

# 스풀형 비례 방향/유량제어밸브의 유체력 검증법

## A Method for Estimating Fluid Force in Proportional Directional Control Valves with Spool

이일영 · 손제목 · 신행봉 · 손정훈

I. Y. Lee, J. M. Son, H. B. Shin and J. H. Son

**Key Words:** Spool Valve(스풀 밸브), Flow Force(유동력), Proportional Directional/Flow Control Valve(비례 방향/유량제어밸브)

**Abstract:** In establishing a simulation program for hydraulic valves, it is always a big obstacle to incorporate correctly flow forces on valve body into the simulation program. This paper suggests a method to estimate flow forces on spool in proportional directional/flow control valves with spool structure. Furthermore, suggests a way to obtain simulation program for spool valves, in which flow force mechanism is fully reflected.

### 기호 설명

- $F_s$  : 정상 유동력(steady state flow force)
- $C_d$  : 유량 계수(discharge coefficient)
- $A$  : 밸브의 개구면적(valve opening)
- $\Delta p$  : 오리피스 압력 강하(pressure difference)
- $\phi$  : 유체의 유출 · 입 각도(jet angle of fluid flow)
- $x_s$  : 스푼 변위(spool displacement)
- $u$  : 제어 입력(control input)

### 1. 서론

스풀형 유압제어밸브의 수학 모델을 정립함에 있어서 가장 어려운 점은 스푼에 작용하는 유체의 유동력을 정확하게 반영하는 문제이다. 스푼에 작용하는 유동력에 관한 기초 방정식이 알려져 있지만, 이식에 의존하여 유동력을 정밀하게 예측하기란 매우 어려우며, 그러한 사실을 이 논문의 전반부에서 실험 결과의 제시를 통하여 보일 것이다.

스풀 밸브는 유압공학 역사상의 초기부터 사용되어 온 밸브이지만, 스푼에 작용하는 유체의 유동력에

관한 연구 보고는 그 수가 많지 않으며, 유동력의 경감법에 관한 연구<sup>1)</sup>, 운동량 이론에 기초한 유동력의 해석<sup>2), 3)</sup>, 스푼 밸브 내부의 유동 해석을 통한 스푼 축 방향 추력 계산<sup>4)</sup> 등이 있다. 그러나 전기적으로 제어되는 스푼 밸브에서 전기적 제어 신호에 의하여 유체력을 계측한 연구, 운동량 이론으로부터 유도된 유동력의 식을 초월하는 고정밀도의 유동력 발생 매커니즘을 밸브 모델에 반영한 연구 등은 찾아 보기 어렵다.

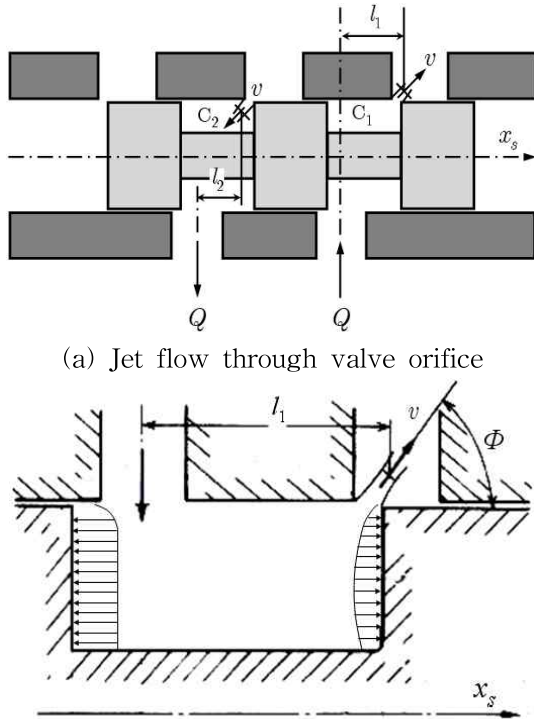
이 논문에서는 스푼의 위치가 페루프 제어되는 비례 방향/유량제어밸브에서 정상 유동력을 정확하게 추정해내는 기법을 제안한다. 제안한 기법을 실제 밸브에 적용한 실험 및 시뮬레이션을 통하여, 스푼에 작용하는 유동력을 비교적 간편하면서도 매우 정밀하게 구할 수 있음을 보인다.

마지막으로, 정상 유동력 추정기를 포함하는 시뮬레이션 프로그램을 구동시켜서 얻는 데이터 파일을 밸브의 특성 해석 시뮬레이션 프로그램에 적용함으로써, 정상 유동력 발생 기구를 정확하게 반영한 밸브 시뮬레이션을 보인다.

