

# 오리피스를 이용한 유압 액추에이터의 충격치 제어특성에 관한 실험적 연구

이 주 성\* · 이 계 복\*\*  
(2000년 4월 28일 접수)

## An Experimental Study on the Control of Shock in the Hydraulic Actuator System Using the Orifice

Joo Seong Lee and Kye Bock Lee

**Key Words:** Control of Shock(충격제어), Orifice(오리피스), Diameter Ratio(직경비), Hydraulic Actuator(유압 액추에이터), Hydraulic System(유압계통)

### Abstract

Control of shock may be important in the hydraulic system and necessary to avoid failure and to improve the efficiency of operation. This study addresses the design and use of an orifice to provide the desired control of the hydraulic actuator system. The experimental apparatus is an idealization of an automobile shift system. Control is accomplished by installing three different types of orifices at appropriate locations in the system. Experimental results show that the orifice can be used to obtain the control of shock and the control level depends on the orifice size, orifice type, operating pressure and flow rate.

### 기호설명

$C_c$  : 오리피스 수축계수  
 $C_v$  : 오리피스 속도계수  
 $C_d$  : 오리피스 유량계수  
 $F$  : 작동력  
 $m$  : 질량  
 $a$  : 가속도  
 $W$  : 부하  
 $g$  : 중력가속도  
 $V_1$  : 초기속도  
 $V_2$  : 후기속도  
 $t$  : 시간  
 $\zeta$  : 충격치 보정계수  
 $Q$  : 작동유량

$\Delta P$  : 압력강하  
 $P'$  : 충격치  
 $\Delta P'$  : 오리피스 유무에 따른 충격치 차  
 $P_{OP}$  : 작동압력  
 $D$  : 배관 직경  
 $D_0$  : 오리피스 내경  
 $L$  : 오리피스 폭  
 $\beta$  : 오리피스 직경비(= $D_0/D$ )  
 $\rho$  : 밀도

### 1. 서론

배관 내에 흐르는 유체는 주로 밸브나 오리피스를 사용하여 유량이나 유속을 제어하게 된다. 따라서 이러한 유체기구를 사용하는 경우에 대해 유량 측정이나 유속변화 특성에 대한 연구가 많이 수행되고 있지만<sup>(1~2)</sup> 배관의 양 끝단이 열려 있는 개방형(open type)이 대부분이다. 오리피스의

\* 충북대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 충북대학교 기계공학부

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

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

경우 수축계수  $C_c$ , 속도계수  $C_v$ , 그리고 유량계수  $C_d$ 와 유량과의 관계가 확립되었고 이것을 오리피스와 배관의 단면적비로 정량화하려는 연구가 수행되었다. 그러나 이러한 연구결과는 유압 배관이 밀폐형(closed type)에 가까운 액추에이터를 포함하는 배관에는 적용하기 어렵다. 유압계통 압력이 높은 유압장치에서는 기기가 대형화되고 기기효율이 떨어져 경제성이 없기 때문에 특별한 이유가 없는 한 낮은 압력으로 유지하는 것이 바람직하다. 따라서 원하는 압력강하( $\Delta P$ )를 얻기 위해 오리피스가 많이 사용된다. 그러나 이때 오리피스 양단의 압력차가 크면 캐비테이션이 발생할 가능성도 높으므로 이에 대한 연구도 수행되고 있다.<sup>(3)</sup> 개방형 배관은 정상상태의 유동현상이 유지될 수 있으나 액추에이터가 포함된 밀폐형 배관은 순간적인 흐름에 이어 바로 흐름이 강제로 차단되는 유동현상이 일어나게 된다. 따라서 고압의 유압장치 회로 내에 있는 유압 액추에이터는 작동시에 배관의 시작점 또는 끝점에서 순간적으로 충격을 발생시키는 특성을 갖게 된다. 이러한 과도현상은 유압계통의 안전에 치명적인 영향을 줄 수 있고 유압계통 성능의 저하를 가져오게 된다. 이때 발생하는 순간 충격치를 제어하기 위해 밀폐형 배관 내에 오리피스가 경험적인 방법에 의해 많이 사용되지만 오리피스의 충격치 제어특성에 대한 정량적인 연구결과는 보고된 것이 거의 없다. Moody<sup>(4)</sup>는 관에서 갑작스런 유동의 방출(blowdown)이나 차단에 의해 야기되는 반력을 시간과 공간의 함수로 특성곡선법(Method of characteristics)을 사용하여 해석적으로 구하였다. Wright 등<sup>(5)</sup>은 오리피스 등의 유체기구를 사용하여 과도현상을 제어할 때 요동압력이 계통 내에 설치된 유체기구에서 반사되지 않는 조건들을 구하였다. 그러나 이러한 결과의 적용범위는 매우 제한적이다. 따라서 실제로 충격이 발생하는 유압장치 설계시에 충격치 제어에 대한 정량화된 설계자료의 부족 때문에 예비모델을 제작하여 수 차례의 실험을 통한 시행착오법에 의존하게 되므로 시간적, 경제적 측면에서 많은 손실을 감수하고 있다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 3가지 형상의 오리피스를 선정하여 고압을 사용하는 유압장치 회로 내에 설치하고, 유압 액추에이터의 작동시 발생하는 충격치 제어특성에 대한 실험을 유압장치에서 일반적

