

# 시스템 식별을 이용한 비례솔레노이드밸브 위치제어기 설계

## Design of Position Controller for Proportional Solenoid Valve Using System Identification

정 규 흥  
G. H. Jung

**Key Words** : Proportional Solenoid Valve(비례솔레노이드밸브), Two-Stage Valve(2단 밸브), PWM(펄스폭변조), System Identification(시스템식별), Position Control(위치제어)

**Abstract:** As the analysis and design technologies for electro-magnetic actuation has advanced over the years, proportional solenoid valve is gaining acceptance in wide range of industrial and commercial applications because of its superior characteristics over the conventional AOV or MOV, such as improved performance, reduced maintenance costs. This research deals with the position controller design of two-stage flow control solenoid valve. Investigation of steady-state characteristics and dynamic model identification for pilot disc is performed. Least square method to minimize the error magnitude of frequency response between the closed-loop and target system is applied to the design of PI-controller gains. From the experiments of step and frequency response, it is concluded that the controller meets the performance specification of target system, which verifies the usefulness of controller design method for proportional solenoid valve.

### 기호 설명

$x_v, x_m$ : 파일럿 디스크, 메인 디스크 변위  
 $p_s, p_d$ : 제어밸브 입구, 출구 압력  
 $p_c$ : 파일럿 디스크 제어압  
 $i_{ref}$ : 전류제어기 기준입력  
 $i_{sol}$ : 솔레노이드 전류  
 $s$ : 라플라스 연산자(Laplace operator)  
 $G(s) = X_v(s)/I_{ref}(s)$ : 개루프 전달함수  
 $G_c(s) = X_v(s)/X_{vRef}(s)$ : 폐루프 전달함수  
 $k_{pi}$ : 전류제어기 비례이득  
 $k_{px}, k_{ix}$ : 위치제어기 비례, 적분이득

### 1. 서 론

솔레노이드 코일에 흐르는 전류에 의하여 발생되

는 전자기력(electromagnetic force)을 이용해서 밸브를 작동시키는 비례제어밸브는 솔레노이드의 설계 및 제작기술이 발전함에 따라 작동성능이 향상되어 방향, 압력, 유량제어 등의 다양한 응용분야에 적용이 확대되고 있다. 화학공장, 화력 및 원자력발전소, 정유공장 등의 공정제어에서는 전기적인 작동 지령신호로 고압 대용량의 유체흐름을 조절하는 기능의 밸브가 필수적이며 대용량 밸브는 유체가 통과할 때 밸브에 작용하는 외력을 보상하기 위하여 파일럿 방식으로 설계된다. 파일럿 밸브 작동방식의 대표적인 형태는 공기 압력을 이용하는 공압작동밸브(air-operated valve)와 전기모터를 이용하는 모터작동밸브(motor-operated valve)이다. 그러나 공압실린더, 또는 전기모터를 이용하는 경우에는 밸브 외부에 설치된 액추에이터가 파일럿 밸브를 구동하므로 밸브작동의 응답속도 및 정밀도, 작동신뢰성 등이 만족스럽지 못하고 패키징에서 발생하는 누설을 방지하기 위하여 주기적인 보수가 필요한 단점이 있다.

비례솔레노이드밸브는 솔레노이드가 밸브에 내장되므로 외부와 연결되는 액추에이터가 없어 패키징이 필요 없는 밀봉된 설계와 구동부의 소형화 설계가

접수일 : 2010년 8월 16일  
수정일(1차) : 2010년 9월 14일  
게재확정일 : 2010년 9월 17일  
정규흥(책임저자): 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과  
E-mail: ghjung@daejin.ac.kr, Tel: 031-539-1974

가능하다는 구조적인 특징 외에 동적 작동성능이 우수하고 사용시간에 따른 성능저하가 상대적으로 작으므로 유지보수비용이 절감되는 장점이 있다. 특히 비례솔레노이드밸브의 위치제어기(positioner)는 파일럿 밸브 변위를 선형변위계로 측정하여 피드백함으로써 밸브의 빠른 응답성과 히스테리시스(hysteresis)가 거의 없는 정밀한 위치제어가 가능할 뿐만 아니라 디지털 방식의 전자제어를 통하여 전원, 센서, 솔레노이드 코일 등의 단선과 단락 등을 검출하는 자기진단기능과 디지털 통신을 이용한 원격제어 및 모니터링 기능이 구현된 스마트밸브로 개발되고 있다.<sup>1,2)</sup>

본 연구에서는 대용량 유량제어에 적용되는 비례솔레노이드밸브를 대상으로 밸브변위를 제어하는 기능의 위치제어기를 산업계에서 일반적으로 사용되는 비례적분제어기로 설계하였다. 이를 위하여 연구대상 비례솔레노이드밸브의 작동원리와 전류특성을 고찰하였고 제어기 설계를 위한 동적모델은 시스템 식별을 이용하였다. 제어기 이득은 식별된 모델과 비례적분제어기로 구성되는 폐루프 제어시스템의 주파수응답이 목표사양에 근접하도록 선정하였으며 위치제어시험을 통하여 제어성능을 검증함으로써 설계방법의 타당성을 입증하였다.

