

유체기구를 이용한 유압시스템의 충격치제어에 수반되는 응답시간 변화특성에 관한 연구

이 주 성* · 이 계 복** · 이 충 구**

A Study on the Response Time Characteristics Related to Shock Control in the Hydraulic System Using the Fluid Device

Joo Seong Lee and Kye Bock Lee and Chung Gu Lee

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

Abstract

Control of pressure transients 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 response time characteristics in the hydraulic system studied for the control of response time.

기호설명

A	: 단면적	t'	: 응답시간(response time)
V	: 유속	t	: 총 작동시간(operating time)
C _c	: 수축계수	P _{OP}	: 작동압력
P	: 압력	P _m	: 실린더 로드 이동중 유체압력
γ	: 비중량	P ₂	: 배압력
ΔP _f	: 마찰에 의한 압력강하	W _r	: 작업시 유동하중
g	: 중력가속도	ρ	: 밀도
ΔP	: 오리피스 전후의 압력강하	β	: 오리피스 직경비(=D ₀ /D)
C _v	: 속도계수	Δt'	: 응답시간차
Q	: 유량	D ₀	: 오리피스 내경
C _d	: 유량계수	D	: 유압배관 내경
K	: 보정계수		

하첨자

1	: 오리피스 통과전 위치
0	: 오리피스 위치
vc	: vena contracta 위치
2	: 오리피스 통과후 위치

* 회원, 충북대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 충북대학교 기계공학부

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

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

1. 서론

유압계통에서 액추에이터의 반응시간제어를 위해서는 주로 공급배관 또는 회귀배관 내에 유체기구를 설치하여 교축에 의한 제어를 하며, 이때 미터인 제어계통(meter-in control system) 또는 미터아웃 제어계통(meter-out control system)을 이용한다. 미터인 제어계통 또는 미터아웃 제어계통은 역류방지 밸브(non-return valve)를 사용하여 액추에이터의 작동방향과 속도를 달리 조절할 수 있게 하므로써 액추에이터의 급속한 회귀작동이 필요한 경우에 응용할 수 있다. 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 압력변화 특성을 연구하였다. 여기서 유압계통의 속도제어를 위하여 계통 내의 공급압력, 회귀압력 및 질량유동의 관계를 구하고 이때 액추에이터에 걸리는 유동하중의 변동에 따라 정상상태의 액추에이터 속도가 일정치 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 스푼(spool)작동에 따른 반응시간특성을 압력강하량, 공급유량 및 실린더 체적의 함수로 해석하였다. 그러나 이러한 연구는 유압계통의 조종자가 조작하려는 계통의 힘 즉 작동력(operating power)에 대한 반응시간 제어는 가능하지만, 유압계통의 조종자가 체감적으로 느끼는 응답특성인, 유압계통 조작직후부터 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 Fig. 1과 같은 절차에 의해 진행된다. 먼저 무부하상태에 있는 액추에이터는 중립에 위치한 조종레버를 조종자가 작동시킴에 따라 실린더 로드가 움직이기 시작하는 작동시작단계로 접어든다. 이때 액추에이터의 전

방에 작업물질인 유동하중이 존재할 경우 실린더 로드는 작업물질이 있는 곳까지 무부하 이동 후 작업물질에 접촉함과 동시에 유동하중이 액추에이터에 걸리게 되며 이때부터 액추에이터는 무부하상태가 아닌 유동하중상태가 된다. 이러한 유압계통의 작동과정 중에서 조종자가 액추에이터의 응답시간특성을 느끼는 부분은 Fig. 1에서 조종레버 작동 후 무부하상태의 액추에이터가 작동을 시작하는 것을 느끼는 순간까지의 과정에 소요되는 응답시간 t' 에 의존하게 된다. 이 응답시간 t' 는 유압계통작동시 발생하는 충격값과도 관계가 있다. 즉, 유압계통의 작동시 발생하는 충격값을 최소로 하기 위해 유체기구를 이용할 경우 응답시간 t' 는 충격값의 크기와 상반되는 결과를 보이며, 충격값을 줄일수록 응답시간 t' 는 길어지게 된다. 그러나 응답시간 t' 는 유압장치의 종류에 따라 다소 다를 수 있으나 자동화 라인에 아닌 사람이 직접 조종하는 기계장치의 경우 0.2초 이내가 이상적이며 0.5초를 넘을 경우는 사용하기 어렵다.⁽⁷⁾ 이것은 기계적으로 조종되는 자동화 라인의 경우는 0~1초 또는 그 이상까지도 프로그램에 의해 제어 가능하지만 사람이 조종할 경우에는 사람의 지각능력과 조종작업의 불균형으로 연속작업의 어려움을 겪게 되는 것이다. 따라서 이 작동초기의 응답시간이 부적절할 경우 조종자가 작업장치를 효율적으로 연속운전하기 어려운 심각한 문제가 발생되며, 이때 무부하상태에서

