

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.3.213>

ISSN 1226-4881

하이브리드 랩 방식 유압 서보 밸브의 스푼 변위에 따른 유동 천이 영역에 대한 연구[§]

정황훈* · 윤소남*[†] · 이성수* · 양주호**

* 한국기계연구원 에너지플랜트본부, ** 부경대학교 기계시스템공학과

Study on Flow-Shifted Region Depending on Spool Displacement in Hydraulic Servo Valve with Hybrid Lap

Hwang-Hun Jeong^{*}, So-Nam Yun^{*[†]}, Sung-Soo Lee^{*} and Joo-Ho Yang^{**}

^{*} Energy Plant Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials,

^{**} Dept. of Mechanical System Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received December 14, 2011 ; Revised January 7, 2013 ; Accepted January 7, 2013)

Key Words: Servo Valve(서보밸브), Hybrid Lap(하이브리드 랩), Flow Shifted Region(유동 천이 영역), Static Pressure Characteristics(압력 정특성), Static Flow Characteristics(유량 정특성)

초록: 본 논문의 목적은 스푼 랜드(spool land)와 슬리브(sleeve) 사이의 정특성 방정식으로부터 스푼 밸브의 압력 특성과 유동특성을 구하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여, 스푼 랜드와 슬리브 사이의 유동을 환상간극 유동과 오리피스 유동, 그 중간의 천이 영역으로 나누고, 천이 영역의 유량계수를 길이에 따른 두 영역으로 나눈 선형 일차방정식으로 가정하였다. 스푼 밸브의 압력특성방정식을 구하기 위해 스푼의 중립지점에서부터의 변위에 따른 유동을 $q_a = q_b = 0$ 의 조건으로부터 구하였으며, 스푼 밸브의 유량특성방정식을 구하기 위하여 스푼의 중립지점에서부터의 변위에 따른 유동을 $q_a = q_b, p_a = p_b$ 의 조건으로부터 구하였다. 구해진 수식의 타당성은 수치해석을 통해 실험식 및 기존논문과의 비교를 통해 확인하였다.

Abstract: This study examined the static characteristics of a spool valve with a hybrid lap between the spool land and the sleeve. The static equation for the pressure characteristics was derived from flow equations that depend on the spool displacement, and the final model was derived from $q_a = q_b = 0$ because the pressure characteristics test needs to block the control port in the valve. The static equation for the flow characteristics was derived from the pressure characteristics when the control port is open ($q_a = q_b, p_a = p_b$). The characteristic equation in the shifted region was assumed from the proportional relationship between the pressure-flow characteristics and the spool displacement.

- 기호설명 -

B : 오리피스 단면적(m^2)
 b : 스푼 랜드와 슬리브 사이의 간극(m)
 c : 유량계수
 k_M, k_M' : 환상간극 유동에서의 유량계수
 k_0 : 오버랩 상태의 유량계수

k_U : 언더랩 상태의 유량계수
 P_S : 공급 포트 압력(Pa)
 P_R : 리턴 포트 압력(Pa, ≈ 0)
 p_a, p_b : 스푼 챔버 압력(Pa)
 q_a, q_b : 제어 포트로 흐르는 유량(m^3/s)
 s_1, s_2, s_3 : 흐름에 대응하는 유로의 폭(m)
 x : 스푼의 중립상태에서의 변위(m)
 Δ_0 : 스푼과 슬리브의 오버랩 양(m)
 Δ_U : 스푼과 슬리브의 언더랩 양(m)
 ρ : 작동유의 밀도(kg/m^3)
 μ : 점성계수

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

[†] Corresponding Author, ysn688@kimm.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

밸브는 유체기계시스템의 작동유체를 제어하는 가장 기본이 되는 액추에이터로서 유체기계시스템의 동특성을 결정하는 중요한 요소이다. 유압서보 밸브는 유체의 흐름을 제어하는 여러 종류의 밸브 중에서 가장 빠른 응답 특성을 가지고 있으며, 이러한 특징 때문에 항공기와 같은 특별한 유압시스템에서 사용되어지고 있다. 하지만, 기술 발전에 따라 유체기계시스템 수요자들은 보다 빠르고 정확한 시스템을 요구하게 되었으며, 이에 따라 서보 밸브의 수요가 증가하는 추세에 있다.

