< >

# 적층형 압전액추에이터 방식 전-공 레귤레이터

윤소남† · 김찬용* · 박중호* · 윤동원*

# Electro-pneumatic regulator using multilayer PZT actuator

So-Nam Yun, Chan-Yong Kim, Jung-Ho Park, Dong-Won Youn

**Key Words:** Electro-pneumatic regulator(전-공 레귤레이터), PWM control(PWM 제어), Solenoid actuator(솔레노이드 액추에이터), Multilayer PZT actuator(적층형 압전액추에이터)

**Abstract**

This paper presents a new control mechanism for the proportional pressure control which is accomplished by electro-pneumatic regulator using two PZT actuators. The electro-pneumatic regulator of this study is 2-stage type and consists of two piezoelectric actuators, a controller and a main poppet valve. The piezoelectric actuators are multilayer bender type and are controlled by digital signal. Proportional pressure control technique is very important because that can derive improvement of product quality and driving ability in the pneumatic system. Solenoid actuator method for pressure control is widely used but this actuator has a high power consumption characteristics. So new actuator is required for the energy saving. In this study, PZT actuator for the pressure control was fabricated and experimented instead of the conventional type solenoid actuator. Experiments for the new control mechanism of the elector-pneumatic regulator were operated under the input condition of 0.4[MPa] and it was confirmed that this mechanism has a good control characteristics to the response sensitivity and hysteresis.

## 1. 서 론

공기압장치에서 사용 목적에 따라 압력을 가변시킬 수 있는 공압레귤레이터는 기계식 및 전기식으로 구분되며, 전기식은 비례 솔레노이드 방식 및 디지털 솔레노이드방식이 주로 이용되고 있다. 솔레노이드 방식은 전자석 원리를 이용한 것으로 코일에 전기를 인가하면 고정자와 가동자 사이에 인력이 작용하여 압력제어가 가능하게 된다. 비례 솔레노이드 방식은 고정자 내부에 제어각을 설치하여 어느 일정구간에서 가동자의 움직임에 관계없이 일정한 흡인력을 발생시키도록 설계된 것으로 입력 전류에 비례한 흡인력을 얻을 수 있는 특징이 있다[1]. 일반 솔레노이드인 경우는 흡인력이 가동자의 움직임에 따라 지수함수적으로 변화하는 특징이 있어 한 개의 솔레노이드 액추에이터를 이용해서는 비례적인 압력제어가 곤란하기 때문에 두개의 솔레노이드 액추에이터를 이용하여 펄스폭 변조방식(PWM)으로 압력을 제어하고 있다[2,3]. 두 개의 솔레노이드 액추에이터를 이용하는 방식에 있어서 솔레노이드 액추에이터는 비례방식이 아니기 때문에 구조적으로 소형화와 단순화가 가능하고, 고속화가 가능하기

† 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부
E-mail : ysn688@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7155 FAX : (042)868-7176
* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

때문에 사용공간이 최소화, 저가격화가 되어서 유리한 방법이라 할 수 있다. 최근에는 신재료를 이용한 액추에이터 개발이 활발하고, 이중에서 압전 액추에이터를 이용한 방향제어밸브 연구[4,5]와 펄스폭 변조방식에 의한 연구[6] 및 압전 액추에이터 자체의 기구학적인 연구들[3,8]이 많은 연구자들에 의하여 수행되고 있다.

이 연구에서는 장시간 연속 사용에도 안정적이고, 에너지 소비 측면에서도 기존 솔레노이드 액추에이터보다 우수한 적층 벤더형 압전 액추에이터에 대해서 논의가 이루어졌다. 이 연구에서 제안하는 적층 벤더형 압전 액추에이터에 의한 공기압력의 비례제어방식은 기존 솔레노이드 액추에이터를 대신할 수 있음을 실험적으로 확인하였으며, 충분히 고압에서도 사용가능함을 증명하였다.

## 2. 전-공 레귤레이터

### 2.1 레귤레이터

연구대상 공압레귤레이터는 설정압력신호와 출력압력신호를 비교하여 사용자가 원하는 압력으로 만들어주는 제어부와 직접적으로 공기압을 제어하는 파이로트밸브부 그리고 최종적으로 사용자가 원하는 압력이 배출되는 메인밸브부의 세부분으로 구성되어있다. Fig. 1은 공압레귤레이터의 내부회로를 나타내고 있으며 이 중에서 레귤레이터의 압력은 파이로트부에 설치되어 있는 두개 밸브의 교번 동작에 의하여 제어된다.

