

고전압 차단기용 솔레노이드 액추에이터의 거동 Behavior of the Solenoid Actuator for High-Voltage Circuit Breaker

윤소남 · 함영복 · 안병규 · 김고도

S. Yun, Y. B. Ham, B. K. Ahn and G. D. Kim

Key Words : Force amplifier(힘 증폭기구), Flux density(자속밀도), B-H curve(B-H 선도), Circuit breaker(차단기), Attracting force(흡인력)

Abstract: In the last few years, a considerable number of studies have been made on On-Off solenoid for fluid control. But, only few attempts have so far been made at solenoid actuator for high-voltage circuit breaker. In case of the high-pressure and high-flow system like high-voltage circuit breaker, a big size of On/Off solenoid is necessary which size is proportional to control pressure and flow rate. So, it is non-effective in the view point of system optimization. In this paper, On/Off solenoid actuator with the force amplifier connected to the solenoid rod was proposed to get a high mechanical force and a fast response time. The magnetic force and the mechanical stress distributions were analysed using finite element analysis. The performances of suggested solenoid actuator were evaluated through the experimental results and compared with the analysis results.

기호 설명

- d_s : 가동자 변위 [mm]
- j_0 : 전류밀도 [A/m^2]
- j_e : 와전류밀도 [A/m^2]
- N : 솔레노이드 코일의 권선수 [turns]
- R_a : 솔레노이드코일의 저항 [Ω]
- r_0 : 요소(e)의 중심의 반경 [mm]
- S : 코일영역의 단면적 [mm^2]
- t_{da} : 지연시간 [s]
- t_r : 상승시간 [s]
- t_s : 안정시간 [s]
- V : 자속의 변화에 의한 유도기전력 [V]
- λ : 쇄교 자속량 [Wb]
- τ : 시정수 [s]

1. 서 론

온-오프 솔레노이드를 이용하여 고압력과 대유량을 동시에 제어하기 위해서는 솔레노이드를 구성하는 재료의 자속밀도가 매우 우수하거나 제어대상 압력 및 유량에 비례하여 커다란 솔레노이드의 필요성이 요구되나 설치 공간 확보 및 최적설계공학면에서 비효율적이라 볼 수 있으며, 2단 혹은 3단 방식으로 압력과 유량을 제어하는 경우도 역시 단수의 증가에 따라 응답속도가 현저히 떨어지기 때문에 힘 증폭기구를 이용하여 힘과 동시에 응답시간을 향상시키는 방법들이 제안되고 있다^{1~5)}.

본 연구에서는 솔레노이드 플런저 로드부에 지렛대 방식의 힘 증폭기구를 연결시켜 볼 형식 포켓 밸브를 구동시킴으로써 소정의 고전압 차단 동작을 행하는 액추에이터 제작을 목적으로, 솔레노이드부 및 몸체부를 설계·제작하고, 성능시험을 통하여 본 연구에서 개발된 액추에이터의 특성을 파악하기로 한다.

2. 이론해석

Fig. 1은 연구의 대상으로 하는 고전압 차단용 액추에이터의 외관을 나타내고, Fig. 2는 고전압 차단용 액추에이터의 구성 요소인 솔레노이드를 나

접수일 : 2004년 6월 20일
 윤소남(책임저자) : 한국기계연구원 첨단산업기술연구부
 E-mail : ysn688@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7155
 함영복, 안병규 : 한국기계연구원 첨단산업기술연구부
 김고도 : SG servo(주)

