

方向制御 로직 밸브의 動特性에 관한 研究*

李 一 永 · 吳 世 旻**

釜山水産大學 · **統營水産專門大學

(1988년 10 월 30일 접수)

A Study on Dynamic Characteristics of Directional Control Logic Valve

Ill-Yeong LEE and Se-Kyung OH**

National Fisheries University of Pusan, **Tong-Yeong Fisheries Junior College

(Received October 30, 1988)

A cartridge type hydraulic logic valve consists of simple two port valve whose poppet is closed or opened by means of pressure signal of a pilot line. Accordingly, the logic valve can be used not only for direction, flow and pressure control purpose but also for versatile function valve which enables all above mentioned functions. In addition, the valve has little internal leakage and pressure loss, superior response characteristics and easiness in making small block type valve.

The above mentioned good performances being recognized recently, the logic valve has been used widely in the large scale hydraulic system such as a hydraulic press system, for the performance requirements of high speed operation and precise control characteristics. However, there are scarce reports until now, except for a few ones from Aachen Institute of Technology in West Germany, so it is necessary to be studied on development of a new logic valve suitable for the purpose of various usage, or technical development and investigation for practical application.

This paper showed that the static and dynamic characteristics of a logic valve when the logic valve is used for directional control, to investigate the relations between the valve operating characteristics and the valve design conditions. From the above mentioned procedure, it was ascertained that the valve operation characteristics obtained by numerical analysis showed good agreements with experimental results.

The representative results obtained are as follows ;

1. During the valve is closing, the poppet velocity is almost constant in the logic valve.
2. The pilot pressure P_3 and the resistance R in the pilot line have much influences on the valve operation time.
3. Spring strength have not such a severe influence on the valve operating time.
4. The operation characteristics of the logic valve can be estimated with good accuracy comparatively by numerical analysis with the equations describing poppet motion.

* 본 연구는 1986년도 문교부 자유과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

記號說明

A_0 : $\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2) / 4$	P_2 : 파일럿室的 압력
A_1 : $\pi \cdot D_1^2 / 4$	P_3 : 파일럿 供給壓力
A_2 : $\pi \cdot (D_2^2 - D_3^2) / 4$	Q : 主밸브 供給流量
C : 流量係數	q : 파일럿 供給流量
C_f : 摩擦係數	R : 파일럿 流體抵抗常數
D_0 : 밸브 本體 直徑	Re : 레이놀즈 數
D_1 : 밸브 시트 直徑	$S(y)$: 開口面積
D_2 : 밸브 상부 直徑	t : 時間
D_3 : 스텐레스棒 直徑	V : 流速
f : 推力係數	y : 밸브 變位
g : 重力加速度	y_0 : 初期變位
h : 壓力水頭	ρ : 流體의 密度
K : 스프링 常數	γ : 流體의 比重量
L : 길이	ν : 流體의 動粘度
M : 밸브의 等價質量	ϕ : 밸브의 圓추각
P_0 : 밸브 出口壓力	δ : $y \cdot \sin \phi$
P_1 : 밸브 入口壓力	

序 論

카트리지형 油壓 로직 밸브(Cartridge type hydraulic logic valve)는 밸브의 작동이 파일럿 라인(Pilot line)의 壓力 信號에 의하여 팝핏(Poppet)이 開閉하는, 구조가 매우 간단한 2포트(Port) 밸브이다. 따라서 파일럿 壓力 信號의 制御에 의하여 方向 制御, 流量 制御, 壓力 制御 밸브로서 사용할 수 있을 뿐 만 아니라 이들 기능을 동시에 가지는 다기능 밸브로서도 사용할 수 있다. 그 외에도 內部 누설이 적고 응답성이 우수한 점, 壓力損失이 적은 점, 다수의 밸브를 블록에 조립하여 적은 형상으로 만들기 쉬운 점 등의 장점을 가지고 있다.

로직 밸브의 이상과 같은 우수한 점이 인식되어 근년, 油壓 프레스 등의 大容量 油壓 裝置의 高速, 高精度 制御용으로 脚光을 받게 되었다. 그러나 이 로직 밸브를 사용하는 油壓 制御에 관한 研究는 西獨의 Aachen工大 油壓研究所에서 얼마간의 研究成果^{1~4)}가 보고되어 있을 뿐으로, 이에 관련된 연구는 國內外를 막론하고 매우 드문 형편이다. 따라서 밸브의 使用 目的에 부합하는 새로운 로직 밸브의 開發이나 로직 밸브의 실

제 응용을 위한 技術 開發 및 研究가 절실히 요청되고 있다.

