

유압제어시스템의 액추에이터 응답시간 특성변화에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on the Response Time Characteristics of Actuator in the Hydraulic Control System

이주성*, 이계복**
Joo-Seong Lee*, Kye-Bock Lee**

<Abstract>

Response time of actuator in a hydraulic system may be important and necessary to avoid failures and to improve the efficiency of operation. Flow restricting devices can result in a decrease in the peak pressure, but may change the response time. The response time has an important effect on both operator and operator perceived smoothness. The response time should correspond to how fast a system responds to a given disturbance at the system boundary. Occasionally the appropriate response time is not easily determined. This study is on the characteristics of response time in the hydraulic system.

Key Words : *Applicated Design, Response Time, Actuator, Fluid Device, Ratio of Orifice Diameter*

1. 서론

유압시스템에서 유체기구를 사용한 응답시간특성에 대한 연구는 많이 수행되어왔으나¹⁾ 이는 액추에이터(actuator)에 유동하중이 걸릴 경우 그 유동하중에 따라 실린더가 1행정만큼 움직이는데 소요되는 반응시간을 연구한 것이 대부분을 차지하고 있다. Henke²⁾는 유압시스템의 액추에이터에 다양한 종류의 유동하중이 걸릴 경우 실린더 로드(cylinder rod)의 속도변화를 각 유동하중별로 거리, 가속도 및 시간의 함수로 해석하였다. Martin³⁾은 오리피스를 사

용하여 유압배관 내의 교축에 따른 압력변화 특성을 연구하였으며, Goodwin⁴⁾은 밸브내부의 스프링작용에 따른 응답시간특성을 압력강하량, 공급유량 및 실린더 체적의 함수로 해석하였다. 이러한 연구결과는 유압시스템의 조종자가 조작하려는 작동력에 대한 반응시간 제어는 가능하지만, 유동하중이 실린더 로드와 떨어져 있는 경우는 적용하기 어렵다⁵⁾. 유동하중이 실린더 로드와 떨어져 있는 조건에서 유압시스템을 조종하면, 중립에 위치한 조종레버를 조종자가 작동시킴에 따라 무부하상태에 있는 실린더 로드가 움직이기 시작하는 작동시작단계로 접어든다. 이때 액추

* 정회원, 충북대학교 대학원 기계공학과
361-771/충북 청주시 흥덕구 분평동 1366, 604-604호

** 정회원, 충북대학교 기계공학부

Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

Faculty, school. of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

에이터의 실린더 로드는 작업물질이 있는 곳까지 무부하 이동 후 작업물질에 접촉함과 동시에 유동하중이 액추에이터에 걸리게 되며 이때부터 액추에이터는 무부하상태가 아닌 유동하중상태가 된다. 이러한 유압시스템의 작동과정 중에서 조종자가 액추에이터의 응답을 느끼는 부분은, 조종레버 작동 후 무부하상태의 액추에이터가 작동을 시작하는 것을 느끼는 순간까지의 과정에 소요되는 응답시간 t' 에 의존하게 된다. 이 응답시간 t' 는 유압시스템작동시 발생하는 충격치와 관계가 있다. 즉, 유압시스템의 작동시 발생하는 충격치를 최소로 하기 위해 유체기구를 이용할 경우 응답시간 t' 는 충격치를 줄일수록 길어지는 특성을 보인다. 여기서 응답시간 t' 가 적절하지 못할 경우, 사람이 직접 조종하는 유압시스템에서는 사용하기 어려운 문제가 발생할 수 있다⁶⁾. 이것은 기계적으로 조종되는 자동화라인의 경우는 0~1초 또는 그 이상까지도 프로그램에 의해 제어 가능하지만 사람이 조종할 경우에는 사람의 지각능력과 조종작업의 불균형으로 연속작업의 어려움을 겪게 되기 때문이다. 따라서 이 작동초기의 응답시간이 최적으로 설계되는 것이 필요하지만 현재 이 부분에 대한 연구는 부족하여 설계시 수차례의 실험을 통한 시행착오법에 의존하는 비효율적인 문제가 발생되고 있다. 유압시스템의 작업조건인 유량과 유압변화에 따라 조

종자가 체감적으로 느끼는 응답시간특성을 최적설계에 응용하기 위해서는, 유동부하가 무부하 조건인 상태에서 응답시간 변화특성에 대한 연구가 필요하다⁷⁻⁸⁾. 이를 위해 본 연구에서는 유압장치에 유체기구인 오리피스를 여러 가지 조건으로 고압의 유압장치회로 내에 설치하고, 무부하상태의 조건에서 실험을 수행하였다. 이 연구를 통해 유압장치의 설계시 시험모델의 제작 없이도 유압제어시스템의 응답시간특성의 변화경향을 예측해볼 수 있도록 하는데 그 목적을 두었다.

