

4 방향 스폴밸브의 중립특성에 관한 연구

함영복*, 윤소남*, 이근호*, 김성동**

A Study on Null Characteristics of 4-way Spool Valve

Young-Bog Ham*, So-Nam Yun*, Geun-Ho Lee*, Sung-Dong Kim**

ABSTRACT

In this study, the 4-way spool valve characteristics are clearly defined and proposed new type of spool valve. This paper presents governing equations of the flow through clearances between sleeve and spool as a model of orifice flow for null characteristic analysis, and programmed analysis software of it. This software is possible to basically analysis that not only which case of open center, closed center or critical center but +, - displacement of spool, lab position, boundary region and spool opening of the valve, and to estimate the pressure variation in the spool and external leak flow variation.

We are convinced that the scale of load pressure difference is changed as lab condition of spool valve, and this scale is changed with boundary point on the annular clearance.

It is vary useful to designer and user of spool valve with this design data and analysis software.

Key Words : 4-Way Spool Valve (4 방향 스폴밸브), Electro-Hydraulic Servo Valve (전기-유압 서보밸브), Null Characteristics (중립특성), Pressure Gain(압력이득), Flow Gain(유량이득)

기호설명

A_{d1}, \dots, A_{d4} : 오리피스부의 개구면적
 C_d : 오리피스부의 유량계수, C_L : 유량 통과길이
 d_s : 스폴 직경
 l_1, \dots, l_4 : 오리피스부의 스폴과 슬리브 중첩길이
 P : 스폴밸브 내부의 변동압력, P_s : 공급압력
 Q : 스폴내부의 변동유량
 Q_L : 스폴 좌측부로 공급되는 유량
 Q_R : 스폴 우측부로 공급되는 유량
 Q_s : 스폴 좌우측으로 공급되는 총유량
 V : 스폴내부 체적
 x_{01}, \dots, x_{04} : 오리피스부 개구변위
 x_v : 스폴의 총변위

β : 기름의 체적 탄성계수
 ρ : 기름의 밀도, v : 기름의 동점성 계수
 μ : 기름의 점성계수, δ : 스폴과 슬리브간극

1. 서론

유공압 밸브의 방향전환용으로 사용되는 4 방향 스폴밸브(이하 스폴밸브라 칭함)는 오버랩(Overlap)의 크기에 따라서 임계센터(Critical Center), 오픈센터(Open Center), 클로우즈드센터 (Closed Center) 밸브로 분류된다. 임계센터밸브는 이상적인 밸브로 부하압력특성이 높고 유량특성이 선형적이며, 오픈센터인 경우는 스폴변위에 따라서 유량특성이 선형적이고, 스폴중립위치에서의 유량계

* 한국기계연구원 산업기술연구부

** 금오공과대학교 생산기계공학과

인이 높고 응답성이 좋으나 초기에 누설손실이 존재하고 이로 인하여 시스템의 정확한 위치제어가 곤란하다. 클로우즈 센터인 경우는 중립위치에서의 유량계인 및 압력계인이 적기 때문에 스폴중립 상태에서 시스템의 위치를 정확하게 할 수 있으나 비선형성이 강하기 때문에 안정성 및 제어성에 문제가 있다¹⁾. 전기-유압서보밸브(이하 서보밸브라 칭함)에 사용되는 스폴밸브인 경우는 고정도의 위치제어 및 속응성을 필요로 하는 시스템에 주로 사용되기 때문에 위치제어 시스템에 적절한 스폴 형태가 바람직하다. J. Montgomery 등은 스폴밸브의 오버랩의 형태에 따라서 유량계인 및 압력계인 변화를 연구했지만 스폴랜드와 슬리브의 간격을 통하여 흐르는 누설을 고려하지 않았으며²⁾, Watanabe 등은 스폴밸브의 일부 랜드는 오버랩, 일부랜드는 오픈랩 형태로 하여 유량 및 압력특성을 연구하였으나, 스폴밸브 양쪽 끝단을 통하여 흐르는 누설을 고려하지 않았다³⁾, 실제 서보밸브 시스템에서는 스폴밸브 양쪽 끝단부의 압력차에 의하여 스폴이 구동되고 스폴 좌우측에 압력변화가 심하게 나타나며, 이로 인하여 누설량이 감소, 증가현상이 일어나게 되며 시스템 동특성에 영향을 미친다⁴⁾. 국내에서는 현재까지 스폴밸브의 중립상태에 대한 연구가 없으며, 경험에 의존하여 스폴밸브를 가공하고, 중립상태를 확인하는 실정이다. 그러나 스폴밸브의 중립상태에서의 유량 및 압력특성이 서보밸브 전체특성을 결정짓기 때문에 서보시스템 설계시는 시스템에 적합한 유량 및 압력계인을 먼저 계산에 의하여 구하고 이에 맞는 서보밸브의 선정이나 설계가 필요하게 된다.