## 2. 비례솔레노이드밸브

### 2.1 내부구조

Fig. 1은 유량제어기능의 상시개방형(normally open type) 비례솔레노이드밸브의 내부구조를 나타낸다. 입구에서 출구로 흐르는 유량( $Q$ )은 메인 디스크 변위( $x_m$ )에 의하여 형성되는 유로단면적으로 조절되고, 메인 디스크는 파일럿 디스크에 대한 상대변위에 따라 형성되는 제어압( $p_c$ )에 의하여 구동력이 변화됨으로써 항상 파일럿 디스크와 일정한 변위 차를 유지하도록 설계된 자력제어시스템(self-controlled system)이다.

메인 디스크 구동력을 발생시키는 제어압은 파일럿 디스크 양단에 동일하게 작용하므로 상쇄되고, 고정자 코일에 흐르는 전류에 비례하는 전자기력과 스프링 압축력이 평형을 이루는 상태에서 파일럿 디스크 변위가 결정된다. 따라서 고압의 유체가 흐를 때 발생하는 유체력(flow force)은 메인 디스크에만 작용하고 메인 디스크는 파일럿 디스크와 일정한 변위 차를 유지하는 자력제어시스템에 의하여

파일럿 디스크 변위를 추종하므로 상대적으로 작은 전자기력만으로 파일럿 디스크 변위를 제어함으로써 대용량의 유량제어가 가능한 2단 밸브의 구조를 갖는다. 연구대상 비례솔레노이드밸브 위치제어기는 파일럿 디스크와 연결된 선형변위계 출력이 기준입력을 추종하도록 고정자 코일에 흐르는 전류를 조절하는 기능을 갖는다.

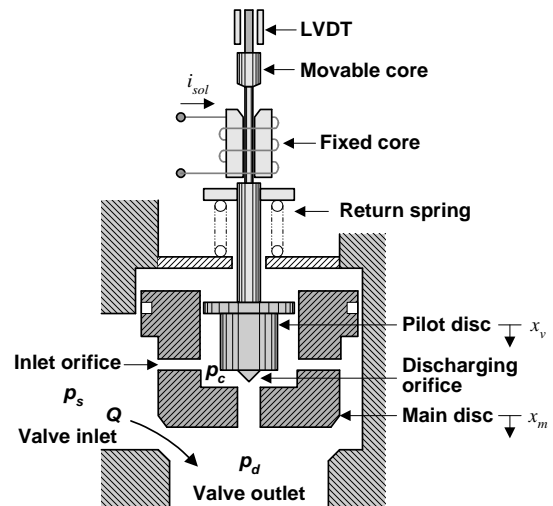


Fig. 1 Proportional flow control solenoid valve

### 2.2 설계방식

Fig. 1의 비례솔레노이드밸브는 코일전류가 흐르지 않는 상태에서의 밸브위치(상시 폐쇄형, 상시 개방형)와 고정자와 가동자 사이에 발생하는 자기력의 형태(푸시형, 풀형)에 따라 4가지 형태의 조합으로 설계될 수 있다. 상시 밸브위치는 유량제어밸브가 적용되는 시스템의 요구사양에 의하여 결정되고 스프링력과 자기력의 방향만이 반대이므로 작동성능이 동일하다. 풀형에 비하여 고정자에 대하여 미는 방향으로 전자기력이 발생하는 푸시형 솔레노이드는 가동자 변위에 비례하여 공극(air)이 증가하므로

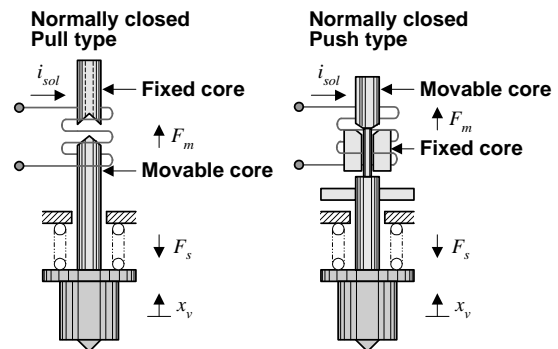


Fig. 2 Design layout of flow control valve

로 동일한 코일전류에 대하여 발생하는 자기력이 가동자 변위가 증가할수록 감소되는 특성을 갖는다. 스프링력은 항상 가동자 변위에 비례하므로 푸시형의 경우에는 가동자 이동변위가 클수록 큰 코일전류가 요구되고 이에 따라 소모전력이 증가하므로 풀형 솔레노이드가 일반적으로 사용되고 있다. Fig. 2는 풀형과 푸시형 솔레노이드가 적용된 상시 폐쇄형 비례솔레노이드밸브의 구조를 나타낸다.

### 2.3 전류특성

정상상태에서 2단 비례솔레노이드밸브의 파일럿 디스크 변위는 고정자 코일에 흐르는 전류에 비례하여 증가하며 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 코일전류  $(i_{sol})_{min}$ 는 파일럿 디스크 변위가 발생하는 최소전류로 불감대를 나타내고 스프링 초기압축력이 증가할수록  $(i_{sol})_{min}$ 은 커지게 된다.  $(i_{sol})_{max}$ 은 파일럿 디스크가 최대변위에 도달하는 시점에서의 코일전류로 스프링 상수에 따라 결정되고 이보다 큰 전류가 인가되어도 파일럿 디스크는 기계적 구속에 의하여 최대변위를 유지한다. 파일럿 디스크는  $(i_{sol})_{min}$ 에서  $(i_{sol})_{max}$  사이의 전류에 대해서만 변화되므로 유효전류영역에 해당된다.  $(i_{sol})_{limit}$ 은 구동전압과 솔레노이드 코일저항에 의하여 결정되는 임계전류로  $(i_{sol})_{max}$ 에서  $(i_{sol})_{limit}$ 의 구간은 포화전류영역으로 구분된다. 이와 같은 전류특성은 전자기력과 스프링 특성뿐만 아니라 파일럿 디스크에 작용하는 마찰력과 외력, 고정자 코일에 흐르는 전류에 의하여 상승하는 코일온도에 따라 변화되므로 일정하지 않으며 유효전류영역은 히스테리시스(hysteresis) 특성으로 인하여 작동방향에 따라 다르게 나타난다.<sup>3)</sup>

