

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME94-D-12)에 의하여 연구되었음.

A/T용 솔레노이드 밸브의 동특성 해석에 관한 연구

송 창 섭,* 이 용 주,** 유 세 준***

A Study on the Analysis of Dynamic Characteristics of the Solenoid Valve of Automatic Transmission

Chang-Seop Song,* Yong-Ju Lee,** Se-Joon You***

ABSTRACT

To reduce the shock in shifting, the clutches and the brakes in automatic transmission have to be connected smoothly and disconnected rapidly. It is PCSV(Pressure Control Solenoid Valve) that play this role of automatic transmission. In this paper, there were two steps in the analysis of the PCSV. The first step was modeling the electromagnet by the permeance method. The second step was modeling the hydraulic circuit by the pressure differential equation. In addition to this modeling, a experiment was performed and the commercial package program was used in order to justify modeling. The result of modeling coincide with the result of experiment and commercial package program. As a result, this modeling is usable in analysis of dynamic characteristics of the PCSV.

Key Words : Electromagnet(전자석), PCSV(압력제어 솔레노이드 밸브), Permeance Method(가정자로 법), Flux(자속), Bulk Modulus(체적탄성계수), Magnetic Force(전자력), Flow Force(유동력), Viscosity Force(점성력)

1. 서 론

자동 변속기의 파워 트레인은 엔진으로부터의 동력을 트랜스미션에 전달하는 토오크 컨버터부와 적절한 회전

력을 얻기 위한 변속 기구로 구성되어 있다. 변속 기구는 프론트 클러치, 리어 클러치, 앤드 클러치, 킥다운 서보, 로우리버스 브레이크 등으로 구성되어 있는데 이러한 작동 요소에 의해 유성치차 기구의 어느 곳을 작

* 한양대학교 정밀기계공학과 (정회원)

** 한양대학교 정밀기계공학과

*** 한양대학교 정밀기계공학과

동시하고 어느 곳을 고정시키는데 따라 운전 조건에 맞는 변속 비를 얻을 수 있다. 변속 시의 쇼크를 줄이기 위해서는 이들 작동 요소들을 부드럽게 연결하고 신속히 분리시켜 주어야 하는데 전자식 자동 변속기에서는 이러한 역할을 얻기 위해서 고속 전자석을 사용한 솔레노이드 밸브가 사용되어진다. 이 솔레노이드 밸브가 자동변속기 내의 클러치 및 브레이크에 작용하는 유압을 최적의 상태가 되도록 제어해서 변속 시의 승차감을 향상시켜 주는 것이다.

본 논문에서는 자동변속기의 전기 유압 액츄에이터로써 사용되어지는 압력 제어 솔레노이드 밸브(PCSV)의 구동장치인 고속 전자석과 유압 회로 내의 동특성을 해석하여 성능을 예측하고 설계 기술을 얻는데 그 목적이 있다.

2. 전자석 부분의 모델링⁽¹⁾

PCSV는 고속 전자석을 사용한 2방향형 밸브로 1주기 동안에 ON-OFF 동작의 비율을 달리하여 유압을 펄스 적으로 제어한다.

변속 제어장치(TCU)에서 압력 제어 솔레노이드 밸브(PCSV)로 전기적인 ON-OFF 신호(duty signal)를 보내면 플런저의 ON-OFF 변화에 의해 export 유로가 형성되어 1 차압이 조절된다. 1 차압의 조절에 의하여 압력 제어 밸브(PCV)가 움직여 2 차압이 듀티비에 따라 조정된다. 2 차압이 자동 변속기 내의 클러치와 브레이크에 제어압으로 작용하게 된다.⁽²⁾

2.1 가정자방법에 의한 해석⁽³⁾

전자석의 솔레노이드에 전류가 흐르면 자속(flux)이

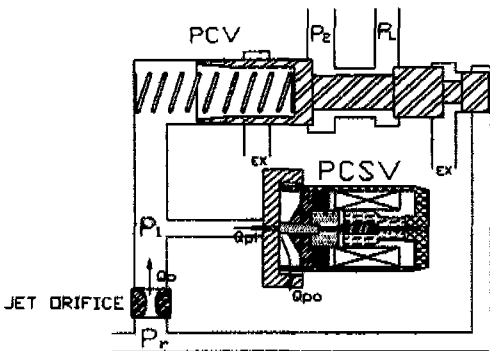


Fig. 1 Hydraulic circuit from jet orifice to PCV

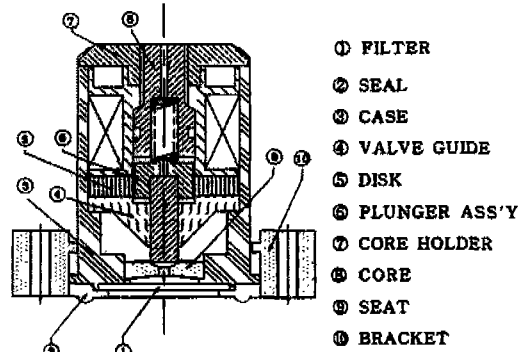


Fig. 2 Vertical sectional view of PCSV

발생하여 자속이 표면(case)에서 가이드 철심(disk), 플런저(plunger), 코어(core)로 흘러 플런저와 코어, 플런저와 가이드 철심 사이의 공극(air gap)에 자기에너지(magnetic energy)가 축적된다.

