

파이로트 구동용 압력제어밸브의 특성 해석

윤소남*, 최영호, 함영복, 김광영(한국기계연구원, 첨단산업기술연구부)

Characteristics Analysis of Pilot Operated Pressure Control Valve

S. N. Yun, Y. H. Choi, Y. B. Ham, K. Y. Kim(Advanced Industrial Technology Dept., KIMM)

ABSTRACT

In this paper, a mathematical model describing the dynamics of pilot operated pressure control valve was derived. A attempt to analyze the parameters(seat diameter, cone angle, spring stiffness, control volume) which relate to the performance of the object valve was carried out. Simulation using AMESim as a simulation tool was operated, and verified the validity of our simulation by means of comparison our simulation results with an experimental results of the pilot operated pressure control valve.

Key Words : Poppet Valve(포 펫 밸브), Flow Force(유체력), Step Response(계단응답), Impulse Response(과도응답)

1. 서론

유압 파워 유닛의 압력제어 및 유압라인의 2 차 압력 제어를 목적으로 사용되는 압력제어밸브는 제어방식에 따라 직접제어방식과 파이로트 제어방식으로 구분된다. 직접제어방식은 동작속도 및 제어 성 면에서 우수하나 대유량 시스템에 부적합하며, 파이로트 제어방식은 대유량 시스템의 압력제어에 유리하나 회로의 복잡성으로 인하여 안정된 시스템을 구현하기 위해서는 관로나 오리피스 등의 적절한 크기와 배치가 이루어져야 한다^{1),2)}.

본 연구에서는 파이로트 제어방식의 압력제어밸브를 대상으로 하고 있으며, 전술한 회로의 안정성을 위한 기초 연구를 위해 밸브 모델을 만들고 특성방정식들을 정립하였다^{3),4)}. 도출된 방정식들은 시뮬레이션 툴인 AMESim⁵⁾을 이용하여 이론해석을 수행하였으며, 본 연구에서 제작된 실험장치⁶⁾를 통하여 얻어진 실험결과와 이론해석을 비교하여 이론해석의 타당성을 확인하였다. 또한, 밸브 성능에 영향을 주는 물리인자들에 대한 해석이 수행되었다.

2. 이론해석

본 연구에서 대상으로 하는 밸브의 모델을 Fig.1 에 보였다. Fig.1 에서 오리피스 및 파이로트

포펫의 운동에 따라서 메인밸브가 제어되고, 결국은 유압원에서 공급되는 압력유가 제어되는 시스템으로 밸브 및 오리피스부에서의 연속의 식은 다음과 같다.

$$Q_s + \beta \cdot V_s \frac{dP_s}{dt} = Q_1 + Q_{31} + Q_{3T} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_{32} + \beta \cdot V_1 \frac{dP_1}{dt} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$Q_2 = Q_{2T} + \beta \cdot V_2 \frac{dP_2}{dt} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$Q_{31} + Q_{32} = Q_4 + \beta \cdot V_3 \frac{dP_3}{dt} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_4 = Q_{4T} + \beta \cdot V_4 \frac{dP_4}{dt} \quad \dots \dots \dots (5)$$

전술한 식들에서 $Q_s, Q_1, Q_2, Q_{31}, Q_{32}, Q_4$ 는 각각 공급유량, 파이로트 유량, 파이로트부 리턴유량, 메인밸브의 전면부 오리피스를 흐르는 유량, 메인밸브 후면부로 공급되는 유량, 안전밸브를 통하여 흐르는 유량을 의미하며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_s = c_{o1} \cdot \frac{\pi}{4} d_{o1}^2 \sqrt{\frac{2(P_s - P_1)}{\rho}} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$Q_1 = c_{o2} \cdot \frac{\pi}{4} d_{o2}^2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$Q_{2T} = c_{2T} \cdot \pi \cdot d_{2T} \cdot x_{2T} \sqrt{\frac{2(P_2 - P_T)}{\rho}} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$Q_{31} = c_{o_3} \cdot \frac{\pi}{4} d_{o_3}^2 \sqrt{\frac{2(P_s - P_3)}{\rho}} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$Q_{o32} = c_{o32} \cdot \frac{\pi}{4} d_{o32}^2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_3)}{\rho}} \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$Q_4 = c_{o4} \cdot \frac{\pi}{4} d_{o4}^2 \sqrt{\frac{2(P_3 - P_4)}{\rho}} \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$Q_{3T} = c_{3T} \cdot \pi \cdot d_{3T} \cdot x_{3T} \sqrt{\frac{2(P_s - P_T)}{\rho}} \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$Q_{4T} = c_{4T} \cdot \pi \cdot d_{4T} \cdot x_{4T} \sqrt{\frac{2(P_4 - P_T)}{\rho}} \quad \dots \dots \dots (13)$$

