

노즐-플래퍼형 서보밸브의 정상상태 특성 해석

Analysis of Steady State Characteristics of Nozzle-Flapper Type Servo Valves

오동훈 · 김현호 · 이일영
D. H. Oh, H. H. Kim and I. Y. Lee

1. 서 언

노즐-플래퍼형 서보밸브는 토크모터, 노즐/플래퍼 기구, 스톱 등으로 이루어져 있다. 전기신호가 토크모터에 가해지면 노즐/플래퍼 기구가 움직여서 유압력이 발생하고, 이 유압력에 의하여 메인스톱이 움직이게 된다.

노즐-플래퍼형 서보 밸브의 특성은 (1)토크 모터의 특성, (2)노즐-플래퍼 기구의 특성, (3)스톱 밸브의 특성의 3개 부분을 해석함으로써 규명될 수 있다. 이 해설에서는 노즐-플래퍼 기구와 스톱밸브의 정상상태 특성을 상세히 해석하고자 한다. 구체적으로는 이 주제에 관한 주요 기초 문헌의 하나인 J. Watton 교수의 텍스트¹⁾에 기술된 해석을 더욱 상세히 해설함으로써 관련 분야 연구에 기초가 되는 자료를 제공하고자 한다.

2. 노즐-플래퍼형 서보 밸브의 기본 구성

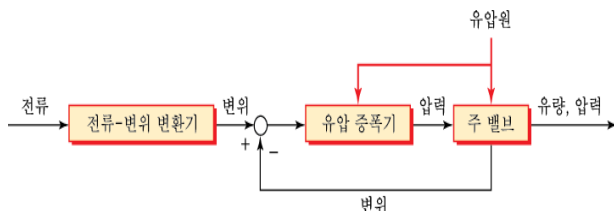


그림 1 서보밸브의 기본 구성

서보밸브의 기본 구성을 블록 선도의 형태로 그림 1에 나타낸다. 그림에서 전류-변위 변환기는 전류 신호를 변위량으로 변환시키는 장치이며, 그 대표적인 예가 토크 모터(torque motor)이다. 유압 증폭기는 토크 모터로부터 발생한 미세 변위를 주 밸브 구동에 필요한 유압력으로 변환하는 기구로서, 이 부분이 1단 증폭부이다. 1단 증폭부의 대표적인 예가 노즐-플래퍼 기구이다. 2단 증폭부인 주 밸브로는 주로 스톱을 사용하며, 1단 증폭부에서 발생된 압력이 스톱의 양끝에 작용하여 스톱의 구동력으로

작용한다. 이 구동력에 따라 스톱의 위치가 결정되어, 압력유의 유동 방향, 유량, 압력을 제어하게 된다²⁾.

3. 플래퍼에 작용하는 토크의 정상상태 평형식

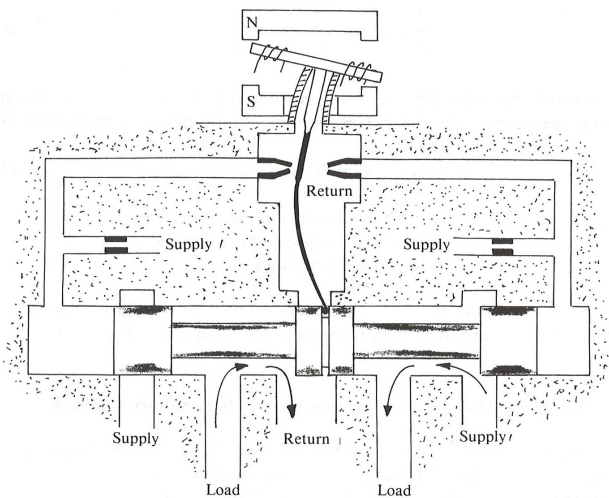


그림 2 힘 피드백식 노즐-플래퍼형 서보 밸브의 작동

실제로 플래퍼의 구동에 소요되는 토크(net torque) T_i 는 다음과 같다.

$$T_i = k_t \Delta i + k_m \theta \tag{1}$$

여기서 k_t , k_m 은 토크모터의 전자기 상수이고 θ 는 플래퍼의 각변위이다. 식 (1)의 두 번째 항은 영구 자석이 생성하는 추가토크이고, 일반적으로 $k_m > 0$ 이므로 플래퍼의 구동 토크는 $k_t \Delta i$ 보다도 더욱 큰 값으로 된다.