### 2. 스푼에 작용하는 유동력

Fig. 1(a)에 스푼형 밸브 내부의 유체 유동 양상을 나타내었다. 그림의 밸브 실  $C_1$ 에서는 유체가 스푼 축에 대하여  $90^\circ$ 의 각도로 유입하여  $\phi$ 의 각도로 유출한다. 이를 Fig. 1(b)에서 보다 자세히 나타내었다.

접수일: 2010년 6월 7일  
 이일영(책임저자): 부경대학교 기계자동차공학과  
 E-mail: iylee@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6153  
 손제목: 부경대(원) 메카트로닉스 공학과  
 신행봉, 손정훈: SG 서보(주)



(a) Jet flow through valve orifice  
(b) Pressure distribution on spool lands  
Fig. 1 Flow force in spool valve chamber

여기서, Fig. 1(a)의 밸브를 서로 쌍을 이루고 대칭인 제어 오리피스들을 갖는 밸브로 고려한다. 이 밸브의 밸브 실 내 일정 체적을 검사 체적(control volume)으로 취하고, 여기에 운동량 이론(momentum theory)을 적용하면, 아래 식 (1)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F &= -2 \rho Q v \cos \phi + \rho(l_2 - l_1) \frac{dQ}{dt} \\
 &= -4 C_d A(x_s) \Delta p \cos \phi + \rho(l_2 - l_1) \frac{dQ}{dt} \quad (1) \\
 &= F_s + F_t
 \end{aligned}$$

위 식에서  $C_d$ 는 유량계수,  $\Delta p$ 는 밸브 제어 오리

피스 전후의 압력차,  $x_s$ 는 스푼의 변위,  $A(x_s)$ 는 오리피스 개구 면적,  $F_s$ 는 정상 유동력,  $F_t$ 는 비정상 유동력이다.

### 3. 스푼 밸브의 모델링

Fig. 2는 스푼 위치가 피드백 제어되는 일반적인 페루프 비례제어밸브의 블록 선도를 나타낸 것이다. 그림에서  $F(s)$ 는 외란을 나타내며, 이 밸브에서 주요 외란 소스는 유체의 유동력으로 간주할 수 있다. 이 밸브의 전달함수 관계식은 다음과 같다.

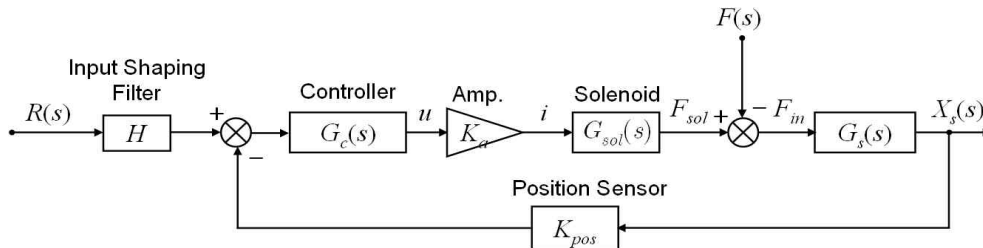
$$\begin{aligned}
 X_s(s) &= \frac{H K_a G_c(s) G_{sol}(s) G_s(s)}{1 + K_a K_{pos} G_c(s) G_{sol}(s) G_s(s)} R(s) \quad (2) \\
 &\quad - \frac{G_s(s)}{1 + K_a K_{pos} G_c(s) G_{sol}(s) G_s(s)} F(s)
 \end{aligned}$$

식 (2)에서  $F(s)$  이외의 요소들은 비교적 간단한 계측 과정을 거쳐서 동정(identification)이 가능하다. 그러나,  $F(s)$ 를 정밀하게 예측하기란 매우 어렵다.  $F(s)$ 에 관한 식 (1)이 알려져 있지만, 이 식에 의존하여  $F(s)$ 를 정밀하게 예측하기란 매우 어려움을 제 4절에서 보일 것이다.

### 4. 시뮬레이션 및 실험

#### 4.1 대상 밸브 및 실험 장치

실험 대상 밸브는 B사의 스푼 위치 피드백형 비례 방향/유량제어밸브로서, 정격 유량 16 L/min(밸브 압력 강하  $2\Delta p = 10$  bar일 때), 최고 작동 압력이 315 bar인 밸브이다. Fig. 3에 대상 밸브 및 앰프의 사진을 나타낸다. Fig. 4는 이 밸브의 정상 상태 작동 특성을 실험하기 위하여 실험용 벤치에 밸브를 설치한 모습을 보인다.



