

관로부의 동특성을 고려한 공기압 압력용기의 압력제어

A Study on the Pressure Control of a Pneumatic Pressure Vessel Considering Dynamic Characteristics of Pneumatic Transmission Line

장 지 성

J. S. Jang

Key Words : A robust controller(강인성 제어기), Compressible fluid(압축성 유체), Pneumatic transmission line(공기압 접속관), Pneumatic pressure control system(공기압 압력제어 장치)

Abstract : In this study, a robust controller to control pressure in a pneumatic pressure vessel considering dynamic characteristics of pneumatic transmission line is proposed. Dynamic characteristics of transmission line using compressible fluid is changed by the flowing states of the fluid. So, if the fixed gain controller is designed based on a fixed model, the performance of the control system could be destabilized or degraded. The controller designed in this study is composed of two parts. The one is to reject modelling error based on the disturbance observer, the other is to obtain the control performance. The control results with the designed controller show that the robustness of the control system is achieved regardless of the change of the model of the transmission line. Therefore, the designed controller can be utilized for the performance improvement of the pressure control system using compressible fluid such as air and gas

1. 서 론

공기압 압력제어 장치는 공기의 유량을 조절하는 제어밸브, 공기를 압력용기로 전달하는 접속관 및 가압 공기를 저장하는 압력용기로 구성되고, 제어밸브를 조절하여 용기내부의 압력을 제어하는 장치이다. 상기한 압력제어 장치의 제어성능을 달성하기 위하여 제어게인을 증가시키면 제어게인이 일정치 이상이 되는 경우에 용기내부의 압력응답이 불안정하게 되어 소정의 제어성능을 달성할 수 없게 되는 경우가 있다. 압력제어 장치의 입력을 유량, 출력을 압력용기 내부의 압력으로 정의하고, 제어계의 전달함수를 구성하면 압력용기는 단순한 1차지연계로 표현되므로¹⁾ 압력응답을 불안정하도록 만드는 요소는 접속관임을 알 수 있다. 그러므로, 압력용기 내부의 압력응답이 설계사양을 만족할 수 있도록 하기 위해서는 접속관의 특성을 보상할 수 있는 제어기를 설계해야 한다.

유체구동시스템의 접속관의 특성에 관한 연구는 많은 결과가 보고되고 있다.²⁾ 그 중에서 공기압 접속관의 주파수 전달특성은 공기의 유동상태를 비압축성으로 가정하고 특성 임피던스법을 이용하여 무한개의 공진 주파수를 가지는 계로 표현되고 있다.³⁾ 이러한 접속관의 공진특성을 보상하는 제어기를 설계하는 경우, 접속관의 공진주파수 중에서 실용적으로 가장 중요한 모드는 1차공진 주파수이므로 접속관의 모델은 1개의 공진모드를 가지는 2차계로 근사할 수 있다.⁴⁾

그러나, 전술한 방법으로 근사한 공기압 접속관의 모델은 공기의 유동을 비압축성으로 가정하였으므로, 공기의 유동이 압축성인 경우, 즉, 유속의 증가에 의하여 관마찰이 급격하게 증가하여 접속관의 모델이 1차지연계로 변화하는 경우⁵⁾에는 모델링 오차가 발생하게된다. 그러므로, 접속관의 모델을 1차계와 2차계 중에서 어떠한 형태로 선정하여도 공기의 유동상태의 변화에 의하여 제어성능이 변화하게 되므로 설정한 사양을 달성할 수 없

접수일 : 2001년 7월 4일

장지성 : 부경대학교 공과대학 기계공학부

는 경우가 발생한다.

본 논문에서는 접속관의 특성이 변화하여도 제어 성능이 변화하지 않는 로바스트(robust) 제어를 설계한다. 설계한 제어기는 외란보상기를 이용하여 모델링오차를 보상하고, 제어계의 감도특성 및 상보감도특성을 향상시키는 부분과 제어성능을 달성하기 위한 피드포워드 보상기로 구성되는 2자유도 제어기다. 설계한 제어기의 성능은 비선형 미분방정식을 이용한 수치 시뮬레이션에 의하여 확인하였고, 비례제어기를 이용한 1자유도 제어기와 비교하여 제어성능이 현저하게 향상되어짐을 알 수 있다.

2. 압력제어계의 모델링

2.1 서보 밸브의 특성 방정식

본 논문에서 대상으로 하는 압력제어계를 Fig. 1에 나타낸다.

