Transactions of the KSNVE, 22(10) : 1020~1026, 2012.
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2012.22.10.1020 ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

압전 작동기를 이용한 방향 제어 밸브의 동적 모델링 및 제어

Dynamic Modeling and Control of Directional Control Valve Using Piezostack Actuator

전 준 철*·한 영 민**·구 오 흥*·최 승 복†
Juncheol Jeon, Young-Min Han, Quoc Hung Nguyen and Seung-Bok Choi

(Received September 7, 2012 ; Accepted September 20, 2012)

Key Words : Directional Control Valve(방향 제어 밸브), Piezostack Actuator(압전스택 작동기), Displacement Amplifier(변위확대기구), Position Tracking Control(위치 추적 제어)

ABSTRACT

This paper proposes a new type of high-frequency directional valve controlled by the piezostack actuator associated with displacement amplifier. As a first step, a dynamic model of directional valve which can operate at 200 Hz with a flow rate of 12 litter/min is derived by considering pressure drop and flow force. As a second step, an appropriate piezostack is selected by considering actuation force as well as field-dependent displacement. Subsequently, in order to control spool displacement and flow rate a proportional-derivative(PD) controller is designed based on the 3rd-order valve system. Control performances such as sinusoidal trajectory tracking of the spool displacement in time domain are evaluated. In addition, the field-dependent flow rate is also presented to verify the required performance of the valve system.

1. 서 론

방향 제어 밸브는 관로 내의 유체의 방향을 제어하는 밸브로, 조작 방법에 따라 수동 전환 밸브, 전자 전환 밸브 등으로 구성 된다. 수동 조작 밸브는 수동으로 레버를 돌려 유체의 방향을 제어하는 밸브이며, 전자 전환 밸브는 솔레노이드에 전기 신호를 인가하여 스풀의 위치를 제어하는 밸브로 크게 1단 밸브, 2단 밸브로 구분된다. 2단 밸브는 1960년대부터 개발, 사용된 서보 밸브로, 솔레노이드에 전기 신호를 인가하면 플래퍼-노즐(flapper-nozzle) 구조를 통하여 압력차를 만들어내고, 이렇게 만들어진 압력차이는 스풀을 구동하는 힘으로 작동하여 유량 혹은 압력을 제어하는 밸브이다[1~3]. 따라서 2단 밸브는 큰 유량 제어가 필요한 시스템에 일반적으로 사용되는 밸브로, 큰 스풀 조작력을 얻을 수 있는 장점을 가지지만, 구조가 복잡하고, 응답속도가 느린 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 1단 밸브가 1990년 초부터 활발히 연구 개발 되었다[4~6]. 1단 밸브는 솔레노이드에 전기 신호를 인가하였을 때 발생하는 작동력을 이용하여 스풀(spool)의 위치를 직접적으로 조절하는 밸브로, 구조가 단순하며, 값이 싸며, 내부 누유량이 적고, 부품수가 적기 때

† Corresponding Author ; Member, Mechanical Engineering of Inha University
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : +82-32-860-7319, Fax : +82-32-868-1716
* Mechanical Engineering, Inha University
** Division of Automotive Engineering, Ajou Motor College

A part of this paper is presented at the KSNVE 2012 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

문에 신뢰성이 높은 장점을 가지지만, 낮은 제어력과 솔레노이드를 사용함에 고속 제어가 어려운 단점을 가진다.

따라서 이 논문에서는, 기존 전자 전환 밸브의 단점을 해결하기 위하여 압전 작동기로 구동되는 변위확대기구에 스풀이 부착된 1단 밸브를 제안 한다. 특정 목표 값에 대한 압전 1단 밸브를 설계, 모델링하기 위하여, 이 논문에서는 고 주파수인 200 Hz에서 비교적 적은 12 liter/min 유량의 제어를 목표로 정하였다. 압전 작동기는 인가되는 전압의 크기에 비례하여 변위가 발생하고, 작동력이 크며 고주파 구동이 가능한 특성을 가지는 지능 재료구성된 작동기로, 솔레노이드 작동기 보다 응답 속도가 빠르고 부피당 작동력이 큰 반면, 생성 변위가 적은 단점을 가지고 있다[7,8]. 이러한 적은 변위를 증폭하기 위하여, 이 연구에서는 레버-힌지 형태의 변위확대기구를 이용한다.