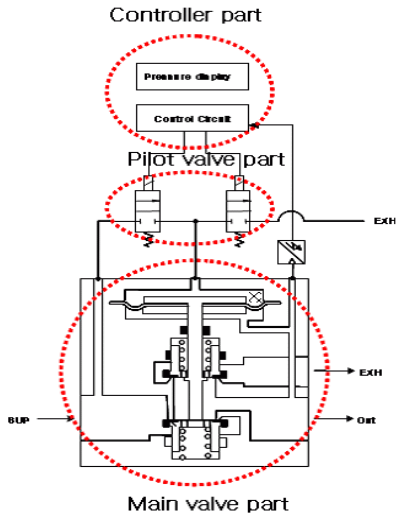



**Fig. 1** Electro-pneumatic regulator circuit

이 파이로트밸브는 고속 ON/OFF밸브이며 메인밸브와 연결되어 있는 다이어프램을 눌러 유체를 제어한다. 파이로트부로부터 입력된 유체에 의하여 다이어프램이 눌려지면 메인밸브가 개방되고 다이어프램을 누르고 있던 유체가 외부로 배출되면 메인밸브는 폐쇄된다. 따라서 전-공 레귤레이터는 사용자가 원하는 압력을 설정하게 되면 제어부에서는 제어신호로 파이로트밸브를 ON/OFF하여 설정된 압력을 유지시킨다. Fig. 2는 레귤레이터의 동작을 나타내는 흐름도이다. 현재 시중에 판매되고 있는 레귤레이터는 이 파이로트밸브를 솔레노이드방식의 밸브로 사용하고 있어 솔레노이드의 코일에서 발생하는 열로 인해 성능저하 및 에너지 과소비의 문제를 가지고 있다. 그러나 이 연구의 관심대상인 압전식 파이로트밸브는 열에 대한 안정성과 에너지 과소비문제가 발생하지 않는 압전액추에이터를 사용하고 있어 솔레노이드파이로트밸브보다 우수한 성능의 파이로트밸브라고 할 수 있다.

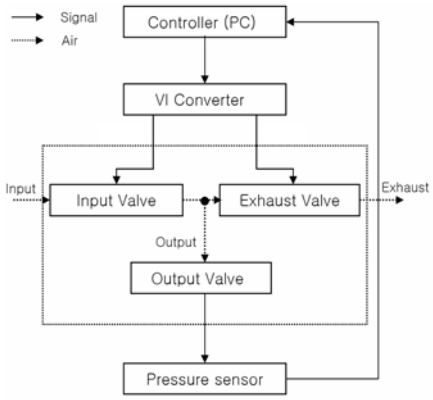
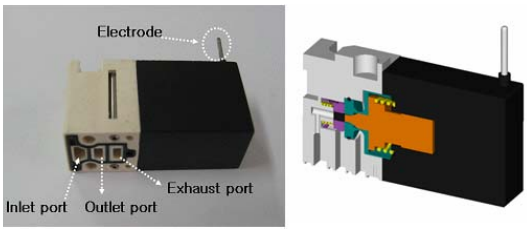


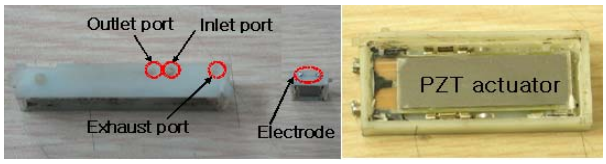

**Fig. 2** Electro-pneumatic regulator control flowchart

### 2.2 파이로트밸브

Fig. 3은 실험에 사용된 솔레노이드방식 및 압전방식 파이로트밸브를 보이는 것으로 각각 S사 및 F사 모델이 사용되었다[3,6].




a) Solenoid pilot valve




b) PZT pilot valve

**Fig. 3** Solenoid and PZT pilot valve

Fig. 3에서도 알 수 있는 바와같이 솔레노이드 파이로트밸브는 많은 구성품으로 이루어진 반면에 압전식 파이로트밸브는 압전소자와 전극으로만 구성이 되어있어 제작기술만 보편화된다면 밸브단가를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

솔레노이드 및 압전식 전-공 레귤레이터의 특성을 검토하기 이전에 솔레노이드 및 압전 파이로트밸브의 독립적인 성능은 스텝응답 특성을 통하여 비교하였다. 이 실험은 솔레노이드 파이로트밸브와 압전식 파이로트밸브의 ON/OFF 특성을 확인하는 것으로 솔레노이드는 구동전압이 직류 24[V]이며 압전식 파이로트밸브는 직류 100[V]를 사용하였다. 실험압력은 0.5[MPa](=5[bar])이며 1[s]에서 ON 신호, 8[s]에서 OFF인 스텝신호를 인가하였다. Fig. 4는 솔레노이드 파이로트밸브의 실험장치를 나타내며 Fig. 5는 스텝응답 특성 결과를 나타내고 있다.