가요관의 탄성력과 노즐에서 분사되는 유체가 플래퍼에 가하는 힘에 따른 토크 T_{f1} 은 다음과 같다.

$$T_{f1} = k_a \theta + (p_a - p_b) a_n r \tag{2}$$

여기서 k_a 는 개요관의 탄성계수이다. p_a 와 p_b 는 파일럿 압력, a_n 은 노즐의 단면적이다.

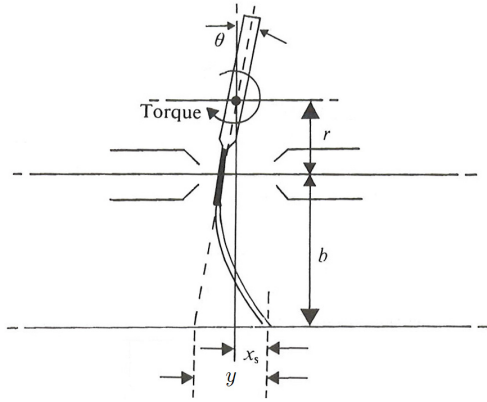


그림 3 플래퍼에 관련된 물리인자

피드백 스프링이 플래퍼에 가하는 회전력 T_{f2} 는 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$T_{f2} = ky(r+b) \tag{3}$$

$$y = x_s + (r+b)\theta \tag{4}$$

여기서 k 는 피드백 스프링의 탄성계수, y 는 플래퍼의 각변위 θ 에 따른 피드백 스프링의 변위이며 식 (4)와 같다. 여기서 x_s 는 스펴의 변위이며 T_{f2} 는 다음과 같이 정리된다.

$$T_{f2} = k[x_s + (r+b)\theta] \cdot (r+b) \tag{5}$$

식 (1), (2), (5)로부터 $T_i = T_{f1} + T_{f2}$ 의 관계식에 의해 다음 식을 얻을 수 있다.

$$k_t \Delta i = (k_a - k_m)\theta + (p_a - p_b)a_n r + k[x_s + (r+b)\theta](r+b) \tag{6}$$

4. 노즐/플래퍼 기구의 정특성 해석

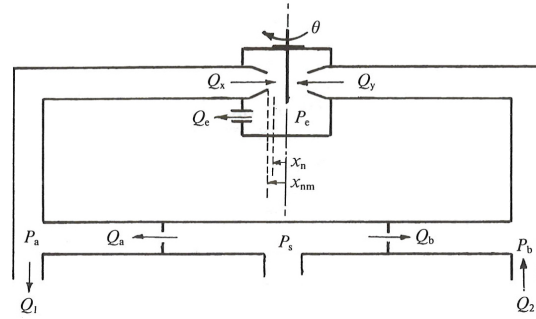


그림 4 노즐-플래퍼 기구의 작동

그림 4에서 노즐부분에서의 플래퍼 변위 x_n 에 따라 결정되는 파일럿 압력 p_a 와 p_b 는 플래퍼변위와 $p_a - p_b$ 의 미분방정식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$(p_a - p_b) = \frac{4Zp_s x_n}{x_{nm}(1+Z)^2} = \frac{4Zp_s r\theta}{x_{nm}(1+Z)^2} \tag{7}$$

$$x_n = r\theta \tag{8}$$

토크 관계식 (6)에서 플래퍼의 각변위 θ 가 결정되면, 노즐부분에서 플래퍼의 변위 x_n 은 $r\theta$ 로 둘 수 있다. Z 는 무차원계수로서 변위 x_n 에 따른 파일럿 압력의 변화에 영향을 준다.

※ 식 (7)의 유도

정상상태 작동조건에서 다음을 얻을 수 있다.

$$Q_a = Q_x \tag{1}$$

$$Q_b = Q_y \tag{2}$$

오리피스를 지나는 유량 Q_a 와 Q_b 는 각각 다음과 같다.

$$Q_a = C_{qo} a_o \sqrt{\frac{2(p_s - p_a)}{\rho}} \tag{3}$$

$$Q_b = C_{qo} a_o \sqrt{\frac{2(p_s - p_b)}{\rho}} \tag{4}$$

여기서 C_{qo} 는 오리피스의 유량계수이며 a_o 는 오리피스의 단면적이다.

