

압전식 전기-공압 레귤레이터의 디지털 제어

Digital Control for PZT Type Electro-pneumatic Regulator

*#윤소남¹, 김찬용¹, 함영복¹, 박중호¹, 윤동원¹

*S. N. Yun(ysn688@kimm.re.kr)¹, C. Y. Kim¹, Y. B. Ham¹, J. H. Park¹, D. W. Youn¹

¹ 한국기계연구원 정보장비연구센터

Key words : Piezoelectric actuator, Electro-pneumatic regulator, PID-PWM control, Saturation function

1. 서론

이 논문에서는 전기-공압 레귤레이터에 사용되는 압전액추에이터의 특성 및 제어기 설계에 관한 연구가 논의 되었다. 시중에 판매되고 있는 밸브의 대다수는 전자기를 이용한 솔레노이드 방식의 액추에이터를 사용하고 있는데 이는 내부에 코일을 사용하고 있어 과도한 에너지 소비를 가져오는 요인으로 작용한다^{1,2)}. 또한 솔레노이드는 코일에 전기를 흘려 코일이 자화되면 액추에이터로서 작용하는데 이때 발생하는 열로 인하여 사용 장소 등의 제약조건을 가진다. 이를 해결하기 위하여 연구 및 개발되고 있는 것이 역압전효과를 이용한 압전액추에이터이다. 압전액추에이터는 고응답성, 고분해능 및 양호한 주파수 특성을 가지는 고전압 및 저전류 구동소자이므로 저전력소비의 장점을 가지고 있다^{3,4,5)}.

이 연구는 사용자가 원하는 압력을 일정하게 유지시켜주는 전기-공압 레귤레이터에 대하여 솔레노이드 방식 레귤레이터와 압전 방식 레귤레이터의 비교실험을 통하여 압전 방식의 레귤레이터의 우수성을 확인하였으며, PID-PWM제어와 포화함수를 사용하여 레귤레이터의 성능개선을 위한 제어가능성을 제시하고자 한다.

2. 전기-공압 레귤레이터

전기-공압 레귤레이터는 사용 대상에 필요한 압력 제공 시 압력을 자동적으로 제어하여 항상 일정한 압력을 유지시켜 주는 공압제품이다. 이 제품은 크게 3부분으로 이루어지는데 1) 일정한 압력으로 제어하는 제어부, 2) 다이어프램쪽으로 유입되는 유체를 개방 또는 차단하여 메인밸브를 ON/OFF하는 파이로트밸브부, 3) 다이어프램이 장착된 메인밸브부로 나눌 수 있다. Fig. 1은 전-공 레귤레이터의 내부회로도 및 제어선도를 나타내고 있다.

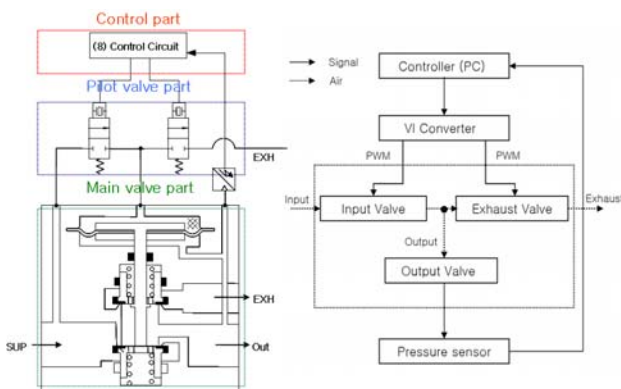


Fig. 1 Regulator circuit and control block diagram

레귤레이터는 원하는 압력이 설정되면 제어부에서 설정압력과 출력압력을 비교하여 그 값이 '+' 이면 압력이 부족한 것으로 판단하여 입력측에 달린 파이로트밸브를 개방시키고 이를 통하여 유입된 유체는 다이어프램을 누르게 된다. 이때 메인밸브의 입력포트와 출력포트가 연결되어 압력이 토출된다. 그 반대로 '-' 의 값이 나오면 출력압력 과도상태로 판단, 입력측 파이로트밸브는 폐쇄하고 출력측 파이로트밸브를 개방하여 다이어프램을 누르고 있던 공기를 배출시키기 때문에 입력포트는 차단된

다. 이와 같은 동작을 반복하면 메인밸브 출력포트는 항상 설정된 압력을 유지시킬 수 있다.

