

파일럿 스푼이 주 스푼에 동심 내장된 2단 방향제어밸브의 기초적 특성 Basic Characteristics of a Two Stage Directional Control Valve with Pilot Spool Assembled in Main Spool Coaxially

이일영 · 손제목

I. Y. Lee and J. M. Son

(접수일 : 2010년 11월 1일, 수정일 : 2010년 11월 23일, 채택확정 : 2010년 11월 24일)

Key Words : Two Stage Hydraulic Valve(2단 유압 밸브), Main Spool(주 스푼 밸브), Pilot Spool(파일럿 스푼), Valve Design(밸브 설계)

Abstract : In this study, the authors investigate the basic characteristics of a two stage directional control valve with pilot spool assembled in main spool coaxially. The step response characteristics and effects of major design parameters' values on valve performances are clarified through numerical simulations. In addition, the authors examined the possibility of applying the object valve for this study as a proportional control valve. Based on the numerical simulation results, new design values for the reformed design as a proportional control valve were suggested.

1. 서 론

이 연구에서는 솔레노이드/유압 파일럿으로 구동되는 스푼식 2단 방향제어밸브의 일종으로, 파일럿 스푼이 주 스푼에 동심축상으로(coaxially) 내장된 밸브의 기초적 특성을 조사하여 보고한다.

일반적으로 솔레노이드/유압 파일럿으로 구동되는 2단 방향제어밸브는 1단 밸브와 2단 밸브가 복층으로 조립되도록 설계된다. 이 연구에서 대상으로 하는 솔레노이드/유압 파일럿 구동식 2단 방향제어 밸브¹⁾는 파일럿 스푼이 주 스푼의 내부에 동심축상으로 조립된 특이한 구조를 가진다. 따라서 연구 대상 밸브는 2단 파일럿 작동식 밸브임에도 불구하고 단층의 구조(Fig. 1 및 Fig. 4 참조)를 보인다. 그 결과로, 연구 대상 밸브는 일반적인 2단 솔레노이드/유압 파일럿식 밸브에 비하여 소형·경량화가 가능한 설계를 제공한다. 또한, 연구 대상 밸브는 정격 압력 35 MPa, 정격 유량 100 L/min에서 소모 전력이 32 W로서, 열 발생이 상대적으로 적기 때문에 장기간 솔레노이드에 전력이 가해진 상태로 사용되

어야 하는 용도의 밸브로서 적격이다.

이 연구에서 대상으로 하는 밸브는 위에서 기술한 바와 같이 그 구조가 매우 특수하여, 유압 전문가들에게도 잘 알려져 있지 않은 밸브이므로, 이 밸브의 특성에 관한 연구 보고 자료는 찾아보기가 어렵다. 저자들은 이 논문에서 연구 대상 밸브의 작동 원리를 명확히 규명하고, 기본적인 응답 특성과 주요 설계 인자인 스푼 오버랩, 스푼 반지름 방향 틈새의 크기가 밸브의 응답 특성에 미치는 영향을 수치 시뮬레이션을 통하여 규명한다.

한편, 이 연구에서 대상으로 하는 밸브는 특수한 구조를 가진 비례제어밸브의 하나인 산업용 서보밸브²⁾와 스푼 형상(Fig. 11 참조)의 면에서 매우 유사한 특징을 가진다. 이 점에 착안하여, 연구 대상 밸브를 비례제어밸브로 응용하고자 했을 때 발생할 수 있는 기술적인 문제점들을 밸브의 응답 시뮬레이션을 통하여 조사하고, 그 결과를 보고한다.