노즐을 통해 공급되는 유량 Q_x 와 Q_y 는 다음과 같다.

$$Q_x = C_{qn} a_{cx} \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}} \tag{5}$$

$$Q_y = C_{qn} a_{cy} \sqrt{\frac{2p_b}{\rho}} \tag{6}$$

여기서 C_{qn} 은 노즐의 유량계수이며 노즐의 관로 면적 a_c 는 플래퍼의 움직임 고려하여 다음과 같이 표시된다.

$$a_{cx} = \pi d_n (x_{nm} - x_n) \tag{7}$$

$$a_{cy} = \pi d_n (x_{nm} + x_n) \tag{8}$$

식 ①로부터

$$C_{qo} a_o \sqrt{\frac{2(p_s - p_a)}{\rho}} = C_{qn} a_{cx} \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}} \tag{9}$$

양변에 $\sqrt{\frac{p_a}{p_s}}$ 를 곱해주면 다음과 같다.

$$C_{qo} a_o \sqrt{\frac{2p_a}{\rho} - \frac{2p_a^2}{\rho p_s}} = (C_{qn} \pi d_n x_{nm} \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}}) (1 - \frac{x_n}{x_{nm}}) \cdot \sqrt{\frac{p_a}{p_s}} \tag{10}$$

$$C_{qo} a_o \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}} \cdot \sqrt{1 - \frac{p_a}{p_s}} = (C_{qn} \pi d_n x_{nm} \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}}) (1 - \frac{x_n}{x_{nm}}) \cdot \sqrt{\frac{p_a}{p_s}} \tag{11}$$

여기서 $\bar{p}_a = \frac{p_a}{p_s}$, $\bar{x}_n = \frac{x_n}{x_{nm}}$, $k_o = \frac{C_{qo} \pi d_o^2}{4} \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}}$, $k_n = C_{qn} \pi d_n x_{nm} \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}}$ 의 무차원 변수들 및 무차원 정수들을 도입하여 식 ⑪을 정리하면 다음과 같다.

$$k_o \sqrt{1 - \bar{p}_a} = k_n (1 - \bar{x}_n) \sqrt{\bar{p}_a} \tag{12}$$

식⑫를 \bar{p}_a 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{p}_a = \frac{1}{1 + Z(1 - \bar{x}_n)^2} \tag{13}$$

한편, 식 ②에 대해서도 위에서와 유사한 풀이 과정을 적용함으로써 식 \bar{p}_b 에 관한 다음 식을 얻는다.

$$\bar{p}_b = \frac{1}{1 + Z(1 + \bar{x}_n)^2} \tag{14}$$

식 ⑫, ⑬ 및 ⑭에서 $Z = \left[\frac{k_n}{k_o} \right]^2 = \left[\frac{4C_{qn} x_{nm} d_n^2}{C_{qo} d_o^2} \right]^2$ 이며, 위 식을 $\bar{p}_a - \bar{p}_b$ 로 정리한다.

$$\bar{p}_a - \bar{p}_b = \frac{4Z \bar{x}_n}{(1 + Z(1 + \bar{x}_n)^2)(1 + Z(1 - \bar{x}_n)^2)} \tag{15}$$

위 식에서 \bar{x}_n 가 중립점 부근에서의 미소변위임을 고려하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{(p_a - p_b)/p_s}{x_n/x_{nm}} \approx \frac{4Z}{(1 + Z)^2} \tag{16}$$

식 ⑬의 유도

$$\begin{aligned} \text{식 ⑬는 } \bar{p}_a - \bar{p}_b &= \frac{4Z \bar{x}_n}{(1 + Z(1 + \bar{x}_n)^2)(1 + Z(1 - \bar{x}_n)^2)} \\ &= \frac{4Z \bar{x}_n}{Z^2 \bar{x}_n^4 + (2Z - 2Z^2) \bar{x}_n^2 + Z^2 + 2Z + 1} \end{aligned} \tag{a}$$