Fig. 1에서 사용된 기호는 다음과 같다.

- d : 접속관 직경[m], L : 접속관 길이[m]
- G : 제어밸브를 통과하여 접속관으로 유입하는 유량[kg/s]
- P_s : 공급압력[Pa], P_a : 대기압력[Pa]
- P_1 : 접속관 입구압력[Pa]
- T_1 : 접속관 입구온도[K]
- P_2 : 압력용기 내부압력[Pa]
- T_2 : 압력용기 내부온도[K]
- V : 압력용기 체적[m³]

본 장에서는 접속관을 포함한 압력제어계의 1차 공진 모드를 이용하기 위하여 공기의 유동을 비압축성 유동상태로 가정한 3차계 모델을 도출한다. 접속관의 전달특성은 접속관 내부의 압력손실을 정상층류 손실로 가정하여 다음 식으로 기술한다.⁴⁾

$$\frac{P_2(s)}{P_1(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\omega_n^2 = \frac{\pi^2}{4L^2} (\kappa RT_a), \quad 2\zeta\omega_n = \frac{32\nu}{d^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 κ 는 비열비, R 은 기체상수[J/kgK], T_a 는 대기온도[K], ν 는 공기의 동점성 계수[m²/s]를 나타낸다.

다음으로, 공기의 상태변화를 단일변화로 가정하고 접속관의 동특성을 무시하면, 유입유량과 압력 제어계의 압력과의 관계는 다음 식으로 기술된다.

$$(V + AL) \frac{dP_1}{dt} = \kappa RT_1 G \quad (2)$$

A 는 접속관의 단면적(= $(\pi/4)d^2$)[m²]을 나타낸다. 제어밸브의 유효 단면적을 s_c [m²], 유량계인을 k_d (= $\partial G/\partial s_c$)[kg/(s · m²)], 유효단면적과 제어 밸브로의 입력과의 관계를 k_u (= $\partial s_c/\partial u$) [m²/V]로 정의하고 제어밸브로의 입력 u 와 P_1 과의 관계를 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{P_1(s)}{u(s)} = k_d k_u \frac{\kappa RT_1}{(V + AL)} \frac{1}{s} \quad (3)$$

식 (3)은 접속관의 공진특성을 무시하고 접속관을 용량요소로 가정한 경우이다.

$T_1 = T_2 = T_a$ 로 가정하면, 접속관의 공진특성을 고려한 압력제어계의 모델은 식(1)과 (3)을 이용하여 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{P_2(s)}{u(s)} = k_n \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$$

$$k_n = k_d k_u \frac{\kappa RT_a}{(V + AL)} \quad (4)$$

공기압 접속관의 동특성 해석에는 특성곡선법을 이용한 수치해석법⁶⁾이 많이 사용되지만 이러한 해석법은 접속관 입구부와 출구부의 압력차가 미소하다는 가정이 성립해야만 사용할 수 있다. 그러므로, 공기의 유동이 압축성 유동을 포함하는 경우에는 비압축성 유동과 압축성 유동영역의 시간 및 주파수 영역에서의 수치해석이 가능한 모델을 이용해야 한다. 이러한 경우에 사용할 수 있는 모델

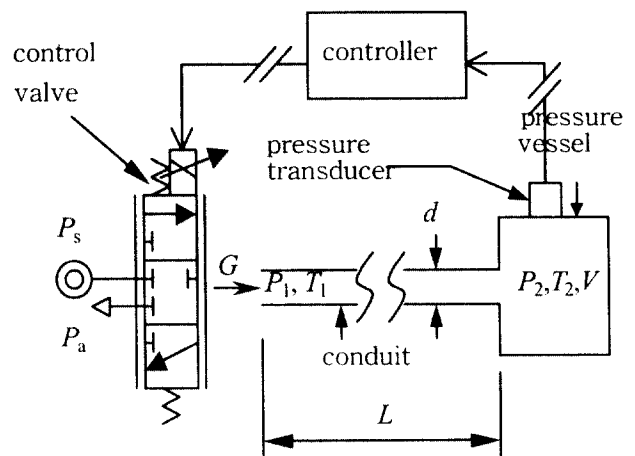


Fig. 1 Pressure control system

로는 접속관을 다수의 영역으로 분할한 후, 각 영역에서는 정상상태 모델을 이용하고, 인접한 영역 사이에는 에너지의 이동에 의한 물리적 파라미터 (압력, 온도 등)의 변화가 발생한다고 가정함으로써 접속관의 특성을 분포계로 표현할 수 있는 모델⁷⁾이 제안되어 있고, 실험결과와의 비교에 의하여 타당성이 확인되었다.