또한, 메인포켓에 작용하는 힘을 F_m , 파이로트 포켓에 작용하는 힘을 F_p , 안전밸브에 작용하는 힘을 F_s 라 하면, 각각 포켓의 운동방정식은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$F_m = (P_s - P_3) \cdot (A_{m1} - A_{m2})$$

$$= m_m \frac{d^2 x_{3T}}{dt^2} + b_m \frac{dx_{3T}}{dt} + k_3(x_{3T_0} + x_{3T}) \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$F_p = P_z A_p = m_p \frac{d^2 x_{zT}}{dt^2} + b_p \frac{dx_{zT}}{dt} + k \cdot i \quad \dots\dots(15)$$

$$F_s = P_4 A_s = m_s \frac{d^2 x_s}{dt^2} + b_s \frac{dx_s}{dt} + k_4 (x_{so} + x_s) \quad ..(16)$$

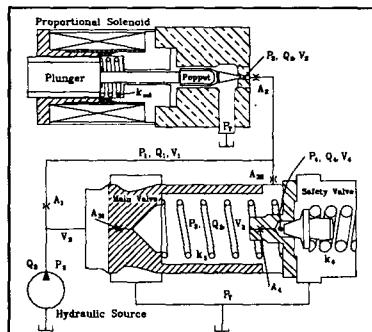


Fig. 1 Analysis model of pilot operated pressure valve

3. 수치 시뮬레이션 및 실험

Fig.2 는 메인밸브와 파이로트 밸브 및 안전밸브로 구성된 연구대상 밸브의 해석모델을 보이는 것으로, 본 연구에서는 AMESim⁵⁾ 소프트웨어를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 값들은 설계 도면에서 얻어진 수치들이고, 유량계수와 마찰계수 등 실험에 의해서 구해지는 값들은 추천하는 값들을 사용하였으며, 서술하면 다음과 같다.

모터회전수 : 1180[rpm], 메인포켓 직경 : 15[mm]

유압펌프 배제용적 :258[cc/rev]

메인 포켓부 hole 직경 : 14 [mm]

메인포펫질량:300[g], 파이로트포펫 질량:100[g]

메인포랫부 스프링 상수 :50[N/mm]

파이로트 포펫부 hole 직경 :1.7[mm]

파이로트 포펫 직경 :10[mm]

파이로트 포펫부 스프링 상수 : 25[N/mm]

메인포랫 올리피스 직경 :0.3[mm]

파이로트부 옥립피스 적경 : 1 [mm]

메이포페 후면봉 오리파스 칠경 : 1 [mm]

시뮬레이션은 두가지 경우를 고려하여 수행하였는데, 하나는 2/2 way valve를 닫은 상태에서 파이로트 릴리프 밸브에 단일스텝 혹은 반복스텝을 인가하는 방법이며, 다른 하나는 파이로트 릴리프 밸브에 임의의 힘(입력전압에 등가되는 힘)이 걸리도록 한 후에 2/2 way valve를 단일스텝 혹은 반복스텝을 인가하여 시스템의 특성을 예측하는 경우를 수행하였다.

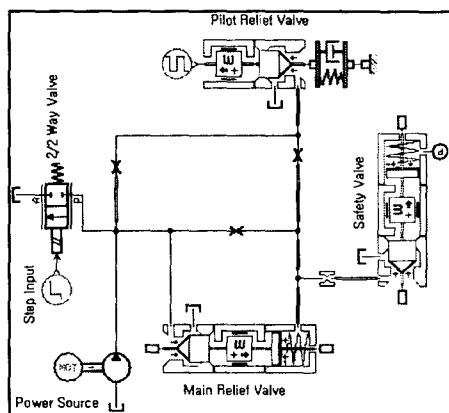


Fig. 2 Simulation model

Fig.3 및 Fig.4는 본 연구의 대상으로 하는 벨브의 성능측정을 목적으로 설계, 제작된 실험장치 유압회로 및 사진을 보이는 것으로 시뮬레이션 결과와의 비교를 위하여 Fig.2의 시뮬레이션 모델과 동일하게 구성하였다.

