

# 자동변속기용 비례제어 솔레노이드밸브 성능시험기 개발

## A Development of Proportional Control Solenoid Valve Performance Tester for Automatic Transmission

정규홍 · 이근호

G. H. Jung and G. H. Lee

**Key Words** : Proportional Solenoid Valve(비례 솔레노이드밸브), Automatic Transmission(자동변속기), Pulse Width Modulation(펄스폭 변조), Current Control(전류제어)

**Abstract**: The proportional control solenoid valves as well as the PWM solenoid valves operated by electric signal play an important role in the hydraulic system for automatic transmissions to improve the shift quality. However it is not generally available for the performance data because most of the automotive parts manufacturer don't release the specific test results, especially dynamic performance that is essential to design a shift control algorithm. In this research, a performance test equipment that can be applied to various types of pressure control solenoid valve was developed. It was implemented by 8-bit micro-controller with many useful functions such as adjustable PWM carrier frequency, embedded function generator, current controller, data monitoring and acquisitions, etc. for the test of dynamic performance of solenoid valve as well as the steady-state pressure characteristics. The performance test results for the direct type proportional control solenoid valve show not only the validity of overall functions but also its usefulness as a hydraulic valve tester.

### 1. 서 론

자동변속기는 차량의 주행상태와 운전자 의지를 반영하여 자동적으로 변속이 이루어지도록 함으로써 운전의 편의성을 도모하는 동력전달장치이며 초기에는 대부분 승용차용으로 개발되었으나 근래에는 상용차와 건설차량 및 농업용 차량에도 적용이 확대되고 있는 추세에 있다.

엔진으로부터 차륜에 전달되는 토크비를 자동적으로 변화시키기 위한 자동변속기의 동력전달방식에는 다양한 종류가 있으나 가장 일반적인 형태는 유성기어를 이용하여 동력을 전달하면서 회전요소에 연결된 마찰요소(클러치 또는 브레이크)의 결합상태를 변화시켜 유성기어로 구성되는 기어열의 입출력 속도비를 변화시키는 방식이다.

유성기어방식의 자동변속기에서는 마찰요소의 결합상태가 변화되는 변속 시에도 엔진으로부터의 입

력토크가 존재하고 짧은 변속시간동안에 변속비가 변화되도록 하기 위해서는 매우 큰 마찰토크를 신속하게 발생시켜야 하므로 클러치 플레이트와 디스크 사이에 작용하는 마찰력을 유압피스톤을 이용해서 압력으로 제어하는 방식이 일반적으로 채택되고 있다. 변속 시에는 입출력 속도비가 변화되므로 변속기 입력 또는 출력속도가 변해야 하지만 차량의 질량에 해당되는 매우 큰 등가의 회전관성을 갖는 출력축의 속도변화는 크지 않으므로 엔진(또는 터빈)의 속도가 변속비에 맞도록 변화되며 이 때 발생하는 관성력에 의하여 변속충격이 발생된다.

변속 시 발생하는 변속충격은 과도변속성을 나타내는 변속품질의 핵심적인 지표이며 가속성능, 연비와 더불어 변속기 설계에서 매우 중요한 성능목표이다. 변속충격의 저감설계를 위해서는 변속 시 마찰요소의 토크를 제어하여야 하며 이는 곧 유압피스톤의 압력제어와 직결되므로 우수한 변속품질을 갖는 변속기 설계를 위해서는 압력제어성능이 우수한 유압시스템의 설계가 선행되어야 한다. 이러한 이유로 최근에 개발되는 거의 모든 자동변속기의 변속제어 방식은 변속제어기(TCU)를 이용하여 과도변속상태

접수일 : 2006년 10월 19일

정규홍(책임저자) : 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과

E-mail : ghjung@daejin.ac.kr, Tel : 031-539-1974

이근호 : 한국기계연구원 유공압 연구그룹

를 실시간으로 파악하면서 전기적인 신호로 압력을 제어할 수 있는 솔레노이드밸브를 채택하고 있다.

이와 같은 전자제어방식의 변속기 설계에 있어서 변속제어 알고리즘은 변속기 동력전달체계에 대한 분석과 솔레노이드밸브에 대한 전기적 및 유압적인 특성을 바탕으로 수립되어야 하며 자동변속기에 적용되는 솔레노이드밸브에 대한 상세한 성능 데이터는 제작회사에서도 제공하지 않으므로 성능분석시험을 통해서 파악하여야 한다.

본 연구에서는 자동변속기에 일반적으로 적용되는 PWM 및 비례제어 솔레노이드밸브에서 요구되는 정특성 및 동특성을 파악하기 위한 성능분석시험에 활용될 수 있는 성능시험기를 개발하였으며 유압시험을 통하여 설계된 기능을 검증하였다. 개발된 유압밸브 시험기는 자동변속기에 적용되는 솔레노이드밸브의 단품성능뿐만 아니라 솔레노이드밸브와 유량 증폭기능을 갖는 2차 스펴밸브로 구성되는 압력제어모듈의 성능시험에도 적용될 수 있도록 설계하였다.

