

압전식 전공 레귤레이터의 디지털 제어

Digital Control of Electro-Pneumatic Regulator with Two Piezoelectric Microvalves

윤소남 · 이경우

S. N. Yun and K. W. Lee

1. 개요

공기압 시스템에 있어서, 기존의 압력제어 기구는 수동식 혹은 솔레노이드방식에 의하여 이루어지고 있다. 수동식(스프링 방식)으로 공기압력을 제어하는 경우는 스프링에 의하여 정해진 압력밖에 제어할 수 없기 때문에 제어성을 요구하는 시스템에는 부적절하다는 단점이 있다. 솔레노이드를 사용하는 방식은 솔레노이드가 온도 변화에 민감하게 반응하여 흡인력이 저하되는 특성이 있다. 또한 전기적 작동 시 스파크가 발생하고 전자기적인 영향으로 인하여 통신이 어렵기 때문에, 위험가스 취급지역인 원거리 통신 시스템에는 부적합한 것으로 알려져 있다.

최근, 부존자원의 부족으로 인하여 에너지 절약에 대한 요구가 매우 높고, 지구온난화와 관련한 클린·그린에너지 관련 기기 개발에 대한 관심이 매우 높은 실정이다.

일반적으로 압전 액추에이터는 기존의 솔레노이드에 비하여 응답이 빠르거나 동급이면서도 에너지 절약 특성과 안전성이 매우 우수하기 때문에 미국, 독일, 일본을 비롯한 세계 선진국에서는 이미 오래전부터 상용화하여 산업계의 여러 분야에 응용하고 있는 기술이다.

본 해설에 소개하는 기술은 압전 액추에이터를 이용하여 마이크로 밸브를 제작하고, 제작된 압전 마이크로 밸브 2개를 이용하여 최종적으로 대유량에 적합한 압력제어를 펄스폭 제어방식에 의하여 비례적으로 하는 것으로, 기존 솔레노이드 방식에 비해 4배 이상의 에너지 절약 효과를 얻을 수 있다. 압전식 전공 레귤레이터 기술은 기존의 고소비전력 솔레노이드 방식의 레귤레이터 시장에 저소비전력의 기술적 우위를 가지는 획기적인 것으로 판단되며, 압전밸브를 디지털화하여 최종적으로 압력을 비례적으로 제어하는 기술은 매우 경쟁력이 있고, 미래지향적인 기술로 평가되고 있다.

이 해설에서는 압전식 전공 레귤레이터의 히스테리시스 및 계단응답특성 향상을 위한 연구로서 제어기 개선문제 및 포화함수 개념 도입에 관한 주제를 논의하고자 한다. 또한, 사용자가 원하는 압력을 일정하게 유지시켜주는 전공 레귤레이터에 대하여 솔레노이드방식 레귤레이터와 압전방식 레귤레이터의 비교실험을 통하여 압전방식 레귤레이터의 가능성을 확인하고, PID-PWM 제어와 포화함수를 사용하여 레귤레이터의 성능개선 결과를 제시하고자 한다.

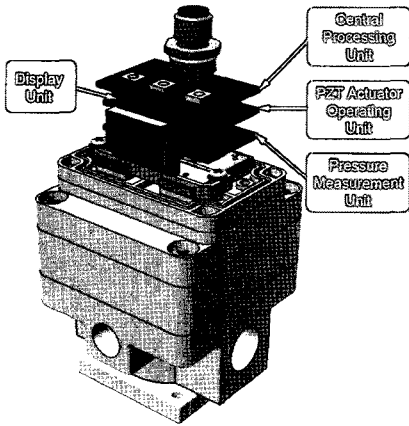
2. 전공 레귤레이터의 구조 및 원리

그림 1에 보이는 바와 같이 압전식 전공 레귤레이터는 크게 밸브 하우징, 출력밸브(포켓방식), 입·출구 파일릿 밸브, 컨트롤러 및 디스플레이 장치, 압력 센서로 이루어져 있으며, 피드백 기능이 내장되고 전기·전자·기계 기술이 융합된 압력제어밸브이다.

포켓방식의 출력밸브는 입·출구 파일릿 밸브의 동작에 의하여 이루어지는 설정압력에 반응하여 최종적으로 대유량의 압력을 제어하는 것으로, 파일릿 압력을 피드백 받기 위하여 다이어프램 장치를 내장하고 있다.