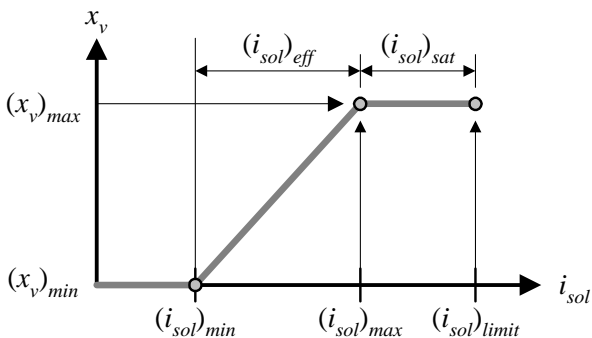


Fig. 3 Pilot disc displacement vs. coil current

## 3. 비례솔레노이드밸브 특성시험

### 3.1 비례솔레노이드밸브 및 제어기사양

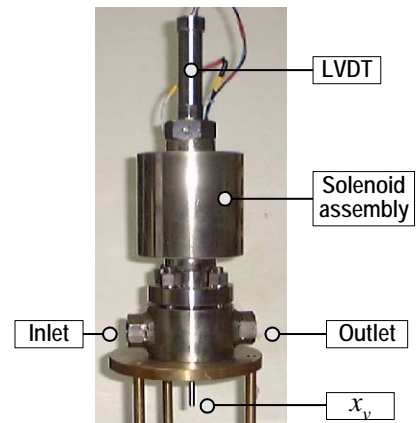
Fig. 4는 시험에 사용된 비례솔레노이드밸브와 제어기를 보여 주요 특성은 다음과 같다.

#### (1) 비례솔레노이드밸브

- 소모전력: 60W
- 구동전압: DC 125V
- 코일저항: 256Ω
- 파일럿 디스크 이동변위: 3mm

#### (2) 제어기

- 마이크로 컨트롤러: ATmega128
- 샘플링 시간: 200Hz
- A/D변환 분해능: 10bit
- PWM 듀티율 분해능: 0.1%
- PWM 반송주파수: 0.3k-16kHz



(a) proportional solenoid valve



(b) servo-controller

Fig. 4 Proportional solenoid valve control system

### 3.2 정특성 시험

파일럿 디스크는 고정자 코일전류에 비례하여 변위가 발생하며 디지털 방식으로 설계된 Fig. 4(b)

제어기는 전력트랜지스터를 PWM 방식으로 구동하여 전류를 제어한다. PWM 구동은 고속 스위칭방식으로 전류를 조절하는데 구동대상 시스템의 전기적 특성과 스위칭 주파수(또는, 반송주파수)에 따라 제어성능이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 PWM 반송주파수에 따른 비례솔레노이드밸브의 개루프 특성을 살펴보기 위하여 0.5k, 1k, 2k, 5kHz PWM 반송주파수에 대하여 PWM 듀티율을 0%에서 60%까지 0.01Hz의 램프형태로 서서히 변화시키면서 코일전류에 대한 파일럿 디스크변위의 정특성을 파악하였다. 정특성시험결과는 Fig. 5와 같으며 선형변위계로 측정되는 파일럿 디스크 변위 출력전압은 최소 0.5V, 최대 4.5V로 보정된 결과이다. 모든 경우에 있어서 전류-변위특성이 유사하였으므로 PWM 반송주파수에 의한 영향은 없다고 판단된다. 파일럿 디스크 변위가 발생하는 최소전류는 30mA 이고 191mA에서 최대변위에 도달함을 확인하였다. 30-191mA의 유효전류영역에서 발생하는 히스테리시스 측정결과는 다음과 같다.

- 입력 히스테리시스: 9mA로 일정
- 출력 히스테리시스: 48mA에서 0.122V이고 179mA에서 0.548V이다.

유효전류영역에서 출력 히스테리시스가 다른 이유는 전류가 클수록 고정자와 가동자 사이의 공극이 작아지므로 전자기력이 증가하여 전류입력에 대한 파일럿 디스크 변위의 개루프 이득이 크기 때문이다. 이와 같은 정특성 시험을 통하여 제어 대상 비례솔레노이드밸브에는 히스테리시스뿐만 아니라 개루프 이득도 작동점에 따라 변화되는 비선형성이 존재함을 알 수 있다.