그러므로, 본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 확인하기 위한 수치해석에서는 상기의 모델을 이용하여 접속관의 비선형 모델을 표현하였다.

수치해석 및 제어기 설계에 이용한 파라미터를 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Physical parameters used in the simulation

d [m]	4×10^{-3}	T_a [K]	293
k_u [kg/(s · m ²)]	1382	V [m ³]	196×10^{-6}
k_u [m ² /V]	1×10^{-6}	κ	1.4
L [m]	5	ν [m ² /s]	1.55×10^{-5}
P_a [kPa]	101.3	접속관 분할수	10
P_s [kPa]	591.6		

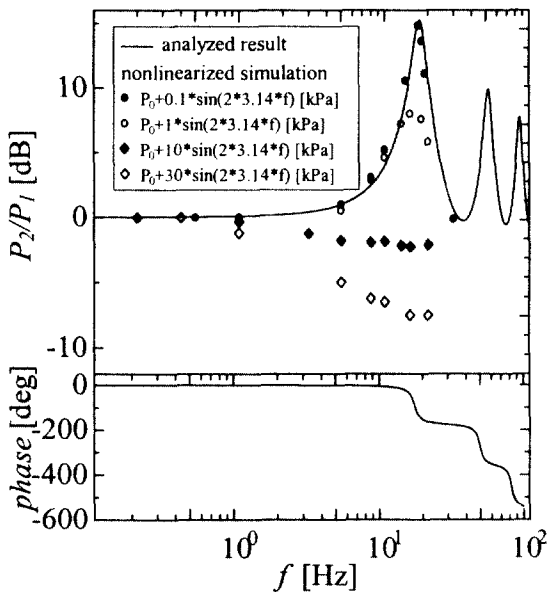


Fig. 2 Transfer characteristics of transmission line

접속관의 전달특성을 Fig. 2에 나타낸다. Fig. 2에서 실선은 브라운모델²⁾을 이용한 해석결과이다. ●로 표시된 결과는 평형압력 300 [kPa]에서 압력진폭을 0.1 [kPa], ○는 1 [kPa], ◆는 10 [kPa], ◇는 30 [kPa]로 설정하고 접속관의 비선형모델을 이용하여 수치시뮬레이션에 의하여 구해진 결과이다.

P_1 의 압력진폭이 작은 경우에는 공진주파수가 약 17[Hz] 정도이고 해석 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 압력진폭이 커짐에 따라서 공기의 유동이 비압축성에서 압축성으로 변화하므로 공기의 밀도변화 및 관마찰의 증가에 의하여 접속관 내부 공기의 유속이 감소한다. 그 결과 접속관 출구부로 전달되는 유량이 감소하여 접속관의 공진 특성이 사라지고 1차 지연계와 유사한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

3. 비례제어기를 이용한 제어성능

제어밸브의 유효단면적과 제어입력이 선형적인 관계를 유지한다고 가정하면 Table.1의 파라미터를 이용하여 구성된 압력제어계의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{P_2(s)}{u(s)} = \frac{6.19136 \times 10^9}{s(s^2 + 31s + 11500)} \quad (5)$$

식(5)를 이용하여 안정한계 게인을 계산하면 5.6×10^5 [Pa/V]가 얻어진다. Fig. 3은 평형압력을 300[kPa]로 설정하고 비례제어를 변화시켰을 때의 응답을 나타낸다.

