한국정밀공학회지 제 22 권 제 8 호 (2005 년 8 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 8, August 2005

개량된 PWM 알고리즘을 이용한 공압 레귤레이터의 압력제어에 관한 연구

김형석*, 안경관#, 이병룡**, 윤소남***

A Study on Pressure Control of Pneumatic Regulator using Modified PWM Algorithm

HyoungSeog Kim*, KyoungKwan Ahn#, ByungRyong Lee**, SoNam Yun***

ABSTRACT

The development of an accurate and energy saving pneumatic regulator that may be applied to a variety of practical pressure control applications is described in this paper. A novel modified pulse width modulation(MPWM) valve pulsing algorithm allows the pneumatic regulator to become energy saving system. A comparison between the system response of conventional PWM algorithm and that of the modified PWM(MPWM) algorithm shows that control performance is almost the same, but energy saving is greatly improved by adopting this new MPWM algorithm. The effectiveness of the proposed control algorithm are demonstrated through experiments with various reference trajectories.

Key Words : pneumatic regulator (공압 레귤레이터), on/off solenoid valve (개폐식 솔레노이드 밸브), pressure control (압력제어), PID control (PID 제어), PWM (펄스폭변조방식)

1. 서론

공압 시스템은 산업현장에 설치되어 있는 압축공기를 사용함으로써 별도의 동력 발생장치를 필요로 하지 않고 가격이 저렴하며 다양한 크기와 모양의 공압 실린더와 밸브를 구할 수 있으며 유지 보수가 용이하며 공기를 작동유체로 사용함으로써 오염으로 인한 문제가 적다.[1] 이러한 공압 시스템들 중에서 기존의 압력 제어 기구는 대부분 수동식 즉, 스프링 방식으로 응답이 늦으며 정밀도도 낮아 자동화 기기 및 제어성을 요구하는 시스템에 부적절하다. 또한 기존방식은 단순 온· 오프 조작만 가능하여 비례적으로 압력제어를 할 수 없으며 에너지 손실도 크다. 효율적인 공압시스템에 관한 연구는 T.N. Huu 가 서보밸브를 사용하는 공압시스템을 구성하여 위치 제어를 하였고 [2] S.G. Lee 는 PI 제어기와 PWM(Pulse Width Modulation)방식으로 개폐식 밸브를 구동하여 위치 및 궤적제어를 하였다.[3] H.S. Cho 와 C.W. Lee 는 PD 제어기를 사용하는 Modified on-off controller 에 대한 Deadband 와 Pulseband 를 제안하였고, 공압 서보 제어 시스템의 안정성과 상승시간을 고려한 Pulse

접수일: 2005 년 2 월 11 일; 게재승인일: 2005 년 6 월 29 일
* 울산대학교 기계• 자동차공학과 대학원
# 교신저자: 울산대학교 기계• 자동차공학부
E-mail kkahn@ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-2282
** 울산대학교 기계• 자동차공학부
*** 한국기계연구원

Modulated value 와 Pulse Band Ratio 에 대한 연구를 하였다[4]. Y. Lu 는 다른 크기의 개폐식 밸브를 사용하는 방법을 제안하였고, 최적화된 PWM 을 사용하여 변환된 연속적인 제어입력값으로 위치제어를 수행하였다.[5] B.H. Choi 외 1 명은 힘/토크 제어를 위한 새로운 PWM 방식을 제시하여 모터의 비선형성을 어느 정도 극복할 수 있는 방법을 제시하였다.[6]

한편 본 논문에서 대상으로 하고 있는 공압 레귤레이터에 관한 압력제어에 대해서는 아직 보고된 연구는 없다. 공압 레귤레이터의 성능향상을 위해 기존의 PWM(Pulse Width Method)을 수정 보완하여 응답성과 안정성을 향상시키고 압력의 목표치에 도달한 경우 흡기 및 배기 솔레노이드 밸브의 효율적인 제어를 통해 흡기 및 배기 솔레노이드 밸브 구동에 소요되는 전력 에너지를 절감하고자 한다.

