

유체기구를 이용한 유압계통의 충격치제어에 수반되는 반응지연에 관한 연구

이 주 성* · 이 계 복†

(2001년 12월 17일 접수, 2002년 5월 2일 심사완료)

A Study on the Associated Response Lag in Shock Control of Hydraulic System Using Fluid Device

Joo Seong Lee and Kye Bock Lee

Key Words: Response Time(응답시간), Fluid Device(유체기구), Operating Pressure(작동압력)
Flow Rate(유량), Ratio of Orifice Diameter(오리피스 직경비)

Abstract

The response time represents how fast a system responds to a given disturbance at the system boundary. Flow restricting devices for controlling transients can result in a decrease in the peak pressure, but may change response time. Response lag in a hydraulic system leads to inefficient working cycle and operator discomfort. The experiments were conducted in order to get information on the parameters which exert appreciable influence on the response time. The experimental apparatus including a hydraulic actuator, orifice and a hydraulic pump was an idealization of a bucket hydraulic shifting system. Experimental results show that the response time depends on operating pressure and flow rate. The effects of orifice type and size on the response time are quantified.

기호설명

A : 단면적
 C_c : 수축계수
 C_d : 유량계수
 C_t : 속도계수
 c : 음속
 D : 유압배관 내경
 D_0 : 오리피스 내경
 F : 실린더 로드에서 걸리는 압력력
 g : 중력가속도

K : 체적탄성계수, 손실계수
 P : 압력
 P_m : 실린더 로드 이동중 유체압력
 P_{OP} : 작동압력
 P_2 : 배압력
 P' : 충격치
 ΔP : 오리피스 전후의 압력강하
 ΔP_f : 마찰에 의한 압력강하
 Q : 유량
 t : 총 작동시간(operating time)
 t' : 응답시간(response time)
 $\Delta t'$: 응답시간차
 V : 유속
 W_r : 작업시 유동하중
 β : 오리피스 직경비(= D_0/D)
 γ : 비중량

* 회원, 충북대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : kblee@cbucc.chungbuk.ac.kr

TEL : (043)261-3232 FAX : (043)263-2448

- ρ : 밀도
- 하점자
- vc : vena contracta 위치
- 0 : 오리피스 위치
- 1 : 오리피스 통과전 위치
- 2 : 오리피스 통과후 위치

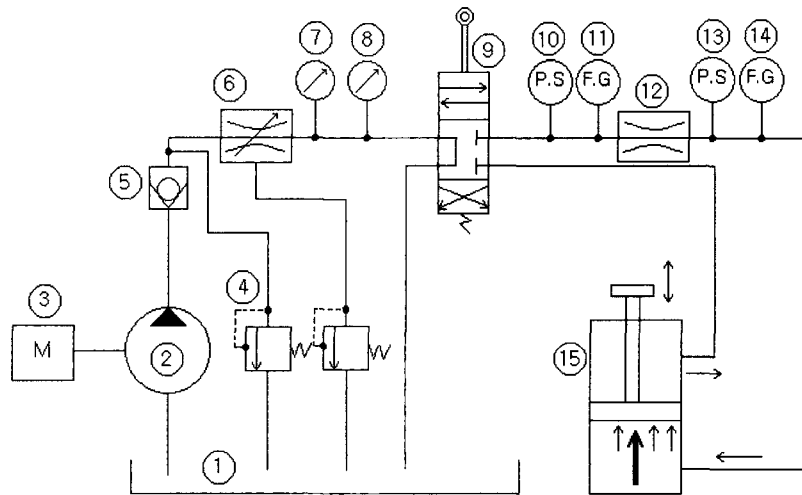
1. 서론

유압계통에서 액추에이터의 반응시간제어를 위해서는 주로 공급배관 또는 회귀배관 내에 유체기구를 설치하여 교축에 의한 제어를 한다. 이러한 유체기구를 사용한 유압계통의 반응시간특성에 대한 연구는 많이 수행되었으나^(1,2) 이는 액추에이터(actuator)에 유동하중이 걸릴 경우 그 유동하중에 따라 실린더가 1행정만큼 움직이는데 소요되는 반응시간특성을 연구한 것이 대부분이다.

