 결과를 나타낸다.



(a) 비자성체 링이 없는 경우

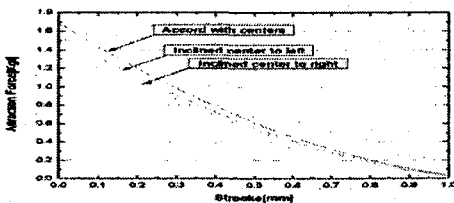


(b) 비자성체 링이 있는 경우

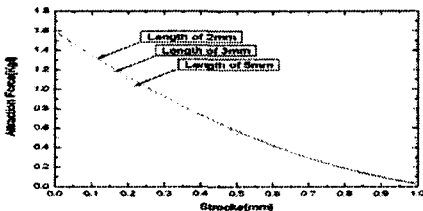
그림 6. 작동시간 측정 결과

그림 6에서, 비자성체 링이 있는 경우의 작동속도가 없는 경우보다 2배 이상 빠르다는 사실을 알 수 있고, 이것은 그림4의 시뮬레이션 결과와 일치한다.

그림 7은 그림 4와 그림 5의 6가지 경우에 대한 흡인력 측정 결과를 나타낸다. 비자성체 링의 길이 중심이 플런저와 고정자 중심과 일치할 때 가장 큰 흡인력이 발생함을 알 수 있고, 이것은 그림 4와 그림 5의 FEM 해석결과와 일치함을 알 수 있다.



(a) 비자성체 링의 위치 변화에 따른 흡인력



(b) 비자성체 링의 길이 변화에 따른 흡인력

그림 7. 흡인력 측정 결과

주파수 응답시험은 시작품 액추에이터의 최대 응답주파수를 구하기 위하여, 플런저가 입력 구형파 주파수를 추종하지 못하는 시점까지 측정하였다. 그림 8은 입력 신호를 추종하는 코일 전류 파형을 나타내고, 여기에서 최대 응답주파수는 25Hz 임을 알 수 있다.

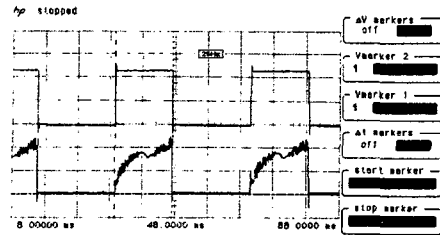


그림 8. 주파수 응답특성

### 4. 결론

본 연구에서는 솔레노이드 액추에이터를 고속화 하기 위한 중요 변수인 비자성체 링의 위치와 길이 변화에 대한 자속밀도 분포를 유한요소법으로 해석하였고, 솔레노이드 액추에이터의 동특성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 분석함으로써,

- (1) 비자성체 링의 길이 중심 위치는 고정자와 고정자의 중심에 일치되도록 설치하는 것이 최적임을 확인하였고,
- (2) 흡인력과 작동속도는 비자성체 링의 길이 보다 설치 위치에 더 큰 영향을 받는다는 것을 규명하였으며,
- (3) 시뮬레이션 해석과 실험결과가 잘 일치함을 확인하였고,
- (4) 주파수 응답 시험 결과를 통하여, 비자성체 링을 사용한 플런저속도 증가 방법은 PWM 액추에이터에도 적용될 수 있다는 사실을 알았으며,
- (5) 이 해석기법을 사용함으로써 솔레노이드 액추에이터의 동적 특성을 비교적 정확히 예측할 수 있었다.

### [참고 문헌]

- [1] B.J. Sung, E.W. Lee, H.E.Kim, "Characteristics of Non-Magnetic Ring For High-Speed Solenoid Actuator", CEF C2004 Digest Book, pp342, June 6-9, 2004.
- [2] 강보식, 윤소남, 성백주, 김형의, "PWM 제어용 고속전자의 특성에 관한 연구", 한국기계연구원 연구논문집, 제 27집, pp141--151, 1997. 12
- [3] Katsuhiko Ogata, "System Dynamics", Prentice Hall, 1998. 1
- [4] Herbert C. Roters, "Electro Magnetic Device", John Wiley & Sons, Inc, 1970
- [5] 성백주, 이은웅, 김형의, "개폐식 솔레노이드 액추에이터용 설계 프로그램 개발", 2002 대한전기학회 하계학술대회 논문집B, pp929--931, 2002. 7. 10
- [6] Takashi Kajima, "Dynamic Model of the Plunger Type Solenoid at Deenergizing State", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31, No.3, pp2315--2323, May 1995
- [7] Takashi Kajima, Shuichi Satoh, Ryuichi Sagawa, "고속電磁弁의開發", 日本電氣學會 論文集(C編), 60권 576호, pp254 -261, 1994. 8