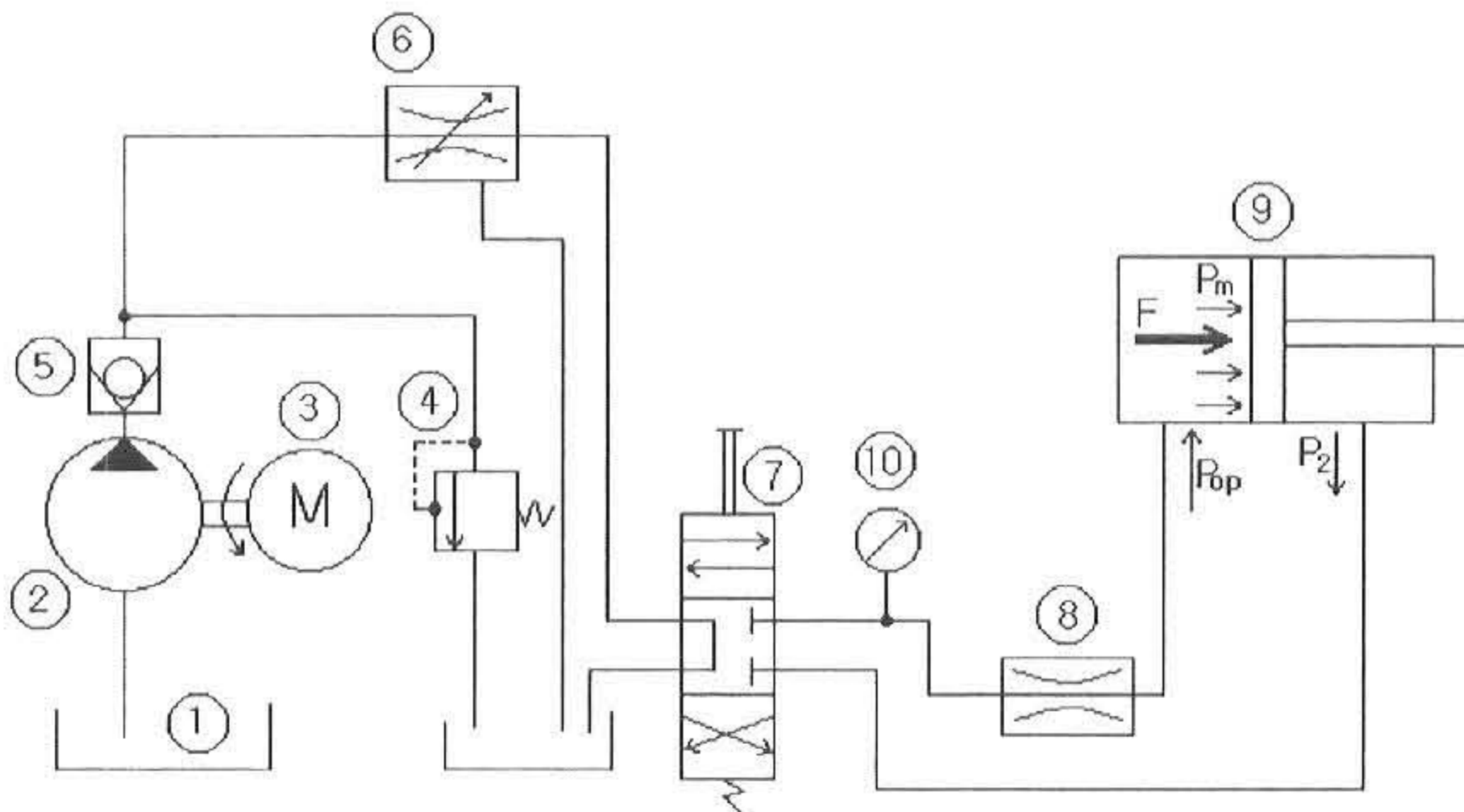
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 설계 제작한 유압시스템의 기본구성은 Fig. 1과 같다. 유압펌프에 의해 토출된 유압유는 압력제어밸브와 유량제어밸브에 의해 해당 작동값으로 조정된다. 이 압력과 유량은 조종레버의 조작에 따라 공급배관에 설치된 오리피스를 통과한 후 액추에이터를 작동시킨다.

2.2 응답특성 변화

유압시스템에서 응답시간의 변화특성은 배관 내를 흐르는 작동유체의 유속, 작동압력 및 작동유량의



- ① Hydraulic oil tank ② Hydraulic pump ③ Electric motor ④ Relief valve ⑤ Check valve
- ⑥ Flow rate control valve ⑦ Directional control valve ⑧ Orifice ⑨ Hydraulic actuator
- ⑩ Pressure gauge & flow rate gauge

Fig. 1 Schematic diagram of experimental model

크기에 따라 다양하게 변화할 수 있다. Fig. 1과 같은 유압계통에서 유압실린더의 배관에 오리피스를 적용할 경우 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다 (9-10)

$$P_1 + \frac{\gamma V_1^2}{2g} = P_{vc} + \frac{\gamma V_{vc}^2}{2g} + \Delta P_f \quad (1)$$

또한 오리피스 전후에 연속방정식을 적용하면

$$A_1 V_1 = A_0 V_0 = A_{vc} V_{vc} \quad (2)$$

여기서 하첨자 1은 유압계통의 오리피스 통과전, 하첨자 0은 오리피스, 하첨자 vc는 vena contracta의 위치를 나타내며, P는 압력, γ 는 비중량, V는 유속, g는 중력가속도, A는 단면적, ΔP_f 는 마찰에 의한 압력강하를 나타낸다.

상기 식(1), (2)에서

vena contracta 단면적 $A_{vc} = C_c A_0$,

압력강하량 $\Delta P = P_1 - P_{vc}$,

$\sqrt{1 - \Delta P_f / \Delta P} = C_v$ 로 두면

$$V_{vc} = \frac{C_v}{[1 - (C_c A_0 / A_1)^2]^{1/2}} \times \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma}} \quad (3)$$

로 정리될 수 있으며, 여기에 연속방정식

$Q = A_{vc} V_{vc} = C_c A_0 V_{vc}$ 와

유량계수 $C_d = C_c C_v$ 를 적용하면

$$\Delta P = \frac{1 - (C_c A_0 / A_1)^2}{C_d^2} \frac{\gamma V_0^2}{2g} \quad (4)$$

여기서 C_c 는 수축계수이며 C_v 는 속도계수, Q는 유량을 나타낸다. 보정계수를 K로 두고 식 (4)를 정리하면

$$\Delta P = K \frac{\gamma V_0^2}{2g} \quad (5)$$

여기서 압력강하량 ΔP 는 수축계수, 유량계수, 속도계수 등에 의해 변화시킬 수 있게 된다.

응답시간 t' 는 이와 관련된 함수로 다음과 같이 표현 가능하게 된다.

$$t' = f(\Delta P, P_{OP}, Q) \quad (6)$$

단, 상기의 이러한 식들의 표현은 실제 유체의 유동특성을 해석하고자 함이 아니라 유체의 유동에서 압력강하량 ΔP 가 변화할 수 있다는 표현이다.

