

압전액추에이터를 이용한 비례 가스유량제어밸브 Proportional Gas Flow Control Valve Using Piezo Actuator

윤소남 · 김찬용 · 함영복 · 이경우 · 강정호

S. N. Yun, C. Y. Kim, Y. B. Ham, K. W. Lee and J. H. Kang

Key Words : PZT actuator(압전액추에이터), Gas valve(가스밸브), Bimorph actuator(바이모프 액추에이터), Proportional control(비례제어)

Abstract: A household gas valve is used for flow control of LPG(Liquefied Petroleum Gas) or LNG(Liquefied Natural Gas) of which pressure is about 200mmH₂O(≐0.0196 [bar]). Currently, two kinds of valves such as rotary type and button type are widely used in many applications. But, these valves have some problems that they are not controllable and reliable. Piezo actuation combined with modern microelectronics provides a reliable, quiet, low energy, infinitely adjustable gas valve. In this paper, gas valve using piezo actuator which are bimorph and a circle type was studied. Also, Prototype for gas valve was manufactured and characteristics of the prototype gas valve were analyzed.

기호 설명

- A : 탄성판과 세라믹판의 young's modulus 비율
 d_{ij} : 압전 상수 (m/V or c/N)
 S_E : 금속탄성판의 탄성계수 (m²/N)
 ρ : 압전소자의 밀도 (kg/m³)
 F_b : 압전액추에이터 발생력 (N)
 F_s : 스프링력 (N)
 u_L : 탄성부하시의 변위량 (m)
 S_L : 탄성부하 킴플라이언스 (m/N)
 S_n : 압전액추에이터 킴플라이언스 (m/N)
 k_s : 스프링 상수 (N/m)
 x_o : 스프링 초기변위 (m)
 x_s : 스프링 변위 (m)
 k_L : 압전액추에이터 변위결정 상수
 V : 입력전압 (V)

1. 서론

가정에서 사용하고 가스기구 중 조리용으로 사용하고 있는 가스레인지와 난방용으로 사용하고 있는 스토브는 LPG(Liquefied Petroleum Gas) 또는 LNG(Liquefied Natural Gas)를 사용하고 있다. 이 가스기구들은 가스량을 조절하기 위하여 조절손잡이를 돌리거나 아니면 조절버튼을 눌러서 사용한다. 이 같은 방법의 가스조절밸브들은 자유롭게 가스량을 조절할 수 있는 것이 아니라 일정하게 정해진 양만을 조절하게 되어있어 사용이 불편하고, 가스의 낭비를 초래하게 된다. 따라서, 불필요한 가스의 낭비를 줄이기 위하여 가스량을 적절히 조절할 수 있는 가스조절 밸브가 필요하다. 일반적으로, 가정에서 사용하는 가스는 LNG로써 공급되는 압력은 200mmH₂O(≐0.0196[bar]) 정도의 미세한 압력이 공급된다. 따라서, 이와 같은 미세압력을 제어하기 위하여 정밀한 제어밸브가 요구된다¹⁾.

이 연구는 정밀하게 가스량을 비례적으로 조절할 수 있는 압전식 가스밸브 개발을 목적으로 하고 있으며, 액추에이터로는 바이모프타입의 압전액추에이터를 이용한다. 바이모프타입의 압전액추에이터는 서로 극이 다른 세라믹판을 금속 탄성판을 사이에 두고 양쪽 면을 붙인 것으로 전압을 인가하게 되면 전압에 비례하는 만큼 압전소자의 중앙이 볼록한 모

