

# 전달 관로의 전달특성을 고려한 공기압 실린더 구동장치의 모델링에 관한 연구

## A Study on the Modeling of a Position Control System with a Pneumatic Cylinder Considering Transfer Characteristics of a Transmission Line

강보식 · 장지성

B. S. Kang and J. S. Jang

**Key Words** : Dynamic Characteristics(동특성), Pneumatic Cylinder(공기압 실린더), Position Control Characteristics(위치제어 특성), Transmission Line(전달관로)

**Abstract**: In this study, a position control characteristics of pneumatic cylinder with transmission line is analyzed. Dynamic characteristics of transmission line using compressible fluid is changed by the flowing states of the fluid, the diameter and the length of the line. But, the effect of the change of dynamic characteristics of transmission line by the flowing states on the position control characteristics can be neglected because of the friction force of the pneumatic cylinder. So, We assume that the position control characteristics is affected by the diameter and length of the transmission line. The experimental results according to the change of parameter of the transmission line show that the relation between the parameter of the transmission line and the position control characteristics of pneumatic cylinder driving system with the transmission line.

### 1. 서 론

일반적인 공기압 위치제어 장치는 공기의 유량을 조절하는 제어밸브, 압축 공기를 전달하는 접속관 및 압축 공기로 구동되는 실린더로 구성되고, 저렴한 가격으로 자동화 시스템을 구축할 수 있으므로 산업계에서 폭넓게 사용되어 지고 있다. 그러나, 공기의 압축성에 기인하는 다양한 비선형 특성 때문에 다른 구동 방식과 비교하여 양호한 제어 성능을 얻기가 곤란한 단점이 있다. 그 중에서도 접속관은 압축 공기를 실린더로 공급하기 위한 필수 요소로써 경우에 따라서는 다양한 길이의 접속관을 사용해야 할 필요가 있다. 접속관의 길이가 짧은 경우에는 접속관을 단순한 용적으로 가정하여 위치제어 장치의 입력을 유량, 출력을 실린더의 위치로 정의하면 제어계의 전달함수는 3차계로 표현되므로 제어를 용이하게 설계할 수 있다. 그러나, 접속관의 길이가 길어지면 접속관의 전달 특성 변화에 의하여 제어계의 모델이 변화할 수 있다.

유체구동시스템의 접속관 특성에 관한 연구로는 많은 결과가 보고되고 있다<sup>1)</sup>. 그 중에서 공기압 접속관의 주파수 전달특성은 공기의 유동상태를 비압축성으로 가정하고 특성 임피던스법을 이용하여 무한개의 공진 주파수를 가지는 계로 표현되고 있다<sup>2)</sup>. 이러한 접속관의 공진특성을 보상하는 제어계를 설계하는 경우, 접속관의 공진주파수 중에서 실용적으로 가장 중요한 모드는 1차공진 주파수이므로 접속관의 모델은 1개의 공진모드를 가지는 2차계로 근사할 수 있다<sup>3)</sup>.

본 논문에서는 접속관의 전달 특성이 위치제어계의 응답 특성에 미치는 영향을 분석하고, 분석 결과를 토대로 접속관의 전달 특성을 고려한 위치제어계의 모델을 구하기 위하여 접속관의 길이와 직경을 변화시켜 가면서 위치제어 실험을 수행하였다. 본 논문에서 제안하는 모델은 접속관의 동특성을 1개의 공진 모드를 가지는 2차계<sup>4)</sup>로 가정하고 접속관의 용량과 시간 지연 요소를 추가한 형태이며, 제안한 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 기존 모델을 이용한 시뮬레이션 결과 및 실험 결과와의 비교 분석에 의하여 제안하는 모델의 타당성을 검증하였다.

접수일 : 2004년 3월 1일

장지성(책임저자) : 부경대학교 기계공학부

E-mail : jangjs@pknu.ac.kr, Tel : 051-620-1583

강보식 : 한국기계연구원 유공압연구그룹

### 2. 실험 장치의 구성

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 위치제어 장치의 구성을 나타낸다. 공기압 실린더는 내경 25 φ, 행정길이 500 mm인 로드레스(rodless) 실린더(MY H25-500H, SMC(社))를 이용하였다. 피스톤의 위치는 선형 포텐셔미터(TLH500, 분해능 0.01 mm, Novotechnik(社))를 실린더 내부의 피스톤과 연결된 실린더 상부 슬라이딩 테이블에 직접 연결하여 검출하였다. 센서에서 검출된 신호는 A/D변환기(PCL-818L, 분해능 12 bit, Advantech(社))를 이용하여 PC로 입력하였다. 제어밸브(MPYE-5-1/4- 010B, FESTO(社))는 최대 유효 단면적이 18.2 mm<sup>2</sup>인 4방향 비례제어밸브를 이용하였고, 제어밸브로의 입력신호는 D/A변환기(PCL-818L, 분해능 12 bit, Advantech(社))를 통하여 PC로부터 출력하였다.