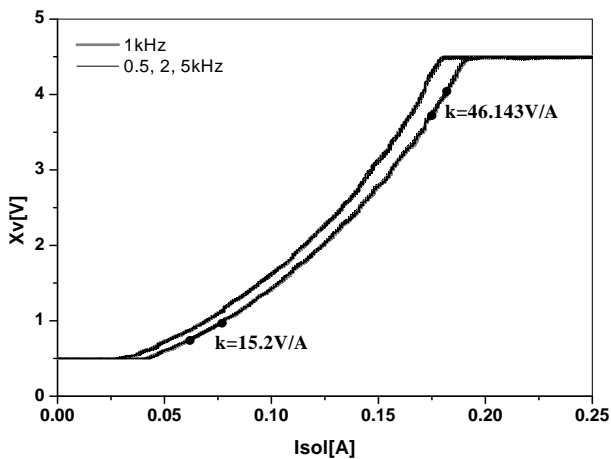
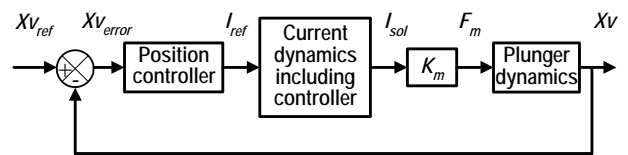


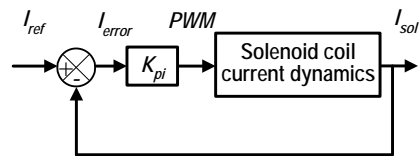
Fig. 5 Steady state pilot disc displacement

### 3.3 전류제어기 이득선정

Fig. 6은 파일럿 디스크 변위를 제어하는 폐루프 시스템의 블록선도를 나타낸다. 위치제어기는 변위 오차로부터 기준전류신호를 연산하고 코일전류는 전류제어기와 RL-회로로 기술되는 코일 동특성에 의하여 발생된다. 가동자에 작용하는 전자기력은 고정자 코일에 흐르는 전류에 비례하여 발생되므로 전류제어기는 코일온도에 따른 저항변화를 보상하고 전류동특성을 향상시키는 기능을 갖는다. 전류제어는 변위를 제어하기 위한 내부루프이므로 전류제어의 정상상태오차는 위치제어성능에 영향을 미치지 않으므로 본 연구에서는 단순비례제어기로 설계하였으며 비례이득  $k_{pi}$ 은 계단입력응답으로부터 선정하였다.



(a) overall system



(b) current control loop

Fig. 6 Control system block diagram

Fig. 7은 PWM 반송주파수를 1kHz로 설정한 상태에서 4종류의 전류제어기 비례이득에 대하여 기준전류를 계단형태로 100mA 변화시키는 시험에 대한 응답을 나타내고 Table 1은 요약된 시험결과이다. 정상상태오차로 인하여 비례이득이 증가할수록 파일럿 디스크 변위의 작동점이 증가하여  $k_{pi}$ 가 0.3과 0.4인 경우에는 유효전류영역을 벗어나게 되고 이 경우에는 계단입력 기준전류를 낮추어 시험하였다. Fig. 7에서 코일전류와 파일럿 디스크 변위는 작동점으로부터의 변화량이고 이동방향에 따른 응답을 비교하기 위하여 기준전류 하강 시의 응답은 정상상태 작동점을 기준으로 반전시켜 나타내었다. 비례이득이 0.3이상인 경우에는 제어전류의 정상상태 오차가 작아지지만 전류응답에 오버슈트가 발생하고 이동방향에 따른 디스크 변위 응답에 다소 큰 차이가 나타나므로 안정적인 작동을 위해서 전류제

여기의 비레이득은 0.1과 0.2로 선정하였다. 비레이득이 0.1인 경우에는 전류와 파일럿 디스크변위 과감쇠(overdamping)이고, 0.2인 경우에는 부족감쇠(underdamping) 특성을 나타냄을 Fig. 7로부터 알 수 있다.

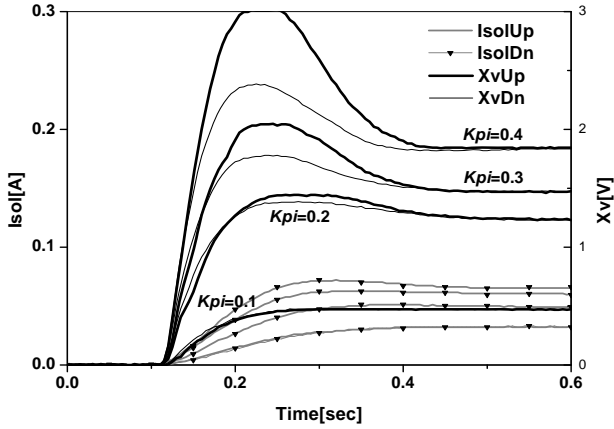


Fig. 7 Current controller step response

Table 1 Summary of current step response

Kpi [%/mA]	Iref [mA]	Isol [mA]	$\Delta$ Isol [mA]
		Xv [V]	$\Delta$ Xv [V]
0.1	200↔300	50↔82	32
		0.719↔1.192	0.473
0.2	200↔300	87↔136	49
		1.258↔2.497	1.239
0.3	150↔250	79↔140	61
		1.144↔2.615	1.471
0.4	150↔250	92↔157	65
		1.381↔3.225	1.844

