

# 대용량 비례유량제어밸브 디지털 컨트롤러 개발 Development of Digital Type Controller for Proportional Flow Control Valve with Large Capacity

정규홍  
G. H. Jung

## 1. 서론

전자기력(electromagnetic force)을 이용해서 밸브를 작동시키는 비례제어밸브는 솔레노이드의 설계 및 제작기술 발전에 의해 작동성능이 향상되어 현재 유체의 압력 및 유량제어뿐만 아니라 각종 액추에이터 위치제어시스템과 같은 다양한 산업분야에 활용되고 있다.

대용량 유량제어밸브는 배관에 직접 연결되어 유량, 압력, 온도등과 같은 배관계통내의 공정량을 제어하는 역할을 담당한다. 전자기력을 이용하여 밸브를 구동하는 비례제어밸브는 공기압력으로 작동되는 공압작동밸브(air-operated valve)나 모터로 작동되는 모터작동밸브(motor-operated valve)에 비하여 외부와 연결되는 액추에이터가 없고 구동부의 소형화 설계가 가능하다는 구조적인 특징 외에 동적 작동성능이 우수하고 사용시간에 따른 성능저하가 상대적으로 작으므로 유지보수비용이 절감되는 장점으로 인하여 긴급급수밸브 등과 같이 위급한 상황에서 작동되어야 하는 분야에 점차 적용이 확대되고 있다.

그림 1은 본고에서 개발대상으로 하는 대용량 비례유량제어밸브의 구성을 나타낸다. 밸브 입구로부터 출구로 흐르는 유량은 메인 디스크 개도에 의하여 조절되고 메인 디스크 변위는 파일럿 디스크 변위에 의해 조절되는 압력차로서 결정되는 2단(two stage) 밸브의 구조를 갖는다. 2단 밸브는 유체압력과 흐름에 의해 메인 디스크에 발생하는 외력을 보상하기 위하여 전자기력으로 구동되는 파일럿 디스크를 이용하여 메인 디스크에 압력차를 발생시키고 메인 디스크는 파일럿 디스크를 자체적으로 추종하는 기능의 기계적인 서보시스템으로 설계된다. 파일럿 디스크는 플런저와 직결되어 코일에 흐르는 전류에 따라 위치가 변화되고, 파일럿 디스크 변위는 그림 2에서와 같이 선형변위계로 측정되어 위치제어기(positioner)로 피드백되는 폐루프 제어시스템의 구조를 갖는다. 여기서 위치제어기는 메인 디스크를 통과

하여 흐르는 유량, 또는 밸브변위에 대한 지령신호와 선형변위계 출력신호를 비교하여 코일에 흐르는 전류를 조절함으로써 밸브에 작용하는 외란, 온도나 압력등과 같은 작동조건변화에 의한 영향을 최소화하면서 안정적인 작동을 가능하게 한다.

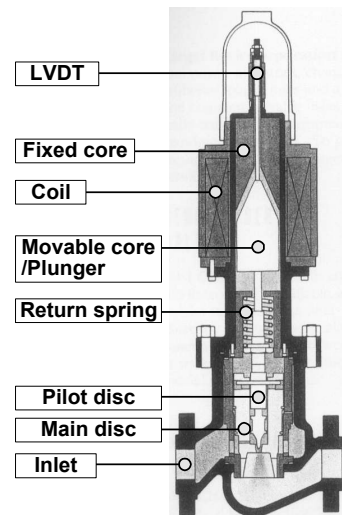


그림 1 대용량 비례유량제어밸브의 구성

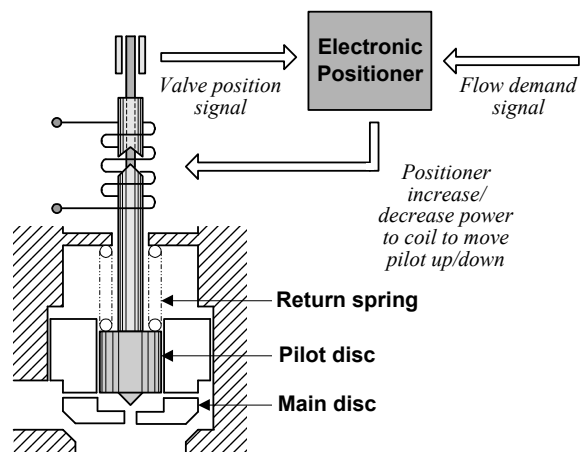


그림 2 비례유량제어밸브 제어시스템

비례제어밸브를 구동하는 위치제어기의 설계방식에는 전기적인 입출력신호를 아날로그 회로만을 이

용하여 하드웨어적으로 처리하는 아날로그방식과 마이크로 컨트롤러를 기반으로 입출력신호를 인터페이스하는 하드웨어와 제어알고리즘을 운용 프로그램으로 구현하는 디지털방식으로 구분된다. 비례제어밸브가 개발되는 초기단계에서는 대부분이 아날로그방식 제어기였지만 디지털 프로세서의 급속한 기술발전은 각종 센서와 액추에이터에 대하여 다양한 인터페이스를 제공하고, 빠른 연산속도는 복잡한 알고리즘에 대한 실시간 처리를 가능케 하여 최근에 개발되는 제어기는 대부분 디지털방식으로 설계되고 있으며 향후 이러한 개발추세는 더욱 확대될 것으로 예상된다. 아날로그방식에 비하여 디지털방식 설계의 장점은 제어기 이득을 비롯한 제반 작동변수의 간편한 설정 및 조정, 다양한 제어알고리즘 및 로직설계, 프로그램 변경에 의한 설계의 유연성 외에 디지털 통신을 이용하여 작동상태에 대한 원격 모니터링과 자체적으로 이상유무를 감지하는 ODB(on-board diagnosis) 와 안전작동(fail safe) 기능에 대한 구현이 가능하므로 지능형 밸브(smart valve)로 개발할 수 있다는 점이다. 그림 3은 고가의 대용량 비례유량 제어밸브를 공급하는 Target Rock사의 아날로그 방식 위치제어기를 나타낸다. 대부분의 전기회로 소자가 소모전력이 큰 저항과 바이폴라 트랜지스터로 설계되어 있고 인쇄회로기판에 배치된 다수의 트리머(trimmer)는 입출력 신호를 조정하거나 작동 파라미터를 설정하는데 사용된다.