本 研究에서는 로직 밸브를 사용하는 경우 使用 頻度가 가장 높은 方向 制御 로직 밸브를 대상으로, 로직 밸브 및 油壓 시스템의 여러가지 파라미터가 로직 밸브의 開閉 特性에 미치는 影響을 명확히 究明할 목적으로, 實驗 回路를 구성하여 밸브의 開閉 特性을 조사하였다. 아울러 밸브의 開閉에 관한 運動方程式을 導出하여 數值 計算을 행하고, 여기서 얻어지는 計算 結果와 實驗 結果를 비교 검토하였다.

理論 解析

本 研究에서 대상으로 하는 로직 밸브의 구조를 Fig.1에 나타내었다. 이 밸브에서의 흐름을 擴大흐름[파핏경 擴大部側으로의 흐름]으로 생각하여, 入口側[펌프측] 流路의 直徑을 D_1 , 入口側 壓力를 P_1 으로, 出口側[負荷側] 壓力를 P_0 로 표시한다. 한편 파일럿側 供給 壓力를 P_3 , 파핏 상부의 파일럿실의 壓力를 P_2 로 나타낸다.

로직 밸브의 動特性 평가를 위하여 필요한 기초 자료인 밸브 流量 特性, 밸브에 작용하는 定常 流體力, 非定常 流體力를 조사하고 여기서 얻

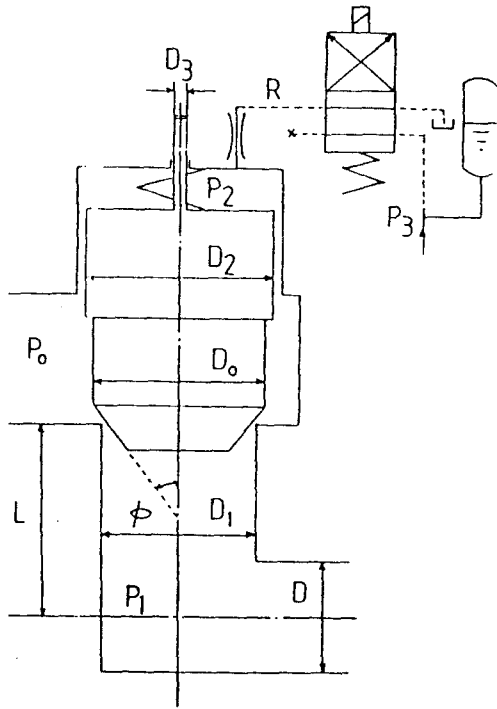


Fig. 1. Schematic diagram of logic valve.

어진 식들을 사용하여 밸브의 動特性을 나타내는 基礎式을 유도하였다.

1. 밸브의 靜特性

(1) 밸브의 流量特性

本 研究에서 대상으로 하는 로직 밸브의 流量特性은 主 밸브의 流量特性과 파일럿 通路의 流量特性으로 나누어 생각할 수 있다.

먼저 主 밸브의 流量特性을 나타내는 척도로서 파핏 밸브[Poppet valve]의 流量係數 C에 대하여 조사할 필요가 있다. 流量係數 C는 다음의 (1)식에서와 같이 정의된다.

$$Q = C \cdot S(y) \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad (1)$$

그러나 이 流量係數 C의 값은 밸브내의 流動狀態 즉 Re 數에 따라 광범위하게 변화하는 특징을 가지고 있다.

파일럿 밸브의 流量係數에 관한 연구 성과는 오래전부터 많이 보고되고 있으며, 그 가운데서도 市川의 연구⁽¹⁾에서는 파핏 밸브의 流量係數 C가 광범위한 밸브 開度 範圍 및 流動狀態의 範圍에서 $Re\delta/R_1$ 만의 함수로 표시할 수 있음을 理論

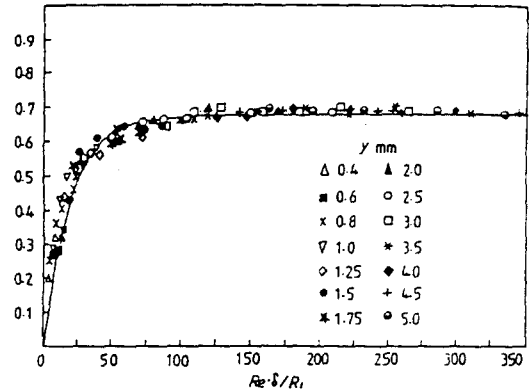


Fig. 2. Flow coefficient of main poppet valve.

