

공압시스템의 설계 파라미터 최적화 Optimization of Design Parameters of a Pneumatic System

엄 태 준
T. J. Um

Key Words : Pneumatic System(공압 시스템), Design Parameter(설계 파라미터), Optimization(최적화), Fuzzy Control(퍼지 제어), PD Control(비례·미분제어)

Abstract: This paper presents optimization of a pneumatic control system whose design parameters have been optimized so that the desired dynamic characteristics of cylinder position was obtained. The pneumatic system is used as transferring and stacking equipment for solid freeform fabrication system which has been widely used in design verification applications. The pneumatic system mainly consists of pneumatic control valves and cylinders. The system was modeled by using several principles for pneumatic components. The system was optimized to obtain dynamic performance with enough damping to reduce cylinder vibration. A fuzzy controller has been applied to fulfill the dynamic performance requirements of the pneumatic system. The simulation results show that the fuzzy controller is more effective than a PD controller.

기호 설명

- | | |
|---|--|
| <p>A : 밸브 오리피스 면적(m^2)</p> <p>A_p : 피스톤 면적(m^2)</p> <p>B : 실린더의 점성감쇠계수($N \cdot s/m$)</p> <p>C : 공기내에서의 음속(m/s)</p> <p>d : 밸브 스톱 직경(m)</p> <p>M : 실린더 부하의 질량(kg)</p> <p>\dot{m} : 공기의 질량유량(kg/s)</p> <p>P_s : 공기의 공급압력(N/m^2)</p> <p>P_a : 실린더 좌측의 압력(N/m^2)</p> <p>P_b : 실린더 우측의 압력(N/m^2)</p> <p>P_0 : 대기압력(N/m^2)</p> <p>R : 이상기체상수($J/mol \cdot K$)</p> <p>s : 라플라스 연산자</p> <p>T : 공기온도(K)</p> <p>x : 밸브스톱의 변위(m)</p> <p>y : 실린더 피스톤의 변위(m)</p> <p>z : 퍼지변수(m)</p> | <p>V_0 : 압축되는 부피(m^3)</p> <p>γ : 공기의 비열비</p> <p>ω : 밸브의 고유진동수(rad/s)</p> <p>Subscripts</p> <p>s : supply</p> |
|---|--|

1. 서 론

모델제작에 사용되는 임의형상가공시스템의 이송적층을 위해서 공압시스템이 사용되는데, 두 개의 실린더가 이송 및 적층을 담당한다.¹⁾

이 시스템의 전체적인 작업순서는 레이저에 의한 소재 절단, 절단면 이송, 절단면 적층 및 가압 적층의 순으로 형상을 완성한다. 이러한 시스템에서 공압장치가 차지하는 비중은 아주 커서 작업효율 및 정밀도에 큰 영향을 미친다. 절단된 슬라이스를 흡착관이 흡착하여 실린더로 이송한다. 이때, 실린더의 변위가 원하는 위치에 정확하게 가도록 하는 것이 요구된다. 이송·적층장치의 작업모습이 Fig. 1에 보이고 있다.

접수일 : 2006년 11월 5일
 엄태준(책임저자) : 순천향대학교 기계공학과
 E-mail : tjoonum@sch.ac.kr, Tel : 041-530-1368

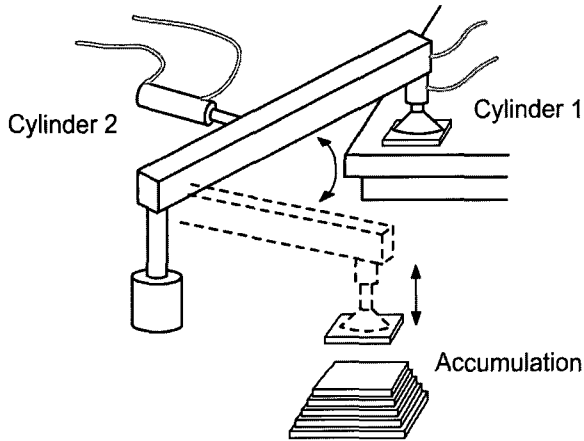


Fig. 1 Transferring and stacking system

위의 그림에서 볼 수 있듯이 공압시스템은 2개의 실린더가 사용되는데, 슬라이스를 상하로 이동하는 실린더1(적층실린더)과 암을 회전하는데 쓰이는 실린더2(이송실린더)로 구성되어 있다.

