

# 자동차용 유압제어밸브의 기본구성 및 작동방식

## Basic Configurations and Working Principles of Automotive Electrohydraulic Control Valves

홍 예 선  
Yeh - Sun Hong



홍 예 선  
• 1955년 4월생  
• 자동차의 현가, 조향, 제동, 변속 등을 위한 유압비례제어 기술  
• 정회원, 한국과학기술연구원 로봇응용 및 유공압연구실장

### 1. 서 론

자동차의 제동장치, 조향장치, 자동 변속장치 등에 요구되는 큰힘을 얻기 위하여 유압식 작동방식이 응용되기 시작한 것은 이미 오래 전부터의 일이다. 이것은 유압식 구동장치가 중량당 출력비가 높고 응답특성이 좋으며 과부하에 대한 방지기능이 간단하게 이루어진다는 장점이 있기 때문이다.

최근들어 전기식 구동장치가 매우 발달되면서 유압식 구동방식을 전기식으로 대체하고자 하는 시도도 있으나 중량 또는 체적당 출력비 면에서 전기식 구동방식과 유압식 구동방식을 비교하면 두 방식에는 근본적으로 큰 격차가 있기 때문에 자동차의 제동장치, 조향장치, 자동변속장치, 현가장치 등과 같이 단위면적당 큰 힘의 제어 출력이 요구되는 자동차부품에는 유압식 구동방식의 응용이 앞으로 계속 일반화될 것이다.

지난 10여년간 눈부시게 발달한 반도체 제조 및 응용 기술은 자동차의 제동장치, 조향장치, 자동변속장치, 현가장치 등의 특성을 마이크로 컴퓨터를 사용하여 주어진 주행조건 및 운전조건에 따라 적절히 조절하는 것이 가능하게 해 주었다. 즉, 모든 복잡한 제어 신호처리가능을 전자제어기가 전담하게 되므로 기존의 기계적 구조를 크게 벗어나지 않고도 다양한 기능을 발휘할 수 있는 제어시스템을 구성하여 양산 실용화하는 것이 가능해진 것이다.

한편, 전자제어기에서 출력되는 전기적 신호로 위와 같은 자동차 부품들을 작동시켜 주는 유압식 구동장치를 제어하기 위해서는 전기적신호를 유압신호로 변화시켜 주는 요소, 즉 전기유압제어밸브가 반드시 필요하게 된다. 이 전기유압제어밸브의 구조 및 작동원리는 용도에 따라 여러 형태를 띌 수 있고, 원하는 특성을 만족시키는 적절한 밸브의 선택 내지는 개발은 전체 시스템의 개발에 있어서 매우 큰 비중을 차지한다.

본고에서는 우리나라에서도 전자제어식 제동장치, 조향장치, 자동변속장치, 현가장치 등의 개발을 시도하고 있는 현 시점에서 기술축적이 가장 취약한 분야라고 볼 수 있는 자동차용 전기유압밸브의 기본적인 메카니즘에 대하여 종합적으로 소개하고자 한다.

## 2. 자동차용 유압제어시스템의 기본 구성

그림 1은 자동차용 유압제어시스템의 기본적인 구성을 block diagram으로 표시한 것이다. 자동차용 유압제어시스템의 출력변수는 제동장치나 현가장치의 예에서 보듯이 기본적으로 주로 유압실린더의 작동압력이다.

전자제어기에서 출력되는 전기적 신호는 전압신호의 형태를 띠므로 전기유압밸브를 작동시키려면 전류증폭기에 의해 전류 신호로 변환되어야 한다. 전압신호를 전류신호로 변환시키는데 있어서는 전기유압밸브의 입력 임피던스에 의해 시간지연이 생긴다. 전기유압밸브는 전류신호에 의해 펌프로부터 유압실린더로 공급되는 유량을 변화시켜 주는데, 밸브내 운동질량이 갖는 기계적인 고유진동수 등에 의해 전류신호와 제어유량간에도 시간