위 식을 \bar{x}_n 에 관하여 미분하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{d(\bar{p}_a - \bar{p}_b)}{d\bar{x}_n} \right|_{\bar{x}_n=0} &= \frac{(4Z \bar{x}_n)' (Z^2 \bar{x}_n^4 + (2Z - 2Z^2) \bar{x}_n^2 + Z^2 + 2Z + 1) - (4Z \bar{x}_n) (Z^2 \bar{x}_n^4 + (2Z - 2Z^2) \bar{x}_n^2 + Z^2 + 2Z + 1)'}{(Z^2 \bar{x}_n^4 + (2Z - 2Z^2) \bar{x}_n^2 + Z^2 + 2Z + 1)^2} \Big|_{\bar{x}_n=0} \\ &= \frac{4Z(Z^2 + 2Z + 1)}{(Z^2 + 2Z + 1)^2} \\ &= \frac{4Z}{(Z + 1)^2} \end{aligned} \tag{b}$$

또한, $\frac{d(\overline{p_a - p_b})}{dx_n}$ 는 $\overline{x_n}$ 가 중립점 부근에서의 미소변위임을 고려함으로써 식 ⑤의 좌변은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d(\overline{p_a - p_b})}{dx_n} = \frac{(p_a - p_b)/p_s}{x_n/x_{nm}} \tag{C}$$

식 ⑤=③의 관계로부터 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{(p_a - p_b)/p_s}{x_n/x_{nm}} = \frac{4Z}{(1+Z)^2}$$

식 ①⑥을 $(p_a - p_b)$ 에 관하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$(p_a - p_b) = \frac{4Zp_s x_n}{x_{nm}(1+Z)^2} \tag{17}$$

5. 스톱 밸브의 정특성 해석

식 (7)에서 결정된 파일럿 압력 p_a 와 p_b 가 주 스톱 밸브의 양쪽에 가해질 때, 주 스톱 밸브에 작용하는 힘의 평형 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$(p_a - p_b)a_s = k[x_s + (r+b)\theta] + 2C_q w \cos\theta_f (p_s - p_t)x_s \tag{9}$$

여기서 k 는 피드백 스프링의 탄성계수, C_q 는 주 스톱 밸브에서의 유량 계수, w 는 밸브 개구부의 면적구배, θ_f 는 유체의 유·출입각도 그리고 p_t 는 부하에서의 압력강하를 나타낸다.

식 (9)의 우변 첫 번째 항은 피드백 스프링력에 따른 항이고, 두 번째 항은 유체의 정상유동력 F_f 에 따른 항이다.

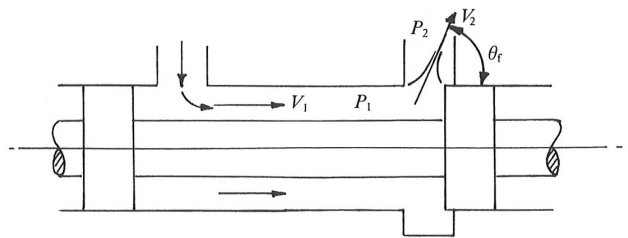


그림 5 서보 밸브의 스톱

※ 식(9)의 정상유동력 F_f 의 유도

유동력은 밸브 실내의 유체가 유동함에 따라서 발생하는 압력 및 전단력 분포에 의한 힘이며 여기서 운동량 변화는 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\text{momentum change} = \rho Q V_2 \cos\theta_f - \rho Q V_1 \tag{1}$$

여기서 Q 는 용적유량이며 미소 개구 열림에서 초기 운동량 $\rho Q V_1$ 은 무시할 수 있다.

$$F_f = \rho Q V_2 \cos\theta_f = \frac{\rho Q^2 \cos\theta_f}{C_c a} \tag{2}$$

여기서 유체속도 $V_2 = Q/a_{vena} = Q/C_c a$ 로 둘 수 있으며 이때 a_{vena} 는 수축단면적, a 는 출구포트의 단면적, $C_c (= a_{vena}/a)$ 는 수축 계수이다.

(∵ 오리피스와 같이 유체나 넓은 유로에서, 급하게 좁고 작은 구멍과 틈의 유출구를 통할 때 유체는 관성 때문에 작은 구멍 등의 단면보다 작은 단면으로 수축해서 유출한다. 이 때의 현상을 축류라고 한다.)