본 연구는 서보밸브에 사용되는 스폴밸브를 대상으로 하여 스폴제어포트 및 양끝단부의 누설을 고려한 특성방정식을 정립하고 도출된 방정식을 통하여 스폴밸브 중립상태의 특성을 해석하는데 목적이 있다. 특히 밸브의 랩(임계센터, 오픈센터, 클로우즈드센터)형태에 따라서 랩량의 입력만으로 스폴중립 특성해석이 가능하도록 프로그램하며, 위치제어 특성에 유리한 중립랩의 형태를 제안하기로 한다.

2. 이론해석

연구대상 스폴밸브의 모델을 Fig. 1 에 보였다. Fig. 1 에서 스폴밸브가 중립상태이거나 좌우로 변위가

일어날 때는 오리피스부(1, 2, 3, 4) 및 드레인부 (5, 6)을 통하여 유동이 일어난다. 본 연구의 목적인 스폴밸브의 유량 및 압력특성해석을 위하여 제어 포트(C_1, C_2)의 흐름은 영(0)으로 하고, 스폴밸브는 좌우대칭이며, 스폴밸브와 슬리브의 모서리부는 날카로운 수직모양으로 가정하였다.

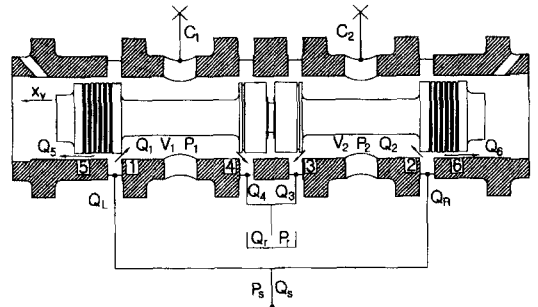


Fig. 1 Schematic of Spool Valve System

Fig. 1 의 스폴밸브 모델을 쉽게 해석하기 위하여 오리피스 형태로 구성된 해석모델을 Fig. 2 에 도시하였으며, 여기에서 공급유량 Q_s 에서 좌우측으로 분배되는 유량을 각각 Q_L, Q_R 로 표기하였다.

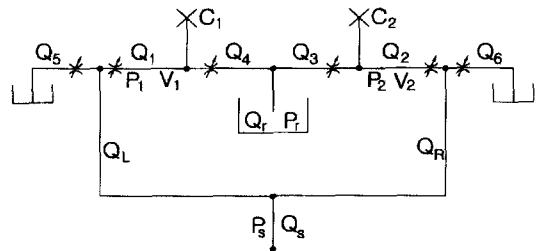


Fig. 2 Analysis Model of Spool Valve System

오리피스부 및 드레인부(1, 2, 3, 4, 5, 6)를 통하여 유량식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_5 = Q_L + Q_R \quad (1)$$

$$Q_1 = Q_L - Q_5 \quad (2)$$

$$Q_2 = Q_R - Q_6 \quad (3)$$

식(2)에서 스폴밸브 왼쪽 제어오리피스를 통과하는 유량 Q_1 은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$Q_{1i} + C_d A_{d1} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)}$$

$$= Q_{4i} + C_d A_{d4} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_{1r})} + \frac{V_1}{\beta} \frac{dP_1}{dt} \quad (4)$$