즉 전자석의 솔레노이드에 가해 준 전기에너지가 공극을 자화시키는 자기에너지로 변환되는 것이다.

2.1.1 이론적 해석

발생 전자력은 전자석을 구성하는 철심의 재질, 치수, 코일의 감긴 횟수, 입력 전압 등의 여러 인자들에 따라서 결정된다. 이 힘을 가정자방법으로 구하기 위해서는 전자석을 하나의 자기 회로 방정식으로 표현하여, 외부로부터 공급되는 기자력을 철심에서의 소모기자력, U_s 와 공극에서의 소모기자력, U_a 으로 나누어서 해석한다. 철심에서의 소모기자력은 자로 길이, $L[i]$ 와 자계 강도, H_i 의 곱으로 표현될 수 있고, 공극에서의 소모기자력은 자속, ϕ_0 와 공극 전체의 퍼미언스(permeance), P_s 로 표현될 수 있다. 퍼미언스 값은 자속이 매질을 얼마나 잘 흐르는가 하는 정도를 나타내며 투자율, μ 및 자속이 흐르는 단면적, A 에 비례하고 자속의 통과 길이, l 에 반비례한다.

$$P_s = \mu \frac{A}{l} \tag{2-1}$$

외부의 공급기자력과 소모기자력은 같아야 하므로 매질을 철심과 공극의 두 부분으로 나누어 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$NI = \sum_{i=1}^n H_i L[i] + \frac{\phi_0}{P_s} = U_s + U_a \tag{2-2}$$

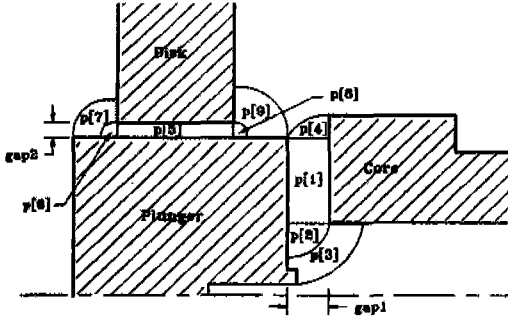


Fig. 3 Modeling of permeance in air gap

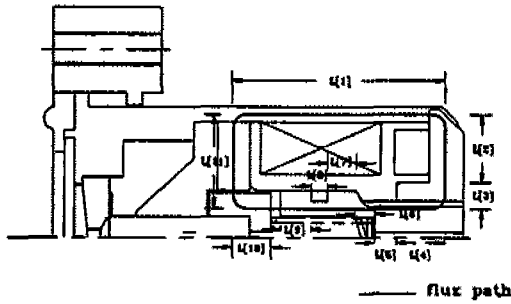


Fig. 4 Magnetic flux line of PCSV

여기서, N : 코일의 권선수 I : 전류이다.

플런저의 위치에 따른 공극의 퍼미언스 분포를 Fig. 3에 나타내었고 Fig. 4는 자속의 흐름을 가정해서 자로 길이를 나타낸 것이다.

전자석의 플런저가 움직이면서 공극에 저장되는 자기 에너지의 변화량, dW 는 직류 전자석인 경우에 식 (2-3)으로 표현된다.

$$dW = \frac{1}{2} U_a^2 dP \quad (2-3)$$

자기에너지의 변화량, dW 는 플런저의 변위, x 에 따라 나타나므로 식 (2-4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_m = -\frac{dW}{dx} \quad (2-4)$$

전자석의 플런저와 코어 사이에서 발생하는 전자력은 식 (2-3)과 식 (2-4)를 연결해서 식 (2-5)로 표현된다.

$$F_m = -\frac{1}{2} U_a^2 \frac{dP}{dx} \quad (2-5)$$

2.1.2 공극의 퍼미언스 분포 및 철심의 소모 기자력 각 위치에서의 퍼미언스 값과 자로 길이를 구해 보면 다음과 같다. 퍼미언스값중 가장 중요한 부분은 1번과 5번이다. 퍼미언스 값은 가정차로법으로 구하였으므로 공극을 3가지의 기하학적 모양으로 나누어서 구하게 되며, 자로 길이는 단면 모양이 같은 부분에서는 자속이 같으므로 단면이 같은 곳까지의 길이를 나타낸 것이다.

