

개폐식 밸브를 사용한 공기압 서보 시스템의 효율적 밸브 개폐 방법에 관한 연구

황응태*, 최서호*, 이정오**

Study on the Effective Operating Method of on-off Valves for a Pneumatic Servo System

Woong Tae Hwang*, Seo Ho Choi*, Chung Oh Lee**

ABSTRACT

This paper is concerned with effective operating method of pneumatic on-off valves for improving position control accuracy, valve life-time and position settling time using modified pulse width modulation with dead-zone(MPWMD). The pneumatic system using on-off valves has advantage of simple construction and low cost compared with a system with servo-valves. The performance of the proposed control method is investigated experimentally for the position control of a pneumatic cylinder using on-off valves. Experimental results show that the proposed algorithm for valve operation can be used to obtain fast and accurate position control compared to the conventional PWM algorithm. It is also shown that the use of the proposed MPWMD algorithm for the position control significantly reduces the number of valve switching and noise.

Key Words : on-off valve(개폐식 밸브), pulse width modulation with dead-zone(PWMD: 데드존을 포함한 펄스 폭 변조 방법), modified PWMD(MPWMD: 수정된 PWMD 방법) Pneumatic Position Control(공압 위치 제어)

기호 설명

A : 실린더 챔버의 단면적
 A_c : 밸브 유효 단면적
 b : 임계 압력비
 F_c : Coulomb 마찰력

F_f : 시스템 전체 마찰력
 $F_v \cdot \dot{x}$: 점성 마찰력
 F_s : 정지 마찰력
 F_{s_max} : 최대 정지 마찰력
 \dot{m} : 밸브를 지나는 공기의 질량 유량
 M : 피스톤, 피스톤 로드, 관성부하의 총질량

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

- n : 폴리트로픽 지수
- P : 챔버 압력
- P_a : 대기압
- P_i, P_o : 밸브 입구와 출구 압력
- R : 공기의 기체 상수
- T_i, T_o : 챔버 입구와 출구의 온도
- V : 챔버 부피
- V_{10}, V_{20} : 두 실린더 챔버의 초기 부피
- x, \dot{x}, \ddot{x} : 피스톤의 위치, 속도, 가속도
- \dot{x}_c : 임계 속도
- γ : 공기의 비열비
- i, O : 실린더 챔버 입구와 출구의 하첨자
- 1, 2 : 실린더 챔버 1, 2의 하첨자

1. 서 론

자동화 시스템에 쓰이는 구동기는 작동원에 따라 전기식, 공기압식, 유압식으로 구분할 수 있다. 그 중 공기압식 구동시스템은 전기식 구동 시스템보다 정밀도면에서 떨어지나 전기식에 비해 일반적으로 큰 출력을 낼 수 있고, 직선운동을 목적으로 하는 경우 실린더를 사용하면 직선운동을 직접 얻을 수 있어 시스템구성시 구조가 간단하고 가격이 저렴한 장점이 있다. 유압식에 비해서는 보수 및 유지가 간편하고 청결한 작업환경이 유지되며 가격이 저렴하다는 장점이 있다.

근래에 이르러서는 공기압식 서보밸브를 사용하여 매우 정확하고 만족할만한 위치제어가 가능하게 되었으나 서보 시스템 구성시 비용이 많이 들고 오염에 민감하기 때문에 공기압시스템의 장점들이 크게 부각되지 못하고 있는 실정이다.

근년에 고가인 공기압 서보밸브 대신에 가격이 저렴한 개폐식(ON-OFF)밸브를 사용하여 비교적 정확한 위치제어가 가능하게 되었다. 개폐식 밸브를 사용하여 위치제어하는 방법으로는 펄스폭 변조방법 (Pulse Width Modulation)이 매우 효과적임이 밝혀졌다.⁽¹⁻⁶⁾ 그러나 기존의 PWM 방법은 밸브의 수많은 개폐로 인해 소음과 밸브의 내구성이 문제되고 또한 정착시간이 길고, 정밀한 위치제어가 어려운 단점이 있다.⁽¹⁾

본 연구는 이론 및 실험을 통해 공기압 밸브의 개폐를 위한 기존의 PWM 방법을 보완하고 수정된 PWM 방법을 제안하여 위치제어의 정밀도를 높이고, 밸브의 개폐 횟수를 현저히 감소시킴으로써 소음을 줄이고 내구성을 향상시키는 목적으로 수행되었다.