- |                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $R(s)$ : Reference input          | $u$ : Control input               |
| $i$ : Solenoid current            | $F_{sol}$ : Solenoid force        |
| $F(s)$ : Disturbance              | $F_{in}$ : Applied force on spool |
| $X_s(s)$ : Output(Spool position) |                                   |

Fig. 2 Block diagram of the spool valve

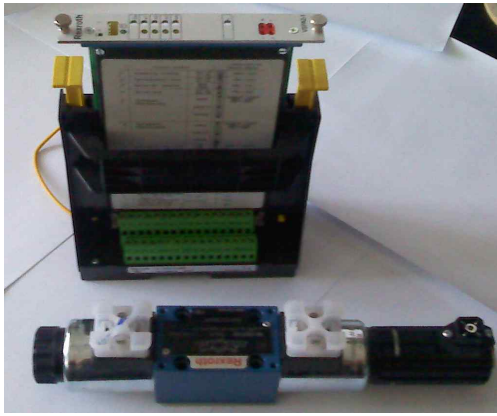


Fig. 3 The valve and amp. for test



Fig. 4 Test bench for experiment

4.2 밸브의 특성 시뮬레이션 모델

대상 밸브의 시뮬레이션 모델은 AMESim 소프트웨어를 사용하여 구성하였다(Fig. 5). Fig. 5에 포함된 비례 솔레노이드 요소는 예비 실험에서 얻어진 실험 데이터(Fig. 6)에 의하여 구현되었다. 제어기는 PI 제어기로 구현하였으며( $K_p = 6, K_i = 20$ ), 앰프 · 위치센서 · 입력필터의 게인들은 정수로 두었다.

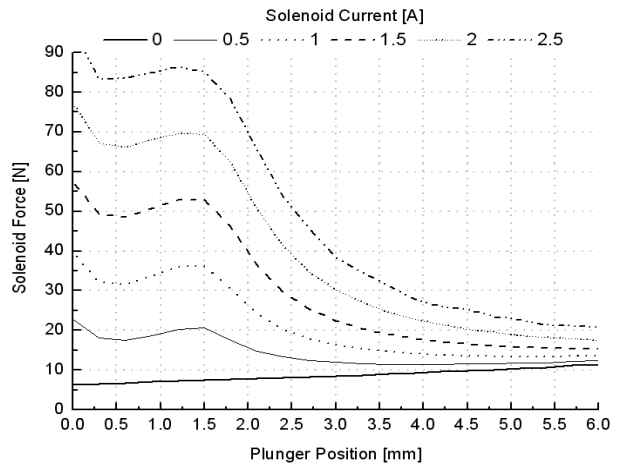


Fig. 6 Steady state characteristics of the proportional solenoid (hysteresis filtered)

4.3 정상 상태 특성 실험의 결과

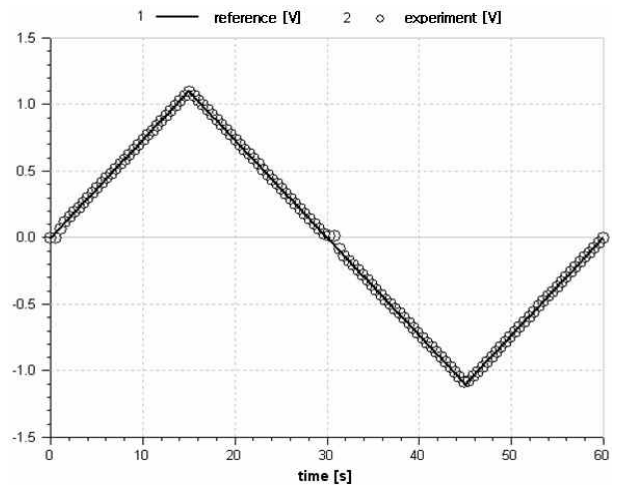


Fig. 7 Response of  $x_s(t)$  under ramp input ( $\Delta p = 100$  bar)

