

Flow Divider Valve의 동특성에 미치는 마찰력의 영향

박태조*, 황태영**

Effect of Friction Force on the Dynamic Characteristics of a Flow Divider Valve

Tae Jo Park* and Tae Young Hwang**

ABSTRACT

In this paper, a numerical analysis is carried out to show the effect of friction force on the dynamic characteristics of a flow divider valve. The continuity equations and the equation of motion for spool are numerically solved. The viscous friction force acting on the spool is considered analyzing the Reynolds equation which governs the viscous flow in the clearance gap between the spool and sleeve. Dynamic characteristics are highly affected by the viscous friction force whose magnitude is relatively small compare with other fluid forces. Therefore present theoretical formulation and numerical scheme can be used generally in designing and performance evaluation of all the hydraulic spool valve.

Key Words : flow divider valve, dynamic characteristic(동특성), flow dividing error(유량분할오차), friction force(마찰력), viscous friction(점성마찰), fluid film lubrication(유체윤활)

1. 서론

유압밸브(hydraulic valve)는 유압원에서 공급되는 유압유(hydraulic oil)의 압력, 유량 및 유동방향 등을 제어하는 유압장치의 필수부품으로 그 종류가 아주 다양하다. 특히, flow divider valve는 건설중장비, 선박, 산업기계, 주차설비, 항공기 탑승고 등에서와 같이 한 개의 공급라인(line)에서 두 개 이상의 출력라인으로 일정비율의 유량분배가 요구되는 경우에 사용된다. 이상적으로는 하중압력이나 공급압력 등에 관계없이 유량분배비율이 항상 일정해

야 됴에도 불구하고 현재 상용제품의 유량분할 정밀도는 90~95% 정도에 불과한 실정이다. 이 결과, 밸브에서의 유량분할오차(flow dividing error)는 유압장치에 누적오차로 작용하여 많은 문제를 유발시키기 때문에 피드백(feed-back) 제어장치를 추가로 설치해야 된다. 그러나, 이에 따라서 전체 시스템이 복잡해지고 비용이 많이 소요되는 등의 단점이 발생하므로 추가장치가 불필요한 고정밀 flow divider valve의 개발이 요구되고 있다.

Flow divider valve에 대한 지금까지 연구의 대

* 경상대학교 기계공학과, 항공기부품기술연구소

** 한국기계연구원 산업기계그룹

구분은 유량분할 오차를 유발시키는 원인을 발굴하고 이를 효율적으로 제어하기 위한 밸브의 구조나 형상 설계에 집중되고 있다. Kwan 등^[1]은 스푸울(spool)의 단면적을 크게 함으로써 스푸울에 작용하는 외력의 영향을 줄여 유량분할 정밀도를 향상시켰지만 밸브의 내부구조는 아주 복잡하였다. Chan 등^[2,3]은 유체의 유동력에 의한 영향을 감소시키기 위하여 특수한 배열의 포트(port)를 채용하여 98%정도의 높은 유량분할 정밀도를 달성하였다. 이상의 결과에서, 고정밀 flow divider valve를 개발하기 위해서는 스푸울에 작용하는 모든 외력들에 대한 정확한 특성평가가 필요함을 알 수 있다.

한편, 스푸울에 작용하는 마찰력은 압력이나 분류(jet)에 의한 힘 등에 비하여 상대적으로 크기가 작기 때문에 지금까지의 대부분 연구에서는 무시되었다. 하지만 마찰력은 스푸울의 운동에 따라서 작용방향과 크기가 변화하므로 이를 고려한 연구가 요구되고 있다. Qing 등^[4]은 실험적으로 구한 마찰력식을 사용하여 flow divider valve의 동특성을 처음으로 이론해석하고 실험결과와 비교하였지만 그들의 결과를 일반화하기는 어려운 실정이다. 이는 마찰력이 스푸울과 슬리브(sleeve) 사이 간극에 존재하는 유압유의 점성에 의하여 발생하므로 참고문헌[4]에서와 같이 간단한 식으로 표현할 수 없기 때문이다. 따라서, flow divider valve의 제반특성을 정확하게 평가하여 정밀도가 높은 밸브를 개발하기 위해서는 마찰력의 영향에 대한 정확한 특성 파악이 수행되어야 한다.

이에 본 논문에서는 스푸울에 작용하는 마찰력이 flow divider valve의 동특성에 미치는 영향을 이론적으로 조사하고자 한다. 이때, 유압유의 작용으로 인한 점성마찰력의 크기는 스푸울과 슬리브 사이 간극에서의 유체유효해석 결과를 이용하여 정확하게 구한다.