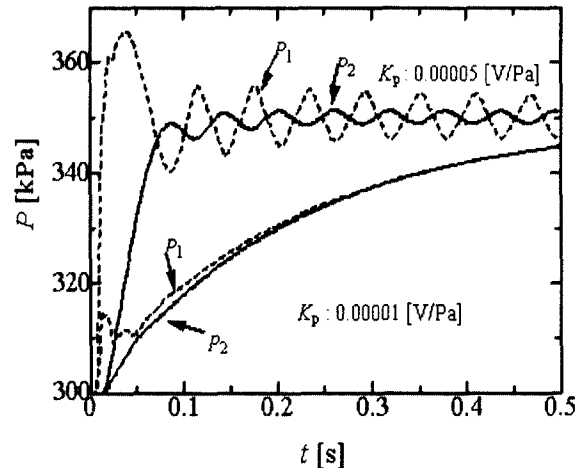


Fig. 3 Pressure control results with proportional controller

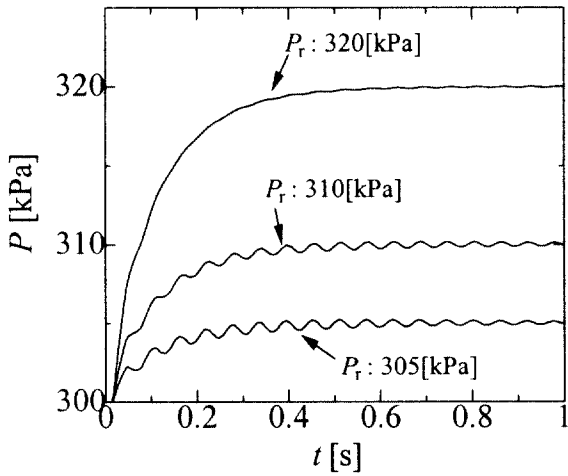


Fig. 4 Pressure control results according to P_r (reference pressure) change

Fig. 4는 비례게인을 2×10^{-5} [V/Pa], 용기 및 접속관 내부의 초기압력을 300[kPa]로 설정한 후, 목표압력을 변화시킨 경우의 제어결과를 나타낸다.

Fig. 4로부터 제어게인을 충분히 낮게 설정하여도 목표압력의 설정치가 낮아지면 용기내부의 압력응답이 목표치로 수렴하지 못함을 알 수 있다.

이 결과는 Fig. 2로부터 고찰한 결과와 일치하고, 제어게인을 안정한계 게인 이하로 설정하여도 목표압력이 낮아짐에 따라서 접속관 내부의 공기의 유동이 비압축성 유동이 되므로 압력과의 전파에 의한 진동이 용기내부의 압력응답에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4. 2자유도 제어기의 설계 및 제어성능

Fig. 5는 2자유도 제어기를 이용한 제어계를 나타낸다. Fig. 5에서 사용된 기호는 다음과 같다.

- P_r : 목표압력[Pa], P_2 : 제어압력[Pa]
- $Q(s)$: 안정화 필터
- $G_0(s)$: 비례게인 K_p 를 이용한 압력제어계
- $G_n(s)$: 식 (5)와 비례게인 K_p 를 이용하여 표현되는 $G_0(s)$ 의 공칭모델
- n : 노이즈
- $C_f(s)$: 압력응답의 동특성을 결정하는 목표치 추종 필터
- d : $G_0(s)$ 와 $G_n(s)$ 의 오차 및 목표치 이외의 외부입력을 표현하는 외란,

Fig. 5에서 $G_0(s)$ 는 Fig. 2에서 고찰한 바와 같이 압력진폭에 따라서 모델이 변화하므로 모델 변화에 의한 제어특성 변화를 보상하기 위하여 안정화

필터 $Q(s)$ 와 공칭모델 $G_n(s)$ 로 구성되는 외란추정 보상기를 삽입하였다. 외란추정 보상기를 이용한 경우의 외란 및 목표압력에서 용기내부 압력까지의 전달함수는 다음 식으로 나타내어진다.

$$\frac{P_2}{d} = \frac{G_0(s)(1-Q(s))}{1+Q(s)G_n^{-1}(s)G_0(s)-Q(s)} \quad (6)$$

$$\frac{P_2}{P_r} = \frac{G_0(s)}{1+Q(s)G_n^{-1}(s)G_0(s)-Q(s)} \quad (7)$$

식 (7)은 $C_f(s)$ 를 1로 가정한 경우이고, 식 (6) 및 (7)에서 $Q(s)$ 가 1이 되는 주파수 범위 이내에서는 외란에 의한 출력이 0이 되고, 또한, 압력제어계의 동특성은 공칭모델 $G_n(s)$ 로 표현되어짐을 알 수 있다. 압력제어계의 특성이 $G_n(s)$ 로 고정된다면, 목표치 추종필터 $C_f(s)$ 의 설계에 의하여 제어계의 동특성을 임의의 형태로 지정할 수 있다. 이때, $C_f(s)$ 의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{P_2}{P_r} = C_f(s)G_n(s) = G_m(s) \quad (8)$$

