

압전 밸브용 압력 레귤레이터 Pressure Regulator for Piezoelectric Valve

윤소남 · 김찬용 · 서우석 · 박중호 · 함영복
S. N. Yun, C. Y. Kim, S. W. Seo, J. H. Park and Y. B. Ham

Key Words : Pressure Regulator(압력 레귤레이터), PZT Actuator(압전 액추에이터), Reducing Pressure Control(감압력 제어), Solenoid Actuator(솔레노이드 액추에이터)

Abstract: The pressure regulator which is used for controlling the reducing pressure in the piezoelectrically driven pneumatic valve has been studied. The pneumatic valve of this study object is 2-stage type and consists of a piezoelectric actuator, a controller, a poppet valve and a pressure regulator. Nominal flow of 50 lpm, maximum operating pressure of 0.9MPa and frequency characteristic of 10Hz and over are required in this pneumatic valve, but the pressure regulator is needed because piezoelectric actuator has no ability to control the pressure of 0.9MPa directly. In this study, bimorph type PZT actuator of 25.2 mm(L)×7.2 mm(W)×0.5 mm(H) with constant of -220×10^{-12} CN-1 was proposed and investigated. Maximum operating force of 0.052 N and maximum displacement of 63 μm were gotten from the fabricated PZT actuator. From the analysis results, the orifice diameter of 0.6mm for a piezoelectric actuator was derived and then the pressure regulator which can be operated under 0.15 MPa easily was designed and manufactured. Performance and effects of design parameters were simulated by the Simulink of Matlab software, and it was confirmed that the performance characteristics of manufactured pressure regulator are superior in the common use pressure range of 0.5 MPa to 0.7 MPa. The results show that the proposed pressure regulator is suitable for the pneumatic valve with a PZT actuator.

기호 설명

A_p : 포펫 수압부 면적 [m^2]	G_p : 포펫부 유량 [m^3]
A_r : 감압밸브 제어부 면적 [m^2]	G_r : 압력레귤레이터부 유량[kg/s]
A_{r1} : 감압밸브 입구수압부 면적 [m^2]	k : 비열비
b_p : 포펫 점성 마찰계수 [$\text{N}\cdot\text{s/m}$]	k_p : 포펫 스프링 상수 [N/m]
b_r : 감압밸브 마찰계수 [$\text{N}\cdot\text{s/m}$]	k_r : 감압밸브 스프링계수[N/m]
D_r : 감압밸브 제어부 지름 [m]	m_p : 포펫 질량 [kg]
D_{r1} : 감압밸브 입구수압부 지름 [m]	m_r : 감압밸브 스톨 질량 [kg]
G_m : 솔레노이드에 흐르는 유량 [kg/s]	P_m : 포펫 제어압력 [Pa]
	P_o : 시스템 출력압력 [Pa]
	P_r : 감압밸브 제어압력 [Pa]
	P_s : 전체 시스템 공급압력 [Pa]
	Q_m : 포펫 제어유량 [m^3/s]
	Q_p : 포펫 출력유량 [m^3/s]

접수일 : 2006년 3월 17일

윤소남(책임저자) : 한국기계연구원 정보장비연구센터

E-mail : ysn688@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7155

김찬용, 서우석, 박중호, 함영복 : 한국기계연구원 정보장비
연구센터

- Q_r : 감압밸브 유량 [m^3/s]
- R : 공기의 기체상수
- S_{em} : 솔레노이드의 유효단면적 [m^2]
- S_{ep} : 포펫의 유효단면적 [m^2]
- S_{er} : 압력레귤레이터의 유효단면적 [m^2]
- T : 절대온도 [$^{\circ}K$]
- V_o : 포펫부 체적 [m^3]
- V_p : 파이로트부 체적 [m^3]
- V_r : 감압밸브 체적 [m^3]
- V_{r0} : 감압밸브 제어부 초기체적 [m^3]
- x_{po} : 포펫 스프링 초기변위 [m]
- x_r : 감압밸브 스톱 변위 [m]
- ρ : 공기 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

