

비례감압밸브의 압력제어특성 Pressure Control Characteristics of Proportional Pressure Reducing Valve

윤소남 · 함영복 · 조정대
S. N. Yun, Y. B. Ham and J. D. Jo

Key Words : Proportional Pressure Reducing(비례 감압), Pressure Control Pin(압력조정핀), Direct Acting Type(직동형), Power Control(동력제어)

Abstract : The purpose of this study is to develop a new proportional pressure reducing valve and to verify the validity of a new mechanism with pressure control pin. The dynamic characteristics of the object pressure reducing valve was studied by numerical analysis of the mathematical model. Also, static and dynamic characteristics of the new pressure control valve were tested with a testing system based on the test standard.

기 호 설 명

- A_{pin} : 스톨에 삽입된 핀의 단면적[m²]
- A_o : 오리피스 단면적[m²]
- A_r : 스톨 탱크부 개구면적[m²]
- A_s : 스톨 개구면적[m²]
- C_s : 스톨 및 가동자의 마찰계수[N · s/m]
- F_{sol} : 솔레노이드의 흡인력[N]
- k_1 : 스톨부 스프링 상수(N/m)
- k_2 : 솔레노이드 스프링 상수(N/m)
- K_s : 스톨 입구부 유량압력계수[m⁵/N · s]
- K_a : 유량제어용 오리피스의 유량압력계수
- K_r : 스톨 리턴부 유량압력계수[m⁵/N · s]
- P_a : 2차 제어압력[MPa]
- P_o : 스톨내 삽입된 핀에 작용하는 압력[MPa]
- P_r : 탱크부 압력[MPa]
- P_s : 1차 공급압력[MPa]
- V_o : 오리피스에서 핀부 내의 체적[m³]
- β : 기름의 압축율[m³/N]

1. 서 론

본 연구의 대상으로 하는 밸브는 기존의 온·오프 솔레노이드를 개량하여 가이드 튜브에 자성과 비자성공간을 두고, 가동자부에는 무마찰 기능을 첨가하여 입력된 전압 혹은 전류에 비례하는 제어 압력을 얻을 수 있는 비례감압밸브이다.

이 밸브는 일반산업계 및 건설기계분야에 사용되는 유압펌프의 경사각 제어기구, 자동변속기 클러치 제어 시스템 등에 응용되는 매우 중요한 밸브이다¹⁾.

본 연구에서 대상으로 하는 비례감압밸브는 비례 솔레노이드가 메인스폴에 직접 작용하여 최종 감압을 행하는 1단형 제어밸브로서 응답성은 빠르나 과도응답특성이 양호하지 못하며, 스톨의 수압면적차를 이용하여 감압시키기 때문에 압력제어 범위를 유연성있게 조절하는데 한계가 있었다.

연구자들은 이러한 단점을 해소하고 국내고유 모델 개발을 위한 방안으로 스톨 내부에 압력핀을 내장하여 기존의 스톨 수압면적 차이를 이용하던 방식을 압력핀으로 할 수 있는 방안을 제시하였다.

연구자들이 제안한 새로운 방식의 밸브를 설계, 제작하였고, 국제규격에 준하는 성능시험장치를 사용하여 시험이 수행되었으며, 기존의 밸브보다 성능이 우수하고 내구성 또한 200만회 이상임을 확인하였다.

2. 이론해석

Fig. 1에 본 연구에서 대상으로 하는 압력핀 제

접수일: 2002년 8월 17일
윤소남(책임저자) : KIMM 첨단산업기술연구부
E-mail : ysn688@kimm.re.kr Tel 042-868-7155
함영복, 조정대 : KIMM 첨단산업기술연구부

어방식 비례감압밸브의 해석모델을 도시하였다. 솔레노이드와 가동자 및 스톱의 힘의 균형은 다음 식에 의해서 이루어진다.

$$F_{sol} + k_2(x_{20} - x) = m_t \ddot{x} + C_s \dot{x} + k_1(x + x_{10}) + A_{pin} \cdot P_o + k_f \cdot x \quad (1)$$

여기에서, m_t 는 스톱 및 가동자의 질량이고, x_{10} 은 스톱부 스프링의 초기 변위이며, x_{20} 은 비례 솔레노이드 스프링의 초기 변위이다. 마지막 항 $k_f \cdot x$ 는 유체력을 의미하는 것으로 계수 $k_f = 0.43w(P_s - P_a)^2$ 로 고쳐 쓸 수 있다. 식(1)을 x 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$x = \{ k_{sol} \cdot i - A_{pin} \cdot P_o - (k_2 \cdot x_{20} - k_1 x_{10}) + 0.43w \cdot P_a \cdot x \} / \{ m_t s^2 + C_s \cdot s + k_1 + k_2 + 0.43w \cdot P_s \} \quad (2)$$

식(2)에서 i 는 비례솔레노이드 입력 전류, k_{sol} 은 비례솔레노이드 계인을 나타낸다.