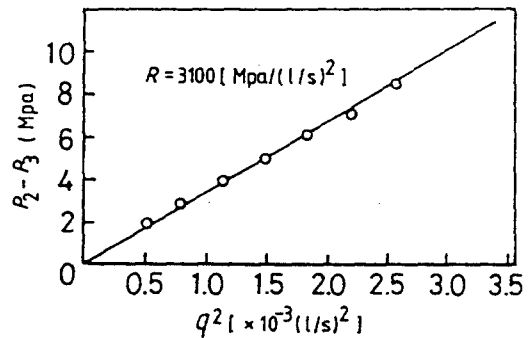


Fig. 3. Flow coefficient of pilot line resistance.

計算 및 實驗을 통하여 제시하고 있다. 여기서 δ 및 Re 는

$$\delta = y \cdot \sin\phi,$$

$$Re = V_m \cdot \delta / \nu$$

[단, $V_m = Q/S(y)$,

$$S(y) = \pi y \cdot \sin\phi \cdot$$

$$(D_1 - 0.5 y \cdot \sin 2\phi)]$$

을 나타낸다. 본 연구에서는 市川의 방식을 도입하여, C와 $Re \cdot \delta / R_1$ 의 관계를 나타내는 實驗式을 구하고자 한다. Fig. 2는 파핏 밸브의 流量特性을 나타낸 것이다. Fig. 2의 實驗 자료로부터 얻은 近似式을 (2)식으로 나타내며, 그림에서는 實線으로 나타내었다.

$$C = 0.68(1 - e^{-0.053 Re \cdot \delta / R_1}) \quad (2)$$

한편, 파일럿 通路의 流量特性은 實驗에 의하여 구하였다. 實驗 結果는 Fig. 3에 나타낸 바와 같으며 이 결과로부터 다음의 實驗式을 얻을 수 있다.

$$P_3 - P_2 = R \cdot q^2 \quad (3)$$

여기서 $R=3100[\text{MPa}/(l/s)^2]$ 이다. 파일릿 通路에서 運動方程式은 다음식으로 표시된다.

$$q=A_2 \cdot \dot{y} \quad (4)$$

여기서 $A_2=\pi(D_2^2-D_3^2)/4$ 이며, (4)式을 (3)式에 대입하면 다음식과 같이 된다.

$$P_2=P_3-R \cdot A_2^2 \cdot \dot{y}^2$$

$$A_2 \cdot P_2=A_2 \cdot P_3-R \cdot A_2^3 \cdot \dot{y}^2 \quad (5)$$

(2) 파릿 밸브에 작용하는 定常流體力 및 非定常流體力

定常 流動하는 流體에 의하여 파릿 밸브가 받는 힘 즉 定常 流體力 F_s 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.⁶⁾

$$F_s=2f(P_1-P_0)C^2 \cdot S(y) \quad (6)$$

여기서 $f=\cos\phi - S(y)/A_1$, $A_1=\pi D_1/4$ 이고, C 는 파릿 밸브의 流量係數를 나타낸다.

한편, 파릿 밸브를 통하는 流體의 流動이 非定常的일 때 流動의 非定常的 要素에 의하여 파릿 밸브에 작용하는 힘 즉 非定常 流體力 F 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F=-\rho LC \sqrt{2(P_1-P_0)/\rho} \cdot \pi \cdot \sin\phi \cdot (D_1-y \cdot \sin 2\phi)y \quad (7)$$

定常 流體力이 작용하는 방향은 (6)式에서 f 의 값이 $f>0$ 인 범위에서는 밸브가 닫히는 방향과 동일하고 f 의 값이 $f<0$ 인 범위에서는 밸브내의

流動이 擴大흐름인 경우는 유체의 흐름방향과 반대로 작용하게 된다. 이에 반하여 非定常 流體力은 밸브가 작동하는 방향과 항상 반대로 작용하며 밸브의 開閉에 저항하는 성질이 있고, 그 크기는 壓力差 ΔP , 원추각 ϕ 및 밸브 速度 y 에 따라 정해진다. 일반적으로 非定常 流體力을 감소시키기 위하여, 方向 制御 로직 밸브의 원추각은 어느정도 큰 값으로 하고 있다.