식 (8)에서 $G_m(s)$ 는 P_2/P_r 의 응답을 최적으로 구현하는 목표치 특성으로써, 본 논문에서 대상으로 하는 3차계의 경우에는 다음과 같이 표현되어진다.⁸⁾

$$G_m(s) = \frac{\alpha}{s^3 + 2 \cdot \sqrt[3]{\alpha} \cdot s^2 + 3 \cdot \sqrt[3]{\alpha^2} \cdot s + \alpha} \quad (9)$$

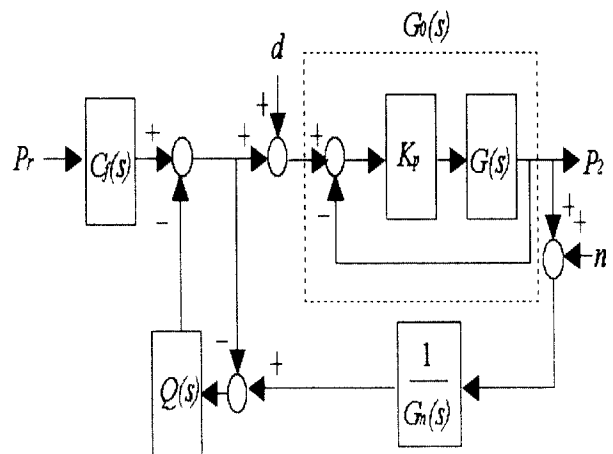


Fig. 5 Structure of 2-degree of freedom controller

그러므로, 본 논문에서 제안하는 제어기는 비례계인을 지정하여 공칭모델 $G_n(s)$ 를 결정한 후, 안정화필터 $Q(s)$ 와 목표치 추종필터 $C_f(s)$ 를 적절히 선정하여 설계할 수 있다. 제어기의 설계순서는 다음과 같다.

① 비례계인 및 공칭모델의 결정 : 비례계인은 안정한계이인 이하로 설정하면 되지만, 비례계인이 낮아질수록 공칭모델의 감도특성이 좋아지므로 본 논문에서는 $1.0 \times 10^{-5} [\text{Pa/V}]$ 로 결정하였다. 그 결과 얻어진 공칭모델은 다음과 같다.

$$G_n(s) = \frac{61914}{s^3 + 31s^2 + 11500s + 61914} \quad (10)$$

② 안정화필터 $Q(s)$ 의 결정 : $Q(s)$ 의 차수는 모델의 불일치에 의한 제어계의 안정성을 고려하여 동일차원 관측기(full-order observer)의 형태로 구성하였다. $Q(s)$ 는 $55 [\text{rad/s}]$ 에서 4중근을 가지고 있고, 저주파수 영역에서는 감도특성이 $G_n(s)$ 보다 향상되도록 하고, 고주파수 영역에서는 $G_n(s)$ 보다 상보감도특성이 향상되도록 설계하였다.

Fig. 6은 2자유도 제어기(실선)와 $G_n(s)$ (파선)의 감도함수 및 상보감도함수를 나타낸다.

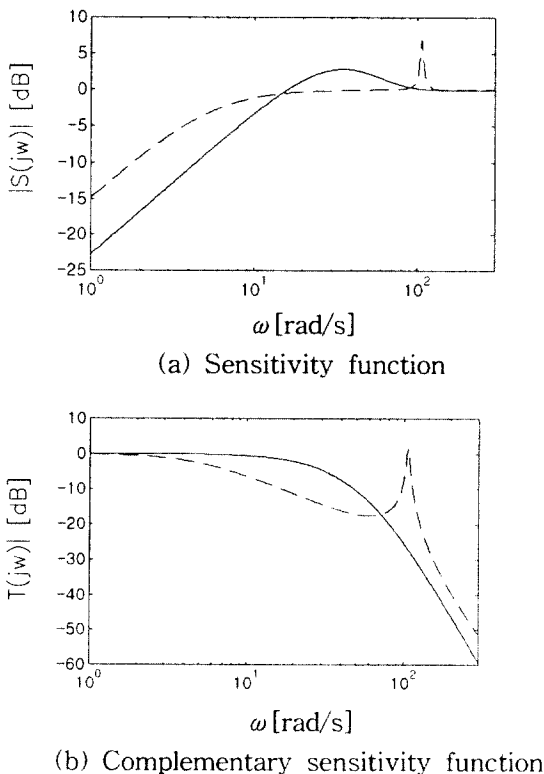


Fig. 6 Transfer characteristics of 2-degree of freedom control system and $G_n(s)$