그림 3 비례유량제어밸브 위치제어기 외형

본고에서는 개발대상 대용량 비례유량제어밸브의 작동원리와 솔레노이드 코일의 전기적 특성을 고찰하고 이를 바탕으로 플런저 변위를 제어하는 기능의 디지털방식 제어기 설계와 이를 이용한 성능시험결과에 대하여 기술하였다. 개발된 제어기는 밸브변위에 대한 위치제어기능뿐만 아니라 시험신호발생과

작동상태를 실시간으로 모니터링하여 컴퓨터에 저장하는 기능이 내장되어 있으므로 성능시험기로도 활용될 수 있도록 개발되었다.

## 2. 비례유량제어밸브 특성분석

### 2.1 자력제어시스템(self-controlled system)

그림 4는 메인 디스크와 파일럿 디스크로 구성되는 2단 유량제어밸브의 도식적인 구조를 나타낸다. 파일럿 디스크는 솔레노이드 가동자와 연결되어 코일전류에 의해 발생하는 전자기력과 리턴 스프링에 의하여 변위가 결정되고 메인 디스크는 입구압력( $p_s$ ), 출구압력( $p_d$ ), 파일럿 디스크와 메인 디스크의 상대변위에 따라 조절되는 제어압력( $p_c$ )에 의하여 변위가 결정되며 압력에 의해 메인 디스크에 작용하는 힘을 나타내면 다음과 같다.

$$\text{위쪽 방향의 힘: } F_{up} = p_s(A_p - A_d) + p_d A_d$$

$$\text{아래쪽 방향의 힘: } F_{down} = p_c A_p$$

위 식에서 입구와 출구압력이 일정하면 메인 디스크를 상승시키는 힘은 일정하므로 제어압  $p_c$ 의 크기에 따라 메인 디스크는 상승 또는 하강하게 된다. 파일럿 디스크가 고정된 상태에서 메인 디스크가 평형위치에서 상승하면 제어챔버의 유출 오리피스 단면적이 작아져 제어압력이 상승하여 메인 디스크를 하강시키게 되고 반대로 메인 디스크가 평형위치에서 하강하면 제어챔버의 유출 오리피스 단면적이 증가

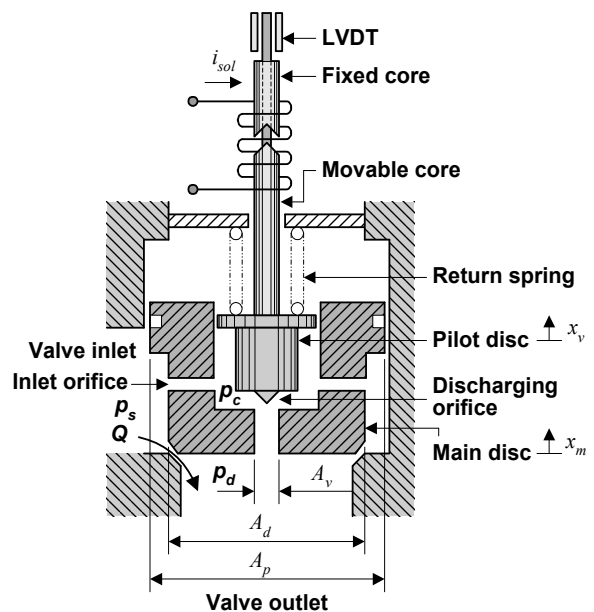


그림 4 2단 비례유량제어밸브

하여 제어압력이 낮아지게 되므로 메인 디스크는 상승하여 평형위치로 복귀하게 된다. 이와 같이 메인 디스크는 항상 파일럿 디스크를 추종하는 자력제어 시스템의 운동특성을 가지며 메인 디스크를 움직이는 구동력은 제어압에 비례하므로 메인 디스크를 통과하는 큰 유량에 의해 발생하는 외력을 보상할 수 있게 된다.

## 2.2 플런저 변위의 정특성

플런저는 그림 5와 같이 파일럿 디스크와 솔레노이드 가동자로 구성된다. 플런저에 작용하는 힘은 코일에 흐르는 전류에 의해 발생하는 전자기력과 리턴 스프링의 압축력이 구동력이고 마찰력( $F_f$ ), 압력 차에 의한 힘( $F_p$ ), 유체력( $F_q$ )이 외란으로 작용한다. 플런저에 작용하는 각 성분의 힘을 살펴보면 다음과 같다.

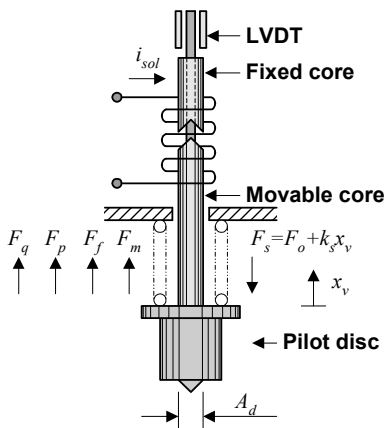


그림 5 플런저에 작용하는 외력

### (1) 전자기력 (electromagnetic force), $F_m$

일반적인 솔레노이드에서 발생하는 전자기력은 다음 식으로 나타내어진다.

$$F_m = \frac{\mu^2 N^2 A I^2}{2\mu_o L^2}$$

$\mu$ : 전자석 코어재질의 투자율 (permeability)

$\mu_o$ : 진공상태의 투자율

$N$ : 솔레노이드 코일의 감긴 회전수

$A$ : 가동자와 고정자사이의 유효단면적

$I$ : 코일전류

$L$ : 자기장 길이로 공극과 코어길이의 합

위 식으로부터 전자기력은 코일전류의 제곱에 비례하고 공극의 제곱에 반비례하므로 코일전류가 일정한 상태에서도 플런저 변위에 따라 전자기력이 다

름을 알 수 있다. 이론적으로 기술되지 않는 전자기력의 중요한 특성 중 하나는 히스테리시스 (hysteresis)로서 이는 동일한 공극조건에서도 전류가 증가할 때와 감소할 때 발생하는 전자기력이 다르게 나타나는 특성이다. 플런저 변위를 피드백하면 히스테리시스에 의해 발생하는 정상상태 오차를 감소시키는 것이 가능하지만 동적제어성능에 큰 영향을 미치므로 전자기력의 히스테리시스 특성이 최소화되도록 솔레노이드를 설계하여야 한다.