지연이 발생할 수 있다. 유압실린더로 작동유가 유입되어 작동유가 압축되면 압력이 상승하게 된다. 이 압력 상승율은 작동유의 탄성계수, 작동유의 가압체적 등에 의해 영향을 받는다. 유압실린더 내의 압력은 구동력으로서 효과를 나타내는데, 이 힘이 브레이크 디스크에 마찰력을 주거나 차체를 현가하도록 응용될 수 있다. 즉, 제어 플랜트가 제동장치인 경우 바퀴의 회전속도를 측정하여 전자제어기로 하여금 록킹이 방지되는 알고리즘을 수행시킬 수 있을 것이고, 현가장치인 경우는 차체나 wheel hub의 가속도 등을 측정하여 진동감쇄를 제어할 수 있다.

자동차용 유압제어시스템의 제어방식은 전기유압 밸브의 작동방식에 의해 그 특성이 좌우되므로 이를 기준으로 분류하는 것이 일관된 체계를 얻을 수 있다.

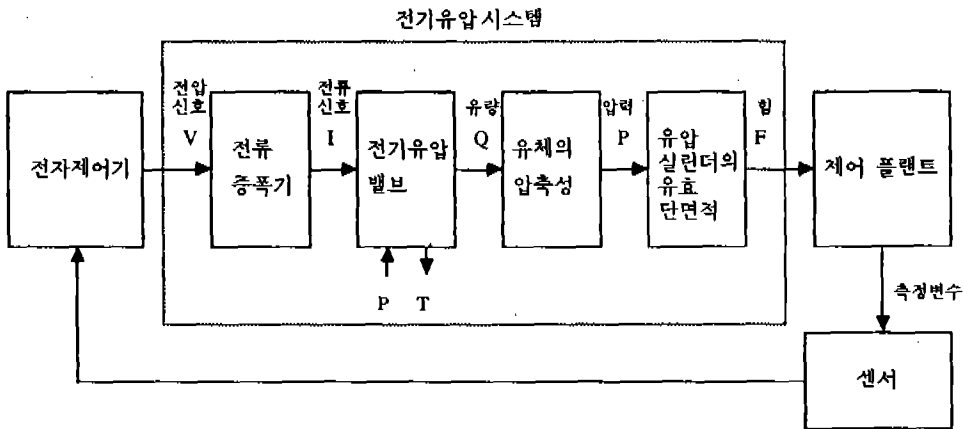


그림 1 전기유압식 제어 / 구동시스템의 구성

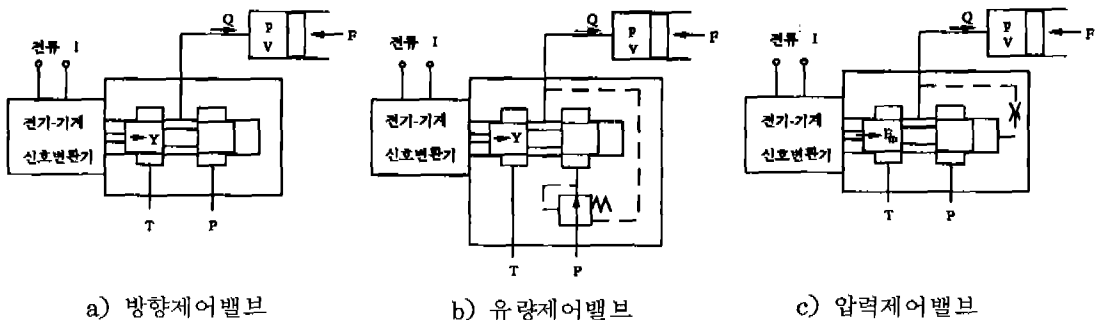


그림 2 전기유압밸브의 기능별 기본구조

### 3. 전기유압제어밸브의 구성

전기적 신호를 받아서 유압 신호로 변화시키는 데에는 직접변환방식과 간접변환방식이 있다. 직접변환방식은 electro-rheological fluid와 같은 특수한 작동유체를 사용하면 전기적신호로 작동유체에 국부적인 전자장을 걸어 줌으로써 작동유체의 점성을 직접 변화시킬 수 있는 원리를 응용한 방식이다. 간접변환 방식은 전기적 신호를 일차적으로 힘이나 변위와 같은 기계적 신호로 변환시킨 후, 이 기계적 신호에 의해 유압밸브의 개도를 변화시키는 방식이다. 직접변환방식은 아직 초보적인 개발단계에 있고 현재까지는 간접변환방식이 일반화되어 있다. 즉, 전기유압밸브의 가장 기본적인 기능은 작동유체가 흐르는 유로의 개도를 기계적으로 변화시키는 것이다.