#### 4. 시스템 식별

파일럿 디스크 변위를 제어하는 페루프 제어를 설계하기 위한 동적기준모델은 시스템 식별을 통해서 구하였다. Fig. 6에서 전류제어기는 페루프 제어 시스템에서 내부루프를 구성하므로 제어기 설계를 위한 비례솔레노이드밸브 동적모델의 입력은 기준 전류이고 출력은 파일럿 디스크 변위이다. 이론적으로 완벽한 식별모델을 구하기 위해서는 동적시스템이 갖는 모든 고유모드를 가진시킬 수 있는 입력신호를 설계하고 이를 통해 얻어진 시험데이터를 이용해야 하지만 연구대상 비례솔레노이드밸브는 히

스테리시스와 작동점에 따라 개루프 이득이 변화되는 비선형성이 존재하고 대역폭이 높지 않은 기계적인 시스템이므로 계단응답 시험데이터만으로 제어기 설계를 위한 동특성 식별이 가능하다고 판단하였다. 본 연구에서는 전류제어기 이득선정에서 얻어진 계단응답을 이용하여 기준전류에 대한 파일럿 디스크 변위의 전달함수를 다음과 같은 1차와 2차 시스템으로 식별하였다.<sup>4)</sup>

$$G_1(s) = \frac{K}{1 + T_s s}$$

$$G_2(s) = \frac{K\omega_{n2}^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2}$$

상기 식별모델에서 개루프 이득  $K$ 는 기준전류입력에 대한 파일럿 디스크의 정상상태 변위를 나타내므로  $G_1(s)$ 와  $G_2(s)$ 가 동일하다. 1차 시스템 식별모델에서는 시정수  $T_s$ , 2차 시스템에서는 감쇠비  $\zeta_2$ 와 고유진동수  $\omega_{n2}$ 에 대하여 최소오차자승법을 이용하여 다음 오차함수가 최소화되는 파라미터를 식별하였다.

$$E = \sum_{i=1}^n \{x_v(i) - x_m(i)\}^2$$

$n$ : 계단응답 샘플 데이터수

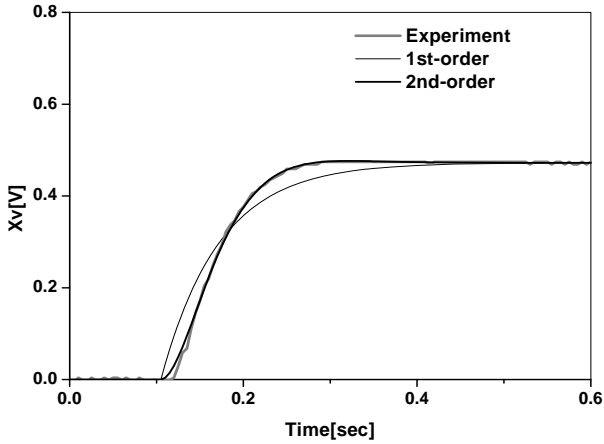
$x_v(i)$ : 시험 계단응답 데이터

$x_m(i)$ : 모델 계단응답 데이터

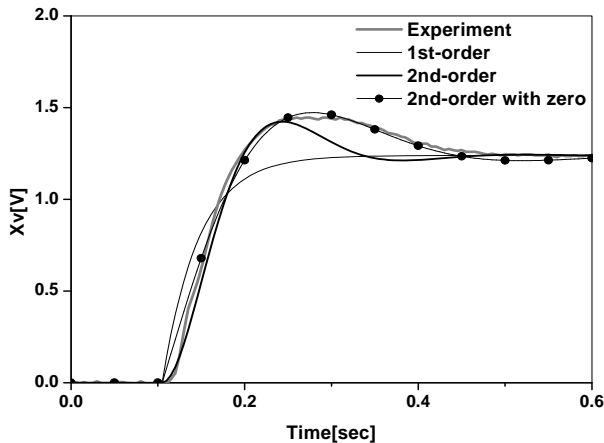
Table 2는 1차와 2차 시스템으로 가정된 식별모델에 대하여 구해진 파라미터를 나타낸다. Fig. 7은 계단응답에서 예상된 바와 같이 전류제어기 비레이득  $k_{pi}$ 가 0.1인 경우에는 임계감쇠에 근접하고 0.2인 경우에는 부족감쇠로 식별되었으며 계단입력 상승과 하강 시 응답이 유사하므로 식별된 결과에는 큰 차이가 없었다.  $k_{pi}$ 가 0.1인 임계감쇠응답으로부터 식별된 동특성모델은 시정수가 대략 60ms이고 고유진동수는 5Hz부근의 저주파영역임을 알 수 있다. Fig. 8은 계단응답 시험데이터와 식별된 모델의 계단응답을 비교한 결과이다.  $k_{pi}$ 가 0.1인 시험데이터로부터 식별된 2차 시스템의 응답은 시험결과와 매우 유사함을 알 수 있다.  $k_{pi}$ 가 0.2인 경우에는 부족감쇠로 식별된 2차 시스템의 과도응답이 시험데이터와 다소 큰 차이를 나타내었는데 이는 2차 식별모델이 일반적인 형태로 가정되지 않았기 때문이다. 식별된 모델의 과도응답 오차를 감소시키기 위해서

는 다음과 같이 영점이 포함된 일반적인 2차 시스템으로 가정하여야 하며 Fig. 8(b)에 영점을 갖는 2차 시스템으로 식별된 전달함수에 대한 계단응답을 나타내었다.