### (2) 스프링력 (spring force), $F_s$

리턴 스프링이 플런저에 가하는 힘은 전자기력과 반대방향이며 플런저 변위에 비례하는 다음 식으로 표현된다.

$$F_s = k_s (x_v + x_{vo}) = k_s x_v + F_o$$

$k_s$ : 스프링 상수

$x_{vo}$ : 스프링의 초기 압축길이

$F_o$ : 스프링의 초기 압축력

### (3) 마찰력 (friction force), $F_f$

항상 플런저 운동방향에 반대방향으로 작용하고 쿨롱마찰력은 코일전류가 일정한 상태에서 플런저 변위의 평형점이 다르게 나타나는 히스테리시스의 원인이 된다.

### (4) 파일럿 디스크 양단 압력 차에 의한 힘, $F_p$

파일럿 디스크 내부 유로를 통하여 상부와 하부에는 제어챔버 압력  $p_c$ 가 일정하게 작용하지만 플런저 시스템 (stem) 단면적에 작용하는 압력에 의한 힘과 파일럿 디스크와 메인 디스크사이의 상대운동이 발생하는 과도상태에서의 제어챔버와 상부압력 차에 의한 힘이 작용한다.

### (5) 유체력 (flow force), $F_q$

파일럿 디스크 출구 오리피스를 통하여 흐르는 유체에 의해 발생하는 힘으로 유체 흐름방향과 반대로 작용하므로 플런저를 상승시키는 방향이다.

이상과 같이 기술된 플런저에 작용하는 힘 중에서 전자기력과 스프링력은 플런저 변위를 제어하는 구동력인 반면에 마찰력, 압력 차에 의한 힘, 유체력은 작동상태에 따라 다르게 나타나는 외란성분의 힘으로 분류된다. 정상상태에서 플런저는 구동력과 외란성분의 힘이 평형을 이루는 위치에서 정지하게 되며

외란을 보상하면서 플런저를 안정적으로 제어하기 위해서는 전자기력이 스프링력과 외란성분의 힘을 합친 값보다 충분히 크게 되도록 설계하여야 한다.

유체가 흐르지 않는 상태 또는, 외란성분의 힘을 무시한 상태에서 전자기력과 스프링력에 의해 결정되는 플런저 변위의 정특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서,  $(i_{sol})_{low}$ 와  $(i_{sol})_{high}$ 는 일정한 코일전류가 낮은 상태와 높은 상태에서 플런저 변위에 따른 전자기력을 나타낸다. 그림 5에서 플런저 변위가 증가할수록 공극이 작아지므로 전자기력은 플런저 변위가 클수록 비선형적으로 증가하게 된다.  $(k_s)_{low}$ 와  $(k_s)_{high}$ 는 스프링 상수가 작은 경우와 큰 경우에 플런저 변위에 따른 스프링력으로 플런저 변위에 대하여 선형적으로 증가하는 특성을 나타낸다. 외란성분의 힘을 고려하지 않는 경우에 플런저 변위는 전자기력과 스프링력이 일치하는 위치에서 평형을 이루며 그림 6에서 스프링 상수가 작은 경우에는  $(x_v)_{e2}$ , 스프링 상수가 큰 경우에는  $(x_v)_{e1}$ 에서 정지하게 된다. 평형점의 안정성은 전자기력이 일정한 상태에서 플런저 변위가 외란에 의하여 평형점을 벗어나는 경우에 다시 원래 위치로 복귀하는 특성으로 평가되는데 그림 6에서  $(x_v)_{e2}$ 는 불안정한 평형점이고  $(x_v)_{e1}$ 은 안정된 평형점을 나타낸다. 이러한 결과는 그림 7에서 불안정한 평형점  $(x_v)_{e2}$ 에서는 플런저 변위가 평형점에서 양의 방향으로 증가하면 전자기력이 스프링력보다 크므로 플런저 변위를 더욱 증가시키는 반면에 안정한 평형점  $(x_v)_{e1}$ 에서는 스프링력이 전자기력보다 크므로 플런저가 원래 위치로 복귀하여 평형을 이루게 된다. 이와 같이 평형점이 안정되는 조건은 플런저 변위에 대한 스프링력과 전자기력의 기울기로 결정되는데 항상 스프링력의 기울기가 전자기력의 기울기보다 크게 설계되어야만 평형점이 안정화됨을 알 수 있다.

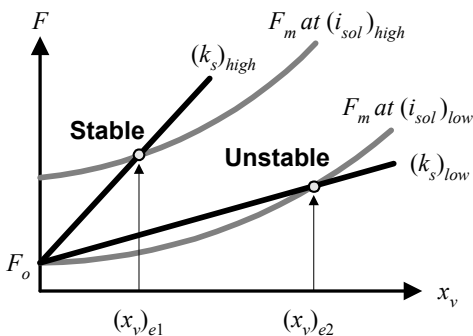


그림 6 전자기력과 스프링력의 평형점

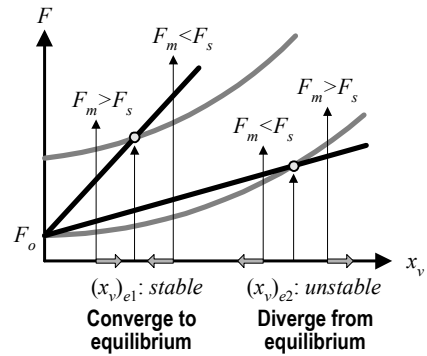


그림 7 전자기력과 스프링력의 평형점

코일전류로 제어되는 플런저 변위를 안정된 평형점으로 설계하기 위해서는 모든 작동범위에서 스프링 상수를 전자기력의 기울기보다 크게 설계하거나 코일전류가 일정한 상태에서 발생하는 전자기력의 기울기를 작게 설계하는 방안이 있다. 전자는 설계가 쉬운 반면에 플런저 변위가 증가함에 따라 스프링력이 크게 되고 이에 따라 전자기력도 크게 되도록 설계하여야 하므로 동일한 플런저 이동변위에 대하여 소모전력이 크게 되는 단점이 있다. 이에 비하여 플런저 변위에 대한 전자기력의 기울기를 작게, 또는 일정하게 설계하는 방식은 스프링 상수가 작은 리턴 스프링으로도 안정된 평형점의 설계가 가능하므로 전력소모를 작게 할 수 있는 장점이 있지만 플런저 변위에 따른 가동자와 고정자 사이의 유효단면적 설계와 엄밀한 전자기력 해석이 어려운 단점이 있다.