으로 사용되는 과일로드 작동압력과 유량범위 내에서 수행하여 오리피스의 제어특성을 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 충격발생 원리

액추에이터가 유압력을 받아 작동할 때 Fig. 1과 같이 작동력(F)과 액추에이터의 부하(W)와의 관계가  $F \leq W$ 의 조건일 때는 로드는 고정상태를 유지하며  $F > W$  조건이 만족될 때 로드는 속도를 갖게된다. 여기서  $F \leq W$ 에서  $F > W$  조건까지 변하여 초기속도를 갖는 위치와  $F > W$  조건에서 로드의 속도가 다시 0으로 되는 위치에서 각각 유압작동회로는 충격(shock)이 발생하게 된다. 이는 뉴턴의 제 2법칙에 의한 가속도에 영향을 받기 때문이다.

즉, 가속도는 다음과 같이 정의될 수 있다

$$F = m a \quad (1)$$

여기서,

$$m = \frac{W}{g}, \quad a = \frac{V_2 - V_1}{t} \quad (2)$$

만약, 초기속도  $V_1 = 0$ 일 경우

$$a = \frac{V_2}{t} \text{로 된다.}$$

여기서 유압회로의 충격치 제어설계를 위하여 충격치 보정계수를  $\zeta$ 로 두면

$$a = \zeta \frac{V_2}{t}$$

따라서 충격치는 다음과 같이 정의된다.

$$\therefore F = \zeta \frac{W}{g} \frac{V_2}{t} \quad (3)$$

Fig. 1의 액추에이터가 Fig. 2와 같은 유압계통에 의해 작동될 때 로드(rod)의 작동이 행정길이만큼 이동 후 멈출 때 충격이 발생하게 된다. 식(3)에서 보정계수  $\zeta$ 가 1인 경우 로드는 순간적으로 정지되는 경우이며 이때 충격치는 최대가 된다. 유압계통에서 로드의 정지는 순간적은 아니지만 짧은 시간 내에 정지하게 된다. 이 경우 로드의 순간적인 정지시 발생하는 충격치와는 그 값이 다른 충격이 발생하게 되며, 이 충격치를 정확히 예측할 수 있다면 충격에 의한 유압계통의 성능저하와 치명적인 손상을 방지할 수 있다.

본 연구에서는 오리피스를 사용하여 유량조절과 압력손실에 의해 계통내의 작동압력을 조절하여 충격치의 크기를 제어하게 된다.