$$G_{2z}(s) = \frac{K(bs + \omega_{n2z}^2)}{s^2 + 2\zeta_{2z}\omega_{n2z}s + \omega_{n2z}^2}$$



(a)  $k_{pi} = 0.1\%/mA$



(b)  $k_{pi} = 0.2\%/mA$

Fig. 8 Identified system step response

Table 2 Identified system parameters

Exp. data		1st-order		2nd-order	
$k_{pi}$	$x_v$	$K$	$T_s$	$\zeta_2$	$\omega_{n2}$
0.1	up	4.73	0.067	0.837	26.48
	dn	4.72	0.061	0.927	31.46
0.2	up	12.39	0.042	0.519	26.56
	dn	12.33	0.039	0.616	32.91

## 5. 제어기 설계

시스템 식별을 통하여 구해진 전류제어기가 포함된 파일럿 디스크의 동적모델을 바탕으로 페루프 위치제어기로 설계된 비례적분제어기의 이득을 선정하였다. 미분제어를 포함시키는 경우에는 페루프 시스템의 설계자유도가 증가하지만 실제 시스템에서는 PWM 스위칭에 의해 선형변위계 출력신호에 잡음이 발생하므로 미분에 의한 성능저하를 방지하기 위하여 미분제어는 고려하지 않았다.

Fig. 9는 비례적분제어기와 식별모델로 구성되는 페루프 제어시스템의 블록선도이다. 식별모델이 1차 시스템인 경우에는 페루프 시스템의 특성다항식이 2차이므로  $k_{px}$ 와  $k_{pi}$ 를 이용한 극점배치설계가 가능하지만 영점이 추가되므로 2차 시스템의 표준응답과 다르게 나타나고 식별모델이 2차 시스템인 경우에는 3개의 극점을 갖는 고차시스템이므로 요구사양을 만족하는 이득선정이 다소 복잡해지게 된다. 본 연구에서는 비례솔레노이드밸브의 대역폭을 고려한 주파수영역 내에서 페루프 시스템의 주파수응답이 다음 식으로 정의되는 표준 2차 시스템의 목표사양에 근접하도록 최소오차자승법을 이용하여 비례, 적분이득을 설계하였다.

$$G_c(s) = \frac{X_v(s)}{X_{vRef}(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Table 3은 목표사양 2차 시스템이 임계감쇠이고 고유진동수가 20rad/sec일 때 1차와 2차 시스템으로 식별된 각 모델에 대하여 설계된 비례적분제어기이득을 나타낸다. 상승과 하강 계단응답에 대한 식별모델은 유사하므로 이득에 큰 차이를 나타내지 않았지만 전류제어기이득이 0.2인 경우에는 개루프 응답특성이 빠르므로 0.1이 적용되는 경우보다 비례 및 적분이득이 작게 설계되었다. Fig. 10은 전류제어기이득이 0.1이고 설계된 비례적분제어기를 적용한 페루프 시스템의 주파수응답과 계단응답을 나타내며, 2차 시스템의 식별모델을 대상으로 설계된 제어시스템의 응답이 식별모델이 1차인 경우보다 목표사양에 근접함을 알 수 있다.

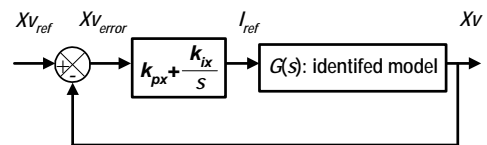
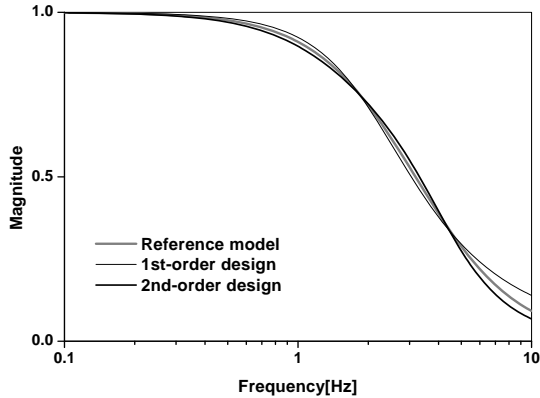


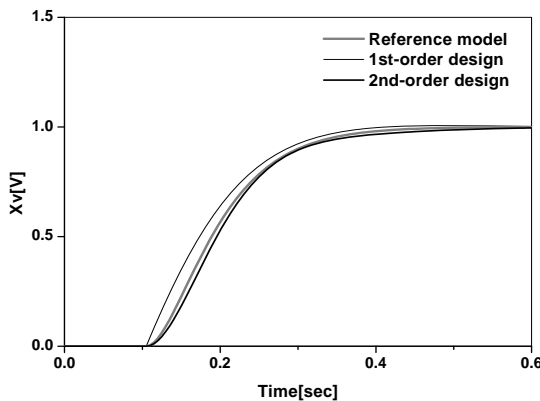
Fig. 9 Position controller in feedback loop

Table 3 Position controller gains

$k_{pi}$	$G(s)$	$x_v$	$k_{px}$ [A/V]	$k_{ix}$ [A/Vs]
0.1	$G_1(s)$	up	0.121	2.563
		dn	0.106	2.541
	$G_2(s)$	up	0.076	1.957
		dn	0.070	2.055
0.2	$G_1(s)$	up	0.022	0.929
		dn	0.019	0.924