③ 목표치 추종필터 $C_f(s)$ 의 결정 : $G_{n0}(s)$ 의 형태는 $G_n(s)$ 의 분모의 차수가 $G_n(s)$ 의 분모의 차수보다 크거나 같다는 조건만 만족하면 제약이 없으므로, 비례계인을 한계계인으로 설정하여 $G_0(s)$ 의 응답이 3차계의 최적제어 시스템의 응답이 되도록 $G_{n0}(s)$ 의 α 를 125,000으로 결정하였다. 그 결과 $C_f(s)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$C_f(s) = \frac{125000}{61914} \frac{s^3 + 31s^2 + 11500s + 61914}{s^3 + 100s^2 + 7500s + 125000} \quad (11)$$

Fig. 7~8은 비례제어기 및 본 논문에서 설계한 제어기를 이용한 압력응답을 나타낸다. Fig. 7~8에서 실선은 2자유도 제어기를 이용한 경우, 일점쇄선은 $2 \times 10^{-5} [\text{V/Pa}]$ 의 비례계인을 이용한 경우, 파선은 $5 \times 10^{-5} [\text{V/Pa}]$ 의 비례계인을 이용한 경우의 제어결과를 나타내고, 초기압력은 300[kPa], 목표압력은 각각 305[kPa]과 350[kPa]로 설정하였다.

Fig. 7의 경우에는 접속관의 공진현상에 의하여 비례계인을 낮게 설정하여도 압력응답에 진동이 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 8의 경우에는 압력진폭이 커짐에 따라서 접속관의 공진현상이 사라지므로 비례계인을 낮게 설정한 경우에는 압력응답에 공진현상이 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.

2자유도 제어기를 이용한 경우에는 압력진폭이 변화하여도 제어결과가 $G_{n0}(s)$ 의 응답특성을 나타내므로 양호한 결과를 보이고, 또한, 목표압력에 도달하는 시간은 비례계인을 $5 \times 10^{-5} [\text{V/Pa}]$ 로 설정한 경우와 유사한 결과가 얻어졌다.

Fig. 9는 목표압력을 각각 305[kPa], 320[kPa], 350[kPa], 초기압력 P_0 를 300[kPa]로 설정하고 2자유도 제어기를 이용한 경우의 제어결과를 그림의 종축에서 표시한 바와 같이 무차원화하여 $G_{n0}(s)$ 의 응답과 비교한 결과를 나타낸다. 그림에서 굵은 실선이 $G_{n0}(s)$ 의 응답을 나타내고, 목표압력이 변화하여도 전체적으로 $G_{n0}(s)$ 의 응답을 잘 추종하고 있다.

Fig. 10은 2자유도 제어기 및 $G_n(s)$ 의 페루프 주파수특성을 나타낸다. 그림에서 실선은 2자유도 제어기의 주파수 응답을 나타내고, 일점쇄선은 $G_n(s)$ 의 주파수 응답을 나타낸다. Fig. 10의 결과로부터 2자유도 제어기를 이용한 경우가 저주파수역의 게인이 증가하고, 공진특성이 사라져서 $G_n(s)$ 와 비교하여 속응성 및 동특성이 향상됨을 알 수 있다.

Fig. 11은 2자유도 제어기 및 비례제어기를 이용하여 제어개시 1초 후에 200[kPa]의 외란 입력을 인가한 결과를 나타낸다.