2.2 실험장치

본 연구에서 설계 제작한 유압장치의 기본구성

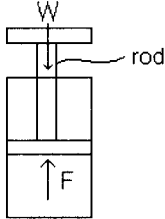
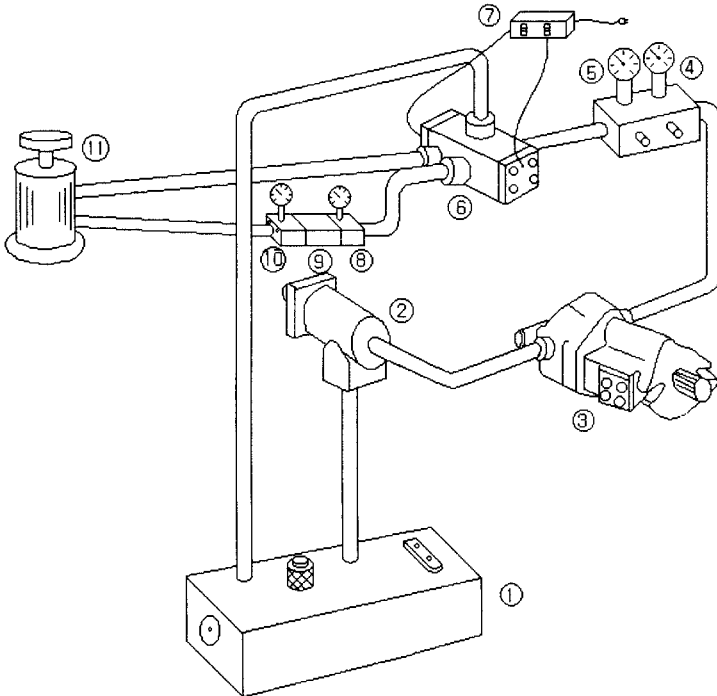


Fig. 1 General view of the actuator

은 Fig. 2와 같다. 먼저 유압펌프에 의해 토출된 고압 유압유는 릴리프 밸브에 의해 해당 작동압력으로 조정된다. 이 압력은 방향전환 밸브를 변속레버로 변속함에 따라 해당 액추에이터로 고압의 유압유를 보내고 해당 액추에이터는 행정만큼 이동한 후 급정지하게 된다. 여기서 급정지에 따른 순간적인 압력변화는 유압회로 내에 충격을 발생시킨다. 유압회로에 많이 사용되는 자동변속기 장치는 이와 동일한 원리로 작동하게 된다.

2.3 실험방법

실험은 유압 액추에이터를 포함한 파일롯트 유압장치에서 일반적으로 운전되는 유량 및 압력범위에서 수행되었고 실험조건은 다음과 같다.



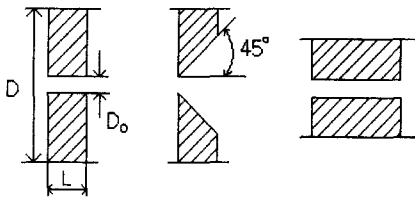
- ① Oil tank, ② Oil filter, ③ Hydraulic pump, ④ Discharge control valve,
- ⑤ Pressure control valve, ⑥ Direction control valve, ⑦ Operating switch,
- ⑧ Pressure gauge P1 & flow meter Q1, ⑨ Orifice, ⑩ Pressure gauge P2 & flow meter Q2, ⑪ Hydraulic actuator

Fig. 2 Schematic diagram of experimental model

- 1) 주위온도는 실내온도로 한다.
- 2) 작동유의 온도는 55℃를 기준으로 ± 10%의 오차범위 내에서 실험한다. 이는 실험이 진행됨에 따라 고압으로 인한 작동유의 온도상승을 피할 수 없으므로 이를 고려하여 실험 온도범위를 유지시켰다.
- 3) 작동유의 압력은 20 bar에서 50 bar 범위로 한다.
- 4) 작동유의 유량은 20 lpm에서 60 lpm 범위로 한다.
- 5) 액추에이터는 로드(rod)가 인장방향으로 운동하는 조건에서 실험하고 이 때 로드는 상방향으로 운동하도록 설치한다.
- 6) 유압배관 내 유속은 3~4 m/s 범위로 한다. 이 때 유압배관의 직경 D는 유량에 따라 9 mm~16 mm 범위로 한다.
- 7) 오리피스는 3가지 형태별로 적용하고<sup>(6)</sup> 그 면적비 ( $\beta^2$ )에 따라 충격치 제어특성을 연구한다.

Fig. 3은 본 실험에서 사용한 오리피스의 형상을 나타낸다. Table 1은 실험에 사용된 오리피스의 직경비  $\beta$  값과 실험조건을 나타낸다.