2. PID 제어기를 이용한 PWM 알고리즘

2.1 시스템 구성 및 제어 블록 선도

본 논문에서 대상으로 하는 공압 레귤레이터는 기존의 온· 오프 방식의 수동식 제어기를 대신하여 비례적으로 시스템 압력을 제어하는 제어밸브로서 (주)SMC 의 ITV3050-313BS 모델을 사용하였으며 최대 공급 압력은 1.0MPa 이며 압력센서는 ㈜SMC 의 ISE40 모델이며 0MPa 에서 1.0MPa 까지 측정할 수 있다. 시스템 구성은 제어기(PC), 흡기 솔레노이드 밸브와 배기 솔레노이드 밸브 및 압력센서로 이루어져 있다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 시스템 구성도와 공압 및 신호 흐름도를 나타내고 있다.

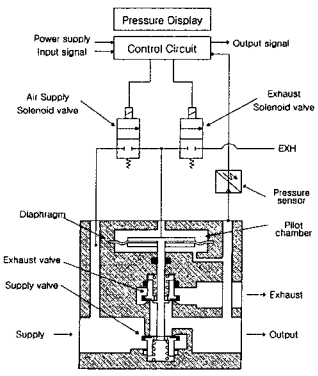

Fig. 1 System configuration

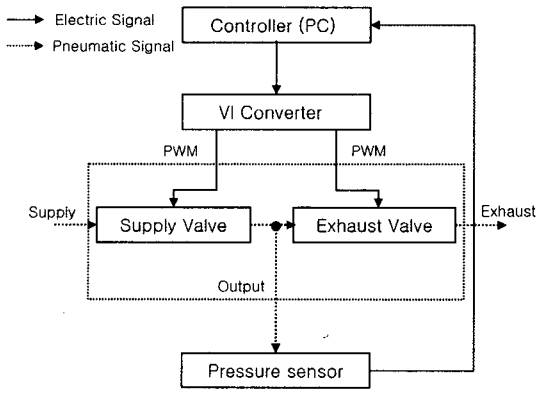

Fig. 2 The structure of pneumatic signal and electric signal

공압 레귤레이터의 압력 제어를 위해 식(1)과 같은 PID 제어기를 사용하였다.

$$V = K_p \cdot (P_d - P) - K_d \cdot P_v + K_i \cdot \int (P_d - P)dt \quad (1)$$

V : Control Input　　P_d : Desired Pressure
P : Actual Pressure　　P_v : Derivate of Pressure
K_p : Proportional Gain　　K_i : Integral Gain
K_d : Derivative Gain　　t : Continuous Time

Fig. 3 는 PID 제어기, PWM 변환기와 흡기/배기 솔레노이드 밸브 그리고 압력센서로 이루어진 제어기의 구조를 보여준다.

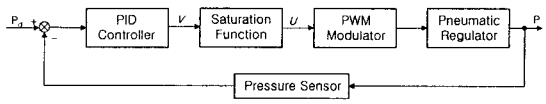

Fig. 3 The structure of the basic control algorithm

제어입력값 'V'는 PID 제어기로부터 연산되어지고 연산된 제어입력은 포화함수(Saturation Function)를 거쳐 '0'과 '1'사이의 값으로 계산되어지며 PWM 출력시간으로 변환되어 개폐식 흡기 및 배기 솔레노이드 밸브를 이에 따라 구동시켜 공압 레귤레이터의 압력을 제어한다. 여기서 포화함수는 PID 제어기의 출력값을 일정한 범위로 제한하여 PWM 주기를 쉽게 연산하기 위하여 본 논문에서 새롭게 도입하였다.