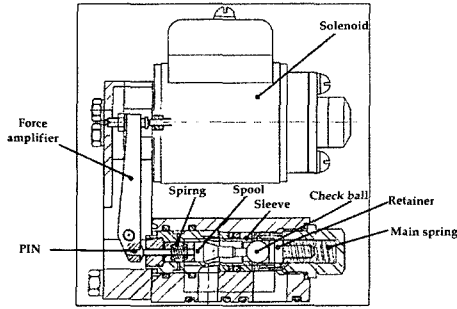


Fig. 1 Schematic of an actuator for high-voltage circuit breaker

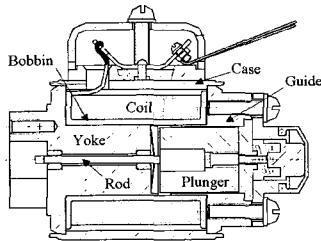


Fig. 2 Solenoid actuator model

타낸다. 솔레노이드 코일에 전압을 입력하면 요크부가 자화되어 플런저를 당기게 되고 플런저와 일체로 되어있는 로드와 힘 증폭장치를 구동시켜 최종적으로 피아로트부의 포켓밸브를 구동시킴으로써 유체의 흐름을 제어할 수 있다.

2.1 유한요소법에 의한 과도상태 해석

2.1.1 지배방정식

과도 상태에서 솔레노이드 액추에이터 내부에는 와전류가 발생하므로 와전류를 고려한 시변 자기장의 지배 방정식은 식 (1)로 표현된다^{3~6)}.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \hat{A}) = \hat{J}_0 + \hat{J}_e \quad (1)$$

식 (1)에서 \hat{J}_0 , \hat{J}_e 는 각각 전류밀도, 와전류밀도를 의미하며, 와전류 밀도는 식 (2)로 정의한다.

$$\hat{J}_e = -\sigma \left(\frac{\partial \hat{A}}{\partial t} + \nabla \Phi \right) \quad (2)$$

식 (2)에서 전위항을 무시하고, 식 (1)에 대입하여 축대칭 3차원 문제를 고려하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) \right] = -\sigma \frac{dA_\theta}{dt} - J_{o\theta} \quad (3)$$

식 (3)을 각 요소에 대하여 갤러킨 법으로 정식화하면 요소(e)에서 요소 행렬 방정식은 식 (4)와 같다.

$$[S_0]^{(e)} \{A\}^{(e)} + [P]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} - [Q]^{(e)} I^{(e)} = 0 \quad (4)$$

2.1.2 회로 방정식의 결합

전압을 입력으로 하는 솔레노이드 액추에이터의 등가 전기회로에 대한 회로 방정식은 누설 리액턴스 성분을 무시하면 식 (5)와 같다.

$$V = R_a I(t) + \frac{d\lambda}{dt} \quad (5)$$

여기에서, R_a 는 솔레노이드코일의 저항, V 는 자속의 변화에 의한 유도기전력을 의미하며, λ 는 쇄교 자속량을 나타낸다.

과도상태를 해석하는 경우에는 전류가 변화함에 따라서 솔레노이드에 쇄교하는 자속이 변화하기 때문에 코일에 유도기전력이 발생하는데, 이 관계를 수식으로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{2\pi N}{S} \frac{d}{dt} \int_{s^{(e)}} r_0 A^{(e)} ds = [G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} \quad (6)$$

여기에서, N 은 솔레노이드 코일의 권선수이고, S 는 코일영역의 단면적, 그리고 r_0 는 요소(e)의 중심의 반경이다. 식 (5)의 회로방정식에 식 (6)을 대입하면 식 (7)과 같다.

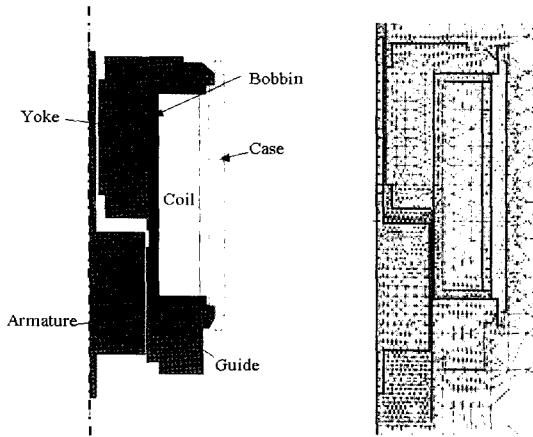
$$[G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} + R_a I(t) = V \quad (7)$$

따라서 식 (4)의 지배방정식과 식 (7)의 회로 방정식을 결합하여, 미지수가 자기벡터 포텐셜과 전류로 표현되는 식을 얻어 유한요소해석을 한다.