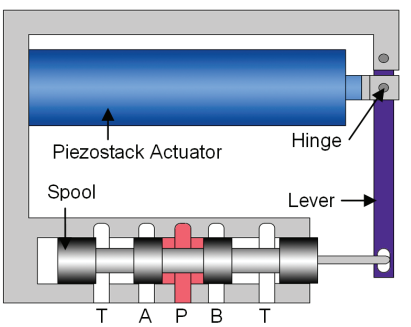
먼저 압전 작동기를 이용한 방향 제어 밸브의 작동 원리를 설명 한 뒤, 스풀 변위에 대한 유체 flow-force와 압력강하 값을 수식적으로 계산 한다. 계산된 결과를 바탕으로 적절한 스풀의 변위를 결정한 후, 스풀을 구동시키기에 필요한 압전 작동기의 변위 값과 구동력을 계산한다. 얻어진 구동력과 변위값을 바탕으로 적절한 크기와 용량의 상용 압전 작동기를 선택 한다. 이후 선택된 압전 작동기로 구동되는 방향 제어 밸브 시스템에 대한 수학적 모델이 유도 되며, proportional-derivative(PD) 제어기를 이용하여 스풀의 위치 추적 제어를 수행한다. 시뮬레이션 결과는 시간 영역에서 스풀의 위치 정보와 유량정보로 나타내며, 이를 통하여 제안된 압전 방향 제어 밸브는 목표 유량인 12 liter/min를 제어 가능함을 확인 한다.

2. 방향 제어 밸브

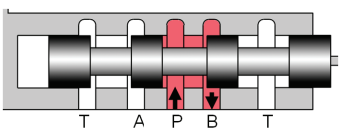
이 연구에서는 12 liter/min의 유량을 200 Hz의 주파수로 제어하기 위하여 Fig. 1(a)와 같은 방향 제어 밸브 시스템을 제안 하였다. 제안된 방향 제어 밸브는 압전 작동기, 레버-힌지, 스풀 등으로 구성 된다. 스풀은 4/3 방향제어 밸브의 스풀 형태를 가지며, Fig. 2와 같이 ε 의 중복 길이를 가지는 positive type의 스풀을 고려하였다. 압전 작동기는 bipolar타입의 압전 작동기를 고려하였으며, 이는 (+)전압을 인가하면 압전 작동기가 (+)변위와 힘을 발생시키고, (-)전압을 인가하면 압전 작동기는 (-)변위와 힘을 발생시킨다. 이러한 원리로 압전 작동기에 (+)전압을 인가하면, Fig. 1(b)와 같이 스풀이 오른쪽으로 이동하며 이에 따라 B-port로 유량이 흐르게 된다. 반대로 (-)전압을 인가하면 Fig. 1(c)와 같이 A-port로 유량이 흐르며, 이러한 구조를 이용하여 유체의 방향을 제어하게 된다.

Positive type의 스풀은 스풀의 폭이 유로의 폭보다 넓은 형태로, 중복되는 구간에서는 비선형성을 가지는 단점이 있다. 하지만 스풀 가공이 쉬우며, 내부 유체의 누출이 적은 장점을 가져 일반적인 방향 제어 밸브에 널리 사용되고 있다. 스풀의 변위에 따른 밸브 유효 열린 넓이(A_v)는 다음과 같이 계산할 수 있다[9].