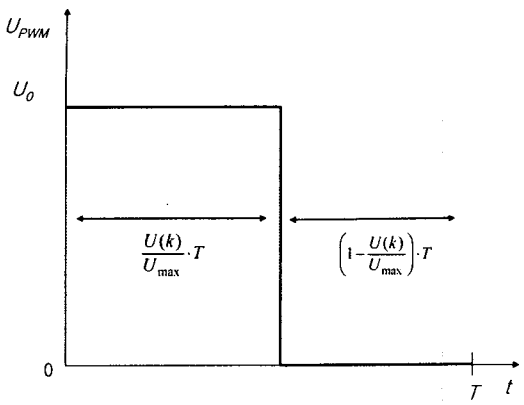

Fig. 4 Duty ratio of PWM algorithm

Fig. 4 는 duty 비에 따른 밸브의 온·오프 시간의 변화를 보여준다. 여기서 U_{PWM}, U_0, $U(k)$, U_{max}, k 및 T 는 PWM 출력전압, 밸브 개방을 위한 인가전압, 포화함수의 출력값, 포화함수의 최대값, 이산시간 및 PWM 의 한 주기를 각각 나타낸다. 여기서 $U(k)$ 가 U_{max} 보다 클 때에는 밸브 개방시간은 T 가 된다.

2.2 일반적인 PWM 알고리즘

일반적인 온· 오프 구동방식으로는 공압 모듈레이터의 압력을 비례적으로 제어는 할 수 없지만 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 PID 제어기의 '0'과 '1' 사이의 제어 입력 값을 이용하여 흡기와 배기 솔레노이드 밸브의 개방 시간을 조절함으로써 압력을 비례적으로 제어 할 수 있다.

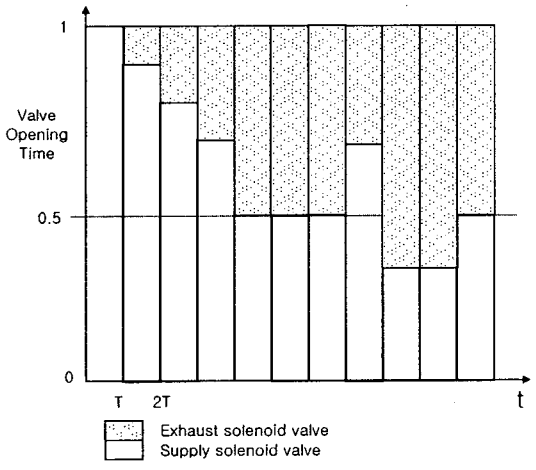

Fig. 5 Valve opening time by conventional PWM

포화함수로는 제어 입력값을 '0'과 '1'로 변환시켜주는 식(2)와 같은 Hyperbolic Tangent Sigmoid 함수를 사용하였다.

$$U(k) = \frac{1}{1+e^{-V(k)}} \tag{2}$$

여기서 $V(k)$는 PID 제어 출력값 $V(t)$의 이산값이다.

따라서 이 경우 U_{max} 는 '1'이 된다. 즉, 포화함수의 출력값에 주기 T 를 곱하면 간단히 흡기 솔레노이드 밸브의 개방시간이 된다. 상기의 밸브 개폐시간을 계산하는 알고리즘을 정리하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$U_{PWM} = \begin{cases} U_0 & 0 \le t \le t_p(kT) \\ 0 & t_p(kT) < t \le T \end{cases} \tag{3}$$

$$t_p(kT) = \frac{U(k)}{U_{max}} \cdot T$$

t_p : Opening Time of the Solenoid Valve for a Cycle

예를 들어 포화함수의 출력값이 *0.6* 이면 흡기 솔레노이드 밸브의 개방시간은 *0.6T* 가 되고 배기 솔레노이드 밸브의 개방시간은 *(1-0.6)T = 0.4T* 가 됨을 의미한다. 그러나 상기 알고리즘은 압력이 목표압력에 도달하더라도 흡기 및 배기 솔레노이드 밸브가 한 주기마다 번갈아 온· 오프가 되므로 전력소모가 심하다.