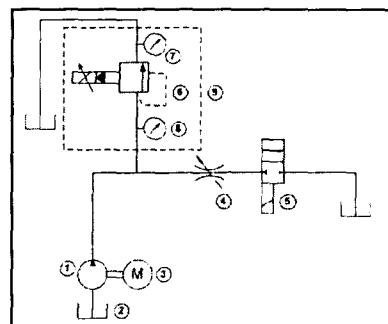


Fig. 3 hydraulic circuit for valve test

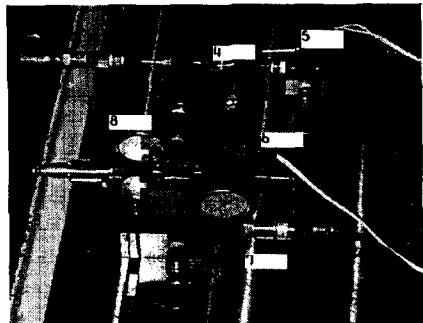


Fig. 4 Valve test equipment

4. 결과 및 고찰

Fig.5 및 Fig.6은 파이로트부 직동형 밸브의 스텝응답특성을 보여주는 것으로 본 연구에서는 최대 제어압력이 $68[\text{kgf}/\text{cm}^2]$ 인 파워소스를 이용하여 실험을 수행하였다. Fig.5 및 Fig.6의 결과로부터 이론 해석 결과가 실험결과와 일치하고 있음을 알 수 있으며, 오버슈트가 1.3% 이하로 본 연구대상 밸브 시스템은 매우 안정하다는 것을 알 수 있다.

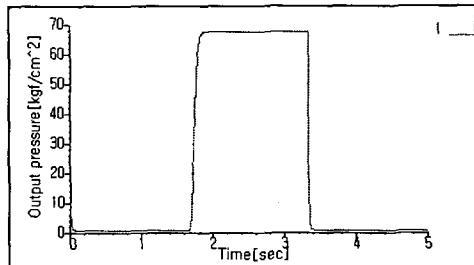


Fig.5 Theoretical result of pilot stage valve

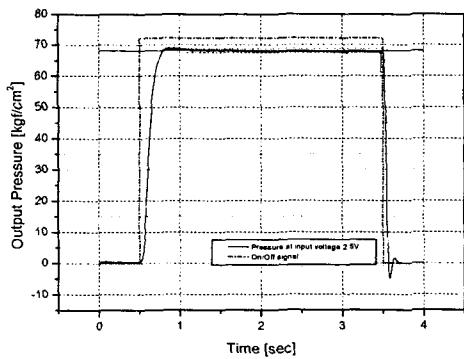


Fig.6 Experimental result of pilot stage valve

Fig.7, Fig.8, Fig.9는 Fig.2의 모델을 이용하여, 파이로트부 직동형 밸브에 스텝으로 제어압력에 해당하는 입력(전류 혹은 힘)을 주었을 때 나타나는

압력, 메인포펫 및 파이로트부 포펫의 변위, 유량특성을 보이는 것으로 스텝입력시에는 갑작스럽게 포펫이 닫혀지기 때문에 과도한 응답이 발생하나 본 연구에서 목적으로 하는 압력의 설정범위 $315[\text{kgf}/\text{cm}^2]$ 를 잘 유지하고 있다.

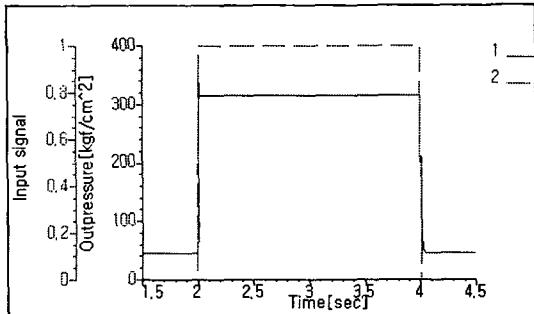


Fig.7 Pressure characteristics by pilot valve step input

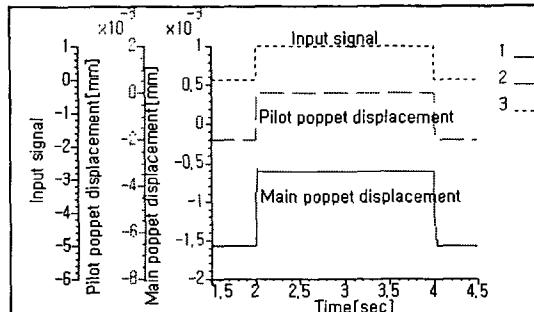


Fig.8 Displacement characteristics by step input

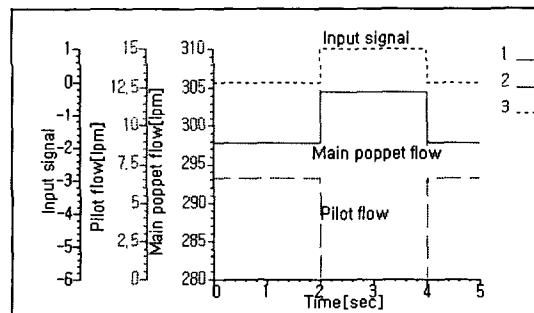


Fig.9 Flow characteristics by step input

Fig.10은 Fig.2의 모델에서 파이로트 밸브를 임의의 값으로 입력하여 고정시킨 후, 2/2 way 밸브를 스텝형식으로 닫았을 때에 제어되는 압력특성을 보이는 것으로 Fig.7의 결과와 비교했을 때, 압력의 기울기가 다름을 알 수 있다. 이것은 본 연구에 사용된 밸브는 1 차 자연함수 특성을 가지고 있기 때문이며, 관로의 압력전달특성이 체적의 영향을 받

기 때문에 사료된다.