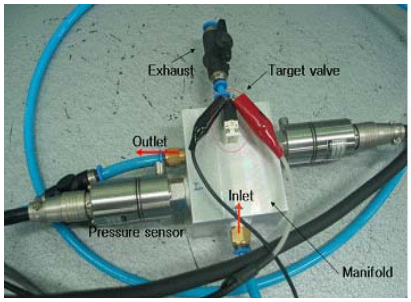



**Fig. 4** Experimental setup of solenoid pilot valve

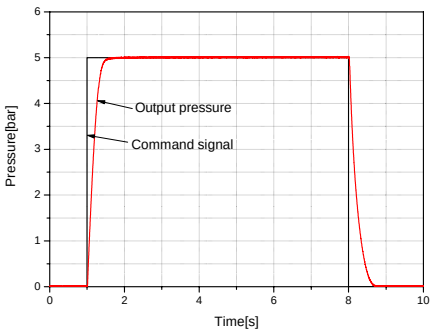



**Fig. 5** Step response of solenoid pilot valve

Fig. 5의 결과에서 상승시간과 하강시간이 거의 동일한 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 레귤레이터 내에 있는 다이어프램의 ON/OFF 동작은 파이로트밸브의 동작에 의하여 일정하게 유지하게 된다. Table 1은 실험된 파이로트밸브의 스텝응답 특성 결과의 정량적인 데이터를 보이는 것으로, $T_d$ : 무응답시간, $T_r$ : 상승시간, $T_s$ : 정착시간, τ : 시정수를 의미한다.

**Table 1** Experimental result of solenoid pilot valve

| | $T_d$ [s] | $T_r$ [s] | $T_s$ [s] | τ [s] |
|---|---|---|---|---|
| Rising | 0.01 | 0.30 | 0.45 | 0.19 |
| Falling | 0.01 | 0.41 | 0.59 | 0.21 |

Fig. 6과 7은 압전식 파이로트밸브의 실험장치와 실험결과를 나타내고 있다. 실험에 사용된 압전액추에이터는 29×13×4.9[㎜]의 크기와 17.55[㎜]의 자유길이를 가진다.

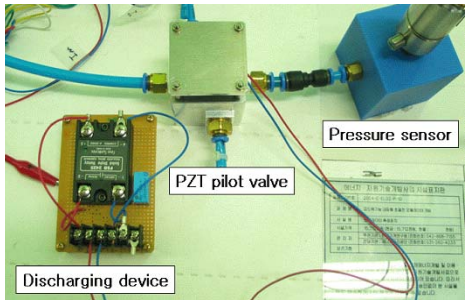



**Fig. 6** Experimental setup of PZT pilot valve

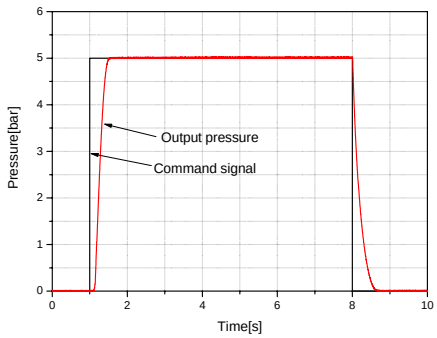



**Fig. 7** Step response of PZT pilot valve

압전식 파이로트밸브에 사용되는 압전소자는 캐패시터와 같이 전하를 충전하는 소자이다. 따라서 전하가 충전되는 시간이 존재하므로 솔레노이드 밸브에서는 거의 없던 무응답시간 $T_d$ 가

존재하게 된다. 그러나 실험결과에서도 확인할 수 있는 바와같이 솔레노이드와 비슷한 안정시간을 가지고 있다. 또한 솔레노이드 파이로트밸브는 전원공급이 차단되면 밸브가 OFF 하지만 압전식 파이로트밸브는 전하를 방전시켜 주어야 밸브가 차단되므로 방전장치를 사용하여 방전시켰다. Table 2는 압전식 파이로트밸브의 스텝응답 특성을 나타내고 있다.