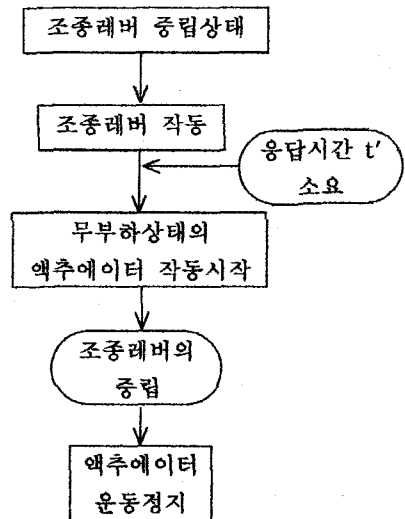


Fig. 1 The working flow of the actuator

조종레버의 작동초기에 일어나는 응답시간특성이 매우 중요하게 된다. 이 작동초기 응답시간은 유압계통의 압력이나 유량의 제어에 따라 변화되며, 이는 유압계통의 충격치제어에 수반되는 변화특성중의 하나이다. 이때 유압계통의 작업조건인 유량과 유압변화에 따라 조종자가 체감적으로 느끼는 응답시간특성을 설계 및 제어하기 위해서는, 유동부하가 무부하 조건인 상태에서 응답시간 변화특성에 대한 연구가 필요하다.

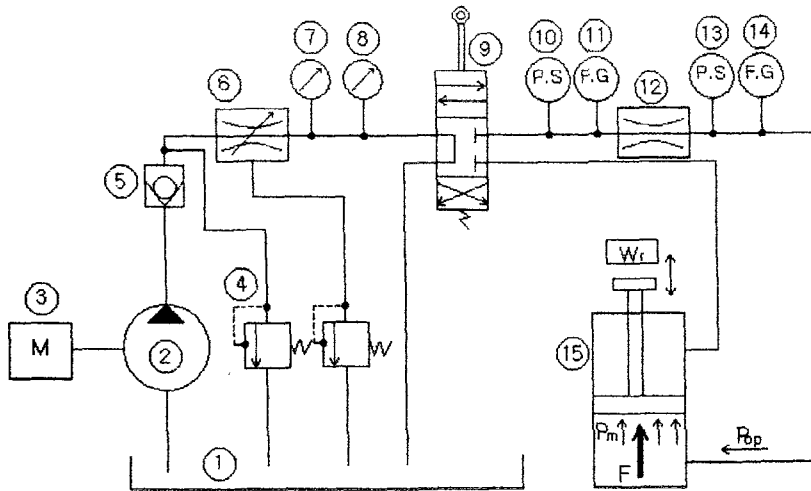
유압계통의 이러한 응답시간 결정시 이용할 수 있는 응답시간 변화특성에 대한 정량화된 설계자료는 현재 매우 부족한 실정이며, 실제 예비모델 제작 후 수 차례의 실험을 통한 시행착오방법에 의존하므로 시간적 경제적 측면에서 많은 손실을 감수하고 있다.⁽⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 유체기구인 오리피스를 고압의 유압장치회로 내에 설치하

고, 유압장치에서 실린더 로드와 속도변화에 영향을 주는 함수인 작동압력과 유량을 파일로트 라인에서 일반적으로 사용되는 범위 내로 설정하고, 조종자의 작업초기 조건인 무부하상태로 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 설계 제작한 유압계통의 기본구성은 Fig. 2와 같다. 유압펌프에 의해 토출된 유압유는 압력제어밸브와 유량제어밸브에 의해 해당 작동값으로 조정된다. 이 압력과 유량은 방향전환밸브의 조작에 따라 공급배관에 설치된 오리피스를 통해 액주에이터를 작동시킨다. 여기서 방향전환밸브의 조작에 따른 액주에이터의 응답시간이 적절하지 못할 경우 조종자가 유압계통을