여기에서, Q_{li} 는 스톱밸브 좌측 제어 오리피스 가 슬리브와 겹쳐 동작할 때 스톱밸브의 환상틈새를 통하여 흐르는 유량을 의미하는 것으로 이를 해석하기 위한 경계조건으로 스톱밸브의 실제 개구변위 x_{01} 및 제어오리피스 통과유량 계산용 길이 C_{L1} 을 이용하기로 한다.

$$x_{01} = x_v - l_1 \quad (5)$$

$$C_{L1} = \sqrt{x_{01}^2 + \delta^2} \quad (6)$$

따라서, Fig.1의 제어오리피스부(1, 2)의 변수들은 식(5)와 식(6)으로부터 $x_{01} < 0$ 일 때는

$$Q_{li} = \frac{\pi \cdot d_s(P_s - P_1)}{12\mu \cdot x_{01}} \delta^3$$

$$A_{d1} = 0 \quad (7)$$

와 같이 스톱밸브 환상틈새를 흐르는 유량식이 적용되고, $x_{01} \geq 0$ 일 때는

$$Q_{li} = 0$$

$$A_{d1} = \pi \cdot d_s \cdot C_{L1} \quad (8)$$

와 같이 스톱밸브 제어오리피스를 흐르는 유량식이 적용된다. 식(4) 우측항의 Q_{4i} 및 A_{d4} 의 해석을 위하여 스톱밸브의 실제 개구변위 x_{04} 및 우측 제어오리피스 통과유량 계산용 길이 C_{L4} 를 이용하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$x_{04} = x_v + l_4 \quad (9)$$

$$C_{L4} = \sqrt{x_{04}^2 + \delta^2} \quad (10)$$

식(9) 및 식(10)으로부터 Q_{4i} 및 A_{d4} 는 좌측 리턴부 제어오리피스의 개구변위 x_{04} 의 변화에 의해 구해진다. $x_{04} \leq 0$ 일 때는

$$Q_{4i} = 0$$

$$A_{d4} = \pi \cdot d_s \cdot C_{L4} \quad (11)$$

$x_{04} > 0$ 일 때는

$$Q_{4i} = \frac{\pi \cdot d_s(P_1 - P_r)}{12\mu \cdot x_{04}} \delta^3$$

$$A_{d4} = 0 \quad (12)$$

식(3)에서 스톱밸브 오른쪽 제어 오리피스를 통과

하는 유량 Q_2 는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$Q_{2i} + C_d A_{d2} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_s - P_2)}$$

$$= Q_{3i} + C_d A_{d3} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2 - P_r)} + \frac{V_2}{\beta} \frac{dP_2}{dt} \quad (13)$$

식(13)도 식(14)의 해석과 동일한 방식으로 경계조건 x_{02} , Q_2 , x_{03} , C_{L3} 를 도입하여 정리하면 다음과 같다.

$$x_{02} = x_v + l_2 \quad (14)$$

$$C_{L2} = \sqrt{x_{02}^2 + \delta^2} \quad (15)$$

식(14)와 식(15)를 식(13)에 적용하면 $x_{02} \leq 0$ 일 때는

$$Q_{2i} = 0$$

$$A_{d2} = \pi \cdot d_s \cdot C_{L3} \quad (16)$$

$x_{02} > 0$ 일 때는

$$Q_{2i} = \frac{\pi d_s(P_s - P_2)}{12\mu \cdot x_{02}} \delta^3$$

$$A_{d2} = 0 \quad (17)$$

$$x_{03} = x_v - l_3 \quad (18)$$

$$C_{L3} = \sqrt{x_{03}^2 + \delta^2} \quad (19)$$

식(18)과 식(19)를 식(13)에 적용시키면 $x_{03} < 0$ 일 때는

$$Q_{3i} = \frac{\pi \cdot d_s(P_2 - P_r)}{12\mu \cdot x_{03}} \delta^3$$

$$A_{d3} = 0 \quad (20)$$

$x_{03} \geq 0$ 일 때는

$$Q_{3i} = 0$$

$$A_{d3} = \pi \cdot d_s \cdot C_{L3} \quad (21)$$

과 같이 쓸 수 있다.