바이모프나 유니모프 구조를 갖는 벤더형식의 압전액추에이터는 구조가 간단하고, 응답이 빠르며, 저소비 전력 특성 등의 많은 이점을 가지고 있으나, 작동력이 기존의 솔레노이드 액추에이터에 비해 떨어지는 단점이 있다¹⁾. 따라서, 저압용 혹은 주파수 응답특성이 매우 낮은 시스템이나 파이로트용으로만 적용되는 단점을 가지고 있다. 그리고 벤더형식의 압전액추에이터를 고압 및 대유량 공압분야에 적용하게 위해서는 적층형으로 개발하는 것이 바람직하나 변위 한계가 있기 때문에 이 또한 문제점이 있다²⁾. 최근에는 중량당 출력비를 개선시키기 위해서 고압화를 추구하고 있기 때문에 압전액추에이터를 고압용으로 사용하기 위한 연구가 필요하다. 유니모프 혹은 바이모프 방식 압전액추에이터를 가지는 파이로트 밸브를 고압에 적용시키기 위해서는 파이로트 밸브 전단에 압력 레귤레이터를 설치하여 소정의 압력 이상이 되면 압력 레귤레이터에 의하여 압력이 제어되어 파이로트 밸브를 안정하게 구동할 수 있도록 하고 있다. 따라서, 압력 레귤레이터는 응답성 뿐만 아니라 안정성이 매우 중요한 인자이며, 이에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다^{3,4)}.

이 연구는 일반 산업분야에 사용되는 압전 액추에이터 내장형 공기압 밸브의 실용성을 확인하기 위하

여 수행되었으며, 압전상수 $-220 \times 10^{-12} CN^{-1}$, 크기가 $25.2mm(L) \times 7.2mm(W) \times 0.5mm(H)$ 인 압전 액추에이터 제작 및 조사가 이루어졌다. 제작된 액추에이터로부터 최대작동력이 $0.052N$, 최대변위가 $63\mu m$ 임을 확인하였다. 또한, 목표로 하는 공기압 밸브의 주파수 성능을 $10Hz$ 로 하기 위해서 오리피스 직경을 $0.6mm$ 로 하였으며, 밸브 시스템의 안전성을 위하여 압력 레귤레이터는 $0.15MPa$ 미만에서 작동되도록 설계하였다⁵⁾. 소프트웨어는 매트랩을 이용하여 압력레귤레이터의 성능과 설계 인자들의 영향이 예측되었으며, 해석을 통하여 시작품 기본 사양이 결정되었다. 시작품 실험을 통하여, 공기압 상용 압력인 $0.5 \sim 0.7MPa$ 범위내에서도 압력 레귤레이팅 특성이 매우 뛰어나며, 산업분야에 쉽게 적용할 수 있음을 확인하였다.

2. 이론해석

2.1 압전식 공압밸브 모델링

Fig. 1에 연구대상으로 하는 압전식 공압밸브의 모델을 도시화하였다. 연구대상 압전식 공압밸브는 감압부와 파이로트제어부 및 포펫밸브부로 구성되어 있으며, 포펫밸브를 통하는 유량은 감압부 및 파이로트 제어부를 통하여 얻어지는 파이로트 제어압력 (P_m)에 의해 구동되는 포펫의 변위(x_p)에 의하여 얻어진다⁶⁾. 이 연구의 목적은 압력레귤레이터의 특성을 평가하는데 있기 때문에 감압부 후면에는 상용품의 솔레노이드 액추에이터를 설치하였다. 감압부에서의 연속의 식과 운동방정식은 식 (1)~식 (4)와 같이 나타낼 수 있다⁷⁾.

$$Q_r = S_{er} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_s}{\rho} \left(1 - \left(\frac{P_r}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (1)$$

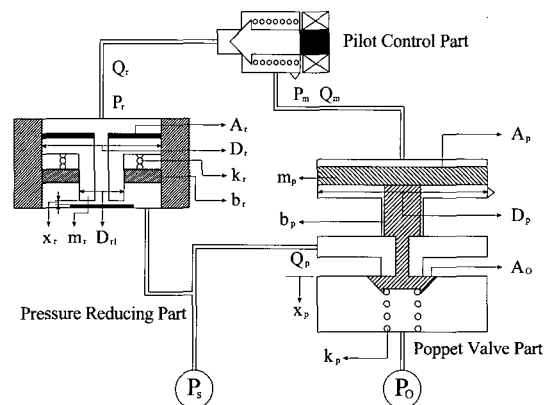


Fig. 1 Pneumatic valve model

$$G_r = Q_r \rho \quad (2)$$

$$\frac{dP_r}{dt} = \frac{1}{V_r} \left\{ G_r RT - P_r \frac{dV_r}{dt} \right\} \quad (3)$$

$$F = m_r \frac{d^2 x_r}{dt^2} + b_r \frac{dx_r}{dt} + k_r (x_r + x_{r0}) \quad (4)$$