압력편부에서의 연속방정식은 다음과 같다.

$$C_d \cdot A_o \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_a - P_o)} = -A_{pin} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{V_o}{\beta} \frac{dP_o}{dt} \quad (3)$$

식(3)을 오리피스부에 작용하는 압력 P_o 로 정리하면 식(4)와 같이 된다.

$$P_o = \frac{K_o \cdot P_a + A_{pin} \cdot s \cdot x}{K_b \cdot s + K_o} \quad (4)$$

여기에서, $K_o = \frac{\partial Q}{\partial P}$ 로 오리피스의 유량 압력 계수이며, $K_b = \frac{V_o}{\beta}$ 이다. 스톱부의 연속방정식은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$Q_s - Q_a - Q_r - Q_o = \frac{V_t}{\beta} \cdot \frac{dP_a}{dt} \quad (5)$$

식(5)에서 Q_s 는 밸브 공급유량, Q_a 는 제어유량, Q_r 은 탱크유량, Q_o 는 오리피스 유량을 나타내는 것으로 이들을 상세히 표현하면 식(6)처럼 고쳐 쓸 수 있다.

$$C_d \cdot A_d \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_a)} - C_d \cdot A_a \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_a - P_r)} - C_d \cdot A_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_a - P_r)} - C_d \cdot A_o \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_a - P_o)} = \frac{V_t}{\beta} \cdot \frac{dP_a}{dt} \quad (6)$$

여기에서, V_t 는 비례감압밸브 내의 전체 체적

을 의미하며, 식(6)을 2차 제어압력 P_a 에 대해서 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_a = \frac{K_t P_s + K_a P_r + K_r P_r + K_o P_o}{K_t s + K_s + K_a + K_r + K_o} \quad (7)$$

여기에서, $K_t = \frac{V_t}{\beta}$ 이다

식(2), 식(4), 식(7)을 정리하여 입력전류 i 에 대한 2차 제어압력 P_a 를 블록 다이어그램으로 표현하면 Fig. 2와 같다.

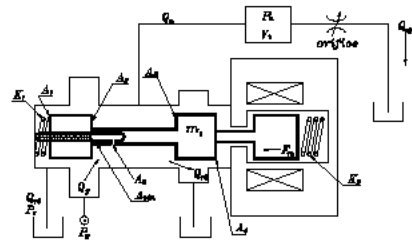


Fig. 1 Analysis model of proportional reducing valve

수치해석은 4차 Runge Kutta법을 이용하여 수행하였으며, 수치해석에 사용된 상수값들은 다음과 같다.

- A_{pin} 3.63mm², A_o 0.5mm, m_t 0.03kg,
- A_d (스톱지경) 8mm, k_1 3024N/m, P_s 5MPa
- k_2 1843N/m, x_{10} 2mm, x_{20} 3.3mm,
- β 1.4×10^{-9} m³/N, ρ 860kg/m³

Fig. 3은 출력압력이 24bar가 되도록 입력전류를



Fig. 2 Control block diagram of the proportional pressure reducing valve

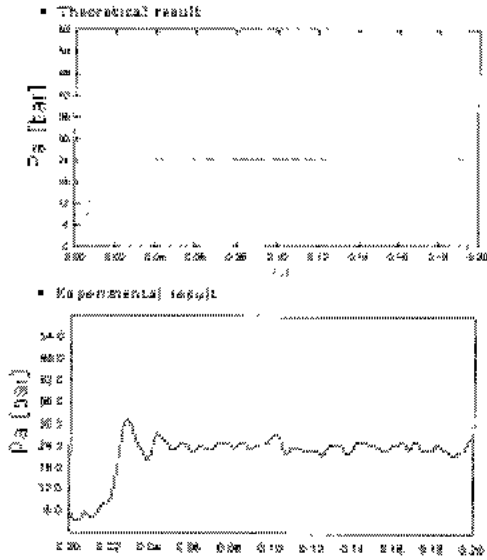


Fig. 3 Simulation result of the proportional pressure reducing valve

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 4는 연구의 대상으로 하는 비례감압밸브의 성능을 측정할 수 있는 유압회로 및 제어계측 장치도를 나타낸다.