스톱밸브 좌·우측 램드를 통하여 드레인되는 유량은 스톱밸브 변위 x_v 및 램드 양단의 압력차 $P_s - P_r$ 의 함수로써 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_5 = \frac{\pi \cdot d_s(P_s - P_r)}{12\mu(l_5 + x_v)} \delta^3 \quad (22)$$

$$Q_6 = \frac{\pi \cdot d_s(P_s - P_r)}{12\mu(l_6 + x_v)} \delta^3 \quad (23)$$

3. 컴퓨터 시뮬레이션

비선형 방정식 (4) 및 (13)은 4차 Runge-Kutta 방법으로 해석을 수행하였으며, 스톱밸브 중립특성 변화를 관찰하기 위하여 오픈센터, 클로우즈드 센터, 임계센터, 복합(Hybrid) 센터의 어느 경우에도 해석이 가능하도록 프로그램을 작성하였다.

시뮬레이션에 있어서 공급압력은 언제나 일정하고, 스톱과 슬리브는 날카로운 모서리를 가지며, 환상간극을 통하는 유체의 흐름은 정상상태와 층류로 가정하였다. 스톱밸브 중립영역을 기점으로 하여 폐쇄되는 경우와 개구되는 경우의 수식이 다르기 때문에 본 연구에서는 Fig. 3 과 같이 환상틈새 $-\delta$ 와 $+\delta$ 사이 통과유량 길이의 기울기를 적정히 조정하는 방법을 사용하였다.

$$C_L = 2\delta - \sqrt{x_0^2 + \delta^2} \quad (24)$$

식(24)는 오리피스부 (1, 2, 3, 4)가 슬리브와 중첩이 시작되는 구간부터 계산을 시작하여 환상틈새 δ 와 같으면 종료하게 된다. Fig.4 는 식(24)를 이용하여 계산한 오리피스 개구면적의 증감을 보인 것이다. 연구의 관심대상인 부하압력특성의 변화는 $\Delta P = P_1 - P_2$, 출력유량은 $Q_i = Q_3 + Q_4$ 로 변화시켜 계산하였다. 시뮬레이션에 사용된 정수값들은 다음과 같다.

- $P_s = 210[\text{kg}_f/\text{cm}^2]$, $P_r = 0[\text{kg}_f/\text{cm}^2]$,
- $V_1 = V_2 = 1.178[\text{cm}^3]$, $C_d = 0.61$, $d_s = 1.0[\text{cm}]$
- $x_{vm} = 0.001[\text{cm}]$, $V = 0.32[\text{cm}^3/\text{sec}]$
- $\delta = 0.00015[\text{cm}]$, $\rho = 8.5077 \times 10^{-7}[\text{kg}_f \cdot \text{sec}^2/\text{cm}^4]$
- $\mu = 2.702 \times 10^{-7}[\text{kg}_f \cdot \text{sec}^2/\text{cm}^2]$
- $\beta = 7.105 \times 10^{-9}[\text{kg}_f/\text{cm}^2]$