McCloy와 Martin⁽³⁾은 오리피스를 사용하여 유압배관 내의 교축에 따른 압력변화특성을 연구하였다. 여기서 액추에이터에 걸리는 유동부하의 변동에 따라 정상상태의 액추에이터 속도가 일정

치 않음을 주목하고 각 부하별 반응시간을 해석적으로 구하였다. Henke⁽⁴⁾는 유압계통의 액추에이터에 다양한 종류의 유동하중이 걸릴 경우 실린더 로드(cylinder rod)의 속도변화를 각 유동하중별로 거리, 가속도 및 시간의 함수로 해석하였다. Goodwin⁽⁵⁾은 밸브류의 스펴(spool)작동에 따른 반응시간특성을 압력강하량, 공급유량 및 실린더 체적의 함수로 해석하였다.

그러나 이러한 연구는 조종자가 조작하려는 계통의 힘 즉 작동력(operating power)에 대한 반응시간의 제어는 가능하지만, 유압계통의 조종자가 체감적으로 느끼는 응답특성인 유압계통 조작 직후부터 액추에이터의 실린더 로드가 움직이기 시작하는 순간까지 걸리는 응답시간에 대한 제어에는 적용할 수 없다.⁽⁶⁾ 즉, 유압계통에서 액추에이터를 작동시켜 작업대상물인 유동하중을 운반하거나 위치변화를 시키고자 할 때는 먼저 중립에 위치한 조종레버를 조작하여 무부하상태에 있는 액추에이터를 작동시키게 된다. 이때 액추에이터의 전방에 작업물질이 있는 곳까지 무부하 이동 후 작업물질에 접촉함과 동시에 유동하중이 액추



- ① Oil tank ② Pump ③ Motor ④ Operating pressure control valve ⑤ Check valve
- ⑥ Flow rate control valve ⑦ Main flow rate gauge ⑧ Main pressure gauge
- ⑨ Directional control valve ⑩ Pressure sensor ⑪ Flow rate gauge ⑫ Orifice
- ⑬ Pressure sensor ⑭ Flow rate gauge ⑮ Actuator (hydraulic cylinder)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental model

에이터에 걸리게 되며 이때부터 액추에이터는 무부하상태가 아닌 유동하중상태가 된다.

이러한 유압계통의 작동과정 중에서 조종자가 액추에이터의 응답특성을 느끼는 부분은 조종레버 작동 후 무부하상태의 액추에이터가 작동을 시작하는 것을 느끼는 순간까지의 과정에 소요되는 시간에 해당된다. 이 응답시간 t 는 유압계통 작동시 발생하는 충격치와도 관계가 있다. 즉, 유압계통의 작동시 발생하는 충격치를 최소로 하기 위해 유체기구를 이용할 경우 응답시간 t 는 충격치의 크기와 상반되는 결과를 보이며, 충격치를 줄일수록 응답시간 t 는 길어지게 된다. 그러나 응답시간 t 는 유압장치의 종류에 따라 다소 다를 수 있으나 자동화 라인이 아닌 사람이 직접 조종하는 기계장치의 경우 0.2초 이내가 이상적이며 0.5초를 넘을 경우는 사용하기 어렵다.⁽⁷⁾ 이것은 기계적으로 조종되는 자동화라인의 경우는 0~1초 또는 그 이상까지도 프로그램에 의해 제어 가능하지만 사람이 조종할 경우에는 사람의 지각능력과 조종작업의 불균형으로 연속작업의 어려움을 겪게 되는 것이다.