플런저 변위를 측정하여 피드백하는 페루프 구동 방식에서는 플런저의 평형점이 불안정한 경우에도 안정적인 위치제어가 가능하지만 기계적으로 안정화된 시스템이 오작동 위험의 부담이 적으므로 비례 제어밸브에서는 전술된 바와 같이 안정화된 평형점이 되도록 리턴 스프링과 솔레노이드의 전자기력 특성을 설계하고 연속적인 변위제어를 하지 않는 ON-OFF 솔레노이드 밸브의 경우에는 양 끝단에서만 기구적으로 안정된 상태를 유지하도록 불안정한 평형점으로 설계한다.

### 2.3 플런저 변위에 대한 코일전류 특성

그림 5의 구조를 갖는 플런저에 대하여 코일전류에 따른 플런저 변위를 나타내면 그림 8과 같다. 여기서  $(x_v)_{max}$ 은 기계적인 구조로 제한되는 플런저 변위의 최대값을 나타낸다.  $(i_{sol})_{min}$ 은 플런저 이동이 시작되는 최소전류를 나타내고  $(i_{sol})_{max1}$ 은 리턴 스프링의 스프링 상수가  $k_{s1}$ 일 때,  $(i_{sol})_{max2}$ 는

$k_{s2} (> k_{s1})$  일 때 플런저가 최대변위에 도달하는 코일전류이다. 어느 경우에서나 평형점에서 스프링 상수가 전자기력의 기울기보다 크므로 안정된 평형상태를 유지하게 된다.

그림 8로부터 플런저가 이동을 시작하는 최소전류는 스프링 초기 압축력에 비례하고 최대변위에 도달하는 시점에서의 최대전류는 스프링 상수가 클수록 증가함을 알 수 있다. 그림 9는 코일전류에 대하여 정상상태에서 발생하는 플런저 변위를 도식적으로 나타낸 그림이며 플런저 변위에 따라 코일전류 영역을 분류하면 다음과 같다.

(1)  $i_{sol} < (i_{sol})_{min}$ : 불감대 (dead zone)

코일전류에 의하여 발생하는 전자기력이 리턴 스프링의 초기압축력보다 작으므로 플런저 변위가 발생되지 않는 영역이다. 불감대에서의 최대전류  $(i_{sol})_{min}$  은 플런저가 이동을 시작하는 시점에서 외란을 극복할 수 있는 충분한 전자기력이 발생되도록 설계하여야 하고 솔레노이드 코일의 단선여부를 판단하는 진단알고리즘에 활용된다.

(2)  $(i_{sol})_{min} < i_{sol} < (i_{sol})_{max}$ : 유효전류영역

코일전류가 증가함에 따라 플런저 변위가 변화되는 전류영역이다. 그림 8에 나타난 평형점 특성으로부터 코일전류에 대한 플런저 변위의 선형성은 전자기력의 기울기가 영인 경우(즉, 전자기력이 플런저 변위에 무관하게 코일전류만의 함수인 경우)에만 성립함을 알 수 있다.

(3)  $(i_{sol})_{max} < i_{sol} < (i_{sol})_{limit}$ : 포화전류영역

플런저가 기계적으로 이동 가능한 최대위치에서 정지된 상태를 유지하는 전류영역이다.  $(i_{sol})_{limit}$  은 제어기에 설계된 구동회로에서 제어되는 전류의 한계값으로 솔레노이드 구동전압을 코일저항으로 나눈 값으로 결정된다.

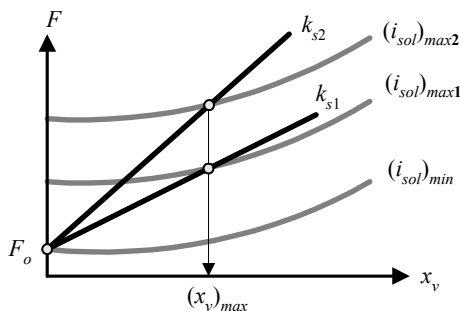


그림 8 플런저 최대변위에서의 코일전류

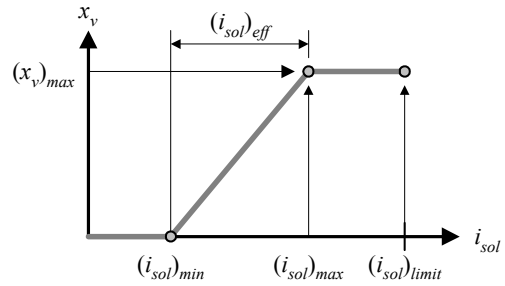


그림 9 코일전류에 대한 플런저 변위특성

이상과 같이 분류된 전류영역에서 실제로 플런저 변위가 변화되는 유효전류영역에 대한 설계는 구동력뿐만 아니라 외란성분의 힘을 고려하여 이를 보상할 수 있는 적절한 범위로 결정하여야 한다. 유효전류영역이 너무 작은 경우에는 구동전류에 대한 플런저 변위의 이득이 크게 되므로 정밀한 위치제어가 어려워지고 너무 큰 경우에는 외란과 히스테리시스, 온도에 따라 증가되는 코일저항 등에 대한 보상이 곤란해지는 단점이 있다.