2.3 에너지 절감을 위한 개량된 PWM 알고리즘

기존의 PWM 방식은 목표압력에 빠른 시간 내로 도달 할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 목표압력에서 흡기 솔레노이드 밸브와 배기 솔레노이드 밸브를 동작시키므로 전력소모가 심하게 된다. 따라서 흡기 및 배기 솔레노이드 밸브를 동시에 동작시키지 않고 조건에 따라 필요한 밸브만을 동작시키며 목표치 근방에서는 최대한 짧은 시간 동안만 흡기 솔레노이드 밸브 또는 배기 솔레노이드 밸브를 동작시켜 정착성과 에너지를 절감할 수 있는 알고리즘을 Fig. 6 에 나타내고 있다.

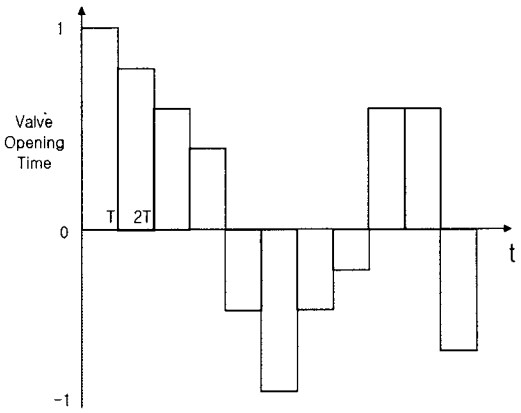

Fig. 6 Valve opening time by proposed PWM

여기서는 포화함수로 식(4)와 같은 수정된 Hyperbolic Tangent Sigmoid 함수를 사용하였다.

$$U(k)=\frac{2}{1+e^{-V(k)}}-1 \tag{4}$$

포화함수의 출력값은 '-1'과 '1'사이의 값을 가지게 된다. 포화함수 출력값의 부호가 '+'이면 흡기 솔레노이드 밸브만을 제어하고 포화함수 출력값의 부호가 '-'이면 배기 솔레노이드 밸브만을 제어하게 된다. 상기의 밸브 개폐시간을 계산하는 알고리즘을 정리하면 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$U_{PWM_IN}(t)=\begin{cases}U_0 & (k-1)T\le t\le (k-1)T+t_{p1}(k)\\ 0 & (k-1)T+t_{p1}(k)\le t<kT\end{cases}$$

$$t_{p1}(k)=\begin{cases}\dfrac{U(k)}{U_{\max}}\cdot T & U(k)>0\\ 0 & U(k)<0\end{cases}$$

$$U_{PWM_EX}(t)=\begin{cases}U_0 & (k-1)T\le t\le (k-1)T+t_{p2}(k)\\ 0 & (k-1)T+t_{p2}(k)\le t<kT\end{cases} \tag{5}$$

$$t_{p2}(k)=\begin{cases}0 & U(k)>0\\ \dfrac{|U(k)|}{U_{\max}}\cdot T & U(k)<0\end{cases}$$

U_{PWM_IN} : PWM Output Voltage of Air Supply Solenoid Valve

U_{PWM_EX} : PWM Output Voltage of Exhaust Solenoid Valve

예를 들어 포화함수의 출력값이 *0.6* 이면 흡기 솔레노이드 밸브의 개방시간은 *0.6T* 가 되고 배기 솔레노이드 밸브는 항시 닫혀있다. 반면 포화함수의 출력값이 *-0.6* 이면 배기 솔레노이드 밸브의 개방시간은 *0.6T* 가 되고 흡기 솔레노이드 밸브는 항시 닫혀있는 것을 의미한다.