**Table 2** Experimental result of PZT pilot valve

| | $T_d$ [s] | $T_r$ [s] | $T_s$ [s] | τ [s] |
|---|---|---|---|---|
| Rising | 0.11 | 0.24 | 0.46 | 0.29 |
| Falling | 0 | 0.38 | 0.55 | 0.19 |

솔레노이드와 압전식 파이로트밸브의 특성을 비교한 결과 동일한 특성을 가지고 있어 각각의 파이로트밸브를 사용한 레귤레이터 성능실험 조건이 동일함을 확인할 수 있다.

## 3. 전-공 레귤레이터 특성실험

솔레노이드 혹은 압전식 파이로트가 내장된 전-공 레귤레이터의 특성을 각각 실험하여 솔레노이드보다 압전식 레귤레이터의 우수성을 확인하고자 한다. 실험은 단순 ON/OFF 제어만을 사용한 경우와 PID-PWM제어를 사용한 경우에 대하여 수행하였다. 실험조건은 사용압력 : 0.4[MPa](=4[bar]), 샘플링시간 : 0.001[s], PWM 삼각반송파 시간 : 0.05[s], 스텝신호 : 1[s](ON) ~ 8[s](OFF), 히스테리시스 신호 : 0 ~ 4 ~ 0[V]의 1회 삼각파, PID 최적게인 : $K_P$ =1.1, $K_i$ =0.001, $K_d$ =0.001이다. 여기서 PWM 삼각반송파 시간은 실험에 의한 최적조건의 시간이다. Fig. 8은 솔레노이드 레귤레이터 실험장치를 나타내고 있다.

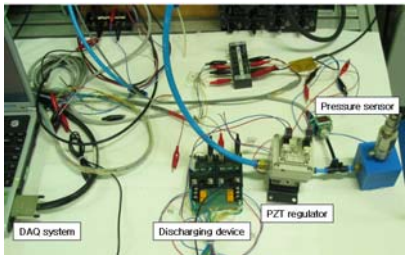



**Fig. 8** Experimental setup of solenoid regulator

실험 데이터 측정을 위한 DAQ(Data AcQuisition)장비로는 NI사의 NI-6062E를 사용하였으며 소프트웨어로는 Matlab사의 simulink R14를 사용하였다. 위의 실험과 동일한 방법으로 압전식 레귤레이터를 실험하였으며, Fig. 9는 압전식 레귤레이터의 실험장치를 나타내고 있다. 이 실험에서 압전식 파이로트밸브 실험과 동일하게 파이로트밸브의 OFF기능을 만들어 주기 위하여 방전회로를 사용하였다.

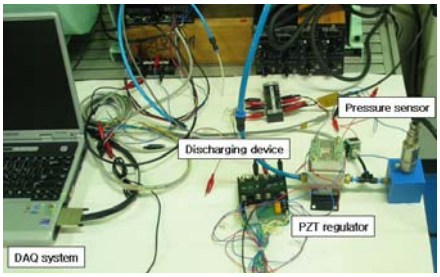
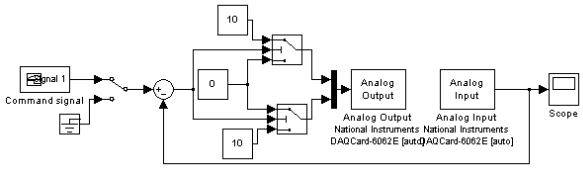
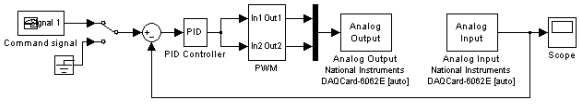



**Fig. 9** Experimental setup of PZT regulator

Fig. 10은 단순ON/OFF제어 및 PID-PWM제어 실험을 위한 simulink 블록선도를 나타내고 있다. 여기서, a)의 경우는 입력압력과 출력압력의 차가 "+"이면 무조건 ON, "−"이면 무조건 OFF로 동작하는 블록이며, b)의 경우는 PID 제어신호를 PWM 입력으로 받아 PWM신호로 변화시켜 최종 제어신호를 만들어 내는 블록이다.