입·출구 파일릿 밸브는 압전 액추에이터로 구성된 마이크로 밸브로, 동작은 컨트롤러에서 발생하는 펄스폭 신호에 의해서 교번하는 방식으로 이루어진다. 컨트롤러에는 마이크로프로세서가 내장되어 있어, 입력신호와 압력센서로부터의 신호를 실시간으로 계산하여 차이값을 각각 입구 및 출구의 압전 마이크로밸브에 전달하여 동작을 유도시킨다.

디스플레이 장치는 압력센서로부터 받은 전압값을 압력값으로 환산하여 사용자가 쉽게 시스템의 제어 압력값을 볼 수 있도록 되어 있다. 압력센서는 밸브 출력부에 설치되어 있어 최종적으로 제어되는 압력값을 센싱하여 컨트롤러 쪽에 정보를 전송하는 역할을 한다.



a) 전공 레귤레이터 구조

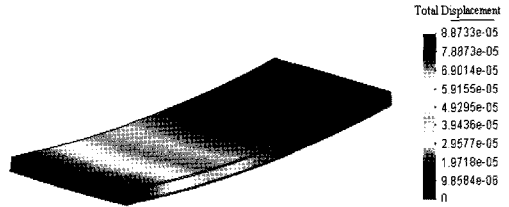


그림 3 압전 액추에이터 해석 결과

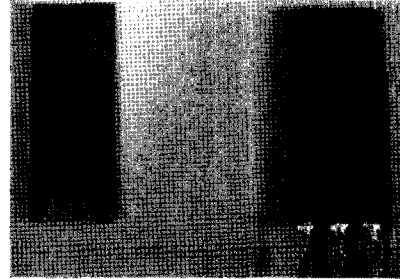
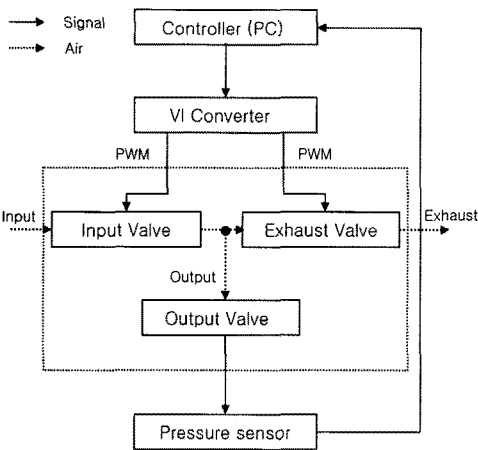


그림 4 제작된 압전 액추에이터



b) 제어흐름도

그림 1 전공 레귤레이터 구조 및 제어흐름도

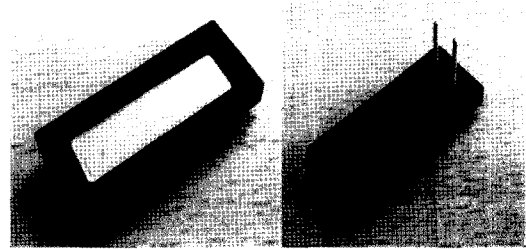
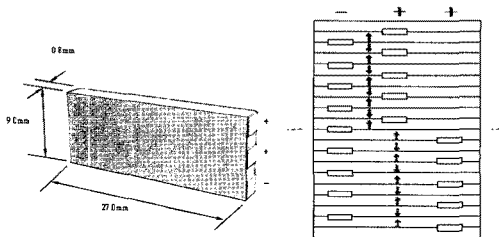


그림 5 압전 마이크로 밸브 구조

3. 개발 사례

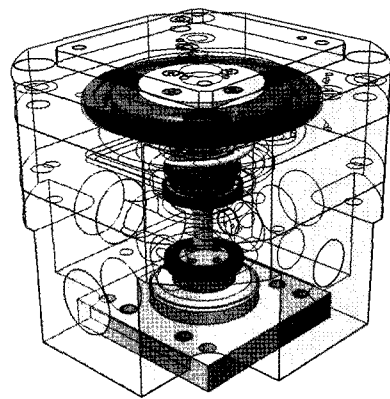
그림 2는 파일럿 밸브용으로 사용하기 위하여 설계된 압전 액추에이터의 외관 및 내부 구조를 나타낸 것이며, 그림 3은 아틸라(Atila) 소프트웨어를 이용하여 계산된 변위 결과이다. 그림 4는 제작된 압전 액추에이터의 사진이다. 이 연구에서 제작된 압전 액추에이터는 20층 구조로 되어 있으며, 크기가 27.0mm×9.0mm×0.8mm이고, 압전상수는 220e-12m/V이다.