### 3. 위치제어계의 모델링 및 제어기 설계

공기압 실린더를 이용한 구동회로의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 실린더의 평형상태를  $x = x_0$ ,  $G_1 = -G_2 = G$ ,  $G = k_q \cdot u$ ,  $T_1 = T_2 = T_s = T_a$ 로 두고, 실린더 내부의 온도변화를 단열변화, 접속관 내부의 압력 손실을 정상 층류 손실로 가정하면 밸브로의 제어입력에서 피스톤 위치까지의 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{x(s)}{u(s)} = H_{TL}(s) \cdot H_{CYL}(s),$$

$$H_{TL}(s) = \frac{k_n w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2},$$

$$H_{CYL}(s) = \frac{k_{n1} w_{n1}^2}{s(s^2 + 2\zeta_1 w_{n1} s + w_{n1}^2)},$$

$$w_n^2 = \frac{\pi^2 \kappa R T_a}{4L^2}, 2\zeta w_n = \frac{32\nu}{d^2},$$

$$k_{n1} = \frac{k_q R T_a}{A P_0}, w_{n1}^2 = \frac{2\kappa P_0 A^2}{V_0}, 2\zeta_1 w_{n1} = \frac{b}{M} \quad (1)$$

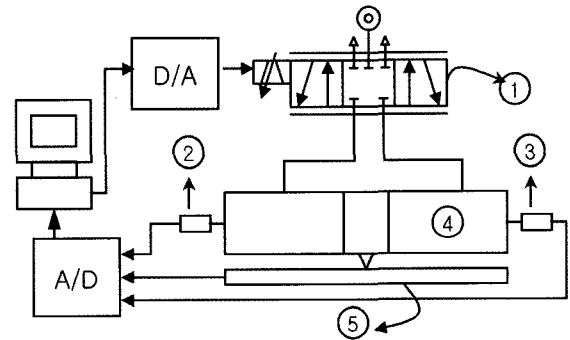
Fig. 1과 식(1)에서 사용된 기호는 다음과 같다.

$A$  : 실린더 직경[m],  $b$  : 점성마찰계수[N/(m/s)],  $d$  : 접속관 내경[m],  $G$  : 제어 밸브를 경유하는 공기

의 질량 유량[kg/s],  $H_{TL}(s)$  : 접속관 전달함수,  $H_{CYL}(s)$  : 접속관을 제외한 위치제어계 전달함수,  $k_q$  : 제어밸브의 제어입력·유량 이득[kg/(s·V)],  $L$  : 접속관 길이[m],  $M$  : 부하 질량[kg],  $P$  : 압력[Pa],  $P_s$  : 공급 압력[Pa],  $P_a$  : 대기 압력[Pa],  $P_0$  : 평형 압력[Pa],  $R$  : 기체 상수[J/(kg·K)],  $S_e$  : 제어밸브 유효 단면적[mm<sup>2</sup>],  $T$  : 온도[K],  $T_s$  : 공급 공기 온도[K],  $T_a$  : 대기 온도[K],  $u$  : 제어입력[V],  $V_0(=A \cdot x_0 + V_d)$  : 평형 체적[m<sup>3</sup>],  $V_d$  : 접속관 체적[m<sup>3</sup>],  $x$  : 피스톤 위치[m],  $x_0$  : 피스톤 평형 위치[m],  $\kappa$  : 비열비,  $\nu$  : 공기 동점성 계수[m<sup>2</sup>/s]

실험 장치의 물리 파라미터를 Table 1에 나타낸다.