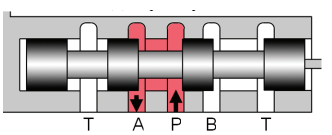
$$\begin{aligned} &|x_s| < \varepsilon, && A_v = 0 \\ &\varepsilon < |x_s| < (\varepsilon + a), && A_v = \pi D_s (|x_s| - \varepsilon) \\ &|x_s| \geq \varepsilon + a, && A_v = \pi D_s a \end{aligned} \quad (1)$$



(a) Directional control valve system



(b) B-port open



(c) A-port open

Fig. 1 Schematic diagram of directional control valve

여기서 D_s 는 스풀의 지름, x_s 는 스풀의 변위, ε 은 중복 길이로 상용 방향 제어 밸브의 치수 및 본 연구에서의 목표 유량을 고려하여 0.05 mm로 정하였다. 또한 다음의 식을 이용하면 유량(Q), 압력 강하(ΔP), 수력 손실(ΔN)을 계산 할 수 있다.

$$Q = C_d A_v \sqrt{2\Delta P/\rho},\ \Delta P = \frac{\rho}{2C_d^2 A_v^2} Q^2$$
$$\Delta N = Q\Delta P \tag{2}$$

여기서 C_d 는유량 계수, ρ 는 유체의 밀도를 나타낸다. 또한 유체의 흐름에 따라 Fig. 3과 같이 flow-force가 발생하며, 이는 다음 식을 통하여 구할 수 있다.

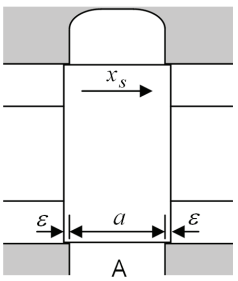


Fig. 2 Over-lapping spool valve

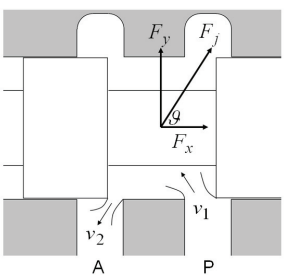


Fig. 3 Flow-forces

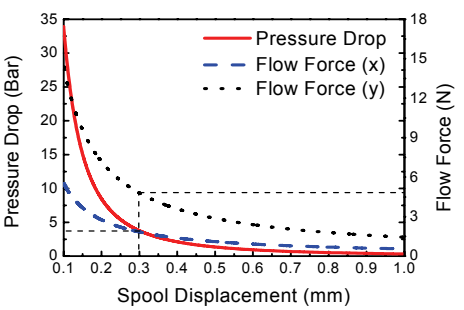


Fig. 4 Pressure drop and flow force

$$\vec{F_j} = \rho Q(\vec{v_1} - \vec{v_2}) \tag{3}$$

여기서 $\vec{v_1}$ 과 $\vec{v_2}$ 는 각각 입구와 출구에서 속도이며, 일반적으로 $\vec{v_1} << \vec{v_2}$ 이므로 위의 식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\vec{F_j} = -\rho Q\vec{v_2} \tag{4}$$

이는 출구 유체 속도의 반대방향으로, 즉, 유체 관로를 닫는 방향으로 힘이 발생하며, flow-force는 유체의 수축계수(C_c)를 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_j = \frac{2C_d{}^2 A_v}{C_c}\Delta P \tag{5}$$

이를 통하여 x축과 y축으로 발생하는 각각의 flow-force는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_x = F_j \cos\vartheta$$
$$F_y = F_j \sin\vartheta \tag{6}$$

F_y는 스풀에 수직으로 가해지는 힘으로 마찰력에 비례하며, 스풀의 내구성에 직접적으로 관여되는 값으로 설계 시 중요하게 고려되어야 하는 값이다.