따라서 조종레버의 작동초기에 일어나는 응답시간특성이 매우 중요하다. 이 작동초기 응답시간은 유압계통의 압력이나 유량의 제어에 따라 변하게 된다. 유압계통의 작업조건인 유량과 유압변화에 따라 조종자가 체감적으로 느끼는 응답시간을 최적설계 및 제어하기 위해서는, 유동부하가 무부하 조건인 상태에 대한 연구가 필요하다. 유압계통의 응답시간 결정시 이용할 수 있는 응답시간 변화특성에 대한 정량화된 설계자료는 현재 매우 부족한 실정이며, 실제 예비모델제작 후 수 차례의 실험을 통한 시행착오방법에 의존하므로 시간적, 경제적 측면에서 많은 손실을 감수하고 있다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 충격치 제어를 위해 사용되는 유체기구인 오리피스에 의한 교축특성이 반응시간에 미치는 영향과 작동조건(압력, 유량)에 따른 영향을 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 설계 제작한 유압계통의 기본구성은 Fig. 1과 같다. 유압펌프에 의해 토출된 유압

유는 압력제어밸브와 유량제어밸브에 의해 해당 작동값으로 조정된다. 이 압력과 유량은 방향전환밸브의 조작에 따라 공급배관에 설치된 오리피스를 통해 액추에이터를 작동시킨다. 작동압력과 유량은 파일롯 라인(pilot line)에서 일반적으로 사용되는 범위인 20~50bar, 30~60ℓ/min 이내로 설정하였고, 작업초기조건인 무부하상태로 실험을 수행하였다. 여기서 방향전환밸브의 조작에 따른 액추에이터의 응답시간이 적절하지 못할 경우 조종자가 유압계통을 연속 운전하는데 장애를 받게 된다.

2.2 응답특성이론

유압계통 조작시 발생하는 응답시간의 변화특성은 작동유체의 압축성, 적용밸브의 포트 크기(port size), 작동압력 및 작동유량의 크기 등에 따라 다양하게 반응한다. Fig. 1과 같은 유압계통에서 유압실린더의 배관에 Fig. 2와 같은 오리피스의 설계를 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 통과 전, 하첨자 0는 오리피스, 하첨자 vc 는 vena contracta의 위치를 나타내며, P 는 압력, γ 는 비중량, V 는 유속, g 는 중력가속도, A 는 단면적, ΔP_f 는 마찰에 의한 압력강하를 나타낸다.

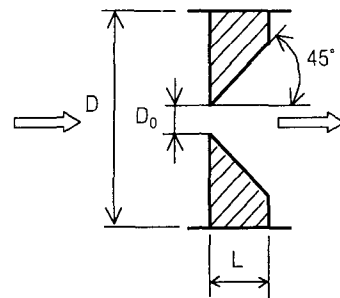


Fig. 2 The orifice for experiment

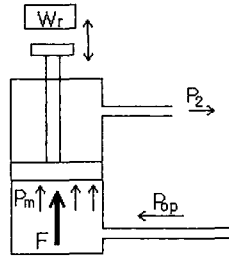


Fig. 3 The hydraulic cylinder

이때, vena contracta 단면적 $A_{vc} = C_c A_0$ 로 두면 상기 식 (1), (2)에서

$$V_{vc} = \frac{1}{[1 - (C_c A_0 / A_1)^2]^{1/2}} \times \left[\frac{2g}{\gamma} \{ (P_1 - P_{vc}) - \Delta P_f \} \right]^{1/2} = \frac{\sqrt{1 - \Delta P_f / \Delta P}}{[1 - (C_c A_0 / A_1)^2]^{1/2}} \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma}} \quad (3)$$

여기서, 압력강하 $\Delta P = P_1 - P_{vc}$ 이며, $\sqrt{1 - \Delta P_f / \Delta P} = C_v$ 로 두면

$$V_{vc} = \frac{C_v}{[1 - (C_c A_0 / A_1)^2]^{1/2}} \times \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma}} \quad (4)$$

연속방정식에서

$$Q = A_{vc} V_{vc} = C_c A_0 V_{vc} \quad (5)$$

식(4), (5)에서

$$Q = \frac{C_c C_v A_0}{[1 - (C_c A_0 / A_1)^2]^{1/2}} \times \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma}} \quad (6)$$

여기서, C_c 는 수축계수이며 C_v 는 속도계수, Q 는 유량을 나타낸다.

