

공기압 밸브 기폐용 솔레노이드 액추에이터의 속응성 해석

성백주 이은웅* 김형의
한국기계연구원 *충남대학교

Analysis of Fast Response Characteristics of Solenoid Actuator for Pneumatic Valve

Baek-Ju, Sung Eun-Woong, Lee* Hyung-Eui, Kim
Korea Institute of Machinery & Materials *Chung Nam 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 paper, we performed the FEM analysis for non-magnetic ring which is used for increasing attraction force and plunger speed by concentration of effective magnetic flux, and also performed simulation for dynamic characteristics of plunger. And, we proved the propriety of these by experiments.

그리고 솔레노이드 액추에이터의 동적특성에 대한 시뮬레이션을 실시하였으며, 시자기의 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 R과 인덕턴스(Inductance) L로 이루어져 있으며, 솔레노이드를 자화시키는 기전력은 직류저항 성분 R과 인덕턴스 L에 의한 전압 강하량 V_s 로 나타낼 수 있으므로 등가 전기회로는 그림2와 같다⁽³⁾⁽⁴⁾. 그리고, M은 플런저 질량, R_v 는 마찰저항, k는 스프링 상수인 기계적 등가회로는 그림3으로 나타내진다.

1. 서 론

최근 자동차 분야와 항공관련 분야로 부터 기존의 개폐식 솔레노이드 액추에이터의 응답특성을 개선한 형태인 고성능의 고속형 솔레노이드 액추에이터 개발의 필요성이 대두되고 있으며, 제어성능 보다 안전에 더 큰 비중을 두고 있는 산업분야에서도 공통적으로 개발의 필요성이 대두되고 있다. 그 이유는 개폐식 솔레노이드 액추에이터가 제어식 액추에이터에 비해 정도(精度)는 떨어지지만 가격이 저렴하고 오염이나 온도 및 습도에 대한 내환경성이 강하다는 특징이 있기 때문이다.

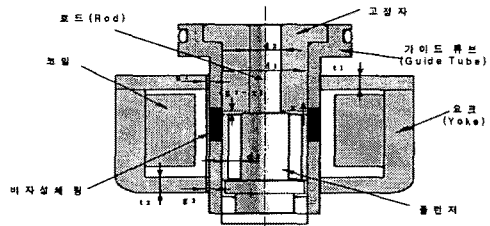


그림1 고속 솔레노이드 액추에이터 모델

현재에도 자동차 분야에서는 엔진의 연료량 제어를 위한 전자 제어식 연료분사기로 이용하고 있고, ABS와 TCS 같은 고속의 작동특성이 필요한 브레이크 시스템에 응용하려 하고 있으며, 항공 분야에서는 비행기의 날개를 빠른 속도로 제어하기 위한 목적으로 사용하려 하고 있다.

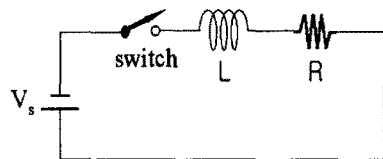


그림2 전기적 등가회로

그러나 고속형 솔레노이드 액추에이터는, 반복작동에 따라 일어나는 절환시간 지연, 반송주파수에 따른 비선형 특성 때문에 제어하기가 용이하지 않으며 이것이 액추에이터의 고속화와 고성능화에 가장 큰 장애요인으로 작용하고 있다⁽¹⁾⁽²⁾.

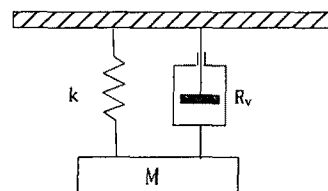


그림3 기계적 등가회로

플런저 속도는 플런저 질량, 기자력, 인덕턴스, 복원 스프링 등에 의하여 영향을 받는데, 속도를 증가시키기 위해서는 기자력을 크게하고, 플런저 질량, 인덕턴스, 복원 스프링 상수를 작게해야 한다. 그러나, 솔레노이드 액추에이터의 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⁽³⁾.