실험에 이용한 제어기로는 Fig. 3과 같은 상태 피드백 제어기를 구성한다. Fig. 3에서  $K_p$ [V/m]는 비례 이득을 나타내고,  $K_v$ [V/(m/s)]와  $K_a$ [V/(m/s<sup>2</sup>)]는 각각 속도 이득 및 가속도 이득을 나타낸다. Fig. 3과 같은 형태의 제어기는 비례 이득을 적절하게 결



- ① Control valve
- ②③ Semi-conductive pressure sensor
- ④ Rodless cylinder ⑤ Potentiometer

Fig. 1 Schematic diagram of position control system

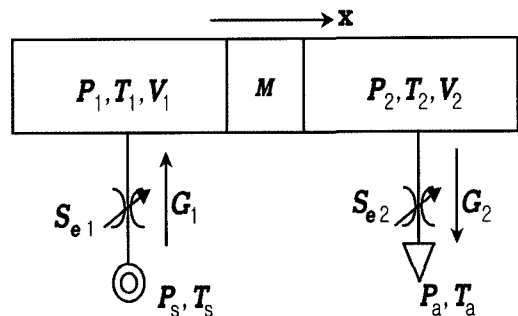


Fig. 2 Schematic diagram of a pneumatic cylinder driving system

Table 1 Physical parameters of the control system

$A$	$4.90625 \times 10^{-4}$	$P_0$	420,000
$b$	50.3	$R$	287
$d$	0.0065, 0.004	$S_e$	max. 18.2
$k_q$	$5.06 \times 10^{-3}$	$T_a$	293
$L$	0.5, 1.0, 2.0	$x_0$	0.25
$M$	0.5	$\kappa$	1.4
$P_s$	591,600	$v$	$1.55 \times 10^{-5}$

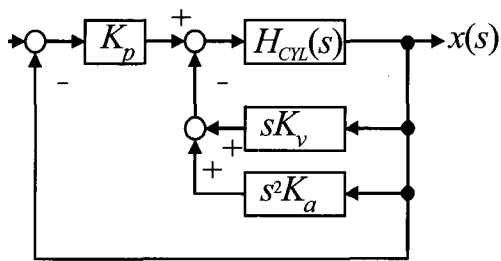


Fig. 3 A state feedback position controller used in the experiment

Table 2 Controller parameters used in the experiment

$d$	$L$	$K_p$	$K_v$	$K_a$	Closed loop t.f.s
0.0065	0.5	25	1.07	0.0098	①
		30	1.27	0.0118	②
	1	26.6	1.16	0.0104	①
		31.9	1.38	0.0126	②
	2	29.7	1.36	0.0117	①
		35.6	1.6	0.0141	②
0.004	0.5	30	1.25	0.0118	③
		35	1.43	0.0136	④
	1	30.7	1.29	0.0121	③
		35.9	1.48	0.0139	④
	2	32.2	1.38	0.0127	③
		37.6	1.58	0.0146	④

note : Closed loop t.f.s are ideal closed loop transfer functions neglecting the dynamics of the transmission lines.

$$\textcircled{1} \frac{112124}{s^3 + 96s^2 + 6976s + 112124}, \quad \textcircled{2} \frac{134548}{s^3 + 102s^2 + 7877s + 134548}$$

$$\textcircled{3} \frac{139996}{s^3 + 104s^2 + 8088s + 139996}, \quad \textcircled{4} \frac{163329}{s^3 + 109s^2 + 8964s + 163329}$$

정한 후, 식(2)에 의하여 속도 이득과 가속도 이득을 결정하면 위치제어계의 이득여유를 16[dB], 위상여유를 70[deg]로 설정할 수 있다.<sup>5)</sup>

$$K_v = \left( 3^3 \sqrt{(k_{n1} w_{n1}^2 K_p)^2 - w_{n1}^2} \right) / (k_{n1} w_{n1}^2),$$

$$K_a = \left( 2^3 \sqrt{k_{n1} w_{n1}^2 K_p - 2\zeta_1 w_{n1}} \right) / (k_{n1} w_{n1}^2) \quad (2)$$