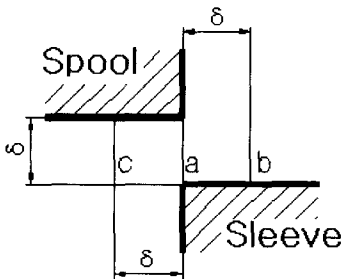


Fig. 3 Boundary Condition for Flow Path Calculation

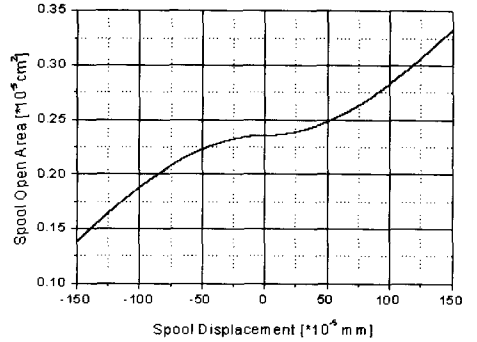


Fig. 4 Open Area Variation of Spool Valve

4. 결과 및 고찰

Fig.5 의 a)와 b)는 스톱밸브의 중립상태를 0, 0.5, 1.0, 1.5[μm] 오버랩 시킨 클로우즈드 센터의 부하압력 특성 및 누설유량특성을 나타내는 것이다. Fig. 5 의 a)에서 오버랩 양이 많을수록 부하압력의 기울기가 커지는 이유는 시뮬레이션 조건에서 환상틈새가 $\delta = 1.5[\mu\text{m}]$ 이기 때문에 오버랩 조건이 1.5[μm]이면 Fig. 3 의 b 지점에 스톱밸브가 위치하게 되고 이때는 환상틈새식과 오리피스식이 변환되는 경계점을 나타내는 것으로 이 지점에서 임계센터형 밸브조건이 만들어지므로 임계조건일 때의 압력계인 $k_p = \infty^5$ 와 동일한 결과를 보이고 있는 것이다. 오버랩조건이 0[μm]인 경우는 Fig. 3 의 a 지점에 스톱밸브가 위치하는 경우로 Fig. 4 에서 스톱밸브 0[μm]에서의 좌우 대칭인 그래프의 기울기를 따라서 움직이기 때문에 중립점 부근에서 부하압력 기울기에 미소한 변화만이 나타난다.

Fig.5 의 b)에서 오버랩조건이 +쪽으로 커질수록 누설유량이 적어지는 결과는 중첩되는 환상틈새의 길이에 비례하여 일어나는 현상이며, 오버랩조건이 1.5[μm]인 경우는 스톱이 Fig. 1 에 1, 2, 3, 4 부의 1, 3 과 2, 4 의 관계가 서로 대칭적으로 열림과 닫힘현상이 동시에 일어나지 못한다는 것을 의미하는 것으로 만약에 1 과 3 이 열릴 때는, 2, 4 가 오버랩 되어있고, 2 와 4 가 열리는 시기에는 1 과 3 이 미소하나마 오버랩 되어 있는 경우로 한쪽은 오리피스식 한쪽은 환상틈새의 식이 계산되는 과정에서 일어나는 현상이라 설명할 수 있다.

Fig.6 은 스톱밸브의 중립조건을 0, -0.5, -1.0, -1.5[μm]로 한 오픈센터인 경우의 부하압력 특성 및 누설유량특성을 나타내는 것이다. Fig. 6 의 a)에

서 초기 중립상태가 많이 열려 있을수록 부하압력의 기울기도 상승하나 초기 개구거리를 벗어나게 되면 오히려 기울기가 적어지는 현상이 나타난다. 이는 Fig.5의 b) 그래프 D와 반대되는 특성으로 Fig.1에 1과 3 및 2와 4의 관계에서, 중립점 근방에서 동시에 개구되어 누설유량이 많아지는 지점이 존재한다는 것으로 설명할 수 있으며 누설을 무시하고 중립상태의 부하압력 기울기만을 고려한다면 응답성이 비교적 우수하다는 것을 예측할 수 있다.

Fig.6의 b)에서는 초기중립상태가 많이 열려 있을수록 중립점 근방에서 누설유량이 많아지고 있음을 보이며, 동시에 오리피스의 닫힘과 열림구간이 존재하고 있음을 보여준다.

Fig.7은 공급측 오리피스부(1, 2)는 -0.5, -1.0, -1.5[μm]의 오픈상태로 두고 탱크측 오리피스부(4, 3)는 0.5, 1.0, 1.5[μm]로 클로우즈드 상태로 하여 시뮬레이션 한 결과를 보이는 것이고, Fig. 8은 공급측 오리피스(1, 2)는 0.5, 1.0, 1.5[μm]의 클로우즈드 상태로 두고 탱크측 오리피스부(4, 3)는 -0.5, -1.0, -1.5[μm]로 오픈상태로 하여 시뮬레이션 한 결과로 대칭 랩 조건에서는 동일한 결과를 보여주고 있다. 리턴 오리피스부 유량은 앞의 Fig.5나 Fig.6과 달리 복합적인 결과를 보여주고 있다. 이는 동작구