## 2. 자동변속기 유압제어시스템

### 2.1 변속제어방식

변속 시 마찰요소의 구속 및 결합토크를 발생시키기 위하여 압력을 제어하는 자동변속기의 유압시스템은 제어압을 발생시키는 방식과 제어압을 마찰요소에 배분하는 방식에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.<sup>1)</sup>

#### 2.2.1 순수 유압식

가속페달에 의하여 작동되는 스톱 밸브로 라인 압(line pressure)을 제어하고 차속을 감지하는 거버너에 의하여 유로가 변경됨으로써 변속이 이루어지는 기계적인 방식으로 다양한 변속상황에 대한 능동적인 대응이 어렵다.

#### 2.2.2 전기 유압식

마이크로 컨트롤러로 구현된 변속제어기에서 변속제어 알고리즘을 수행하고 전기적인 신호로 솔레노이드밸브를 구동하여 변속 제어압을 발생시키는 방식으로 솔레노이드밸브의 배치와 특성에 따라 다음과 같은 설계방식으로 분류된다.

##### 1) 배분제어(distributed pressure control)

전기적인 신호로 압력제어가 가능한 하나의 솔레

노이드밸브에서 발생하는 변속 제어압을 다수의 ON/OFF 솔레노이드밸브를 이용해서 변속 시 압력제어가 요구되는 마찰요소에 작용하도록 유로를 변경시켜 변속제어 시 능동적인 압력제어가 가능하도록 설계하는 방식이다. 솔레노이드밸브에서 제어되는 유량은 클러치 피스톤을 구동시킬 만큼 충분하지 않으므로 감압밸브형의 2차 스펴밸브로 유량을 증폭시켜 압력을 제어한다.

##### 2) 독립제어(independent pressure control)

변속 제어 시 유로변경 없이 마찰요소에 작용하는 압력을 독립적으로 제어할 수 있도록 마찰요소의 수만큼 압력제어 솔레노이드밸브와 감압밸브형의 2차 스펴밸브로 구성되는 압력제어모듈로 설계하는 방식이다.

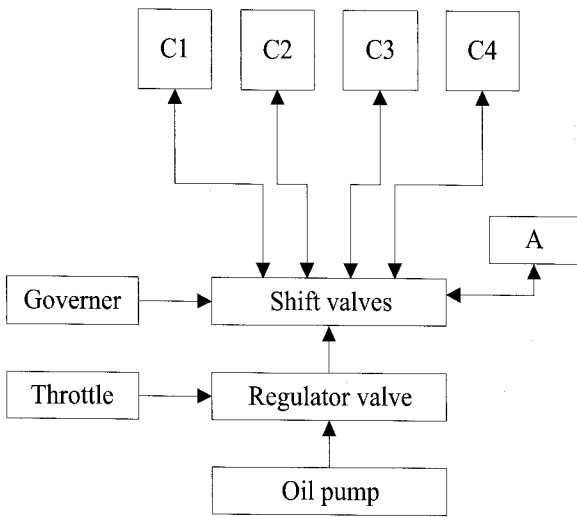
##### 3) 직접제어(direct pressure control)

각 마찰요소의 압력을 독립적으로 제어하는 측면에서는 독립제어형과 동일하나 제어유량이 큰 압력제어 솔레노이드밸브만을 사용함으로써 2차 스펴밸브 없이 솔레노이드밸브 제어유량만으로 클러치 피스톤의 압력을 제어한다. 직접제어형에서는 2차 스펴밸브가 제거되므로 밸브바디(valve body)의 설계가 매우 단순해지는 장점이 있다.

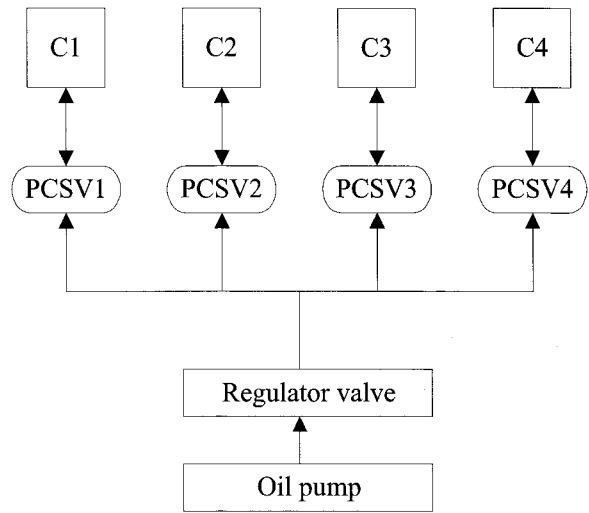
이상과 같이 분류된 자동변속기 유압시스템을 압력제어방식에 따라 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같으며 그림에 표시된 요소의 영문기호에 대한 부가적인 설명은 다음과 같다.