3. 유한요소 해석 결과

3.1 솔레노이드 해석 결과

본 논문의 해석 모델인 고전압 차단기용 솔레노이드 액추에이터의 형상을 Fig. 3(a)에 보이며, 해석영역은 축대칭을 고려하여 단면의 1/2만을 해석하였고, 해석영역의 요소 분할도를 Fig. 3(b)에 보인다.



(a) analysis region (b) finite element mesh
Fig. 3 Analysis model of solenoid actuator

Table 1 Specifications of solenoid actuator

Voltage [V]	Number of Turns [Turns]	Resistance [Ω]	Weight of plunger [g]
75~125	1100	14	40.8

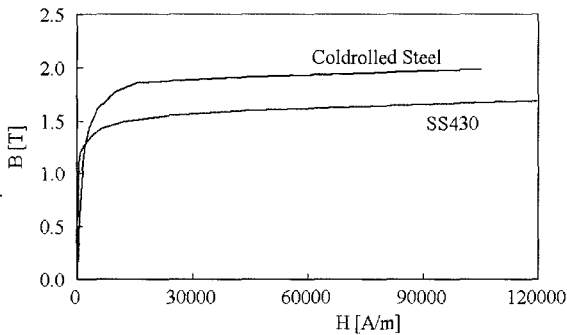
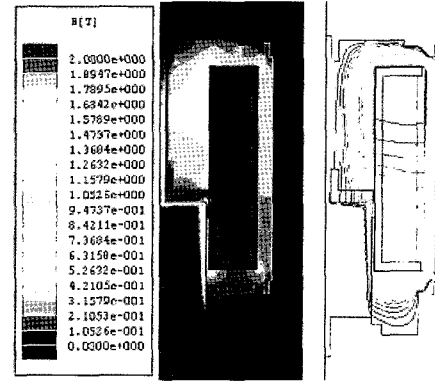


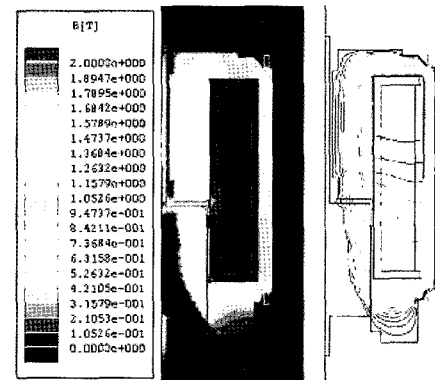
Fig. 4 B-H characteristics of magnetic materials

본 연구에서는 솔레노이드 액추에이터의 입력전압으로 75~125[V]의 직류전원을 사용하였으며, 권회수 및 권선저항 등에 관한 사양을 Table 1에 보인다. 자성체의 비선형성을 고려하기 위하여 Fig. 4에 보이는 자성체의 B-H 특성곡선을 사용하였다.

Fig. 5에 플런저의 이동이 시작되는 순간과 이동이 완료된 후의 시간에서 자속의 흐름과 자속밀도 분포를 보인다. Fig. 5(a)는 $t=2$ [ms]에서의 자속의 흐름 및 자속밀도 분포로서, 이 때는 플런저의 표면에 발생하는 와전류의 영향으로 대부분의 자속이 플런저의 표면을 타고 흐르게 된다. 그리고 요크와 플런저 사이의 공극이 매우 크기 때문에 플런저와 일체형으로 되어 있는 로드(rod)부분에도 많은 양의 자속이 집중되어 자속밀도가 공극보다 높게 됨



(a) time = 2 [ms]



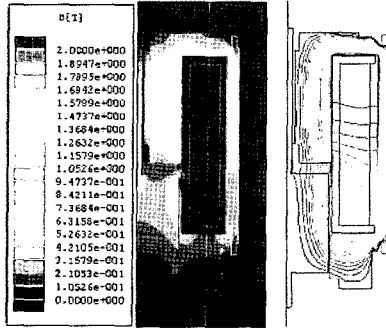
(b) time = 11 [ms]