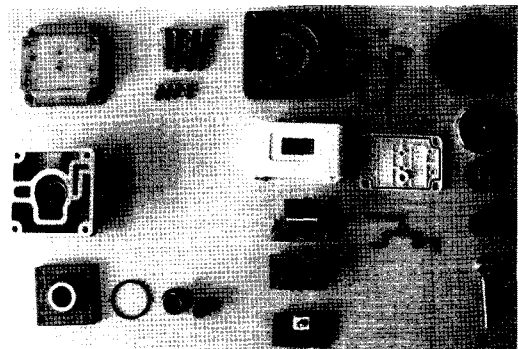
a) 외관

b) 내부구조

그림 2 적층 벤더형 압전 액추에이터



a) 레귤레이터 투영도



b) 제작된 시작품

그림 6 레귤레이터 투영도와 시작품

그림 5는 설계·제작된 압전 액추에이터를 이용한 마이크로 밸브의 내부 및 조립 후의 상태를 보여주는 것으로, 전술한 바와 같이 2개의 마이크로 밸브를 이용하여 그림 1의 입구·출구 파일럿 밸브로 사용된다.

또한, 그림 6은 설계된 레귤레이터의 투영도와 제작된 부품들의 사진을 나타낸 것이다. 압력센서를 제외하고는 모두 국내에서 개발이 이루어졌으며, 성능 분석 및 제어기 특성 검증이 실험장치를 통하여 수행되었다.

4. 성능시험 결과

그림 7은 설계·제작된 적층 벤더형 압전 액추에이터의 변위특성 실험 결과를 나타낸 것으로, 80V에서 150 μ m 이상의 변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 힘 특성에 있어서는 상용압력에서 무난히 사용할 수 있음이 확인되었다. 그림 8에는 개발된 레귤레이터의 성능을 평가하기 위하여 제작된 실험 장치를 나타내었다. 개발된 레귤레이터는 기존 솔레노이드 방식과 상대평가 되었으며, 레귤레이터 자체의 성능향상을 위한 제어기법이 연구되었다. 실험은 단순 ON/OFF 제어만을 사용한 경우와 PID-PWM제어를 사용한 경우에 대하여 수행하였다. 실험조건 (Table 1 참조)은 사용압력이 0.5[MPa], 제어 기준압력이 0.4[MPa](= 4[bar]), 샘플링시간이 0.001[s], PWM 삼각반송파 시간이 0.05[s], 스텝신호가 1[s](ON)~8[s](OFF), 히스테리시스 신호가 0~4~0[V]의 1회 삼각파, PID게인이 $K_p = 1.1$, $K_i = 0.001$, $K_d = 0.001$ 인 조건하에서 이루어졌다. 실험 데이터 측정을 위한 DAQ장비로는 NI사의 NI-6062E를 사용하였으며 소프트웨어로는 Matlab사의 simulink R14를 사용하였다.

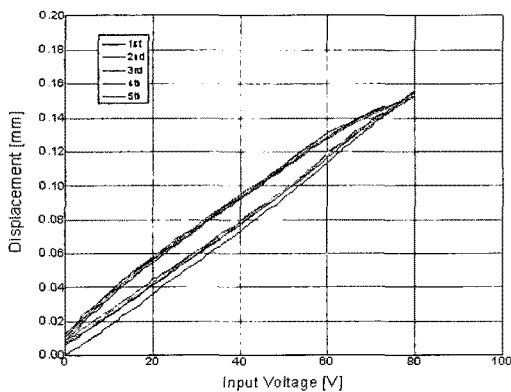
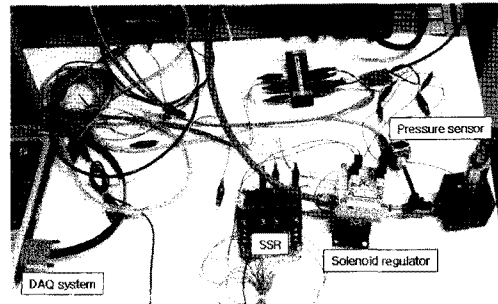
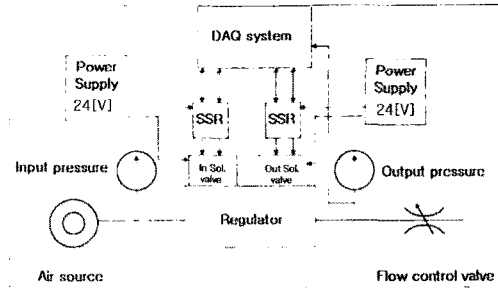