- C : clutch
- A : accumulator
- S : ON/OFF solenoid valve
- PWM : PWM solenoid valve
- PCV : pressure control valve
- PCSV : pressure control solenoid valve

변속제어기에 의한 전자제어가 개발되었던 초기에는 상대적으로 고가인 압력제어 솔레노이드를 하나만 사용하는 배분제어가 일반적이었으나 가격이 저렴하면서도 성능이 향상된 솔레노이드밸브가 개발됨에 따라 점차 독립제어형이 적용되고 있으며 최근에는 제어유량이 큰 비례제어 솔레노이드 밸브도 개발됨에 따라 직접제어형의 유압시스템도 개발되고 있다.

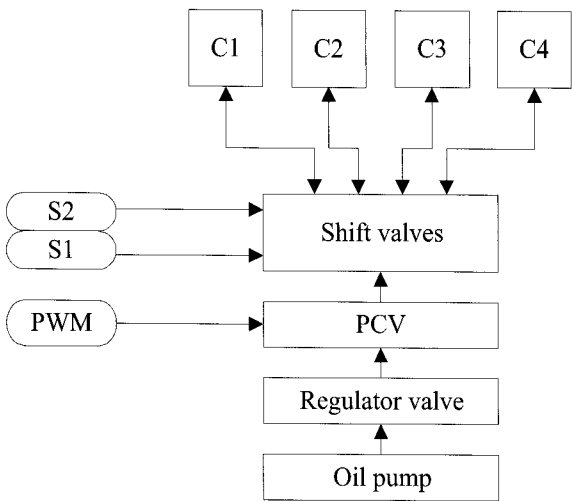


(a) pure hydraulic system

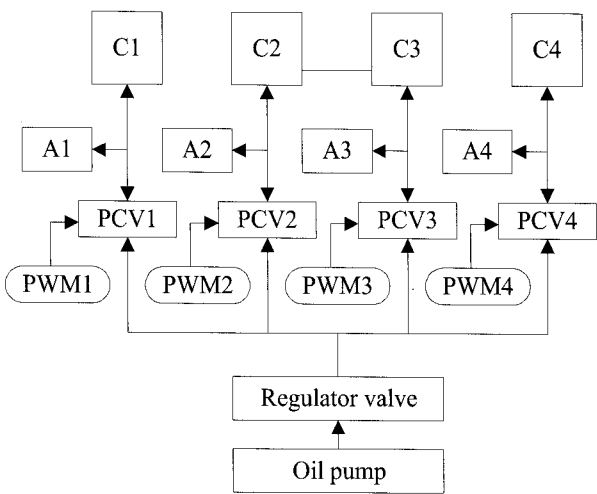


(d) independent direct pressure control

Fig. 1 Hydraulic control system design for A/T



(b) distributed pressure control



(c) independent pressure control

## 2.2 자동변속기용 솔레노이드밸브의 종류

자동변속기 유압시스템에 적용되는 솔레노이드 밸브는 전기력에 의하여 작동되는 밸브의 작동특성에 따라 ON/OFF 솔레노이드와 압력제어 솔레노이드로 구분되고 유로의 수에 따라 2-방향과 3-방향 솔레노이드, 밸브에 작용하는 스프링력에 의한 초기 위치에 따라 상시개방형과 상시폐쇄형으로 구분할 수 있다.

### 2.2.1 솔레노이드밸브 작동특성에 의한 분류

#### 1) ON/OFF 솔레노이드

솔레노이드 코일에 흐르는 전류의 유무에 따라 2 위치만이 가능한 밸브로서 유로를 변경하는 방향제어밸브 구동에 사용된다.

#### 2) PWM 솔레노이드

밸브에 인가되는 PWM 반송주파수로 운동하는 밸브에 의하여 압력을 변화시킬 수 있는 압력제어밸브이다. 스프링력과 전기력이 작용하는 밸브는 양극단에서만 안정된 상태(bi-stable)이므로 일정한 범위내의 PWM 듀티율에 대해서 밸브는 최대 변위를 이동하며 이에 따라 발생하는 압력도 밸브 기준압과 배출압 사이에서 변화되므로 매우 큰 맥동압(ripple pressure)이 발생되므로 경우에 따라서는 클러치 피스톤에 어큐뮬레이터를 병렬로 연결하여 평활된 압력으로 클러치를 제어하기도 한다. PWM 솔레노이드의 반송주파수는 대략적으로 100Hz 이하이며 변속기 유온이 낮은 경우에는 반송주파수를 낮춰 사용하기도 한다.