접속관이 변화할 때의 제어기 이득은 접속관 길이 0.5[m]를 기준으로 비례 이득을 설정하고, 식(2)에 의하여 속도 및 가속도 이득을 결정 한 후, 접속관의 길이가 변화하여도 위치 제어계의 폐루프 전달함수가 동일한 형태가 되도록 설정하였다. Table 2는 실험에 사용한 제어기의 이득과 각 제어기 이득에 대한 제어계의 폐루프 전달함수를 나타낸다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4~5는 Table 2의 모델 ①과 ②를 가정한 실험 결과이다. Fig. 4~5에서 실선은 접속관의 길이가 0.5[m]인 경우, 점선 및 일점 쇄선은 각각 접속관의 길이가 1[m], 2[m]인 경우의 실험 결과이고, 횡축은 시간, 종축은 무차원화한 위치 응답을 나타낸다. 실험 결과로부터 접속관의 길이가 길어지면 응답 지연이 조금씩 길어지고, 또한 위치 응답의 진동이 커지고 있음을 알 수 있다. 위치 응답에 정상 편차가 존재하는 것은 Table 2에서 설계한 제어기가 제어계의 마찰 특성을 고려하지 않고 설계되었기 때문이며, 본문에서는 이러한 정상 편차에 대한 분석은 제외한다. 그러므로, 본 논문의 연구 범위는 접속관의 파라미터 변화에 의한 위치제어계의 동특성 변화를 추정할 수 있도록 하기 위하여 접속관을 포함한 위치제어계의 동적인 모델을 제시하는 것으로 한정한다.

Fig. 6은 Table 2의 모델 ③을 가정한 실험 결과이다. Fig. 10에서 실선은 접속관의 길이가 0.5 [m]인 경우, 점선 및 일점 쇄선은 각각 접속관의 길이가 1[m], 2[m]인 경우의 실험 결과이고, 횡축은 시간, 종축은 무차원화한 위치 응답을 나타낸다. 실험 결과로부터 접속관의 길이가 길어지면 응답 지연이 조금씩 길어지지만, Fig. 4 및 5에서와 같이 접속관이 길어짐에 따른 위치 응답의 진동은 나타나고 있지 않다. 이러한 현상은 접속관이 좁아지면 접속관 내부 공기의 유속 증가 및 밀도 증가에 의하여 관 마찰이 증가하므로 접속관의 이득이 감소하고, 감쇠비가 증가하는 것을 원인으로 생각할 수 있다.