위 식에 $Q = C_q a \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$ 를 대입하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$F_f = \frac{\rho C_q^2 a^2 (p_1 - p_2) \cos\theta_f}{\rho C_c a} = 2 \frac{C_q^2}{C_c} a \cos\theta_f (p_1 - p_2) = 2 C_q a \cos\theta_f (p_s - p_t) \quad (\text{where } C_q^2/C_c \cong C_q) \tag{3}$$

6. 입력전류 i 와 대한 스플변위 x_s 의 관계식

식(7)에서 결정된 파일럿 압력

앞서 구한 식 (6), (7), (8)로부터 입력전류 i 에 대한 스플변위 x_s 의 방정식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$x_s = \frac{\frac{p_s a_s}{kx_{nm}} - \frac{(r+b)(1+Z)^2}{r4Z}}{\frac{p_s a_n r}{kx_{nm}} [k+2C_q w \cos \theta_f (p_s - p_l)] + \frac{(r+b)^2 (1+Z)^2}{r4Z} [k+2C_q w \cos \theta_f (p_s - p_l)] + \frac{p_s a_s}{x_{nm}} (r+b) - \frac{k(r+b)^2 (1+Z)^2}{r4Z}} k_i \Delta i \quad (10)$$

※ 식 (10)의 유도

식 (9)에 식 (7)을 대입한 후 θ 에 대해 정리하면 아래와 같다.

$$\frac{4Zp_s r \theta}{x_{nm} (1+Z)^2} a_s = [k+F_f] x_s + k(r+b)\theta, \quad \theta = \frac{[k+F_f] x_s x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2} \quad (1)$$

여기서 $F_f = 2C_q w \cos \theta_f (p_s - p_l)$ 이다.

식 (6)에서 $(k_a - k_m)\theta$ 항의 계산치는 나머지 두 항의 계산치와 비교할 때 매우 작아서 무시가능하므로 식 (6)에 식 (7)과 식 ①을 대입 후 정리한다.

$$k_i \Delta i = \frac{4Zp_s r^2 a_n}{x_{nm} (1+Z)^2} \theta + k(r+b)^2 \theta + kx_s (r+b) \quad [(6) \leftarrow (7)] \quad (2)$$

$$= \left[\frac{4Zp_s r^2 a_n [k+F_f] + k(r+b)^2 [k+F_f] x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2} + k(r+b) \right] x_s \quad [(2) \leftarrow (1)] \quad (3)$$

식 ③의 유도

$$\begin{aligned} k_i \Delta i &= \left[\frac{4Zp_s r^2 a_n}{x_{nm} (1+Z)^2} + k(r+b)^2 \right] \theta + kx_s (r+b) \\ &= \left[\frac{4Zp_s r^2 a_n}{x_{nm} (1+Z)^2} + k(r+b)^2 \right] \left[\frac{[k+F_f] x_s x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2} \right] + kx_s (r+b) \\ &= \frac{4Zp_s r^2 a_n [k+F_f] x_s + k(r+b)^2 [k+F_f] x_s x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2} + kx_s (r+b) \\ &= \left[\frac{4Zp_s r^2 a_n [k+F_f] + k(r+b)^2 [k+F_f] x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2} + k(r+b) \right] x_s \end{aligned}$$

식 ③을 x_s 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$x_s = \left[\frac{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r^2 a_n (k+F_f) + k(r+b)^2 (k+F_f)x_{nm} (1+Z)^2 + k(r+b)4Zp_s r a_s - k^2 (r+b)^2 x_{nm} (1+Z)^2} \right] k_i \Delta i \quad (4)$$

식 ④의 유도

$$\begin{aligned} \left[\frac{4Zp_s r^2 a_n [k+F_f] + k(r+b)^2 [k+F_f] x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2} + k(r+b) \right] x_s &= k_i \Delta i \\ x_s &= \left[\frac{1}{\frac{4Zp_s r^2 a_n [k+F_f] + k(r+b)^2 [k+F_f] x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2} + k(r+b)} \right] k_i \Delta i \\ &= \left[\frac{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r^2 a_n [k+F_f] + k(r+b)^2 [k+F_f] x_{nm} (1+Z)^2 + [4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2] k(r+b)} \right] k_i \Delta i \\ &= \left[\frac{4Zp_s r a_s - k(r+b)x_{nm} (1+Z)^2}{4Zp_s r^2 a_n (k+F_f) + k(r+b)^2 (k+F_f)x_{nm} (1+Z)^2 + k(r+b)4Zp_s r a_s - k^2 (r+b)^2 x_{nm} (1+Z)^2} \right] k_i \Delta i \end{aligned}$$