3. 솔레노이드 및 압전 방식 레귤레이터 특성

솔레노이드 방식 레귤레이터와 압전 방식 레귤레이터의 성능 비교를 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하였다. 여기서, 솔레노이드는 전기 공급이 중단되면 내부에 삽입된 스프링에 의하여 플런저가 원상태로 복귀되어 밸브를 차단한다. 압전소자는 내부가 콘덴서와 같은 구조로 되어있어 전기공급이 차단되어도 내부에 저장된 전기에너지를 방전시켜주지 않으면 원상태로 복귀되지 않아 밸브가 닫히지 않는다. 따라서 압전식 파이로트밸브의 경우 실험을 위하여 방전회로를 구성하였으며, 밸브의 성능에는 아무런 영향을 주지 않는다.

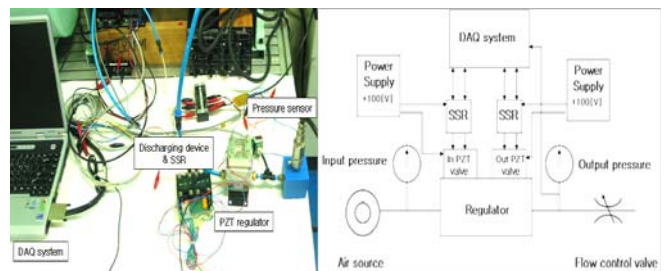


Fig. 2 Experimental apparatus and circuit

실험은 정상상태 도달 시간 확인을 위한 스텝응답 특성과 연속적인 압력변화에 따른 선형성 및 반복성 확인을 위한 히스테리시스 특성을 위해 단순 ON/OFF제어 및 PID-PWM제어를 수행하였다. 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

	Operating voltage	Sampling freq.	Step signal	PWM freq.	Using pressure	Hysteresis signal
Solenoid	24[Vdc]	1[kHz]	1[s]ON ~ 8[s]OFF	20[Hz]	0.4[bar]	0~4~0[V] Triangle wave
PZT	100[Vdc]					

실험측정을 위한 DAQ(Data Acquisition)장비는 NI-6062E를 사용했으며 실시간제어를 위하여 Matlab사 Simulink R14의 Real-time windows target을 사용하였다. 단순 ON/OFF 제어는 입력신호와 출력신호를 비교하여 그 결과가 '+' 이면 무조건 입력측 파이로트밸브를 개방하고, '-' 이면 입력측은 폐쇄시키고 출력측 파이로트밸브를 개방시키는 식의 제어방식이다. PID-PWM제어는 PID제어신호에서 단순 ON/OFF가 아닌 제어구간에 따라 ON시간의 간격을 조절하는 PWM신호를 사용하여 제어하는 것으로 솔레노이드 레귤레이터를 대상으로 하여 최적의 PID게인 값을 찾고 그 결과를 이용하여 솔레노이드 및 압전 방식 레귤레이터에 적용하여 제어를 수행하였다. 여기서, 솔레노이드의 최적 PID게인을 모든 레귤레이터에 적용한 이유는 솔레노이드 레귤레이터에 유리한 조건에서 압전식 레귤레이터의 우수성을 확인하기 위함이다. 사용된 최적의 PID 게인은 $K_p=1.1$, $K_I=0.001$, $K_d=0.001$ 이며, 그 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

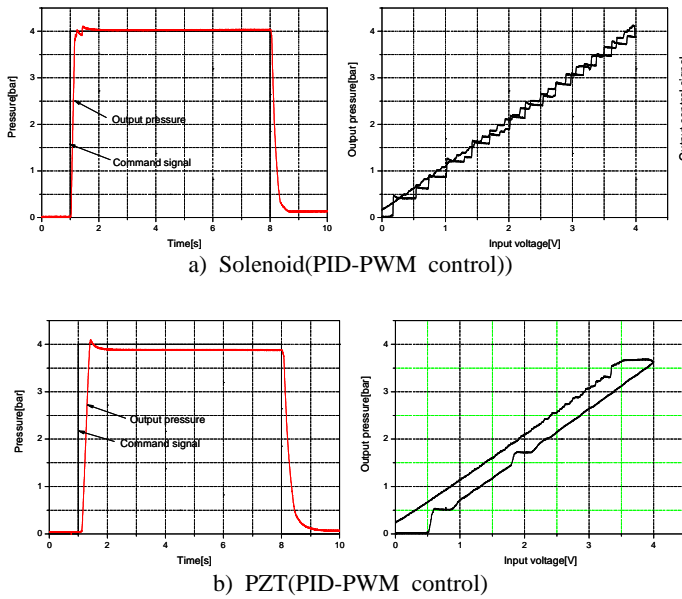


Fig. 3 Experimental results of solenoid and PZT regulator

Fig.3의 결과에서 전체적으로 압전방식이 솔레노이드에 비하여 진동폭이 적음을 알 수 있으며, PID-PWM제어의 경우 솔레노이드의 최적 PID게인을 사용했지만 압전방식이 솔레노이드에 비해 히스테리시스에서 선형적이고 더 안정적인임을 확인할 수 있다. 이것은 압전방식이 제어특성에서는 솔레노이드 보다 더 우수함을 의미한다.