Fig.4와 Fig.5에 定常 流體力 및 非定常 流體力의 計算置를 나타내었다. 그림에서 밸브가 닫힐 때의 定常 流體力은 變位가 $y=0.2\text{cm}$ 부근에서 비교적 큰 값을 가지며, 밸브가 닫힘에 따라 감소한다. 밸브 變位가 비교적 큰 領域 즉 變位 $y=0.3\text{cm}$ 부근에서는 (6)式의 f 의 값이 0으로 되고, 따라서 y 의 값이 0.3cm보다 큰 領域에서는 定常 流體力은 밸브를 여는 방향으로 작용함을 알 수 있다. 또한 主 밸브의 壓力差 ΔP 의 값이 증가할수록 定常 流體力의 절대치가 증가함을 알 수 있다. 非定常 流體力은 밸브가 닫힐 때 變位 $y=0.15\text{cm}$ 부근까지는 밸브 닫힘과 더불어 증가하다가, 밸브가 완전히 닫힘에 따라 非定常 流體力은 0으로 됨을 알 수 있다.

2. 밸브의 動特性

方向 制御 로직 밸브를 급격히 닫을 때, 밸브

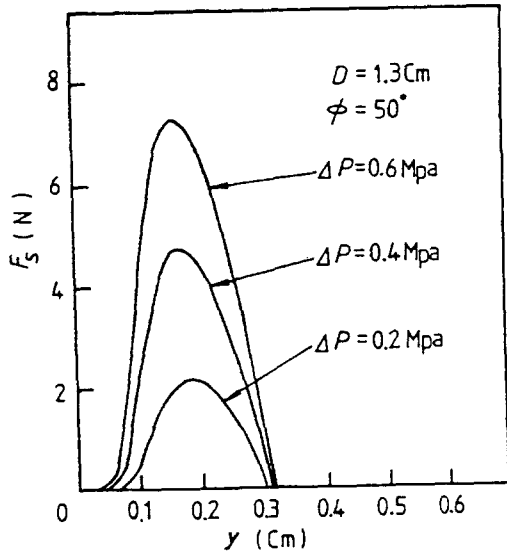


Fig. 4. Steady state flow force (theoretical values).

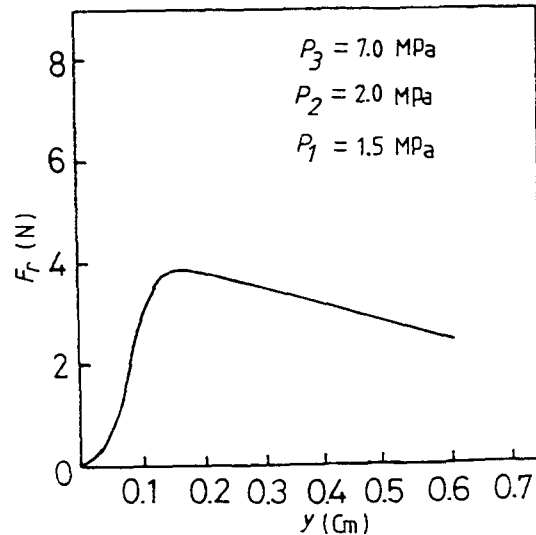


Fig. 5. Unsteady state flow force (theoretical values).

에 관련된 여러 파라미터가 밸브의 동특성에 미치는 영향을 이론적으로 조사하기 위한 밸브의 운동방程式을 세우기 위하여 다음과 같은 가정을 설정한다.

- 1) 파핏과 밸브 시트와의 중첩부분의 틈에서 壓力 積分은 생략한다.
- 2) 파일럿 通路에서 流體의 壓縮에 의한 流量 變化는 무시 한다.
- 3) 파일럿 通路의 電磁 切換 밸브는 순간적으로 작동된다.