식 ④의 분자와 분모를 $4Zrkx_{nm}$ 로 나누어 주면 식 (10)으로 된다.

$$x_s = \left[\frac{\frac{p_s a_s}{kx_{nm}} - \frac{(r+b)(1+Z)^2}{4Zr}}{\frac{p_s a_n r}{kx_{nm}} (k+F_f) + \frac{(r+b)^2 (1+Z)^2}{4Zr} (k+F_f) + \frac{p_s a_s}{x_{nm}} (r+b) - \frac{k(r+b)^2 (1+Z)^2}{4Zr}} \right] k_i \Delta i \quad [(4)/4Zrkx_{nm}] \quad (5)$$

아래의 그림 6 블록선도에서 입력전류 i 와 스펴 변위 x_s 사이의 관계를 알 수 있다.

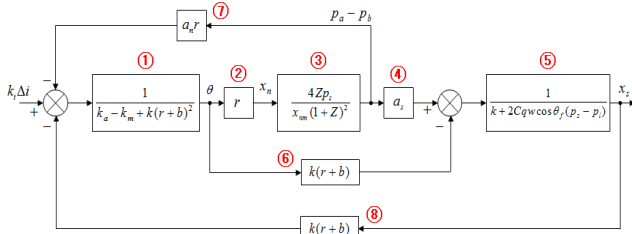


그림 6 서보밸브의 블록선도

※ 블록선도에 대한 설명

식 (6)을 θ 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$\theta = \frac{k_i \Delta i - k(r+b)x_s - a_n r(p_a - p_b)}{k_a - k_m + k(r+b)^2}$$

여기서 차례대로 ①, ⑧, ⑦ 을 나타낼 수 있으며, ②와 ③은 식 (7), (8)로부터 구할 수 있다.

식 (9)를 x_s 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$x_s = \frac{(p_a - p_b)a_s - k(r+b)\theta}{k + 2C_q w \cos \theta_f (p_s - p_l)}$$

여기서 분자는 ④와 ⑥, 분모는 ⑤를 나타낸다.

식 (10)에서는 아래와 같은 조건이 만족된다.

$$\frac{p_s a_s}{k x_{nm}} \gg \frac{(r+b)(1+Z)^2}{r4Z} \quad (11)$$

$$\left[1 + \frac{2C_q w \cos \theta_f (p_s - p_l)}{k}\right] \frac{r}{(r+b)} \frac{a_n}{a_s} \ll 1 \quad (12)$$

표 1 서보 밸브의 주요 물리 수치

Parameters	Values
공급압력(p_s)	140 bar
부하압력(p_l)	70 bar
스풀의 단면적(a_s)	49.51 mm ²
노즐의 단면적(a_n)	0.28 mm ²
플래퍼 길이(r)	15.4 mm
플래퍼의 최대변위(x_{nm})	0.05 mm
피드백 스프링 길이(b)	18.85 mm
피드백 스프링 탄성계수(k)	20 N/mm
무차원계수(Z)	0.81
유량계수(C_q)	0.78
밸브 개구부의 면적구배(w)	24.94
유체의 유출입 각도(θ_f)	69°

※ 식 (11), (12)의 확인

저자들이 보유한 정격유량 63 L/min(@밸브 압력강하 70 bar)의 밸브에서의 실측치인 표 1에 제시된 수치들을 사용하여 식 (11) 및 (12)을 평가한다.

식 (11)의 계산결과 :

$$\frac{p_s a_s}{k x_{nm}} = 6.93 \times 10^2, \quad \frac{(r+b)(1+Z)^2}{r4Z} = 2.25$$

식 (12)의 계산결과 :

$$\left[1 + \frac{2C_q w \cos \theta_f (p_s - p_l)}{k}\right] \frac{r}{(r+b)} \frac{a_n}{a_s} = 0.0149$$

이므로 식 (11)과 식 (12)는 유효하다고 볼 수 있다.