2. 공기압 위치 제어 시스템

2.1 공기압 시스템 개략도

Fig. 1은 본 연구에 사용한 공기압 시스템의 개략도이며 크게 공기압 실린더, 개폐식 밸브, 엔코더, 컴퓨터 및 V/I 변환기(Voltage/Current Converter)⁽⁴⁾로 구성된다. V/I 변환기는 제어기 출력 전압을 밸브의 입력전류로 변환시킨다.

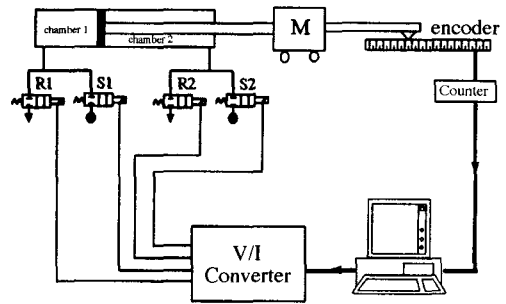


Fig. 1 Schematic diagram of the pneumatic servo system

Fig.1의 공기압 서보 시스템의 작동원리는 매 샘플링 타임마다 엔코더에서 나오는 공기압 실린더의 피스톤 변위를 컴퓨터가 입력받아서 위치, 속도 및 가속도를 계산하고, 이들 상태변수를 사용하여 제어기 출력전압을 결정하고 V/I 변환기를 통하여 개폐식 밸브를 작동시킨다.

공기압밸브는 고속 밸브 개폐가 가능한 직동식 밸브를 사용하며, Fig.1에서 보는바와 같이 실린더 챔버1의 입구밸브를 S1으로, 출구밸브를 R1으로 표시하고, 챔버2의 입구와 출구밸브를 각각 S2, R2로 표시하기로 한다.

2.2 공기압 시스템의 모델링과 시뮬레이션

2.2.1 공기압시스템의 모델링

공기압 시스템의 지배방정식은 다음과 같다. 개폐식 밸브는 개폐 시간이 짧으므로 단순 시간지연 요소로 모델링하였다.

밸브를 지나는 공기의 질량 유량

$$m = \left(\left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \cdot \frac{\gamma}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot A_e \cdot \frac{P_i}{\sqrt{T_i}} \cdot f(z)$$

$$f(z) = \begin{cases} 1 & z \leq b \\ \sqrt{1 - \left(\frac{z-b}{1-b}\right)^2} & z > b \end{cases} \quad (1)$$

$$z = \frac{P_o}{P_i}$$

실린더 챔버의 압력 변화

챔버의 체적 V_1, V_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{10} + A_1 \cdot x \\ V_2 &= V_{20} - A_2 \cdot x \end{aligned} \quad (2)$$

실린더 챔버의 압력 변화를 모델링하기 위하여 partially polytropic model¹⁷⁾을 도입한다.

$$\dot{P} = \frac{n}{V} \{ R(T_i \cdot \dot{m}_i - T_o \cdot \dot{m}_o) - P \cdot \dot{V} \} \quad (3)$$

피스톤 및 관성부하의 운동 방정식

$$M \cdot \ddot{x} + F_f(\dot{x}) = P_1 \cdot A_1 - P_2 \cdot A_2 - P_a(A_1 - A_2) \quad (4)$$

여기서, 시스템 전체의 마찰력 $F_f(\dot{x})$ 에 대한 식은¹⁴⁾

$$F_f(\dot{x}) = F_c + F_v \cdot \dot{x} + F_s$$

$$F_s = \begin{cases} \frac{(F_{s_max} - F_c) \cdot (|\dot{x}| - \dot{x}_c)^4}{\dot{x}_c^4} \cdot \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} & |\dot{x}| < \dot{x}_c \\ 0 & |\dot{x}| \geq \dot{x}_c \end{cases} \quad (5)$$

이다.

2.2.2 시뮬레이션 결과

Fig.1과 같은 공기압 위치제어 시스템의 피스톤을 전진시키기 위한 개폐식 밸브의 밸브 개폐 조합으로는 아래와 같은 세가지 방식이 있다.