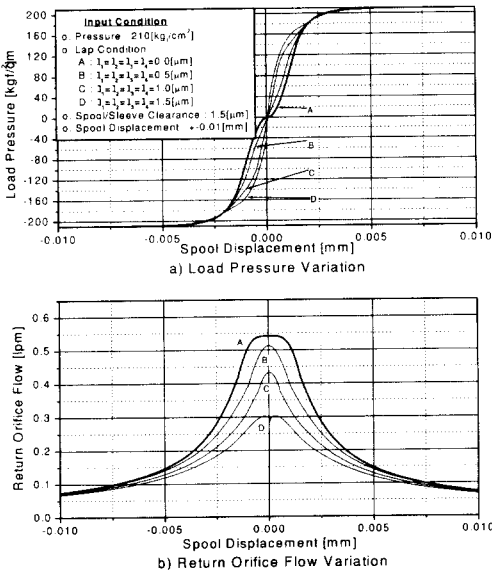


Fig. 5 Steady State Characteristics of Closed Center Valves

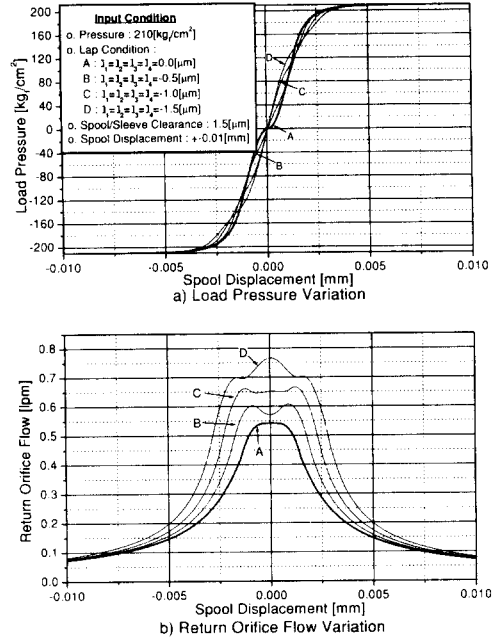


Fig. 6 Steady State Characteristics of Open Center Valves

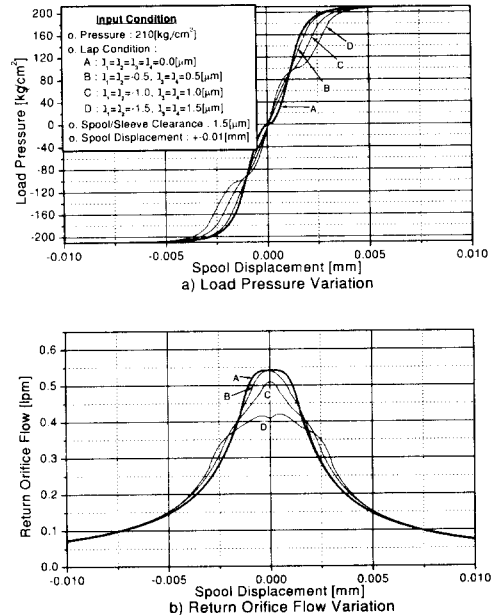


Fig. 7 Steady State Characteristics of Hybrid Center Valves_I

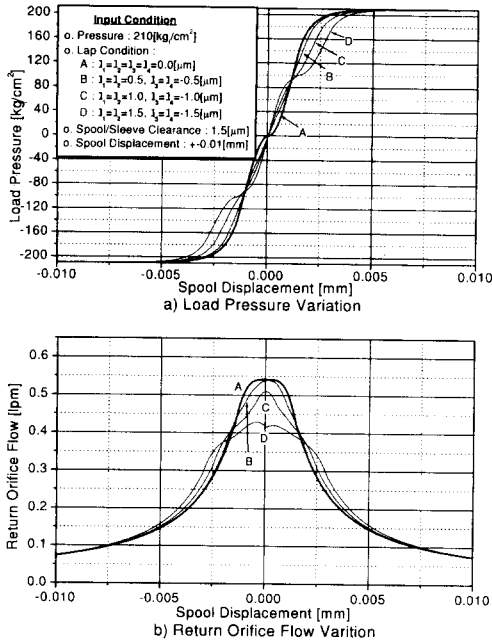


Fig. 8 Steady State Characteristics of Hybrid Center Valves_II

간에서 동시에 클로즈드 랩구간이 존재하거나 동시에 오픈 랩구간이 극명하게 존재하고 있음을 보여주는 것으로 이 결과는 Fig.7의 a) 및 Fig.8의 a)의 결과로서도 확인할 수 있다. 설계자의 입장에서는 이 두 가지의 기울기가 존재하는 밸브를 잘 이용하면 중립위치 지역에서는 압력계인을 크게 하여 제어의 정확도를 높일 수 있으며 중립위치 이외의 지역에서는 유량계인을 높여 속응성을 높일 수 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 0 랩을 기준으로 $-1.5[\mu\text{m}]$ 만큼 스폴밸브가 오픈되어 있는 경우와 $1.5[\mu\text{m}]$ 만큼 오버랩 되어 있는 경우의 부하압력 특성 및 누설유량 특성 결과를 비교한 것으로 기울기의 변화가 환상틈새와 일정한 관계가 있음을 알 수 있다. 특히 $-1.5[\mu\text{m}]$ 의 오픈랩인 경우는 환상간극 $1.5[\mu\text{m}]$ 와 등가되는 지점에서 변곡점이 심하게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig.6에서 고찰한 바와 같이 동시에 오리피스부(1, 2, 3, 4)가 개구되면서 환상틈새식과 오리피스식을 사용하기 때문인데, 역으로 오리피스부(1, 2, 3, 4)의 랩 길이 조정으로 부하압력 및 누설유량 특성 조절이 가능하다는 결과를 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.