유압회로는 한국공업규격 (KS)³⁾ 및 일본공업규격 (JIS)⁴⁾을 토대로 작성된 것이며, 실험실내에 설치되어 있는 것으로, 온도, 압력, 유량을 계측하여 밸브의 성능을 예측할 수 있도록 설계되어 있다. 밸브에 입력되는 전류는 시험항목에 따라서 PC 혹은 함수발생기에 의해서 이루어진다.

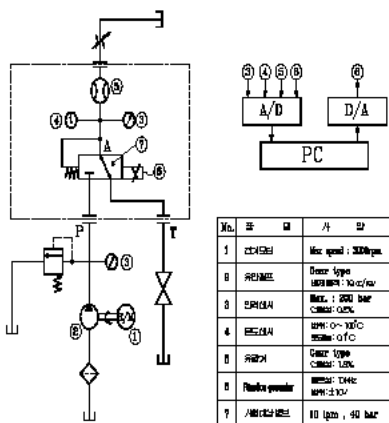


Fig. 4 Test circuit for the proportional pressure reducing valve

3.2 실험방법

연구대상밸브의 성능을 예측하는 방법으로는 정특성, 동특성 및 환경시험이 있으며, 본 연구에서는 정·동특성 시험 및 환경시험 중의 내구성 시험을 행하여 밸브의 성능을 평가하였다. 실험장치는 기본적으로 실험장치가 갖추어야 되는 실험조건 및 측정허용 범위를 만족하도록 했으며, 실험시마다 교정을 하여 실험을 수행하였다. 또한, 실험항목마다 컴퓨터에서 자동적으로 항목을 선택하고 일련의 시험을 수행한 다음에 분석된 데이터를 저장 혹은 컴퓨터 화면에 표시하도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 정특성 시험 결과

Table 1은 연구자들이 목표로 하는 밸브의 성능 사양을 나타낸 것이다.

Table 1 Target performance

No.	Items	Target Performance
1	Hysteresis	5% below
2	Linearity	7% below
3	Resolution	2% below
4	Frequency response	5Hz at 3dB
		15Hz at 90 phase lag.

Fig. 5는 입력신호에 대한 제어압력변화 특성 시험 결과를 보이는 것으로 압력범위가 1.5~39.6bar이고, 히스테리시스가 3.75%, 직선성이 2.77%로 목표 성능보다 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 스펙의 단면적 차이에 의해 제어되는 밸브에 비해 유체유동에 의한 영향을 비교적 적게 받으며, 시작된 밸브의 가공정도가 매우 양호하기 때문이다.

Fig. 6은 분해능(반응민감도)시험 결과를 보이는 것으로 시험 도중 최고사용압력의 85%에서 10초간 정지시켰다가 계속 시험을 수행한 결과를 보이는 것으로 전술한 바와 같이 가공정도가 매우 양호하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 입력신호를 최고사용압력의 30%로 설정하고, 공급압력을 변화시켰을 때의 제어압력 변화 특성 결과를 보이는 것으로 공급압력의 최대 차이가 30bar임에도 불구하고, 2bar 이내로 제어되는 양호한 밸브임을 알 수 있다.