a) ON/OFF control block diagram



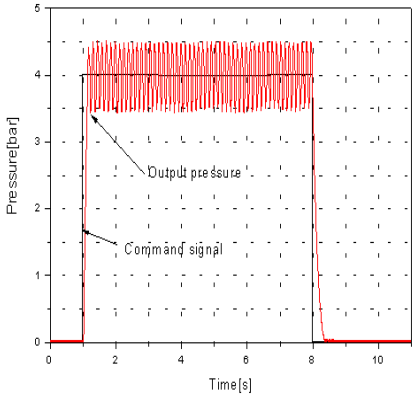

b) PID-PWM control block diagram

**Fig. 10** Proportional pressure control block diagram

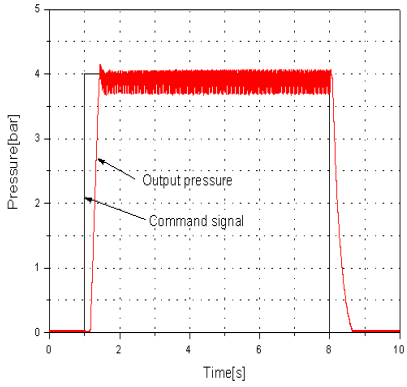
## 4. 실험결과

Fig. 10을 이용한 실험을 통해서 각각의 레귤레이터에 대하여 스텝응답 특성과 히스테리시스 특

성을 비교하였다. Fig. 11과 12는 ON/OFF제어와 PID-PWM제어에 대한 솔레노이드와 압전식 레귤레이터의 특성 결과이다. 실험에서 알 수 있듯이 단순 ON/OFF제어만을 수행하는 경우는 압력 헌팅이 발생하는 것을 확인하였으며, 보다 우수한 제어특성을 얻기 위해서는 최적제어기법 적용이 필요하다는 것을 알 수 있다.

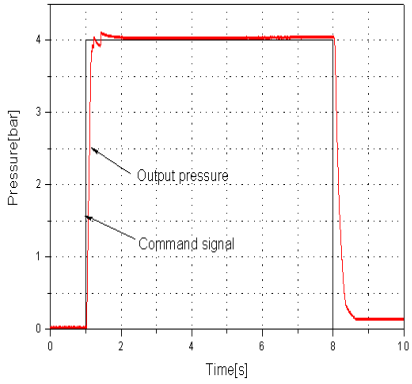



a) Solenoid regulator

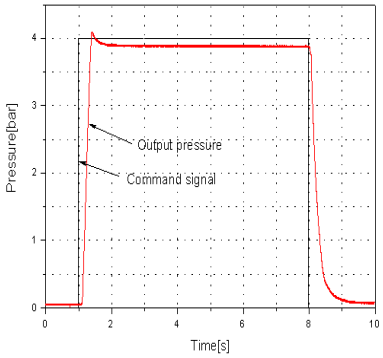



b) PZT regulator

**Fig. 11** ON/OFF control characteristics




a) Solenoid regulator

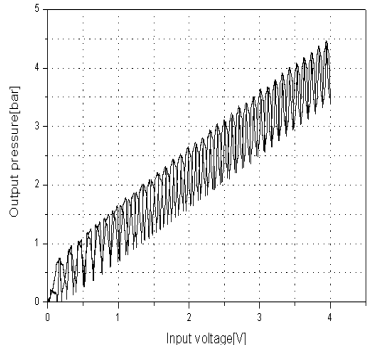



b) PZT regulator

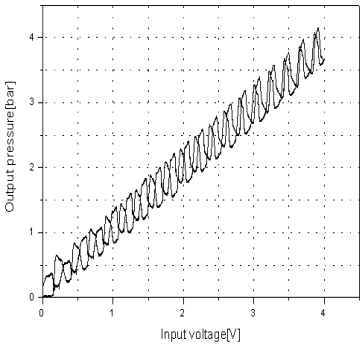
**Fig. 12** PID-PWM control characteristics

Fig. 12의 결과에서 솔레노이드와 압전식 레귤레이터가 비슷한 성능을 나타내는 것을 확인하였으며, 이 결과로부터 압전식 전-공 레귤레이터도 충분히 솔레노이드방식 전-공 레귤레이터를 대신할 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 13과 14는 각각의 제어에 대한 히스테리시스 응답을 나타낸다.