따라서 앞선 식 (2)와 (6)을 바탕으로, 수력 손실과 flow-force가 적으며, 앞전 작동기가 발생시킬 수 있는 구동력과 변위 범위에서 적절한 스풀의 변위를 결정하였다. 식 (2), (6)에서 알 수 있듯이, 수력 손실과 flow-force는 스풀의 지름과, 최대 변위가 클 때 작은 값은 가진다. 하지만 수력 손실과 flow-force가 작은 값을 가지기 위하여 스풀의 지름이 크면, 고유진동수가 낮아지고 응답속도가 낮아지며, 스풀의 무게가 증가함에 따라 큰 구동력이 필요한 단점이 있다. 또한 압전 작동기가 발생시키는 변위의 크기에는 한계가 있으며, 따라서 적절한 스풀 최대 변위를 결정하기 위하여 Fig. 4와 같이 스풀의 최대 변위 변화에 따른 압력 강하와 flow-force를 계산 하였다. 이를 통하여, 비교적 적은 압력 강

하와 flow-force를 가지는 최대 스풀의 변위는 ±0.3 mm로 결정 하였고, 앞서 결정한 중복 길이로 인하여 실제 스풀의 요구 변위는 ±0.35 mm가 되어야 한다. 이때, 스풀의 지름은 이 연구의 목표 유량과 유사한 상용 밸브의 스풀의 지름을 고려하여 12 mm로 가정하였다.

3. 압전 작동기

앞서 결정한 ±0.35 mm의 스풀 요구변위를 얻기 위한 필요 구동력을 계산하기 위하여 Fig. 5와 같은 자유 물체도를 구성하였다. 이때 스풀의 운동방정식은 다음 식과 같다.

$$m_s\ddot{x}_s + c_s\dot{x}_s + k_s x_s + F_x = F_s \tag{7}$$

여기서, m_s는 스풀의 무게, c_s는 마찰에 의한 감쇠계수, k_s는 스풀의 강성 계수, F_s는 스풀의 구동력이다. 이 연구에서 스풀과 연결된 레버의 질량도 연결부에 집중되어 있다고 가정하여 m_s는 일반적인 스풀에 비해 비교적 큰 값인 0.2 kg으로 가정하였다. 또한 c_s는 70 Ns/m으로, k_s는 스프링 효과가 없다고 가정하여 0으로 결정하였다. Matlab Simulink를 통해서 힘을 증가 시켜가며 시뮬레이션을 하였으며,

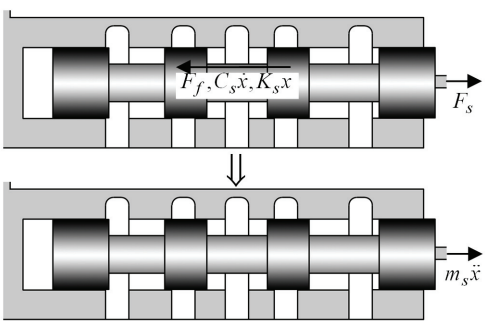


Fig. 5 Free-body diagram of the spool

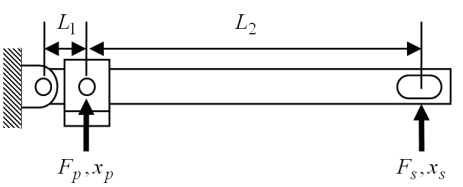


Fig. 6 Schematic diagram of the lever

$F_s = 120\sin(400\pi)N$ 에서 앞서 결정한 ±0.35 mm의 변위가 나오는 것을 확인 할 수 있었다.

레버-힌지 타입의 변위확대기구는 Fig. 6의 구조를 가지며, 압전 작동기의 변위와 구동력, 변위확대기구 끝단에서 변위와 구동력에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_p L_1 &= F_s(L_1 + L_2) \\ x_p(L_1 + L_2) &= x_s L_1 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 F_p는 압전 작동기의 구동력, L_1은 압전 작동기에서 힌지까지 거리, L_2는 압전 작동기에서 변위확대기구 끝단까지 거리, x_p는 압전 작동기의 변위, x_s는 스풀의 변위 즉, 변위확대기구 끝단의 변위이다. 이 논문에서는 L_1=6 mm, L_2=54 mm로 정하였으며, 따라서 스풀 구동에 필요한 압전 작동기의 구동력과 변위는 각각 F_p=1200sin(400π)N, x_p= ±0.035 mm이다.