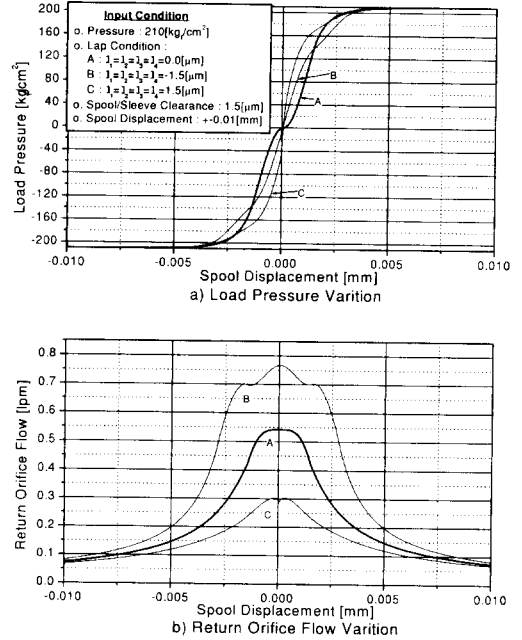


Fig. 9 Steady State Characteristics Comparison of Spool Valves

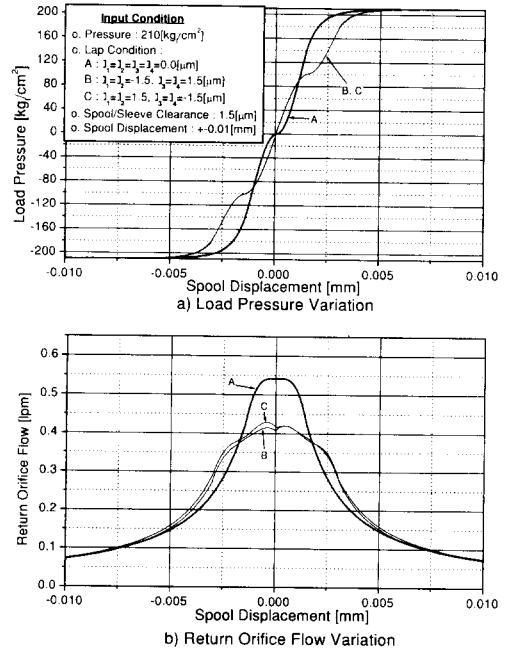


Fig. 10 Steady State Characteristics Comparison of Hybrid Valves

Fig.10 은 0 랩을 기준으로 공급측 오리피스(1, 2) 를 각각 $-1.5[\mu\text{m}]$, $1.5[\mu\text{m}]$, 탱크측 오리피스(4, 3)을 각각 $1.5[\mu\text{m}]$, $-1.5[\mu\text{m}]$ 로 하여 하이브리드 입력조건에서의 부하압력 및 누설유량 특성 결과를 보인 것으로 Fig. 10, b)의 결과로부터 전체 +랩 혹은 전체 -랩인 경우의 특성과 다르게, 누설유량이 스펴변위가 $1.5[\mu\text{m}]$ 보다 크거나 $-1.5[\mu\text{m}]$ 보다 작은 경우에는 0 랩인 경우보다 크게 나타나고, $1.5[\mu\text{m}]$ 안쪽 범위에서는 적게 나타난다. 이는 일반 동일랩인 경우에 비해서 오리피스부(1, 3)이 닫혀 있어도 오리피스(2, 4) 가 열려있는 경우가 있거나 혹은 그 반대인 경우가 있기 때문이다. 이러한 이유로 인하여 환상간극이 $1.5[\mu\text{m}]$ 일 때, 하이브리드 랩을 각각 $-1.5[\mu\text{m}]$, $1.5[\mu\text{m}]$ 혹은 $1.5[\mu\text{m}]$, $-1.5[\mu\text{m}]$ 로 주는 경우는 부하압력 특성이나 누설유량 특성이 거의 일치할 수 있음(Fig. 10, a))을 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 서보밸브에 사용되는 스펴밸브의 중립특성 해석을 위하여 슬리브와 스펴밸브의 관계를 오리피스 모델로 구성하였으며, 이 모델로부터 특성방정식을 도출하고 도출된 특성방정식을 이용하여 해석소프트웨어를 작성하였다. 