그림 7 압전 액추에이터 변위특성



a) 실험장치



b) 실험회로

그림 8 전공 레귤레이터 실험장치 및 회로

Table 1 Experimental conditions

	Solenoid	PZT
Operating Voltage	24[Vdc]	100[Vdc]
Sampling Freq.	1[kHz]	
Step Signal	ON_1[s] ~ OFF_8[s]	
PWM Freq.	20[Hz]	
Reference Pressure	4[bar](=0.4[MPa])	
Hysteresis Signal	0~4~0[V] Triangle wave	

그림 9는 단순 ON/OFF 제어와 PID-PWM 제어를 위한 시뮬링크 블록선도이다. 실험에 사용된 전공 레귤레이터의 솔레노이드 및 압전식 파일럿 밸브는 동일 용량의 밸브이다. 솔레노이드 및 압전방식 레귤레이터의 단순 ON/OFF 제어결과는 그림 10, 11에 PID-PWM 제어결과는 그림 12, 13에 나타내었다.

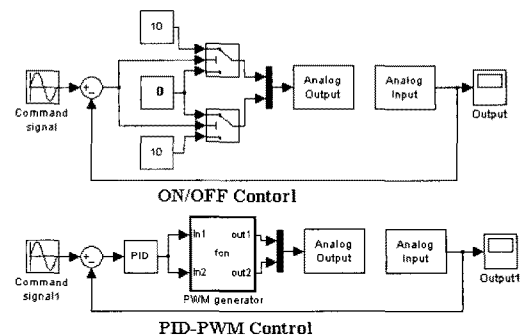
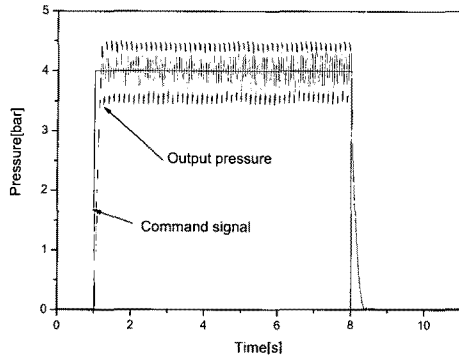
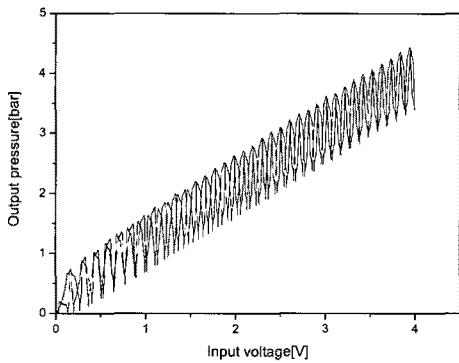