이송실린더위치의 동특성은 크게 응답속도와 감쇠비를 들 수 있는데, 이 중에서 감쇠비가 작은 경우, 슬라이스가 흡착판으로부터 분리되는 등 작업성에 문제가 생길 수가 있다. 이러한 문제를 줄일 수 있도록 제어기를 설치하고, 파라미터를 최적화하여 원하는 동특성을 내는 것이 필요하다.

2. 모델링

2.1 공압요소 모델링

이송·적층장치에 사용된 공압시스템의 회로도가 Fig. 2이다. 컴프레서에서 공급된 압축공기를 밸브를 통하여 제어하여 실린더로 보낸다.

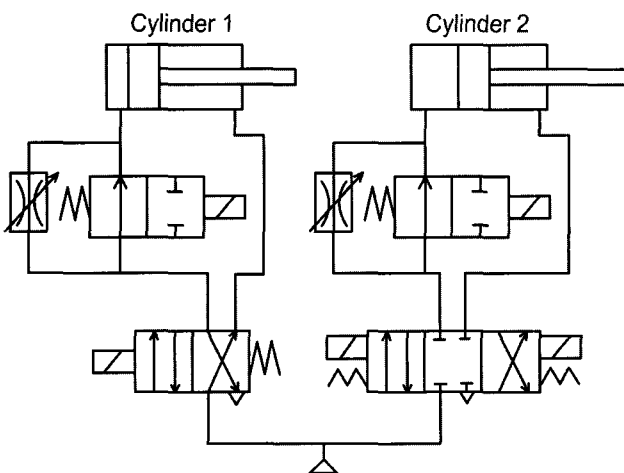


Fig. 2 Pneumatic Circuit diagram for the transferring and accumulating system

적층실린더(실린더1)는 상하로 움직이는 실린더로서 중간에 멈추는 동작이 필요없으나, 우측의 이송실린더(실린더2)는 원하는 위치(실제는 이송장치의 각도)에 가도록 하기 위해 중간에 멈추는 동작이 필요하다. 실린더의 속도를 제어하는 것이 목표는 아니기 때문에 유량제어밸브를 설치하여 속도 제어를 용이하게 하였다.

이 중에서 최적화할 필요가 있는 부분은 4포트-3위치밸브에 의해 작동되는 이송실린더이다. 중립위치에 의해 실린더가 멈추었을 때, 감쇠가 낮아 흔들거리는 원인이 될 수 있기 때문이다.

이송실린더와 제어밸브를 모델링하기 위해서 아래와 같이 간략하게 재구성하였다.

공압시스템의 모델링은 밸브 및 실린더에 대한 지배방정식을 기본으로 한다. 스톱밸브자체의 동역학은 다른 요소에 비해 응답속도가 현저히 빠르므로 다음과 같이 2차의 전달함수로 가정한다.

$$\frac{x}{i} = \frac{K_i}{\frac{s^2}{\omega^2} + \frac{2\delta}{\omega}s + 1} \quad (1)$$

실린더 좌우 각 공간에서의 압력변화에 대한 식으로서 연속의 정리를 이용하여 유도되는 식들이다. 즉, 실린더 좌측공간의 압력 p_a 의 시간에 따른 변화는 밸브에서 유입되는 질량유량에 \dot{m}_a 의 한 압력상승 과 실린더속도 \dot{y} 에 의해서 증가하는 공간에 의한 압력감소를 반영한 식이다. 그리고, 실린더 우측공간의 압력 p_b 의 시간에 따른 변화는 실린더속도 \dot{y} 에 의해서 감소하는 공간에 의한 압력