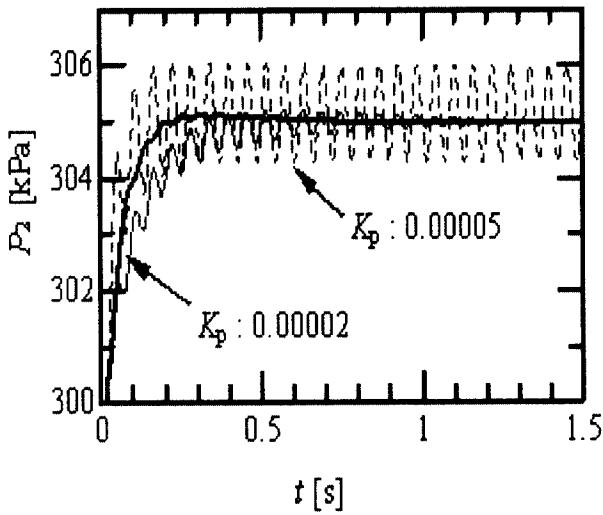


Fig. 7 Pressure control results(P_r :305[kPa])

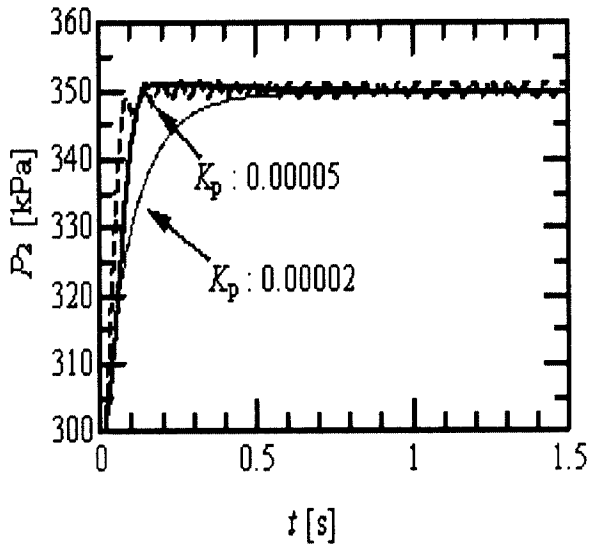


Fig. 8 Pressure control results(P_r :350[kPa])

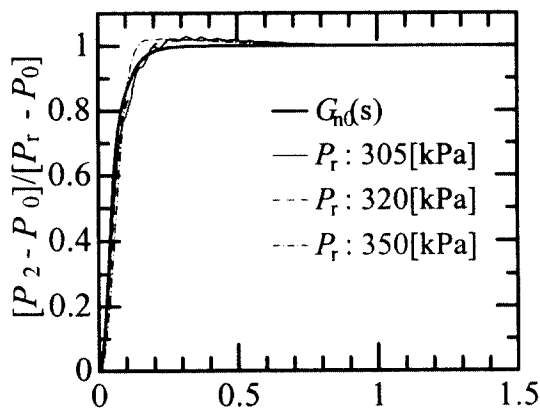


Fig. 9 Normalized Pressure control results (P_r : 305[kPa], 320[kPa], 350[kPa])

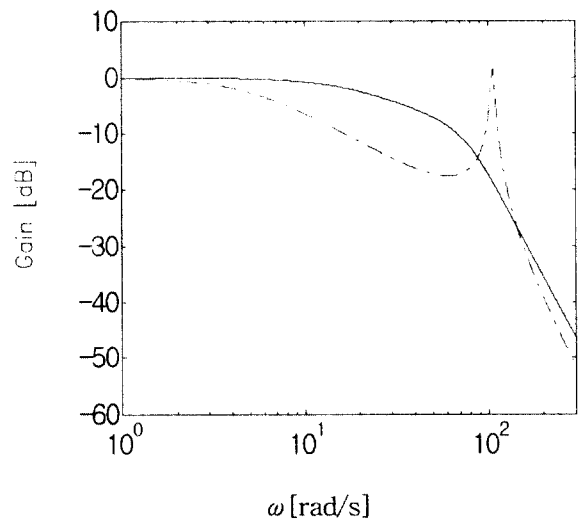


Fig. 10 Closed loop Transfer characteristics of 2-degree of freedom control system and $G_n(s)$

비례게인을 이용한 제어기는 그대로 출력에 반영되지만, 2자유도 제어기를 이용한 제어기는 외란 입력이 사라지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11의 압력제어를 수행할 때 발생한 접속관 및 압력용기 내부의 압력변화를 3차원으로 표현한 결과이다. 그림에서 위치 0은 압력용기 내부의 압력 즉 Fig. 11의 P_2 를 나타낸다. 위치 1~10은 접속관 내부의 압력변화를 나타내고, 접속관 입구부에서 압력용기 방향으로 $\{(10-위치번호) \times 0.5 + 0.25\} [m]$ 이동한 지점의 압력응답을 나타낸다.