전기유압밸브를 그 기능을 기준으로 하여 분류하면 그림 2와 같이 방향제어밸브, 유량제어밸브, 압력제어밸브로 구분할 수 있는데, 구조상 유량제어밸브와 압력제어밸브는 제어 변수(즉, 유량 또는 압력)를 각각 측정하여 설정치와 비교하는 기능이 방향제어밸브에 추가된 것으로 간주할 수 있다.

### 3.1 전기유압제어밸브용 신호변환기의 종류

전기유압제어밸브에는 전기적인 신호를 받아서 기계적인 신호로 변환시켜 주는 신호변환기가 요구된다. 이러한 신호변환기에는 직류 switching solenoid, proportional solenoid, torque motor, moving coil, stepping motor 등과 같은 electrodynamic 변환기, 그리고 piezo-actuator와 같은 electro-static 변환기가 있다(그림 3).

직류 switching solenoid는 스프링과 조합하여 2 position의 작동조건만을 얻을 수 있는 가장 간단한 구조의 전자석으로서 플런저의 변위가 증가함에 따라 자력이 반비례의 관계로 감소하는 특성을 띤다.

직류전자석에서 과생된 비례전자석은 유도 자력이 입력전류에 비례하되, 플런저의 변위가 변하더라도 일정하게 유지되는 특성을 띤다. 따라서 반력 스프링과 조합하면 플런저의 변위를 전류에 비례하게 변화시킬 수 있다. 비례전자석은 가격, 내구성, 보수 유지성 측면에서 차량용 유압시스템에 가장 적합한 비례신호 변환기라 할 수 있다.

토오크 모터(또는 리니어 모터)는 양방향 구동이 가능하다는 장점이 있으나 대칭특성을

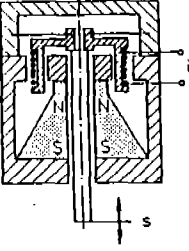
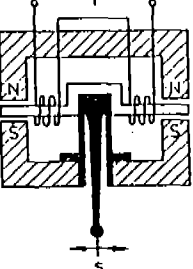
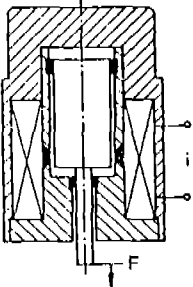
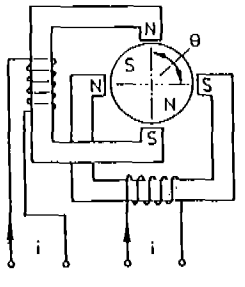
Moving coil	Torque-motor	Prop. solenoid	Stepping motor
			
0.2 - 5	0.02 - 4	10 - 30	소비 전력 (W)
1 - 2	1 - 2	3 - 6	선형 오차 (%)
100 - 200	100 - 300	10 - 40	주파수 응답 대역 (Hz)

그림 3 전기-기계 신호 변환기의 종류

연기 위하여 정밀가공을 해야 하므로 가격 및 보수관리 면에서 불리한다. moving coil은 구동 변위가 크고 선형성이 좋다는 장점이 있는 반면, 체적당 출력비가 낮다는 단점이 있다. 스텝 모터는 디지털 신호로 직접 구동할 수 있다는 큰 장점이 있으나 작동 전에는 항상 초기 위치를 확인해야 하고 슬립에 의한 변위오차가 누적되더라도 작동 중에는 보정할 수 없다. 최근들어 점차 실용화 시도가 활발해지고 있는 piezo-actuator는 구조가 간단하고 소비전력이 미소하며, 경제성도 좋은 반면, 유압밸브를 직접 구동할 수 있을 만큼의 변위를 얻으려면 크기가 매우 커진다.