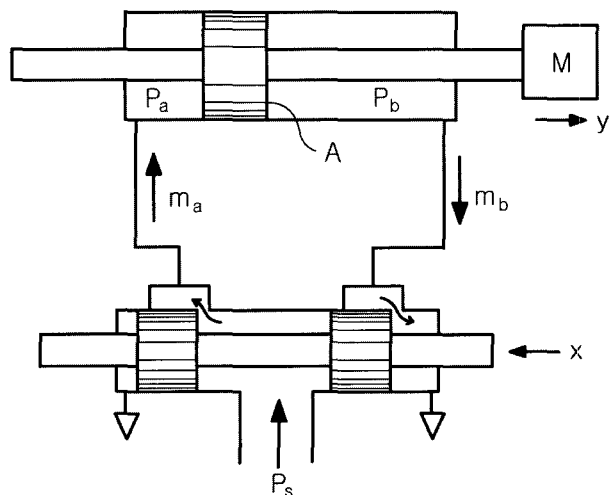


Fig. 3 Transferring cylinder and control valve

상승과 밸브로 배출되어 빠져나가는 질량유량 \dot{m}_b 에 의한 압력감소를 반영한 식이다.

$$\dot{P}_a = \left(\frac{\gamma RT}{V_0 + A y} \right) \dot{m}_a - \left(\frac{\gamma A}{V_0 + A y} \right) P_a \dot{y} \quad (2)$$

$$\dot{P}_b = - \left(\frac{\gamma RT}{V_0 - A y} \right) \dot{m}_b + \left(\frac{\gamma A}{V_0 - A y} \right) P_b \dot{y} \quad (3)$$

여기서 압축되는 부피는 실린더변위에 따라 변하는데, 실린더 전진시 실린더의 좌측공간은 커지고 우측공간은 줄어들게 된다.

그리고 실린더로 유입되는 질량유량방정식은 다음과 같다.²⁾

$$\dot{m}_a = C_d A \sqrt{\frac{P_s}{RT}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_a}{P_s} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_s} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (4)$$

$$\dot{m}_b = C_d A \sqrt{\frac{P_b}{RT}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_0}{P_b} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_0}{P_b} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (5)$$

위에서 오리피스 면적 A 는 다음 식에 의해 정의된다.

$$A = \pi dx \quad (6)$$

다음으로 실린더 피스톤의 운동방정식은 운동법칙에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{y} = - \frac{B}{M} \dot{y} + \frac{A_b}{M} (P_a - P_b) \quad (7)$$

여기서 쿨롬 마찰력은 따로 포함하지 않는 것으로 가정하였다.

2.2 밸브 및 관로 동역학 검토

밸브 자체의 동역학(고유진동수는 30Hz이상)은 시스템전체의 동역학에 비해 빠르므로 밸브자체의 전달함수는 무시한다. 그리고 관로의 동역학에 대해서 검토할 필요가 있다.

관로에 의한 시간지연은 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$P(t) = u\left(t - \frac{l}{C}\right) P_u \quad (8)$$

여기서 P_u 는 upstream압력으로 지연시간은 관로의 길이 l 에 의해 결정되나, 본 시스템의 관로(0.5m정도)는 상대적으로 길지 않으므로 관로의

동역학은 무시할 수 있다.

이렇게 모델링된 공압시스템의 최적화된 동특성을 얻기 위해서는 제어를 설치하는 것이 필요하다. 즉, 요구하는 변위에서 멈추도록 변위 피드백이 필요하고, 원하는 동특성이 되도록 속도 피드백을 추가하는 방법을 고려하였다. 피드백된 값에 적용된 제어기는 여러 가지 전통적인 기법을 생각할 있으나, 더 나은 방법으로 퍼지제어기를 사용하여 보다 안정된 동특성을 얻을 수 있을 것이다.

3. 퍼지제어기

원하는 동특성을 내도록 시스템을 최적화하기 위해서 일반적인 PD제어기보다는 퍼지제어기를 선택하였다. 변위 및 속도 피드백에 사용되는 게인값의 불확실성을 최소화할 경우 시스템 최적화를 쉽게 얻어 원하는 동특성을 얻을 수 있기 때문이다.