3. 실험

본 실험에서는 공압 레귤레이터의 압력제어에 기존의 PWM 구동 방식과 제안한 PWM 구동 방식을 적용하여 압력 제어 성능을 비교 검토하고자 한다. Fig. 7 은 기존의 PWM 구동방식을 이용하여 Sine 함수에 대한 추종 성능 및 흡기 솔레노이드 밸브와 배기 솔레노이드 밸브의 온·오프 동작량을 보여주고 있으며 최대오차는 0.022MPa 이다. Fig. 8 은 본 논문에서 제안한 PWM 구동방식을 통한 추종성능 및 온·오프 동작량을 보여주고 있으며 최대오차는 0.012MPa 이다. 본 실험결과로부터 Sine 목표치에 대한 추종성능은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

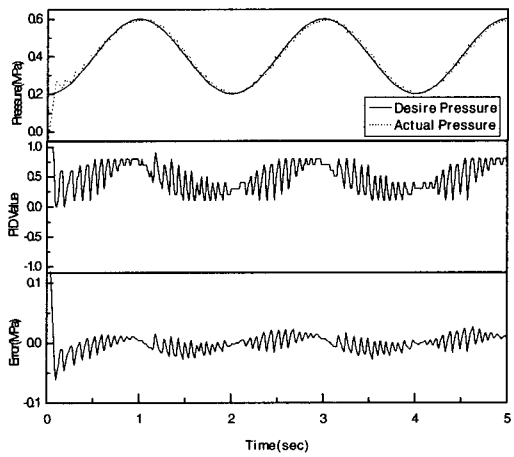

Fig. 7 Experimental results of sine response by conventional PWM

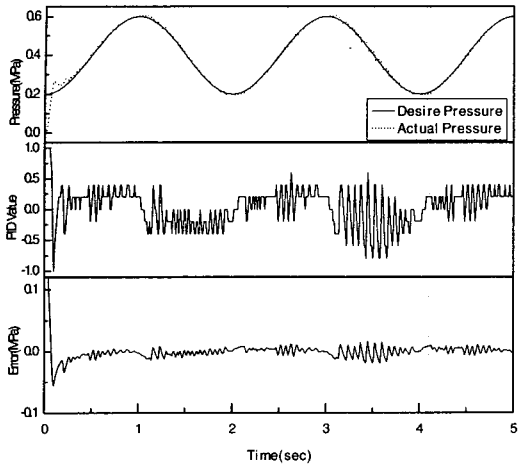

Fig. 8 Experimental results of sine respons by proposed PWM

Fig. 9 는 기존의 PWM 구동방식을 이용하여 증가하는 다단의 계단함수의 추종 성능 및 흡기/배기 솔레노이드 밸브의 온· 오프 동작량을 보여주고 있으며 상승시간, 오버 슈트, 정상 상태 오차는 각각 0.04sec, 13.9%, 0.002MPa 이다. 또한 Fig. 10 은 제안된 PWM 구동방식을 통해 추종 성능 및 온· 오프 동작량을 보여주고 있으며 상승시간, 오버 슈트, 정상 상태 오차는 각각 0.04sec, 14.9%, 0.002MPa 임을 알 수 있다.