Fig. 5 Flux density distributions of solid type plunger

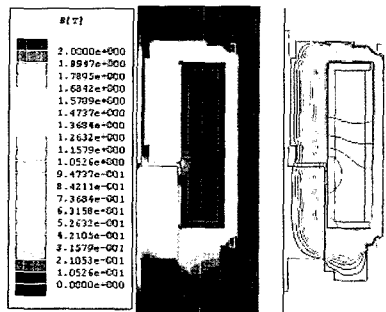
을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 플런저가 이동을 완료한 후인 $t=11$ [ms]에서의 자속의 분포를 보이는 것으로, 이 때는 와전류의 영향이 많이 줄어들어 플런저의 안쪽까지 자속이 침투하였고, 요크와 플런저 사이의 공극도 충분히 작아져 많은 양의 자속이 이 공극을 통과하여 흐르기 때문에 공극의 자속밀도도 많이 높아졌다.

본 연구에서는 공극의 자속밀도를 높여 플런저의 흡입력을 높이기 위한 방법으로 플런저의 구조를 적층형(lamination type)으로 변경하여 특성을 해석하였다. 플런저의 구조를 적층형으로 하면 회전기의 코어를 적층해서 사용하는 것과 마찬가지로, 플런저에 발생하는 와전류를 억제할 수 있다.

Fig. 6은 플런저를 적층하여 제작하였을 경우의 자기장의 분포를 해석한 결과이다. Fig. 6(a)은 플런저의 이동 초기인 $t=2$ [ms]에서의 자속의 흐름 및 자속밀도 분포로서, 플런저에 와전류가 발생하지 않는 경우에는 자속이 플런저의 내부로 침투할 수 있어 결과적으로 많은 양의 자속이 발생하여 요크와



(a) time = 2 [ms]



(b) time = 11 [ms]

Fig. 6 Flux density distributions of laminated plunger

플런저 사이의 공극을 통해서 흐를 수 있다. Fig. 6(b)는 $t=11[ms]$ 에서도 플런저의 내부까지 자속이 흐르는 것을 볼 수 있으며, 대부분의 자속은 플런저와 요크 사이의 공극을 통해서 흐른다.

3.2 힘 증폭기구 해석 결과

Fig. 7은 본 연구에서 설계된 힘 증폭장치 해석 모델을 보이는 것으로 솔레노이드로부터 생겨나는 흡인력을 6.66배로 증폭할 수 있도록 설계하였으며, 지지대의 중심이 각각 4, 5, 6 [mm] 일 때를 기준으로 하여 응력 및 휘어짐 정도를 해석하였다. Fig. 8은 Fig. 7의 모델 1, 2, 3에 대한 해석 결

과를 보이는 것으로 힘 전달능력 및 전달방향, 응력 분포의 균일성을 비교한 결과, 모델 1의 경우가 우수하다는 것이 확인되었다.

4. 고전압 차단용 액추에이터 실험결과

4.1 실험장치 및 실험방법

실험대상 모델로 제작한 고전압 차단용 액추에이터는 연구자들이 목적으로 하는 입력전압 125V 최대압력 350bar에서 구동되며, 전술한 FEM 해석 및 설계알고리즘을 근거로 설계·제작한 시제품을 사용하였다. Fig. 9에 액추에이터의 성능을 측정할 수 있는 솔레노이드 제어·계측 장치도를, Fig. 10에 액추에이터 성능평가 유압회로를 보인다. 실험장치