유압계통에서 Fig. 1의 ㉑와 같은 액추에이터의

실린더 로드를 작동시 배압력 P_2 와 유동하중 Wr이 걸리지 않은 무부하상태에서, 기본적인 응답특성곡선은 Fig. 2와 같다. 여기서 t' 가 응답시간이다. 응답시간 제어를 위해 유압실린더의 공급배관에 유체기구중의 하나인 오리피스를 적용할 경우 압력강하는 Fig. 3과 같이 유압계통의 응답시간 t' 에 영향을 준다. 즉, 유압실린더의 배관라인에 오리피스를 제거한 상태 또는 오리피스를 장착한 상태의 조건으로 각각 작동시킬 경우 Fig. 3에서와 같이 응답시간 t' 는 $t_1 < t_2$ 의 관계가 된다. 이는 유체기구들 중의 하나인 오리피스를 유압배관 내에 적용시키므로써 유압계통의 작동시 응답시간을 변화시킬 수 있음을 보여주며, 이를 통해 최적의 조종환경을 위한 응답시간의 최적 설계응용에 관한 연구가 가능하다¹¹⁾. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용하는 작

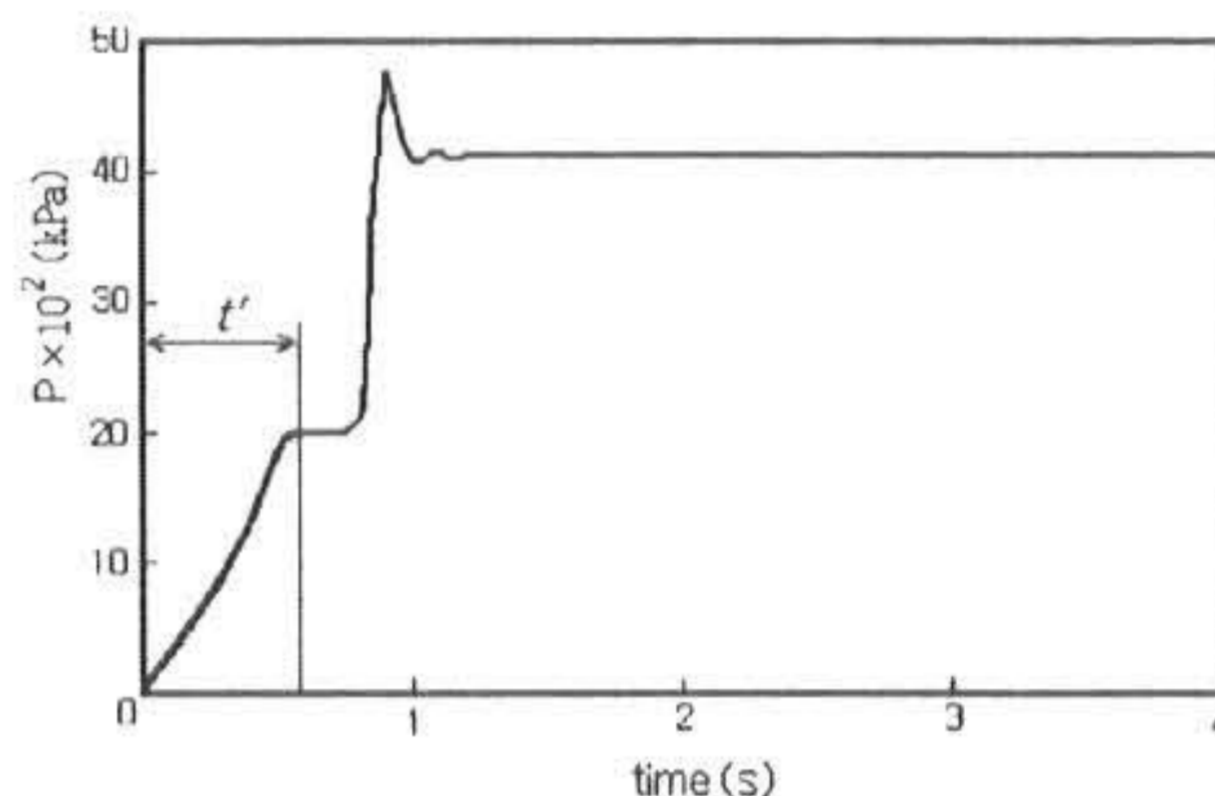


Fig. 2 Typical curve of a response time in the hydraulic systems

동압력과 작동유량 범위 내에서 유체기구를 이용하여 응답시간 t' 에 영향을 미치는 각 요인별 상관관계를 특성곡선화하여, 유압제어계통의 응용설계시 예비모델을 제작하지 않고도 응답시간의 변화경향을 예측해볼 수 있도록 연구하였다.

2.3 실험방법

본 실험은 유압계통에서 일반적으로 운전되는 유량 및 압력범위에서 수행되었으며 실험조건은 다음과 같다.

- 1) 작동유의 온도는 $55 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \%$ 로 한다.
- 2) 주위온도는 실내온도로 한다.
- 3) 작동유의 압력은 $20 \times 10^2 \text{ kPa}$ 에서 $50 \times 10^2 \text{ kPa}$ 범위로 한다.
- 4) 작동유의 유량은 $30 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{min}$ 에서 $60 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{min}$ 범위로 한다.

5) 액추에이터는 실린더 로드 방향이 인장방향으로 운동하는 조건으로 하고, 이때 실린더 로드는 무부하 상태로 한다.

6) 유압배관 내 유속은 3~4 m/s 범위로 한다.

7) 오리피스 직경비 β 는 0.2에서 1.0까지의 범위로 한다.

2.4 실험데이터 출력 및 저장

본 연구에서는 액추에이터의 작동시 발생하는 응답시간을 각 조건에 따라 실험에 의해 측정하였다¹²⁾. 측정된 신호는 증폭된 후 A/D변환기를 통해 컴퓨터에 저장되고 프린터로 출력되며 측정오차범위는 $\pm 0.25\%$ 이다. 이때 유량계는 Hydrotechnik사의 기어방식을 적용하였으며 압력계측기의 대역폭(band width)은 30 kHz를 적용하였다.