- 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. 2 Schematic diagram of experimental model

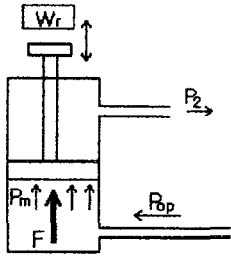


Fig. 3 The hydraulic cylinder

연속 운전하는데 장애를 받게 된다.

2.2 응답특성이론

유압계통 조작시 발생하는 응답시간의 변화특성은 사용유체의 압축성, 적용밸브의 포트 크기(port size), 작동압력 및 작동유량의 크기 등에 따라 매우 다양하게 반응한다. Fig. 2와 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 통과 전, 하첨자 0는 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.

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,

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

$$V_{vc} = \frac{C_v}{[1 - (C_c A_0 / A_1)^2]^{1/2}}$$

$$\times \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma}} \quad (4)$$

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, Q는 유량을 나타낸다. 유량계수 $C_d = C_c C_v$ 로 두고 유압계통의 배관 내 오리피스 통과전후의 압력강하 ΔP 에 대하여 정리하면

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

보정계수를 K라 두고 정리하면

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

여기서 압력강하량은 오리피스와 압력 및 유량에 의해 변화시킬 수 있으며 이는 응답시간 t'에 영향을 주게된다. 즉,

$$t' \propto f\left(\frac{\Delta P}{P_{OP} \cdot Q}\right) \quad (9)$$

이 식에 상기 식(8)을 대입하면

$$t' \propto f\left(\frac{K \rho V_0^2}{2 \cdot P_{OP} \cdot Q}\right) \quad (10)$$

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 t는 총 작동시간이 되며 따라서 t-t'는 실린더가 움

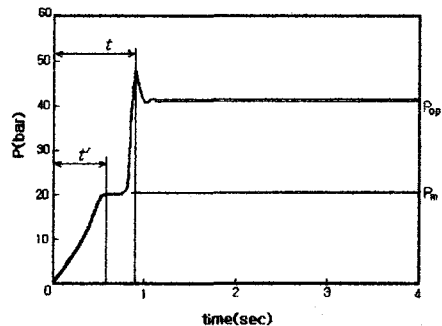


Fig. 4 Typical curve of a response time in the hydraulic systems

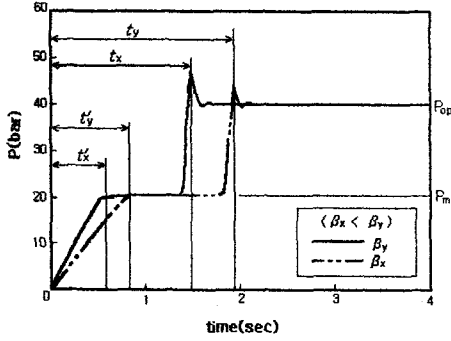


Fig. 5 Typical response time variation by actuator operation

적인 반응시간이 된다. 응답시간 제어를 위해 유압실린더의 공급배관에 유체기구중의 하나인 오리피스를 적용할 경우 압력강하는 Fig. 5와 같이 유압계통의 총 작동시간 t 에 영향을 주며, 이는 동시에 작동초기의 응답시간 t' 에 영향을 미치게 된다. 즉, 유압실린더의 배관라인에 오리피스의 직경비가 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 되며, 이것은 유체기구들 중의 하나인 오리피스를 적용하므로써 유압계통의 작동시 발생하는 충격치를 완화시키면 동시에 응답시간변화를 야기시키므로 효율적인 최적의 조종환경을 위해서 적절한 응답시간의 확보가 필요하다.⁽¹¹⁾ 따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용하는 작동압력과 작동유량 범위 내에서 유체기구를 이용하여 응답시간 t' 의 변화특성을 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 bar에서 50 bar 범위로 한다.
- 4) 작동유의 유량은 30 l/min에서 60 l/min 범위로 한다.
- 5) 액추에이터는 실린더 로드가 인장방향으로 운동하는 조건으로 하고, 이때 실린더 로드는 무

부하상태로 한다.