그림 9 ON/OFF 와 PID-PWM제어용 블럭

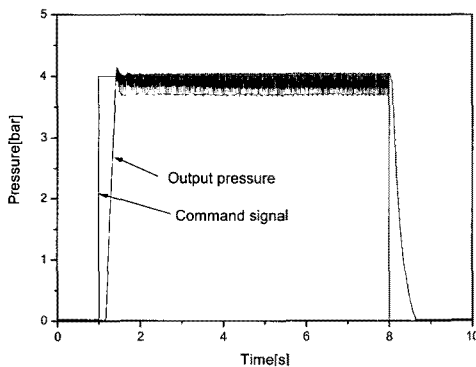


a) 스텝응답 특성

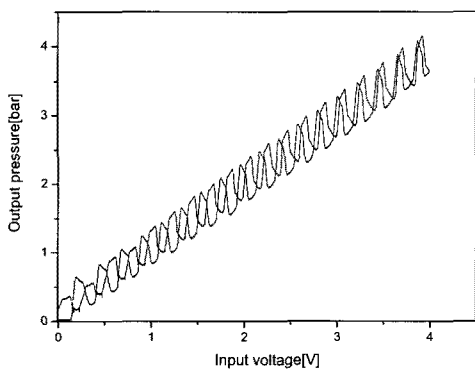


b) 히스테리시스 특성

그림 10 솔레노이드 방식 On-Off 제어 특성



a) 스텝응답 특성



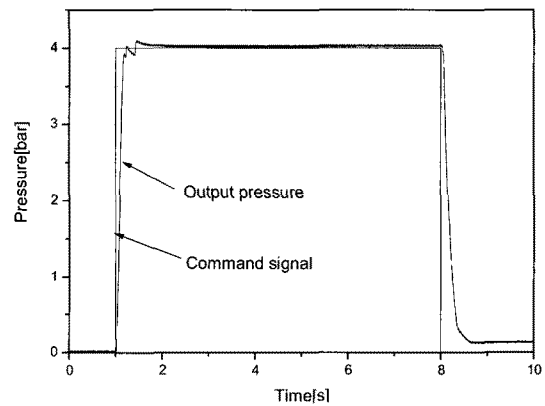
b) 히스테리시스 특성

그림 11 압전방식 On-Off 제어 특성

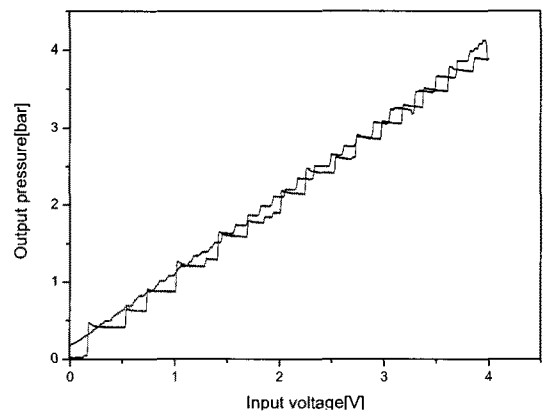
그림 10, 11은 20Hz의 구형 주파수 입력시 듀티율을 50%로 고정한 전형적인 On/Off 제어시의 결과를 보이는 것이다.

그래프에 나타난 바와 같이 단순 ON/OFF 제어의 경우, 솔레노이드 및 압전방식 레귤레이터 모두가 진동을 일으키는 불안정한 결과를 얻을 수 있었으나, 입력압력이 0.5[MPa]이고, 제어압력이 0.4[MPa]인 결과이기 때문에 비교적 헛팅현상이 적게 나타나는 것으로 사료되며, 이 결과로부터 쉽게 제어성능 향상을 꾀할 수 있음을 예측할 수 있다.

그림 12, 13에서 PID-PWM제어의 경우는 솔레노이드 방식 레귤레이터에 먼저 최적 PID게인을 사용하고 이 게인을 압전방식에 적용한 결과이나 솔레노이드에 비해 히스테리시스에서 선형적이고 더 안정적임을 확인할 수 있다. 이것은 압전방식이 솔레노이드와 등가되는 우수한 특성을 가지고 있음을 의미하며 추후 제어가 개선될 경우 더 성능이 뛰어난 레귤레이터가 개발될 수 있을 것이라 사료된다.