압전 작동기의 입력 전압과 실제 출력 변위에 대한 발생력의 수식은 다음과 같다.

$$F_p = d_{33}k_p V_p - k_p x_p \tag{9}$$

여기서 d_{33}은 압전 상수, V_p는 입력 전압, k_p는 압전 작동기의 강성 계수이다. 이 논문에서는, Piezomechanik사의 bipolar type piezostack actuator의 물성치를 사용하여 적절한 압전 작동기를 선택하였으며, 최대 1200 N의 blocking force에서 0.35 mm의 변위를 얻을 수 있는 PSt 350 bp/16/90 VS 25 모델을 선정할 수 있었다[10]. PSt 350 bp/16/90 VS 25 모델은 ±350 V의 전압에서 작동가능하며, 1.2857×10^{-7} m/V의 d_{33}, 75×10^{6} N/m의 k_p값을 가진다.

4. 밸브 성능 평가

입력 전압에 따른 밸브의 성능을 평가하기 위하여, 밸브의 지배방정식을 유도하였다. 먼저 입력 전압에 따른 스풀의 위치는 식 (7), (8), (9)를 연립하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_s\ddot{x}_s + c_s\dot{x}_s + a^2 k_p x_s + F_x = a d_{33} k_p V_p \tag{10}$$

여기서 a는 식 (11)과 같으며, F_x는 식(1), (5), (6)을 연립하여 식(12)와 같이 얻을 수 있다.

$$a = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \tag{11}$$

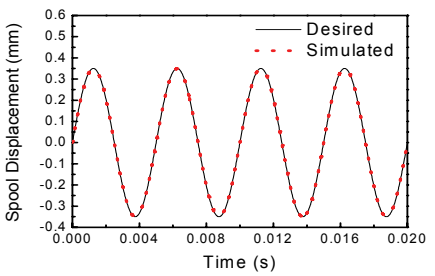
$$\begin{aligned} &|x_s| < \varepsilon, && F_x = 0 \\ &\varepsilon < |x_s| < (\varepsilon + a), && F_x = \frac{2C_d{}^2 \pi D_s}{C_c} \Delta P(|x_s| - \varepsilon) \\ &|x_s| \geq \varepsilon + a, && F_x = \frac{2C_d{}^2 \pi D_s a}{C_c} \Delta P \end{aligned} \tag{12}$$

일반적인 방향제어 밸브는 스풀의 위치를 제어하여, 유체의 유량을 제어하며, 따라서 이 연구에서는 스풀의 위치는 측정 가능하다는 가정하에 proportional-derivative(PD) 제어기를 통하여 스풀의 위치를 추적 제어 하였다. PD제어기에서 제어 입력은 다음과 같다.

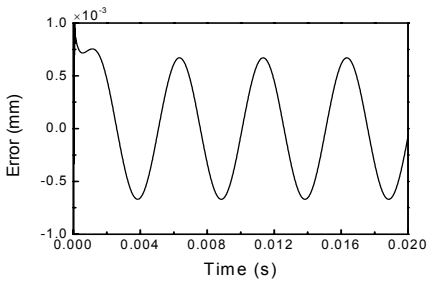
$$V_p = u(t) = P_{gain}(x_d - x_s) + D_{gain}(\dot{x}_d - \dot{x}_s) \tag{13}$$

여기서 P_{gain}는 비례 게인, D_{gain}는 미분 게인, x_d는 요구 변위이다. 위치 추적을 하기 위한 요구 변위(x_d)는 이 연구의 목표 유량인 12 liter/min를 발생시킬 수 있는 $0.35\sin(400\pi)$mm로 정하였다.