3) 비례제어 솔레노이드

코일에 흐르는 전류에 비례하여 제어압이 발생되며 밸브변위는 밸브에 작용하는 스프링력, 밸브에 피드백되는 출구 제어압에 의한 유압력, 전기력이 평형을 이루는 일정한 위치에서 압력을 제어한다. 따라서 비례제어 솔레노이드밸브는 PWM 솔레노이드밸브에서 발생하는 맥동압이 거의 발생되지 않으며 출구압력이 피드백되므로 전기력에 비례하는 압력이 안정적으로 발생하는 특성을 갖는다. 코일에 흐르는 전류는 PWM 구동방식으로 제어하며 보통 100Hz 이상의 높은 반송주파수로 구동한다. 비례제어 솔레노이드의 제어압은 오직 전기력에 의해서만 변화되므로 압력제어특성은 PWM 듀티율이 아닌 전류에 대해서 나타내고 전류에 의하여 밸브에 작용하는 힘이 변화되므로 VFS(variable force solenoid)라고도 한다.

2.2.2 유로 수에 의한 분류

1) 2-방향 솔레노이드

솔레노이드 밸브에서 형성되는 유로는 제어포트를 배출압측으로 연결하거나 차단하는 상태만이 존재하며 압력제어를 위해서는 제어포트가 오리피스를 통해서 밸브 기준압과 연결되어야 한다.

2) 3-방향 솔레노이드

솔레노이드밸브의 변위에 따라 제어포트는 밸브 기준압과 배출압으로 연결되는 유로를 형성하는 구조를 갖는다.

Fig. 2는 2-방향과 3-방향 솔레노이드밸브의 유압 기호를 나타낸다. 3-방향 비례제어 솔레노이드 밸브는 밸브변위가 연속적으로 변화되면서 출구 제어압이 밸브에 피드백되는 구조를 보여준다.

2.2.3 스프링력에 의한 초기 위치에 따른 분류

2-방향 솔레노이드의 경우에는 전기력이 인가되지 않은 상태에서 제어포트가 배출압과 연결된 상태이면 상시 개방형이고 반대로 닫힌 경우에는 상시 폐쇄형으로 분류하며 3-방향 솔레노이드에서는 전류가 인가되지 않은 상태에서의 제어압이 저압이면 상시 저압형이고 반대의 경우에는 상시 고압형으로 분류된다.

Fig. 3은 파일럿 압력을 발생시키는 2-방향 비례제어 솔레노이드밸브와 제어유량이 커서 직접제어에 적용될 수 있는 3-방향 비례제어 솔레노이드의 외형

을 나타내고 Fig. 4는 PWM과 비례제어 솔레노이드 밸브 내부구조의 예이다.

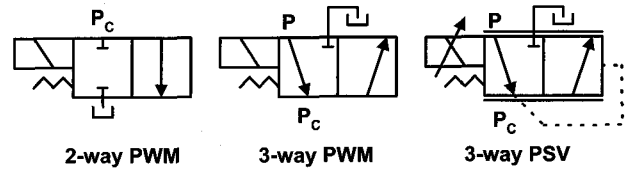


Fig. 2 Hydraulic symbols for solenoid valve

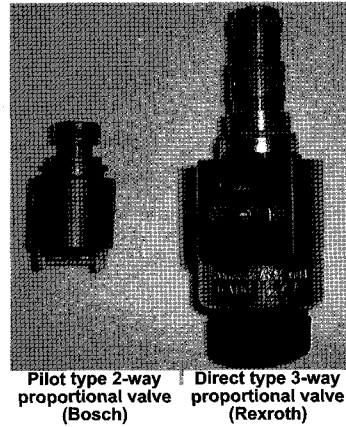
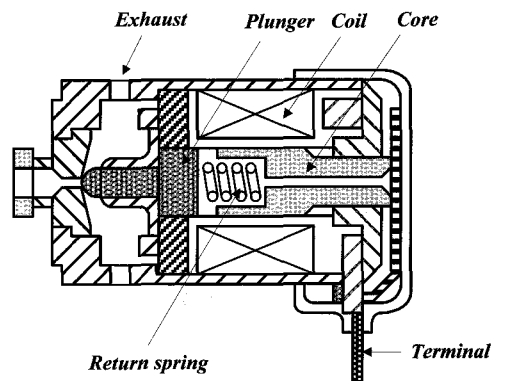
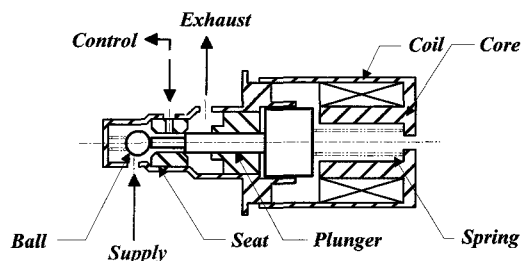