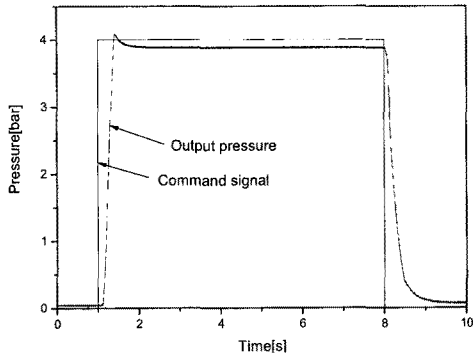


a) 스텝응답 특성

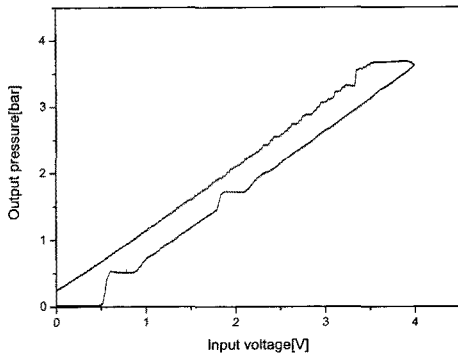


b) 히스테리시스 특성

그림 12 솔레노이드 방식 PID-PWM 제어 특성



a) 스텝응답 특성



b) 히스테리시스 특성

그림 13 압전방식 PID-PWM 제어 특성

5. 압전식 전공 레귤레이터의 제어특성 개선

이 장에서는 압전방식 레귤레이터에 대하여 PID-PWM제어와 포화함수를 이용한 제어에 대하여 비교하고자 한다. 포화함수는 PWM으로 만들어진 제어신호를 그대로 이용하여 파일럿밸브를 ON/OFF 하는 것이 아니라 제어목표치 근방에서 제어 기울기를 조절하여 최적의 히스테리시스 특성과 스텝특성 범위를 얻기 위한 제어신호를 발생시키므로 PID-PWM제어 보다 안정적인 제어가 가능하게 하는 함수이다. 식 (1)은 포화함수의 수식을 나타내고 있다.

$$\frac{2}{1 + e^{-(k \cdot u)}} - 1 \quad (1)$$

여기에서, u 는 PID의 제어 입력이며 k 는 포화함수의 포화성능을 결정하는 요소로써 k 값에 따라 제어성능이 달라짐을 실험을 통하여 확인하였다. 실험 조건은 Table 1과 동일하며 여기에 사용된 PID 게인값은 압전방식 레귤레이터를 대상으로 이론과 실험에 의해서 구해진 최적의 게인값으로 $K_p=3.5$,

$K_i=0.1$, $K_d=0.1$ 이다. 실험은 포화함수가 없는 경우와 있는 경우에 대하여 수행하였으며, 포화함수가 있는 경우에는 k 값에 따른 제어실험을 수행하였다.

6. 실험 및 결과

그림 14는 PID-PWM제어와 포화함수가 포함된 제어의 시뮬링크 블록선도이다.

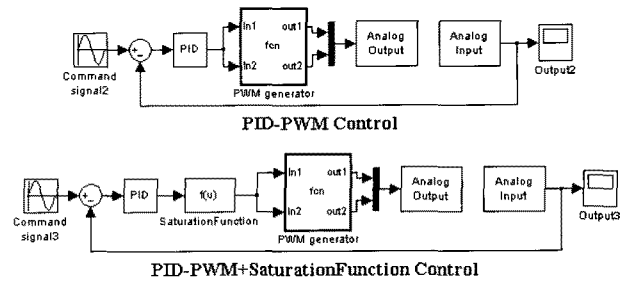
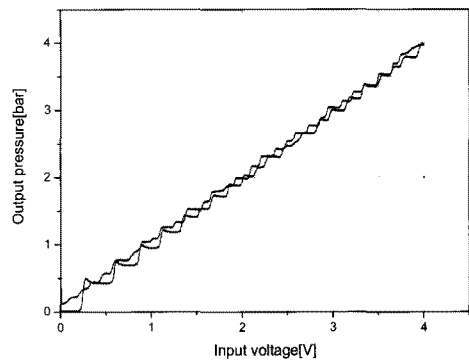
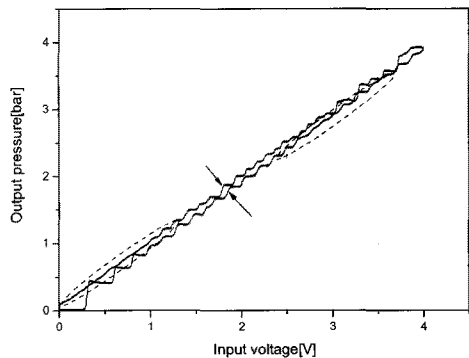


그림 14 PID-PWM과 포화함수 기능을 갖는 제어 블록

위 실험은 Table 1의 PZT실험과 동일한 조건으로 수행하였으며, 그 결과인 히스테리시스 특성은 그림 15에 나타내었다.