$$P[1] = \mu_0 \times \frac{A}{\ell} = \mu_0 \frac{\pi}{4} \frac{[d5^2 - d10^2]}{(gap1 - x)}$$

$$p[2] = 1.658 \mu_0 [d10 - (gap1 - x)]$$

$$p[3] = 4\mu_0 \left[\frac{(d10 - d7)}{2} - \sqrt{(gap1 - x) \frac{(d10 - d7)}{2}} \right] \times \ln \frac{(d10 - d7)}{2(gap1 - x)}$$

$$p[4] = 1.658 \mu_0 \left[\frac{d12 + d5}{d12 - d5} \right] (gap1 - x)$$

$$p[5] = \mu_0 \frac{\pi (gap2 + d5) \times al}{gap2}$$

$$p[6] = 1.658 \times \mu_0 (d5 + gap2)$$

$$p[7] = 4\mu_0 \left[\frac{d5}{2} + \sqrt{2((gap1 - x) + gap2)} \right] \times \ln \frac{(gap1 - x) + gap2}{gap2}$$

$$p[8] = 1.658 \mu_0 (d5 + gap2)$$

$$p[9] = 4\mu_0 \left[\frac{d5}{2} + \sqrt{gap2(a13 - (gap1 - x))} \right] \times \ln \frac{a13 - (gap1 - x)}{gap2}$$

여기서, x : 플런저의 스트로크, $gap1$: x 가 0일때의 플런저와 코어 사이의 공극, $gap2$: 플런저와 디스크 사이의 공극이다.

$$L[1] = a1/2 + a2 + a3 + a4 + a5/2$$

$$L[2] = (d2 - d8)/2 + (d1 - d2)/4$$

$$L[3] = (d8 - d11)/2$$

$$L[4] = a12$$

$$L[5] = a11$$

$$L[6] = a10$$

$$L[7] = a9$$

$$L[8] = a8$$

$$L[9] = a7$$

$$L[10] = a13 - x + a1/2$$

$$L[11] = (d2 - d4)/2 + (d1 - d2)/4$$

$$P_A = P[1] + P[2] + P[3] + P[4]$$

$$P_B = P[5] + P[6] + P[7] + P[8] + P[9]$$

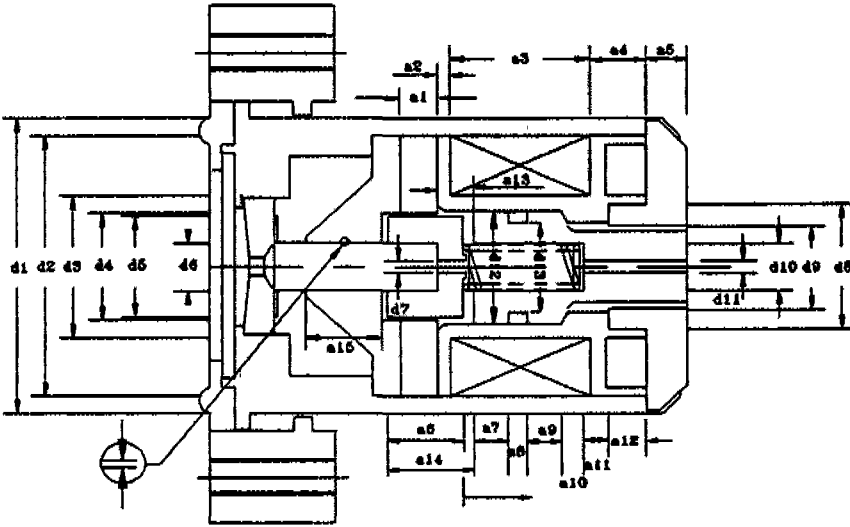


Fig. 5 Dimension of PCSV

P_A 와 P_B 는 서로 직렬로 연결되어 있으므로 전체 퍼미언스, P_s 는 식 (2-6)과 같이된다.

$$P_s = \frac{P_A \times P_B}{P_A + P_B} \quad (2-6)$$

철심에서의 소모기자력과 공극에서의 소모기자력은 모두 자속 ϕ_0 의 함수이므로, 외부 공급기자력과 일치하는 소모기자력을 만드는 자속 ϕ_0 를 결정할 수 있다. Fig. 3에서 퍼미언스 1, 2, 3, 4가 서로 병렬로 연결되어 있으므로 전체 자속 ϕ_0 는 퍼미언스의 크기에 비례해서 흐르고, 각 퍼미언스에서의 기자력은 모두 같다. 퍼미언스 5, 6, 7, 8, 9도 마찬가지로의 결과가 되어 PCSV의 전자력을 나타내는 식 (2-7)을 얻는다.

$$F_m = -\frac{1}{2}\phi_0^2 \left(\frac{1}{P_A^2} \sum_{i=1}^4 \frac{dP_i}{dx} + \frac{1}{P_B^2} \sum_{i=5}^9 \frac{dP_i}{dx} \right) \quad (2-7)$$

2.1.3 코일의 인덕턴스

전자석의 솔레노이드에 가해지는 전류는 코일 자체의 저항과 도선 저항등에 영향을 받으며, 코일의 인덕턴스와 인덕턴스의 시간에 대한 미분 치에 영향을 받는다.

$$V = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (2-8)$$

코일의 인덕턴스와 퍼미언스와의 관계는 식 (2-9)와

같다. ⁽⁴⁾

$$L = N^2 \mu \frac{A}{\ell} = N^2 P_n \quad (2-9)$$

여기서, $P_n : P_A$ 와 $P_c(P[8]+P[9])$ 의 직렬 퍼미언스이다.