2. 연구 대상 밸브의 구조와 작동원리

Fig. 1은 이 연구에서 대상으로 하는 밸브의 구조를 나타낸다. 이 밸브의 주요 구성요소로는 밸브 하우징, 주 스푼, 파일럿 스푼, 솔레노이드, 스프링 등이 있다. 그림에서 보는 바와 같이 파일럿 스푼은

이일영(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : iylee@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6153
손제목 : 부경대학교 대학원

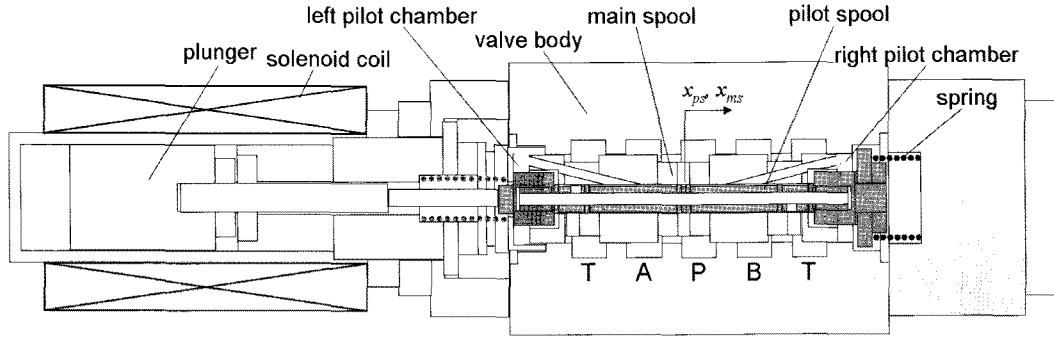


Fig. 1 Structure of the valve (when solenoid is not activated)

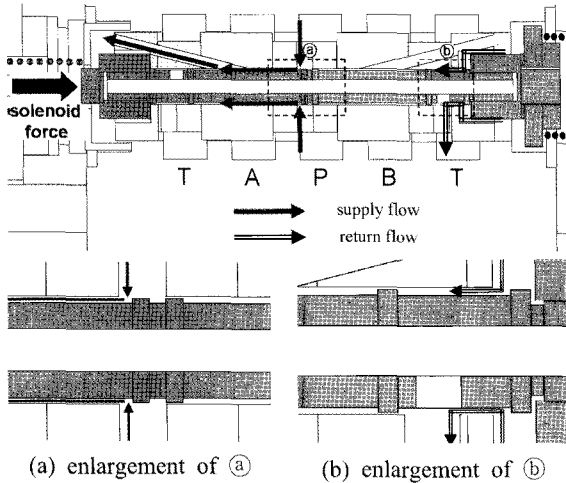


Fig. 2 Operation of the valve (when solenoid is switched from 'off' to 'on')

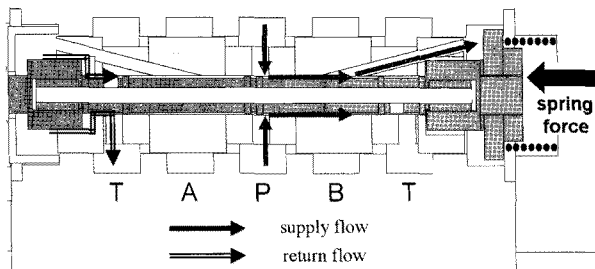


Fig. 3 Operation of the valve (when solenoid is switched from 'on' to 'off')

주 스톱 내부에, 주 밸브와 동심축을 이루도록 조립된다. 그림에서 기호 x_{ps} 와 x_{ms} 는 각각 파일럿 스톱과 주 스톱의 변위를 나타낸다. 이 밸브의 작동 원리에 관한 이해를 돕기 위한 그림들을 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타낸다.

Fig. 1의 밸브에서, 펌프로부터 압력유가 밸브의 P 포트에 공급되고 있는 상태에서 솔레노이드에 전력이 가해질 때(off→on)의 밸브 작동을 상세하게 나타낸 것이 Fig. 2이다. 솔레노이드에 전력이 공급