압력 특성과 유량 특성을 갖는 서보 밸브를 제작하기 위해서는 서보 밸브의 설계도 중요하지만, 스푼(Spool)과 슬리브(Sleeve)를 설계대로 제작하는 것이 보다 중요하다. 하지만, 국내 밸브 생산업체의 가공 정도는 설계된 스푼과 슬리브를 완벽히 구현하기 힘든 실정이며, 이에 따라 스푼과 슬리브 사이의 오버랩(Over lap)이나 언더랩(Under lap)이 발생하며, 서보 밸브의 반복적인 사용에 따라 스푼 랜드와 슬리브 모서리가 곡을 반경만큼 닳게 된다. 이러한 설계 이외의 요소는 서보밸브의 압력 특성과 유량 특성에 영향을 끼치게 된다.

본 연구에서는 서보 밸브의 압력 정특성과 유량정특성을 스푼과 슬리브 사이의 오버랩이나 언더랩의 영향과 스푼 랜드와 슬리브 모서리의 영향을 포함하여 해석하는 것을 목적으로 한다.

서보 밸브의 압력과 유량 특성을 스푼 랜드와 슬리브의 오버랩과 언더랩, 모서리 특성에 따라 유도한 연구는 곡을 반경의 2배에 해당되는 천이 영역을 사용한 경우⁽¹⁾와 서보 밸브의 동특성을 이용하여 정특성을 유추한 경우⁽²⁾가 있다.

전자의 경우, 천이 영역의 유량 계수를 단순히 거리에 비례하는 값으로 선정하여 압력 특성 곡선에 특이점이 발생하며, 이러한 영향을 줄이기 위해서는 천이영역을 충분히 넓혀야 하는 단점을 가지고 있다.

후자의 경우, 동특성 방정식으로부터 정특성 방정식을 유추함에 따라 밸브의 유량특성 중 누설 특성 부분에 있어 일반적인 누설 유량 곡선과는 판이하게 다른 유량 곡선이 나타나는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 천이 영역의 유량 계수를 거리에 비례하는 값으로 선정하되, 천이 영역을 2개의 구간으로 나눠 기울기가 다른 유량 계수식을 이용하는 방법을 통해 천이 영역의 구간을 좁히면서도 압력 특성이나 유량특성을 보다 정확하게 나타낼 수 있는 관계식을 구하고자 한다.

2. 서보 밸브의 정특성

2.1 서보 밸브

Fig. 1은 일반적인 서보 밸브의 개념도이다. 스푼 이동이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하는 경우에 스푼 변위 x 를 +값이라고 정의한다. 이 때, 스푼의 변위에 따라 스푼 랜드와 슬리브 사이의 유체의 유동은 Table 1과 같다.

환상간극에서의 유량은 식 (1)과 같다.

$$q = \frac{k_0 b^3}{l} \Delta P \tag{1}$$

이 때, $k_0 = \frac{\pi d}{12\mu}$ 이다.

Table 1 Flow of work fluid depends on the spool's displacements

spool disp.	q_1	q_2	q_3	q_4
$0 \leq x < \Delta_0 - r_c$	orifice	annular clearance	orifice	annular clearance
$\Delta_0 - r_c \leq x < \Delta_0 - \frac{2}{3}r_c$			orifice	transition(1)
$\Delta_0 - \frac{2}{3}r_c \leq x < \Delta_0$			orifice	transition(2)
$\Delta_0 \leq x < \Delta_U$			orifice	orifice
$\Delta_U \leq x < \Delta_U + \frac{2}{3}r_c$			transition(3)	orifice
$\Delta_U + \frac{2}{3}r_c \leq x < \Delta_U + r_c$			transition(4)	orifice
$\Delta_U + r_c \leq x$			annular clearance	orifice

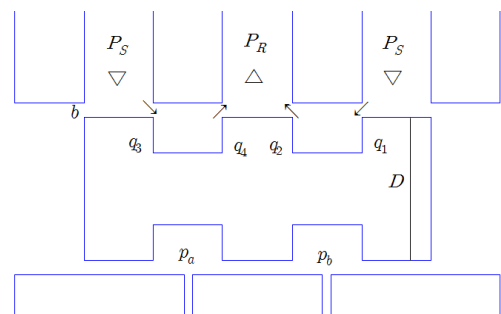


Fig. 1 Schematic of servo valve's flow between spool land and sleeve

Table 2 Parameter value for Fig. 2

parameter	value	parameter	value
b	$4 \times 10^{-6}[\text{m}]$	Δ_U	$5 \times 10^{-6}[\text{m}]$
r_c	$2.5 \times 10^{-6}[\text{m}]$	Δ_0	$5 \times 10^{-6}[\text{m}]$
k_0	5×10^{-3}	D	$1 \times 10^{-2}[\text{m}]$
P_s	$5.88 \times 10^6[\text{Pa}]$	ρ	$860[\text{kg}/\text{m}^3]$
c	0.65		