식 (2-9)를 식 (2-8)에 대입해서 정리하면 식 (2-10)이 된다.

$$N^2 P_n \frac{di}{dt} = V - iR - iN^2 \frac{dP_n}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2-10)$$

2.2 상용 프로그램을 이용한 해석 결과와의 비교

본 연구에서는 압력 제어 솔레노이드 밸브의 전자력을 유한요소법을 사용하는 상용 프로그램인 Maxwell[®]과 ANSYS[®]를 사용해 구하고 이 결과를 가정자로법을 사용해서 만든 PCSV의 시뮬레이션 프로그램 결과와 비교하여 보았다.

Fig. 6은 자속의 흐름을 나타낸 것인데 황동으로 만들어진 밸브 가이드 밀부분(Fig. 2 참조)으로는 자속이 흐르지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 전류가 각각 0.2 [A], 0.6 [A], 1 [A]에서의 Maxwell, ANSYS, 시뮬레이션 프로그램으로 구한 전자력을 비교한 것이다. 전체적으로 전류가 작은 경우보다 전류가 큰 경우에서 오차가 큰 것을 알 수 있는데, 이는 가정자로

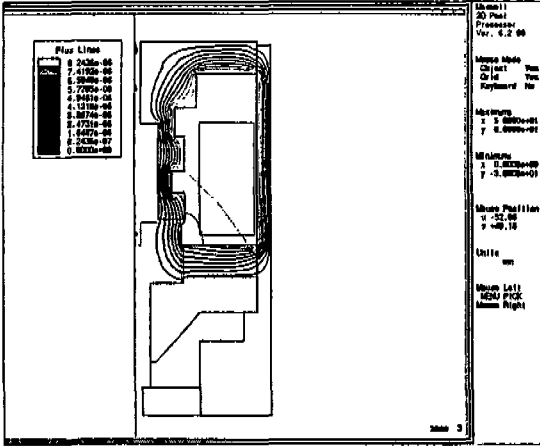


Fig. 6 Flux lines when stroke $x=0$

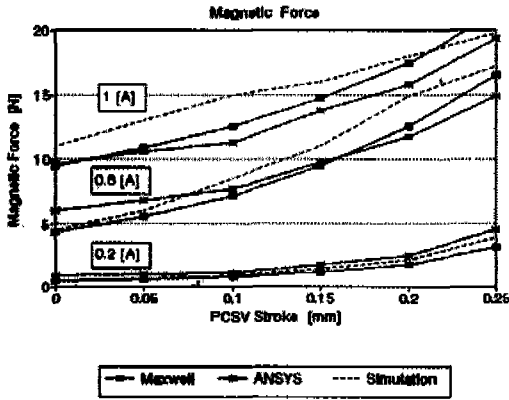


Fig. 7 Comparison of magnetic force

법은 에너지 관점에서 해를 구하나 상용 프로그램은 유한 요소법의 스트레스 텐서를 사용해서 해를 구하기 때문이다.⁽⁶⁾ 그리고 전류가 1 [A]인 경우에 스트로크가 0.1 [mm]인 곳에서 부터 시뮬레이션으로 구한 곡선이 convex곡선을 이루게 된다. 이것은 스트로크가 0.1 [mm]이상에서는 전자력의 증가율이 0.1 [mm]이하인 경우보다 작아진다는 것을 나타낸 것으로 자기포화현상에 의한 것이다.

3. 유압 제어장치의 모델링

자동변속기의 유압 제어 기본 장치는 오일 팬, 오일 펌프, 밸브 기구 및 유압 작동 요소로 구성되어 있다.

오일 펌프가 오일 팬에서 흡입한 오일은 밸브 기구에서 압력이 조정된 후 변속기 내부의 클러치 또는 브레이크의 작동 요소에 공급된다. 밸브 기구에서의 잔여분 오일은 리턴 회로를 경유하여 오일 팬으로 되돌아간다.

3.1 압력 방정식

오일 펌프에서 발생한 유압은 레귤레이터 밸브를 거쳐 일정한 라인압(약 0.833 MPa)으로 되고 다시 리듀싱 밸브를 거치면서 더욱 낮아진 일정한 리듀싱압(약 0.4165 MPa)으로 유지된다. 리듀싱압이 체크 오리피스를 통과하는 유량, Q_0 는 식 (3-1)과 같다.

$$Q_0 = C_{d0} \frac{\pi}{4} D_0^2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_r - p_1)} \quad (3-1)$$

여기서, C_{d0} : 유량 계수 D_0 : 체크 오리피스의 지름 p_r : 리듀싱압 p_1 : 1차압이다.