접수일 : 2005년 7월 28일

윤소남(책임저자) : 한국기계연구원 정보장비연구센터

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

김찬용, 함영복 : 한국기계연구원 정보장비연구센터

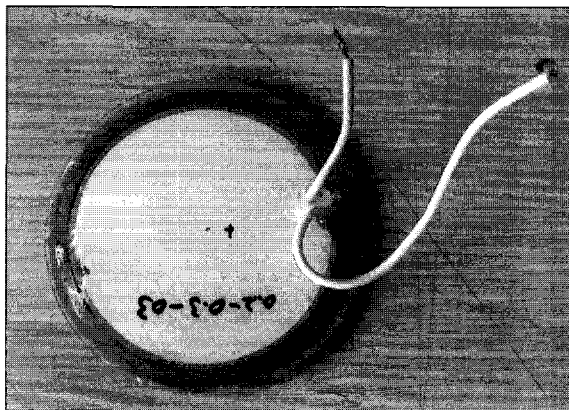
이경우 : 경원웨어이트공업(주) 부설연구소

강정호 : 삼성종합기술원, 나노공정센터

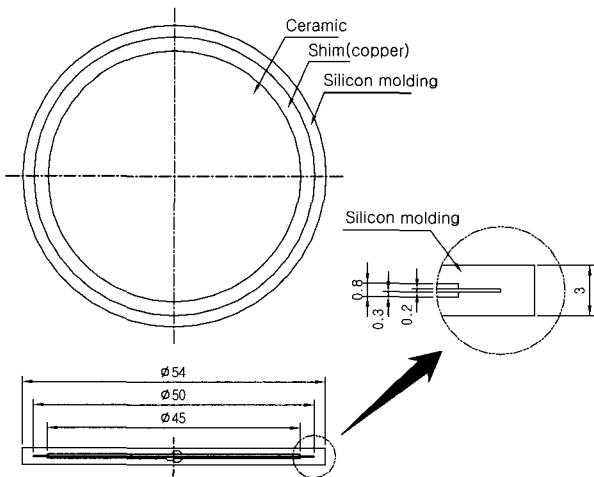
양으로 변위를 일으키게 된다²⁻³⁾. 그러나, 압전액추에이터는 압전소자가 가지는 강유전성에 의하여 히스테리시스가 발생하는 단점을 가지고 있다⁴⁻⁵⁾. Fig. 1에서 a)는 실제 제작된 바이모프타입의 압전액추에이터를 나타내고, b)는 바이모프의 형상을 나타낸다. 현재 제작된 바이모프타입의 압전액추에이터를 구동하기 위해서는 +200[V] ~ -200[V] 사이의 전압을 사용하게 되며 전압이 인가되면 위쪽과 아래쪽 방향으로 압전액추에이터의 중심부가 요철모양으로 변위를 일으키는 것을 확인할 수 있다. 연구대상 압전식 가스밸브는 가스량을 조절할 수 있는 압전액추에이터와 가스밸브의 밀봉효과 및 압전액추에이터가 가지는 히스테리시스 발생을 줄이기 위한 각종 밸브부재로 이루어져 있다.

2. 압전액추에이터 및 가스밸브

2.1 압전액추에이터 동작원리



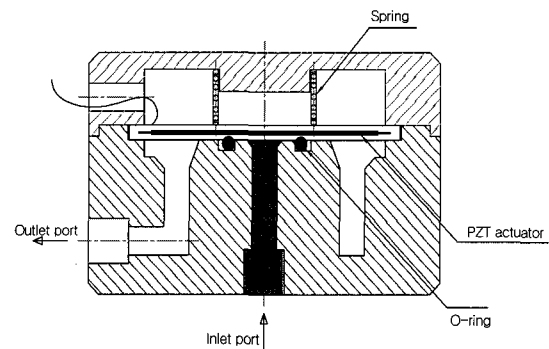
a) Photo view of bimorph



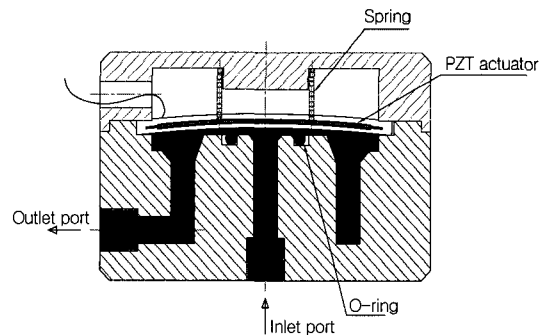
b) Specification of bimorph

Fig. 1 Bimorph type piezo actuator

이 연구에서 바이모프타입의 압전액추에이터를 사용한 목적은 유체가 들어오는 입구측에 설치되어 있어 유로의 크기를 비례적으로 조절하는데 있다. 압전액추에이터의 성질은 전압이 인가되면 전압에 비례하는 변위가 발생하게 되는데 이 변위에 의해서 입구측으로 들어오는 유체를 제한하게 된다. 즉, 변위가 크면 유체가 입구측으로 들어와 출구측으로 나갈 때 유로가 넓게 형성이 되어 유량이 많아지고, 변위가 작으면 유로가 좁아져 유량이 감소하게 된다. 이러한 동작이 비례적으로 가스량을 조절하는 원리가 된다. 실제로 전압이 인가된 후 압전액추에이터가 움직이므로써 유로가 형성되는 모습을 Fig. 2에서 볼 수 있다. 압전액추에이터는 직접 유체에 접촉되는 부분이므로 유체에 의한 부식을 방지하고 고전압에 대한 누전(Short)을 막기 위하여 압전액추에이터 전체를 실리콘으로 도포하였다. 압전액추에이터의 크기는 실리콘이 도포되기 전 상태에서 두께가 0.8[mm], 지름은 탄성판이 50[mm], 세라믹판이 45[mm]이다. 실리콘이 도포된 상태에서는 두께가 3[mm], 지름이 54[mm]이다. 이 압전액추에이터에 최대전압인 +200[V] ~ -200[V]를 인가했을 때 구동되는 변위는 금속 탄성판을 기준점으로 약 $\pm 200[\mu\text{m}]$ 이다.