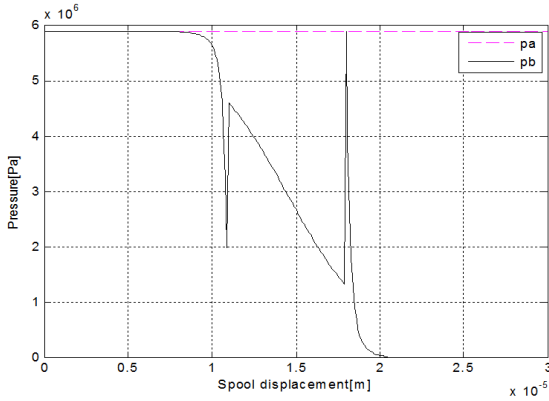


Fig. 2 Pressure characteristic of servo valve

오리피스에서의 유량은 식 (2)와 같다.

$$q = k_U s_0 \sqrt{\Delta P} \quad (2)$$

이때,

$$k_U = cB\sqrt{2/\rho},$$

$$s_0 = \sqrt{(x - \Delta_0 + 2r_c)^2 + (b + 2r_c)^2} - 2r_c \text{이다.}$$

천이영역은 환상간극의 유동에서 오리피스의 유동으로 혹은 그 반대의 경우로 유동이 천이됨에 따라 압력 특성을 보다 현실적으로 나타내기 위해 도입된 부분이다. Fig. 2는 실제 정특성 수식을 이용하여 나타낸 서보 밸브의 압력특성으로 유동이 변동되는 부근에서 노치(notch)가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 노치는 스톱 랜드와 슬리브 모서리의 영향으로 인하여 유로의 단면적이 변동되고, 이에 따라 환상간극 유동의 기울기와 오리피스의 기울기가 달라져 나타나는 현상이다. Table 2는 Fig. 2의 파라미터 값을 나타낸 표이다.

본 연구에서는 천이영역에 따른 유량계수의 선정을 다음과 같은 4가지 경우로 나누어 1차 선형 보간법을 이용하여 구하였다.

먼저, 스톱 변위 x 가 $\Delta_0 - r_c \leq x < \Delta_0 - \frac{2}{3}r_c$ 인 경우이다. 식 (3)과 같이 환상간극에서 오리피스로

천이하는 구간에서 1차 선형 보간법에 의해 구한 유량계수이며, $(\Delta_0 - r_c, k_M)$, $(\Delta_0 - \frac{2}{3}r_c, \frac{k_M + k_U}{2})$ 를 지나는 1차 방정식을 k_M 과 k_U 의 항으로 정리한 식이다.

$$k_{r01} = \frac{3(x - \Delta_0 + r_c)}{2r_c}k_U + \frac{3(\Delta_0 - x) - r_c}{2r_c}k_M \quad (3)$$

여기서, $k_M = \frac{k_0 b^2}{2r_c} \sqrt{p_b}$ 이다.

다음으로, 스톱 변위 x 가 $\Delta_0 - \frac{2}{3}r_c \leq x < \Delta_0$ 인 경우이다. 식 (4)와 같이 환상간극에서 오리피스로 천이하는 구간에서 1차 선형 보간법에 의해 구한 유량계수이며, $(\Delta_0 - \frac{2}{3}r_c, \frac{k_M + k_U}{2})$, (Δ_0, k_U) 를 지나는 1차 방정식을 k_M 과 k_U 의 항으로 정리한 식이다.

$$k_{r02} = \frac{3(x - \Delta_0)}{4r_c}k_U + \frac{3(\Delta_0 - x)}{4r_c}k_M \quad (4)$$

여기서, $k_M' = \frac{k_0 b^2}{2r_c} \sqrt{P_s - p_b}$ 이다.