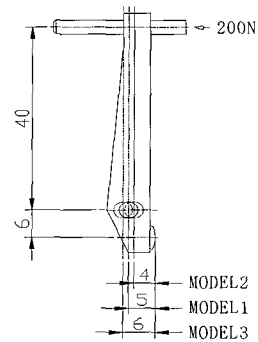


Fig. 7 Analysis model of force amplifier

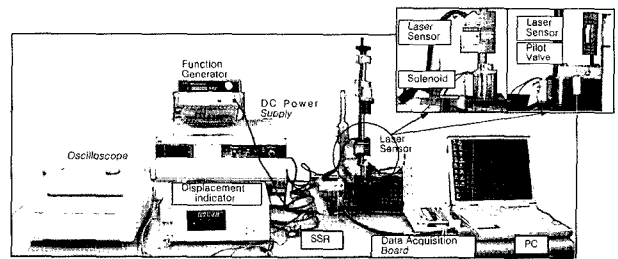


Fig. 9 Test equipment for solenoid performance evaluation

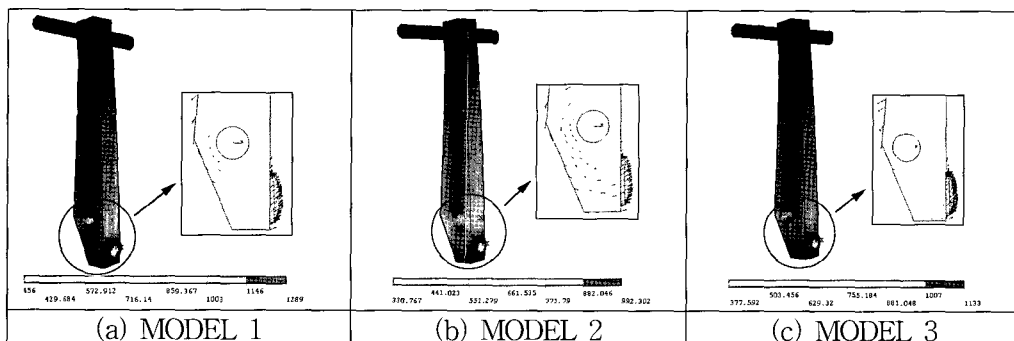


Fig. 8 Analysis results of force amplifier

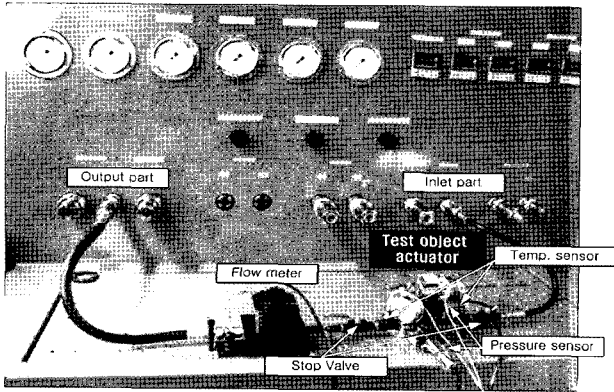


Fig. 10 Test equipment of digital pilot actuator

및 유압회로는 한국공업규격(KS)⁹⁾ 및 일본공업규격(JIS)¹⁰⁾을 토대로 구성되었으며, Fig. 9의 경우는 스텝신호에 따른 변위 및 힘, Fig. 10의 경우는 온도, 압력, 유량을 계측하여 밸브의 성능을 예측할 수 있도록 설계되었다.

4.2 실험결과 및 고찰

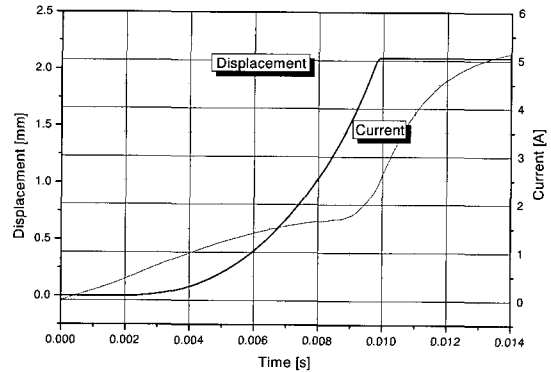
Fig. 11에 솔레노이드의 스텝응답특성에 대한 FEM 해석결과와 실험결과를 보인다. Fig. 11에서 (b)는 컴퓨터를 통하여 계측된 결과이고, (c)는 전류특성을 확인하기 위하여 오실로스코프에 측정된 결과를 보이는 것이다. 스텝응답 지연시간은 2ms로 해석결과와 실험결과가 일치하는 것을 알 수 있으며, 상승시간의 경우도 1ms의 차이로 실험결과가 약간 크게 나왔으나, 이것은 가공에 의존하는 마찰 및 점성 등의 물리인자의 변화의 원인으로 사료된다.