質量 M 인 파핏 밸브에 작용하는 힘으로는 앞에서 언급한 定常 流體力, 非定常 流體力 외에도 파핏 上下에 작용하는 壓力 밸런스, 스프링 力, 파핏의 마찰력이 있으며, 위의 가정하에서 이들 힘들을 고려하여 다음의 運動方程式이 얻어진다.

$$M\ddot{y} + (C_1 + C_1 \cdot D_1 - C_1 \cdot C_2 y - RA^2 \dot{y})\dot{y} + Ky + C_3 + Ky_0 + C_4 = 0 \quad (8)$$

여기서

$$C_1 = \rho LC \sqrt{2(P_1 - P_0)} / \rho \pi \sin \phi$$

$$C_2 = \sin 2\phi$$

$$C_3 = 2(P_1 - P_0) C^2 S(y) (\cos \phi - S(y) / A_1)$$

$$C_4 = A_2 \cdot P_3 - A_1 \cdot P_1 - A_0 \cdot P_0$$

이다.

여기서 y_0 는 스프링의 初期 變位(스프링의 자유길이-밸브가 닫힐 때의 스프링 길이), C_1 는 파핏 밸브 습동부의 摩擦係數를, K 는 스프링 常數를 나타낸다.

本 研究에서는 위의 非線形 微分方程式을 Runge-Kutta법으로 數值 積分하여 밸브의 동특성을 해석한다. 로직 밸브의 靜特性和 동특성 해석에 사용된 常數값들은 다음과 같다.

$D_0 = 1.62$	(cm)
$D_1 = 1.3$	(cm)
$D_2 = 1.7$	(cm)
$D_3 = 0.4$	(cm)
$L = 3.5$	(cm)
$R = 3100$	(MPa/(l/s))
$y_0 = 1.5$	(cm)
$\sigma = 0.884$	(g/cm ²)
$\nu = 0.7$	(cm ² /s)
$\phi = 50$	(deg.)

實驗裝置 및 方法

實驗에 사용한 로직 밸브의 斷面圖 및 實驗 裝置의 油壓 回路를 Fig.6 및 Fig.7에 나타내었다.

本 實驗에서 사용한 로직 밸브는 큐슨이 없는 면적비($A_1 : A_0$)가 2 : 1, 파일럿 容量 1.6cm³, 스트로크 0.69cm, 시트 直徑 13mm인 파핏형 밸브이다. 밸브 상부에는 差動變壓器로 變位를 측정하기 위하여 직경 4mm의 스테레스 봉을 설치하였다. 油壓源으로는 容量 100l/min의 主 回路用 펌프와 容量 10 l/min인 파일럿 回路用 펌프를 사용하였다.

파일럿 通路는 電磁 밸브에서 切換되어 絞縮 流路를 통하여 파일럿室로 흐르도록 하였다. 로

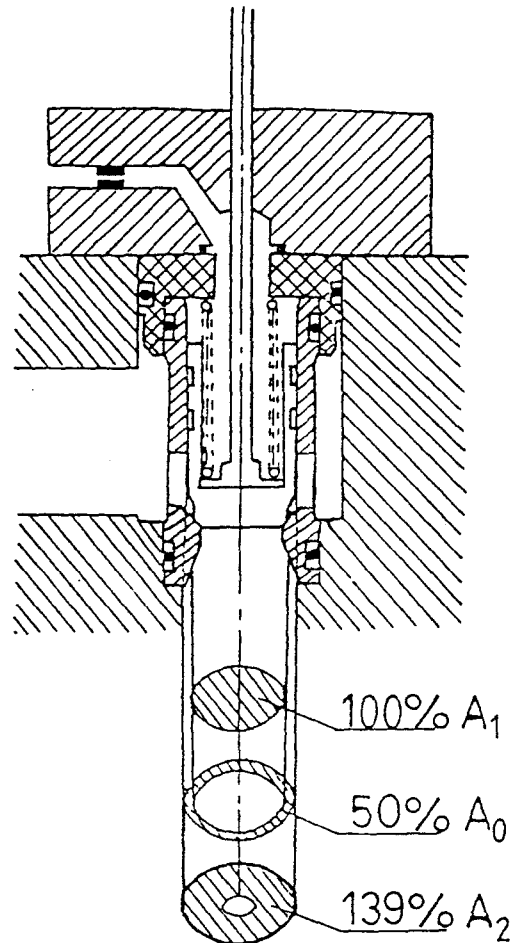
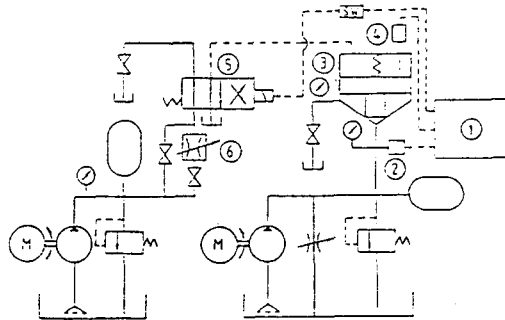


Fig. 6. Sectional diagram of logic valve.