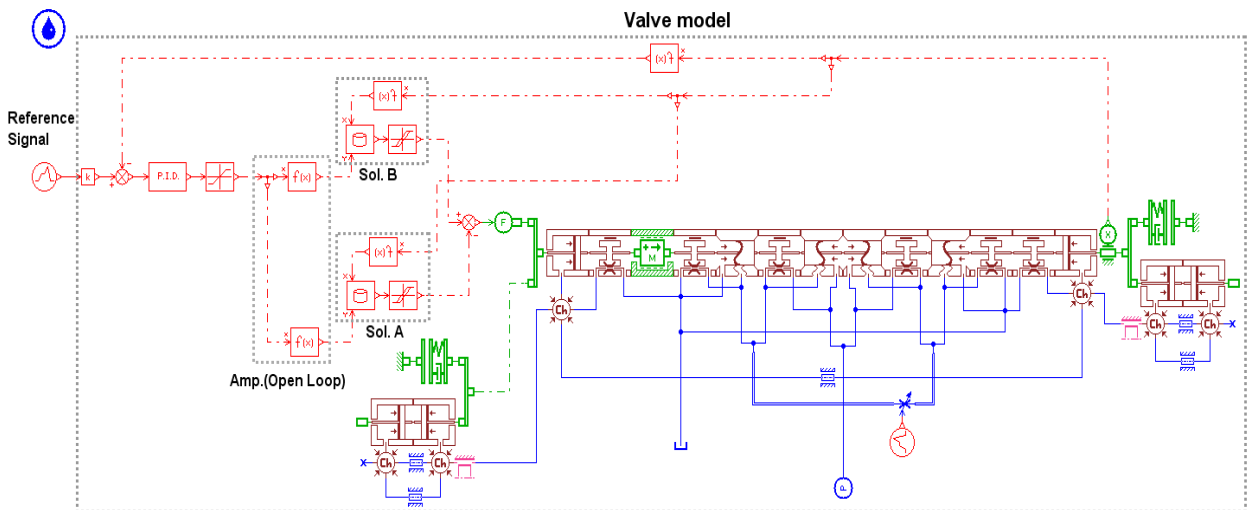


Fig. 5 Simulation model(AMESim based)

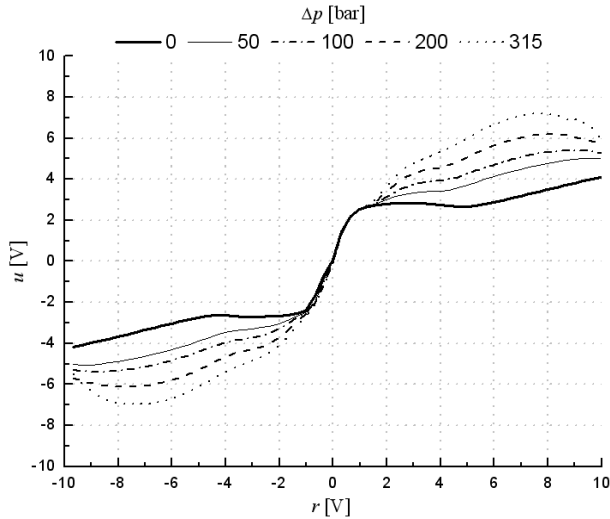


Fig. 8 Effect of  $\Delta p$  on  $u$  : experiment (hysteresis filtered)

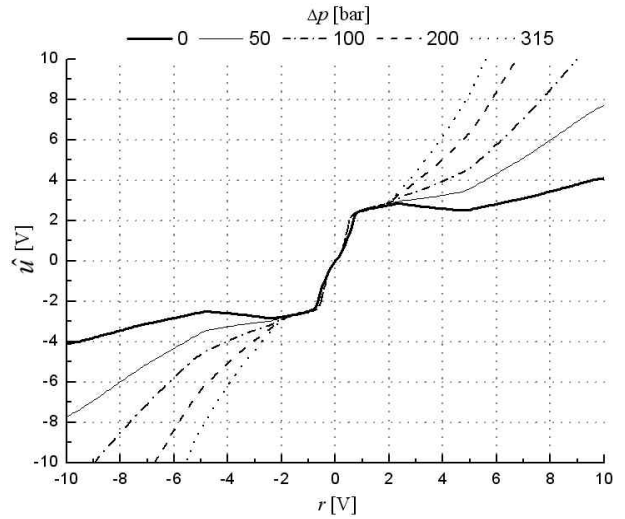
Fig. 7은 대상 밸브의 정상 상태 응답(비교적 긴 시간 동안의 램프 입력에 따른 스폴 변위 응답)을 보인다. 대상 밸브가 스폴 위치 피드백 제어 방식이며, 적분 제어 동작이 이루어지므로  $x_s(t)$ 의 응답은 기준 입력  $r(t)$ 를 잘 추종함을 알 수 있다. Fig. 5의 시뮬레이션 모델을 사용한 수치 계산에서도  $\Delta p$  값에 상관없이 Fig. 7과 거의 동일한 결과들이 얻어졌다.