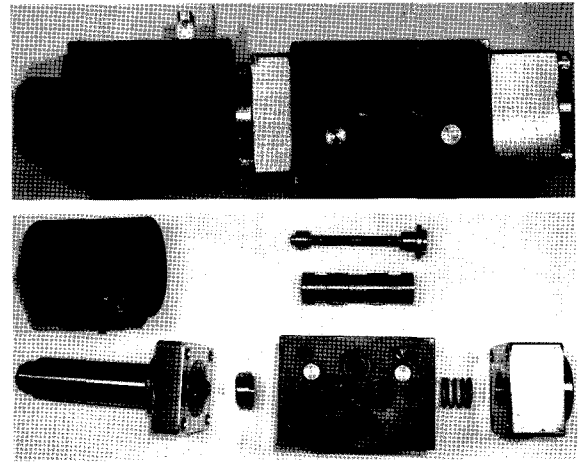


Fig. 4 Photo. of the valve

되면 플런저에 가해지는 솔레노이드 구동력이 오른쪽 끝의 스프링 지지력을 극복하여 파일럿 스톱을 오른쪽으로 밀어준다. 이 때 파일럿 스톱 외주의 랜드(land)부와 주 밸브 내부의 슬리브 사이에 유체가 흐를 수 있는 통로가 만들어진다(Fig. 2의 (a)부 확대도 참조). 이에 따라서, Fig. 2에 표시된 화살표 방향으로 압력유가 흘러서 좌측의 파일럿 체임버 (pilot chamber)에 펌프 공급 압력이 작용하고, 주 밸브는 매우 강한 유압력을 받아서 오른쪽으로 움직인다. 이와 동시에 우측 파일럿 체임버에 충전해 있던 유압유가 탱크 포트에 흐를 수 있는 유로가 파일럿 스톱의 랜드부와 주 스톱 내부의 슬리브 사이에 형성되며(Fig. 2의 (b)부 확대도 참조), 우측 파일럿 체임버의 압력유는 탱크 포트에 흐른다. 이 때 주 밸브의 위치 이동은 Fig. 2의 (a)부 확대도에 나타난 파일럿 스톱 랜드부와 주 스톱 슬리브 사이 개구부가 폐쇄될 때까지 지속된다. 즉, 주 밸브의 위치는 파일럿 스톱의 위치를 추종하게 된다. 결과적으로 주 스톱은 파일럿 밸브의 위치 변화를 추종하여 오른쪽으로 움직여서, 주 밸브의 P 포트는 B 포트, A 포트는 T 포트에 연결된다.

Table 1 Physical parameter's value

| element | value of major item |
|-------------|--|
| pilot spool | overlap: 2.4 mm, valve opening: 0.7 mm, radial clearance: 7.5 μ m |
| solenoid | gain: 100 N/A, hysteresis: 2 %, delay time: 5 ms, time constant: 30 ms |
| spring | stiffness: 3275.86 N/m initial displacement: 3 mm |
| fluid | density: 850 kg/m ³ , bulk modulus: 1700 MPa, viscosity: 60 $\times 10^{-6}$ m ² /s, temperature: 40 °C |

Fig. 1에 나타난 밸브에는 스톱의 왼쪽 및 오른쪽에 각각 스프링이 배치되어 있지만, 스톱의 왼쪽에 위치한 스프링은 스톱 오른쪽의 스프링에 비하여 강성계수가 미약하므로, 스톱 왼쪽에 위치한 스프링이 밸브의 작동에 미치는 영향은 미미하다.

Fig. 3은 솔레노이드에 공급중인 전력을 차단(on→off)할 때의 밸브 작동을 나타낸다. 솔레노이드의 구동력이 해제됨에 따라서, 오른쪽 스프링의 탄성력이 파일럿 스톱을 왼쪽으로 밀어준다. 이 때에는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 파일럿 스톱 외주의 렌드부와 주 스톱 내부의 슬리브 사이에 유체가 흐를 수 있는 통로가 만들어진다. 펌프로부터의 압력유는 오른쪽 파일럿 체임버로 공급되고, 왼쪽 파일럿 체임버 속의 유압유는 탱크로 흐르며, 주 스톱은 매우

강한 유압력을 받아서 왼쪽으로 움직인다. 이 때에도 주 스톱의 위치는 파일럿 스톱의 위치를 추종하게 되고, P 포트는 A 포트, B 포트는 T 포트로 연결된다.

Fig. 4는 이 연구에서 대상으로 하는 밸브의 사진이다. 이 밸브가 파일럿 작동식의 2단 솔레노이드 밸브임에도 불구하고, 외부 형상은 마치 직동식 솔레노이드 밸브처럼 보이며, 매우 간결한 구조임을 알 수 있다.

Fig. 1의 밸브는 4포트 2위치 밸브이지만, 동일한 스톱 제어 방식의 4포트 3위치 밸브¹⁾도 시판되고 있다.