- (1) (S1,R2) ON, (S2,R1) OFF
- (2) (S1) ON, (S2,R1,R2) OFF
- (3) (R2) ON, (S1,S2,R1) OFF

피스톤이 최대한 후진했을 때의 위치를 0으로 한다. 피스톤을 168mm인곳에 위치시키고 압력조건을 같게 하여 뒤와 같은 세가지 경우의 밸브 개폐 방법을 각각 적용하여 밸브를 50msec동안 열고, 닫은 후 시간에 따른 피스

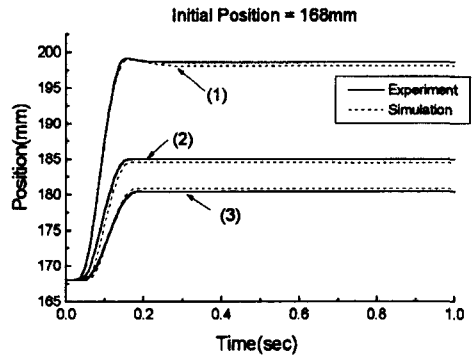
톤의 위치 및 속도를 시뮬레이션으로 구하여 Fig.2의 (a) 및 (b)에 각각 나타내었다.

개폐식 밸브의 유효단면적은 $A_e = 3.8mm^2$ 이고¹⁴⁾ 공급압력은 6bar, 대기압은 1bar이며 다른 파라미터값들은 table 1과 같다. 이때 마찰력은 특별히 개발된 마찰 측정장치¹⁴⁾를 이용하여 측정하였다.

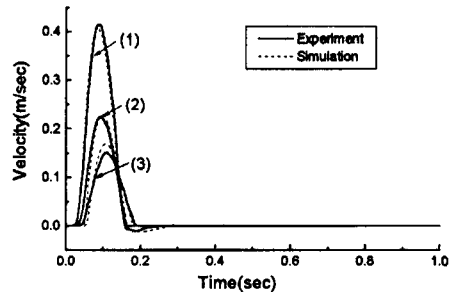
Table 1 Value of simulation parameters

$M = 4.5kg$	$\gamma = 1.4$	$b = 0.3$
$n = 1.2$	$F_c = 17.35N$	$F_{s_max} = 50N$
$F_v = 90Ns/m$	$\dot{x}_c = 0.05m/s$	
$A_1 = 1.257 \times 10^{-3}m^2$	$A_2 = 1.056 \times 10^{-3}m^2$	

Fig.2에 보인 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위해 위와 동일한 방식으로 실험을 하고, 그 결과를 시뮬레이션과 비교했다. 실험과 시뮬레이션의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) Position



(b) Velocity

Fig. 2 Comparison of simulation results with experimental data for three valve opening methods.

Fig.2에서 보는바와 같이 밸브 개폐 조합 (1)를 사용하는것보다 (2) 또는 (3)를 사용할 경우에 피스톤의 위치변화가 작다. 이 사실은 밸브 개폐 조합을 적절히 선택하면 피스톤의 속도 및 위치변화가 조절 될 수 있음을 의미한다.

3. 제어기 설계 및 밸브 구동방법

3.1 제어기 설계

공기압 위치제어 시스템은 위치, 속도 및 가속도를 제어하는 3루프(loop) 제어기가 효과적임이 밝혀져 있다.^(8,9) 제어기에서 제어출력값은 식(6)과 같이 피스톤의 위치 x 와 기준 입력 위치 x_d 의 차이 및 이 값을 수치적으로 미분해서 얻은 속도와 가속도로부터 얻는다.

$$U = K_p \cdot (x_d - x) - K_v \dot{x} - K_a \ddot{x} \quad (6)$$

- U : 제어기 출력
- K_p, K_v, K_a : 위치, 속도 및 가속도 계인
- x_d : 기준 입력 위치
- x, \dot{x}, \ddot{x} : 피스톤의 위치, 속도 및 가속도

3.2 밸브 구동 방법

식(6)에서 제어기 출력은 연속적인 값이나 서보 밸브 (servo valve)와는 달리 개폐식 밸브를 사용할 경우에는 밸브를 개폐하기 위해 불연속적인 값을 만들어 내야한다. 본 연구에서는 개폐식 밸브를 구동하기 위해 널리 사용되고있는 PWM 제어방법을 보완하는 수정된 PWMD 제어를 제안하고자 한다.