(a) frequency response



(b) step response

Fig. 10 Closed-loop system response

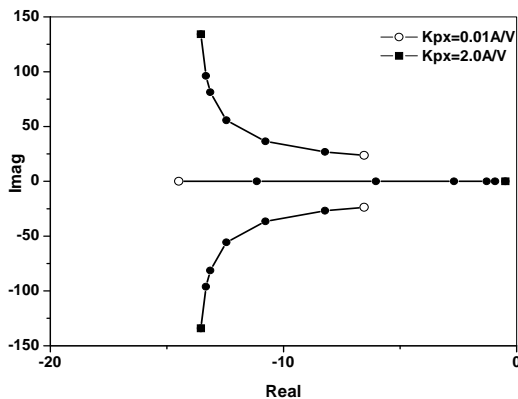


Fig. 11 Root locus for  $k_{px}$  at  $k_{ix} = 1.0 \text{ A/V sec}$

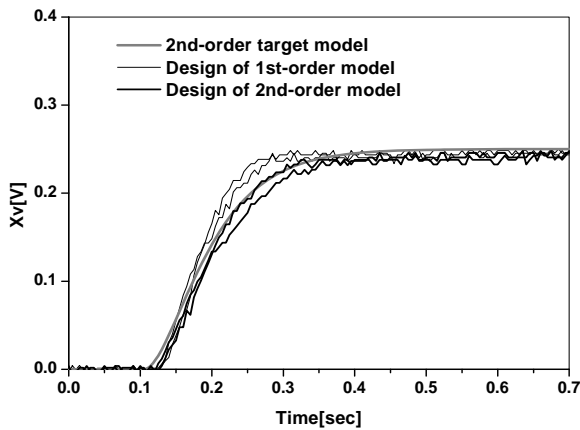
전류제어기 비례이득이 0.2이고 식별모델이 2차 시스템인 경우에는 목표사양을 만족시키는 비례적분이득을 찾을 수 없었다. 이는 비례적분제어의 한계로서 개루프 시스템의 응답이 부족감쇠인 경우에는 임계감쇠의 폐루프 시스템 설계가 곤란함을 의미한다.<sup>5,6)</sup>  $k_{ix} = 0$ 인 경우에 폐루프 시스템의 특성다항식은  $s^2 + 2\zeta_2\omega_{n2}s + (1 + k_{px}K)\omega_{n2}^2$ 이며  $k_{px}$ 가 증가할수록 감쇠비는 개루프 전달함수의 감쇠비  $\zeta_2 (< 1)$ 보다 작아지므로 모든  $k_{px}$ 에 대하여 임계감쇠 특성이 나타나지 않는다. Fig. 11은  $k_{ix} = 1$ 이고  $k_{px}$ 를 0.01-2.0A/V로 변화시키는 경우에 근궤적을 보여준다.  $k_{ix}$ 가 일정할 때  $k_{px}$ 가 증가할수록 실근은 허수축에 근접하므로 응답이 느려지고 복소수근의 감쇠비는 작아지므로 계단응답은 초기에 큰 진동이 발생하면서 정착시간이 길어지게 된다. 일반적으로 부족감쇠를 갖는 개루프 시스템의 비례적분제어는 비례이득이 증가할수록 감쇠비가 급격히 감소하면서 실근이 허수축에 근접하므로 응답이 느려지고 적분이득을 증가시키면 감쇠비는 완만히 작아지지만 실근이 허수축으로부터 멀어져 빠른 응답이 가능한 특성을 갖는다. 따라서 비례적분제어만으로는 폐루프 시스템의 감쇠비 증가가 곤란하며 이를 보완하기 위해서는 미분제어를 추가하여 감쇠를 증가시켜야 함을 알 수 있다. 본 연구에서는 위치제어기로 비례적분제어기만을 고려하였으므로 임계감쇠를 갖는 목표사양을 충족시키기 위하여 전류제어기 비례이득을 개루프 계단응답이 임계감쇠로 나타나는 0.1로 선정하였다.

### 6. 제어성능시험

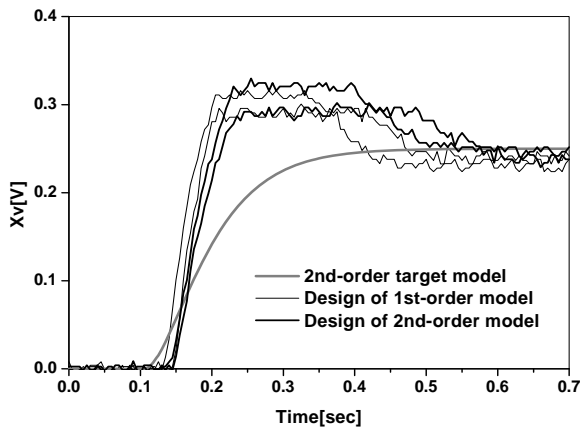
솔레노이드 코일전류에 대한 파일럿 디스크 변위의 동특성 식별모델을 이용하여 설계된 비례적분 위치제어기의 제어성능을 시험을 통하여 검증하였다. 검증대상은 전류제어기 비례이득이 0.1인 상승 계단입력응답을 1차와 2차로 식별한 모델에 대하여 설계된 제어이득이다.