Fig. 8은 Fig. 7과 같은 형태로 스폴이 움직이도록 밸브를 구동할 때 실험에서 얻어진 제어 입력  $u(t)$ 의 변화를 보인다.  $\Delta p$ 의 값이 높은 수치일수록  $u$  값이 증가하는 것은 스폴에 작용하는 정상 유동력의 차이에 기인한 것이다.

Fig. 9는 Fig. 5의 시뮬레이션 모델에  $F_s$ 의 계산을 위하여 식 (1)을 적용한 경우의 계산 결과를 보인다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교해볼 때, 동일한  $r(t)$ 와  $\Delta p$  조건에서의  $u$ 와  $\hat{u}$  사이에 큰 차이가 있으며,  $r$ 의 증가에 따른  $u$ (또는  $\hat{u}$ ) 증가의 패턴에도 큰 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 10은  $\Delta p = 0$  bar, 즉 유체의 흐름이 없을 때의  $u$ 와  $\hat{u}$ 를 비교한 것으로, 이들은 기준 입력  $r$ 의 전 범위에 걸쳐서 비교적 정확하게 일치한다. 이로부터, Fig. 5의 시뮬레이션 모델은 외란(유동력)이 가해지지 않는 영역에서는 실제 밸브의 거동을 비교적 정밀하게 모의할 수 있는 모델임을 알 수 있다.

### 5. 스폴 밸브에서 정상 유동력 추정법의 제안

이 연구에서 제안하는 정상 유동력 추정의 알고리즘을 블록 선도 형태로 Fig. 11에 나타내었다.



$$*F_s = -4C_d A(\hat{x}_s) \Delta \hat{p} \cos \phi$$

Fig. 9 Effect of  $\Delta p$  on  $\hat{u}$  : simulation using Eq. (1) with  $C_d = 0.7$ ,  $\phi = 69^\circ$

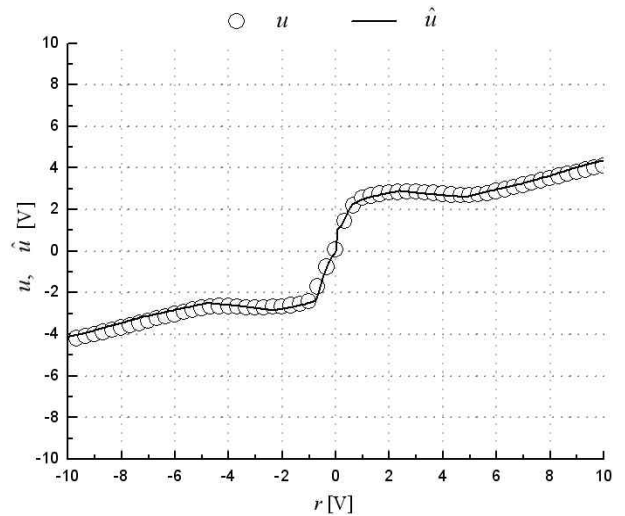


Fig. 10 Comparison of  $u$  and  $\hat{u}$  (under  $\Delta p = 0$ )

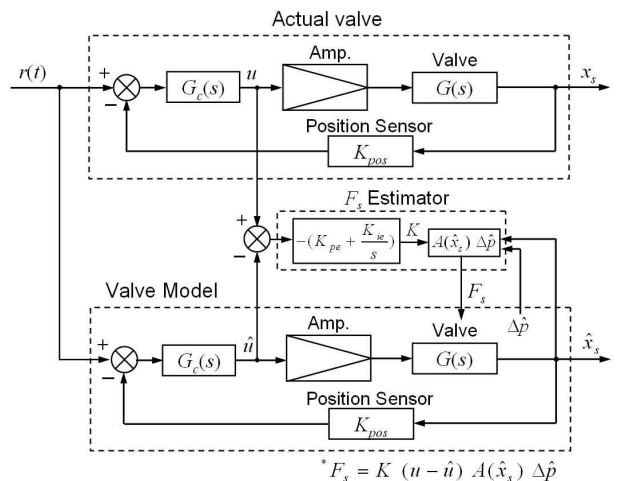


Fig. 11 Block diagram to estimate steady state flow force

Fig. 11의 ' $F_s$  Estimator'는 정상 유동력의 추정을 위하여 실제 밸브와 밸브 모델 사이에 추가된 요소로서 제어 입력  $u$ 와  $\hat{u}$ 의 오차로부터 정상 유동력  $F_s$ 를 추정하는 역할을 한다. 밸브 모델에는 식 (1)의 정상 유동력을 대신하여 ' $F_s$  Estimator'로부터 추정된 아래 식 (3)의 외란  $F_s$ 을 고려한다.

$$F_s = K A(\hat{x}_s) \Delta \hat{p} \quad (3)$$

여기서  $\hat{x}_s$ ,  $\Delta \hat{p}$ 는 각각  $x_s$ ,  $\Delta p$ 의 이론 계산치이고  $K$ 는 이 연구에서 정상 유동력의 추정을 위하여 고려한 계수이며, 아래 식 (4)와 같다.

$$K = -\left(K_{pe} + \frac{K_{ie}}{s}\right)(u - \hat{u}) \quad (4)$$

여기서  $K_{pe}$ 와  $K_{ie}$ 는 비례게인과 적분게인을 나타낸다.