다음으로, 스톱 변위 x 가 $\Delta_U \leq x < \Delta_U + \frac{2}{3}r_c$ 인 경우이다. 식 (5)와 같이 환상간극에서 오리피스로 천이하는 구간에서 1차 선형 보간법에 의해 구한 유량계수이며, (Δ_U, k_U) , $(\Delta_U + \frac{2}{3}r_c, \frac{k_M' + k_U}{2})$ 를 지나는 1차 방정식을 k_M' 과 k_U 의 항으로 정리한 식이다.

$$k_{r03} = -\frac{3(x - \Delta_U) - 4r_c}{4r_c}k_U + \frac{3(x - \Delta_U)}{4r_c}k_M' \quad (5)$$

끝으로, 스톱 변위 x 가 $\Delta_U + \frac{2}{3}r_c \leq x < \Delta_U + r_c$ 인 경우이다. 식 (6)과 같이 환상간극에서 오리피스로 천이하는 구간에서 1차 선형 보간법에 의해 구한 유량계수이며, $(\Delta_U + \frac{2}{3}r_c, \frac{k_M' + k_U}{2})$, $(\Delta_U + r_c, k_M')$ 를 지나는 1차 방정식을 k_M' 과 k_U 의 항으로 정리한 식이다.

$$k_{r04} = -\frac{3(x - \Delta_U - r_c)}{2r_c}k_U + \frac{3(x - \Delta_U) - r_c}{2r_c}k_M' \quad (6)$$

3. 압력 및 유량 특성

3.1 압력특성

밸브의 압력 특성 시험은 밸브의 제어포트를 잠근 상태($q_a = q_b = 0$)에서 스톱 변위에 따른 스톱 챔버의 압력차를 측정하는 시험이다. 따라서, 압력 특성 방정식을 구하기 위해서는 스톱 랜드와 슬리브 사이의 유량 특성으로부터 챔버의 압력을 구하는 과정이 필요하다.

제어 포트에 흐르는 유량은 식 (7)과 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$q_a = q_1 - q_2 \quad (7)$$

$$q_b = q_4 - q_3 \quad (8)$$

Table 1의 유동관계로부터 제어포트 a에 흐르는 유량 q_a 는 모든 스톱 변위 구간에서 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$q_a = k_U s_1 \sqrt{P_S - p_a} - \frac{k_0 b^3}{\Delta_0 + x} p_a \quad (9)$$

여기서, $s_1 = \sqrt{(\Delta_U + x + 2r_c)^2 + (b + 2r_c)^2} - 2r_c$ 이다.

유량 특성 시험 조건으로부터 $q_a = 0$ 이므로, 스톱 챔버 압력 p_a 는 식 (10)의 해와 같다.

$$a_{11} p_a^2 + a_{12} p_a - a_{12} P_S = 0 \quad (10)$$

여기서, $a_{11} = \frac{k_0^2 b^6}{(x + \Delta_0)^2}$, $a_{12} = k_U^2 s_1^2$ 이다.

Table 1의 유동관계로부터 제어포트 b에 흐르는 유량 q_b 는 스톱 변위 x 에 따라 다음과 같이 구해진다.

1) $0 \leq x < \Delta_0 - r_c$ 일 때
이 구간에서의 제어포트 b에 흐르는 유량 q_b 는 식 (11)과 같이 구해진다.

$$q_b = \frac{k_0 b^3}{\Delta_0 - x} p_b - k_U s_2 \sqrt{P_S - p_b} \quad (11)$$

여기서, $s_2 = \sqrt{(\Delta_U - x + 2r_c)^2 + (b + 2r_c)^2} - 2r_c$ 이

다.

유량 특성 시험 조건으로부터 $q_b = 0$ 이므로, 이 구간에서의 스톱 챔버 압력 p_b 는 식 (12)의 해와 같다.

$$a_{21} p_b^2 + a_{22} p_b - a_{22} P_S = 0 \quad (12)$$

여기서, $a_{21} = \frac{k_0^2 b^6}{(\Delta_0 - x)^2}$, $a_{22} = k_U^2 s_2^2$ 이다.

2) $\Delta_0 - r_c \leq x < \Delta_0 - \frac{2}{3} r_c$ 일 때

이 구간에서의 제어포트 b에 흐르는 유량 q_b 는 식 (13)과 같이 구해진다.

$$q_b = k_{r01} s_3 \sqrt{p_b} - k_U s_2 \sqrt{P_S - p_b} \quad (13)$$

여기서, $s_3 = \sqrt{(x - \Delta_0 + 2r_c)^2 + (b + 2r_c)^2} - 2r_c$ 이다.

유량 특성 시험 조건으로부터 $q_b = 0$ 이므로, 이 구간에서의 스톱 챔버 압력 p_b 는 식 (14)의 해와 같다.

$$a_{01}^2 s_3^2 p_b^2 + 2a_{01} b_{01} k_u s_3^2 p_b \sqrt{p_b} + (k_u^2 s_2^2 + b_{01}^2 k_u^2 s_3^2) p_b - k_u^2 s_2^2 P_S = 0 \quad (14)$$

여기서, $a_{01} = \frac{k_0 b^2 (3(\Delta_0 - x) - r_c)}{4r_c^2}$, $b_{01} = \frac{3(x - \Delta_0 + r_c)}{2r_c}$

이다.