3. 밸브의 특성 시뮬레이션

3.1 특성 시뮬레이션 모델

이 연구에 대상으로 하는 밸브의 특성을 해석하기 위한 시뮬레이션 프로그램의 구성에는 범용 유압시스템 해석 소프트웨어인 AMESim³⁾을 사용한다. 대상 밸브의 유압회로를 AMESim 소프트웨어로 구성한 것이 Fig. 5이다. Fig. 5의 프로그램에 포함된 각종 유압요소들은 AMESim HCD(hydraulic component design) 라이브러리³⁾에서 제공하는 요소들이며, 프로그램에 반영된 물리 파라미터 값들 가운데서 주요 수치들을 Table 1에 제시한다.

Fig. 5의 프로그램에서는 파일럿 체임버로 통하는 유로에서 가변 오리피스 역할을 하는 파일럿 스톱의 개구부(Fig. 2(a), (b) 참조) 면적이 파일럿 스톱과 주 스톱의 상대변위에 따라서 계산되도록 한다. 또한, 주스톱 양측의 파일럿 압력 작용 면적은 유압 실린더에서의 압력 작용 면적으로 모의한다.

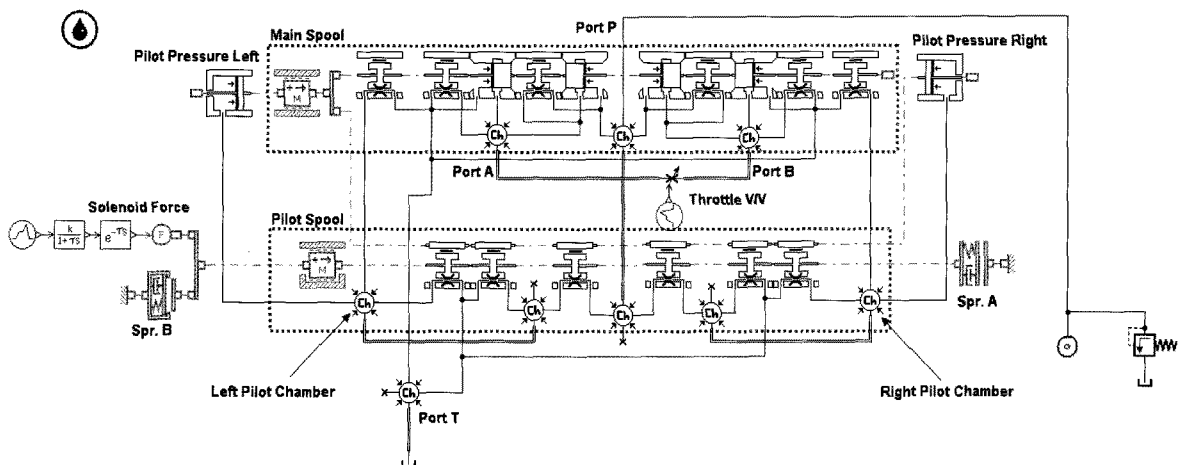


Fig. 5 Simulation program shown by AMESim symbols

3.2 밸브의 응답 특성

(1) 스톱의 변위 응답

Fig. 6은 이 연구에서 대상으로 하는 밸브를 ISO 10770-1⁴⁾에 제시된 시험회로에 적용할 때의 유압 및 계측회로를 간략하게 나타낸 것이다.

Fig. 6의 회로에서 부하용 교축밸브를 완전 개방한 상태로 두고, 솔레노이드에 스텝상의 전압 신호(직류 0↔24 V)를 인가/해제할 때의 파일럿 스톱 및