6) 유압배관 내 유속은 3~4 m/s 범위로 한다.

7) 오리피스의 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 측정하였다.⁽¹²⁾ 측정된 신호는 증폭된 후 A/D변환기를 통해 컴퓨터에 저장되고 프린터로 출력되며 측정오차범위는 $\pm 0.25 \%$ 이다. 이때 유량계는 기어방식을 적용하였으며 압력계측기의 대역폭(band width)은 30 kHz를 적용하였다.

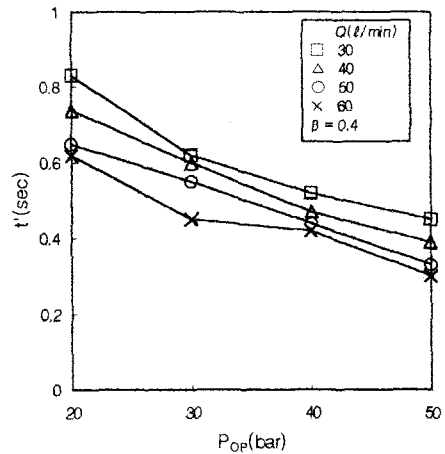


Fig. 6 The test results of response time in the various operating pressure(at $\beta=0.4$)

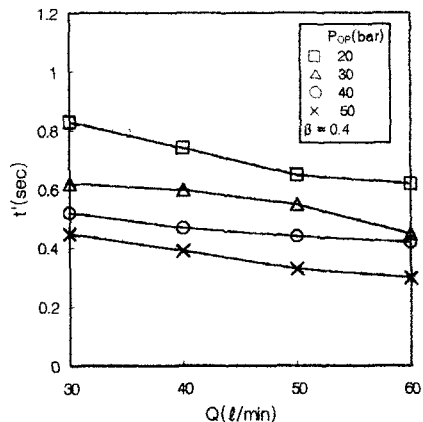


Fig. 7 The test results of response time in the various flow rate(at $\beta=0.4$)

3. 실험결과 및 고찰

본 실험장치에서 액추에이터의 응답시간 변화 특성을 실험한 결과는 기본적으로 Fig. 4와 같은 파형으로 나타난다. 조종레버의 조작으로 방향변환밸브를 변속하면 응답시간 t' 가 흐르는 동안은 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 이점체선과 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 다양하게 변화시켜 적용할 경우 응답시간차 $\Delta t' (= t'_y - t'_x)$ 만큼의 변화를 가져오게 되는 것이다.

3.1 작동압력변화에 따른 응답시간변화 실험결과

유압계통에서 오리피스 직경비중 일반적으로 가장 많이 적용되는 범위인 $\beta=0.2\sim 0.4$ 의 경우, 사용압력의 변화에 따른 각 사용유량별 응답시간 실험결과는 Fig. 6과 같다. 여기서 응답시간은 유량 및 사용압력이 증가할수록 짧아지고, 사용압력증가에 따른 응답시간의 변화는 각 유량에서 각각 감소하는 특성을 보여주었다.

3.2 작동유량변화에 따른 응답시간변화 실험결과

유압계통에서 많이 적용되는 오리피스 직경비 범위인 $\beta=0.2\sim 0.4$ 의 경우, 사용유량의 변화에 따른 각 사용압력별 응답시간 실험결과는 Fig. 7과 같다. 여기서 응답시간은 유량 및 사용압력이 증가할수록 짧아지고, 유량증가에 따른 응답시간의 변화는 각 사용압력에서 각각 감소하는 특성을 보여주었다.