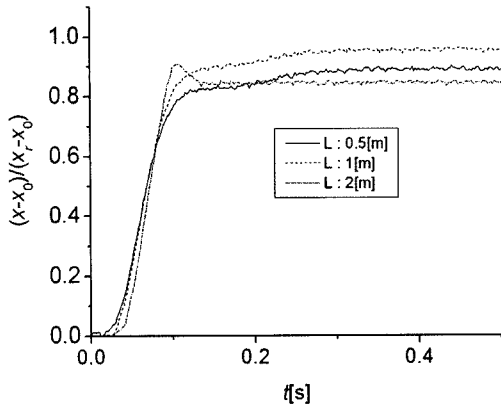


Fig. 4 Position control results with model ① in Table 2

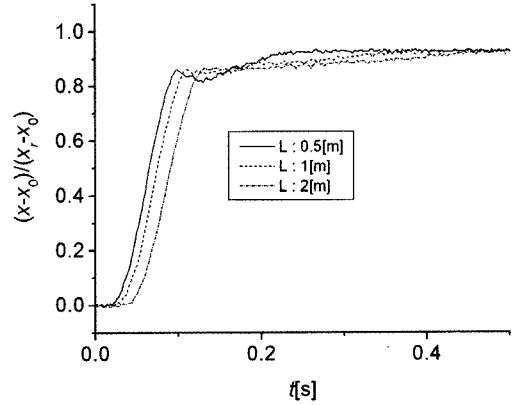


Fig. 7 Position control results with model ④ in Table 2

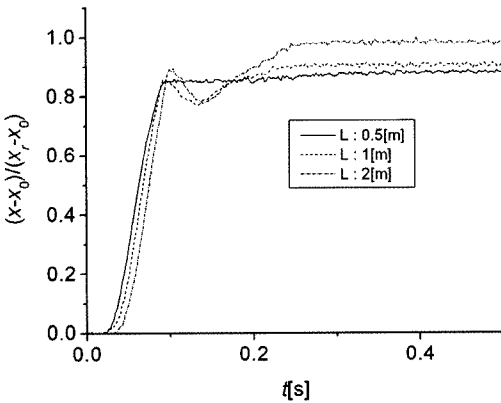


Fig. 5 Position control results with model ② in Table 2

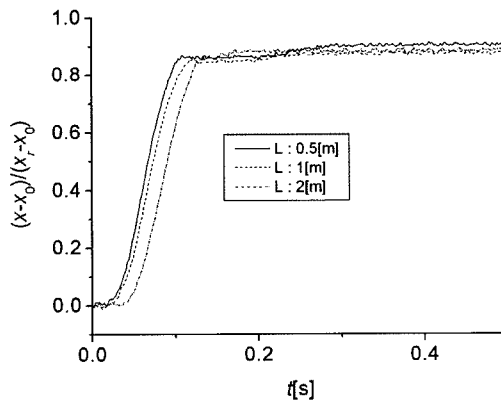


Fig. 6 Position control results with model ③ in Table 2

Fig. 7은 Table 2의 모델 ④를 가정한 실험 결과이다. Fig. 7에서 실선은 접속관의 길이가 0.5 [m]인 경우, 점선 및 일점 쇄선은 각각 접속관의 길이가 1[m], 2[m]인 경우의 실험 결과이다. 실험 결과로부터 Fig. 6과 동일한 경향의 결과가 얻어졌음을 확인할 수 있다.

Fig. 4~5와 Fig. 6~7의 결과를 비교하면 접속관의 내경이 6.5[mm]인 경우에는 접속관의 길이가 길어짐에 따라서 위치제어계의 응답이 불안정해지는 경향이 있고, 접속관의 내경이 4[mm]인 경우에는 접속관의 길이가 길어짐에 따라서 위치제어계의 응답이 안정해짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 (1)접속관의 내경 변화에 따른 접속관 전달 함수의 감쇠비 변화에 의한 위상 여유 변화, (2)접속관의 길이 변화에 따른 이득 변화에 의한 위상 여유 변화, (3)접속관의 길이 변화에 따른 시간 지연에 의한 위상 여유 변화의 상관관계에 의하여 일어났다고 생각되어진다. 그러므로, 접속관의 내경이 6.5[mm]인 경우에는 접속관의 길이증가에 의한 위상 여유 감소가 접속관의 길이 증가에 따른 이득 감소에 의한 위상 여유 증가분보다 크기 때문에 접속관의 길이가 길어짐에 따라서 위치제어계의 응답이 불안정해지고, 접속관의 내경이 4[mm]인 경우에는 접속관의 길이증가에 의한 위상 여유 감소가 접속관의 길이 증가에 따른 이득 감소에 의한 위상 여유 증가분보다 작기 때문에 접속관의 길이가 길어짐에 따라서 위치제어계의 응답이 안정해진다고 생각할 수 있다.

Fig. 8~9는 같은 길이의 접속관에 대하여 접속관 내경을 변화시킨 경우의 실험 결과를 나타낸다. 실험 결과로부터 접속관의 직경이 변화하여도 동일한 길이의 접속관에 대해서는 응답 지연 시간이 일치하고, 접속관의 내경이 변화하면 감쇠 특성이 변화함을 알 수 있다.

제안하는 모델 및 기존 논문에서 사용하고 있는 모델을 Fig. 10~11에 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 모델은 식(1)에서 나타낸 모델을 변형한 형태이고, 접속관 양단의 압력차가 커지면 정상 층류 손실

로 가정한 접속관 모델의 감쇠비가 변화하므로<sup>4)</sup> 감쇠비  $\zeta$ 는 1보다 크다고 가정하였다.

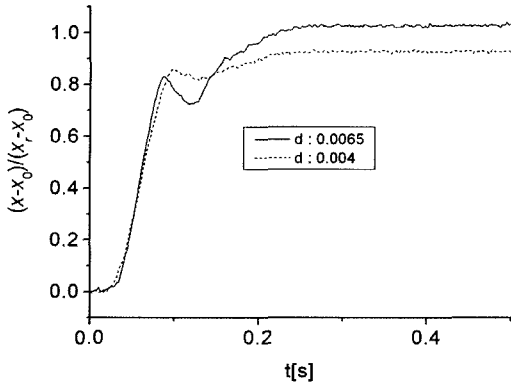


Fig. 8 Position control results with model ② and ③ in Table 2(transmission line length : 0.5[m])

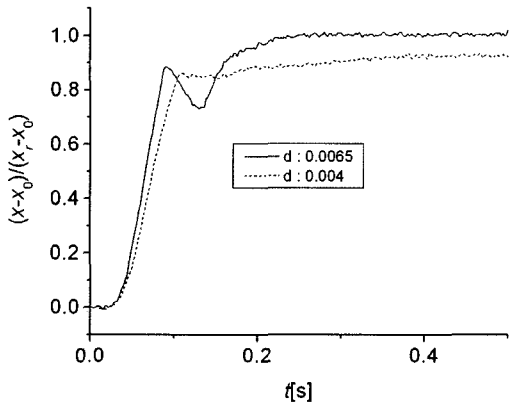


Fig. 9 Position control results with model ② and ③ in Table 2(transmission line length : 1[m])