a) Voltage off



b) Voltage on

Fig. 2 PZT actuator operating principal

2.2 FEM 해석

제작된 압전액추에이터에 실제로 전압이 인가되었을 경우에 어떻게 변위가 발생하는가를 알아보기 위하여 다음과 같은 전기장 해석을 하였다. 해석에 사용된 소프트웨어는 ATILA⁷⁾이며 이 소프트웨어는 FEM(Finite Element Method)기법의 해석방법을 이용하고 있다. 해석에 필요한 조건들은 Table 1과 같다.

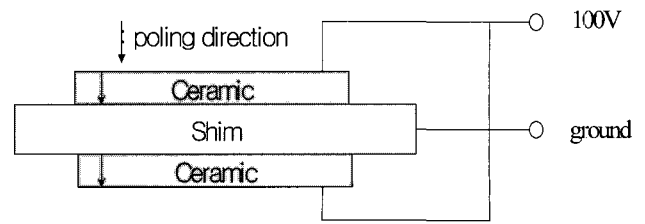
Table 1 Specification for ATILA

Shime	
Material	Brass
A	$92 \times 10^9 \text{N/m}^2$
Poisson ratio	0.33
ρ	8720kg/m^3
Ceramic	
Material	PZT5A
ρ	7750kg/m^3
S_{E}^{11}	$16.4 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$
S_{E}^{12}	$-5.74 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$
S_{E}^{13}	$-7.22 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$
S_{E}^{33}	$18.8 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$
S_{E}^{44}	$47.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$
d_{15}	$584 \times 10^{-12} \text{C/N}$
d_{31}	$-171 \times 10^{-12} \text{C/N}$
d_{33}	$374 \times 10^{-12} \text{C/N}$

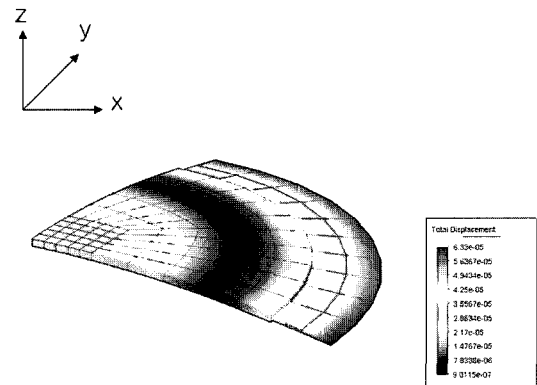
FEM해석은 각각 변위, 응력 그리고 전기장으로 수행되었다. Fig. 3의 a)는 해석에 사용된 액추에이터의 모델을 나타낸다. 해석은 전체모델의 1/4만을 모델링하여 해석하였다. 여기서, 잘린 면은 그 면에 수직인 방향으로 변위를 고정시켰다. 이 해석은 전압 100[V]를 인가했을 때를 기준을 해석하였다. 그림들에서 b)는 변위를 나타내는데 외경쪽으로 갈수록 붉은색을 띠고 있다. 이것은 중심부에서 바깥쪽으로 갈수록 변위가 커짐을 알 수 있다. c)는 응력(Stress)으로써 중심부분에 응력이 심하게 발생함을 볼 수 있으며, d)는 전기장 분포로써 전압이 인가되면 shim(Shim)부분만 전기장이 형성되고 그 외에는 접지(Ground)가 되는 것을 확인할 수 있다.