본 실험에서는 액추에이터의 작동으로 인해 발생하는 충격치와 오리피스에 의한 충격치 제어특



(1) Type 1 (2) Type 2 (3) Type 3(D<sub>0</sub><L)

Fig. 3 The orifice types for the test

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Condition
$\beta (= \frac{D_0}{D})$	$\beta_1=1.0, \beta_2=0.8,$ $\beta_3=0.6, \beta_4=0.4,$ $\beta_5=0.2$
Pressure(bar)	20, 30, 40, 50
Flow rate(lpm)	20, 30, 40, 50, 60

성을 압력센서를 오리피스 전후에 설치하여 측정하였다.<sup>(7)</sup> 측정된 압력신호는 증폭된 후 A/D 변환기를 통해 컴퓨터에 저장되고 프린터로 출력된다. 측정오차 범위는 ± 0.25%이다. 주어진 실험 조건에 따라 실험을 수행하여 유량, 유속, 오리피스의 형태, 오리피스의 크기에 따른 충격치 제어특성을 분석한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 실험장치에서 유압 액추에이터의 작동시 발생하는 충격에 의한 맥동압력은 오리피스의 유, 무에 따라 Fig. 4와 같은 압력파형을 나타낸다. 여기서 P'값이 실질적인 유압 액추에이터 작동시의 충격치를 나타내며 작동조건에 따라 변하게 된다. 이러한 충격치는 유압계통의 안정성을 해치게 되므로 적절한 제어가 필요하다.<sup>(8-10)</sup> 오리피스는 그림과 같이 충격치의 최대값을 감소시키거나 전체 계통압력의 반응시간에 영향을 미치므로 이를 고려한 최적설계가 요구된다. 본 연구에서는 오리피스에 의한 충격치 크기의 제어에 대해 연구하였다. 그림에서 보면 오리피스가 있는 경우와 없는 경우에  $\Delta P'$ 만큼의 충격치 감소가 발생한다. 이는 오리피스의 면적비( $\beta^2$ )와 유체와의 접촉면에 따라 유량감소와 압력강하가 발생한 결과로서, 이러한 변수들에 대한 충격치 제어특성을 파악하여야 한다.

#### 3.1 오리피스의 면적비( $\beta^2$ )에 따른 충격치 제어특성

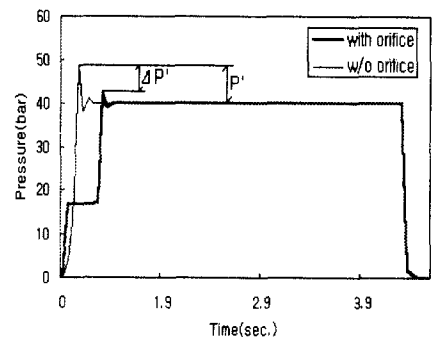


Fig. 4 Typical pressure variation by actuator operation

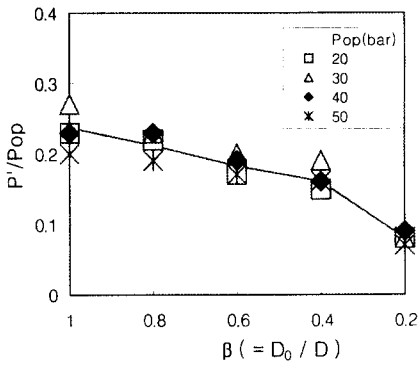


Fig. 5 The shock pressure for various orifice diameter ratio

일정압력과 유량조건에서 오리피스의 직경비에 따른 충격치의 제어특성을 연구하였다. Fig. 5는 유량이 30 lpm이고 압력이 일정한 조건에서 오리피스 면적비에 따른 충격치의 최대값을 나타낸다. 여기서 충격치  $P'$ 는 오리피스 면적비가 감소함에 따라 모든 작동압력에서 일정 비율로 감소하다가 면적비가 4%(직경비  $\beta=0.2$ )에서  $P'$ 의 감소율이 크게 증가하는 것을 보여준다. 따라서 충격치의 크기 제어시 원하는 제어량에 따라 오리피스의 크기를 설계할 수 있다. 이러한 현상은 모든 형태의 오리피스에서 똑같이 나타난다. 즉, 충격치의 절대값을 제어하는 관점에서는 오리피스 면적이 관면적의 4%( $\beta=0.2$ )일 때 효과가 상대적으로 증대되는 것을 보여준다. 오리피스 면적비가 16%( $\beta=0.4$ )일 때 충격치는 33% 감소하였고, 면적비가 4%( $\beta=0.2$ )일 때는 충격치가 66.4%까지 크게 감소하였다.