Fig. 12(a)는 파일럿 디스크 변위의 기준입력신호를 0.75V에서 1.0V의 계단파형으로 인가하는 경우에 1차와 2차 식별모델을 기준으로 설계된 두 제어기의 상승 및 하강 계단입력 시험결과를 나타낸다. 두 제어기 모두 임계감쇠의 목표사양을 만족하였으나 2차 식별모델을 기준으로 설계된 제어기 응답이 1차의 경우보다 목표 전달함수의 계단응답에 근접함을 알

수 있다. Fig. 12(b)는 시스템 식별모델의 작동점을 벗어난 4.0V에서 4.25V의 계단과형에 대한 시험결과이다. 정특성 시험에서 분석된 바와 같이 파일럿 디스크 변위가 증가할수록 개루프 전달함수 이득이 증가하여 식별모델의 오차가 커지므로 목표사양에 비하여 다소 큰 오차를 갖는 응답을 나타내었다. 이와 같은 결과로부터 비례적분 위치제어기를 설계하는 경우에는 비례제어밸브의 작동점을 고려한 제어대상 모델의 식별이 중요함을 알 수 있다.



(a) from 0.75V to 1.0V step reference



(b) from 4V to 4.25V step reference

Fig. 12 Experimental step response

Fig. 13은 2차 식별모델로 설계된 위치제어기의 주파수응답 시험결과를 나타낸다. 주파수응답 시험의 가진주파수 범위는 제어기에 설계된 함수발생기의 설계범위인 0.01-2.5Hz이다. 식별모델의 작동점 근방에서는 시험결과가 목표 전달함수의 주파수 응답과 상당히 유사하므로 본 연구에서 수행된 모델 식별과 이를 이용한 제어이득 설계방법이 타당함을 확인하였다.

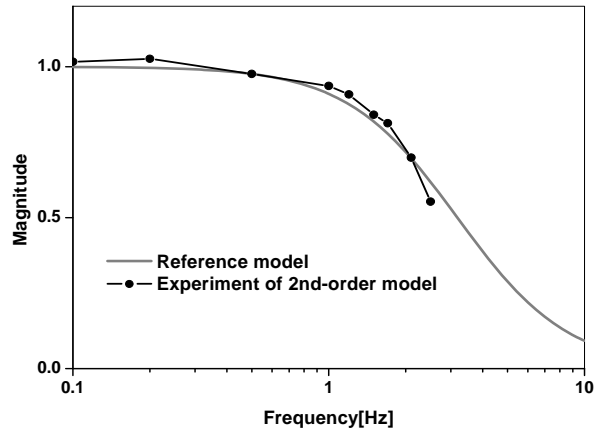


Fig. 13 Closed-loop system frequency response

## 7. 결 론

본 논문에서는 배관계통의 관로유량을 조절하는 목적으로 설계되는 비례솔레노이드밸브를 대상으로 유로단면적을 결정하는 파일럿 디스크의 동적제어 성능을 향상시키기 위하여 시스템 식별을 이용한 제어기 설계방법에 대하여 연구하였으며 수행된 연구내용과 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 대용량 유량제어 2단 밸브의 내부구조와 작동원리를 파악하고 설계방식과 고정자 코일에 흐르는 전류에 대한 파일럿 디스크 변위의 정특성을 분석하였다.

(2) 시험 제작된 밸브와 제어기를 이용하여 정적 변위특성과 동적 전류제어성능을 시험하였으며 이로부터 적절한 PWM 반송주파수와 전류제어기 비례이득을 선정하였다.

(3) 전류제어기가 포함된 비례솔레노이드밸브 개루프 시스템의 동적모델을 시스템 식별을 이용하여 도출하였으며 이를 바탕으로 목표 전달함수와 근접한 주파수응답특성을 나타내는 비례적분제어 이득을 설계하였다.

(4) 폐루프 제어시스템의 성능시험은 설계이론과 유사한 결과를 나타내었으므로 식별이론을 이용한 제어기 설계의 유용함을 입증하였으며 제어 대상시스템의 동적특성을 잘 반영하는 식별모델의 도출이 제어성능에 영향이 있음을 확인하였다. 비례적분제어기는 부족감쇠를 갖는 개루프 제어시스템의 성능향상에 한계가 있으며 작동점 변화에 따른 모델오차에 대해 견실하지 않으므로 엄격한 제어사양이 요구되는 경우에는 다른 형태의 제어기 설계기법을 적용하여야 한다.



## 후 기

이 논문은 2010학년도 대전대학교 학술연구비지원에 의한 것임.

## 참고문헌

- 1) Vito Liantonio, "High Pressure Modulating Solenoid Valve for Steam/Gas Service", InTech, pp.43-46, 1988.
- 2) Vito Liantonio, "Use of Electromagnetic Control Valves in Risk Significant Applications"
- 3) 정규홍, "대용량 비례유량제어밸브 정특성 분석", 유공압시스템학회 2009년도 추계학술대회 논문집, pp.67-72, 2009
- 4) 정규홍, 조백현, 이교일, "자동변속기용 펄스폭 변조 솔레노이드 밸브의 동특성 식별", 대한기계학회 논문집(A) 제21권 제10호, pp.1636-1647, 1997.
- 5) Karl Johan Astrom and Tore Hagglund, "Automatic Tuning of PID Controllers", Instrument Society of America, 1988.
- 6) John J. D'Azzo and Constantine H. Houpis, "Linear Control System Analysis and Design", McGraw-Hill, 1981.