2.3 압전식 가스밸브

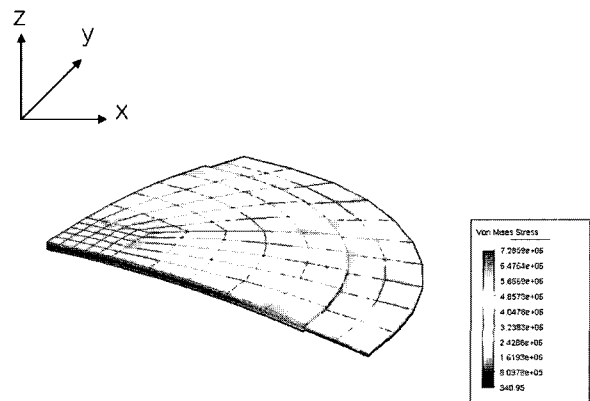
이 연구에서는 탄성부하를 이용하여 디스크형 압전액추에이터를 비례적으로 구동시킬 목적으로 아래



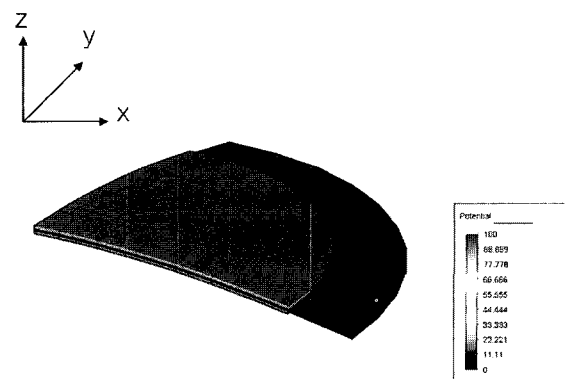
a) Actuator structure



b) Displacement



c) Stress



d) Electric field

Fig. 3 FEM analysis using ATILA

의 힘 평형식을 사용하였다.

식(1) 및 식(2)로부터, 일반적으로 탄성부하시의 변위량 u_L 은 입력전압의 함수로 표시할 수 있으나, 압전소자가 갖는 강유전체 고유의 특성으로 인하여 매우 큰 히스테리시스가 발생할 수 있기 때문에 적절한 스프링부하($k_s(x_o+x_s)$)를 사용하면 쉽게 소정의 목적을 이룰 것으로 예측할 수 있다.

$$F_t = F_b - F_s = \frac{u_L(S_L - S_n)}{S_L S_n} - k_s(x_o + x_s) \quad (1)$$

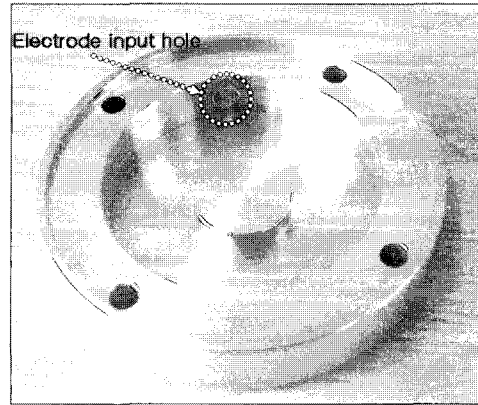
$$u_L = k_L \cdot V \quad (2)$$

Fig. 4는 압전식 가스밸브의 몸체 상단부와 하단부 그리고 가스 밀봉효과를 증대시키기 위한 부싱(Bushing) 및 스프링(Spring)을 나타내고 있다. 가스밸브의 몸체 하단부의 홈에 압전액추에이터가 덮이게 되고 그 위를 부싱과 스프링을 삽입하여 밸브몸체의 상단부가 덮이게 된다. 가스밸브의 작동은 가스가 밸브몸체 하단부의 입력포트로부터 유입되는데 이때 압전액추에이터가 입력포트를 막고 있다가 인가되는 전압에 따라 압전액추에이터의 변위만큼 포트를 열게 된다. 그러면 Fig. 4의 b)에 표시된 출력포트 쪽으로 가스가 흘러나가게 된다. 가정에서 사용하고 있는 가스의 압력은 0.0196[bar]로 아주 미세한 압력이지만 압전액추에이터를 실리콘으로 도포한 면이 고르지 못하거나 조립상의 문제로 인해 가스가 완전히 차단되지 못하는 경우가 발생한다. 이 같은 경우를 고려하여 입력포트쪽에 오링(O-ring)을 삽입하였다. 또한, 입력포트에서 가스의 압력으로 인해 압전액추에이터를 밀어내는 경우와 압전액추에이터가 가지는 히스테리시스에 의한 압전액추에이터의 복귀 시 문제를 고려하여 밸브하단부에 스프링을 삽입하였다. 밸브몸체를 서로 결합할 때 몸체의 홈이 밸브와 완전히 결합할 수 있게 만들어 밀봉효과를 좋게 하기 위하여 밸브몸체에 부싱을 삽입하였다.