파이로트부에서의 연속방정식과 변위관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 연구에서는 파이로트부에 압전액추에이터 대신 특성을 알 수 있는 솔레노이드 액추에이터를 삽입하여 공압밸브의 특성을 쉽게 확인할 수 있도록 하였으며, 식 (8)과 같이 솔레노이드 액추에이터의 변위를 1차 지연함수로 하였다.

$$Q_m = S_{em} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_r}{\rho} \left(1 - \left(\frac{P_m}{P_r} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (5)$$

$$G_m = Q_m \rho \quad (6)$$

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{V_p} \left\{ G_m RT - P_m \frac{dV_p}{dt} \right\} \quad (7)$$

$$x_m = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

포켓밸브부에서의 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_p = S_{ep} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_s}{\rho} \left(1 - \left(\frac{P_o}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (9)$$

$$G_p = Q_p \rho \quad (10)$$

$$\frac{dP_o}{dt} = \frac{1}{V_o} \left\{ G_p RT - P_o \frac{dV_o}{dt} \right\} \quad (11)$$

$$F = m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_p \frac{dx_p}{dt} + k_p (x_p + x_{p0}) \quad (12)$$

Fig. 2는 대상 압전식 공압밸브를 해석하기 위한 시뮬링크블록을 보이는 것으로, 설계변수들의 특성변화에 따라 압전식 공압밸브의 특성을 쉽게 확인할 수 있도록 구성하였다⁸⁾.

2.2 이론해석 결과

Fig. 3은 Fig. 2의 해석블록을 이용하여 이론해석을 수행한 결과를 보이는 것으로, 해석시의 공급압력은 0.5 MPa를 사용하였다.

Fig. 3의 a)는 감압부의 압력특성을 보이는 것으로, 매우 안정적이고 빠른 응답특성을 보여주고 있다. 2초 지점은 닫혀있던 솔레노이드 액추에이터를 개방했을 때의 특성을 보이는 것으로, 압력특성이 조금 흔들리고 있으나 빠른 복귀특성을 보이고 있으며, b)에 보이는 파이로트 압력 역시 안정시간이 0.18초 정도로 매우 응답이 빠른 시스템임이 확인되었다.