Fig. 3 Proportional control solenoid valves

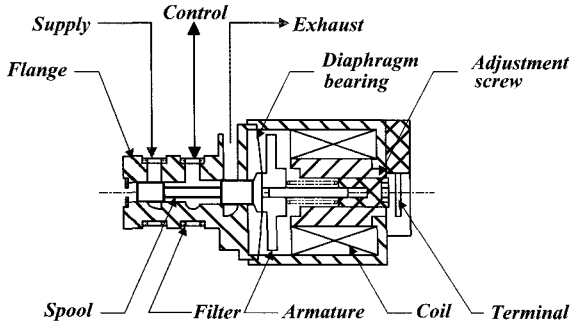
Fig. 5는 상시 고압형 3-방향 PWM 솔레노이드밸브에 대하여 실시된 정상상태 압력특성 시험결과를 예로 나타낸다.



(a) 2-way PWM solenoid



(b) 3-way PWM solenoid



(c) 3-way proportional solenoid

Fig. 4 Types of pressure control solenoid valve

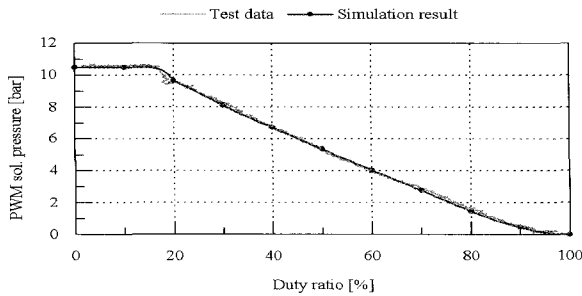


Fig. 5 Steady-state characteristics of 3-way PWM solenoid valve(filtered pressure)

전송된 바와 같이 자동변속기의 과도변속특성은 TCU의 변속제어 알고리즘과 더불어 압력제어 성능에 의해 결정되므로 솔레노이드밸브 성능은 변속품질에 매우 큰 영향을 준다. 비례제어 솔레노이드밸브는 가격이 다소 높은 반면에 출구 제어압이 피드백되는 구조로 인하여 유온 등의 작동환경 변화에 대해서 안정적이고 맥동압이 거의 없으며 높은 PWM 반송 주파수로 인하여 동특성 응답이 우수한 장점이 있다. 이에 따라 최근 자동변속기 개발에서는 비례제어 솔레노이드밸브의 적용이 점차 확대되는 추세에 있으며 독립제어형 또는 직접제어형 유압시스템의 개발이 시도되고 있다.

### 2.3 자동변속기용 솔레노이드밸브의 요구 사양

자동변속기에 적용되는 압력제어 솔레노이드밸브의 요구사양은 전기, 기계 및 유압적인 측면에서 기술될 수 있으며 압력제어와 관련된 주요 성능을 살펴보면 다음과 같다.

#### 2.3.1 정상상태 압력특성

PWM 듀티율(또는 구동전류)이 일정한 상태에서의 발생하는 제어압의 정특성으로 히스테리시스, 불

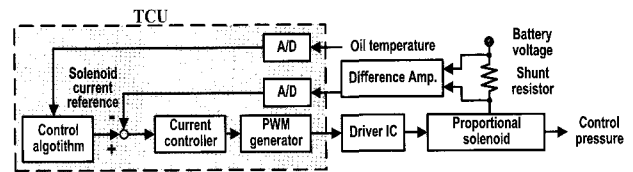
감대(dead zone), 선형성, 부하유량변화에 따른 압력 강하 특성, 온도변화에 대한 안정성 등으로 나타내어지며 정특성 시험은 램프파형의 PWM 듀티율을 매우 낮은 주파수(0.01Hz 정도)로 변화시키면서 측정된 제어압을 PWM 듀티율(또는 구동전류)에 대하여 표시하여 나타낸다.

#### 2.3.2 동특성

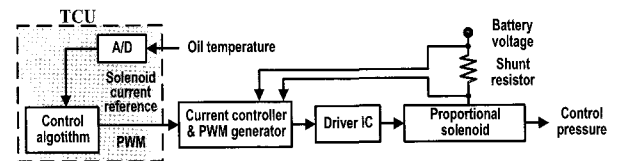
PWM 듀티율을 계단 또는 높은 주파수(대략 0.1Hz-2Hz)의 램프파형으로 변화시켰을 때 발생하는 제어압의 동적지연과 안정성으로 평가한다.