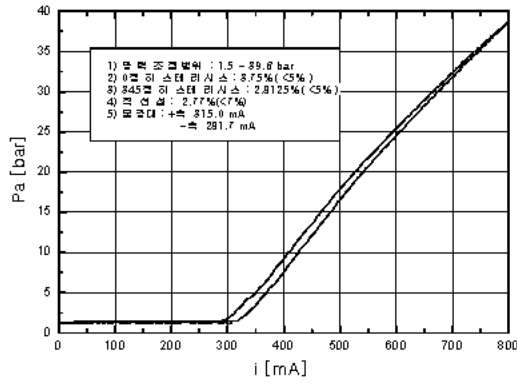


Fig. 5 Steady state characteristics of the proportional pressure reducing valve

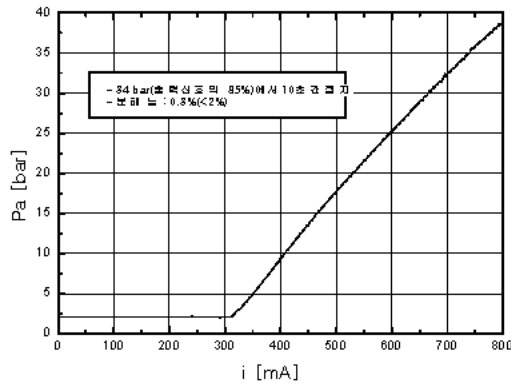


Fig. 6 Resolution test result

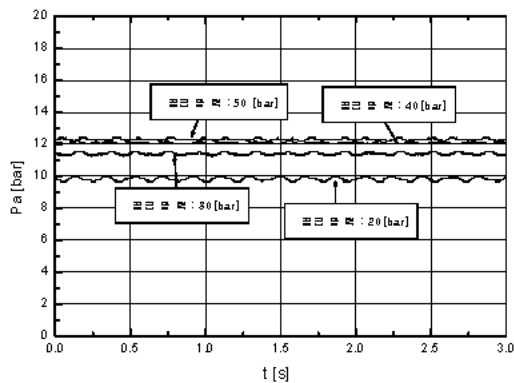


Fig. 7 Control pressure variation characteristics according to supply pressure variation

Fig. 8은 최대입력 신호의 0~50% 및 50~100%를 번갈아 가며 밸브에 입력했을 때, 0~50% 입력시의 압력 최대치와 50~100% 입력시 압력의 최소치의 차이를 평가하는 시험으로 반복 편차율이

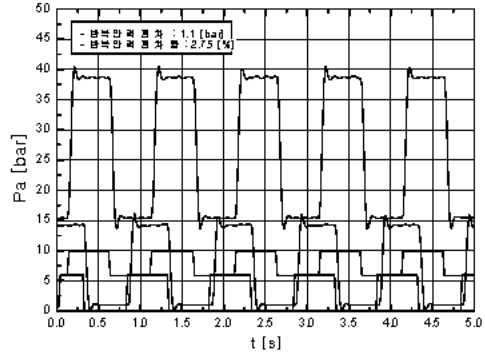


Fig. 8 Repeatability test results

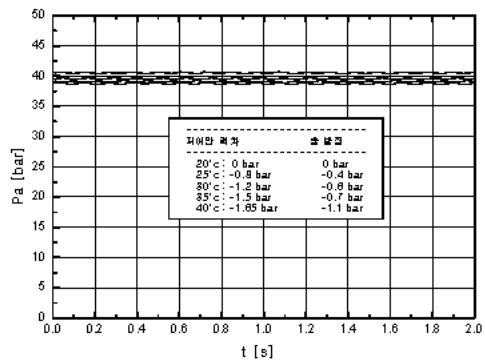


Fig. 9 Control pressure variation characteristics according to oil temperature variation

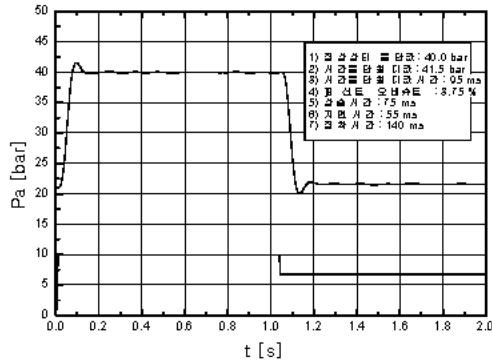
2.75%로 매우 양호한 결과를 얻었다.

Fig. 9는 기름온도를 20~40℃까지 5℃씩 상승 시켜가면서 출력압력의 차이를 계측한 것으로 최대 차이가 약 1.65bar로 매우 양호한 결과를 얻었다. 이 결과로부터 가공정도가 매우 양호하다는 것과, 압력편 방식으로도 쉽게 소정의 감압력 제어가 가능하다는 것을 알 수 있다.

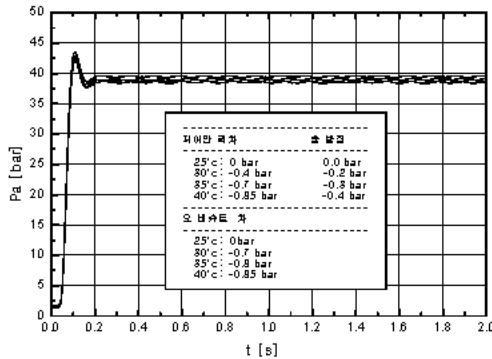
4.2 동특성 시험 결과

Fig. 10은 스텝응답시험 결과를 보이는 것으로, a)는 스텝폭을 기준량의 50%에서 100%, 그리고 100%에서 50%로 인가하여 나타난 결과로, 상승시간이 75msec이고 퍼센트 오버슈트가 연구자들이 목표로 하는 5% 범위 이하인 3.75%로 매우 양호한 결과를 얻었다.