2. 이론

2.1 연속방정식

Fig.1은 본 논문에서 해석하고자 하는 flow divider valve의 개략도로서 그림에 나타난 밸브의 각 위치에서의 유량에 대한 연속조건식을 압력에 대하여 표현하면 다음 식들과 같다.

$$p_s = \frac{1}{C_i} \int (Q_s - Q_{f01} - Q_{f02}) dt + p_s(0) \quad (1)$$

$$p_1 = \frac{1}{C_1} \int (Q_{f01} - Q_{f1} - Q_{v01}) dt + p_1(0) \quad (2)$$

$$p_2 = \frac{1}{C_2} \int (Q_{f02} + Q_{f2} - Q_{v02}) dt + p_2(0) \quad (3)$$

$$p_{L1} = \frac{1}{C_{L1}} \int (Q_{v01} - Q_{L1}) dt + p_{L1}(0) \quad (4)$$

$$p_{L2} = \frac{1}{C_{L2}} \int (Q_{v02} - Q_{L2}) dt + p_{L2}(0) \quad (5)$$

여기서, 우변 마지막 항들은 초기압력이며, $C_i \sim C_{L2}$ 는 각 유로에서의 체적과 체적탄성계수와와 비로서 정의되는 커패시턴스(capacitance)이다.

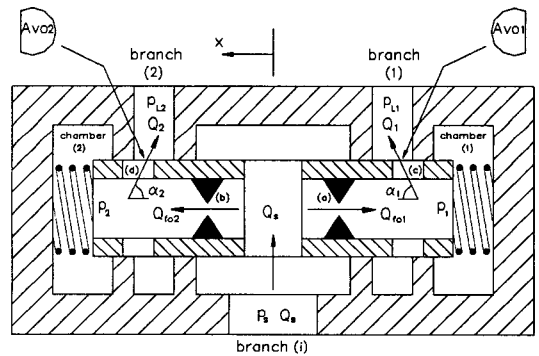


Fig. 1 Schematics of a flow divider valve

이때, 고정오리피스 (a), (b) 및 가변오리피스 (c), (d)를 통과하는 유량은 순서대로 다음의 식(6) ~ 식(9)와 같다.

$$Q_{f01} = \frac{1}{R_{f01}} \sqrt{|p_s - p_1|} \text{sign}(p_s - p_1) \quad (6)$$

$$Q_{f02} = \frac{1}{R_{f02}} \sqrt{|p_s - p_2|} \text{sign}(p_s - p_2) \quad (7)$$

$$Q_{v01} = C_{v01} A_{v01} \sqrt{|p_1 - p_{L1}|} \text{sign}(p_1 - p_{L1}) \quad (8)$$

$$Q_{v02} = C_{v02} A_{v02} \sqrt{|p_2 - p_{L2}|} \text{sign}(p_2 - p_{L2}) \quad (9)$$

여기서, R_{f01} , R_{f02} 는 고정오리피스의 저항, C_{v01} , C_{v02} 와 A_{v01} , A_{v02} 는 각각 가변 오리피스에서의 유량 계수와 단면적이다.

한편, branch (1), (2)에서의 하중유량 Q_{L1} , Q_{L2} 는 각각 다음 식으로 나타내어진다.

$$Q_{L1} = \frac{1}{R_{L1}} \sqrt{p_{L1} - SP_e} \quad (10)$$

$$Q_{L2} = \frac{1}{R_{L2}} \sqrt{p_{L2} - SP_e} \quad (11)$$

여기서, R_{L1} , R_{L2} 및 SP_e 는 각 branch에서의 하중저항 및 저장조에서의 압력이다.

스푸울의 변위에 따른 챔버(chamber) (1), (2)에서의 체적변화량 Q_{P1} , Q_{P2} 는 각각 다음 식과 같다.

$$Q_{P1} = u A_s \quad (12)$$

$$Q_{P2} = u A_s \quad (13)$$

여기서, A_s 와 u 는 스푸울의 단면적과 속도이다.