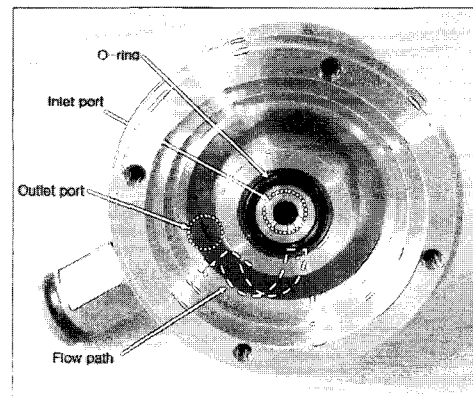
일반적으로 가정에서 사용하고 있는 가스기구들은 정해진 몇몇단계로 가스량을 조절하게 되지만 위의 압전식 가스밸브는 압전액추에이터의 변위를 비례적으로 제어할 수 있어 자유로이 무단으로 가스량을 조절할 수 있다.

3. 실험 및 실험장치

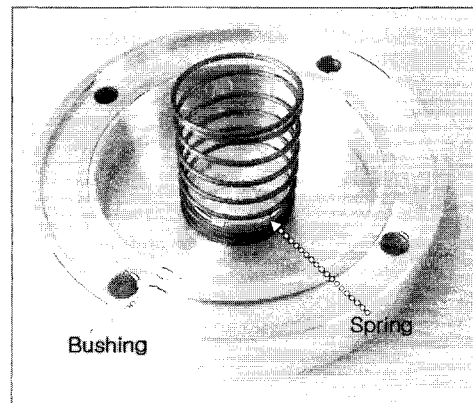
Fig. 5는 압전식 가스밸브의 비례제어를 실험하기



a) Upper case of gas valve



b) Gas valve body with O-ring



c) Spring and bushing

Fig. 4 Manufactured gas valve

위한 개략도를 보여주고 있다. 이 실험장치는 입력되는 가스압력을 측정하기 위한 입력압력센서와 출력포트로 배출되는 가스압력을 측정하기 위한 압력센서를 가지고 있다. 그리고 가스밸브의 출력포트로 배출되는 가스량을 확인하기 위하여 유량계를 설치하였다.

가스밸브는 함수발생기(Function generator)를 이용하여 전압 +200[V] ~ -200[V]를 인가하여 구동

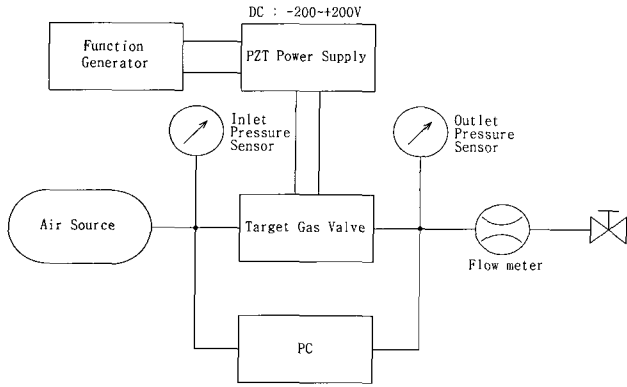


Fig. 5 Experimental circuit for gas valve test

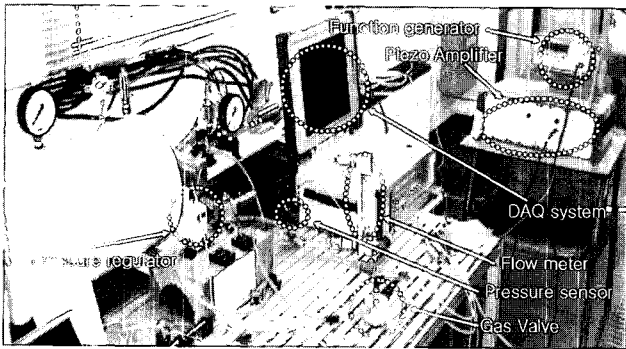


Fig. 6 Experimental apparatus

Table 2 Experimental instrument list

Model name	Purpose	Company
HVPZT-Amplifier	Voltage Amplifier	PI
A-5Gage	Pressure sensor	Sensys
STO-4-MII	Flow meter	FLOW CELL
DAQ-system	Measuring instrument	DEWETRON
ITV2050-312BS	Regulator	SMC