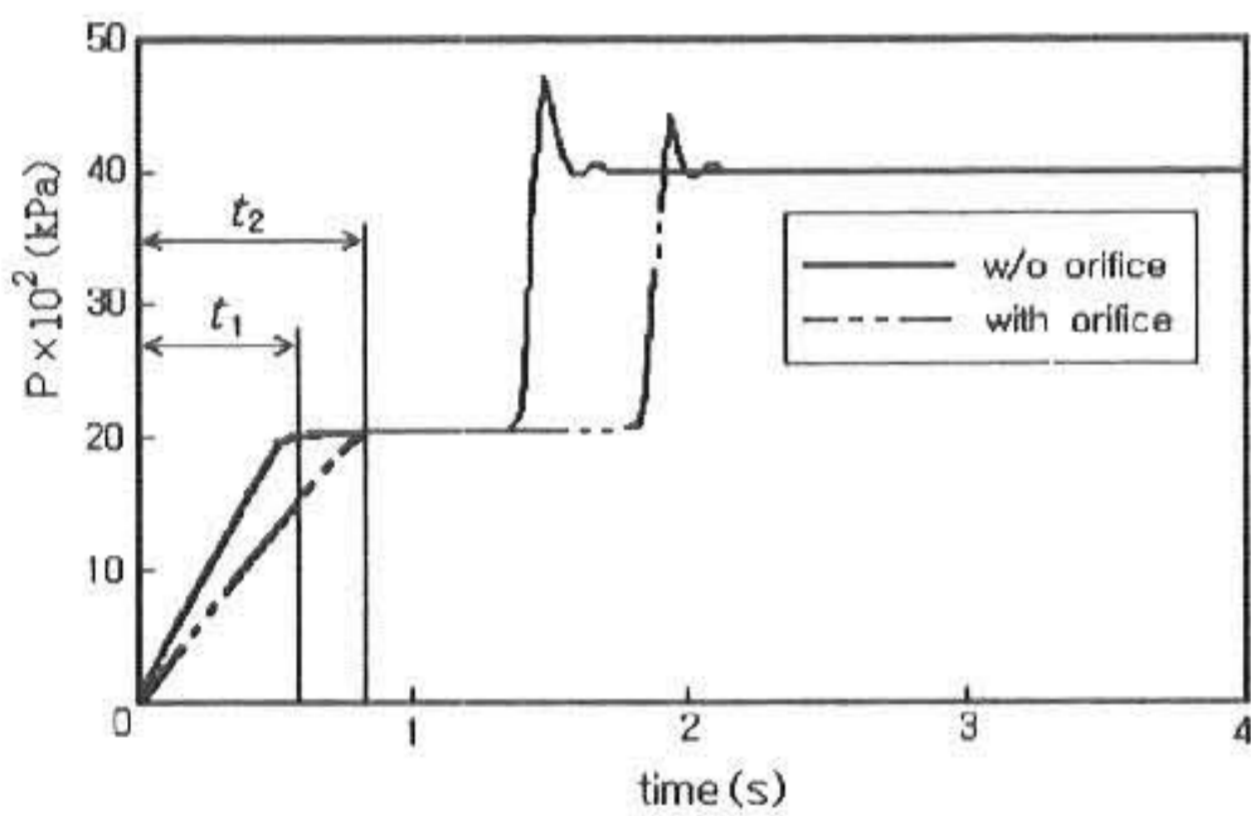


Fig. 3 Typical response time variation by actuator operation

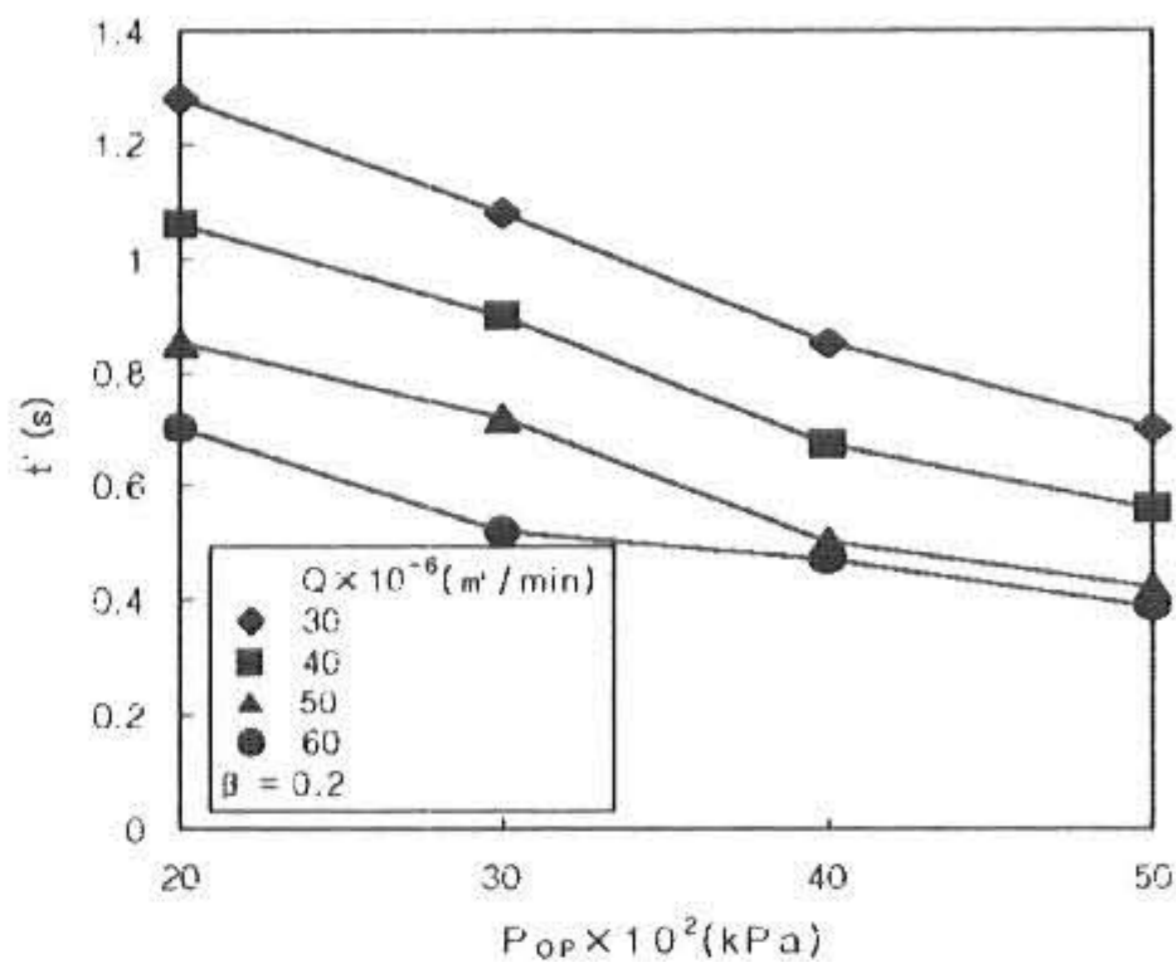


Fig. 4 The test results of response time in the various operating pressure(at $\beta=0.2$)

3. 실험결과 및 고찰

본 실험장치에서 조종레버의 조작으로 방향변환밸브를 변속하면 응답시간 t' 가 흐르는 동안은 유압 