3.2.1 PWM 제어

먼저 PWM 제어방법을 고찰한다.

PWM 제어방법은 한 샘플링 주기(PWM 주기)중 밸브를 여는 시간을 제어 출력에 비례해서 열어주는 것이다. 기존의 PWM 제어방법은 제어기의 제어출력값이 0이더라도 밸브는 지속적으로 개폐되기 때문에 공기의 소모량이 많아지고, 소음이 발생할 뿐 아니라 밸브 수명을 단축시키며, 피스톤이 정착하기 어렵다는 단점이 있다. 이런 단점을 보완하고자 제어출력값이 어느 범위(dead-zone) 이내 일 때는 밸브가 모두 닫히는 과정을 포함하여 밸브 개폐 횟수를 줄인 것을 PWMD(Pulse Width Modulation with Dead-Zone) 제어방식이라 하고, 수식으로 나타내면 다음과 같다.⁽¹⁾

$$U_{PWMD}(t) = \begin{cases} \text{sign}(U(KT)) \cdot U_0 & 0 \leq t \leq t_p(KT) \\ 0 & t_p(KT) < t \leq T \end{cases}$$

$$t_p(KT) = \begin{cases} 0 & |U(KT)| \leq a \\ \frac{|U(KT)|}{U_{\max}} \cdot T & a < |U(KT)| < U_{\max} \\ T & U_{\max} \leq |U(KT)| \end{cases} \quad (7)$$

$$a = \frac{t_d}{T} \cdot U_{\max}$$

- T : PWM 주기
- U_{\max} : 모듈레이터 입력의 포화값
- a : dead-zone 임계값
- t_d : 개폐식 밸브의 dead time
- 0 : (S1, S2, R1, R2) OFF한 경우
- U_0 : (S1, R2) ON, (S2, R1) OFF한 경우
- $-U_0$: (S2, R1) ON, (S1, R2) OFF한 경우

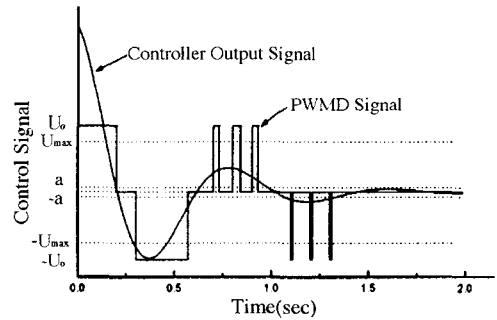


Fig. 3 PWMD Signal

3.2.2 수정된 PWMD 제어

앞에서 설명한 PWM 제어방법에서는 아래와 같은 밸브 개폐의 조합으로 피스톤을 움직인다.

- 1) (S1,R2)ON & (S2,R1)OFF(피스톤이 전진하는 경우)
- 2) (S2,R1)ON & (S1,R2)OFF(피스톤이 후진하는 경우)
- 3) (S1,S2,R1,R2) OFF

위의 밸브 개폐 조합은 한쪽 챔버의 흡기밸브와 다른쪽 챔버의 배기밸브를 동시에 열어 피스톤이 움직일 수 있도록 하는 것이다. 공기압 시스템의 위치 정밀도를 높이기

위해서는 정착단계에서 피스톤의 속도를 늦추어야 한다는 사실에 착안하여 식(7)에 제어기 출력값이 $a(|U(KT)| \leq U_{max})$ 일 때는 Fig. 2에서 보인 것처럼 양쪽 챔버의 밸브를 개폐하는 것이 아니라 한쪽 챔버의 흡기 또는 배기 밸브만을 개폐하여 다른쪽 챔버내의 유량의 흐름을 차단함으로써 피스톤이 움직임에 따라 변하는 다른쪽 챔버내의 압력이 피스톤의 속도를 둔화시키는 밸브 개폐 조합을 제안한다.

이 제어방법을 수정된 PWMD, 즉 MPWMD (Modified Pulse Width Modulation with Dead-zone)이라고 하기로 한다. 이 경우에는 모두 4가지 밸브 개폐 방식이 있고 아래와 같이 호칭한다.