유량계수 $C_d = C_c C_v$ 로 두고 유압계통의 배관 내 오리피스 통과전후의 압력강하 ΔP 에 대하여 정리하면

$$\Delta P = \frac{1 - (C_c A_0 / A_1)^2}{C_d^2} \frac{\gamma V_0^2}{2g} \quad (7)$$

손실계수를 K 라 두고 정리하면

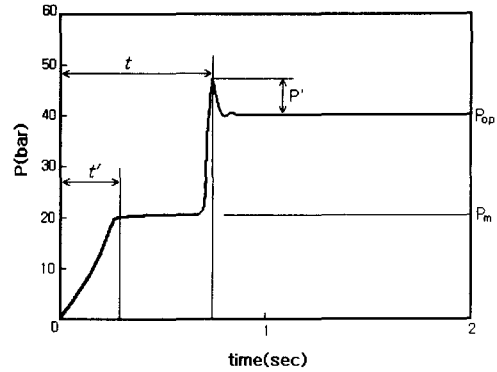


Fig. 4 Typical curve of a response time in the hydraulic systems

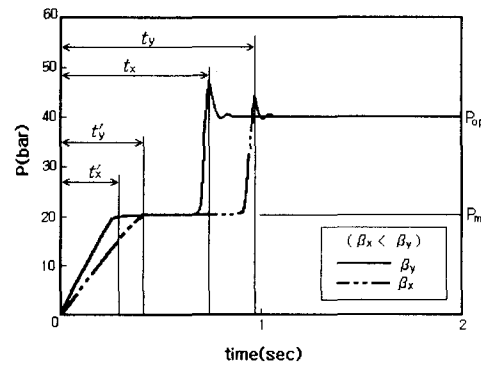


Fig. 5 The variation of response time by actuator operation

$$\Delta P = K \frac{\gamma V_0^2}{2g} \quad (8)$$

이러한 압력강하량은 충격치를 감소시키나 응답시간 t' 에 영향을 주게 된다.

유압계통에서 Fig. 3과 같은 액추에이터의 실린더 로드를 작동시 배압력 P_2 와 유동하중 W_r 이 걸리지 않은 무부하상태에서 기본적인 응답특성곡선은 Fig. 4와 같다. 여기서 t' 는 응답시간이고 t 는 총작동시간이 되며 따라서 $t - t'$ 는 실린더가 움직인 반응시간이 된다. 충격치제어를 위해 유압실린더의 공급배관에 유체기구중의 하나인 오리피스를 적용할 경우 압력강하는 Fig. 5와 같이 유압계통의 총작동시간 t 에 영향을 주며, 이는 동시에 작동초기의 응답시간 t' 에 영향을 미치게 된다. 즉, 유압실린더의 배관라인에 오리피스의 직경비

가 β_x , β_y 인 2개의 오리피스를 $\beta_x < \beta_y$ 의 조건으로 차례로 작용시킬 경우 Fig. 5에서와 같이 응답시간 t 는 $t_x < t_y$ 의 관계가 된다.

따라서 유체기구인 오리피스를 적용하면 유압계통의 작동시 발생하는 충격치를 완화시키지만 동시에 응답시간변화를 야기시키므로, 효율적인 최적의 조종환경을 위해서 적절한 응답시간의 확보가 필요하게 된다.^(11,12)

2.3 실험방법

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

- 1) 작동유의 온도는 $55^\circ\text{C} \pm 10\%$ 로 한다.
- 2) 주위온도는 실내온도로 한다.
- 3) 작동유의 압력은 20bar에서 50bar 범위로 한다.
- 4) 작동유의 유량은 30ℓ/min에서 60ℓ/min 범위로 한다.
- 5) 액추에이터는 실린더 로드가 인장방향으로 운동하는 조건으로 하고, 이때 실린더 로드는 무부하상태로 한다.
- 6) 유압배관 내 유속은 3~4m/s 범위로 한다.
- 7) 오리피스의 직경비 β 는 0.2에서 1.0까지의 범위로 한다.