실린더의 실린더 로드 방향이 움직이지 않으며 응답시간 t' 가 끝나는 시점에서 비로소 실린더 로드는 엔드스โตร크(end stroke)까지 움직이게 된다. 이때 작동조건이 바뀔 경우 응답시간 t' 는 변화하게 된다. 이 변화결과를 응답시간의 최적응용설계에 적용하기 위하여 실험결과를 고찰하고 특성곡선화 하였다.

3.1 실험결과

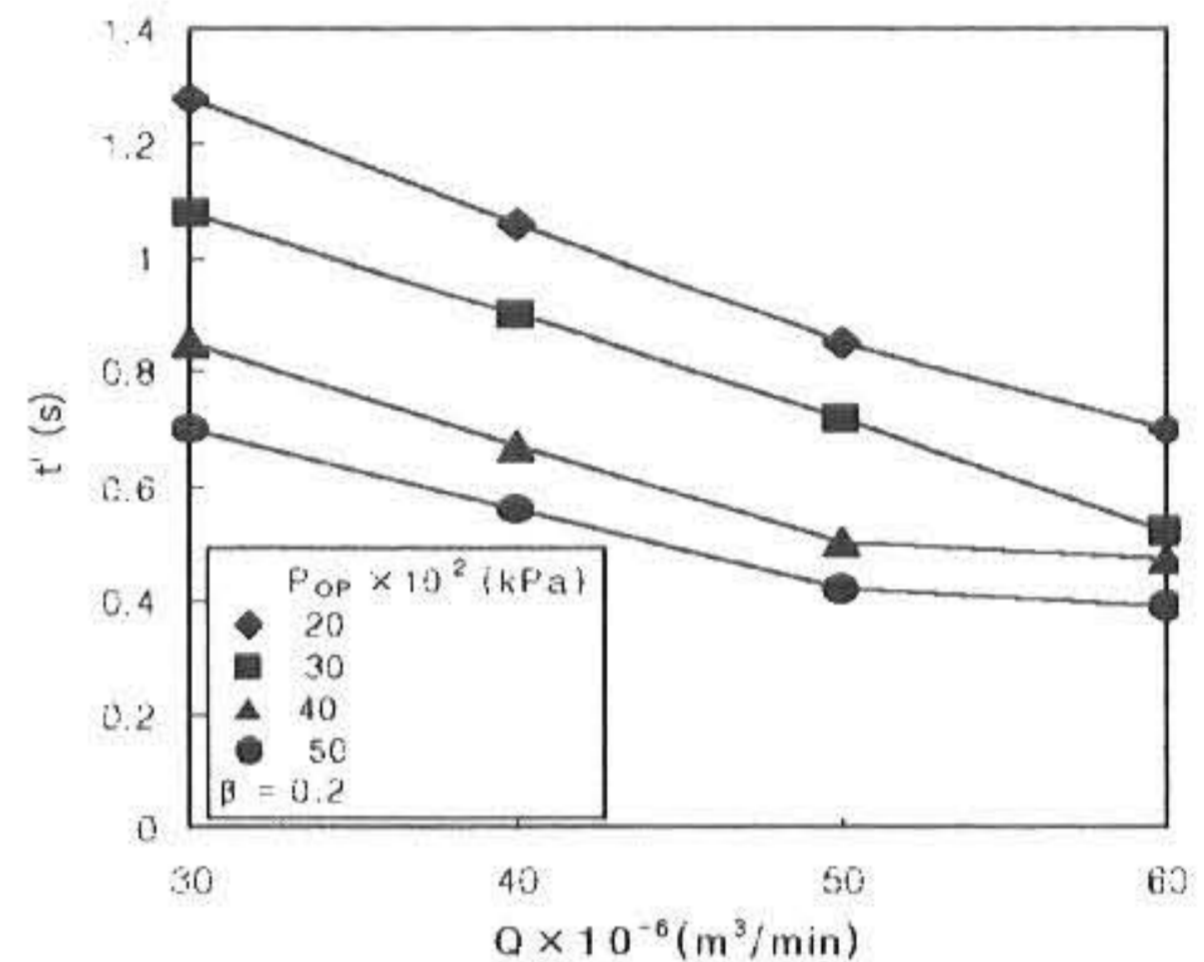


Fig. 5 The test results of response time in the various flow rate(at $\beta=0.2$)