- 1) SOURCE (챔버 1,2의 흡기 밸브만 개폐)
 - (S1) ON & (S2,R1,R2) OFF(피스톤이 전진)
 - (S2) ON & (S1,R1,R2) OFF(피스톤이 후진)
- 2) RETURN (챔버 1,2의 배기 밸브만 개폐)
 - (R2) ON & (S1,S2,R1) OFF(피스톤이 전진)
 - (R1) ON & (S1,S2,R2) OFF(피스톤이 후진)
- 3) SO-RE1 (챔버1의 흡기 또는 배기 밸브만 개폐)
 - (S1) ON & (S2,R1,R2) OFF(피스톤이 전진)
 - (R1) ON & (S1,S2,R2) OFF(피스톤이 후진)
- 4) SO-RE2 (챔버 2의 흡기 또는 배기 밸브만 개폐)
 - (R2) ON & (S1,S2,R1) OFF(피스톤이 전진)
 - (S2) ON & (S1,R1,R2) OFF(피스톤이 후진)

제어기 출력값이 $a(|U(KT)| \leq U_{max})$ 를 벗어난 경우에는 기존의 PWMD 제어방법과 같은 방법으로 밸브를 개폐하게 된다.

본 논문에서 제안한 MPWMD의 수식은 다음과 같다

$$U_{MPWMD}(t) = \begin{cases} \text{sign}(U(KT)) \cdot U_0 & 0 \leq t < t_{p1}(KT) \\ \text{sign}(U(KT)) \cdot U_1 & 0 \leq t < t_{p2}(KT) \\ 0 & t_{p2}(KT) \leq t < T \end{cases} \quad (8)$$

$$t_{p1}(KT) = \begin{cases} T & U_{max} < |U(KT)| \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$t_{p2}(KT) = \begin{cases} \frac{|U(KT)|}{U_{max}} T & a < |U(KT)| \leq U_{max} \\ 0 & |U(KT)| \leq a \end{cases}$$

U_i = 제안한 밸브 개폐 방식으로 피스톤 전진
 $-U_i$ = 제안한 밸브 개폐 방식으로 피스톤 후진

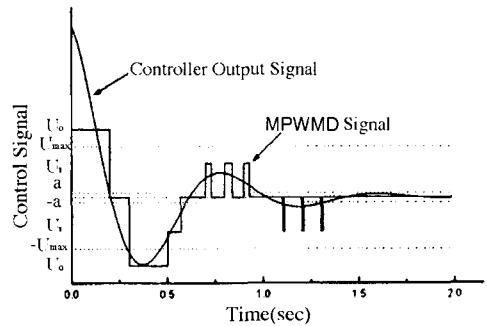


Fig. 4 Modified PWMD Signal

4. 수정된 PWMD를 적용한 공기압 서보 시스템의 위치제어

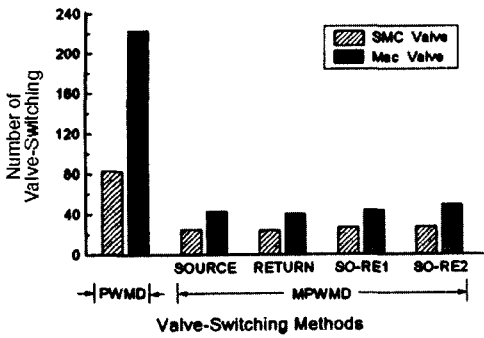
스트로크가 600mm이고 내경이 40mm인 편로드 복동 실린더로 Fig.1과 같은 공기압 위치 제어 시스템을 구성하여 실험한다. 밸브 개폐 방식은 제안한 수정된 PWMD 방법으로 위치 제어를 수행하고 또한 기존의 PWMD 방법을 적용한 실험을 하여 그 결과와 비교한다.

실험에 사용한 작동식 밸브는 Mac밸브(series 100)와 SMC밸브(model VT301)이며 측정된 Mac밸브의 effective area는 $3.8mm^2$ 밸브가 열리는 시간은 3ms, 닫히는 시간은 2.8ms로 측정 되었다. SMC밸브의 effective area는 $3.3mm^2$ 열리는 시간은 2.6ms, 닫히는 시간은 2.7ms로 측정 되었다. 공기의 공급압력은 5.8bar이다.