직 밸브 前後의 壓力과 파일럿室의 壓力은 스트레인 게이지식 壓力 變換機로, 밸브 變位는 差動 變壓器로 측정하고, 스트레인 증폭기 및 직류 증폭기를 통하여 메모리스코프, X-Y플로터로 기록하였다.



- 1. amp, memoryscope
- 2. pressure transducer
- 3. logic valve
- 4. L.V.D.T
- 5. solenoid valve
- 6. flow control valve

Fig. 7. Experimental apparatus.

結果 및 考察

(1) 로직밸브의 열림壓力, 닫힘壓力

Fig. 8에 밸브가 열리기 시작하는 壓力 및 닫히는 壓力과 파일럿 壓力과의 관계를 나타내었다. 그림에서 實線은 밸브 上, 下面에 작용하는 壓力에 의한 힘의 밸런스로부터 計算한 것이다. 열림이 시작되는 壓力과 닫히는 壓力의 差는 밸브의 구조, 加工 精度에 따라 발생하는 것으로 본 實驗에서 사용한 밸브에서는 이들 값들이 잘 일치되고 있으며, 따라서 시트의 구조, 加工 精度가 적정 상태임을 알 수 있다.

(2) 로직밸브의 動作特性

Fig. 9에 밸브 變位 過程의 實驗 및 計算 結果의 一例를 나타내었다. 이 그림에서 양자는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 밸브 닫힘 初期에 약간의 차이가 발생하고 있는 것은, 計算에서는 파일럿 電磁 切換 밸브가 순간적으로 작동하는 것으로 가정하고 있으나 실제로는 10ms 정도의 시간이 소요되는데 基因하는 것으로 생각된다.

Fig. 10에는 P_1 , P_0 를 일정한 값으로 고정한

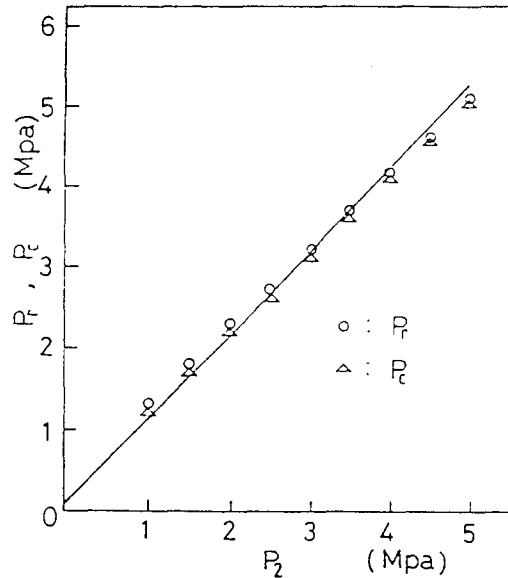


Fig. 8. Logic valve opening pressure and closing pressure.

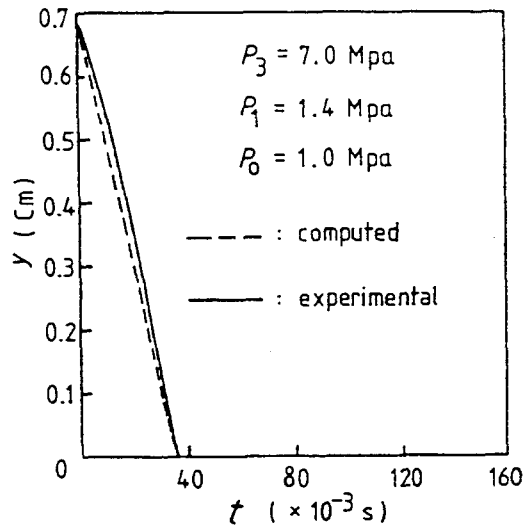


Fig. 9. Relation between valve lift and valve closing time.