퍼지제어기는 퍼지이론을 적용한 제어기로서 전통적인 특정한 값으로 표시하기 어려운 변수들을 집합에 포함되는 정도까지 나타내는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 실린더의 변위와 속도가 함께 피드백되므로 피드백 게인값의 설정을 절대적인 특정값으로 정하는 것보다 불확실한 값에 의한 범위로 하는 것이 바람직하다.

Fig. 4에서 퍼지제어기는 일반적인 퍼지제어기의 구조를 나타내고 있다.³⁾ 전통적 수치정보(crisp data information)를 퍼지집합으로 변화시키는 퍼지화기(fuzzifier), 퍼지제어기의 핵심부로 입력·퍼지규칙베이스·출력을 연결하는 퍼지추론부(fuzzy inference engine), 제어규칙을 정하여 추론엔진에 적용하게 되는 제어규칙베이스(fuzzy rule base), 퍼지데이터를 전통적 데이터로 변환하는 비퍼지화기(defuzzifier)로 구성되어 있다.

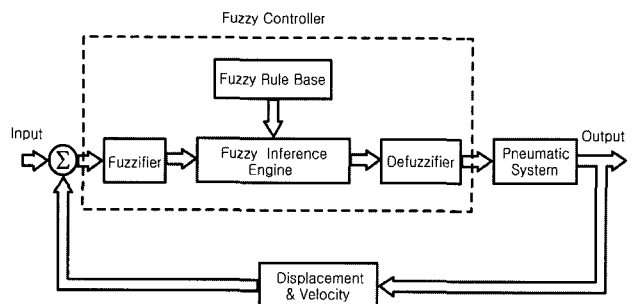


Fig. 4 Fuzzy controller implemented to the pneumatic system

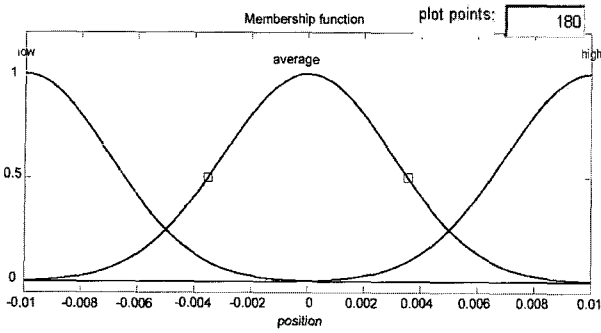


Fig. 5 Cylinder position variable

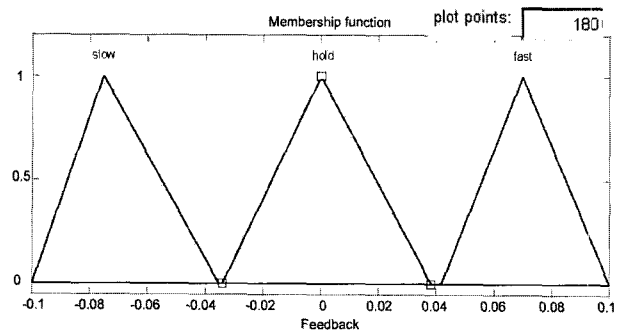


Fig. 7 Feedback membership function

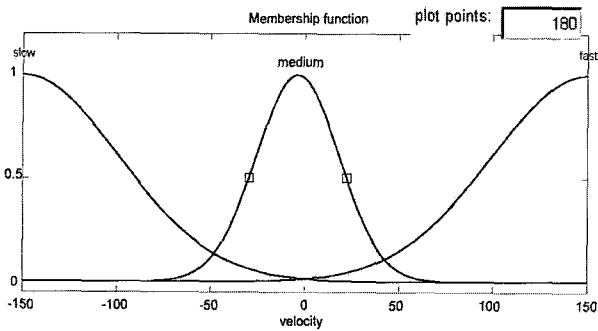


Fig. 6 Cylinder velocity variable

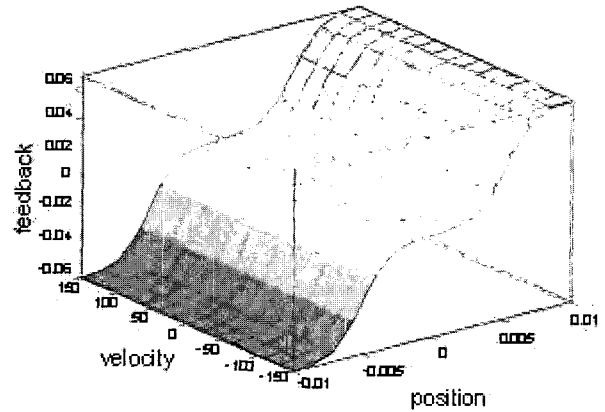


Fig. 8 Surface view for the input-output relationship