2.2 운동방정식

스푸울에 작용하는 외력 f_a 는 스푸울 양단에 작용하는 압력에 의한 힘 f_i , 스프링력 f_s , 분류에 의한 반작용력(reaction force) f_r 및 마찰력 f_f 의 합으로서 다음 식과 같이 표현된다.

$$f_a = f_i - f_s - f_r - f_f \quad (14)$$

여기서,

$$f_i = (p_1 - p_2) A_s \quad (15)$$

$$f_s = 2kx \quad (16)$$

$$f_r = \frac{\rho Q_{vo2}^2}{A_{vo2}} \cos \alpha_2 - \frac{\rho Q_{vo1}^2}{A_{vo1}} \cos \alpha_1 \quad (17)$$

$$f_f = R \int_0^l \int_0^{2\pi} \left[\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} - \eta \frac{u}{h} \right] d\theta dx \quad (18)$$

여기서, k 는 지지스프링의 상수, α_1 과 α_2 는 분류의 분출각도(jet angle), η 는 점도이다.

따라서, 스푸울에 대한 운동방정식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{1}{M} \int f_a dt + u(0) \quad (19)$$

$$x_v = \int u dt + x_v(0) \quad (20)$$

여기서, M 은 스푸울의 질량, $u(0)$ 와 $x_v(0)$ 는 각각 스푸울의 초기 속도와 변위이다.

한편, 식(18)의 스푸울에 작용하는 점성마찰력을 정확하게 예측하기 위해서는 스푸울과 슬리브 사이 간극에서의 박막유동(thin film flow)을 지배하는 다음의 레이놀즈 방정식을 해석해야만 한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 6\eta u \frac{\partial h}{\partial x} \quad (21)$$

윗 식에 대한 수치해석과정은 참고문헌[5,6]에 상세하게 나타내었다.

참고로 Qing 등^[4]은 다음 식과 같이 실험적으로 구한 단순한 형태의 마찰력식을 이용하여 이론 해석을 수행하였다.

$$f_f = f_c + K_f u \quad (22)$$

여기서, f_c , K_f 는 건마찰력과 점성마찰계수이다.

Table 1 Fluid parameters and coefficients.

Parameters	Value	Unit
M	0.1322	kg
$C_i \sim C_{L2}$	7.79×10^{-15}	m^3/Pa
R_{fo1}, R_{fo2}	5.056×10^6	$Pa^{0.5} \cdot s/m^3$
C_{vo1}, C_{vo2}	2.8×10^{-2}	$(m^3/s)/Pa^{0.5}$
f_c	12.1	N
A_s	5.142×10^{-4}	m^2
α_1, α_2	69	deg
R	15.78	mm
l	119	mm
K_f	56.4	Ns/m
ρ	9.51×10^2	kg/m^3
E	1.31×10^9	Pa
η	0.032	Pa·s

따라서, 밸브 각 부분에서의 연속조건식과 스푸울에 대한 운동방정식을 Table 1에 나타낸 유체 변수와 계수를 사용하여 반복적으로 수치적분하면 스푸울의 속도와 변위, 스푸울 양단에서의 압력, 각 포트를 통하는 유량 등을 구할 수 있다. 이때, 수치적분은 심프슨(Simpson)의 방법을 사용하였다. 이와 같은 과정을 시간의 경과에 따라 반복하면 flow divider valve의 하중압력, 하중유량 등에 대한 과도상태 및 정상상태에서의 응답특성을 구할 수가 있다.

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 스푸울에 작용하는 마찰력의 차이에 의한 flow divider valve의 동특성 변화를 중점적으로 조사하고자 한다. 결과의 제시를 위하여 사용한 스푸울은 완전한 원통형상으로 동심상태에서의 간극의 크기는 $8\mu\text{m}$ 이며, 마찰력은 다른 조건은 모두 고정된 상태에서 스푸울의 편심율이 $\epsilon = 0.5$ 과 $\epsilon = 0.8$ 인 경우로 한정하여 구하였다.