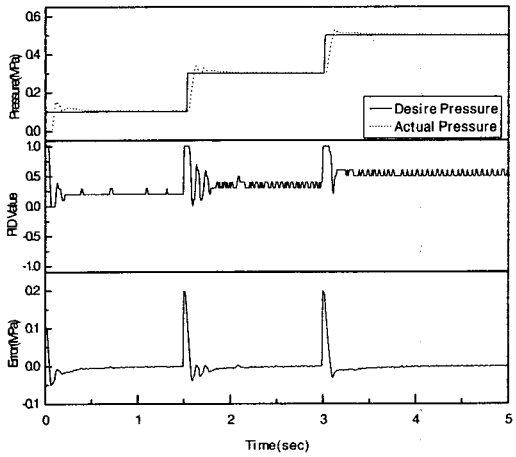

Fig. 9 Experimental results of increasing step response by conventional PWM

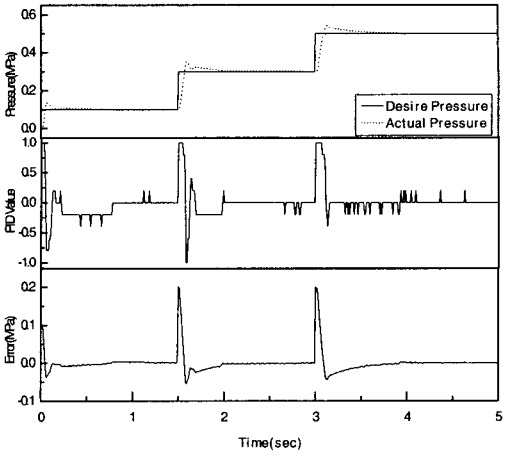

Fig. 10 Experimental results of increasing step response by proposed PWM

Fig. 11 은 1.60s 와 1.65s 사이 구간의 흡기/배기 솔레노이드 밸브의 동작을 기존의 PWM 방식과 제안된 PWM 방식으로 나누어 비교하였다. 이 그래프에서 상단부는 흡기 솔레노이드 밸브의 개폐시간을 나타내고 있으며 하단부는 배기 솔레노이드 밸브의 개폐시간을 각각 나타내고 있다. 상/하단부에서 빗금 친 부분의 폭이 클수록 밸브의 개방시간이 이에 비례하여 길어지게 된다. 기존의 PWM 구동방식은 흡기 및 배기 솔레노이드 밸브가 5 번 전부 개폐하였지만 제안된 PWM 구동방식은 흡기 솔레노이드 밸브는 3 번, 배기 솔레노이드 밸브는 1 번만 개폐하다. 만약 전력소모가 솔레노이드 밸브의 opening 시간에 비례한다고 가정했을 때 이 경우 기존의 PWM 구동방식에 비해 63%의 전력소모를 감소시켰음을 알 수 있다.

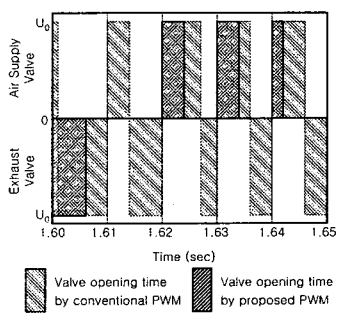

Fig. 11 Comparison of valve opening time

Fig. 12 은 기존의 PWM 구동방식을 이용하여 감소하는 다단의 계단함수에 대한 추종 성능 및 흡기 솔레노이드 밸브와 배기 솔레노이드 밸브의 온· 오프 동작을 보여주고 있으며 상승시간, 오버슈트, 정상 상태 오차는 각각 0.06sec, 3.6%, 0.004MPa 이다. 한편 Fig. 13 은 본 논문에서 제안한 PWM 구동방식을 통한 추종 성능 및 온· 오프 동작을 보여주고 있으며 상승시간, 오버슈트, 정상 상태 오차는 각각 0.05sec, 2.5%, 0.003MPa 이다.