### 3. 디지털 컨트롤러 설계

대용량 비례유량제어밸브의 작동원리와 솔레노이드를 이용하여 구동되는 플런저의 운동특성분석을 바탕으로 파일럿 디스크 변위를 페루프 방식으로 제어하는 기능의 컨트롤러를 디지털방식으로 설계하였다. 개발된 비례유량제어밸브 컨트롤러는 그림 2의 전자식 위치제어기(electronic positioner)의 기능을 수행하도록 설계되었다. 내장된 마이크로 컨트롤러에서는 파일럿 디스크 변위만을 선형변위계로 측정하여 솔레노이드 코일전류를 조절하고 메인 디스크 변위는 파일럿 디스크 변위를 추종하도록 설계된 서보시스템에 의하여 제어된다.

비례유량제어시스템을 구성하는 주요 요소에 대한 기능과 설계특징은 다음과 같다.

#### 3.1 비례유량제어밸브

그림 10은 개발을 위해 시험 제작된 비례유량제어밸브를 보여주며 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 플런저 이동변위: 0-3mm
- 정격 구동전압: DC 125V
- 코일저항: 상온에서 254Ω
- 소모전력: 최대 61.5W

솔레노이드 코일은 정상상태에서 저항과 동일한 특성을 가지므로 전류가 흐르면 발열하고 온도가 높

을수록 코일저항은 증가하게 된다. 따라서 솔레노이드 코일에 일정한 전압을 인가하면 온도가 증가함에 따라 구동전류가 감소하여 전자기력이 감소되므로 이를 보상하기 위해서는 코일전류를 측정하여 피드백하는 설계가 필요하다.

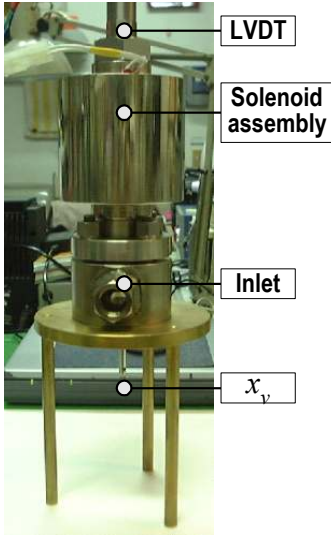


그림 10 대용량 비례유량제어밸브 시작품

### 3.2 선형변위계

선형변위계는 플런저와 연결되어 플런저 이동변위에 따라 출력전압이 변화되는 선형변위 센서이다. 그림 11은 비례유량제어밸브에 적용된 선형변위계 입출력신호와 코어변위에 따른 출력전압의 특성을 나타내며 세부 사양은 다음과 같다.

- 측정범위:  $\pm 6.35\text{mm}$
- 입력전압: DC 24V
- 출력전압: 1.2V/mm 스케일의 양방향 차동전압 (differential bipolar voltage)

선형변위계는하우징에 대한 코어의 상대위치에 따라 양방향 전압을 출력하지만 단방향으로 작동되는 비례유량제어밸브에 적용하는 경우에는 플런저 전체이동변위에 대하여 동일한 전압부호가 발생되도록 코어와 플런저를 조립하는 것이 신호처리에 편리하다. 특히, 플런저가 구동되지 않는 초기상태에서 출력전압은 플런저와 코어의 조립상태에 따라 다르게 되는데 초기위치에서의 출력신호 조정은 신호조정회로의 가변저항을 이용하여 설정하는 방식이 일반적이다. 출력전압은 차동이므로 코어 이동방향에 따른 전압부호를 변경하는 경우에는 V+와 V- 출력 단자를 바꾸는 것이 가능하다.

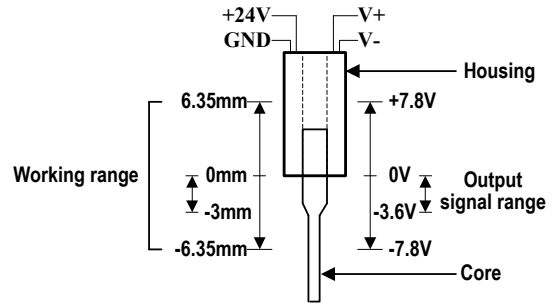


그림 11 선형변위계 출력전압 사양

### 3.3 파워 서플라이 (power supply)

솔레노이드에서 소모되는 전력을 공급하는 파워 서플라이는 125V의 직류전압으로 최대 4.8A의 전류를 공급할 수 있는 600W 용량을 사용하였다.

### 3.4 디지털 컨트롤러

플런저 변위를 실시간으로 제어하는 기능의 디지털 컨트롤러는 마이크로 컨트롤러를 기반으로 설계되었으며 센서와 액추에이터 입출력신호를 처리하는 기능의 인터페이스 회로와 마이크로 컨트롤러에서 수행되는 운용 프로그램으로 구성된다. 전기적인 신호처리를 담당하는 회로와 제어 및 운용 알고리즘에 대한 설계특징은 다음과 같다.

#### (1) 마이크로 컨트롤러 및 인터페이스 회로

##### ATmega128

ATMEL사에서 개발된 AVR 마이크로 컨트롤러이며 16MHz 클럭으로 동작한다. 센서에서 출력되는 아날로그 전압신호를 10bit A/D변환하고 솔레노이드 코일의 전류제어를 위하여 PWM 신호를 출력하며 직렬통신으로 작동지령을 수신하고 수집된 작동상태 데이터를 송신하는 기능을 갖는다.

##### 선형변위계 출력신호 조정회로

선형변위계 차동전압신호의 스케일과 오프셋조정을 위하여 연산증폭기로 설계하였다.

##### 코일전류 측정회로

LEM(local energy meter)은 전류에 비례하는 전압신호를 출력하는 기능의 전류측정소자이다. 솔레노이드 코일에 흐르는 전류측정에는 LEM을 이용하였으며 LEM 출력전압은 신호조정회로를 통하여 마이크로 컨트롤러의 A/D 변환 전압범위로 조정되도록 설계하였다.

##### 코일전류 구동회로

마이크로 컨트롤러에서 출력되는 PWM 신호는 게이트 드라이버(gate driver)회로에서 증폭된 후

IRF640 FET를 스위칭함으로써 코일전류를 조절할 수 있도록 설계하였다.