3) $\Delta_0 - \frac{2}{3} r_c \leq x < \Delta_0$ 일 때

이 구간에서의 제어포트 b에 흐르는 유량 q_b 는 식 (15)와 같이 구해진다.

$$q_b = k_{r02} s_3 \sqrt{p_b} - k_U s_2 \sqrt{P_S - p_b} \quad (15)$$

유량 특성 시험 조건으로부터 $q_b = 0$ 이므로, 이 구간에서의 스톱 챔버 압력 p_b 는 식 (16)의 해와 같다.

$$a_{02}^2 s_3^2 p_b^2 + 2a_{02} b_{02} k_u s_3^2 p_b \sqrt{p_b} + (k_u^2 s_2^2 + b_{02}^2 k_u^2 s_3^2) p_b - k_u^2 s_2^2 P_S = 0 \quad (16)$$

여기서, $a_{02} = \frac{3k_0 b^2 (\Delta_0 - x)}{8r_c^2}$, $b_{02} = \frac{3(x - \Delta_0)}{4r_c}$

이다.

4) $\Delta_0 \leq x < \Delta_U$ 일 때

이 구간에서의 제어포트 b에 흐르는 유량 q_b 는 식 (17)과 같이 구해진다.

$$q_b = k_{Us3} \sqrt{p_b} - k_{Us2} \sqrt{P_S - p_b} \quad (17)$$

유량 특성 시험 조건으로부터 $q_b = 0$ 이므로, 이 구간에서의 스톱 챔버 압력 p_b 는 식 (18)과 같다.

$$p_b = \frac{s_2^2 P_S}{s_2^2 + s_3^2} \quad (18)$$

5) $\Delta_U \leq x < \Delta_U + \frac{2}{3}r_c$ 일 때

이 구간에서의 제어포트 b에 흐르는 유량 q_b 는 식 (19)와 같이 구해진다.

$$q_b = k_{Us3} \sqrt{p_b} - k_{r03s2} \sqrt{P_S - p_b} \quad (19)$$

유량 특성 시험 조건으로부터 $q_b = 0$ 이므로, 이 구간에서의 스톱 챔버 압력 p_b 는 식 (20)의 해와 같다.

$$a_{03}^2 s_2^2 (P_S - p_b)^2 + 2a_{03} b_{03} k_u s_2^2 (P_S - p_b) \sqrt{P_S - p_b} + (b_{02}^2 k_u^2 s_2^2 - k_u^2 s_3^2) (P_S - p_b) - K_u^2 s_3^2 P_S = 0 \quad (20)$$

여기서, $a_{03} = \frac{3k_0 b^2 (x - \Delta_U)}{8r_c^2}$, $b_{03} = -\frac{3(x - \Delta_U) - 4r_c}{4r_c}$ 이다.

6) $\Delta_U + \frac{2}{3}r_c \leq x < \Delta_U + r_c$ 일 때

이 구간에서의 제어포트 b에 흐르는 유량 q_b 는 식 (21)과 같이 구해진다.

$$q_b = k_{Us3} \sqrt{p_b} - k_{r04s2} \sqrt{P_S - p_b} \quad (21)$$

유량 특성 시험 조건으로부터 $q_b = 0$ 이므로, 이 구간에서의 스톱 챔버 압력 p_b 는 식 (22)의 해와 같다.

$$a_{04}^2 s_2^2 (P_S - p_b)^2 + 2a_{04} b_{04} k_u s_2^2 (P_S - p_b) \sqrt{P_S - p_b} + (b_{04}^2 k_u^2 s_2^2 - k_u^2 s_3^2) (P_S - p_b) - K_u^2 s_3^2 P_S = 0 \quad (22)$$

여기서, $a_{04} = \frac{k_0 b^2 (3(x - \Delta_U) - r_c)}{4r_c^2}$, $b_{04} = -\frac{3(x - \Delta_U) - r_c}{2r_c}$

이다.