스텝변화에 따른 전류 특성의 경우도, 해석 및 실험결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

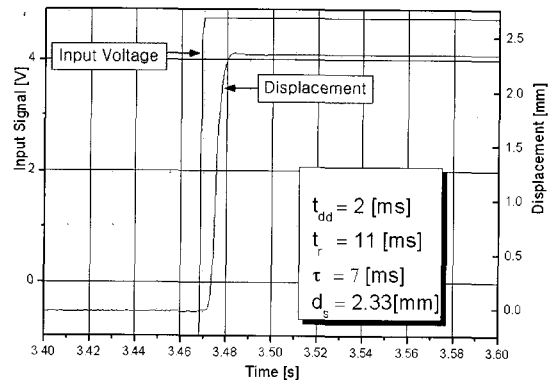
이 결과는 본 연구를 통하여 설계·제작된 고전압 차단용 액추에이터의 성능이 매우 우수하다는 것을 알 수 있으며, 성능개선을 위한 기술들이 개발되면 쉽게 국내에서도 성능이 우수한 고전압 차단용 액추에이터 고유모델이 상용화 될 수 있음을 확인할 수 있는 결과라 사료된다.

Fig. 12는 본 연구에서 설계·제작된 고전압 차단용 액추에이터의 스텝응답특성을 보이는 것으로, 실험은 Fig. 10의 실험장치를 통하여 수행되었다. 본 연구에서 대상으로 하는 액추에이터는 제어기의 디지털 동작에 의하여 온 혹은 오프 기능을 수행하는 것으로서 솔레노이드에 전원이 입력되지 않는 경우는 Fig. 12(a)와 같이 액추에이터 입구부에 사용 최대압력이 대기 상태에 있게 되고, 솔레노이드에 전원이 입력되면, 서론에서도 밝혔던 바와 같이 플

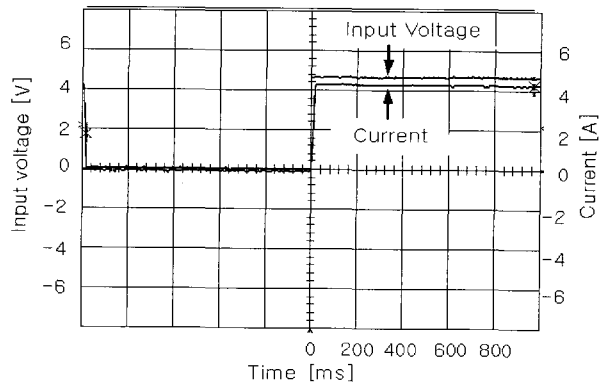
런저가 이동하고, 증폭기구가 작동되어 결국에는 액추에이터의 메인 포켓이 작동하게 되어, 유량의 흐름이 시작된다. Fig. 12(a)는 전원입력이 차단된 경우에 포켓부의 스프링력에 의해 서 복귀되는 특성을 보이는 것이고, Fig. 12(b)는 솔레노이드에 전원이 입력이 이루어진 후의 특성을 보이는 것으로 시정수가 54ms, 상승시간이 75ms인 매우 빠른 응답성을 갖는 액추에이터임이 확인되었다.