PCSV를 모델링 하는데 있어서 밸브 시트와 플런저 개구면적을 일종의 오리피스로 생각했다. 따라서 밸브 시트를 통과해서 PCSV내부로 들어가는 유량, Q_{pi} 는 식 (3-2)와 같다.

$$Q_{pi} = C_{di} \frac{\pi}{4} D_s^2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_{ch})} \quad (3-2)$$

여기서, D_s : 밸브 시트 구멍의 지름 p_{ch} : PCSV의 플런저에 작용하는 압력이다.

PCSV 내부에서 플런저 개구면적으로 빠져나가는 유량, Q_{po} 는 식 (3-3)과 같다.

$$Q_{po} = C_{d0} \pi D_p x \sin \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{ch})} \quad (3-3)$$

여기서, D_p : 플런저 지름 α : 플런저와 밸브 시트의 각도이다.

체적이 V , 체적 탄성계수(bulk modulus)가 β , 압력이 p 일 때 식 (3-4)와 같은 연속 방정식(continuity equation)을 얻을 수 있다.⁽⁷⁾ 이때 β 는 온도가 상승하면 감소하게 된다.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\beta}{V} (\Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} - \frac{dV}{dt}) \quad (3-4)$$

1차압에 대한 압력 미분방정식은 식 (3-4)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\beta}{V_1} (Q_0 - Q_{pi} + A_{PCV} v_{PCV}) \quad (3-5)$$

여기서, V_1 : 1차압 관로의 체적
 A_{PCV} : PCV의 단면적 v_{PCV} : PCV의 속도이다.
 식 (3-5)에서 PCV가 고정되어 있다고 가정하면 v_{PCV} 가 0이라 할 수 있다.
 또한, PCSV의 플런저에 작용하는 압력, P_{ch} 의 압력 미분 방정식은 식 (3-6)과 같다.

$$\frac{dp_{ch}}{dt} = \frac{\beta}{V_{ch}} (Q_{pi} - Q_{po} - \frac{\pi}{4} D_p^2 \frac{dx}{dt}) \quad (3-6)$$

3.2 PCSV의 운동 방정식

3.2.1 PCSV의 유동력

유동력을 베르누이 힘(Bernoulli forces) 이라고도 하며 유체를 흐르게끔 하는 데 필요한 힘이다.⁶⁾ 유동력은 식 (3-7)과 같다.

$$F = \int_{c.s} v(\rho v \cdot dA) + \frac{d}{dt} \int_{c.v} v \rho dV \quad (3-7)$$

여기서, v : 속도 A : 면적 벡터 V : 체적이다.
 밸브에 작용하는 힘은 주로 정상유동력에 의존하므로 과도 유동력을 무시하면 식 (3-8)과 같다.

$$F = \rho \frac{Q_{po}^2}{A_2} \cos \alpha - \rho \frac{Q_{pi}^2}{A_1} \quad (3-8)$$

여기서, $A_2 = C_{co} \pi D_p x \sin \alpha$ $A_1 = C_{ci} \frac{\pi}{4} D_s^2$ 이다.
 유체가 플런저에 작용하는 힘은 F 의 반력이므로 식 (3-9)와 같다.

$$\begin{aligned} F_f &= -F \\ &= \frac{\pi}{2} D_s^2 C_{ci} C_{vi} (p_1 - p_{ch}) \\ &\quad - 2C_{co} C_{vo} \pi D_p x \sin \alpha \cos \alpha (P_{ch}) \end{aligned} \quad (3-9)$$

여기서, C_{ci} : 수축 계수(contraction coefficient)
 C_{vi} : 속도 계수(velocity coefficient)이다.
 힘 F_f 는 스프링에 의한 탄성력과 같이 항상 밸브를 닫는 방향으로 작용한다.

3.2.2 PCSV의 점성력

유체 입자가 상대 운동을 할 때 응집력과 운동량 수송에 의하여 상대 운동을 방해하는 유체의 마찰 작용이

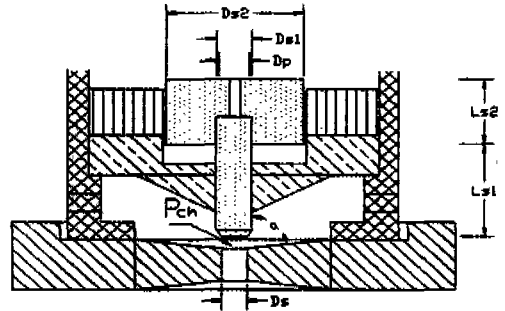


Fig. 8 Schematic diagram of PCSV plunger

생긴다. 이와 같은 성질을 점성이라 한다. 유체가 가지는 점성은 PCSV 플런저 작동시 댐핑효과를 가져온다. PCSV에서의 점성력은 식 (3-10)과 같이 나타낼 수 있다.⁶⁾

$$\begin{aligned} F_c &= c \frac{dx}{dt} \\ &= \rho v \pi \left(\frac{D_{s1} L_{s1} + D_{s2} L_{s2}}{L_{c1}} \right) \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad (3-10)$$

여기서, L_{c1} : 플런저와 가이드의 간극
 D_{s1} , D_{s2} : 밸브의 지름 L_{s1} , L_{s2} : 플런저의 길이
 ρ : 밀도 v : 동점성 계수 이다.