4. 압전방식 레귤레이터 제어특성

3장에서는 압전방식이 솔레노이드 보다 제어성능에서 우수함을 확인하였으며, 이 장에서는 압전방식 레귤레이터에 대하여 PID-PWM제어와 포화함수를 이용한 제어에 대하여 비교하고자 한다. 포화함수는 PWM으로 만들어진 제어신호를 그대로 이용하여 피로트밸브를 ON/OFF하는 것이 아니라 제어목표치 근방에서 아주 짧게 ON 또는 OFF의 제어신호를 발생시키므로 PID-PWM제어 보다 안정적인 제어가 가능하게 하는 함수이다. 식(1)은 포화함수를 이용한 최적제어입력 u_o 의 수식을 나타내고 있다.

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

여기서, 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 PID게인값은 3장과는 다른 압전방식 레귤레이터를 대상으로 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. Fig. 4는 시뮬링크선도를 나타내며, Fig. 5는 포화함수분포 및 k 값에 따른 제어성능 결과를 나타내고 있다.

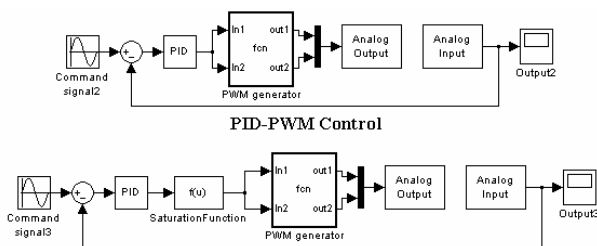


Fig. 4 Experimental block diagram

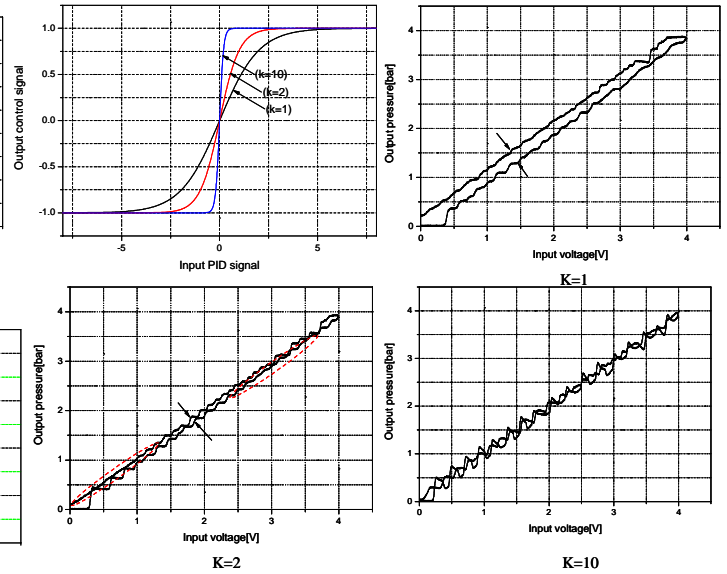


Fig. 5 Experimental results by factor k

위 결과에서 포화함수를 사용한 경우 히스테리시스 특성이 개선되었으며 k 가 '1' 및 '2'에서 우수한 특성을 나타내었다. 따라서 포화함수의 적절한 튜닝으로 제어성능을 결정하는 임계영역을 규정지을 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

현재 시판되는 솔레노이드방식의 레귤레이터는 열적 성능저하 및 에너지과소비의 단점을 가지고 있어 이를 보완하기 위하여 압전소자를 이용한 레귤레이터가 연구개발 되고 있다. 이 연구에서는 단순 ON/OFF제어 및 PID-PWM제어를 이용하여 솔레노이드보다 압전방식의 레귤레이터의 우수성을 실험을 통하여 확인하였으며, 포화함수의 사용으로 제어성능의 향상을 확인하였다. 이 결과에서 좀더 정확한 제어튜닝이 이루어진다면 에너지절감효과와 제어가 용이한 레귤레이터의 개발이 가능하리라 사료된다.

참고문헌

1. 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, 7, 4, 19-24, 2003.
2. 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 50th national conference on fluid power, 243-247, 2005.
3. Hironao 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, 591-596, 1999.
4. Sonam Yun etc, Development of The Pneumatic Valve with Bimorph Type Piezoelectric Actuator, 1st International Workshop on Piezoelectric Materials & Application in Actuator, 118, 2004.
5. N. C. Boydston, Thermally actuated microbeam for large in plane mechanical deflections, J. Vac. Sci. Technol., 17, 4, 442-444, 1982.