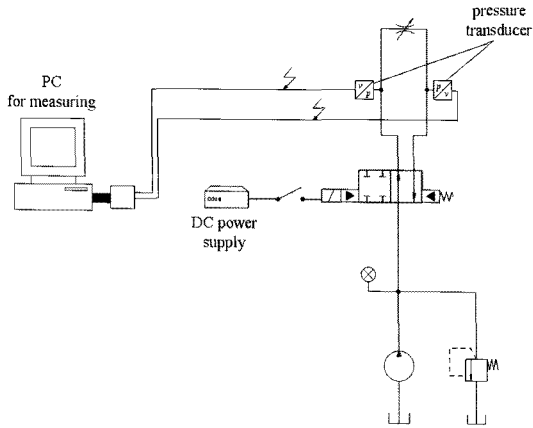
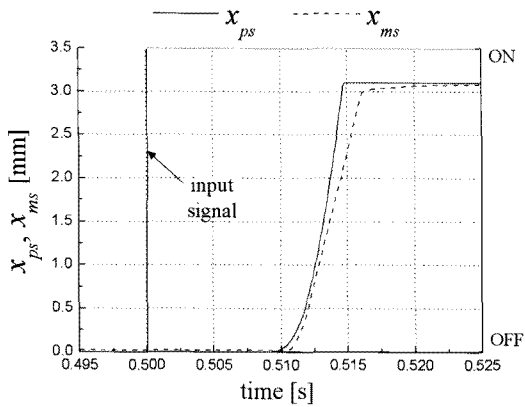
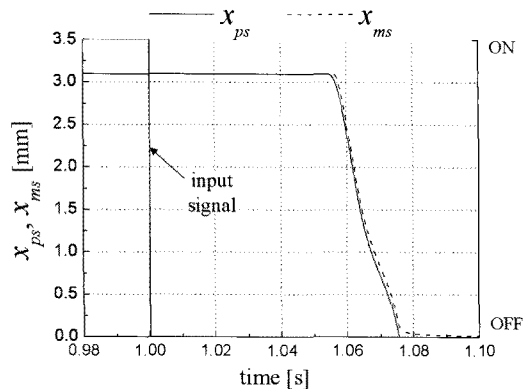


Fig. 6 Hydraulic circuit for simulation



(a) Solenoid OFF → ON



(b) Solenoid ON → OFF

Fig. 7 Step response(simulation)

주 스톱의 변위 x_{ps} 와 x_{ms} 의 시뮬레이션 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 밸브의 공급 압력 1 MPa, 복귀압력 0 MPa, 유압유 동점도 $60 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 유압유 온도는 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다.

솔레노이드에 전압 신호를 인가(off→on)했을 때의 응답을 Fig. 7의 (a)에 나타내었으며, 파일럿 밸브의 응답 지연 시간은 약 10 ms, 상승시간(x_{ps} : 0→90%)은 5 ms로 나타났다. 주 스톱은 파일럿 스톱의 위치를 비교적 빠른 속도로 추종함을 보였으며, 두 스톱 모두의 변위는 약 3.1 mm로 나타났다.

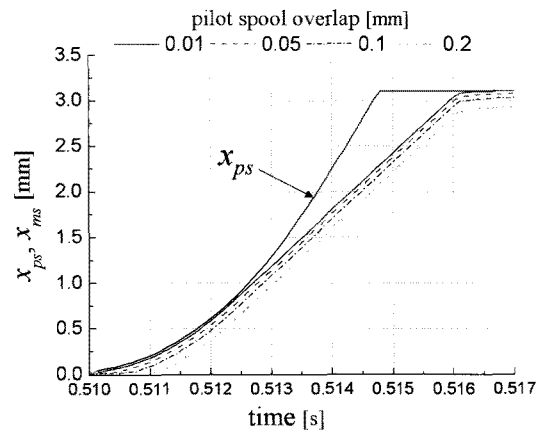


Fig. 8 Main spool displacement x_{ms} under various pilot spool overlap(simulation)

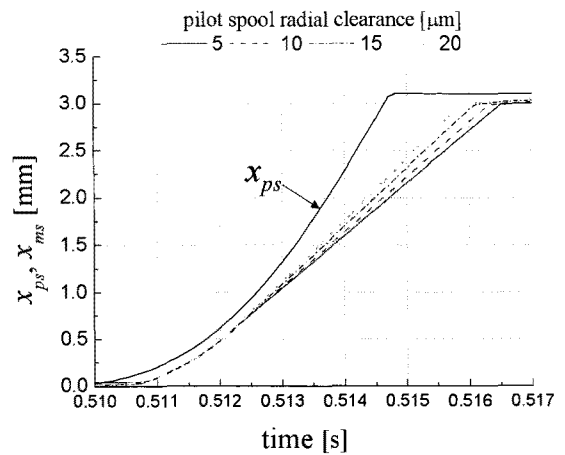


Fig. 9 Main spool displacement x_{ms} under various pilot spool radial clearance (simulation)