접속관 입구부에서는 압력이 급격하게 상승하지만 출구부로 이동하면서 발생하는 마찰손실에 의하여 출구부의 압력이 상대적으로 완만하게 상승하고 있음을 알 수 있다.

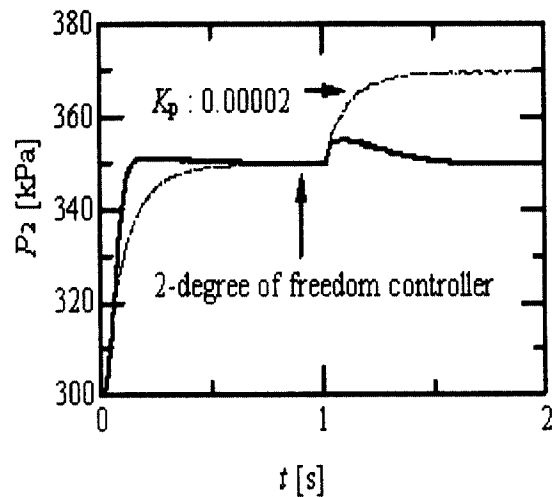


Fig. 11 Disturbance rejection performance

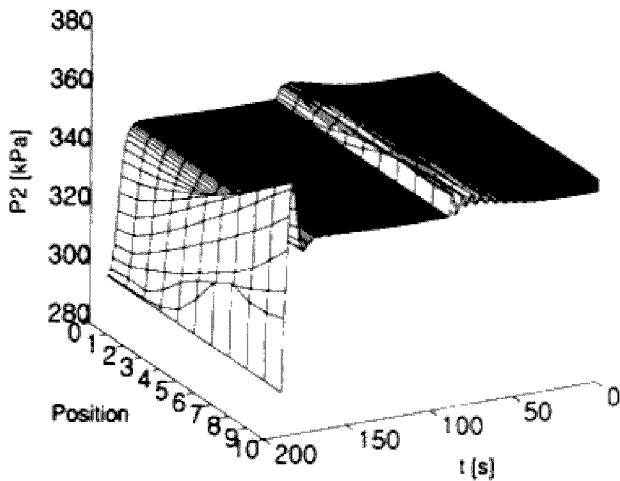


Fig. 12 Pressure response in the conduit and pressure chamber

5. 결론

본 논문에서는 압력진폭의 변화에 의하여 공기압 접속관의 전달특성이 변화한다는 사실에 착안하여 접속관의 전달특성이 변화하여도 압력제어 성능이 변화하지 않는 제어기를 설계하였다.

설계된 제어기는 접속관의 모델변화를 보상하고, 감도특성을 향상시키는 피드백 보상기와 압력응답의 동특성을 임의의 형태로 지정할 수 있는 피드포워드 보상기로 구성된 2자유도 제어기이다.

설계한 제어기를 이용하여 압력제어를 수행한 결과 접속관의 전달특성이 변화하여도 피드포워드 보상기에서 지정한 목표치 특성을 추종하여 양호한 압력제어 성능이 얻어짐을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 2000년도 부경대학교 기성회 학술연구 조성비에 의하여 지원되었음

참고문헌

1. J. Jang, T. Kagawa, “空氣壓容器と簡易比例弁により構成される壓力制御系の特性”, 油壓と空氣壓, Vol. 27, No. 4, pp. 544~549, 1996
2. 日本油空壓學會, “油空壓便覽”, pp. 17~47, 1989
3. C. P. Rohmann, E. C. Grogan, “On the Dynamics of Pneumatic Transmission Lines”, Transactions of the ASME, Vol.97, pp. 853~874, 1957

4. 中山, “流體の力學”, 養賢堂, pp.191~192, 1983
5. 吉岡常雄, 森川敬信, “容量で終端された空氣壓傳送管路の過渡應答”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 17, No. 9, pp. 920~928, 1981
6. 北川能, 香川利春, “空氣壓管路の過渡應答の特性曲線法による高速高精度計算法”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 20, No. 7, pp. 648~655, 1984
7. T. Kagawa, “壓縮性流體の管路容量系における非正常流れに關する研究”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 28, No. 6, pp. 655~663, 1992
8. 花房, “關節形ロボットの制御を目的とした電氣油壓サーボ系の設計”, 油壓と空氣壓, Vol. 13, No. 7, pp 429~436, 1982