### 6. 정상 유동력 추정기가 포함된 시뮬레이션 모델의 특성

Fig. 11의 블록 선도를 AMESim에 기초한 시뮬레이션 모델로 구현한 것이 Fig. 12이다. Fig. 12에는 일정한  $\Delta p$ 에 따른  $r$ 과  $u$  사이의 관계(Fig. 8의 데이터)를 데이터 파일로 반영하고 있다.

Fig. 13에 제어입력  $u$ 와  $\hat{u}$ 의 시뮬레이션 결과를

나타내었다. Fig. 8과 Fig. 9에서는 밸브 압력차  $\Delta p = 0$ 일 때를 제외하고는  $u$ 와  $\hat{u}$ 가 서로 다른 양상을 보이는데 반해 Fig. 13에서는 어떤  $\Delta p$ 값에서도  $\hat{u}$ 가 비교적 정확하게  $u$ 를 모의함을 확인할 수 있다. 이로부터 실제 밸브에서의 정상 유동력을 정확하게 추정하였음을 확인할 수 있다.

Fig. 13을 사용한 계산에서 구해진 정상 유동력과 스프링력을 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15에서 각  $\Delta p$ 에서의  $F_s$ 와 스프링력을 합한 것이 스톨 구동에 필요한 힘이며, 이는  $u$ 의 변화와 비슷한 양상을 보이게 된다.

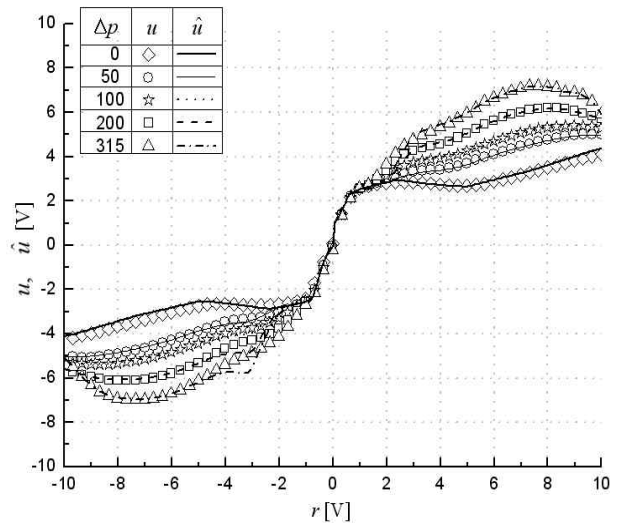


Fig. 13  $u$  and  $\hat{u}$  under various  $\Delta p$  : experiment & simulation (hysteresis filtered)