a) PID-PWM 제어 결과



b) PID-PWM+포화함수 제어 결과

그림 15 포화함수를 이용한 제어 특성

그림 15의 결과에서 PID-PWM제어를 사용한 경우 상승 및 하강구간 모두 채터링을 가지고 있어 히스테리시스의 특성을 확인할 수 없었으나 포화함수를 사용한 경우 상승구간 끝부분과 하강부분 끝부분에서 채터링이 없는 직선구간이 나타나 PID-PWM 제어보다 안정적인 제어가 이루어졌음을 알 수 있었다. 또한 포화함수의 경우 k 에 따라 포화함수의 기울기가 변화하는데 이 기울기가 성능에 영향을 미침을 알 수 있었으며 실험을 통하여 증명하였다. 그림 16은 k 에 따른 포화함수의 기울기를 나타내고 있는 것으로, k 값이 클수록 포화함수의 영향이 적어 시스템이 심한 채터링 현상이 일어나게 된다.

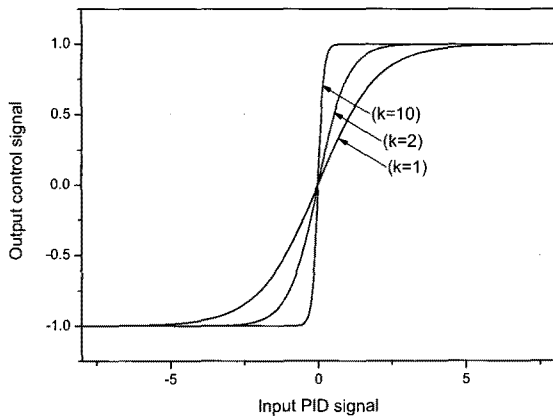
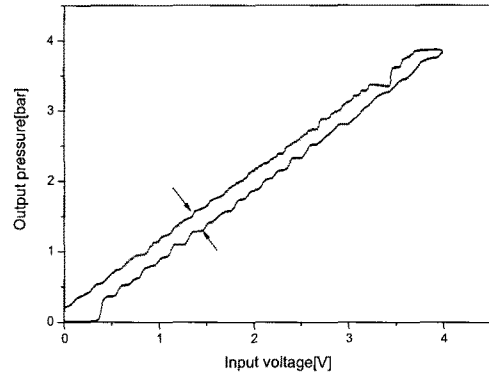


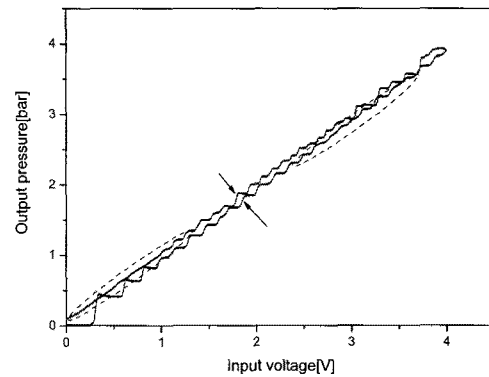
그림 16 포화함수 k 의 영향

실험은 $k=1, k=2, k=10$ 의 3가지 경우에 대하여 수행하였으며 실험 블록선도는 그림 14의 PID-PWM+saturation function과 동일하며 실험조건 역시 Table 1 과 동일하게 사용하였다. 실험결과인 히스테리시스 특성은 그림 17에 나타내었다. 그림 17의 결과에서 k 값이 10보다 클 경우 채터링이 증가하여 불안정하나 k 값이 1보다 작을 경우 안정적인 반면에 히스테리시스가 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 사용대상 시스템이 안정적인 것 보다 빠른 특성을 요구하면 k 값을 10에 가깝게 조정하거나 그 반대의 경우 빠른 것 보다 안정적인 것이 요구되면 k 값을 1에 가깝게 설정할 수 있다.