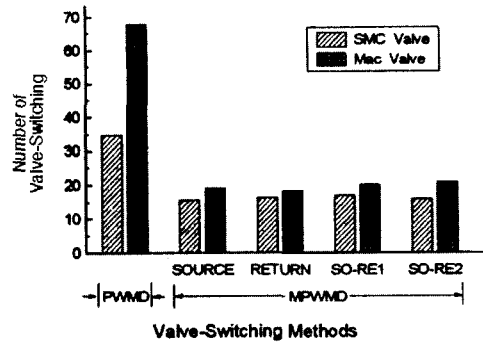
4.1 PWMD 제어와 MPWMD 제어방식의 비교

실험에서 피스톤의 초기 위치는 $x=0mm$ 이고, 목표위치가 300mm인 계단 입력(step-input)을 가했을때 시스템의 응답 특성인 정착시간과 밸브개폐횟수를 최대오차 $\pm 0.1mm$ 및 $\pm 0.2mm$ 인 두가지 경우에 대해서 각각 실험하였다. Fig.5 및 Fig.6은MPWMD방식으로 위치 제어를 수행한 실험결과이며, 이는 동일한 목표위치를 200번 반복해서 얻은 값의 평균을 취했다.

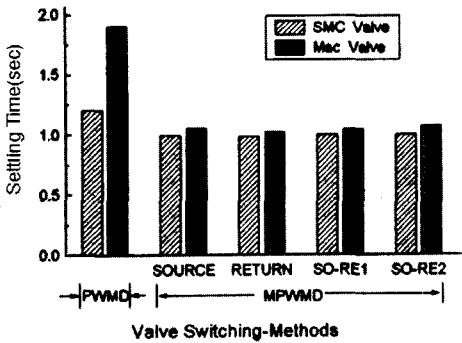
Fig.5와 Fig.6에서 보는바와 같이 주어진 위치 정밀도에서 MPWMD방식이 PWMD방식보다 밸브개폐횟수와 정착시간을 감소시킨다는 것을 알 수 있다. 최대오차가



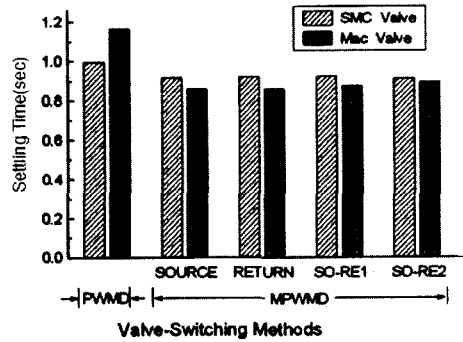
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5 Comparison of control performance between PWMD and MPWMD method (Max. position error = $\pm 0.1\text{mm}$)

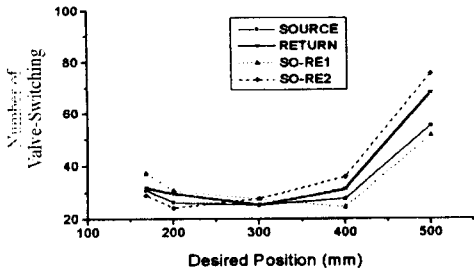
Fig. 6 Comparison of control performance between PWMD and MPWMD method (Max. position error = $\pm 0.2\text{mm}$)

작을수록 제어 성능이 현저히 향상되고, 최대오차가 커지면 두 방식간의 제어성능 차이가 줄어들는 경향이 나타낸다.

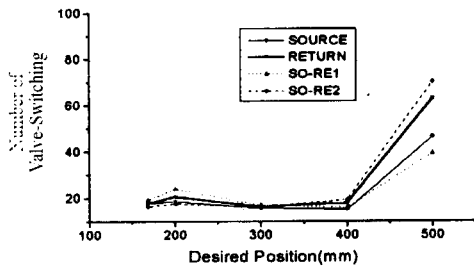
0.1mm 이내 오차범위에서는 SMC밸브가 Mac밸브보다 정착시간이 짧고 밸브개폐횟수가 적다(Fig.5). 이것은 SMC밸브의 유효단면적(effective area)이 Mac밸브보다 작기때문에 밸브를 통과하는 유량이 작아 정밀한 위치제어에 유리하다. 그러나 최대오차 $\pm 0.2\text{mm}$ 인 실험결과를 나타낸 Fig.6을 보면 MPWMD방법으로 위치제어를 한 경우에는 Mac밸브를 사용한 경우가 오히려 SMC밸브를 사용한 경우보다 정착시간이 짧다. 이는 계단 입력에 대해 유효단면적이 큰 Mac밸브를 사용한 위치제어 시스템의 상승시간(rising time)이 SMC밸브보다 짧기 때문이다. 그러나 밸브개폐횟수는 여전히 Mac밸브를 사용한 경우가 컸다는 것은 정밀한 위치제어를 하기 위한 정착단계에서 유효단면적이 큰 Mac밸브가 SMC밸브보다 시간이 많이 소요된다는 것을 의미한다.