이것은 직접 단면적 차이를 이용하는 방식에 비해 오리피스를 두는 압력편 방식이 오리피스 효과에 의해 매우 부드러운 동작을하고 있음을 예측할 수 있다. b)는 사용기름의 온도를 25, 30, 35, 40℃로 유지한 후, 0%에서 100%로 인가하여 나타나는



(a) Input range test(50 100 50%)



(b) Temperature range test

Fig. 10 Step response test results

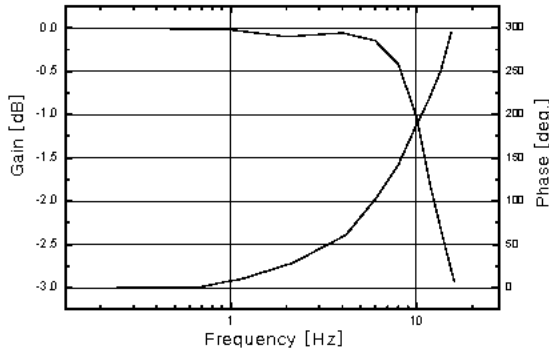


Fig. 11 Frequency response test result

결과를 도시한 것으로 Fig. 9와 동일한 결과를 얻을 수 있었으며, 온도변화에 따라서 압력편과 스펙의 누설이 발생하고, 이로 인하여 제어압력의 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 주파수 응답특성 결과를 보이는 것으로 게인 3dB에서 약 5.5Hz, 90°위상 지연에서 약 17Hz의 특성을 보이며, 연구자들이 초기에 목표로 하는 성과를 올릴 수 있었다.

4.3 내구성 시험 결과

Fig. 12는 내구성 시험을 11만회 및 26만회 한 후, 온도 범위를 30, 35, 40℃로 두고 입력신호에 대한 제어압력특성시험을 수행한 결과를 보이는 것으로 목표로 하는 성능사양을 만족하고 있음을 알 수 있으며, 매우 강인한 제어특성을 가지고 있음이 확인되었다. 이 후에도 연구자들은 각각 52만, 88만, 142만, 183만, 196만, 226만, 232만회 내구성 시험을 수행한 후에 히스테리시스 특성을 조사하였으며, 3% 미만의 제어특성을 가지는 밸브임을 확인할 수 있었다.

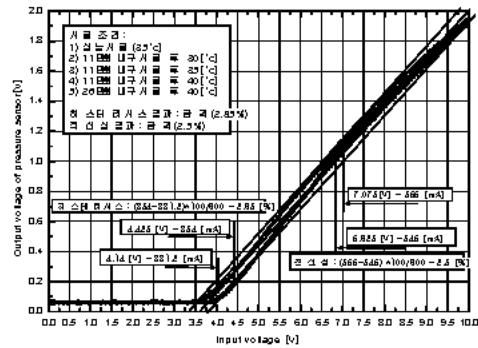


Fig. 12 Endurance test results

5. 결 론

본 연구에서는 스펙의 단면적 차이를 이용하여 감압력을 제어하던 방식을 스펙의 직경은 일정하게 하고, 스펙 내부에 압력편을 삽입하여 이 압력편의 수압면에 작용하는 반발력을 이용하여 감압력을 제어하는 새로운 밸브를 제안하였으며, 국내·외 규격을 기본으로 하여 시험장치를 제작하고 규격에 준하는 시험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 신방식 밸브의 히스테리시스, 직선성, 분해능, 반복성 결과는 규격에서 규제하는 값보다 우수한 특성을 가짐이 확인되었다.
2. 새로운 방식의 밸브는 퍼센트 오버슈트가 3.75%, 최대 주파수가 17Hz의 특성을 갖는 밸브임이 확인되었다.
3. 새로운 방식의 밸브는 230만회 내구성 시험후의 히스테리시스 성능이 3% 미만이며, 초기에 밸브가 갖고 있는 성능의 저하가 거의 없음을 확인되었다.
4. 새로운 방식의 밸브는 유압식 가변펌프의 동력

제어용, 반자동 및 자동 클러치 제어시스템에 이르기까지 산업계에 매우 유용히 적용될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 鈴木勝也 外2人, "比例3ポート減壓弁回路", 油壓と空氣壓, 第24卷, 第2号, pp.206~210, 1993
2. H. E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc., pp.101~105, 1967
3. KS B 6508(비례전자식 감압밸브 및 비례전자식 릴리프 감압밸브 시험방법), 1991
4. JIS B 8652(비례전자식 감압변 및 비례전자식 릴리프 감압변 시험방법), 1989