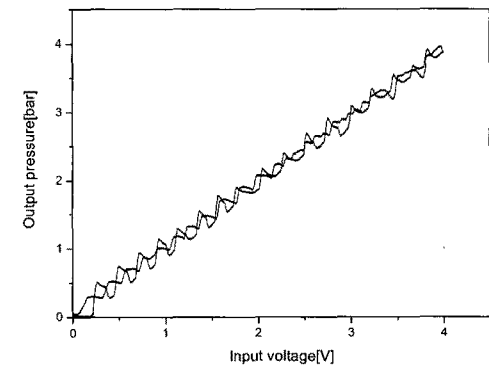
실험 결과에 의하면, 안정적인 범위내에서 히스테리시스 특성을 최대 $\pm 1\%$ 이내로 유지시킬 수 있어, 기존 솔레노이드 방식 전공 레귤레이터 보다 우수한 특성(S사: $\pm 1\%$, C사: $\pm 3.25\%$, K사: $\pm 7.16\%$, F사: $\pm 2\%$)의 압전식 전공 레귤레이터 모델 생산이 기대된다.



a) $k=1$ 인 경우 특성



b) $k=2$ 인 경우 특성



c) $k=10$ 인 경우 특성

그림 17 포화함수 k 에 따른 히스테리시스 특성

7. 결론

본고에서는 솔레노이드와 압전방식 레귤레이터에 대하여 단순 ON/OFF제어와 PID-PWM제어 실험을 통하여 솔레노이드에 등가되는 압전방식 레귤레이터의 우수성을 확인하였으며 압전방식 레귤레이터에 포화함수를 사용할 경우 제어성능이 개선됨은 물론 포화함수의 k 값에 따라 제어성능의 범위를 결정지을 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 좀 더 개선된 제어튜닝이 이루어진다면 에

너지절감효과와 제어가 용이한 압전방식의 레귤레이터 개발이 가능하리라 사료된다.

일반적으로 레귤레이터는 반도체용(칩조립라인, 세정라인), 자동차용(부품운송라인, 로봇조작라인, 버스 및 차량 브레이크라인), 자동화(식품생산라인, 포장기구라인, 초정밀 기계조립라인, 담배제조라인, 신발제조라인), 필드버스용(빌딩·사무실, 공기조화·청정라인, 위험지역, 화재지역), 항공용(기내공기조화 및 자동화 기기라인), 천연가스 제어용 태양열 에너지 시스템 등 산업 전분야에 걸쳐서 사용되고 있으며, 기본적으로 1대의 유체 제어시스템(공기압, 가스)에는 1대의 레귤레이터가 사용되고 있다.

또한, 공압 분야의 기기들이 전세계적으로 연 3% 이상의 신장율을 보이고 있어 전망이 매우 밝은 부품이다. 에너지 절약면에 있어서도 수배에서 수백 배에 이르는 특성을 가지고 있기 때문에 많은 수요가 예상되며, 에너지 절약에 기여할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- 1) 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", Proceedings of the 50th international conference on fluid power, pp. 243~247, 2005.
- 2) 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.
- 3) S. N. Yun etc, "Development of The Pneumatic Valve with Bimorph Type Piezoelectric Actuator", 1st International Workshop on Piezoelectric Materials & Application in Actuator, 118, 2004.
- 4) N. C. Boydston, "Thermally actuated microbeam for large in plane mechanical deflections", J. Vac. Sci. Technl., Vol. 17, No. 4, pp. 442~444, 1982.
- 5) Hoerbiger, "Pneumatic Valve Catalogue", pp. 18~29, 1999
- 6) Q. M. Wang and et al., "Nonlinear piezoelectric behavior of ceramic bending mode actuators under strong electric fields", J. of Appl. Phys, Vol. 86, No. 6, pp. 3352~3360, 1999

[저자 소개]

윤소남(책임저자)

E-mail : ysn688@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7155

1963년 7월 29일생

1994년 부경대학교 기계공학부 박사 과정 졸업, 1994년 한국기계연구원 입사, 2007

년 한국기계연구원 나노기계연구본부 책임연구원/스마트디바이스응용연구팀장, 압전밸브 및 스마트

디바이스응용연구에 종사, 유공압시스템학회, 대한기계학회, 일본유공압학회 등의 회원, 공학박사



[저자 소개]

이경우

E-mail : kwlee@kwfi.co.kr

Tel : 031-433-5501

1955년 06월 20일생

1984년 연세대학교 전기공학과 석사과정 졸업, 1998년 경원혜라이트 입사, 2008년

현재 경원혜라이트 부설연구소 연구소장,

압전 소재, 압전 액추에이터 및 액추에이터 응용연구에 종사, 소음진동공학회 회원, 공학석사