솔레노이드에 가해진 전압 신호를 해제(on→off)했을 때의 응답을 Fig. 7의 (b)에 나타내었다. 이 때 파일럿 밸브의 응답 지연 시간은 약 55 ms, 하강시간(x_{ps} : 100→10%)은 약 20 ms로 나타났다. 이 때에도 주 스톱은 파일럿 스톱의 위치를 비교적 빠른 속도로 추종함을 보였으며, 두 스톱 모두의 변위는

약 3.1 mm로 나타났다. 솔레노이드 전압 신호를 해제(on→off)할 때에 응답 지연 시간이 매우 길어진 이유는 솔레노이드 최대 흡인력(약 35 N)에 비하여 스프링력(약 10 N)이 약하게 설계되었기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 스톱의 변위응답에 미치는 설계인자들의 영향
파일럿 스톱의 위치가 이동할 때, 주 스톱이 파일럿 스톱의 위치를 추종하는 작동은 이 밸브의 주요 관심사이다. Fig. 8과 Fig. 9에서는 밸브의 설계인자인 파일럿 스톱의 오버랩과 반경 방향 틈새의 값을 변경하였을 때의 주 스톱 변위 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

Fig. 8에서 파일럿 스톱의 오버랩이 0.01 mm에서 0.2 mm까지 증가함에 따라서 주 스톱의 추종 속도가 점점 느려짐을 확인할 수 있다. Fig. 9에서는 파일럿 스톱의 반경방향 틈새가 5 μm에서 20 μm까지 변경됨에 따라서 달라지는 주 스톱의 추종성을 확인할 수 있다. 파일럿 스톱의 반경 방향 틈새가 늘어날수록 주 스톱이 움직이기까지의 지연시간에는 영향을 미치지 않지만, 추종 속도는 점점 빨라짐을 알 수 있다.

(3) 정상상태 응답

Fig. 10은 밸브의 전개(full open)시 밸브 압력 강하(주 밸브에서 2개 제어 오리피스에서의 압력 강하의 합) Δp 에 따른 밸브 유량 Q 의 관계를 보인다. 그림에는 시뮬레이션 결과와 함께 이 밸브의 제조사 카탈로그 자료에 있는 실험결과가 나타나 있다. 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 Δp 의 넓은 범위에 걸쳐서 잘 일치하고 있으며, 이는 시뮬레이션 모델에 밸브의 물리 파라미터 수치들이 올바르게 반영되었음을 의미한다.

4. 비례제어밸브로의 응용에 관한 고찰

이 연구에서 대상으로 하는 Fig. 1에 나타난 밸브는 2위치 온-오프(on-off) 밸브이다. 이 밸브는 주 스톱의 내부에 주 스톱과 동심축 상으로 파일럿 밸브를 내장한 것이 특징이며, 주 스톱은 파일럿 스톱의 위치 변화를 정확하게 추종함이 제3절에서 기술한 시뮬레이션 결과로부터 확인되었다. 이러한 밸브의 구조는 일반적인 온-오프(on-off)식 유압 밸브류의 설계양식에 비추어 볼 때 매우 독특한 구조이며, 비례제어밸브의 한 가지인 양식인 Fig. 11의 산업용 서보밸브²⁾와 매우 유사한 구조적 특징을 가진다.

Fig. 11의 산업용 서보밸브도 주 스톱의 내부에 주 스톱과 동심축 상으로 파일럿 밸브를 내장한 것이 특징이다. Fig. 11의 밸브는 구동 코일의 저항이 20 Ω, 정격전류가 200 mA, 정격유량이 90 L/min이고, -3 dB의 게인에서 25 Hz의 주파수 특성을 갖는 밸브이다. Fig. 1의 밸브와 Fig. 11에 나타난 밸브의 구조적 유사성을 고려하여, 이 절에서는 Fig. 1의 밸브를 비례제어 밸브로의 응용 가능성에 관한 기술적인 문제점들에 대하여 고찰한다.