Fig.2~Fig.6에는 $t=0.02$ 초에 단위계단함수인 하중저항 RL1이 입력으로 작용하는 경우에 대한 하중압력, 하중유량, 스푸울에 작용하는 마찰력 및 스푸울의 변위와 속도의 응답을 순서대로 나타낸 결과이다. 여기서, 단순마찰(simple friction)에 대한 결과는 참고문헌[4]와 동일하게 식(22)를 사용한 경우이다. 마찰력은 다른 외력에 비하여 그 크기는 작지만 이것의 작은 차이에 의한 과도상태응답은 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 지금까지 대부분의 연구에서 고려되지 않았던 마찰력이 동특성에 미치는 영향은 실제로 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 특히, Fig.4에서 식(22)는 스푸울이 슬리브 내벽에 거의 닿은 상태에서의($\epsilon \approx 1.0$) 실험결과로 추정되므로 이 식에 의한 동특성 결과는 실제와는 상당한 차이를 보일 것으로 예상된다. 한편, MATLAB과 같은 소프트웨어를 이용하여 밸브의 동특성을 해석하기 위해서는 마찰력에 대한 표현식이 요구되지만 편심률 뿐만 아니라 스푸울 형상, 운전속도, 간극의 크기, 점도 등 많은 변수에 의하여 마찰력이 결정되기 때문에 MATLAB의 이용에도 한계가 있다[7]. 따라서, flow divider valve의 정확한 동특성 해석을 위해서는 본 논문에서 제시한 해석방법이 보다 실제적임을 알 수 있다.

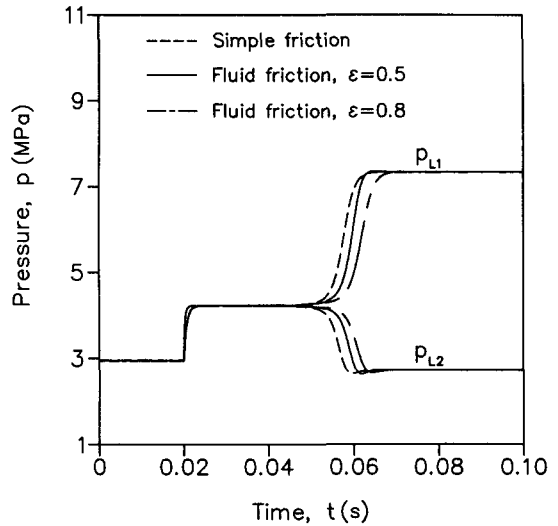


Fig. 2 Transient pressure response

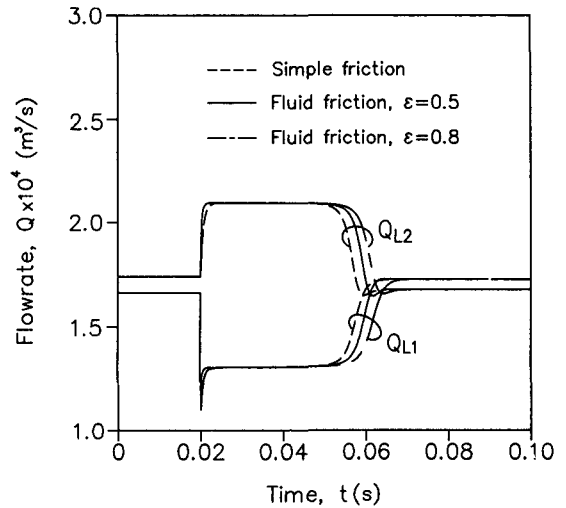


Fig. 3 Transient flow rate response

이상에서 제시한 결과는 입력인 하중저항이 가장 단순한 단위계단함수이고 슬리브 내에서의 스푸울 편심상태가 고정된 경우에 대한 결과이므로 실제에서와 같이 복잡한 형태의 하중저항과 편심상태 등의 운전조건이 변할 경우에는 결과가 크게 달라질 것으로 쉽게 예측된다. 하지만 본 논문에서 제시한 간극에서의 유압유에 대한 윤택해석에 의한

정확한 마찰력 계산과 이를 이용한 제어밸브의 동특성 해석방법은 운전조건이 변화하는 경우에도 그대로 적용이 가능하기 때문에 고정밀 flow divider valve 개발에 아주 유용하게 사용될 수가 있을 것으로 예상되며, 다양한 설계변수들의 영향에 대한 추가적인 연구를 요한다.