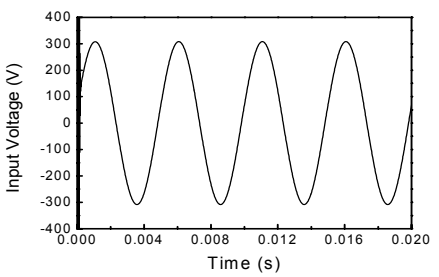
PD제어기를 통하여 위치를 추적 제어 한 결과 Fig. 7(a)와 같은 성능을 확인 할 수 있었으며, 이 때의 오차는 Fig. 7(b)와 같이 최대 0.7×10^{-4} mm로 제안한 PD제어기를 바탕으로 우수한 추적 제어 성능을



(a) Spool displacement

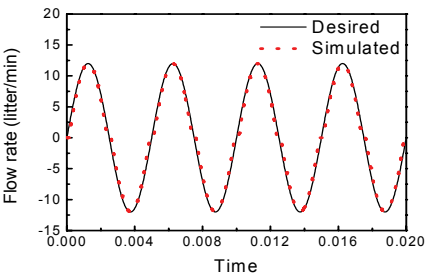


(b) Error of the spool displacement

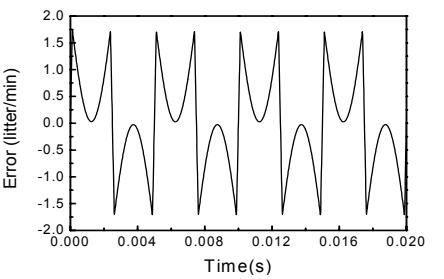


(c) Input voltage

Fig. 7 Simulation results(spool displacement)



(a) Flow rate



(b) Error of the flow rate

Fig. 8 Simulation results(flow rate)

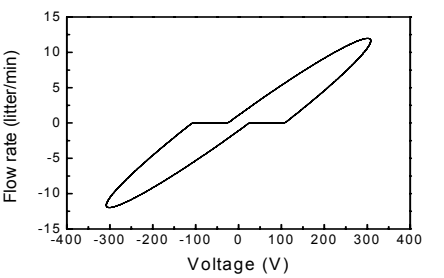


Fig. 9 Simulation results(vol. vs. flow rate)

얻을 수 있었다. 또한 이때, 압전 작동기에 인가되는 전압은 Fig. 7(c)와 같으며, 이 연구에서 선택된 PSt 350 bp/16/90 VS 25 모델의 작동 전압인 ±350 V보다 작은 값은 가짐을 확인 할 수 있었다. 이때 시행착오법으로 구한 최적 게인 값 P_{gain}, D_{gain}는 각각 2×10^{8}, 10^{5}이다.