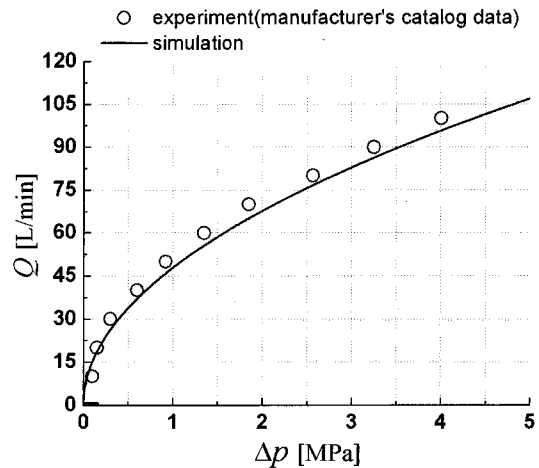


Fig. 10 $\Delta p - Q$ characteristics (when the valve orifice is fully opened)

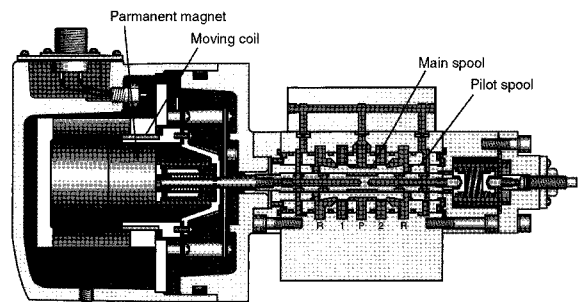


Fig. 11 An industrial servo valve²⁾

Fig. 1의 밸브를 비례제어밸브로 응용하기 위한 검토의 첫 단계로서, 먼저 Fig. 1에 나타난 밸브의 솔레노이드를 비례 솔레노이드로 대체하고, 밸브 내부의 다른 요소들은 기존의 설계 수치를 그대로 유지하는 경우의 시뮬레이션 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 시뮬레이션에는 Fig. 5에 나타난 AMESim에 기초한 프로그램을 부분 수정한 것을 사용하였다. Fig. 12는 밸브 압력 강하 $\Delta p = 1$ MPa일 때에, 비례 솔레노이드 전류 i 의 변화(0→0.2→0A)에 따른 파일럿 스톱 변위 x_{ps} , 주 스톱 변위 x_{ms} , 유량 Q 를 보인다. 스프링의 초기 변위에 따른 스프링력을

극복하는 데에 0.1 A의 전류가 필요하며, 0.1 A로부터 0.12 A까지 상승하는 동안에 유량은 약 50 L/min에서 0 L/min로 변화하는 것으로 나타났다. 이 시뮬레이션 결과에는 히스테리시스(2%)의 영향이 비교적 크게 나타났으며, 주 스펴의 변위 x_{ms} 는 파일럿 스펴 변위 x_{ps} 를 비교적 잘 추종하는 것으로 나타났다.

Fig. 12의 결과는 Fig. 1의 밸브에서 솔레노이드를 비례 솔레노이드로 대체함으로써, 이 밸브가 비례제어밸브로 응용될 수 있음을 보인다. Fig. 12의 시뮬레이션 결과를 검토할 때, 더욱 개선되어야 할 점은 유량 제어 구간이 좁아서(전체 전류 변화의 10% 범위에서만 제어가 수행되므로) 제어 입력의 해상도(resolution)가 매우 낮다는 점이다. 그에 따라서 밸브의 히스테리시스가 유량 Q 에 매우 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

Table 2 Design value variation for a new proportional control valve

| elements | variation of design value |
|--------------------------------|------------------------------------|
| basic type | normally open → normally closed |
| overlap | 2.4 mm → 0.1 mm |
| opening | 0.7 mm (not changed) |
| sol. gain | 100 N/A → 26.21 N/A |
| spring const. | 3275.86 N/m → 6552 N/m |
| initial displacement of spring | 3 mm → 0 mm |