Fig. 10에 나타낸  $T1[s]$ 은 제어 밸브의 응답 지연 시간과 부하의 관성에 의한 응답 지연시간을 나타내고,  $T2[s]$ 는 접속관의 응답 지연 시간을 나타낸다. 접속관의 응답 지연을 식(2)에 나타낸다.

$$T2 = \frac{L}{\sqrt{\kappa RT_a}} \quad (2)$$

Fig. 11은 접속관의 동특성을 지연시간으로만 기술한 모델이고,  $T3$ 는 Fig. 1에서 나타낸  $T1$ 과  $T2$ 의 합으로 표현된다.

Fig. 12는 실험과 시뮬레이션 결과를 비교한 그림을 나타낸다. Fig. 12에서 실선은 실험 결과를 나타내고, 점선과 일점 쇄선은 각각 본 논문에서 제안하는 모델과 기존 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 12 중에서 제안한 모델을 이용한 시뮬레이션 결과는  $T1$ 을 10[ms]로 추정하고, Table 1

과 식(2)를 이용하여 계산한  $T2$ 를 6[ms]로 설정한 결과이고, 피스톤이 이동을 시작하는 시간 및 피스톤의 응답 속도가 실험 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 기존 모델을 이용한 결과는  $T3$ 를 16[ms]로 설정한 결과이고, 피스톤이 이동을 시작하는 시간 및 피스톤의 응답 속도가 실험 결과와 상이함을 알 수 있다.

Fig. 13은 접속관의 길이를 변경하여 Fig. 6과 동일한 방법으로 실험 및 시뮬레이션을 수행한 결과이다. Fig. 13에서  $T1$ 은 Fig. 6과 동일하게 10[ms]로 설정하였고,  $T2$ 는 계산에 의하여 1.5 [ms]로 설정하였다.  $T3$ 는  $T1$ 과  $T2$ 의 합에 의하여

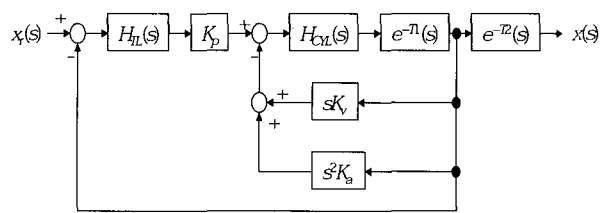


Fig. 10 Proposed model for the position control system considering dynamic characteristics of transmission line

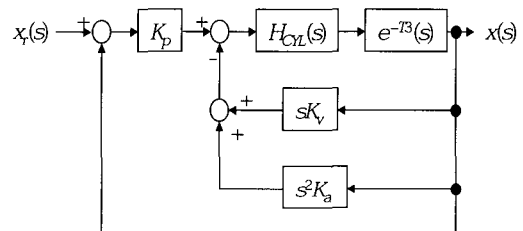


Fig. 11 Conventional model for the position control system considering effect of transmission line

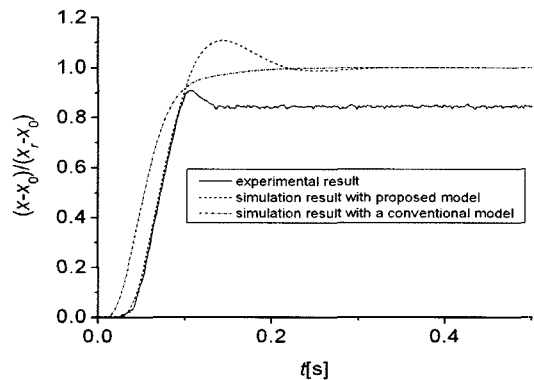


Fig. 12 Comparison of experimental result with simulation results(transmission line : 2[m], controller type : model ① in Table 2)

11.5[ms]로 설정하였다. 결과로부터 접속관의 길이가 변화하여도 제안한 모델을 이용한 결과가 실험 결과와 비교하여 피스톤이 이동을 시작하는 시간 및 피스톤의 응답 속도 모두 잘 일치함을 알 수 있다고, 기존 모델을 이용한 결과는 실험 결과와 상이한 결과가 얻어짐을 확인할 수 있다.