ΔP가 일정하게 유지되도록 압력이 공급된다면, 식 (2)를 통하여 밸브 유효 열린 넓이(A_v)와 유량은 선형의 관계를 가진다. 따라서 앞서 제어된 스풀의 변위를 유체의 유량으로 바꾸어 시뮬레이션 한 결과 Fig. 8(a)와 같이 이 논문의 목표 유량인 12 liter/min를 따라 제어가 가능 한 것을 알 수 있었다. 여기서 (+)유량은 B-port로 유량이 흐름을 의미하고, (-)유량은 A-port로 유량이 흐르는 것을 의미한다. 또한, 이때의 오차는 Fig. 8(b)와 같이 최대 1.75 liter/min 정도 발생 하였다. 중복 길이인 -0.05~0.05 mm 사이에 스풀이 위치하고 있을 때는 밸브에 유체가 흐르지 않으며, 이에 따른 비선형 구간에 따라 오차가 발생 하였다. Fig. 9는 입력 전압에 따른 유량에 대한 관계로, 입력 전압이 ±300 V에서 이 연구의 목표인 12 liter/min의 유량이 나오는 것을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 기존 전자 전환 밸브의 단점을 해결하기 위하여 압전 작동기로 구동되는 방향 제어1단 밸브를 제안 하였다. 밸브의 계략적인 설계를 위하여 밸브 성능 목표를 200 Hz에서 12 liter/min의 유량 제어로 정하였다. 먼저 밸브에 대한 유체 식을 바탕으로 목표 유량을 얻기 위하여 요구되는 스풀의 변위를 결정 하였으며, 결정된 변위를 얻을 수 있는 스풀의 필요 구동력을 시뮬레이션을 통하여 계산 하였다. 이를 통하여 충분한 구동력과 변위를 낼 수 있는 stack타입의 상용 압전 작동기인 Piezomechanik 사의 PSt 350 bp/16/90 VS 25 모델을 선택 하였다. 이후 압전 방향 전환 밸브에 대한 지배 방정식이 도출 되었으며, PD제어기를 통하여 스풀의 위치를 추적 제어 하였다. 추적 제어 결과 적절한 P, D게인 값을 인가하였을 때 우수한 위치 추적 제어 성능을 보였으며, 이를 통하여 유량을 계산 한 결과 밸브의 목표 제어성능을 만족하는 것을 확인 할 수 있었다. 향후, 실제 압전 작동기로 구동되는 방향 제어 밸브를 제작하고 실험을 통하여 유량 제어 성능을 평가할 예정이다.

참 고 문 헌

(1) Taghizadeh, M., Ghaffari, A. and Najafi, F., 2009, Modeling and Identification of a Solenoid Valve for PWM Control Applications, Comptes Rendus Mecanique, Vol. 337, No. 3, pp. 131~140.

(2) Miyajima, T., Fujita, T, Sakaki, K., Kawashima, K. and Kahawa, T., 2007, Development of a Digital Control System for High-performance Pneumatic Servo Valve, Precision Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 156~161.

(3) Choi, S. B. and Yoo, J. K., 2004, Pressure Control of a Pneumatic Valve System Using a Piezoceramic Flapper, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 218, No. 1, pp. 83~91.

(4) Lindler, J. E. and Anderson, E. H., 2002, Piezoelectric Direct Drive Servovalve, Proceedings of SPIE Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, San Diego, CA, pp. 4698-53.

(5) Liu, Q., Bo, H. and Qin, B., 2010, Experimental Study and Numerical Analysis on Electromagnetic Force of Direct Action Solenoid Valve, Nuclear Engineering and Design, Vol. 240, No. 12, pp. 4031~4036.

(6) Lee, C. D., Park, S. H. and Lee, J. K., 2005, Robust Control of Pressure Control System Using Direct Drive Valve, Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 11, No. 12, pp. 1077~1082.

(7) Jeon, J., Sohn, J. W. and Choi, S. B., 2011, Vibration Control of Stiffened Hull Structure Using MFC Actuator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 7, pp. 643~649.

(8) Choi, S. B., Sohn, J. W., Choi, S. M., Nguyen, V. Q. and Moon, S. J., 2009, A Piezostack-based Active Mount for Broadband Frequency Vibration Control: Experimental Validation, Smart Materials and Structures, Vol. 18. No. 9. pp. 1~8.

(9) Rabie, M. G., 2009, Fluid Power : Chaper 5 Hydraulic Control Valves, Mc Graw Hill, USA, pp.

157~172.

(10) Piezomechanik Corporation, Catalog for Bipolar Piezo Stack Actuators, http://Piezomechanik.com.

Seung-Bok Choi received Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Michigan State University in 1990. He is currently a fellow professor with the Department of Mechanical Engineering at Inha University, Korea. He has published more than 300 refereed international journal papers in the area of smart material applications such as electro-rheologicalfluids, magnetorheological fluids, piezoelectric materials and shape memory alloys.

Juncheol Jeon received bachelor's degree in Mechanical Engineering from Inha University in 2008. He is currently doctoral student in the Department of Mechanical Engineering at Inha University. His research interests include design, analysis and flow-rate control of direct drive valve using smart materials.