3.2 일정압력에서 유량변화에 따른 충격치 특성

일정압력에서 면적비가 16%( $\beta=0.4$ )인 오리피스를 사용한 경우 유량변화에 따른 충격치 특성을 Fig. 6에 나타냈다. 모든 경우에서 유량  $Q$ 가 증가함에 따라 충격치가 커지는 것을 보여준다. 여기서 각 점들은 각 압력별 유량변화에 따른 충격치( $P'/Pop$ )를 나타내며 실선으로 보여주는 것은 이 충격치들을 각 오리피스 형태별로 피팅(fitting)한 값을 나타낸다. 이때 표준편차는 0.075 범위 내에 있었다.

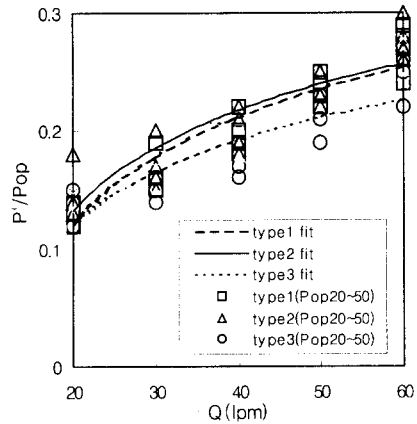


Fig. 6 The shock pressure for various flow rate

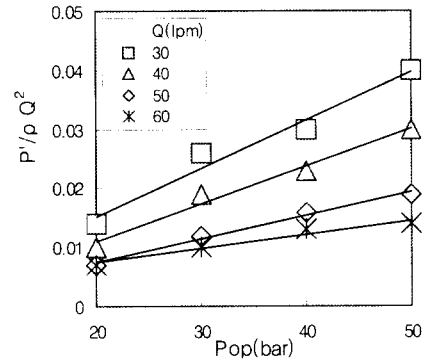


Fig. 7 The pressure rise for various operating pressure(type 1 orifice)

3.3 일정유량에서 압력변화에 따른 충격치 특성

일정유량에서 오리피스를 장착하고 압력변화에 따른 충격치 특성을 Figs. 7~9에 나타냈다. 모든 경우에서 작동압력이 증가함에 따라 충격치가 커지는 것을 보여준다. 따라서 작동압력이 충격치의 크기에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

3.4 오리피스 형태에 따른 충격치 제어특성

일정한 압력과 유량에서 오리피스 형태에 따른 충격치 변화를 연구하였다. Fig. 10은 압력 30 bar, 유량 30 lpm에서의 충격치 변화특성을 나타낸다. 모든 형태에서 충격치는 오리피스 면적비의 감소에 따라 줄어들고 있음을 보여주며 특히 면적비가 4%( $\beta=0.2$ )에서 충격치 제어특성은 급격히 증가되는 것을 보여주고 있다. 여기서 세번

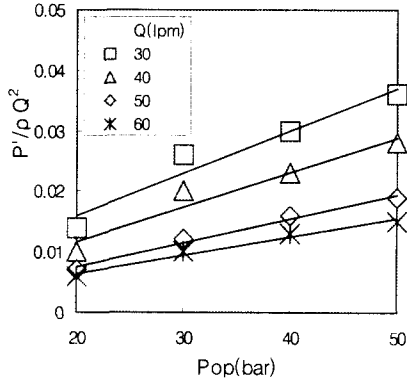


Fig. 8 The pressure rise for various operating pressure(type 2 orifice)

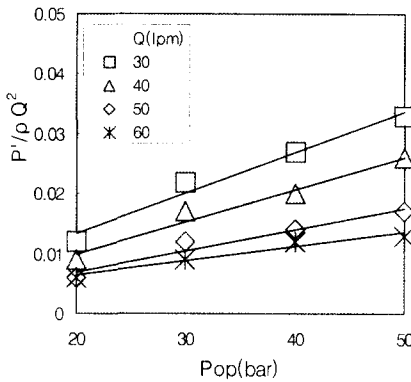


Fig. 9 The pressure rise for various operating pressure(type 3 orifice)

째 형태의 오리피스가 상대적으로 충격치를 비교적 많이 줄이는 것을 보여준다. 이는 각 오리피스가 갖고 있는 압력강하  $\Delta P$ 와 유량제어의 영향에 따른 것이다. 즉, 세 번째 형태의 오리피스는 다른 형태에 비해 유체통과시 오리피스 마찰면이 크므로  $\Delta P$ 의 크기가 증가되어 상대적으로 작동압력이 낮게 된다. 따라서 충격치의 크기를 감소시키게 된다.