4.2 제안한 4가지 MPWMD 제어방법의 비교

Fig.7 및 Fig.8은 4가지 MPWMD 제어방법의 비교를 하기 위해서 목표위치가 168mm, 200mm, 300mm, 400mm 및 500mm인 계단 입력을 가해 실험한 결과이다. 목표위치 300mm에서는 4가지의 MPWMD방법이 거의 동일한 제어성능을 나타냈으나, 168mm, 200mm, 400mm, 500mm의 목표위치에서는 실린더 챔버 1.2중 체적이 큰 챔버에 있는 흡기 및 배기밸브만으로 위치를 조절한 방법의 제어성능이 가장 좋았다. 즉 168mm에서는 SO-RE2방식이, 그리고 400mm와 500mm에서는 SO-RE1방식이 효율적인 밸브 개폐 방법임을 알 수 있다. 양쪽 챔버의 부피의 차가 클수록 SO-RE1 또는 SO-RE2방식의 제어성능이 다른 방식에 비해 더욱 좋아진다. 이는 실린더 챔버를 출입하는 유량이 같다고 하더라도 챔버가 크면 압력변화가 적어 정밀한 위치제어가 가능하기 때문이다.

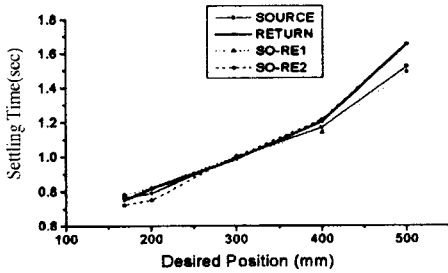


(a) Max. position error = $\pm 0.1\text{mm}$

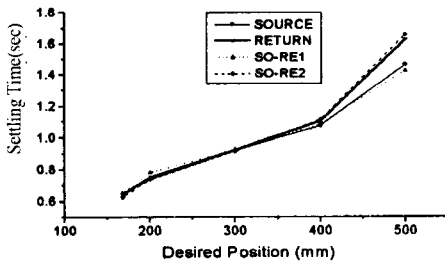


(b) Max. position error = $\pm 0.2\text{mm}$

Fig. 7 Comparison of the number of valve switching between MPWMD methods



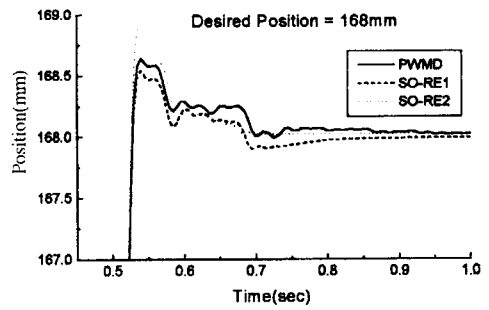
(a) Max. position error = $\pm 0.1\text{mm}$



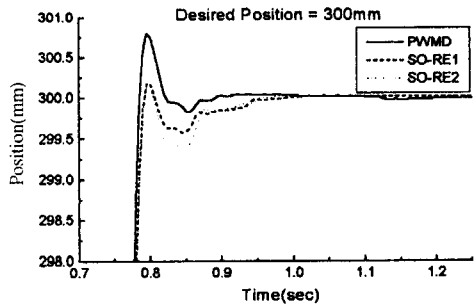
(b) Max. position error = $\pm 0.2\text{mm}$