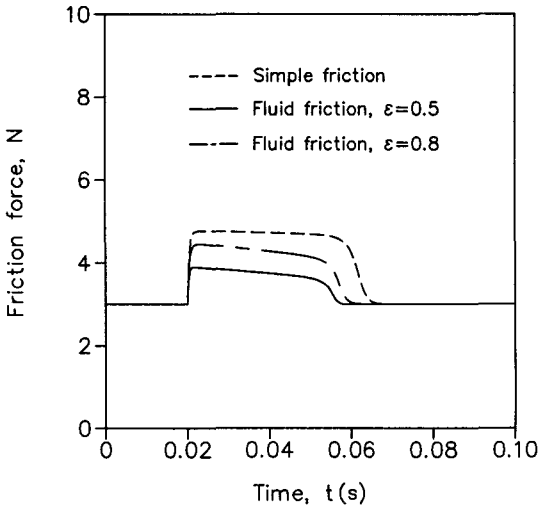


Fig. 4 Transient friction force acting on the spool

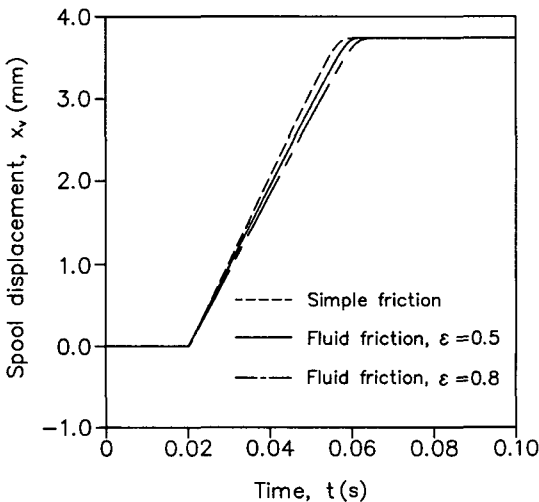


Fig. 5 Transient spool displacement

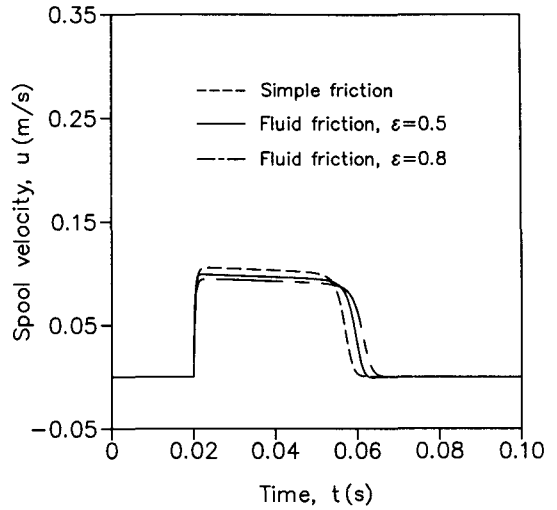


Fig. 6 Transient spool velocity

4. 결론

본 논문에서는 flow divider valve의 동특성에 미치는 마찰력의 영향을 조사하기 위하여 스푸울과 슬리브 사이 간극에서의 유체유행해석으로 마찰력을 정확하게 예측하고 이를 사용하여 운동방정식과 연속방정식을 해석하였다. 이 결과, 스푸울에 작용하는 마찰력은 다른 외력에 비하여 크기가 아주 작음에도 불구하고 flow divider valve의 동특성에 상당한 영향을 미치고 있다. 따라서, flow divider valve를 비롯한 유압 스푸울 밸브의 동특성을 정확하게 평가하기 위해서는 마찰력을 고려한 해석이 요구되며, 이러한 문제의 해석에 본 논문에서 제시한 이론적인 해석방법이 아주 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Kwan, D. S. *et al.*, "A New High Precision Flow-Divider Valve," Proc. of 35th Nat. Conf. on Fluid Power, 1979.
2. Chan, R. K. *et al.*, "Mathematical Mode for Predicting the Steady State Flow Dividing Error of a Piston-Type Flow-Divider Valve," Proc. of 35th

- Nat. Conf. on Fluid Power, 1979.
3. Chan, R. K. *et al*, "A Single Stage Precision Flow Divider Valve," Proc. of 36th Nat. Conf. on Fluid Power, 1980.
 4. Qing, G. *et al*, "Dynamic Response of Flow Divider Valves," J. of Fluid Control, pp. 20-42, 1986.
 5. Park, T. J. and Lee, C. O., "Hydrodynamic Lateral Force on a Tapered Piston Subjected to a Large Pressure Gradient," Proc. of 3rd ICFP, pp. 44-48 1993.
 6. 이정오, 박태조, "피스톤 형상이 유압피스톤 펌프.모터의 윤활특성에 미치는 영향," 한국윤활학회지, Vol. 10, No. 3, pp. 47-53, 1994.
 7. 박태조, 황태영, "MATLAB을 이용한 Flow Divider Valve의 동특성 해석," 경상대학교 생산기술연구소논문집, Vol. 14, pp. 291-297, 1998.
 3. Meritt, H. E., Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons Inc, 1967.