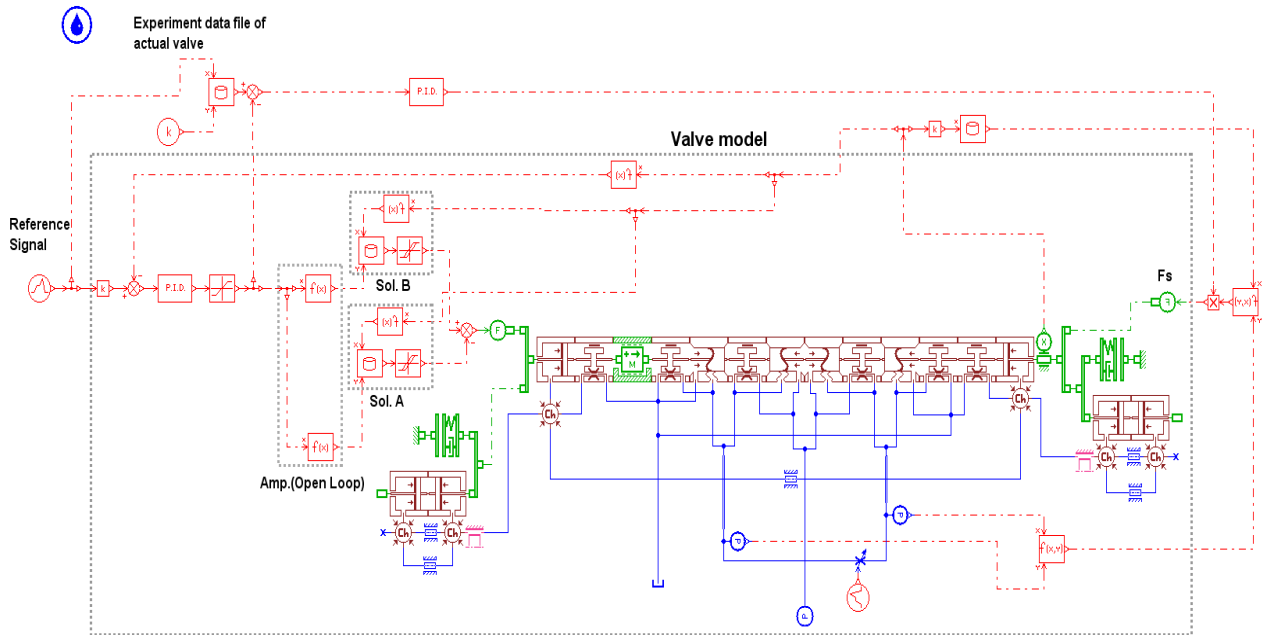


Fig. 12 Simulation model including the steady state flow force estimator

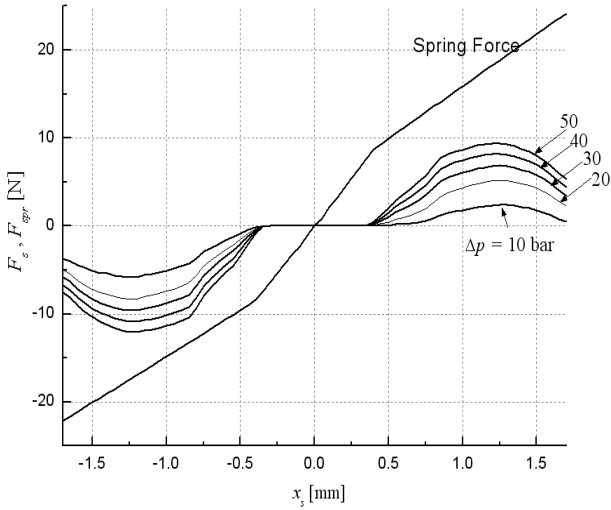


Fig. 14 Estimated  $F_s$  under various  $\Delta p$ , and spring force

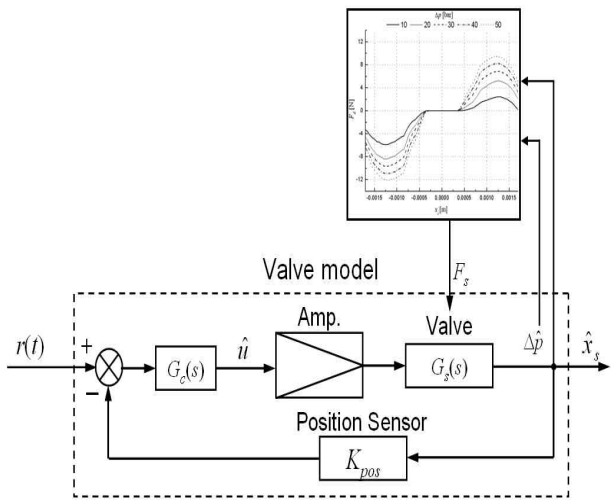


Fig. 15 Block diagram of the spool valve including the  $F_s$  data file

Fig. 12의 시뮬레이션 모델을 사용하여 Fig. 13과 같은 계산 결과를 얻는 과정에서  $\Delta \hat{p}$  값이 일정(10, 20, ..., 315 bar)할 때에  $\hat{x}_s$ 의 변화에 따른  $F_s$ 의 데이터가 얻어진다. 이러한  $F_s$  데이터의 집합체를 사용하여 Fig. 15와 같은 구조의 시뮬레이션 프로그램 (Fig. 16)을 만들었다. 여기서 사용되는  $F_s$ 의 데이터 파일은 독립 변수의 미세한 변화에 대응하는 종속 변수 값을 생성해주는 보간 기능이 있다. Fig. 16의 시뮬레이션 모델을 사용함으로써  $\hat{x}_s$  및  $\Delta \hat{p}$ 의 값에 대응하는  $F_s$  값을 정확하게 반영한 밸브의 특성 시뮬레이션 결과(예: Fig. 13)를 얻을 수 있음을 확인하였다.