### 2.4 비례제어 솔레노이드밸브의 전류제어

비례제어 솔레노이드밸브의 제어압은 구동전류에 의하여 결정되므로 변속 시 안정된 압력제어를 위해서는 전류제어가 필수적이다. 밸브구동회로에서는 배터리 전압이 비례제어 솔레노이드밸브에 직접 연결되며 차량 배터리 전압은 충전상태에 따라 변화되므로 PWM 듀티율이 일정한 경우에도 구동전류는 변화하게 된다. 밸브구동전류를 제어하는 방식에는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 TCU에서 전류를 측정하여 밸브에 인가되는 PWM 듀티율 신호를 조절하는 방식과 전류제어 전용 IC를 채택하는 방식이 있으며 이러한 전류제어는 배터리 전압변화에 대한 보상기능을 수행한다. 유온이 변화되면 누유변화로 인하여 일정한 구동전류에서 발생하는 클러치 제어압이 다르게 되는데 이러한 경우에는 비례제어 솔레노이드밸브 구동전류의 기준값을 변화시켜 압력을 보상하게 된다.



(a) current feedback by TCU



(b) current feedback by dedicated driver

Fig. 6 PSV(Proportional Solenoid Valve) current control scheme

### 3. 솔레노이드밸브 성능시험기 설계

자동변속기에 적용되는 압력제어 솔레노이드 밸브의 정상상태 및 동적성능을 시험적으로 파악할 수 있는 기능의 성능시험기를 개발하였으며 이를 활용하면 PWM 솔레노이드와 비례제어 솔레노이드의 단품성능시험과 압력제어 솔레노이드와 2차 스펙밸브로 구성되는 압력제어모듈의 특성분석이 가능하다. 개발된 성능시험기의 주요 특징과 기능은 다음과 같다.

- (1) 마이크로 컨트롤러 : AVR ATmega8535(16MHz)를 이용하여 설계하였으며 제어주기는 5ms(200Hz)이다.
- (2) 0.1% 듀티율 분해능의 PWM 신호발생기능
- (3) PWM 반송주파수 선택기능: 최저 40Hz에서 최대 1.2kHz까지 1Hz 단위로 PWM 반송주파수를 설정할 수 있다.
- (4) 함수발생기내장: 스위핑(Sweeping) 주파수 0.01Hz~2.5Hz, 스텝 및 램프형 함수 발생
- (5) 비례제어 솔레노이드 전류측정 기능: Fig. 7과 같이 AD22057(difference amplifier) IC를 이용하여 설계하였으며 증폭된 전압은 A/D 변환을 통해서 마이크로 컨트롤러에서 측정한다.
- (6) 비례-적분 제어기에 의한 전류제어기능: 비례및 적분제어기의 이득은 시험대상 솔레노이드의 특성에 따라 사용자가 변경가능하다.
- (7) PSV 최대제어전류 설정기능: 비례제어 솔레노이드밸브에서 제어되는 전류의 최대값을 0.2A에서 1.2A까지 0.1A단위로 설정이 가능하다.
- (8) 수동 및 프로그램 시험모드 설정기능: 수동 시험모드에서는 사용자 조작에 의하여 솔레노이드밸브에 인가되는 PWM 신호의 듀티율(또는 구동전류)을 설정하고 프로그램 시험모드에서는 내장된 함수발생기의 함수과형에 의하여 압력이 발생하는 기능을 갖는다.
- (9) LCD 인터페이스
- (10) 2채널의 압력신호 10-bit A/D 변환기능
- (11) 직렬통신(57600 baudrate)을 이용하여 PC(LabWindows/CVI)에서 시험모드와 작동변수를 설정하고 시험데이터를 수집하여 저장하는 기능을 갖는다.
- (12) EEPROM을 이용한 PSV duty controller 작동상태변수 저장 및 복원기능

Fig. 8은 개발된 솔레노이드밸브 성능시험기를 나

타내고 Fig. 9는 PC에서 수행되면서 성능시험기의 작동상태를 조작하고 데이터를 수집하는 기능의 LabWindows/CVI 화면을 나타낸다.

### 4. 성능시험결과

개발된 성능시험기의 기능을 확인하기 위하여 렉스로스(Rexroth)사의 비례제어 솔레노이드밸브를 대상으로 정상상태 및 동적성능시험을 실시하였으며 시험대상 밸브의 주요 특성은 다음과 같다.

- 직접제어형 비례제어 감압밸브
- 구동전압: 26V
- 코일저항: 22.5Ω
- 최대전류: 0.7A
- 최대압력: 18bar
- 권장 초핑주파수(chopping frequency): 150Hz

Fig. 10은 성능시험장치의 구성을 나타내는 도식적인 그림이다. 시험대상 비례제어 솔레노이드밸브의 기준압은 릴리프 밸브에서 일정하게 제어되고 성능시험기에서는 설계된 시험모드에 따라 전류제어를 통하여 비례제어 솔레노이드밸브의 압력을 제어하도록