식 (2-7)에서 구한 전자력(F_m), 식 (3-9)에서 구한 유동력(F_f), 식 (3-10)에서 구한 점성력(F_c)에 탄성력(F_p)과 플런저에 작용하는 압력(P_{ch})을 함께 고려하면 식 (3-11)과 같은 PCSV의 운동 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= F_m + F_f - F_c - F_k + \frac{\pi}{4} D_p^2 P_{ch} \\ &= F_m + F_f - c \frac{dx}{dt} - k(x_0 + x) \\ &\quad + \frac{\pi}{4} D_p^2 P_{ch} \end{aligned} \quad (3-11)$$

여기서, m : 플런저의 질량 k : 스프링 탄성계수
 X_0 : 스프링의 초기 압축 길이이다.
 식 (3-11)을 기본 식으로 해서 PCSV의 움직임을 모델링 할 수 있다.

4. 실험 장치 및 실험 방법

PCSV 모델링의 타당성을 검증하기 위해 변위 측정 실험과 1차압 측정 실험을 수행하였다.

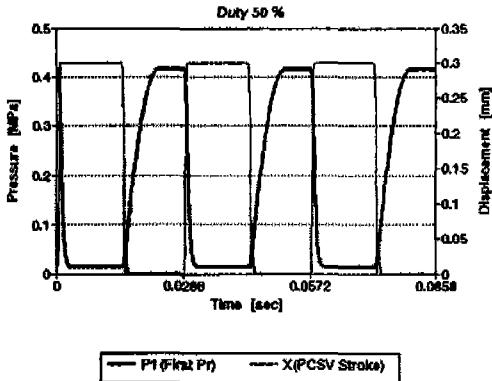


Fig. 9 First pressure and stroke at 50 % duty

4.1 PCSV의 변위 측정 실험

변위 측정 실험은 플런저에 황동링을 고정시키고 황동링의 움직임을 레이저 변위 측정계를 사용하여 측정하였다. 실험 장치를 보면 자체 제작한 듀티 콘트롤러를 통해 PCSV에 신호를 보내고 플런저의 움직임을 레이저 변위 측정계(KL 133A)를 사용해서 측정하고 이를 A/D Converter(PCL-812)를 통해 데이터로 저장하였다. 실험 방법은 입력 전압을 3.5 V로 일정하게 하고 듀티 콘트롤러에서 듀티 10%부터 90%까지 10%씩 듀티를 증가시키면서 신호를 보낸다. 각 듀티에 따른 플런저의 변위를 측정하여 데이터로 저장하고 이를 변위로 환산하여 시뮬레이션 프로그램의 결과와 비교해 보았다.

4.2 PCSV의 1차압 측정 실험

실험 장치는 듀티 콘트롤러를 통해 PCSV에 신호를 보내고 PCSV의 1차압을 압력 측정 센서(112A21)를 사용해서 측정하고 이를 플로터로 출력하였다. PCSV

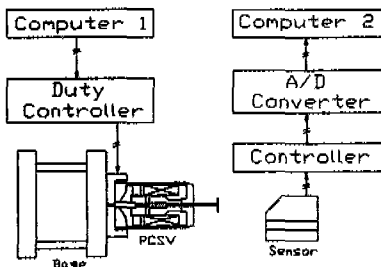


Fig. 10 Experimental setup for PCSV plunger stroke measurement

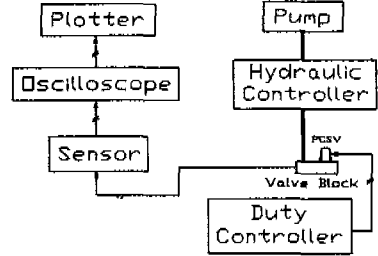


Fig. 11 Experimental setup for the 1st pressure measurement

를 단품으로 장착하여 실험을 했는데 듀티 콘트롤러에서 듀티 30%, 50%, 70%로 신호를 보내고 이때의 1차압의 변화를 측정하여 시뮬레이션 프로그램의 결과와 비교해 보았다.

Fig. 10은 변위 측정 실험 장치의 계통도를 나타낸 것이고 Fig. 11은 1차압 측정 실험 장치의 계통도를 나타낸 것이다.