따라서, 본 연구에서는 일정한 기자력을 최대한 이용하기 위하여 누설자속을 최소화 시켜 자속을 집중시킴으로써 플런저 이동속도를 증가시키는 방법인 비자성체 링에 대한 전자장 해석을 수행하였다.

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 릴럭턴스를 각각 R_1, R_2, R_3 라 하면, 전 릴럭턴스 R 은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

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

그리고, 인덕턴스 L 은 식(2)로 나타내진다.

$$L = \frac{N^2}{R}$$

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

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..

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

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⁽¹⁾⁽⁵⁾.

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

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

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

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 그래프

를 그림 4에 나타내었다. 그리고, 이때 사용한 솔레노이드 액츄에이터의 사양은 표1과 같다.

표1 솔레노이드 액츄에이터의 사양

항 목	사 양
코일저항 R	20(Ω)
입력전압 V	DC24(V)
플런저 질량 M	6.15(g)
스트로크 x	0.25(mm)
고정공극 g_f	0.05(mm)
복원스프링 상수 k	387(g/mm)

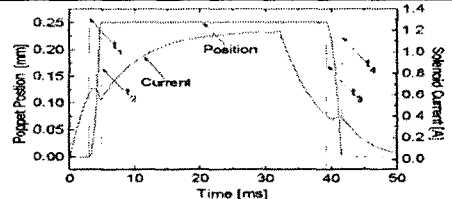


그림4 솔레노이드 전류와 플런저 위치(시뮬레이션)

이 그림 4로부터 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.

2.3 전자장의 FEM 해석

솔레노이드 액츄에이터에 대한 전자장 해석은 솔레노이드의 누설자속을 최소화시켜 기자력을 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. 전자장 해석에 사용한 주요 입력 데이터는 표2와 같다.

표2 주요 입력 데이터

항 목	입력 데이터
코일 권선수 N(Turn)	930
코일 직경 d_c (mm)	0.25
코일 저항 R(Ω)	20
입력전압 V(V)	DC 24V
플런저 질량 M(g)	6.15
플런저 직경 d_p (mm)	9.9
스트로크 x(mm)	0.25
고정공극 g_f (mm)	0.05
복원 스프링 상수 k(g/mm)	387
플런저 및 고정자 비투자율 μ_p (Wb/AT)	1520
요크 투자율 μ_v (Wb/AT)	1250

플런저의 변위를 0.2mm로 고정시키고 비자성체 링의 길이 중심을 고정자와 플런저의 중심과 일치시킨 경우의 전자장 해석결과와 일치하지 않은 경우의 해석결과를 그림5(a),(b)에 각각 나타내었다. 그리고 이때 출력되는 흡인력 계산값은 표3과 같다.

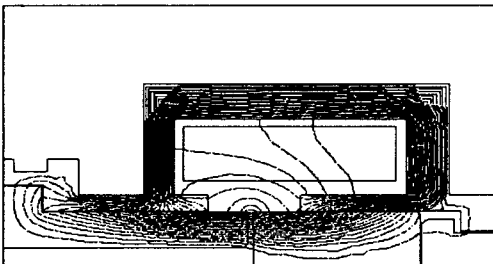
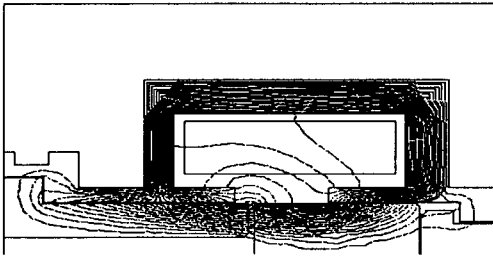
그림5(a) 중심이 서로 일치하지 않은 경우

그림5(b) 중심이 서로 일치한 경우
그림5 비자성체 링의 위치변화에 따른 자속분포

표3 비자성체 링의 위치 변화에 따른 흡인력

분 류		흡인력
플런저와 고정자 중심과 비자성체 링의 중심	일치	1.59 kgf
	불일치	1.47 kgf

그림5와 표3에서, 비자성체 링의 중심이 고정자와 플런저의 중심과 일치한 경우가 일치하지 않은 경우보다 누설자속이 저감되고 흡인력 계산값 또한 증가함을 알 수 있다.