7) $\Delta_U + r_c \leq x$ 일 때

이 구간에서의 제어포트 b에 흐르는 유량 q_b 는 식 (23)과 같이 구해진다.

$$q_b = k_{Us3} \sqrt{p_b} - \frac{k_0 b^3}{x - \Delta_U} (P_S - p_b) \quad (23)$$

유량 특성 시험 조건으로부터 $q_b = 0$ 이므로, 이 구간에서의 스톱 챔버 압력 p_b 는 식 (24)의 해와 같다.

$$a_{31} p_b^2 - (2a_{31} P_S + a_{32}) p_b + a_{31} P_S^2 = 0 \quad (24)$$

여기서, $a_{31} = \frac{k_0^2 b^6}{(x - \Delta_U)^2}$, $a_{32} = k_{Us3}^2$ 이다.

3.2 유량특성

밸브의 유량 특성 시험은 밸브가 무부하 상태에서 서 동작($p_a = p_b = p$)할 수 있도록 설정한 상태에서 제어포트를 흐르는 유량($q_a = q_b$)을 스톱 변위에 따라 측정하는 시험이다. 따라서, 유량 특성 방정식을 구하기 위해서는 스톱 밸브 내의 두 챔버 압력을 동일하게 두고, 제어포트에 흐르는 유량 사이의 관계로부터 밸브 챔버 내의 압력을 구하는 과정이 필요하다. 이후 구해진 압력을 식 (9)에 대입하여 스톱 변위에 따른 유량을 구할 수 있다.

1) $0 \leq x < \Delta_0 - r_c$ 일 때

시험 조건으로부터 식 (9)와 식 (11)은 같으며, 밸브의 두 챔버 압력 또한 같다고 둘 때, 밸브 챔버 압력 p 는 식 (25)의 해로 구할 수 있다.

$$A_{01} p^2 + A_{02} p - A_{02} P_S = 0 \quad (25)$$

여기서, $A_{01} = \frac{4k_0^2 b^6}{(\Delta_0^2 - x^2)^2}$, $A_{02} = k_U^2 (s_1 + s_2)^2$ 이다.

2) $\Delta_0 - r_c \leq x < \Delta_0 - \frac{2}{3}r_c$ 일 때

시험 조건으로부터 식 (9)와 식 (13)은 같으며, 밸브의 두 챔버 압력 또한 같다고 둘 때, 밸브 챔버 압력 p 는 식 (26)의 해로 구할 수 있다.

$$A_{11}p^2 + A_{12}p\sqrt{p} + A_{13}p - A_{14}P_S = 0 \quad (26)$$

여기서, $A_{11} = \frac{k_0^2 b^6}{(\Delta_0 + x)^2} + a_{01}^2 s_3^2 + \frac{2s_3 k_0 b^3}{\Delta_0 + x} a_{01}$,

$$A_{12} = 2a_{01} b_{01} k_u s_3^2 + \frac{2s_3 k_0 b^3}{\Delta_0 + x} b_{01} k_u,$$

$$A_{13} = b_{01}^2 k_U^2 s_3^2 + k_U^2 (s_1 + s_2)^2,$$

$$A_{14} = k_U^2 (s_1 + s_2)^2 \text{ 이다.}$$

3) $\Delta_0 - \frac{2}{3}r_c \leq x < \Delta_0$ 일 때

시험 조건으로부터 식 (9)와 식 (15)는 같으며, 밸브의 두 챔버 압력 또한 같다고 둘 때, 밸브 챔버 압력 p 는 식 (27)의 해로 구할 수 있다.

$$A_{21}p^2 + A_{22}p\sqrt{p} + A_{23}p - A_{24}P_S = 0 \quad (27)$$

여기서, $A_{21} = \frac{k_0^2 b^6}{(\Delta_0 + x)^2} + a_{02}^2 s_3^2 + \frac{2s_3 k_0 b^3}{\Delta_0 + x} a_{02}$,

$$A_{22} = 2a_{02} b_{02} k_u s_3^2 + \frac{2s_3 k_0 b^3}{\Delta_0 + x} b_{02} k_u,$$

$$A_{23} = b_{02}^2 k_U^2 s_3^2 + k_U^2 (s_1 + s_2)^2,$$

$$A_{24} = k_U^2 (s_1 + s_2)^2 \text{ 이다.}$$

4) $\Delta_0 \leq x < \Delta_U$ 일 때

시험 조건으로부터 식 (9)와 식 (17)은 같으며, 밸브의 두 챔버 압력 또한 같다고 둘 때, 밸브 챔버 압력 p 는 식 (28)의 해로 구할 수 있다.

$$A_{31}p^2 + A_{32}p\sqrt{p} + A_{33}p - A_{34}P_S = 0 \quad (28)$$

여기서, $A_{31} = \frac{k_0^2 b^6}{(\Delta_0 + x)^2}$, $A_{32} = \frac{2k_U k_0 s_3 b^3}{\Delta_0 + x}$,

$$A_{33} = k_U^2 ((s_1 + s_2)^2 + s_3^2), \quad A_{34} = k_U (s_1 + s_2)^2$$

이다.