#### 4. 결론

고압 액추에이터를 사용하는 유압회로에 발생하는 충격치를 오리피스를 사용하여 제어하는 실험

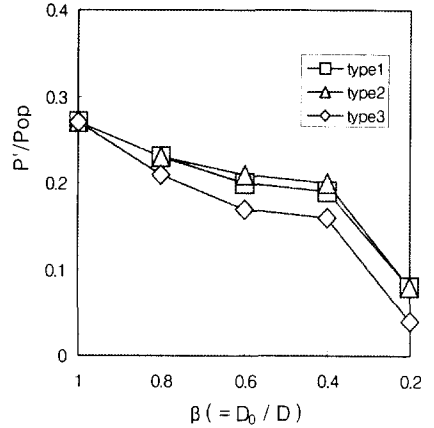


Fig. 10 The shock pressure variation for orifice types

험을 수행하였다. 작동압력과 유량변화에 따라 실험을 통해 다음과 같은 충격치 제어특성을 얻었다.

(1) 본 실험에서 수행된 작동압력과 유량에서 오리피스의 면적비가 감소함에 따라 충격치는 일정비율로 감소하였다. 또 면적비가 16% ( $\beta = 0.4$ ) 보다 작아지면 그 감소율이 더 큰 폭으로 증대되어 충격치 제어효과가 더욱 커지는 것을 보여 주었다.

(2) 유압 액추에이터 작동시 배관 내 조건이 오리피스 면적비와 유속이 동일할 경우 유량변화에 따라 충격치는 각 작동압력에서 일정하게 증가한다. 이는 유속 및 오리피스 면적비가 일정할 경우 모든 작동압력에서 유량변화에 따른 충격치 변화율을 동일하게 적용할 수 있음을 나타낸다.

(3) 유압 액추에이터 작동시 배관 내 조건이 오리피스 면적비와 유속이 동일할 경우 작동압력이 증가함에 따라 충격치는 각 유량에서 일정하게 증가한다.

(4) 본 실험에 사용한 세가지 형태의 오리피스 모두 충격치를 줄여주는 특성을 보여주었고 세 번째 형태의 오리피스가 가장 효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 오리피스 크기에 따른 충격치 제어효과를 작동조건에 따라 예측할 수 있다.

(5) 상기 결과는 오리피스를 이용한 유압액추에이터의 충격치 제어설계에 있어서, 유량변화 또는 압력변화에 따른 충격치의 변화특성을 정량적으로 보여준다.

## 후 기

본 실험에 있어서 미국의 유압전문회사인 Sun Hydraulics Co.의 R & D Part 및 Q. C Part의 협조에 감사 드린다.

## 참고문헌

- (1) Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1993, *Fluid Transient in Systems*, Prentice Hall.
- (2) Moody, F. J., 1990, *Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics*, John Wiley & Sons.
- (3) Wiggert, D. C. and Sundquist, M. J., 1979, "The Effect of Gaseous Cavitation on Fluid Transients," *J. Fluids Engineering, ASME Transactions*, Vol. 101, pp. 79~86.
- (4) Moody, F. J., 1973, "Time-Dependent Pipe Forces Caused by Blowdown and Flow Stoppage," *J. Fluids Engineering, ASME Transactions*, Vol. 95, pp. 422~428.
- (5) Wright, S. J., Wylie, E. B. and Taplin, L. B., 1983, "Matched Impedance to Control Fluid Transients," *J. Fluids Engineering, ASME Transactions*, Vol. 105, pp. 219~224.
- (6) Idelchik, I. E., 1994, "Handbook of Hydraulic Resistance," CRC Press, Inc., pp. 208~235.
- (7) Hydro Technik, 1995, "Operation Manual-Measuring Instruments," Hydro Technik.
- (8) 小栗幸正, 1979, "油壓と回路," 理工學社, pp. 13~17.
- (9) 汁 茂, 1998, "油壓裝置設計の實際," たいが出版, pp. 41~50.
- (10) 田中裕久, 1991, "油壓のデジタル制御と應用," 近代圖書, pp. 43~66.
- (11) Goodwin, A. B., 1976, "Fluid Power systems," Macmillan Press Ltd., pp. 78~112.
- (12) Vockroth, R. W., 1994, "Industrial hydraulics," Delmar Publishers Inc., pp. 43~60.
- (13) Henke, R. W., 1986, "Fluid power systems & circuits," Penton Publishing, Inc., pp. 7~31.