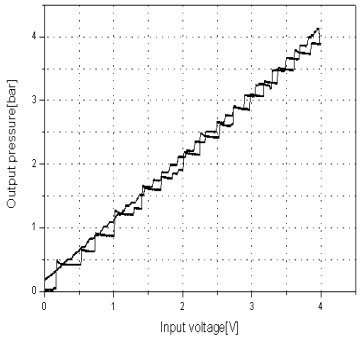



a) Solenoid regulator

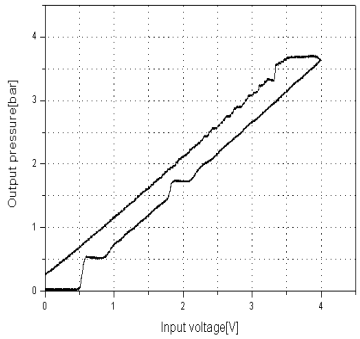



b) PZT regulator

**Fig. 13** PID-PWM control hysteresis characteristics




a) Solenoid regulator




b) PZT regulator

**Fig. 14** PID-PWM control hysteresis characteristics

Fig. 13의 경우 솔레노이드와 압전식 레귤레이터 모두 히스테리시스를 측정할 수 없을 만큼의 채터링이 발생하며 압전식의 경우는 그 폭이 솔레노이드보다 좁은 것을 제외하고는 비슷한 결과를 보인다. Fig. 14의 경우 히스테리시스 폭은 솔레노이드가 좁게 나타나지만 역시 채터링이 발생하며 압전식의 경우는 일반적인 히스테리시스의 특성을 보이고 채터링 발생이 일부구간에서만 발생하며 직진성이 우수하게 나타나고 있다. 따라서 동일한 제어조건으로 실험한 경우 솔레노이드보다 압전식 레귤레이터의 제어성능이 우수하여 레귤레이터로써 충분히 사용가능함을 제시하며 적절한 제어기를 사용한다면 더 좋은 성능을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결론

산업분야에 많이 사용되고 있는 공기압 시스템 중에서 전기-공압 레귤레이터는 수요가 매년 증가하고 있는 추세이며, 기존 펄스폭 제어방식 솔레노이드 파이로트 밸브를 이용한 방식의 성능 개선 연구 또한 매우 활발히 이루어지고 있다. 연구에서 제안하는 압전방식 전-공 레귤레이터는 온오프 솔레노이드를 대신하여 압전 액추에이터를 사용한 것으로, 스텝 응답 및 히스테리시스 특성 실험을 통하여 제어의 가능성을 확인하였으며, PID-PWM 제어를 통하여 충분히 산업화가 가능함을 증명하였다. 사용되는 압전 액추에이터의 고압화 및 최적 제어기 개발이 추가적으로 이루어지게 되면 단순화 구조와 동시에 에너지 절약이 가능한 신방식 전-공 레귤레이터 개발이 가능하리라 사료된다.

## 참고문헌

(1) Sonam Yun, Jae-seop Ryu, Byung-Kyu Ahn, Mi-Ran Seo, Chang-Seop Koh, Optimal Design of Electro-Magnetic Proportional Solenoid using Genetic Algorithm, Proceedings of the 50thnational conference on fluid poser, pp. 243~247, (2005)

(2) S.N. Yun, Y. B. Ham, J. D. Jo and B. S. Ryu, Development of Solenoid Valve for the Exhaust Brake of Diesel Engines, Transactions of KSAE, Vol. 7, No. 4, pp. 19~24, (2003)

(3) http://www.smckorea.co.kr/homepage/source/custotomer/customer.asp?param=100

(4) Hironao YAMADA etc, Development of a Low Cost Hign-Speed On/Off Digital Valve Using a Bimorph PZT Actuator, Proceeding of the Forth JHPS International Symposium on Fluid Power, pp. 591~596, (1999)

(5) Sonam Yun etc, Development of The Pneumatic Valve with Bimorph Type Piezoelectric Actuator, 1st International Workshop on Piezoelectric Materials & Application in Actuator, pp.118, (2004)

(6) http://catalog.festo.com/enu/asp/default5.asp

(7) N. C. Boydston, Thermally actuated m`icrobeam for large in plane mechnical deflections, J. Vac. Sci. Technl., Vol. 17, No. 4, pp. 442~444, (1982)

(8) Michael Goldfarb and Nikola Celanovic, Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation, IEEE control system, Vol. 10, No. 9, pp.423~428, (1997)