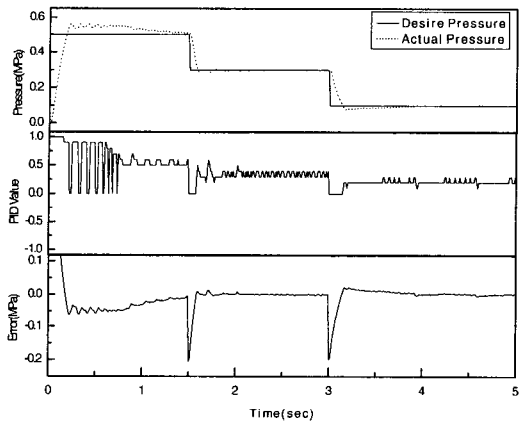

Fig. 12 Experimental results of decreasing step response by conventional PWM

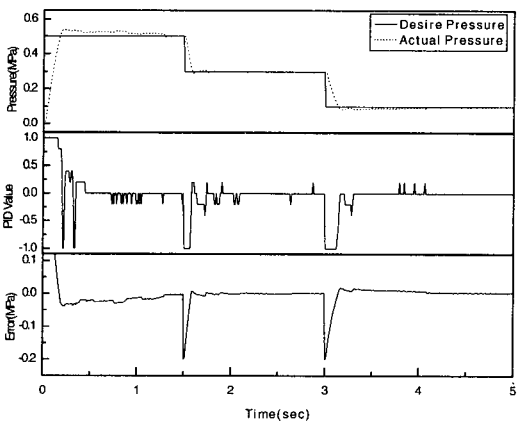

Fig. 13 Experimental results of decreasing step response by proposed PWM

이 결과로부터 추종성능에는 큰 차이가 없음을 알 수 있으며 Fig. 12 와 Fig. 13 에서 보여주는 PID 제어 출력값이 Fig. 12 에서는 여러주기동안 '*0*'값을 가지고 있다. 이는 흡기· 배기 솔레노이드 밸브 모두가 동작하지 않고 있음을 의미한다. 또한 PID 제어 출력값이 '+'인 경우 흡기 솔레노이드 밸브만 동작하고 PID 제어 출력값이 '-'인 경우 배기 솔레노이드 밸브만 동작하고 있는 것을 말한다. 결국 제안된 알고리즘을 적용함으로서 에너지 소모를 최소화 할 수 있다.

4. 결론

기존의 기계식 공압 기구들의 온· 오프 방식은 압력의 비례제어가 불가능하다. 또한 압력 제어를 위한 기존의 PWM 구동 방식은 추종속도는 뛰어나나 온· 오프밸브를 계속적으로 동작시키므로 전력소모가 많았다.

본 논문에서는 공압시스템의 2 차 압력을 제어하는데 사용되어지는 공압 레귤레이터에 대하여 고정도 및 에너지 절감을 위한 수정된 PWM 밸브 구동 알고리즘을 제안하였다. 제안한 PWM 알고리즘은 추종성능은 기존의 PWM 구동 방식과의 큰 차이가 없으며 흡기 솔레노이드 밸브와 배기 솔레노이드 밸브 모두를 동작시키지 않고 PID 제어 출력값이 '+'인 경우 흡기 솔레노이드 밸브만 동작하고 PID 제어 출력값이 '-'인 경우 배기 솔레노이드 밸브만 동작시키므로써 흡기 솔레노이드 밸브와 배기 솔레노이드 밸브의 작동시 소비되는 전력을 최소화할 수 있었다.

후기

본 연구는 에너지관리공단에서 지원하는 "에너지· 자원기술개발사업" 의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Hwang, W.T., Choi, S.H. and Lee, J.O., "Study on the Effective Operating Method of the on-off Valve for a Pneumatic Servo System," J. of the KSPE, Vol. 15, No. 1, 1998.
2. Huu, T.N., "Verhalten servopneumatischer Zylinderantriebe im Lageregelkreis," Ph.D. thesis, RETH-Aachen, 1987.

3. Lee, S.G., "On the Development of a PWM Control-based Pneumatic Servomechanism," Int. Sym. on Fluid Control and Measurement, Tokyo, Sept., pp.29-36, 1985.
4. Cho, H.S. and Lee , C.W., "Perfomance of a Modified On-off Controller with PD action of Pneumatic Servomechanism," Int. Sym. on Fluid Control and Measurement, Tokyo, Sept, pp.37-45, 1985.
5. Lu, Y, "Elektropneumatischer Positionierantriebe mit schnellen Schaltventilen," Ph.D.thesis, RWTH-Aachen, 1992.
6. Choi, B.H. and Choi, H.R., "Force/Torque Control of Ultrasonic Motor with PWM Driving Method," J. of the KSME, Vol. 24, No. 11, pp. 2723-2731, 2000.