(2) 시스템 프로그램

제어주기: 5ms(200Hz)

0.1% 분해능의 PWM 신호발생

PWM 반송주파수(carrier frequency)의 설정: 300Hz에서 16kHz까지 100Hz 단위로 설정가능  
 지령신호 선택기능: 4-20mA의 전류, 0-5V의 전압, 직렬통신으로 지령신호 입력

구동모드 선택기능: 전압(PWM)구동, 전류제어, 플러저 변위제어모드로 설정가능

내장된 함수발생기에 의한 프로그램 구동모드: 스텝, 램프, 사인함수를 0.01Hz에서 2.5Hz까지 0.01Hz 단위로 구동주파수 설정이 가능

비례-적분제어기에 의한 전류 및 변위제어  
 코일전류와 선형변위계 출력신호에 대한 디지털 저주파 필터링 기능

LCD 및 EEPROM 인터페이스: 작동상태 표시 및 작동변수의 저장 및 복원기능

직렬통신을 이용한 지령신호 송신 및 시험데이터 수집기능: 115,200 baudrate으로 통신

선형변위계 출력전압 자동보정기능: 플러저와 코어의 조립상태에 무관하게 항상 선형변위계 출력전압이 최소 0.5V, 최대 4.5V가 되도록 보정 연산하는 기능으로 그림 12는 자동보정이 진행되는 과정을 나타낸다. 자동보정이 시작되면 디지털 컨트롤러는  $T_{hold}$  시간동안 코일에 전압을 인가하지 않으며 이 상태에서의 최소전압  $v_{min}$  을 기록한다. 다음  $T_{move}$  시간동안에는 PWM 듀티율을 0%에서 100%까지 증가시켜 플러저가 최대변위에 도달하도록 한 후 다시  $T_{hold}$  시간을 유지하여 이 상태에서의 최대전압  $v_{max}$  을 기록하고 PWM 듀티율을 감소시켜 자동보정을 완료한다. 보정 연산은 자동보정에서 기록된 전압을 이용하여 선형변위계 출력전압이  $v_{min}$  일 때 0.5V,  $v_{max}$  일 때 4.5V가 되도록 스케일과 오프셋을 조정한다.

그림 13은 전술된 기능을 구현하여 개발된 디지털 컨트롤러를 보여준다. 전면에는 전원 스위치, LCD, 직렬통신 포트와 전압지령신호를 자체적으로 발생시킬 수 있도록 포텐시오메터가 설계되어 있고 후면에는 AC 220V 전원커넥터, DC 125V 전원입력, 솔레노이드 코일, 선형변위계 입출력신호, 전류 및 전압 지령신호를 연결하는 커넥터가 배치되어 있다. DC

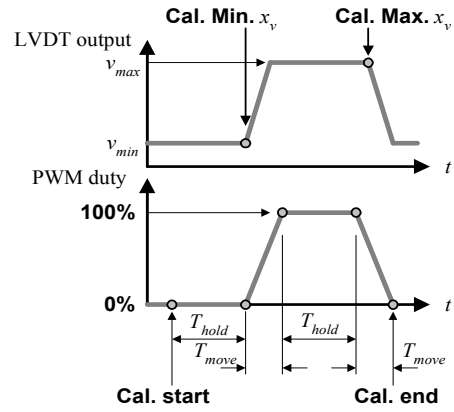
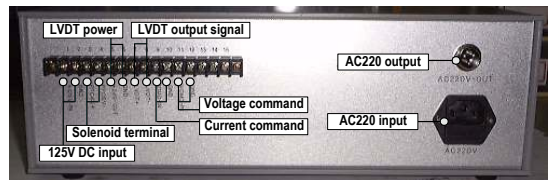


그림 12 선형변위계 출력전압 자동보정과정

125V의 솔레노이드 구동전원은 디지털 컨트롤러에 내장되어 있지 않으며 AC 220V 전원출력이 외부 파워 서플라이에 연결되고 DC 125V 전원이 후면 커넥터로 공급된다. 그림 14는 디지털 컨트롤러 내부와 외부에 연결되는 신호를 나타내는 기능블록선도이다.



(a) 전면



(b) 후면

그림 13 디지털 컨트롤러

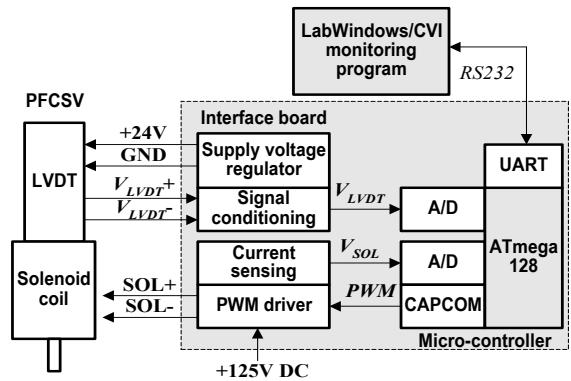


그림 14 디지털 컨트롤러의 기능블록선도

### 3.5 모니터링 프로그램

PC에서 수행되는 모니터링 프로그램은 디지털 컨트롤러와 직렬통신을 이용하여 실시간으로 작동지령 및 작동 파라미터를 송신하고 시험데이터를 수집하여 제어화면에 표시하거나 파일로 저장하는 사용자 인터페이스 기능을 담당한다.

그림 15는 LabWindows/CVI를 이용하여 개발된 모니터링 프로그램의 제어화면을 나타내고 설정가능한 작동 파라미터는 PWM 반송주파수, 디지털 저주파 필터 절점주파수, 전류 및 위치제어기 이득 등이 있으며 이 외에도 선형변위계 자동보정과 비례제어 솔레노이드 구동전원 제어기능이 포함된다. 디지털 컨트롤러는 모니터링 프로그램과 직렬통신으로 연결되면 작동모드와 작동 파라미터 설정 등과 같은 다양한 기능이 활성화되고 단독으로 작동하는 경우에는 내부에 설계된 점퍼설정에 따라 후면 커넥터로 입력되는 전류 또는 전압지령신호로 플런저 변위를 제어한다. 그림 16은 그림 15의 제어화면에서 작동모드 설정과 관련된 컨트롤을 나타낸다. 'CtrType'이 'OP'인 경우에는 전압구동이고 'CL'인 경우에는 'CtrVar'의 설정에 따라 전류 또는 플런저 변위를 제어하며 'FuncGen'는 내장된 함수발생기의 활성화 여부를 결정한다.