3.3 응답시간 실험결과 응용

3.3.1 작동압력변화에 따른 응답시간 응용

실험범위 내에 있는 모든 작동유량, 작동압력 및 유체기구 직경비에서 이러한 방법으로 응답시간변화율을 Fig. 8~9에서 읽어 활용할 수 있다. 먼저 작동압력변화에 따른 응답시간 변화특성의 경우, 실험에서 유체기구로 사용한 오리피스 직

경비(β)의 전체범위인 $\beta=0.2\sim 1.0$ 과 작동유량변화의 전체범위인 $30\text{ l/min}\sim 60\text{ l/min}$ 의 모든값에서 작동압력만을 변화시킬 경우 응답시간은 모든 유량범위와 모든 오리피스 직경비 범위에서 Fig. 8과 같은 변화율을 보여주었다. 여기서 $t'/t_{(20\text{bar})}$ 는 응답시간 변화율을 나타내며, 작동압력이 20 bar 일 때를 기준으로 백분율로 나타낸 것이다. 유압계통의 주어진 오리피스직경비에서 작동유량과 작동압력을 변화시킬 경우 Fig. 8의 응답시간 변화율을 적용하여 유압계통의 응답시간 변화값을 구해 낼 수 있다. 즉, 해당되는 응답시간변화율 $t'/t_{(20\text{bar})}$ 값을 Fig. 8에서 읽은 후 식(10)의 보정계수 K 에 적용하면 응답시간 t' 를 응용 설계할 수 있다.

3.3.2 오리피스 직경비변화에 따른 응답시간 응용

실험에 적용한 작동압력 및 작동유량의 전체 범위 내인 조건에서 오리피스의 직경비 β 를 변화시킬 경우 응답시간은 모든 작동압력과 작동유량 범위에서 Fig. 9와 같은 변화율을 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. 9의 응답시간 변화율을 적용하여 유압계통의 응답시간 변화값을 구

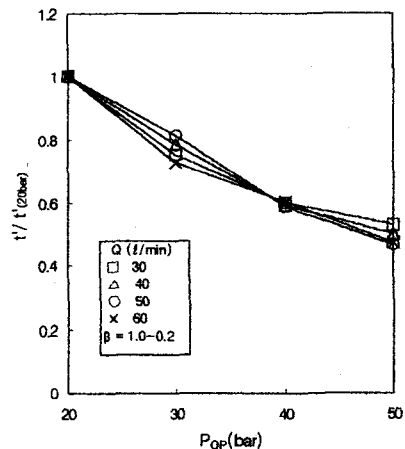


Fig. 8 The distribution chart of the ratio of response time variation in the variable operating pressure

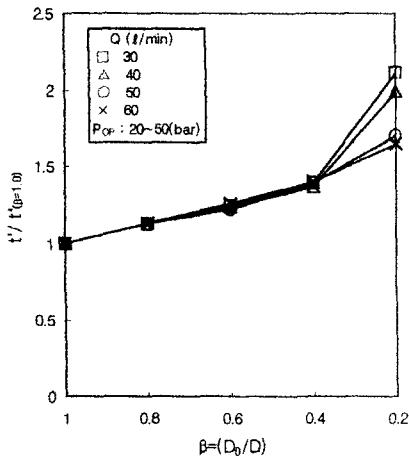


Fig. 9 The distribution chart of the ratio of response time variation in the variable ratio of orifice diameter

해낼 수 있다. 즉, 해당되는 응답시간 변화율 $t'/t'_{(\beta=1.0)}$ 값을 Fig. 9에서 읽은 후 식 (10)의 보정계수 K에 적용하면 응답시간 t' 를 응용 설계할 수 있다.

4. 결론

유압계통의 액추에이터 작동시 유체기구를 이용하여 응답시간 변화특성에 대한 실험을 수행하였다. 실험범위로 설정한 작동압력, 유량 및 오리피스 직경비 등의 변화를 적용한 실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 오리피스 직경비 β 가 작을수록 응답시간 변화량은 크게 나타나는 특성을 보여주었다.
- (2) 오리피스 직경비가 0.4이하일 때 응답시간은 급격히 길어지는 특징을 나타냈다.
- (3) 각 조건별 $t'/t'_{(\beta=1.0)}$ 값을 곡선화 하여 보정계수로 설계에 활용할 수 있음을 보여주었다.
- (4) 유압계통 작동시 응답시간의 변화는 각 작동조건에 영향을 받으며, 이때 각 조건에 따른 응답시간 변화량은 오리피스의 경우가 가장 크고 작동유량의 경우가 가장 작게 나타났다.

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) 이주성, 이계복, 2000, "오리피스를 이용한 유압액추에이터의 충격치 제어특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제11호, 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) Hydro Technik, 1995, "Operation Manual-Measuring Instruments," Hydro Technik.