5) $\Delta_U \leq x < \Delta_U + \frac{2}{3}r_c$ 일 때

시험 조건으로부터 식 (9)와 식 (19)는 같으며,

밸브의 두 챔버 압력 또한 같다고 둘 때, 밸브 챔버 압력 p 는 식 (29)의 해로 구할 수 있다.

$$A_{41}p^2 + A_{42}p\sqrt{p} + A_{43}p + A_{24}\sqrt{p} + A_{25}P_S = 0 \quad (29)$$

여기서, $A_{41} = \left(\frac{k_0 b^3}{\Delta_0 + x} + a_{03} s_2\right)^2$, $A_{42} = 2\left(\frac{k_0 b^3}{\Delta_0 + x} + a_{03} s_2\right) k_u s_3$,

$$A_{43} = (k_u s_1 + b_{03} k_u s_2)^2 - 2\left(\frac{k_0 b^3}{\Delta_0 + x} + a_{03} s_2\right) a_{03} s_2 P_S,$$

$$A_{44} = -2k_u s_3 a_{03} s_2 P_S, \quad A_{45} = -(k_u s_1 + b_{03} k_u s_2)^2 \text{ 이다.}$$

6) $\Delta_U + \frac{2}{3}r_c \leq x < \Delta_U + r_c$ 일 때

시험 조건으로부터 식 (9)와 식 (21)은 같으며, 밸브의 두 챔버 압력 또한 같다고 둘 때, 밸브 챔버 압력 p 는 식 (30)의 해로 구할 수 있다.

$$A_{51}p^2 + A_{52}p\sqrt{p} + A_{53}p + A_{54}\sqrt{p} + A_{55}P_S = 0 \quad (30)$$

여기서, $A_{51} = \left(\frac{k_0 b^3}{\Delta_0 + x} + a_{04} s_2\right)^2$, $A_{52} = 2\left(\frac{k_0 b^3}{\Delta_0 + x} + a_{04} s_2\right) k_u s_3$,

$$A_{53} = (k_u s_1 + b_{04} k_u s_2)^2 - 2\left(\frac{k_0 b^3}{\Delta_0 + x} + a_{04} s_2\right) a_{04} s_2 P_S,$$

$$A_{54} = -2k_u s_3 a_{04} s_2 P_S, \quad A_{55} = -(k_u s_1 + b_{03} k_u s_2)^2 \text{ 이다.}$$

7) $\Delta_U + r_c \leq x$ 일 때

시험 조건으로부터 식 (9)와 식 (23)은 같으며, 밸브의 두 챔버 압력 또한 같다고 둘 때, 밸브 챔버 압력 p 는 식 (31)의 해로 구할 수 있다.

$$A_{61}^2 p^2 + A_{62} p \sqrt{p} + A_{63} p - A_{64} \sqrt{p} + A_{65} P_S = 0 \quad (31)$$

여기서, $A_{61} = k_0 b^3 \left(\frac{1}{\Delta_0 + x} + \frac{1}{x - \Delta_U}\right)$,

$$A_{62} = 2k_U k_0 s_3 b^3 \left(\frac{1}{\Delta_0 + x} + \frac{1}{x - \Delta_U}\right),$$

$$A_{63} = k_U^2 (s_1^2 + s_3^2) - 2\left(\frac{(k_0 b^3)^2 P_S}{x - \Delta_U}\right) \left(\frac{1}{\Delta_0 + x} + \frac{1}{x - \Delta_U}\right),$$

$$A_{64} = \frac{2k_U k_0 s_3 b^3 P_S}{x - \Delta_U},$$

$$A_{65} = \left(\frac{k_0 b^3}{x - \Delta_U}\right)^2 P_S - (k_U s_1)^2 \text{ 이다.}$$

3.2 특성곡선

Table 3은 압력 특성 곡선과 유량 특성 곡선을

Table 3 Parameter value for Fig. 3, Fig. 4

parameter	value	parameter	value
b	$4 \times 10^{-6}[\text{m}]$	Δ_U	$1.8 \times 10^{-5}[\text{m}]$
r_c	$2.5 \times 10^{-6}[\text{m}]$	Δ_0	$1.1 \times 10^{-5}[\text{m}]$
k_0	5×10^{-3}	D	$1 \times 10^{-2}[\text{m}]$
P_s	$5.88 \times 10^6[\text{Pa}]$	ρ	$860[\text{kg}/\text{m}^3]$
c	0.65		