Fig. 14와 15는 Table 2의 모델 ②를 이용한 결과이고, Fig. 12, 13과 동일하게 제안한 모델을 이용한 결과가 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

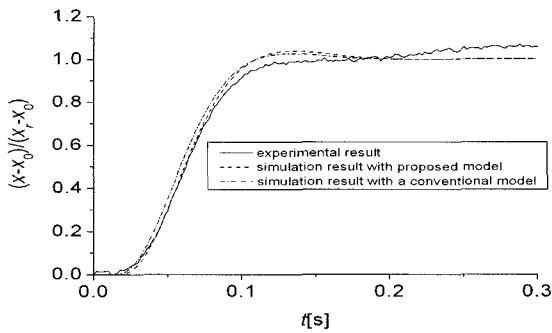


Fig. 13 Comparison of experimental result with simulation results(transmission line : 0.5 [m], controller type : model ① in Table2)

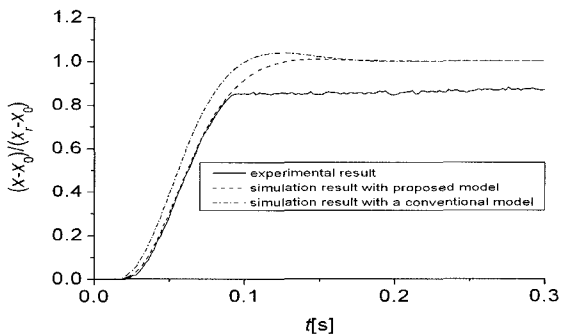


Fig. 14 Comparison of experimental result with simulation results(transmission line : 0.5 [m], controller type : model ② in Table 2)

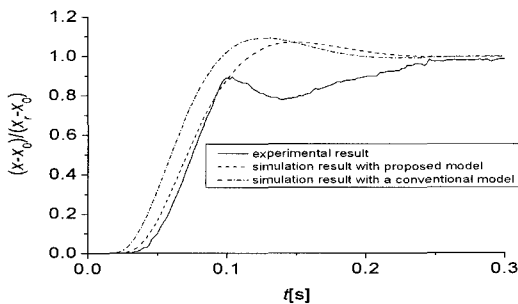


Fig. 15 Comparison of experimental result with simulation results(transmission line : 2[m], controller type : model ② in Table2)

## 5. 결 론

본 논문에서는 접속관이 공기압 위치제어계의 응답 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 내경 4[mm]와 6.5[mm], 길이 0.5[m], 1[m] 및 2[m]인 접속관으로 제어밸브와 실린더를 연결한 위치제어계를 구성하고, 위치제어 실험을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 접속관을 포함한 위치제어계의 위상 여유는 접속관 직경과 길이 변화에 의하여 변화하지만 접속관의 직경이 6.5[mm]인 경우에는 길이가 길어지면 위상 여유가 감소하고, 접속관의 직경이 4[mm]인 경우에는 길이가 길어지면 위상 여유가 증가하므로 접속관의 길이가 길어져도 위상 여유가 확실적으로 증가하거나 감소하지는 않는다.

(2) 접속관의 내경이 변화하여도 길이가 동일하면 위치제어계의 시간 지연은 변화하지 않는다.

(3) 접속관을 포함한 위치 제어계의 정확한 모델은 접속관의 압력 전파 거동에 의하여 결정되는 동특성 모델과 시간 지연모델을 고려하여 결정해야 한다.

## 참 고 문 헌

- 1) 日本油空壓學會, “油空壓便覽”, pp.17~47, 1989.
- 2) C. P. Rohmann and E .C. Grogan, “On the Dynamics of Pneumatic Transmission Lines”, Transactions of the ASME, Vol.97, pp.853~874, 1957/
- 3) 中山, “流體の力學”, 養賢堂, pp.191~192, 1983.
- 4) 장지성, 이광국, 최명수, “긴 전달관로를 갖는 공압제어계의 압력 제어”, 대한기계학회논문집 A권, 제 27권, 제 4호, pp.567~576, 2003.
- 5) H. Hanafusa, “Design of Electrohydraulic Servo Control System for Articulated Robot Arm Control”, The Japan Hydraulics & Pneumatics Society, Vol. 20, No. 7, pp.429~436, 1982.