2.4 실험데이터 출력 및 저장

본 연구에서는 유압계통의 작동시 발생하는 응답시간을 각 조건에 따라 실험에 의해 측정하였다.⁽¹³⁾ 측정된 신호는 증폭된 후 A/D변환기를 통해 컴퓨터에 저장되고 프린터로 출력되며, 압력과 응답시간의 측정오차범위는 $\pm 0.25\%$ 이고 유량의 측정오차범위는 $\pm 1\%$ 이다. 이때 유량계는 기어방식을 적용하였으며 압력계측기의 대역폭(band width)은 30kHz를 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험장치에서 액추에이터의 응답시간 변화 특성을 실험한 결과는 Fig. 4와 같은 파형으로 나타난다. 조종레버의 조작으로 방향변환밸브를 변속하면 응답시간 t 까지는 유압실린더의 실린더 로드가 움직이지 않으며 반응시간 $t-t'$ 사이에 실린더 로드는 비로소 엔드 스트로크(end stroke)

까지 움직이게 된다. 이때 작동조건인 유량, 유압 및 오리피스 직경비 등이 바뀔 경우 이 파형은 Fig. 5의 이점쇄선과 같은 형태로 변하여 나타나게 된다. 이때 응답시간 t_y 는 응답시간 t_x 에 비하여 많이 지연되어 나타남을 볼 수 있다.

유압배관 내에 오리피스 직경비와 유량 및 압력을 변화시켜 적용할 경우 응답시간차 $\Delta t' (= t_y - t_x)$ 만큼의 변화를 가져오게 된다.

3.1 작동압력변화에 따른 응답시간변화

유압계통에서 오리피스 직경비중 일반적으로 가장 많이 적용되는 범위인 $\beta=0.2\sim 0.4$ 의 경우, 일정한 유량에서 사용압력의 변화에 대한 응답시간 실험결과는 Fig. 6~7과 같다. 일정한 유량에서 작동압력증가에 따른 응답시간변화는 감소하는 특성을 보여주었다. 이 응답시간은 전파유동에서 유체내부의 음속에 영향을 받는다. 이때 음속(c)은 $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ 로 표현된다. 여기서 유압유와 같은 액체의 경우 압력이 증가하면 체적탄성계수 K 는 증가하게 되므로 이러한 응답시간 변화가 감소하는 특성으로 나타났다. 여기서 ρ 는 밀도이다.

3.2 유량변화에 따른 응답시간변화

오리피스 직경비범위가 $\beta = 0.2\sim 0.4$ 의 경우, 일정한 압력에서 작동유량의 변화에 따른 응답시간

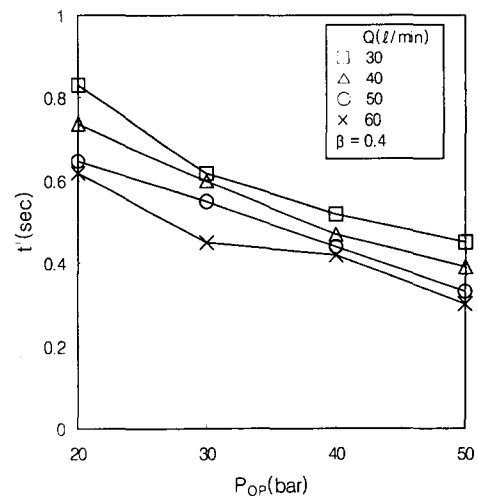


Fig. 6 The response time in the various operating pressure(at $\beta=0.4$)

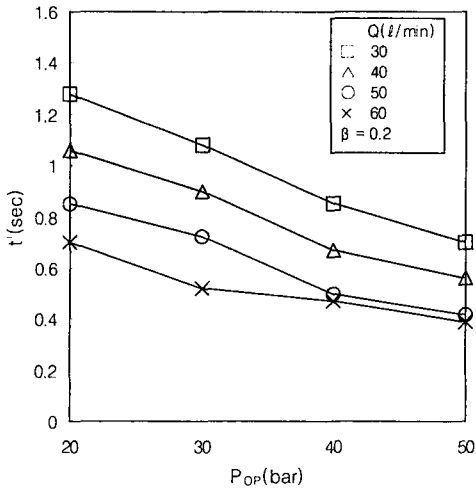


Fig. 7 The response time in the various operating pressure(at $\beta=0.2$)