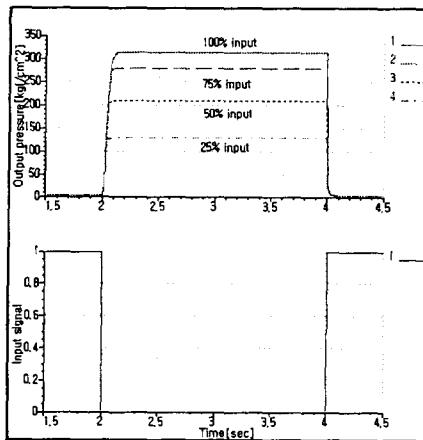


Fig.10 Pressure characteristics by 2/2way valve step input

Fig. 11 은 메인 포켓의 직경을 변화시키면서 압력제어특성변화를 관찰한 결과를 보인 것으로 직경이 커질수록 유량특성이 양호하여 제어압력이 떨어짐을 알 수 있으며, 직경변화에 매우 민감하게 반응하고 있음을 확인할 수 있다.

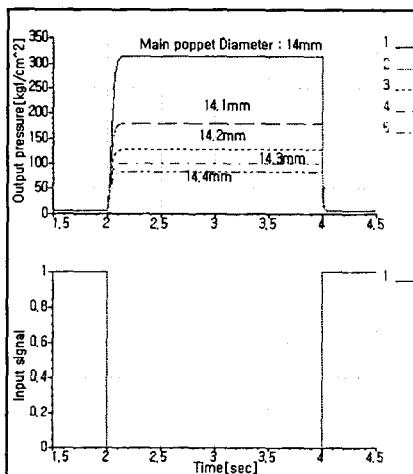


Fig.11 Pressure characteristics by main poppet diameter variation

Fig.12 는 파이로트 포켓 hole 직경 변화에 따른 압력제어특성 결과를 보이는 것으로 Fig.11 과 같이 직경변화에 매우 민감하다는 것을 알 수 있다. 그럼에서와 같이 직경이 미소변화에서는 거의 동일한 결과를 보이는 영역이 존재하나 안정영역을 벗어나게 되면(직경:2.2mm), 회로 자체가 심하게 흔들리는 특성이 있음을 알 수 있다.

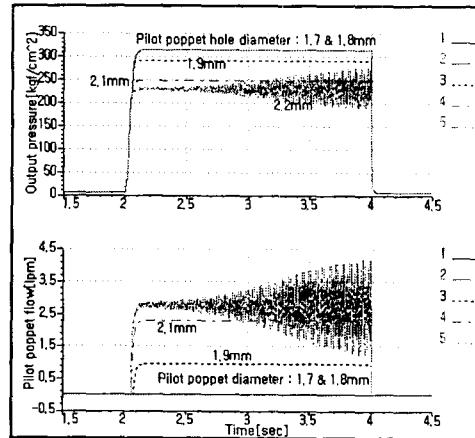


Fig.12 Pressure characteristics by pilot poppet hole diameter variation

5. 결론

본 연구에서는 파이로트 제어방식 압력제어밸브를 대상으로 해석 모델을 구성한 후 특성방정식을 도출하였으며, 해석 툴인 AMESim 을 이용하여 대상밸브의 특성을 확인하였다. 실험장치를 통하여 얻어진 결과로부터 이론해석의 타당성이 입증되었으며, 본 연구에서 얻어진 결과는 대상 밸브 설계에 유용한 자료가 될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. R.F. Sharp, "What can be expected of a "GOOD" relief valve?", Fluid power research conference, P76~37, pp.37-1~37-9, 1976.
2. F.C. Fitch, "The simulation of pilot-operated relief valves", BFPR, Vol.13, No.3, pp.225~228, 1980.
3. 石井 進, "油圧比例制御弁トサ-ボ弁", 油空壓化設計, 第 21 卷, 第 12 口, pp.42~46, 1983.
4. 市川常雄, 中村京市, "ボペット油圧弁の安定性について", 日本機械學會論文集(第 2 部), 34 卷, 25 7 口, pp.91~99, 1968.
5. AMESim, "AMESim ver_4.0", 2002.
6. F.D. Norvelle, "Static and dynamic test procedures for pressure control valves", BFPR, Vol.18, No.1, pp.27~30, 1985.
7. Shi weixiang, "Review and progress on flow force of a poppet valve", proceedings of the second JHPS international symposium on fluid power, pp.423~428, 1993.
8. Satoru Hayashi, "Influence of drain orifice on poppet valve stability", proceedings of the second JHPS international symposium on fluid power, pp.399~404, 1993.