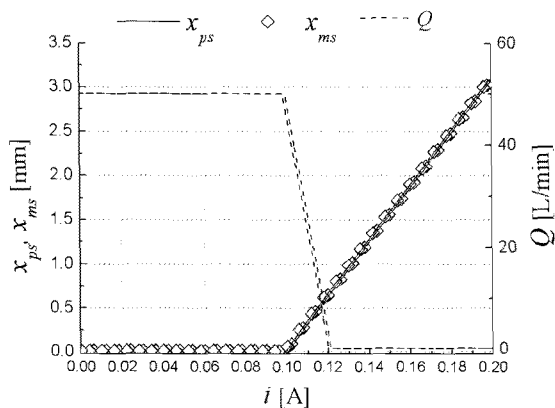


Fig. 12 $i - Q$, $i - x_{ms}$, $i - x_{ps}$ characteristics of the object valve with a proportional solenoid($\Delta p = 1\text{MPa}$)

Fig. 1의 밸브에서 단지 솔레노이드만을 비례 솔

레노이드로 변경한 경우에 밸브의 성능에서 관찰된 문제점들을 개선한 새로운 설계안(설계 변경안)을 Table 2에 나타내었다. 그리고 새로운 비례제어밸브 설계안을 고려한 시뮬레이션 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13은 밸브 압력 강하 $\Delta p = 1\text{MPa}$ 일 때에, 전류 i 의 변화($0 \rightarrow 0.2 \rightarrow 0\text{A}$)에 따른 x_{ps} , x_{ms} , Q 의 변화를 보이며, 전류 변화에 따른 유량 변화의 구간이 증가되고, 히스테리시스(2%)가 유량 제어에 미치는 영향이 상대적으로 감소됨을 알 수 있다.

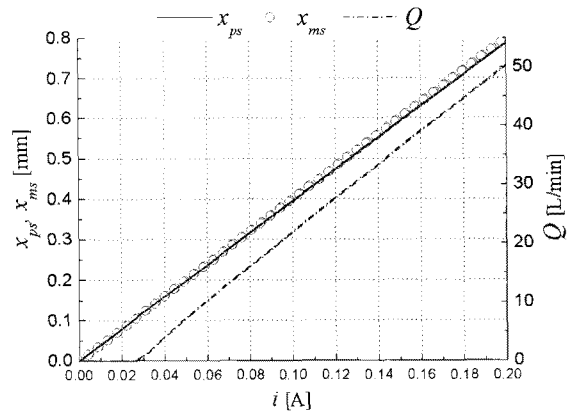


Fig. 13 $i - Q$, $i - x_{ms}$, $i - x_{ps}$ characteristics of the object valve after design value change(Table 2) ($\Delta p = 1\text{MPa}$)

6. 결론

이 연구에서는 솔레노이드/유압 파일럿으로 구동되는 스펴식 2단 방향제어밸브의 일종으로, 파일럿 스펴이 주 스펴에 동심축상으로(coaxially) 내장된 밸브의 기초적 특성을 조사하여 보고하였다.

저자들은 이 논문에서 연구 대상 밸브의 작동 원리를 명확히 규명하고, 기본적인 응답 특성과 주요 설계 인자인 스펴 오버랩, 스펴 반지름 방향 틈새의 크기가 밸브의 응답 특성에 미치는 영향을 수치 시뮬레이션을 통하여 규명하였다.

한편, 이 연구에서 대상으로 하는 밸브는 특수한 구조를 가진 비례제어밸브의 하나인 산업용 서보밸브²⁾와 스펴 형상의 면에서 매우 유사한 특징을 가진다. 이 점에 착안하여, 연구 대상 밸브를 비례제어밸브로 응용하고자 했을 때 발생할 수 있는 기술적인 문제점들을 밸브의 응답 시뮬레이션을 통하여 조사하고, 그 결과에 따라서 새로운 설계 인자 수치를 제안하였다.

참고 문헌

1. www.bucherhydraulics.com/ · · · /WDV-W, EV-WOF
2. www.nireco.jp/prod/process/pg2.html
3. LMS IMAGINE S. A., 2008, "AMESim Library Manual"
4. ISO 10770-1, 1998, "Hydraulic Fluid Power — Electrically modulated hydraulic control valves — Part 1 : Test methods for four- way directional flow control valves"