퍼지화기는 퍼지변수로 나타내는 과정인데, 본 연구에서는 연속형의 퍼지변수를 사용하는데 그 중에서 삼각형의 퍼지변수대신 범종형의 퍼지제어기를 사용하였다. Fig. 5에 나타낸 그래프는 실린더 변위에 대한 퍼지변수이고, Fig. 6은 실린더 속도에 대한 퍼지변수이다.

이와 같은 범종형의 퍼지변수는 멤버십 함수가 일반적으로 다음 식으로 표시된다.

$$A(y) = e^{-\frac{1}{\alpha^2}(y-\beta)^2} \quad (9)$$

범종형 멤버십 함수로 정하여 넓은 범위에 대해서 반영되도록 한 것이다.

Fig. 5에서 실린더변위는 단위가 m이기 때문에 변수의 값이 작게 표시되고 있다.

그리고, 피이드백 게인값에 대한 퍼지변수는 일반적으로 많이 쓰이는 삼각형의 변수형태로 나타내었는데, Fig. 7에 보이고 있다.

제어규칙은 입력인 실린더변위와 속도의 조건을 출력인 피이드백 게인값의 관계를 설정하였는데, 여러 단계의 조건을 그래프로 표현한 것이 Fig. 8이다. Fig. 8의 규칙을 얻기 위해서 속도 피이드백에 비해서 변위 피이드백에 대한 비중이 상대적으로 크도록 고려하였다.

퍼지추론부의 입출력 관계를 나타낸 것이 Fig. 9이다.

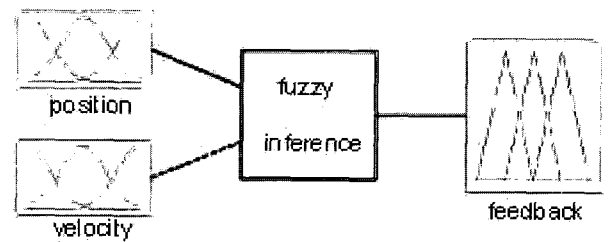


Fig. 9 Fuzzy inference engine

비퍼지화기는 퍼지추론부의 출력으로부터 전통적 수치로 변환하는데 아래와 같은 평균중심법을 사용하여 데이터를 처리하게 된다.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} (z_i \cdot w_i)}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (10)$$

지금까지 기술한 퍼지제어기를 2장에서 설명한 모델링식들과 연결하여 실린더의 응답특성을 예측하게 된다.