시킨다. 이때, 비례적으로 동작시키기 위하여 사용전압을 천천히 증가시켜 비례적으로 가스가 배출되는 것을 확인한다. 실제로 사용되는 가스의 압력은 가정용 LPG 또는 LNG가스의 압력을 기준으로 하기 때문에 0.0196[bar]를 입력을 넣어 실험해야 하나 미소유량계 및 압력계의 제약조건으로 인하여 0.4[bar]로 입력압력을 고정하고 압전식 밸브에 입력전압을 0[V] ~ +200[V]로 설정하였다. 이때, 전압을 +20[V]씩 증가시켰을 때 배출되는 가스량을 측정하였다. Table 2는 실험에 사용된 제어 및 계측기기들의 목록을 나열한 것이다. Fig. 6은 실제 실험장치와 기기들을 보여주고 있다.

4. 실험결과

이 실험은 압전식 가스밸브가 비례적으로 가스량을 제어할 수 있는가를 확인하는 실험으로 실험결과는 Fig. 7에 보이는 바와 같이 전압이 0[V]에서 +200[V]까지 증가함에 따라 가스량이 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 압전액추에이터가 가지는 강유전성에 의해서 전압이 +200[V]에서 0[V]로 감소시킬 때는 히스테리시스로 인하여 유량의 차이를 보이고 있으며, 이 가스밸브가 가지는 히스테리시스를 측정된 결과 3.59%임을 알 수 있었다. 이 결과는 비례특성을 얻기 위하여 설치된 스프링이 매우 적절한 조합을 이루고 있음을 알 수 있으며, 충분히 가스유량제어밸브로써 사용이 가능함을 예측할 수 있다.

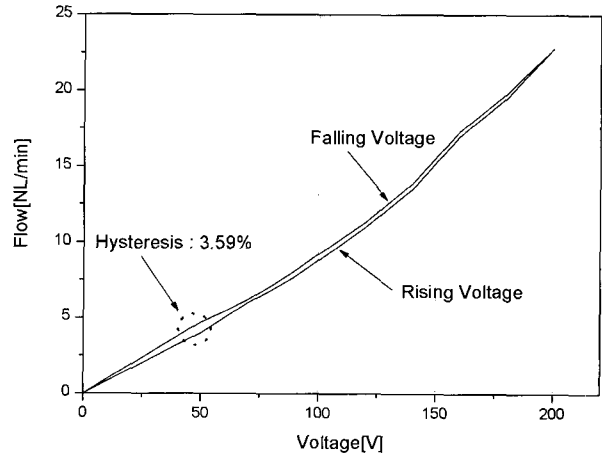


Fig. 7 Flow characteristics

5. 결론

현재, 가정에서 사용 중인 가스밸브는 기구적으로 만든 조절밸브에 의해서 가스량을 조절하고 있어 가스량을 자유롭게 조절할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 그러나, 연구대상 가스밸브는 전압에 따른 변위를 발생시키는 압전액추에이터를 이용하고 있다. 이 압전액추에이터는 인가되는 전압에 따라 변위를 일으키며 변화된 변위는 유체의 유로를 변화시켜 가스량을 비례적으로 제어할 수 있다. 제안한 밸브의 유효성은 실험에 의한 유량특성을 통하여 입증하였다. 따라서, 기존의 방식에서 불가능했던 임의의 가스량조절을 전압을 이용하여 비례적으로 실현할 수 있으므로 임의의 유량조절뿐만 아니라 에너지 절감 효과도 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) H. YAMADA etc, "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.
- 2) S. N. Yun etc, "Development of the Pneumatic Valve with Bimorph Type Piezoelectric Actuator", 1st International Workshop on Piezoelectric Materials & Application in Actuator, pp. 118, 2004.
- 3) N. C. Boydston, "Thermally actuated microbeam for large in plane mechanical deflections", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 17, no. 4, pp. 2257~2263, 1996.
- 4) C. Newcomb and I. Flinn, "Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators", Electronics Letters, vol. 18, no. 11, pp. 442~444, 1982.
- 5) T. G. King, M. E. Preston, B. J. M. Murphy and D. S. Cannell, "Piezoelectric Ceramic Actuators: A Review of Machinery Applications", Precision Engineering, vol. 12, no. 3, pp. 131~136, 1990.
- 6) T. Ikeda, "Fundamentals of Piezoelectricity", Sendai, pp. 105~107, 1990.
- 7) ATILA software ver. 5.2.4, Micromechatronics Inc.