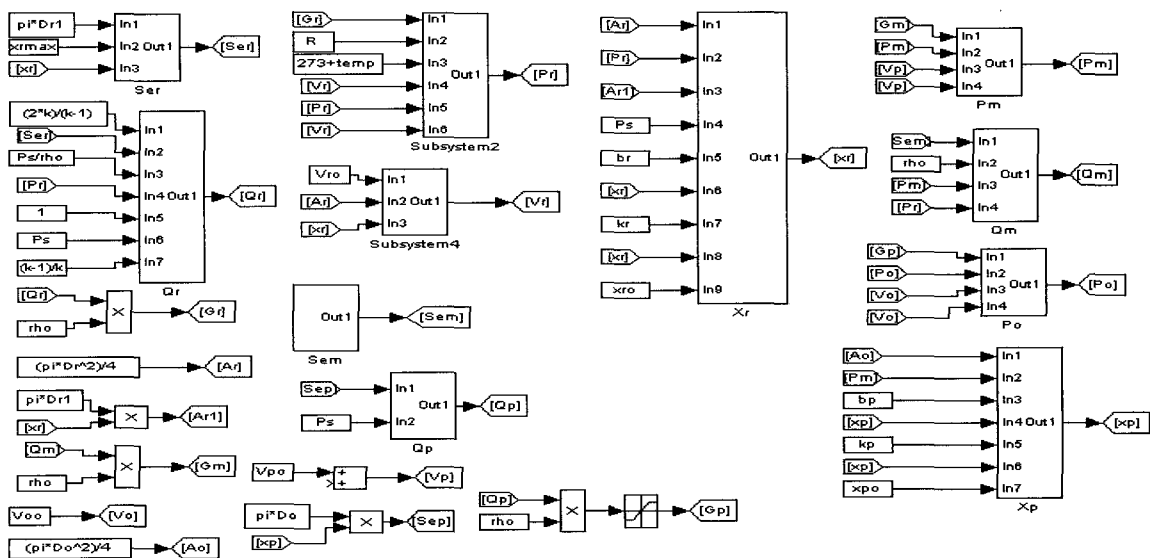


Fig. 2 Simulink block for analysis

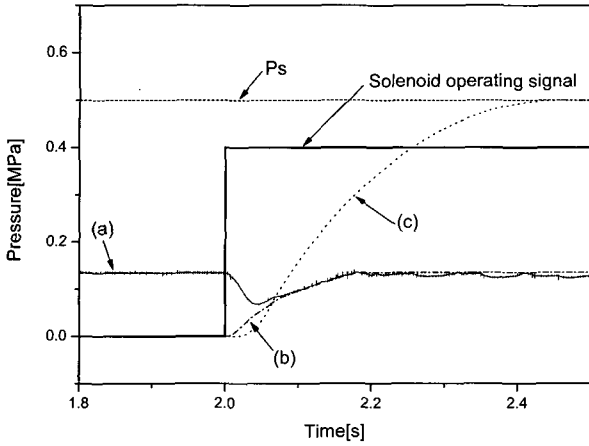


Fig. 3 Theoretical analysis results

3. 실험 및 실험장치

3.1 실험장치

Fig. 4에 연구대상 밸브의 실험을 위한 공압회로를 보인다. 관심대상인 레귤레이터부의 특성을 조사하기 위하여 레귤레이터 전후에 압력계를 설치하였으며, 압력발생은 온-오프 솔레노이드 밸브의 동작에 의하여 이루어지도록 설치하였다.

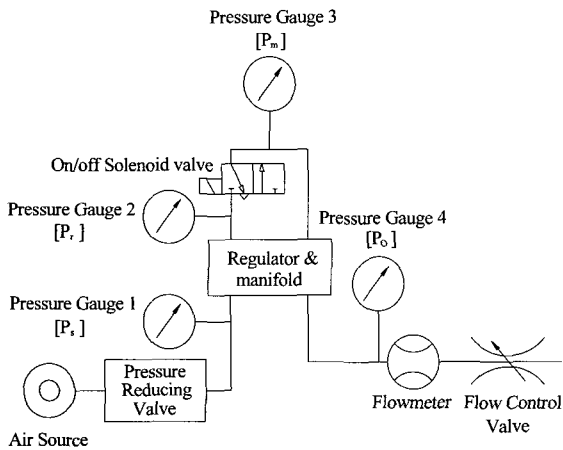


Fig. 4 Pneumatic circuit for experiment

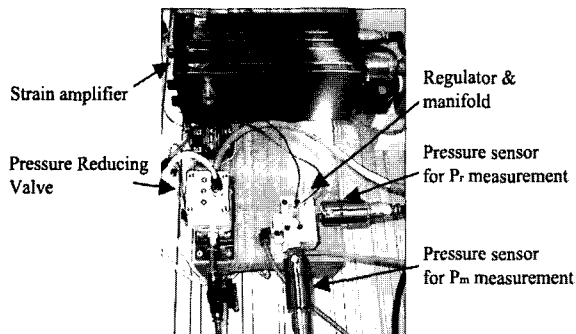


Fig. 5 Photo of experimental setup

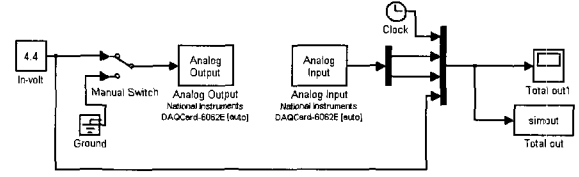
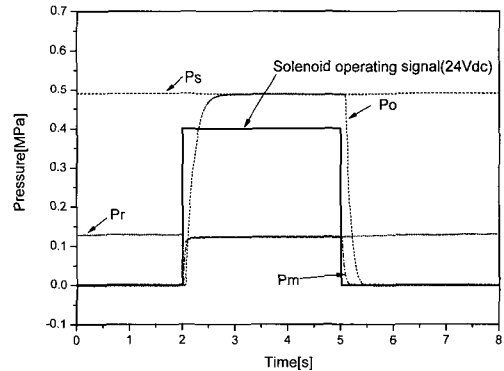