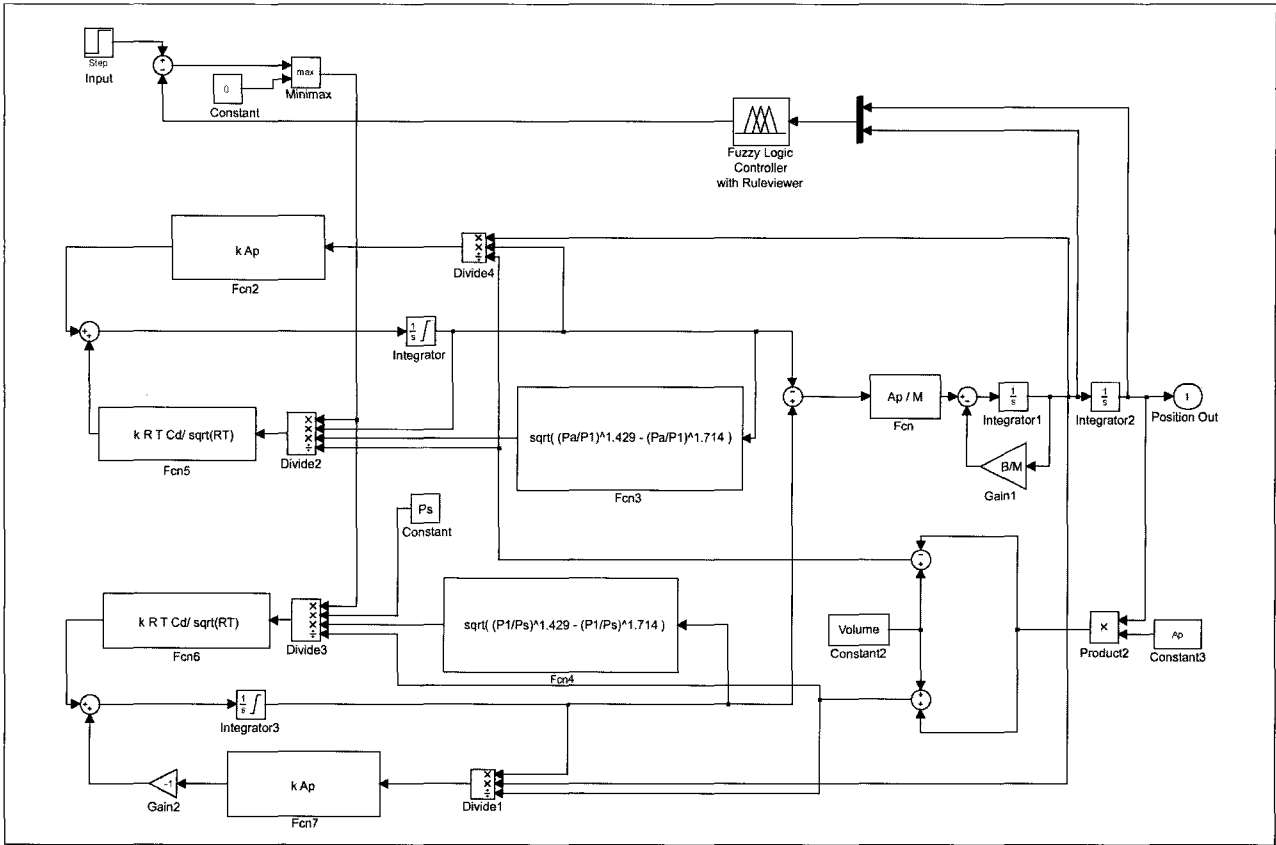


Fig. 10 Simulink Diagram including the fuzzy controller

4. 시뮬레이션 및 최적화

MATLAB Simulink를 사용하여 시스템의 시간 응답특성을 시뮬레이션하였다. Fig. 10은 Simulink 다이어그램을 보여주고 있다. 앞서 기술한 퍼지제어기를 사용하여 실린더 변위의 시간응답특성을 시뮬레이션하기 위한 다이어그램이다.

입력신호는 계단입력으로 주고, 변위와 속도가 각각 퍼지제어기로 피드백되도록 구성하였다.

최적화된 퍼지제어기를 찾기 위해 여러 번의 시뮬레이션을 거쳐 Fig. 11의 시간응답특성을 얻었다. 일점쇄선은 PD제어에 의한 시간응답이고, 실선은 퍼지제어기에 의한 시간응답이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 퍼지제어기에 의한 응답은 PD제어