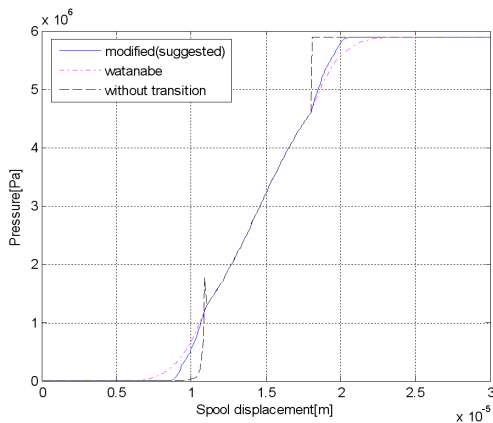


Fig. 3 Pressure characteristic of servo valve

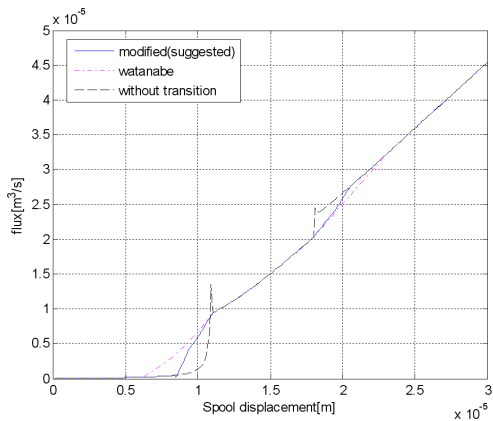


Fig. 4 Flux characteristic of servo valve

그리기 위한 파라미터를 정리한 표이다.

Fig. 3은 기존의 참고문헌(1)에서 제시하는 방법에 의해 구한 압력 특성과 본 연구에서 제시하고 있는 방법에 의해 구한 압력 특성을 나타낸 그림이다. Table 3에서 정의한 언더랩량은 $11\mu\text{m}$ 이며, Fig. 3의 시뮬레이션 결과 참고문헌의 압력 특성 곡선에서는 $2r_c$ 에 해당되는 $5\mu\text{m}$ 에서 부터 압력 변화가 일어나고 있다. 하지만, 일반적인 환

상간극의 실험식으로부터 이 거리에서는 압력 변화가 일어나지 않거나 충분히 작아야만 한다. 즉, 참고문헌의 압력 곡선은 천이영역이 넓기 때문에 실제 압력과 다른 결과가 나타난다.

Fig. 4는 기존의 참고문헌(1)에서 제시하는 방법에 의해 구한 유량 특성과 본 연구에서 제시하고 있는 방법에 의해 구한 유량 특성을 비교하여 나타낸 그림이다. 압력 특성과 마찬가지로 참고문헌의 유량 특성곡선은 환상간극 유동 시 유량이 발생하지 않아야 하는 지점에서 유량이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 스폴 밸브의 압력 특성과 유량 특성을 정특성 방정식을 유도하여 구하였으며, 기존 논문에서 발생하고 있는 천이영역에 따른 오차를 천이영역을 두 영역으로 나누어 처리하는 방법을 통해 50% 이상 줄일 수 있었다.

향후, 실제 스폴 밸브 시스템에 대하여 압력 특성 시험과 유량 특성 시험을 실시하여 시뮬레이션 결과를 검증하는 과정이 필요하다 판단된다.

참고문헌

- (1) Watanabe, K. and Tsushima, K., 1995, "Static Characteristics Analysis of Hybrid-Type Servo Valve," *Journal of the Japan Fluid Power System Society*, Vol. 26, No. 7, pp. 888-894.
- (2) Yun, S. N., Ham, Y. B., Park, J. H. and Jeong, H. H., 2011, "A Study on the Position Control Accuracy Improvement of Spool-Sleeve for Servo Valve," *2011's Spring Conference of the Korean Society for Precision Engineering*, pp. 1211-1212.
- (3) Park, H. B. and Sung, H. J., 2008, "Flow Analysis of Servo valve," *2008 KSME Fall Annual Meeting*, pp.1221-1225.
- (4) Seo, J. S., Shin, Y. S., Chun, Y. H. Jeong, H. M. and Chung H. S., 2004, "A Study on the Frequency Response Characteristics of High Response Flow Control Servo Valve," *International Journal Of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 12, No. 3, pp. 131-140.