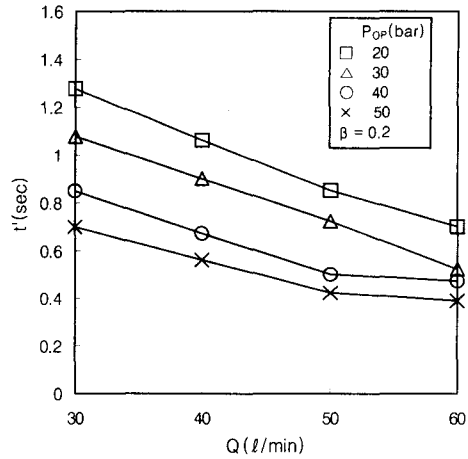


Fig. 9 The response time in the various flow rate(at $\beta=0.2$)

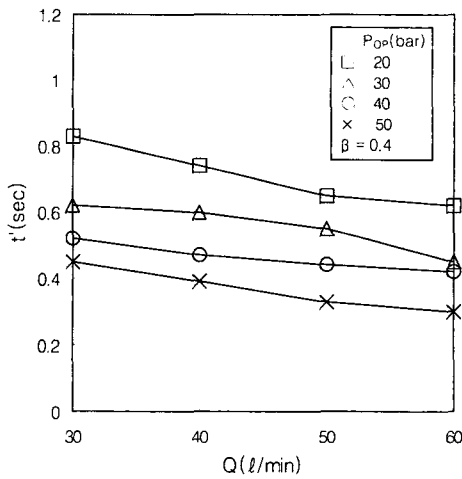


Fig. 8 The response time in the various flow rate(at $\beta=0.4$)

실험결과는 Fig. 8-9와 같다. 일정한 압력에서 유량증가에 따른 응답시간의 변화는 감소하는 특성을 보여주었다. 이 응답시간은 계통 내에서 유량의 증가에 따라 유속이 증가하여, 충격치가 유속으로 전달될 때 응답시간 변화에 영향을 주게 된다.

3.3 오리피스 직경비 변화에 따른 응답시간변화

3.3.1 각 유량별 응답시간

유압계통에서 작동압력이 30bar와 50bar의 경우 각 유량별로 오리피스 직경비의 변화에 따른 응답시간 실험결과는 Fig. 10~11과 같다. 응답시간은 각 유량에서 오리피스의 직경비 β 의 감소에 따라 길어지는 특성을 보여주었다.

3.3.2 각 압력별 응답시간

유압계통에서 작동유량이 30l/min와 50l/min의 경우 각 압력별로 오리피스 직경비의 변화에 따른 응답시간 실험결과는 Fig. 12~13과 같다. 여기서 응답시간은 각 압력에서 오리피스의 직경비 β 의 감소에 따라 길어지는 특성을 보여주었다. 또한 $\beta=0.4$ 이하의 경우 응답시간은 급속히 길어지는 특성을 보여주었다. 이것은 오리피스의 손실계수(K)가 증가되어 압력강하량이 커진 것에 기인한 것으로 판단된다.

주어진 실험범위 내에서 작동압력의 변화에 따른 응답시간변화량이 작동유량에 따른 변화보다 크게 나타났다. 따라서 오리피스 직경비, 작동유량 및 작동압력에 따른 $\Delta t'$ 의 변화특성을 고려하여 유압계통의 최적설계에 응용할 수 있다.

즉, 휠 로우더(wheel type loader)의 연속작업 경우를 예로 보면, 응답시간은 일반적으로 0.5초 이내에서 충격치를 고려하여 결정하게 된다.