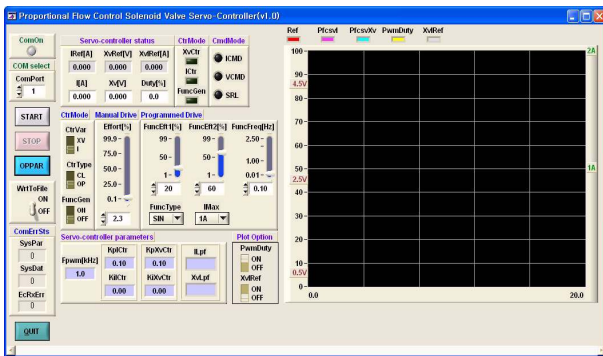


그림 15 모니터링 프로그램 제어화면

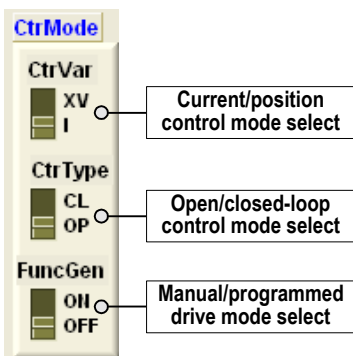


그림 16 작동모드 설정 컨트롤

### 4. 성능시험

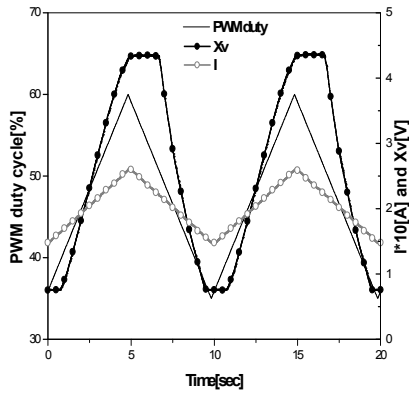
개발된 대용량 비례유량제어밸브 디지털 컨트롤러의 기능 및 제어성능을 검증하기 위하여 성능시험을 실시하였다. 작동조건은 솔레노이드 구동전압이 DC 125V이고 PWM 반송주파수는 1kHz이며 메인 디스크를 통하여 흐르는 유량이 없는 상태에서 플런저 변위만을 제어하였다.

그림 17(a)는 비례솔레노이드의 특성을 살펴보기 위하여 개루프 전압구동모드에서 내장된 함수발생기를 이용하여 PWM 듀티율을 35%에서 60%까지 0.1Hz의 램프파형으로 변화시키는 경우에 대한 응답을 나타낸다. PWM 듀티율이 서서히 증가, 감소되면 코일전류는 듀티율 파형과 거의 같은 형태로 나타나지만 플런저 변위는 상승과 하강 시에 다른 형태로 변화됨을 알 수 있다. 그림 17(b)는 그림 17(a)의 시험결과를 코일전류에 대한 플런저 변위로 나타낸 그림이며 이로부터 코일전류가 동일하여도 증가, 감소되는 작동상태에 따라 플런저 변위가 다르게 나타나는 히스테리시스 특성이 있음을 확인하였다. 개루프 전압구동 시험으로부터 플런저 변위가 변화되는 유효 PWM 듀티율은 37%에서 60%이고 유효 전류영역은 155mA에서 260mA로 파악되었다. 히스테리시스는 동일한 PWM 듀티율에 대하여 최대 1.5V의 변위 차가 발생하고 코일전류에 대해서는 최대 1.34V로 측정되었다.

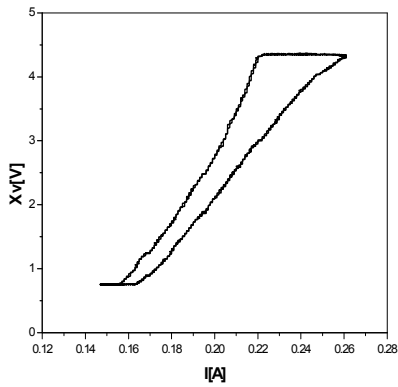
동일한 코일전류에 대하여 코일전류 변화율의 부호에 따라 플런저 변위가 다르게 나타나는 히스테리시스의 원인은 플런저에 작용하는 쿨롱 마찰력보다 전자기력의 히스테리시스 특성이 주된 원인으로 분석되고 기존에 상용화된 제품에 대한 성능시험을 통해서 시험결과를 비교분석한 후 개발 시제품의 특성 개선방안을 모색할 예정이다.

그림 18은 전류제어모드에서 0.1A에서 0.3A까지 변화되는 0.2Hz 스텝신호에 대한 페루프 전류제어 성능 시험결과이다. 비례-적분제어기가 적용되므로 전류제어에 대한 정상상태 오차는 발생하지 않았으며 기준전류의 90%에 도달하는 상승시간은 0.195초로 측정되었다. 전류제어는 플런저 변위를 제어하는 페루프 시스템의 내부 루프에 적용되므로 빠른 동특성이 중요하고 스텝응답에 대하여 발생하는 약간의 오버슈트는 허용되도록 제어이득을 선정하였다.