5. 실험 결과 및 고찰

Fig. 12는 50%의 듀티일때의 변위실험치와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 변위측정실험에서는 PCSV 구동 전압을 3.5V로 일정하게 했기 때문에 시뮬레이션 결과와 비교해 보았을 때 ON시는 응답성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 그러나 OFF시에는 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 이때 유압은 고려되지 않았다.

Fig. 13은 50%의 듀티일때의 1차압 실험치와 시뮬

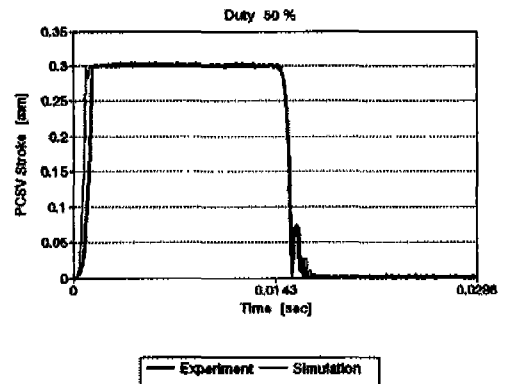


Fig. 12 Comparison of stroke at 50 % duty

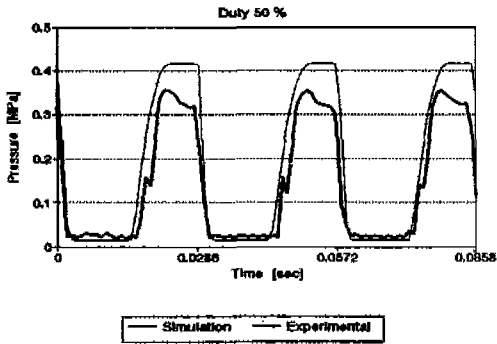


Fig. 13 Comparison of the 1st pressure at 50 % duty

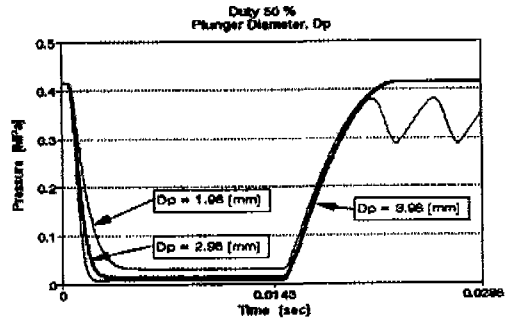


Fig. 15 Pressure variation due to change of plunger diameter, D_p

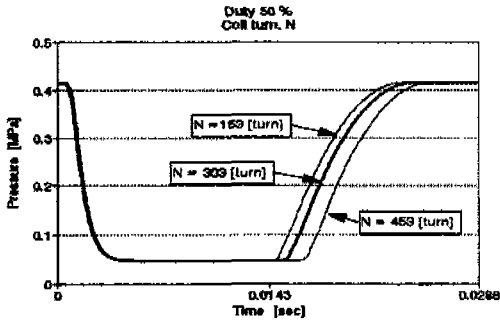


Fig. 14 Pressure variation due to change of coil turn, N

레이션 결과를 비교한 것이다. 실험 결과치가 이론치에 비하여 작게 나타난 것은 혼입 공기에 의한 유효 체적 탄성계수의 저하에서 초래된 것으로 사료된다.

PCSV의 설계시에 고려되어야 할 요소들은 크게 전기적 요소, 기계적 요소로 나눌 수 있다. 전기적 요소에는 구동 전압, 코일의 인덕턴스, 코일의 권선수, 저항값 등의 요소가 고려되어야 한다. 기계적인 요소에는 플런저의 질량, 스프링의 탄성계수, 밸브 구멍의 크기 등이 고려되어야 한다. 그러나 전기적인 요소들은 독립적이 아니라 서로 연관되어 있고 또한 기계적인 요소와도 상호 관련이 있다. Fig. 14는 코일의 권선수를 변화시켰을 때의 압력 변화를 시뮬레이션 한 것인데 단순히 기자력만 변하는 것이 아니라 코일의 저항과 인덕턴스가 변화해서 전자력이 영향을 받게 된다. 권선수가 증가하면 전자력이 증가해서 플런저의 ON 시간이 길어짐을 알 수 있다. Fig. 15는 플런저의 지름을 변화시켰을 때의 유압 특성을 시뮬레이션 한 것이다. 지름이 3.96