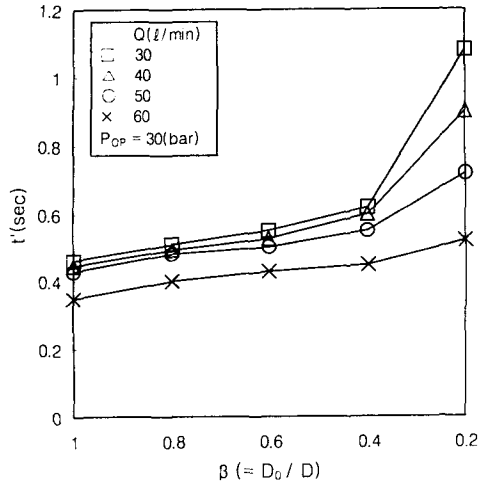


Fig. 10 The response time in the various orifice diameter ratio(at 30bar)

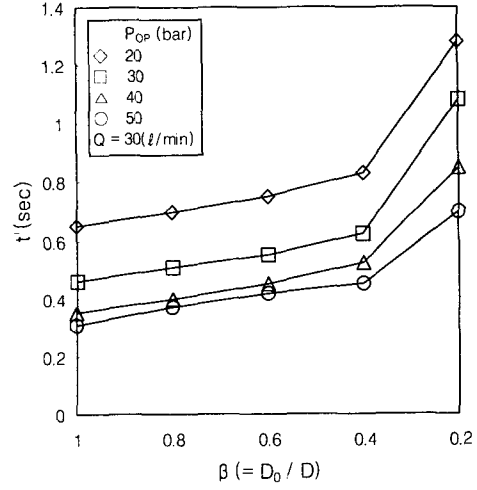


Fig. 12 The response time in the various orifice diameter ratio(at 30 l/min)

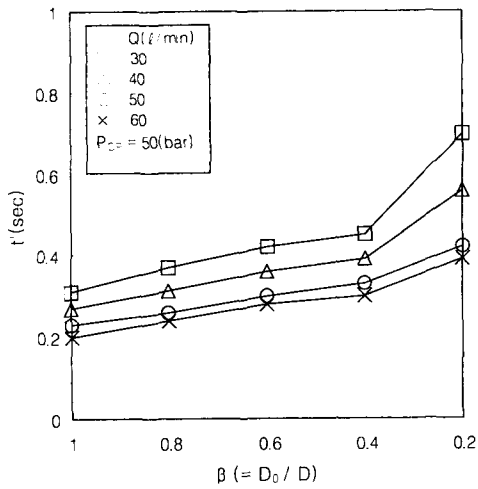


Fig. 11 The response time in the various orifice diameter ratio(at 50bar)

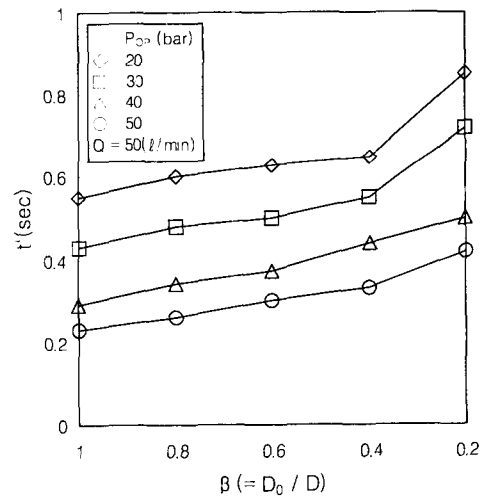


Fig. 13 The response time in the various orifice diameter ratio(at 50 l/min)

이때 Fig. 12의 결과를 이용하여 응답시간 및 작동압력, 오리피스 직경비 등을 결정할 수 있다.

유압계통에서 요구되는 응답시간은 각 유압계통의 용도와 기능에 따라 다르게 되므로, 본 실험결과를 유압계통의 요구조건에 따라 응용할 수 있다.

3.4 충격치 제어에 따른 응답시간변화

유압계통에서 오리피스 사용은 주로 유압계통

에서 발생하는 충격치 P'의 제어를 위해서이다. 이러한 오리피스의 사용은 본 실험에서 나타난 바와 같이 응답시간에 영향을 준다.