소프트웨어는 기본적으로 오픈센터, 클로즈드센터, 임계센터 어느 경우라도 해석이 가능할 뿐만 아니라 +변위, -변위에 관계없이 변위에 따라서 랩상태, 경계구간, 실제 밸브의 개구상태를 알아내어 스펴내부의 압력변동 및 탱크로 누설되는 유량변동상태를 쉽게 예측할 수 있도록 하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- ① 스펴밸브의 랩 조건에 따라서 부하압력의 기울기가 변화되는 것이 확인되었으며, 이 기울기는 환상틈새 거리를 경계점으로 하여 변화되는 것을 알 수 있었다. 때문에 이 결과를 이용하면 설계자나 사용자의 요구조건에 적합한 스펴밸브의 설계가 가능함이 확인되었다.
- ② 실제 밸브의 설계 및 제작시에는 스펴밸브와 슬리브 사이의 환상틈새를 고려하여 이 틈새에 등가하도록 미소하게 중첩 시키는 것이 좋으나 위치제어용으로 사용되는 스펴밸브인 경우는 공급측 오리피스는 오픈랩, 탱크측 오리피스는 오버랩 형태의 복합센터(Hybrid Center)로 하는 것이 고 정밀

위치제어와 응답성 면에서 유리하다는 것이 해석적으로 확인되었다.

참 고 문 헌

1. Herbert E. Merrit, Hydraulic Control System, John Wiley & Sons, Inc., pp. 76~79, 1967.
2. J. Montgomery, "Asymmetrical Lap and Other Non-linearities in Valve-controlled Hydraulic Actuators," Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 183, Pt1, No. 33, pp. 663~682, 1969.
3. Kenji WATANABE, Kazunori TSUSHIMA, "Static Characteristics Analysis of Hybrid-type Servovalve," Hydraulics & Pneumatics, Vol. 26, No. 7, pp. 888~895, 1995.
4. 윤소남, 성백주, "힙 피드백 방식 유량제어 서보밸브의 특성 연구," 대한기계학회 '99 추계 학술대회 논문집, 99F141, pp. 820~825, 1999.
5. C. R. Burrows, Fluid Power Servomechanism, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 47~54, 1972.