식 (11)과 식 (12)가 성립하면 식 (10)은 다음과 같은 비례식으로 구해진다.

$$x_s = \frac{k_i \cdot \Delta i}{k(r+b)} \quad (13)$$

표 2 기호 설명

파라미터 정리	
a	출구포트 단면적
a_c	노즐의 관로면적
a_n	노즐의 단면적
a_o	오리피스의 관로면적
a_s	스풀의 단면적
a_{vena}	베나(수축) 단면적
A	$2C_q w \cos \theta_f (p_s - p_l)$
b	노즐 - 스펴밸브 사이 거리
C_c	베나(수축) 계수
C_q	스풀에서의 유량계수
C_{qn}	노즐의 유량계수
C_{qo}	오리피스의 유량계수
d_o	오리피스의 직경
d_n	노즐의 직경
F_f	정상유동력
i	입력전류
k	피드백스프링의 탄성계수
k_a	가요관의 탄성계수
k_n	$C_{qn} \pi d_n x_{nm} \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}}$
k_o	$\frac{C_{qo} \pi d_o^2}{4} \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}}$
k_t, k_m	토크모터 전자기 상수
p_a, p_b	파일럿 압력

표 2 기호 설명(계속)

파라미터 정리	
p_l	부하압력
p_s	공급압력
\bar{p}_a	p_a/p_s
Q	용적유량
Q_1, Q_2	부하유량
Q_a, Q_b	오리피스 공급 유량
Q_x, Q_y	노즐을 통한 공급 유량
r	토크모터-노즐 사이 거리
T_i	실제로 플래퍼 구동에 소요되는 토크
T_{f1}	가요관의 탄성력과 노즐에서의 분사력에 따른 토크
T_{f2}	피드백 스프링이 플래퍼에 가하는 힘에 의한 토크
w	밸브 개구부의 면적구배
x_n	플래퍼의 변위
x_{nm}	플래퍼의 최대변위
\bar{x}_n	x_n/x_{nm}
x_s	스풀의 변위
y	피드백 스프링의 변위
ρ	유체의 밀도
θ	플래퍼의 각변위
θ_f	유체의 유출입 각도
Z	무차원계수 $(k_n/k_o)^2$

7. 결 언

이 해설에서는 노즐-플래퍼 기구와 스푼밸브의 정상상태 특성 관계식을 상세히 풀어 이해하기 쉽게 소개하였다. 향후 이 자료가 서보 밸브의 연구·개발 및 성능 시험 과정에서 유용한 참고 자료가 될 것으로 기대한다.

이 해설의 내용은 노즐-플래퍼형 서보밸브의 정상상태 해석에 국한하며, 다음 기회에 밸브의 동특성까지를 포함한 기술 해설 자료를 제공할 기회가 있기를 바란다.

후 기

이 연구는 2013년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원을 통해 우수제조기술연구센터(ATC)사업 지원(과제번호:10045861)을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

- 1) J. Watton, "Fluid Power Systems : modeling, simulation, analog and microcomputer control", Prentice Hall, 1989.
- 2) 이일영, BRKR교육사업부, "유압공학-단계적 학습가이드", 문운당, 2012

[저자 소개]

오동훈

E-mail : Donghun.oh@volvo.com

Tel : 055-260-7401

2013년 부경대학교 메카트로닉스공학과 석사 졸업. 2013년부터 (주)볼보건설기계 근무, 유압제어시스템 개발업무에 종사



김현호

E-mail : mungani@pknu.ac.kr

Tel : 051-629-6153

2005년 부경대학교 에너지시스템공학전공 석사 졸업. 현재 부경대학교 기계설계공학과 박사 과정



이일영

E-mail : iylee@pknu.ac.kr

Tel : 051-629-6153

1978년 부경대학교 기관공학과 졸업. 1986년 Tokyo Institute of Technology 제어공학과 박사 과정 졸업. 1986년~현재 부경대학교 교수, 유압 시스템 맥동 해석, 유압시스템 제어에 관한 교육 및 연구에 종사, 유공압 시스템학회, 대한기계학회 등의 회원