본 연구의 실험결과를 이용하여 충격치 제어에 따른 응답시간의 변화결과를 Fig. 14에 나타냈다. 모든 작동압력과 유량조건에서 오리피스에 의한 충격치의 제어량이 커질수록 응답시간이 상대적으로 길어지므로 유압계통의 요구조건에 따라 충

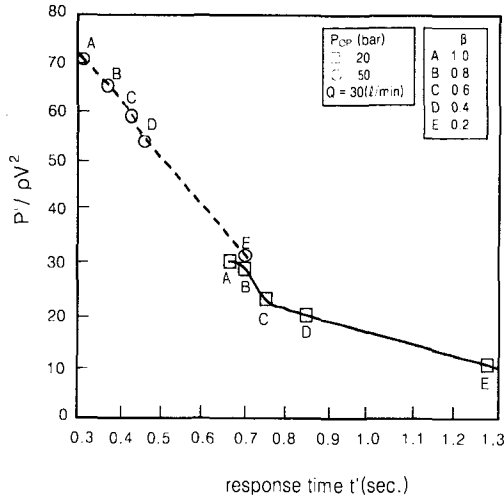


Fig. 14 The relation between the pressure shock and the response time

격지와 응답시간의 최적조건을 구해야 한다.

4. 결론

유압계통의 액추에이터 작동시 충격치 제어에 사용되는 유체기구가 응답시간에 미치는 영향을 실험을 통해 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 부부하상태에서 유압계통의 액추에이터 작동시 응답시간은 작동압력, 유량 및 오리피스 직경비 등의 변화에 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (2) 오리피스 직경비 β값이 작을수록 응답시간 변화량은 크게 나타나는 특성을 보여주었다.
- (3) 충격치 제어에 사용되는 오리피스는 응답시간의 지연을 초래하므로 유압계통의 용도와 기능에 따라 계통의 요구조건인 충격치와 응답시간의 최적조건을 구해야 한다.
- (4) 오리피스 직경비가 0.4이하일 때 응답시간은 급격히 길어지는 특징을 나타냈다.

참고문헌

(1) Reeves, W. W., 1997, "Technology of Fluid

Power," Delmar Publishers, pp. 261~264.
 (2) Reed, E. W. and Larman, I. S., 1985, "Fluid Power with Microprocessor Control," Prentice Hall, pp. 132~167.
 (3) McCloy, D. and Martin, H. R., 1973, "The Control of Fluid Power," Longlam Group Ltd., pp. 116~259.
 (4) Henke, R. W., 1986, "Fluid Power Systems & Circuits," Hydraulics & Pneumatics, pp. 1~33.
 (5) Goodwin, A. B., 1976, "Fluid Power Systems," Macmillan Press Ltd., pp. 78~112.
 (6) Andrew, P., 1991, "Hydraulics Pneumatics," Newnes Ltd., pp. 127~129.
 (7) Mike, C., and Richard, I., 1998, "Modeling, Identification, and Real-Time Control of Bucket Hydraulic System for a Wheel Type Loader Earth Moving Equipment," *Mechatronics*, pp. 863~885.
 (8) Joo Seong Lee, Kye Bock Lee, 2000, "An Experimental Study on the Control of Shock in the Hydraulic Actuator System Using the Orifice," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 24, No. 11, pp. 1506~1512.
 (9) Merritt, H. E., 1976, "Hydraulic Control System," John Wiley & Sons, pp. 76~132.
 (10) Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1993, "Fluid Transient in Systems," Prentice Hall, pp. 215~243.
 (11) J. S. Lee, K. B. Lee, C. G. Lee, 2001, "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.
 (12) Joo Seong Lee, Kye Bock Lee, 2001, "A study on the Shock Characteristics in the Hydraulic Power Shifting System of the Hydraulic Travel Motor," *Journal of the Korean Society of Industrial Application*, Vol. 4, No. 3, pp. 305~310.
 (13) Hydro Technik, 1995, "Operation Manual-Measuring Instruments," Hydro Technik, pp. 1~50.