(a) Theoretical analysis results (Displacement & current)



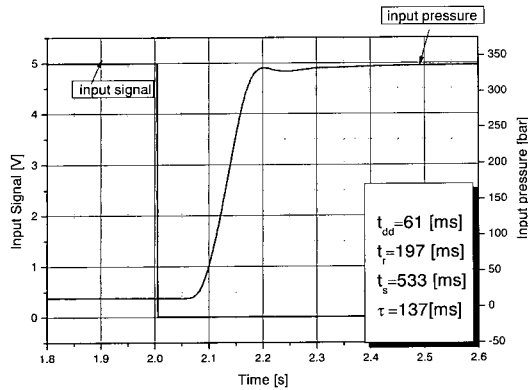
(b) Experimental results (Displacement)



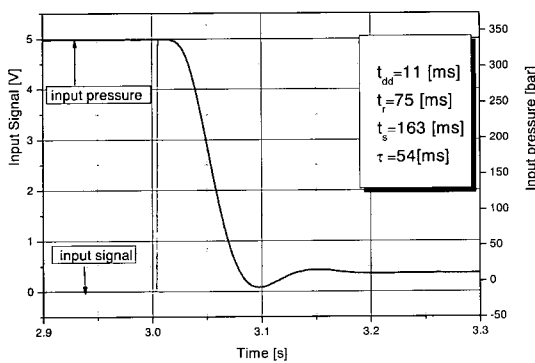
(c) Experimental results (Current)

Fig. 11 Step response results (Solenoid)

참고 문헌



(a) Signal off characteristics



(b) Signal on characteristics

Fig. 12 Step response results (Actuator)

5. 결 론

본 연구는 고전압 차단용 액추에이터의 고유모델 개발을 목적으로 수행되었으며, 설계알고리즘으로부터 설계를 한 후, 유한요소 해석을 통하여 모델이 제안되었다.

실험을 통하여, 설계·제작된 액추에이터 특성이 얻어졌으며, 이 결과는 이론해석결과와 매우 잘 일치하고 있음이 확인되었다. 또한, 설계/제작된 액추에이터는 시정수가 54ms, 상승시간이 75ms로 매우 빠른 응답성능을 갖는 액추에이터임이 확인되었다.

이 결과로부터 액추에이터 시스템 해석 모델 및 유한요소 해석모델에 대한 타당성 및 시험장치에 대한 신뢰성을 확보 할 수 있었으며, 본 연구의 결과는 고전압 차단용 액추에이터 뿐만 아니라 솔레노이드 액추에이터의 국내 고유모델 개발에 매우 유용한 활용자료로 가치가 있을 것으로 사료된다.

- 1) J. R. Brauer, "Alternative Dynamic Electro Mechanical Models of Magnetic Actuators Containing Eddy Currents", IEEE transactions on magnetics, vol. 36, No. 4, pp. 1333~1336, 2000.
- 2) A. M. Pawlak and T. W. Nehl, "Transient Finite Element Modeling of Solenoid Actuators : the Coupled Power Electronics, Mechanical, and Magnetic Field Problem", IEEE transactions on magnetics, vol. 24, No. 1, pp. 270~273, 1988.
- 3) I. H. Choi, S. C. Ko, T. K. Jung and S. Y. HAN, "FEM Analysis of Solenoid Actuator Electromagnet System", KIEE, Vol. 40, No. 11, pp. 1105~1113, 1991.
- 4) G. T. Kweon and H. T. Han, "Dynamic Analysis of Fast-Acting Solenoid Valves Using Finite Element Method", KSME, Vol. 26, No. 7, pp. 959~965, 2002.
- 5) I. S. Jung, J. heo, S. B. Yun and D. S. Hyun, "A study on the Shape Optimization of Solenoid Actuator", KIEE, Vol. 47, No. 9, pp. 1325~1330, 1998.
- 6) Herbert C. Roters, "Electromagnetic Devices", John wiley & Sons, 1941.
- 7) H. Yamada, "Development of a Low Cost High-Speed On/Off Digital Valve Using a Bimorph PZT Actuator", Proceeding of the Forth JHPS International Symposium on Fluid Power, pp. 591~596, 1999.
- 8) H. Tanaka, "A Study on High Speed Eelectromagnetic Valve", JSME, Vol. 50, No. 457, pp. 1594~1601, 1984.
- 9) KSA, "DC Solenoids for General Purpose", KSC 4532, 1991.
- 10) JSA, "DC Solenoids for General Purpose", JIS C 4553, 1984.