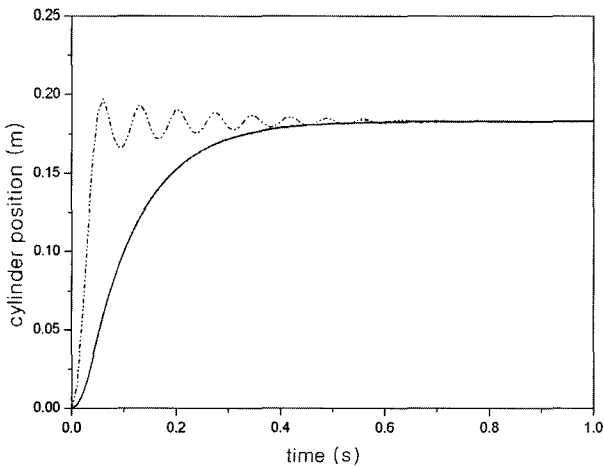


Fig. 11 Time response of the cylinder position

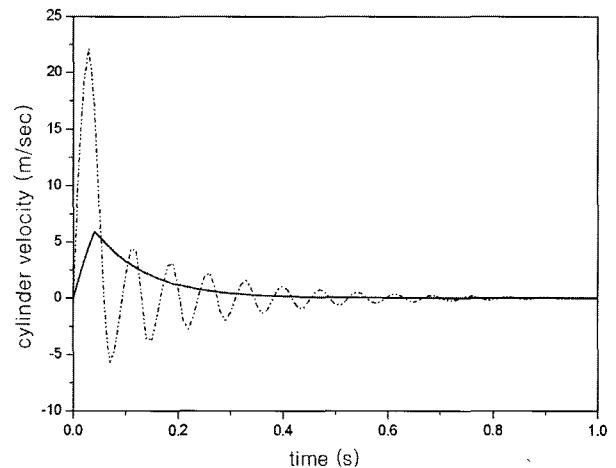


Fig. 12 Time response of the cylinder velocity

에 의한 결과보다 감쇠가 커 안정적인 동특성을 보여주고 있다.

Fig. 12는 실린더 속도에 대한 시간응답 결과를 보여주고 있다. 일점쇄선은 PD제어에 의한 시간응답이고, 실선은 퍼지제어기에 의한 시간응답이다. 역시 그래프에서 볼 수 있듯이 퍼지제어기에 의한 응답은 PD제어에 의한 결과에 비해 오버슈트가 적은 동특성을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 이송·적층장치에 사용되는 공압시스템의 동특성을 최적화하기 위해서 퍼지제어기를 사용하였고, MATLAB Simulink를 사용하여 시뮬레이션하여 퍼지제어기의 규칙베이스를 최적으로 정하였다. 시뮬레이션으로 퍼지제어기를 사용하여 동특성을 최적화한 결과, PD제어기를 사용한 경우보다 원하는 동특성에 가까운 시간응답을 얻었음을 입증하였다.

후 기

이 논문은 2004년도 순천향대학교 교수 연구년제에 의하여 연구하였음.

참 고 문 헌

- 1) T. Um, Y. Joo, Y. Kong, I. Cheon, S. Kim, and J. Bang, "Optimization of Design Parameters of a Pneumatic System for Solid Freeform Fabrication System Using Genetic Algorithm," IEEE Conference on Control Application, vol. 1, no. 2. pp. 120~123, 2003.
- 2) F. Yeaple, "Fluid Power Design Handbook," 3rd ed., Dekker, pp. 508~517, 1995.
- 3) R. Burns, "Advanced Control Engineering," B-H, pp. 326~392, 2001.
- 4) 권옥현, "고전 및 현대제어설계(도립진자를 활용한)," 청문각, pp. 409~414, 2004.
- 5) R. Bethke and D. Rediess, "Modeling and Analysis of a Pneumatic System," ISA paper, pp. 2397~2402, 1990.
- 6) M. Parnichkun and C. Ngaecharoenkul, "Hybrid of Fuzzy-PID in Kinematics Control of a Pneumatic System," 26th Annual Conference of the IEEE, vol. 2, pp. 1485~1490, 2000.
- 7) M. Shih and M. Ma, "Position Control of a Pneumatic Cylinder Using Fuzzy PWM control Method," Mechatronics, vol. 8, pp. 241~253, 1998.