상태에서 밸브 닫힘 時間과 파일럿 壓力 P_3 와의 관계를 나타내었다. 또 Fig. 11에는 P_3 를 일정한 값으로 고정한 상태에서 P_1 , P_0 와 밸브 닫힘 時間과의 관계를 나타내었다. 어느 경우에서나 밸브 닫힘 時間은 파릿에 작용하는 힘의 크기에 의하여 결정됨을 알 수 있다. Fig. 10, Fig. 11에 나타낸 바와 같이 數值 計算値와 實驗値는 잘 일

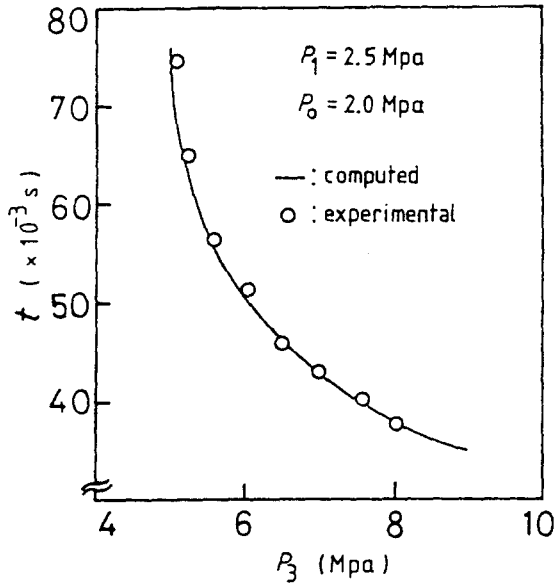


Fig. 10. Relation between valve closing time and pilot line pressure.

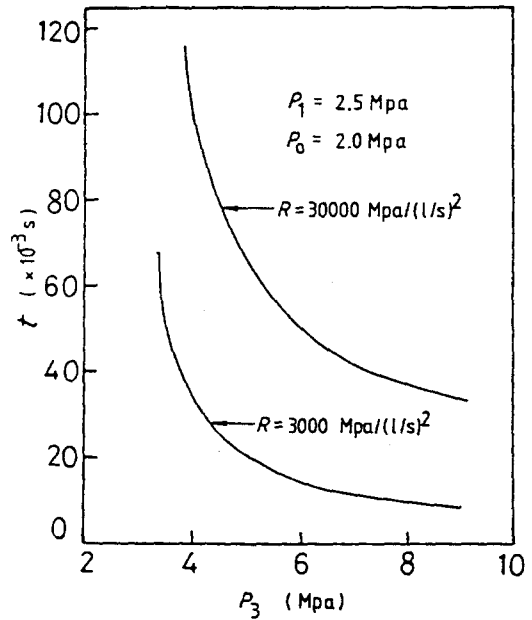


Fig. 12. Relation between valve closing time and pilot line resistance.

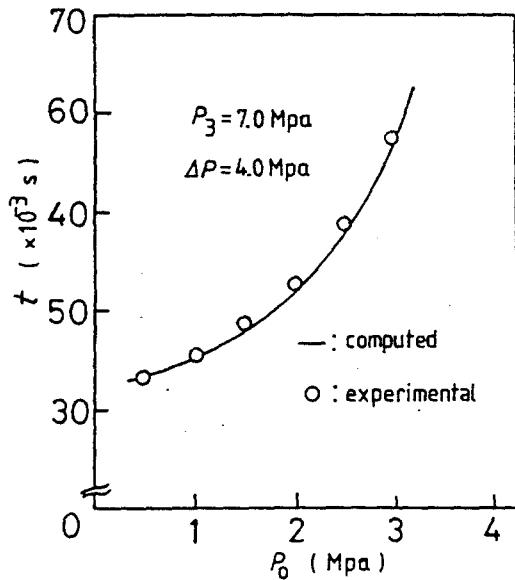


Fig. 11. Relation between valve closing time and discharge pressure.

치하고 있으며, 따라서 數值 計算에 의하여 로직 밸브의 動特性이 비교적 정확하게 예측될 수 있음을 확인하였다.