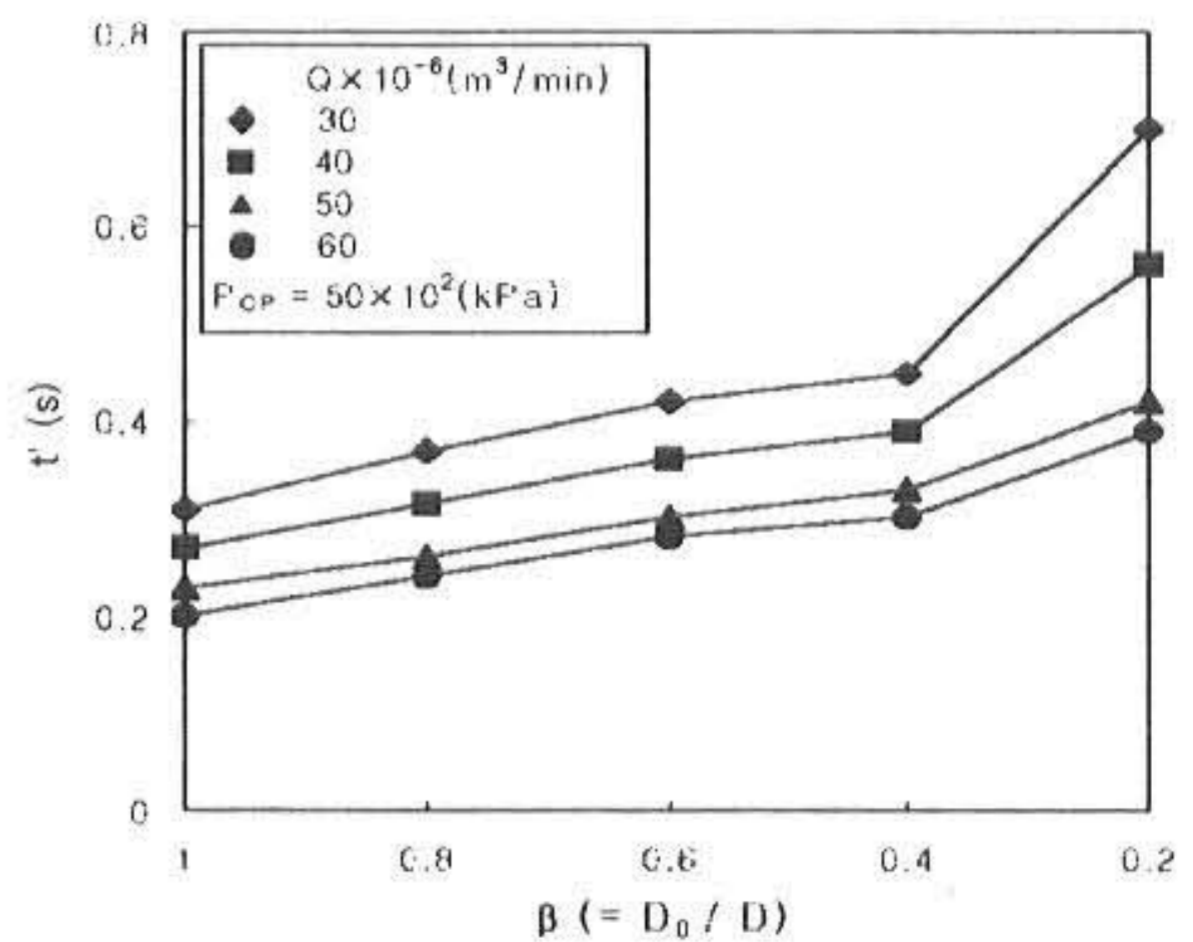


Fig. 6 The test results of response time in the various orifice diameter ratio(at 50 bar)

유압계통에서 오리피스 직경비 $\beta=0.2$ 를 적용한 경우, 작동압력의 변화에 따른 각 작동유량별 응답시간 실험결과는 Fig. 4와 같았다. 또한 작동유량의 변화에 따른 각 작동압력별 응답시간 실험결과는 Fig. 5와 같았으며 오리피스 직경비의 변화에 따른 응답시간 실험결과는 Fig. 6과 같았다. 여기서 응답시간은 작동유량 및 작동압력이 증가할수록 짧아지는 특성을 보여주었고, 오리피스 직경비 β 는 작을수록 응답시간이 길어지는 특성을 보여주었다.

3.2 응답시간 설계응용

현재 유압계통 설계방법은 설계하고자 하는 기계 성능에 맞는 작동압력과 유량, 유속 등을 목표치로 결정하여 설계한 후 시험기계를 제작하여 수 차례의 실험을 통해 최적성능을 결정해 나가는 방식을

전체범위인 $\beta=0.2\sim 1.0$ 과 작동유량변화의 전체범위인 $30\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{min}\sim 60\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{min}$ 의 모든 값에서 작동압력만을 변화시킬 경우 응답시간은 모든 유량범위와 모든 오리피스 직경비 범위에서 Fig. 7과 같은 변화특성을 보여주었다. 여기서 $t'/t'_{(20\times 10^2 \text{ kPa})}$ 는 응답시간 변화율을 나타내며, 작동압력이 $20\times 10^2 \text{ kPa}$ 일 때를 기준으로 백분율로 나타낸 것이다.

유압계통의 주어진 오리피스 직경비에서 작동유량과 작동압력을 변화시킬 경우 Fig. 7의 응답시간 변화율을 찾아 유압계통의 응답시간 변화값에 응용할 수 있다. 즉, 해당되는 응답시간변화율 $t'/t'_{(20\times 10^2 \text{ kPa})}$ 값을 Fig. 7에서 읽은 후 이 비율을 보정계수로 하여 응답시간 t' 의 변화량을 예측하여 응용설계할 수 있다.