(mm)일 때는 ON시의 응답성은 향상되나 OFF시 P_{ch} 가 플런저에 작용하는 힘이 스프링 힘보다 크므로 플런저가 열리게 되고 플런저가 열리면 유량이 빠져나가므로 곧바로 압력 P_{ch} 가 떨어져서 압력에 의해 플런저에 작용하는 힘이 작아지므로 플런저가 다시 닫히게 된다. 따라서 압력이 또다시 증가해서 스프링힘을 이기고 열리는 과정이 되풀이 되게 된다. Fig. 16은 플런저의 스트로크에 따른 유압 특성을 나타낸 것으로 스트로크가 커질수록 빠져나가는 유량이 많기 때문에 응답성이 향상됨을 알 수 있다. Fig. 17은 스프링 상수를 바꿔 가면서 시뮬레이션 한 것으로 스프링 상수가 작아지면 OFF시에도 유압에 의해 플런저에 작용하는 힘이 스프링힘보다 커지게 되기 때문에 플런저가 움직이는 것을 알 수 있다. Fig. 18은 플런저의 질량을 변화시켜가면서 시뮬레이션 한 것으로 질량이 작은 경우가 OFF시에 유압이 빠르게 상승하는 것을 알 수 있다. 이때 ON시보다는 OFF시에 더 큰 영향을 받는다.

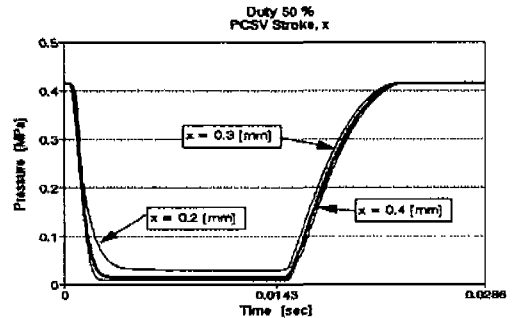


Fig. 16 Pressure variation due to change of plunger stroke, x

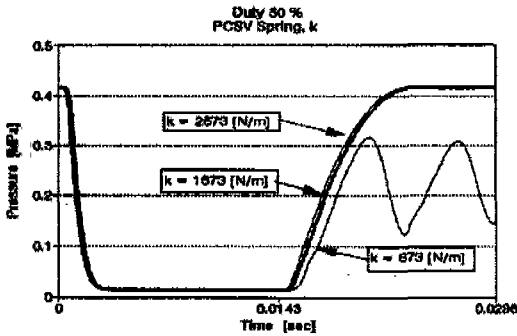


Fig. 17 Pressure variation due to change of spring constant, k

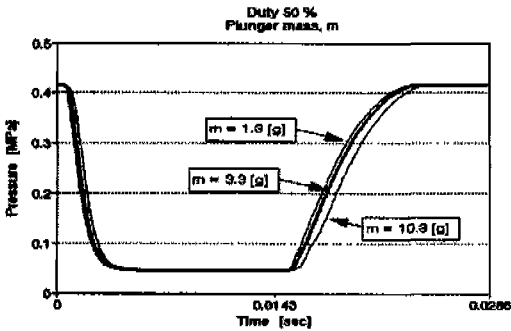


Fig. 18 Pressure variation due to change of plunger mass, m

이렇게 여러 요소들을 변화시켜 가면서 시뮬레이션함으로써 기대되는 성능을 가진 PCSV에 대한 설계값을 구할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 PCSV를 전자석 부분과 유압 부분으로 나누어서 모델링 했고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 본 논문에서 가정자로법으로 구한 전자력이 상용 프로그램인 Maxwell, ANSYS로 구한 값과 대체로

잘 일치함을 알 수 있었다.

② 전기적 요소 중에서 중요한 인자들은 입력 전압, 저항, 인덕턴스 등이고 기계적 요소 중에서 중요한 인자들은 PCSV의 재질, 플런저와 코어의 치수, 스프링 상수 등인데 특히 플런저와 코어의 치수는 전자력에 큰 영향을 미치므로 설계시의 중요한 인자가 됨을 알 수 있었다.

③ PCSV의 플런저 지름, D_p 가 일정치 이상이 되거나 스프링 상수, k 가 일정치 이하가 되면 PCSV의 OFF시에 플런저에 작용하는 유압의 힘과 스프링힘의 균형이 이루어지지 않으므로 1차압이 듀티에 잘 추종하지 않음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 송창섭, 양해정, 송성배, "PWM 방식 고속 전자석에 관한 연구", 한국정밀공학회지 춘계학술대회 초록집, pp.273-277, 1994.
2. 손우철, "자동변속기의 변속시 유압회로내의 제어 압 해석에 관한 연구", 漢陽大學校碩士論文, 1994.
3. Herbert C. Roters, "Electromagnetic devices", JOHN WILEY & SONS, pp.84-150, 1947.
4. 中田高義外 2人 共著, "交流電磁石の設計と應用", 森北出版株式會社, pp.18-46, 1991.
5. Maxwell, "Maxwell User's Reference", Ansoft, 1994.
6. Ansys, "Magnetics for static fields", Swanson Analysis Systems Inc.
7. Herbert E. Merritt, "Hydraulic control systems", JOHN WILEY & SONS, pp.1-105, 1967.
8. 손병진外 2人 共著, "油壓工學", 喜重堂, pp.17-302, 1993.