(a) 램프 응답



(b) 코일전류에 대한 플런저 변위 응답  
그림 17 전압구동 성능시험

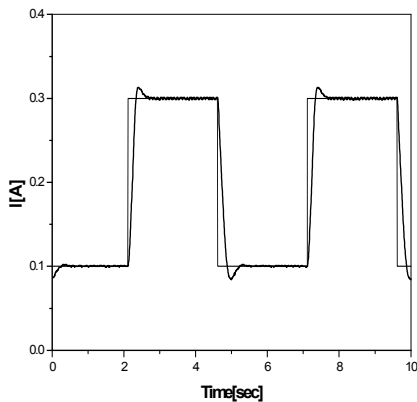
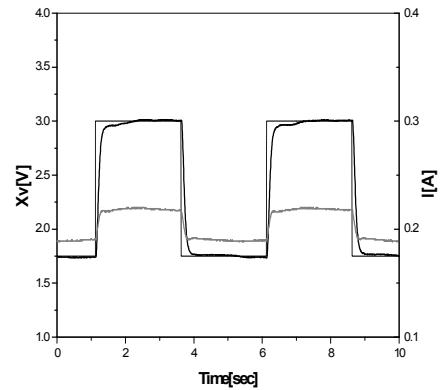


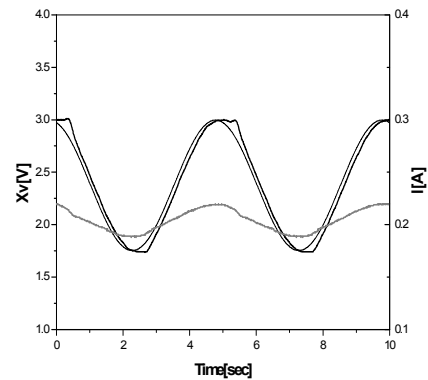
그림 18 솔레노이드 코일전류제어 성능시험

그림 19는 플런저 변위에 대한 제어성능을 평가하기 위하여 플런저 변위제어모드에서 1.75V에서 3V 까지 변화되는 0.2Hz의 스텝 및 사인함수를 기준 입력신호로 인가한 성능시험결과이며 플런저 변위제어기는 비례-적분제어기로 설계하였다. 스텝응답에서는 오버슈트가 발생하지 않았지만 약간의 정상상태 오차가 발생하며 기준입력신호가 사인함수인 경우에는 플런저의 운동방향이 변화되는 시점에서 지연현상이 나타남을 확인하였다. 정상상태 오차와 동적지

연의 원인은 모두 전압구동 성능시험에서 확인된 히스테리시스이며 히스테리시스 특성은 페루프 제어를 통하여 나타나는 영향을 감소시킬 수는 있지만 완전히 제거하는 것은 어려울 것으로 판단되므로 우수한 제어성능의 비례제어밸브 설계를 위해서는 솔레노이드 코일의 성능개선이 선행되어야 할 것으로 예상된다.



(a) 스텝 응답



(b) 사인함수 응답

그림 19 플런저 변위제어 성능시험

## 5. 결 론

대용량 비례유량제어밸브는 솔레노이드에서 발생하는 전자기력을 플런저 구동에 이용하므로 외부 액추에이터로 구동되는 공압이나 모터작동밸브에 비하여 소형으로 설계가 가능하고 성능이 우수하며 유지보수비용이 적은 장점으로 인하여 점차 적용분야가 확대되는 추세에 있다.

개발대상 대용량 비례유량제어밸브는 플런저와 직결된 파일럿 디스크 변위를 조절하여 큰 유량이 통과하는 메인 디스크 변위를 압력 차로 제어하는 2단 밸브의 구조를 갖는다. 일반적으로 솔레노이드에서 발생하는 전자기력은 공극이 증가할수록 급격하게

감소되므로 밸브 이동변위가 제한되고 이에 따라 게이트(gate)나 나비(butterfly)밸브에 비하여 정격유량을 크게 설계할 수 없는 단점이 있으나 최근에는 파일럿 디스크 변위를 추종하도록 설계되는 메인 디스크의 자력제어시스템을 대신하여 고속응답이 가능한 비례제어 솔레노이드를 이용하여 메인 디스크의 압력을 직접적으로 제어하는 fly-by-wire' 방식의 설계도 시도되고 있다.

본고에서는 현재 전량 수입되고 있는 대용량 비례유량제어밸브의 국산화 개발을 위하여 비례제어밸브와 디지털 컨트롤러 시제품을 개발하였다. 설계된 디지털 컨트롤러는 마이크로 컨트롤러를 기반으로 플러저 변위 측정 및 솔레노이드 코일전류 구동기능의 전기적인 인터페이스 보드와 제어 및 운용 알고리즘을 소프트웨어로 구현한 시스템 프로그램으로 구성된다. 이러한 디지털방식의 설계는 다수의 트리머를 이용하여 번거로운 조정작업이 요구되는 기존의 아날로그방식 컨트롤러에 비하여 다양한 작동변수와 파라미터를 사용자 인터페이스용으로 설계된 모니터링 프로그램을 통하여 간편하게 설정할 수 있을 뿐만 아니라 시험데이터에 대한 실시간 모니터링과 저장기능이 가능하다는 장점이 있다. 특히 개발된 디지털 컨트롤러에는 함수발생기와 전압(PWM)구동 및 전류제어기능 등이 내장되어 이를 이용하면 개발대상 비례유량제어밸브의 성능시험도 가능하다.

향후에는 다양한 시험을 통해서 비례솔레노이드의 동특성을 분석하고 최적의 구동조건과 제어기 이득을 선정하는 연구를 수행할 예정이며 이와 더불어

작동오류를 검출하여 오류종류에 따라 적절한 안전 작동모드로 전환하는 기능의 진단알고리즘을 추가하여 지능형 밸브로 개발할 예정이다.

참고 문헌

- 1) V. Liantonio, "High Pressure Modulating Solenoid Valve for Steam/Gas Service", InTech, pp. 43~46, 1988.
- 2) V. Liantonio, "Use of Electromagnetic Control Valves in Risk Significant Applications"
- 3) 정규흥, 이근호, "자동변속기용 비례제어 솔레노이드밸브 성능시험기 개발", 유공압시스템학회 논문집 제 3권 제 4호, pp. 21~28, 2006.

[저자 소개]



정규흥

E-mail: ghjung@daejin.ac.kr

Tel : 031-539-1974

1963년 7월 30일생

1993년 서울대학교 기계설계학과 박사 과정 졸업, 1993년 현대자동차 중앙연구소 선임연구원, 1995년~현재 대진대학교 컴퓨터응용기계설계공학과 교수, 자동변속기 변속제어기 설계, 운동재현기 제어시스템설계, 서보밸브 및 비례제어밸브 컨트롤러 설계 및 메카트로닉스를 이용한 제어시스템 개발에 중사, 유공압시스템학회, 대한기계학회, 한국자동차공학회 회원