3.2.2 오리피스 직경비 변화에 따른 응답시간

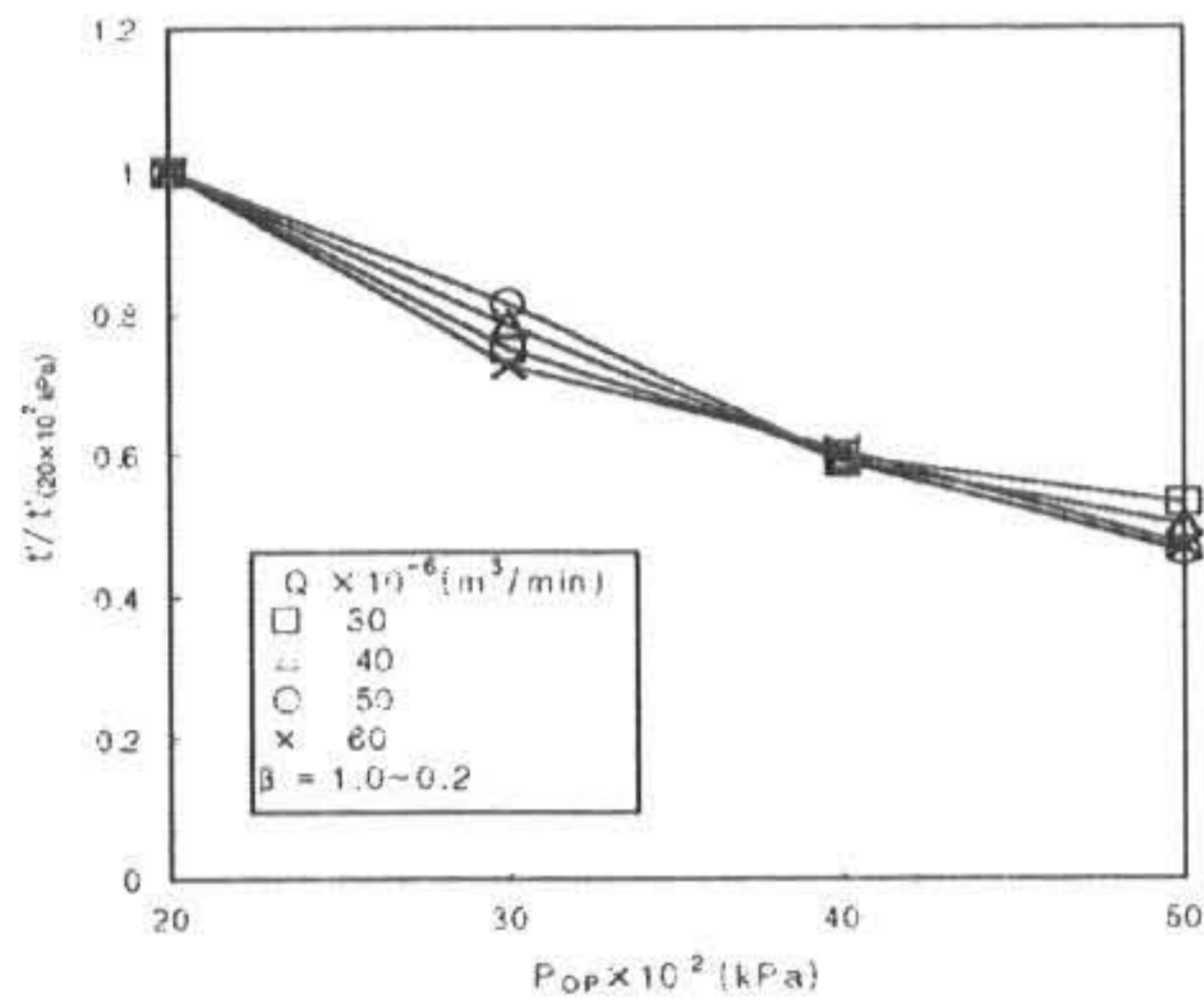


Fig. 7 The distribution chart of the ratio of response time variation in the variable operating pressure