비자성체 링의 중심을 고정자와 플런저의 중심과 일치시키고, 비자성체 링의 길이를 변화시킨 경우의 전자장 해석 결과를 그림6에, 이때의 흡인력 크기를 표4에 각각 나타내었다.

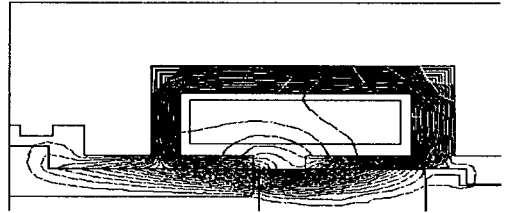
그림6(a) 길이 6mm에서의 자속분포

그림6(b) 길이 8mm에서의 자속분포
그림6 비자성체 링의 길이 변화에 따른 자속분포

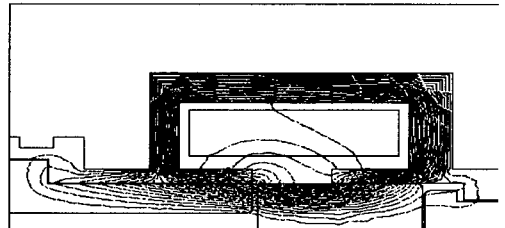
표4 비자성체 링의 길이변화에 따른 흡인력 결과

분 류		흡인력
비자성체 링의 길이 변화	6mm	1.63 kgf
	8mm	1.56 kgf

표4에서의 비자성체 링 길이는 플런저 스트로크 보다 크므로, 주 공극에서의 누설자속 영향을 해석하기에 충분하다. 그림6과 표4에서, 비자성체 링의 위치를



플런저와 고정자 중심에 들 경우의 비자성체 링의 길



이는, 코일과 쇠교하는 유효자성체의 절반이내 길이에서 최대 흡인력이 발생됨을 알 수 있다. 그러나 흡인력과 플런저 작동속도에 미치는 영향력은 비자성체 링의 위치를 변화시켰을 경우보다 미약함을 알 수 있다.

3. 실험

비자성체 링의 유무에 따른 플런저 작동시간을 비교하기 위해서, 스텝입력에 대한 솔레노이드 전류 측정과 가속도 센서를 사용한 작동시간 측정 실험을 실시하였다. 동일 솔레노이드 액추에이터에 비자성체 링이 있는 가이드 튜브와 비자성체 링이 없는 가이드 튜브를 각각 사용하여 실시하였다. 스텝입력 신호는 DAQ(Data Acquisition Unit) 측정의 편의를 위하여 4:1로 감압하여 측정하였다.

그림7은 비자성체 링이 없는 가이드 튜브를 장착한 솔레노이드 액추에이터의 실험 결과로서, 그림7(a)의 입력 신호 전류파형, 그림7(b)의 전류파형과 가속도계 출력파형을 나타낸 것으로 플런저의 작동시간이 약 10ms 인 것을 알 수 있다.