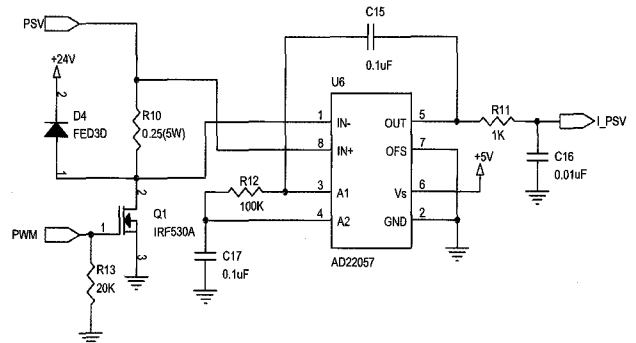


Fig. 7 Solenoid drive and current sensing circuit

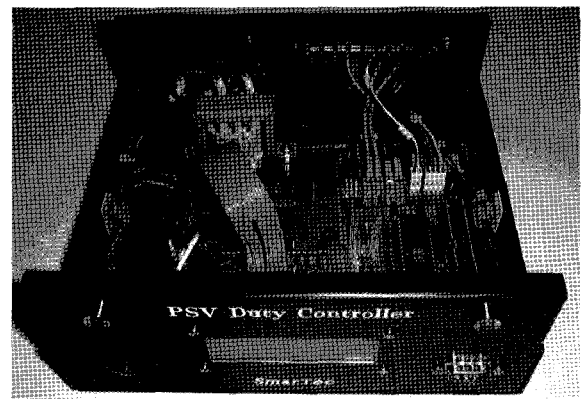


Fig. 8 PSV duty controller

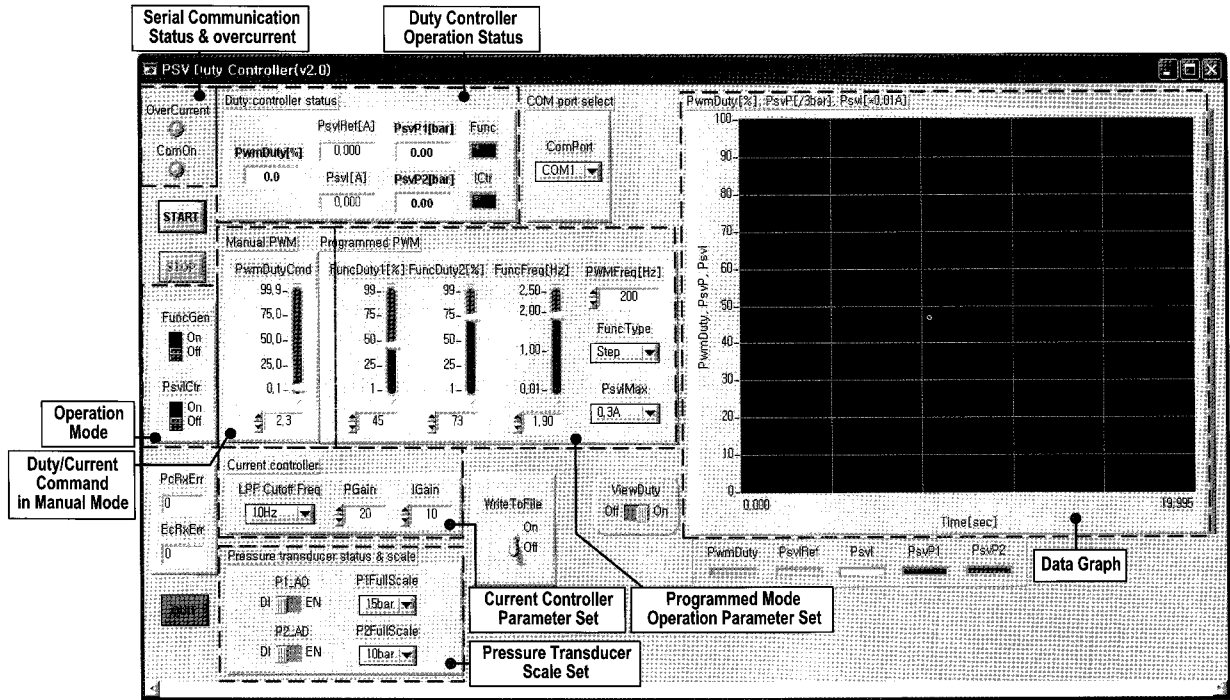
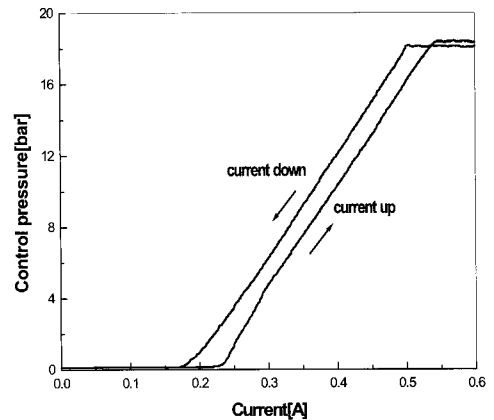


Fig. 9 PSV duty controller LabWindows/CVI front panel

구성하였다. 압력변환기는 센시스(SenSys)사의 증폭기 내장형을 사용하였으며 압력측정범위는 50bar이다. 성능시험 데이터는 마이크로 컨트롤러에 내장된 10bit A/D 변환기를 통하여 획득된 구동전류와 제어압을 직렬통신으로 PC로 송신하는 방식으로 설계하였으며 200Hz의 획득주기로 시험결과가 저장된다.