Fig. 12는 P_1 , P_0 를 일정한 값으로 고정한 상태에서 P_3 및 파일럿 通路의 絞縮 抵抗 R 의 값

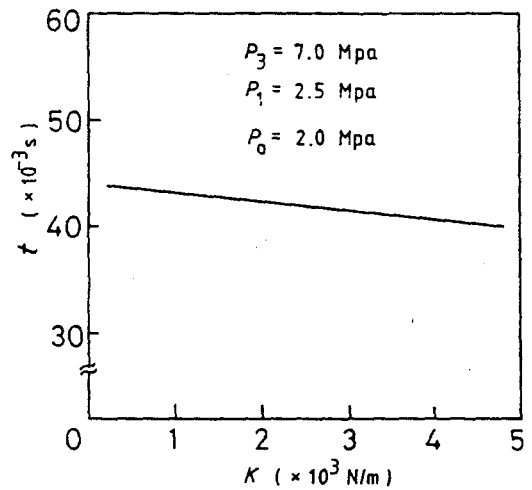


Fig. 13. Relation between valve closing time and spring constants.

이 밸브 닫힘 時間에 미치는 影響을 조사한 數值 計算 結果를 나타낸 것이다. 이 그림에서 R 의 값이 변화함에 따라 밸브 닫힘 時間이 현저하게 달라짐을 알 수 있으며, 따라서 R 의 값을 적절히 선택함으로써 닫힘 時間의 조정이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 13은 스프링 常數 K 를 변화시킨 경우의

計算 결과이다. 그림에서 스프링 常數는 밸브 닫힘 時間에 그다지 影響을 미치지 않음을 알 수 있다. 즉 本 研究에서는 $K=686\text{N/m}$ 인 스프링을 사용하고 있으나 K 값이 이것의 10배에 가까운 5000N/m 인 경우에도 닫힘 時間의 차이는 큰 소함을 위의 計算 結果로부터 알 수 있다. 이러한 이유는 파킷 上下에 작용하는 壓力의 不平衡에 의하여 발생하는 힘에 비하여 스프링 힘이 상대적으로 작기 때문이다.

結 論

本 研究에서는 方向 制御 로직 밸브의 動特性을 數值 해석과 實驗을 통하여 상세히 조사 하였다. 밸브의 動作 特性에 관하여 얻어진 結果를 요약하면 아래와 같다.

1. 로직 밸브에서는 밸브가 닫힐 때 파킷은 거의 一定 速度로 變位한다.
2. 파일럿 壓力 P_3 및 파일럿 通路 抵抗 R 이 로직 밸브 動作 時間에 매우 큰 影響을 미치며, 壓力 P_1, P_3 에 따라 P_3, R 을 적절히 선택함으로써 로직 밸브 動作 時間을 임의로 조정할 수 있다.
3. 스프링 常數는 밸브 動作 時間에 그다지 影響을 미치지 않는다.
4. 로직 밸브의 動作 特性은 파킷의 運動에 관한 方程式을 數值 積分함으로써 비교적 정확하게 예측할 수 있다.

한편, 밸브 動作 時間이 매우 짧은 경우에는 파일럿 通路에서의 時間 遲延이 밸브 動作 時間

의 數倍에 달하는 경우도 예상되므로, 밸브가 高速으로 作動될 때는 파일럿 電磁 切換 밸브의 應答性, 파일럿 부분의 體積 등을 고려한 수치해석이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

參考文獻

1. Willebrand, H. O. (1984): Hydraulische Steuerungen mit 2-Wege-Einbauventilen Systematik, Entwurf und Untersuchung des Systemverhaltens., T.H.Aachen Ph.D thesis.
2. Wobben, D. (1978): Statisches und dynamisches Verhalten vorgesteuerter Druckbegrenzungsventile unter besonderer Berücksichtigung der Strömungskräfte., T. H. Aachen Ph.D thesis.
3. Trudzinski, R.M. (1980): Experimentelle und analytische Bestimmung des Betriebsverhaltens von direktwirkenden und vorgesteuerten 2-Wege-Stromregelventilen., T.H. Aachen Ph.D thesis.
4. Lu, Y. (1981): Entwicklung vorgesteuerter Proportionalventile mit 2-Wege-Einbauventil als Stellglied und mit geräteinterner Rückführung., T.H. Aachen Ph.D thesis.
5. 市川, 清水(1965): ポベツト弁の流量係數について, 日本機械學會論文集 31(222), 317-319.
6. 竹中, 浦田 (1970): 油力學, 養賢堂, 47-57.