7. 결론

스플형 비례 방향/유량제어밸브의 시뮬레이션 모델을 작성함에 있어서 최대의 난관은 스펴에 작용하는 유체의 유동력을 모델에 정확하게 반영하는 문제이다.

이 논문에서는 스펴의 위치가 페루프 제어되는 비례 방향/유량제어밸브에서 정상 유동력을 정확하게 추정해내는 기법을 제안하였다. 제안한 유동력 추정 기법은 실제 밸브 제어 시의 제어 입력( $u$ )과 시뮬레이션 모델에서 얻어지는 제어 입력( $\hat{u}$ )을 비교하고,  $u$ 와  $\hat{u}$ 의 편차가 0가 되도록 하는 제어 루프를 가동함으로써 정상 유동력을 정확하게 추정할 수 있게 하는 기법이다.

제안한 정상 유동력 추정기를 사용함으로써 스펴에 작용하는 정상 유동력을 비교적 간편하면서도 매

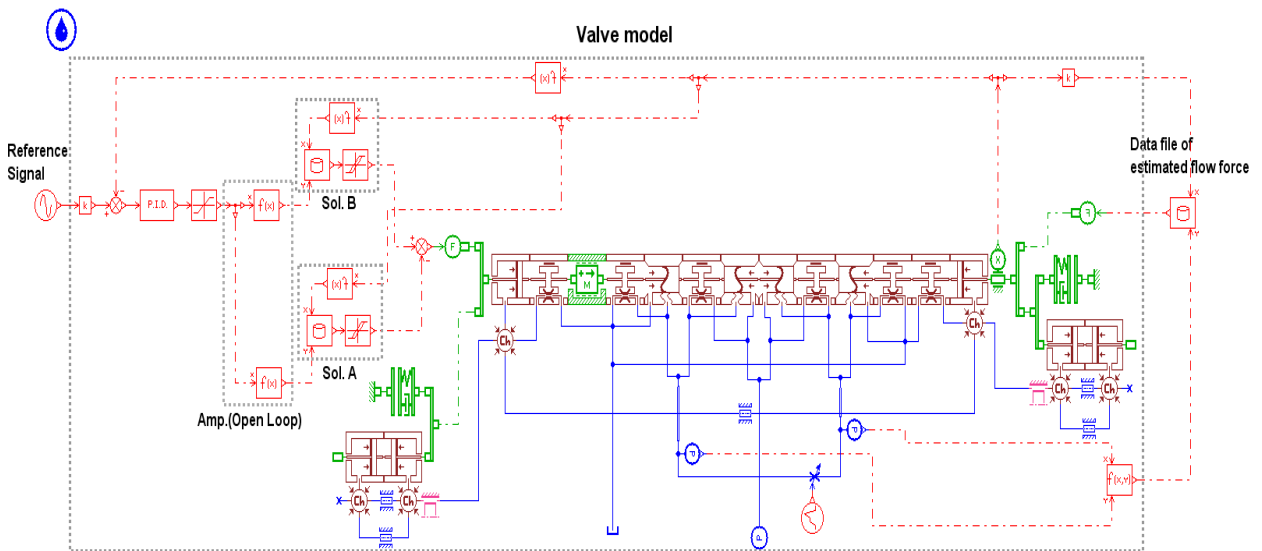


Fig. 16 Simulation model including the  $F_s$  data file

우 정밀하게 구할 수 있음을 확인하였다.

정상 유동력 추정기를 포함하는 시뮬레이션 프로그램을 구동시켜서, 스푼 위치( $x_s$ ) 및 압력차( $\Delta p$ )의 변화에 따른 정상 유동력( $F_s$ )의 데이터 파일을 밸브의 시뮬레이션 모델에 적용함으로써, 정상 유동력 발생 기구를 정확하게 반영한 밸브 시뮬레이션 프로그램을 완성할 수 있었다.

### 참고 문헌

- 1) S. Y. Lee and J. F. Blackburn, "Contribution to Hydraulic Control 1. Steady State Axial Forces on Control-Valve Pistons", Trans. ASME, Vol. 74, 1005/1011, 1952.
- 2) Takenaka, T. and e. Urata, "Oil Hydraulics", Yogendo, Tokyo, 1970.
- 3) Herbert E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc. pp. 101 ~ 105, 1967.
- 4) M. Guo and K. Nakano, "Numerical Analysis for the Flow in a Spool Valve by a Boundary Element Method(1st, 2nd Report)", JFPS, Vol. 20, No. 6, 1989.

1) S. Y. Lee and J. F. Blackburn, "Contribution to Hydraulic Control 1. Steady State Axial Forces