Fig. 8 Comparison of the settling time between MPWMD methods

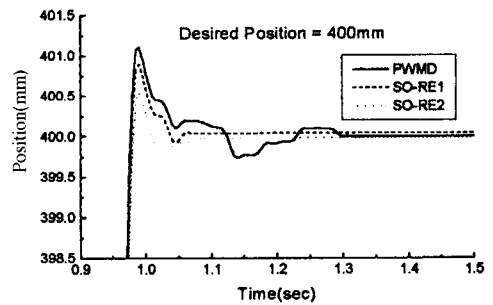
Fig.9는 목표위치 168mm, 300mm, 400mm인 계단 입력에 대해서 최대오차 $\pm 0.1\text{mm}$ 를 준 공압 서보 시스템의 위치제어 결과를 PWM 방법과 MPWMD 방식에 의한 실험결과를 비교한 것이다. 각 경우의 제어성능을 확실하게 비교하기 위해서 정착단계를 확대하여 나타낸 그림이다. 그림에서 보는바와 같이 PWM 방법은 모든 경우에서 밸브의 지속적인 개폐로 인해 정착시간이 길고 떨리는 현상을 나타낸다. Fig.9 (a)인 경우에는 수정된



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Results of position control(Max. position error = $\pm 0.1\text{mm}$)

PWMD의 SO-RE2 방식에 의한 정착시간이 가장 짧다. 이는 이미 지적한 바와 같이 (a)에서는 챔버2의 부피가 크기때문에 SO-RE2 방식이 좋고 (c)에서는 SO-RE1 방식의 제어성능이, 그리고 (b)에서는 두 챔버의 부피의 차가 적기때문에 SO-RE1과 SO-RE2방식의 제어성능이 거의 비슷하다.

5. 결 론

- 1) 개폐식 밸브를 사용한 공압 위치 제어 시스템을 구성하고 MPWMD 방법으로 밸브를 구동하여 위치 제어를 수행한 결과 기존의 PWMD방법을 적용한 것보다 밸브 개폐 횟수가 감소하고 정착시간이 짧아진다.
- 2) 제안한 MPWMD를 사용하면 정착단계에서 크기가 다른 밸브를 사용하는 효과를 낼 수 있어서 위치 제어 성능을 향상 시킬 수 있다.
- 3) MPWMD의 4가지 밸브 개폐 방식중에서 계단 입력에 따른 목표위치에 도달할 때 실린더 챔버 1,2중 체적이 큰 챔버쪽에 있는 흡기, 배기밸브만을 사용해 위치제어하는 것이 효과적인 밸브 개폐방법이다.
- 4) 본 연구에서 제안한 MPWMD 방법을 개폐식 밸브에 적용한 저가의 공기압 시스템을 구성하면 고가의 공기압 서보밸브를 사용한 위치 제어 시스템의 대안이 될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Y. Lu, "Elektropneumatischer Positionierantriebe mit schnellen Schaltventilen", dissertation, RWTH-Aachen, 1992.
2. H.S. Cho, C.W. Lee, "Performance 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.
3. 홍지중, "저가의 공압제어 시스템 구성과 그 위치 제어에 관한 연구", 한국 과학기술원 생산공학과 석사학위 논문, 1992.
4. S.H. Choi, C. Ahn and C.O. Lee, "Application of Fuzzy Logic Adaptor to the Position Control of a Pneumatic System Using On-Off Valves", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, FPST Vol.2, pp. 21-28, 1995.
5. T. Virvalo, "Pressure and Position Control with Electropneumatic On/Off-Valves", ICFP'93, Hangzhou, China, Sept., pp. 489-494, 1993.
6. W. Peirong, D. Yunbo and H. Jianhua, "The story of a Pneumatic PWM Position Control System", ICFP'93, Hangzhou, China, Sept., pp. 499-504, 1993.
7. O. Oligschlaeger, "Pneumatische Zylinderantriebe-thermodynamische Grundlagen und digitale Simulation", dissertation, RWTH-Aachen, 1990.
8. R.H. Weston, P.R. Moore, T.W. Thatcher, "Computer controlled Pneumatic Servo Drives", Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol 198B, No 14, pp. 225-231, 1984.
9. A. Klein, "Einsatz der Fuzzy-Logik zur Adaption der Positionsregelung fluidtechnischer Zylinderantriebe", dissertation, RWTH-Aachen, 1993.