Fig. 6 Data acquisition block using simulink

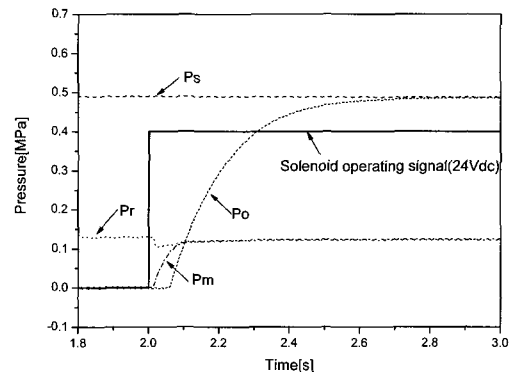
Fig. 5는 Fig. 4의 공압회로를 기준으로 하여 제작된 실험장치의 사진을 보이는 것이며, Fig. 6은 Matlab의 시뮬링크 소프트웨어에 의하여 구성된 제어 및 데이터 획득 블록을 보이는 것으로, 1 kHz의 속도로 데이터 샘플링이 이루어졌다.

3.2 실험결과 및 고찰

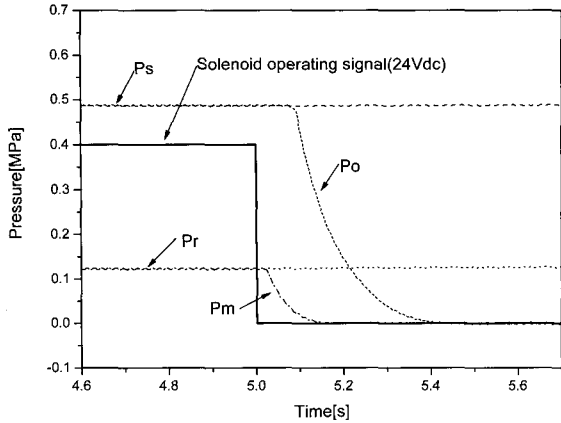
Fig. 7은 연구대상 공압밸브의 실험특성을 나타낸 것으로, a)는 온과 오프시의 특성결과, b)와 c)는 각각 온과 오프시의 특성을 구분하여 보이는 것이다. 실험은 Fig. 4의 실험회로에 보이는 온-오프 솔레노이드에 24V의 직류전압을 계단형태로 인가하여 수행하였다. 포켓 출력 압력의 무응답시간이 온시에 60ms, 오프시에 83ms로 나타났으며, 시정수는 온시에 150ms, 오프시에 98ms임을 확인할 수 있었다. 압력레귤레이터의 제어압력의 시정수는 온과 오프시 모두 45ms이며, 압력레귤레이터는 충격과 없이 매우 안정되게 압력제어를 수행하고 있음을 확인하였다.



a) On-off characteristics



b) On characteristics



c) Off characteristics

Fig. 7 Pneumatic valve characteristics

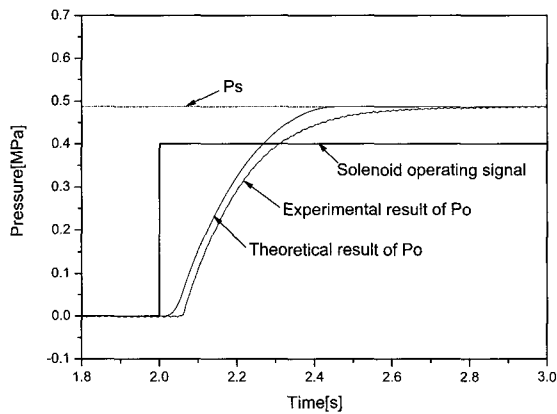


Fig. 8 Output pressure results of poppet

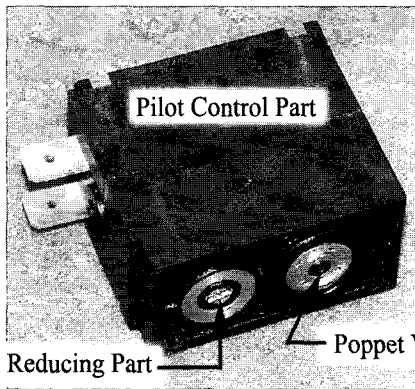


Fig. 9 Manufactured pneumatic valve

Fig. 8은 포핏부 출력압력의 결과를 보이는 것으로, 이론과 실험결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 실험결과가 이론결과보다 응답성이 낮은 이유는 포핏의 마찰 및 유량계수가 적절히 보상되지 못한 것으로 사료된다.