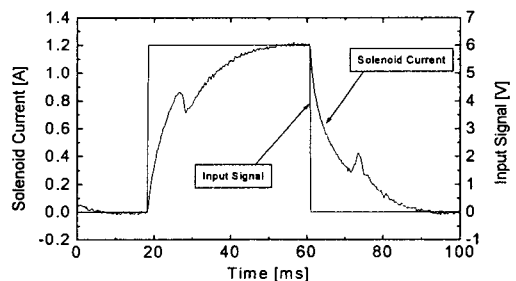


그림7(a) 스텝입력과 솔레노이드 전류

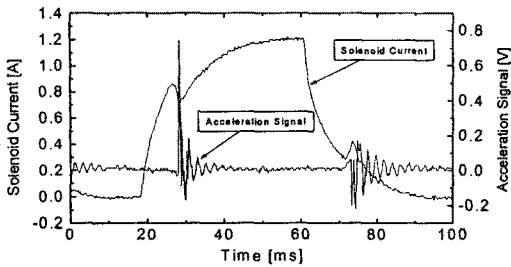


그림7(b) 솔레노이드 전류와 가속도계 출력
그림7 비자성체 링이 없는 솔레노이드 액추에이터의 동작특성

그림8(a)는 비자성체 링이 있는 가이드 튜브를 장착한 솔레노이드 액추에이터의 입력 신호와 전류 파형을 그림 8(b)는 전류파형과 가속도계 출력파형을 나타낸 것으로 플러저의 작동시간이 약 3ms로서 그림7과 비교하여 작동시간이 단축된 것을 알 수 있다.

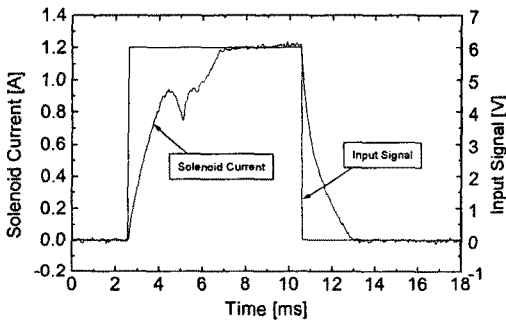


그림8(a) 스텝입력과 솔레노이드 전류

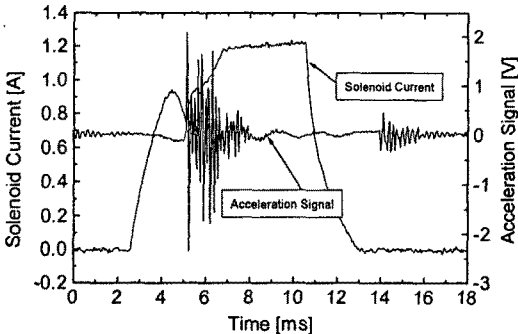


그림8(b) 솔레노이드 전류와 가속도계 출력
그림8 비자성체 링이 있는 솔레노이드 액추에이터의 동작특성

3. 결 론

본 연구에서는 솔레노이드 액추에이터를 고속화 하기 위한 중요 변수인 비자성체 링의 위치와 길이에 대한 자속밀도 분포를 유한요소법으로 해석하였고, 솔레노이드 액추에이터의 동특성을 시뮬레이션 해석과 실험으로

- (1) 비자성체 링의 위치는 가동자와 고정자의 중심에 일치되도록 설치하는 것이 최적임을 확인하였고,
- (2) 흡인력과 작동속도는 비자성체 링의 길이 보다 는 설치 위치에 더 큰 영향을 받는다는 것을 규명하였고,

- (3) 시뮬레이션 해석과 실험결과가 잘 일치함을 확인하였고,

그리고, 이 해석기법을 사용함으로써 솔레노이드의 동적 특성을 비교적 정확히 예측할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- (1) 강보식, 윤소남, 성백주, 김형의, "PWM 제어용 고속전자석의 특성에 관한 연구", 한국기계연구원 연구논문집, 제 27집, pp141151, 1997. 12
- (2) Takashi Kajima, "Dynamic Model of the Plunger Type Solenoid at Deenergizing State", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31, No.3, pp2315-2323, May 1995
- (3) Herbert C. Roters, "Electro Magnetic Device", John Wiley & Sons, Inc, 1970
- (4) Takashi Kajima, Shuichi SATOH, Ryuichi SAGA WA, "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
- (5) Katsuhiko Ogata, "System Dyanamics", Prentice Hall, 1998. 1
- (6) 성백주, 이은웅, 김형의, "개폐식 솔레노이드 액추에이터용 설계 프로그램 개발", 2002 대한전기학회 하계학술대회 논문집B, pp929-931, 2002. 7. 10