Fig. 11은 0%~100%의 PWM 듀티율을 갖는 0.01Hz의 램프함수로 밸브를 구동하였을 때 발생하는 제어압을 구동전류에 대하여 나타낸 정상상태 특성을 나타낸다. 선형성은 양호하지만 구동전류가 0.2A에서 0.5A인 구간에서만 제어압이 변화되며 약 2bar의 히스테리시스 특성을 나타내었다.



(a) steady-state pressure characteristics

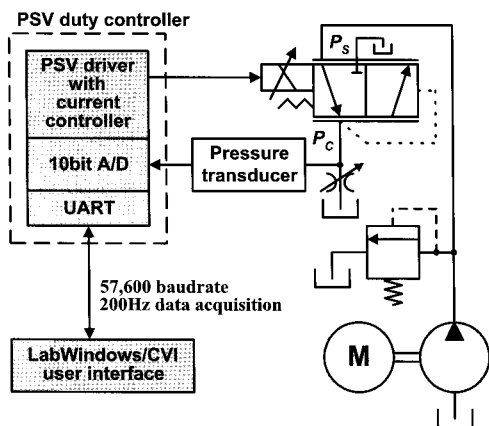
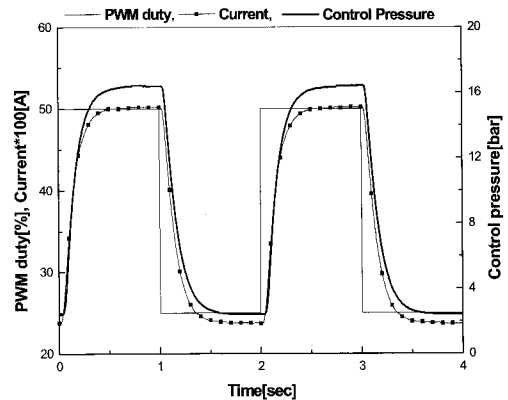


Fig. 10 Configuration of the valve test system



(b) step duty response

Fig. 11 Solenoid valve test result

비례제어 솔레노이드밸브에 대한 동특성 응답은 25%와 50%의 PWM 듀티율을 갖는 계단입력신호로 살펴보았으며 시험결과로부터 제어압과 구동전류는 모두 시상수가 0.15sec인 1차 시스템의 계단응답특성을 나타내었다. 구동전류와 제어압의 과도응답이 매우 유사하므로 구동전류와 제어압 사이의 동특성은 PWM 신호에 대한 전류의 동특성보다 매우 빠름을 알 수 있다. 따라서 비례제어솔레노이드의 동특성을 향상시키기 위해서는 구동전류가 신속하게 발생되도록 구동전압을 높이고 과도한 전류흐름을 방지하기 위하여 정상상태에서의 전류를 제한하는 방법이 적용되고 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 자동변속기에서 변속제어 기능을 담당하는 유압시스템에 적용되는 압력제어 솔레노이드밸브의 종류와 특성, 주요 요구 성능에 대해서 살펴보았으며 정상상태 및 동적성능의 시험평가에 활용될 수 있는 성능시험기를 마이크로 컨트롤러를 이용하여 개발하였다.

개발된 성능시험기를 이용하여 Rexroth사의 비례제어밸브를 시험평가하였으며 이를 통하여 설계된 기능을 검증하고 시험결과를 분석하였다. 개발된 솔레노이드밸브 성능시험기는 PWM 솔레노이드와 전류제어기능이 요구되는 비례제어 솔레노이드밸브에 대한 단품성능시험이 가능하도록 설계하였으며 파일럿 압력 솔레노이드와 2차 감압밸브로 구성되는 압력제어모듈에 대한 성능시험에도 활용할 수 있다.

## 참고 문헌

- 1) 조백현, "완전전자제어방식 자동변속기용 유압시스템 개발", 서울대학교 공학석사학위 논문, 1998.
- 2) 정규홍, 조백현, 이교일, "자동변속기용 펄스폭변조 솔레노이드 밸브의 동특성 식별", 대한기계학회 논문집(A) Vol. 21, No. 10, pp. 1636~1647, 1997.
- 3) 정규홍, 이근호, "자동변속기용 솔레노이드밸브 성능시험기 개발", 유공압시스템학회 2006 춘계학술대회논문집, pp. 158~163, 2006.