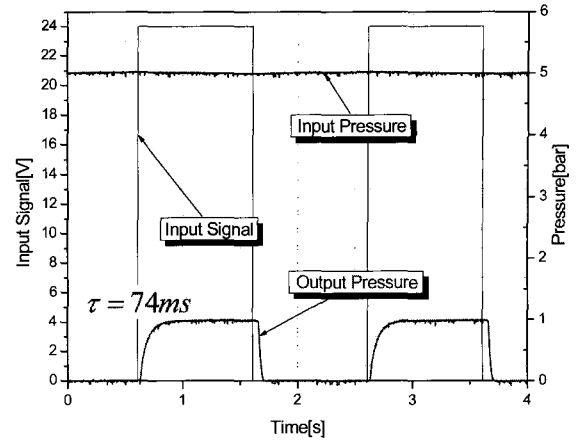


Fig. 10 Step response characteristics of manufactured pneumatic valve

Fig. 9는 전술한 Fig. 1에서 파이로트 제어부에 솔레노이드 액추에이터 대신에 25.2mm(L)×7.2mm(W)×0.5mm(H)의 크기와 압전상수 $-220 \times 10^{-12} \text{CN}^{-1}$ 의 특성을 갖는 바이모프 형식 압전액추에이터를 삽입하여 공압밸브를 제작한 사진을 보이는 것이다. 이 공압밸브에 사용된 압전액추에이터는 최대 작동력이 0.052N, 최대 변위가 63 μm 이며, -9dB의 게인에서 구형과 주파수 특성이 15Hz인 성능을 갖고 있다.

Fig. 10은 제작된 압전식 공압밸브의 스텝응답 특성을 보이는 것으로, 시정수가 74ms로서 매우 응답성이 빠르고, 압력특성이 안정적인 밸브임이 확인되었다.

4. 결 론

이 연구는 기존에 많이 사용하고 있는 솔레노이드 밸브에서 압전밸브로의 사용 가능성을 제시하는 기초연구이다. 이 연구의 타당성을 증명하기 위해 압전액추에이터 및 레귤레이터를 제작하여 특성실험을 수행하였으며 수학적 이론해석 결과와의 비교를 통해 이론해석의 타당성이 증명되었다. 또한, 이 연구에서 기초적으로 수행된 압력 레귤레이팅 기술은 압전밸브를 상용화하는 데에 매우 유익한 정보를 제공할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) S. N. Yun, K. W. Lee, H. H. Kim and H. J. So, "Development of the Pneumatic valve with bimorph type piezoelectric actuator", Materials

- Chemistry and Physics, Vol. 97, No. 1, pp. 1~4, 2006.
- 2) S. N. Yun, Y. B. Ham, C. Y. Kim and J. H. Park, "Hysteresis characteristics improvement of the PZT actuator for metal jet printing", 2nd IWPMA, pp. 56, 2005.
 - 3) S. N. Yun and Y. B. Ham, "Characteristics analysis of the solenoid valve for exhaust brake", Trans. of KSAE, Vol. 12, No. 1, pp. 190~195, 2004.
 - 4) S. N. Yun, "Electro-Magnetic Proportional Solenoid", Journal of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 35, No. 5, pp. 342~347, 2004.
 - 5) S. N. Yun, J. S. Ryu, Y. B. Ham and G. D. Kim, "Pressure control technique using proportional solenoid actuator", 9th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp. 1~5, 2005.
 - 6) S. N. Yun, J. S. Ryu, B. K. Ahn, M. R. Seo and C. S. Koh, "Optimal Design of Electro-Magnetic Proportional Solenoid using Genetic Algorithm", NCFP 105-7.6, pp. 243~247, 2005.
 - 7) SMC catalogue, CAT.KS11-82, pp. 1~8, 2004.
 - 8) T. Kagawa, K. Kawashima, T. Fujita, Y. Tanaka and K. Sakaki, "Measurement method for the effective area using an isothermal chamber", hydraulics and pneumatics, Vol. 26, No. 1, pp.76~81, 1995.