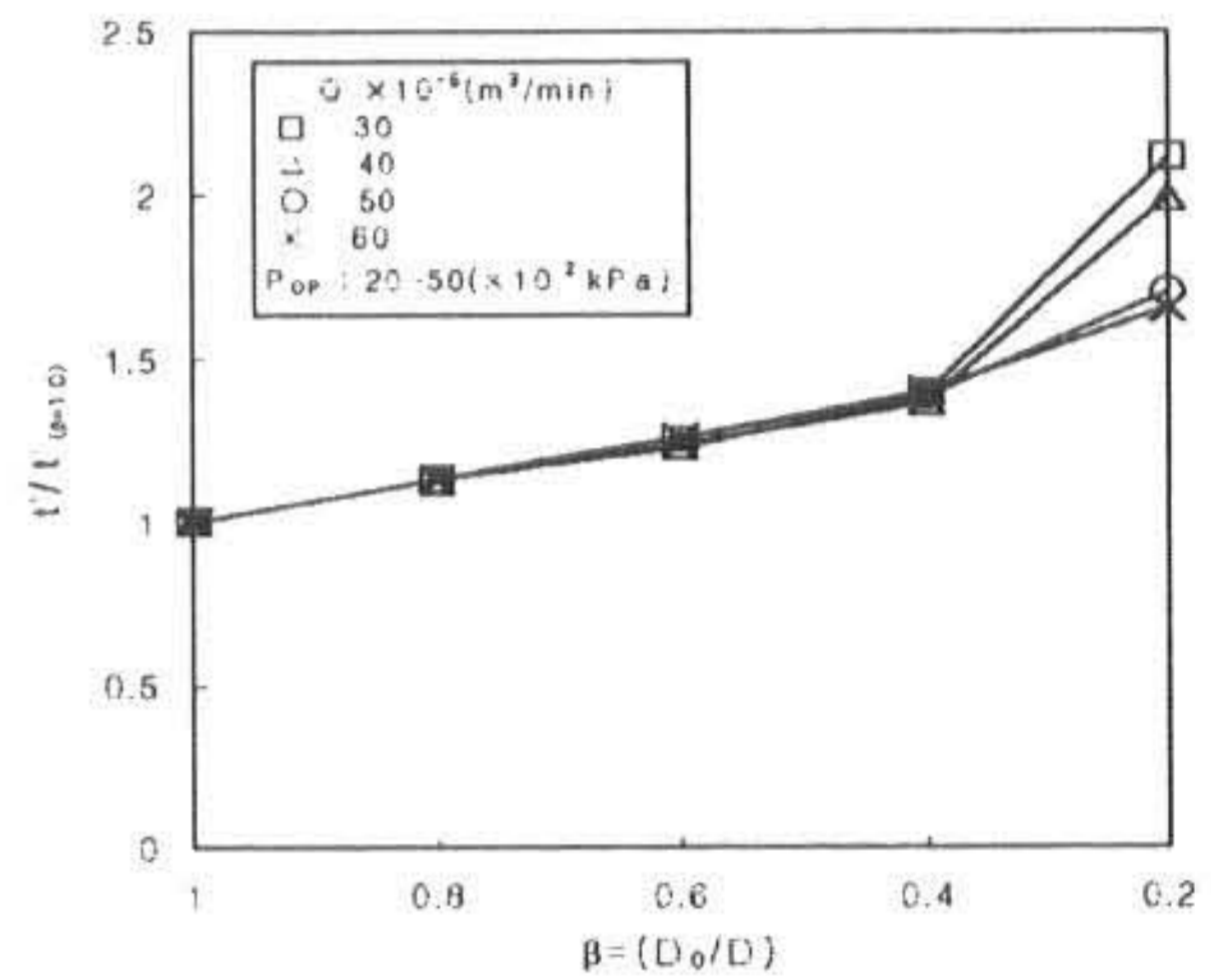


Fig. 8 The distribution chart of the ratio of response time variation in the variable ratio of orifice diameter

이용하고 있다. 이때 시험기계를 1차 실험해보면 식 (6)의 모든 항목값이 실험치로 나오며, 이때 응답시간 t' 값은 다음과 같이 1회의 보정설계로 최적성능을 위한 응용설계가 가능하다.

3.2.1 작동압력변화에 따른 응답시간

실험범위 내에 있는 모든 작동유량, 작동압력 및 유체기구인 오리피스 직경비에서 응답시간변화율을 Figs. 7~8과 같이 체계화하여 활용할 수 있다. 먼저 작동압력 변화에 따른 응답시간 설계응용의 경우, 실험에서 유체기구로 사용한 오리피스 직경비(β)의

실험에 적용한 작동압력 및 작동유량의 전체 범위 내인 조건에서 오리피스의 직경비 β 를 변화시킬 경우 응답시간은 모든 작동압력과 작동유량범위에서 Fig. 8과 같은 변화특성을 보여주었다. 여기서 오리피스의 직경비 $\beta=1.0$ 인 때를 기준으로 응답시간변화율 $t'/t'_{(\beta=1.0)}$ 로 나타내었다. 유압계통에 주어진 작동압력과 작동유량에서 오리피스 직경비 β 를 변화시킬 경우 Fig. 8의 응답시간 변화특성에서 변화율을 찾아 유압계통의 응답시간 변화값에 응용할 수 있다. 즉, 해당되는 응답시간 변화율 $t'/t'_{(\beta=1.0)}$ 값을 Fig. 8에서 읽은 후 이 비율을 보정계수로 하여 응답시간

t' 의 변화량을 예측하여 응용 설계할 수 있다.

4. 결론

유압시스템의 설계시 응답시간의 최적응용설계를 위하여 응답시간 변화특성에 대한 실험을 수행하고, 이 실험결과를 특성곡선화 하여 체계적으로 정리함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 오리피스 직경비 변화에 따른 각 조건별 응답시간변화율 $t'/t'_{(\beta=1.0)}$ 값을 특성곡선화 하여 보정계수로 설계에 응용할 수 있도록 하였다.
- (2) 작동압력변화에 따른 각 조건별 응답시간변화율 $t'/t'_{(20 \times 10^2 \text{ kPa})}$ 값을 특성곡선화 하여 보정계수로 설계에 응용할 수 있도록 하였다.
- (3) 유압시스템 작동시 응답시간의 변화는 각 작동조건에 영향을 받으며, 이때 각 조건에 따른 응답시간 변화량은 작동유량이나 작동압력이 작을수록 크게 나타났다.

- 8) 이주성, 이계복, 이충구, :유압 브레이크 시스템의 과도맥동압력 제어특성에 관한 실험적 연구, 한국산업응용학회지, 제4권, 제1호, pp.21-26, (2001)
- 9) Wylie, E. B. and Streeter, V. L., : Fluid Transient in Systems, Prentice Hall, pp. 215-243, (1993)
- 10) Merritt, H. E., : Hydraulic Control System, John Wiley & Sons, pp. 76-132, (1976)
- 11) J. S. Lee, K. B. Lee, C. G. Lee, : An Experimental Study on the Control of Pressure Transients Using an Orifice, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 78/5, pp. 337-341, (2001)
- 12) Hydro Technik : Operation Manual- Measuring Instruments, Hydro Technik. (1995)
- 13) Reeves, W. W., : Technology of Fluid Power, Delmar Publishers, pp. 261-264, (1997)

(2001년 10월 23일 접수, 2002년 2월 20일 채택)

참고문헌

- 1) Reed, E. W. and Larman, I. S., : Fluid Power with Microprocessor Control, Prentice Hall, pp. 132-167, (1985)
- 2) Henke, R. W., : Fluid Power Systems & Circuits, Hydraulics & Pneumatics, pp.1-33, (1986)
- 3) Martin, H. R., and McCloy, D., : The Control of Fluid Power, Longlam Group Ltd., pp. 116-259, (1973)
- 4) Goodwin, A. B., : Fluid Power Systems, Macmillan Press Ltd., pp. 78-112, (1976)
- 5) Andrew, P., : Hydraulics Pneumatics, Newnes Ltd., pp. 127-129, (1991)
- 6) Mike, C., and Richard, I., : Modeling, Identification, and Real-Time Control of Bucket Hydraulic System for a Wheel Type Loader Earth Moving Equipment, Mechatronics, pp. 863-885, (1998)
- 7) 이주성, 이계복, :오리피스를 이용한 유압액추에이터의 충격치 제어특성에 관한 실험적 연구, 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제11호, pp.1506-1512, (2000)