### 3.2 전기유압밸브의 작동방식

전기유압밸브의 작동방식은 크게 비례제어 방식과 개폐제어 방식으로 구분할 수 있다.

#### 1) 비례제어방식

비례제어방식의 전기유압밸브에 있어서는 전기적 입력신호로 전기유압밸브의 출력변수를 주어진 범위내에서 無段으로 설정할 수 있고, 전기적 신호의 형태나 크기와 출력변수 간에는 일정한 함수관계가 성립된다. 그림 2에서 보인 밸브들이 이러한 기능을 갖는 경우, 비례제어밸브 혹은 서어보밸브라 부른다.

비례제어방식의 가장 대표적인 구성은 전자제어기에서 출력되는 디지털 신호가 D/A-변환기를 거쳐 아날로그 신호로 변환된 다음 전류증폭기에 의해 전류 신호로 변환되어 비

례전자석이나 torque motor, moving coil, piezo-actuator 등을 작동시킴으로써 작동유체의 유로를 교축해주는 것이다.

이때 전류증폭기 자체의 작동방식은 다시 아날로그 제어방식, PWM (pulse width modulation) 제어방식, bang-bang 제어방식 등의 형태로 구분할 수 있다(그림 4). 펄스 변조 방식은 전기-기계 신호변환기가 갖는 시간지연을 이용하는 것이므로 그 특성을 1차함수로 간주하였을 때의 시간상수에 의해 전류 변조특성이 결정된다. 예를 들어 직류 솔레노이드의 시간상수( $\tau_{coil} = L_{coil} / R_{coil}$  :  $R_{coil}$ =솔레노이드 코일의 저항,  $L_{coil}$ =솔레노이드 코일의 인덕턴스)는 자화도에 따라 감소하므로 bang-bang 방식에 의해 전류제어를 하면 전류의 변조 진폭은 일정하나 전류평균치의 절대적 크기에 따라 펄스 주파수가 증가한다. 반대로 PWM 방식에 있어서는 변조 펄스 주파수가 일정하나 전류평균치의 절대적 크기에 따라 변조진폭이 증가하게 된다.

반면에 D/A-변환기를 사용하지 않고 전자제어기가 직접 디지털신호로 전기유압밸브의 개도를 비례하게 제어할 수도 있다. 그 방법으로는

- a) 전기유압밸브의 밸브 구동에 스텝 모터를 사용하여 밸브의 원하는 변위에 해당하는 수 만큼 펄스 신호를 전자제어기가 출력시켜 주거나,
- b) 전자제어기가 펄스주파수 변조(pu -

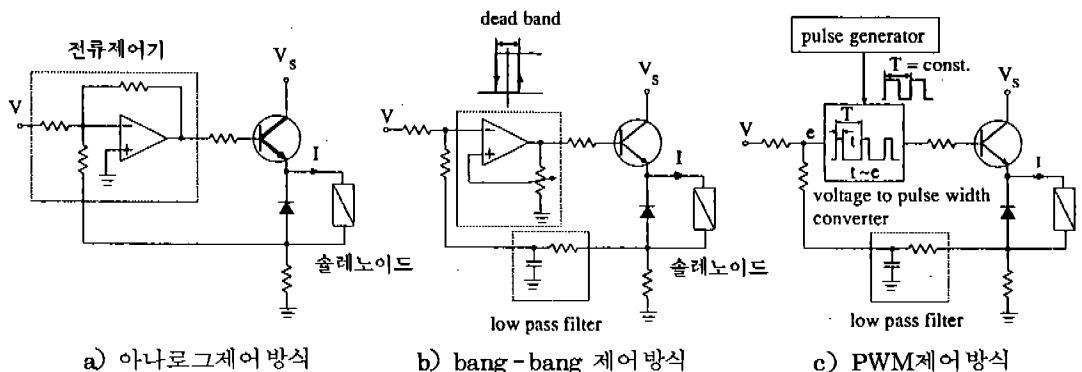
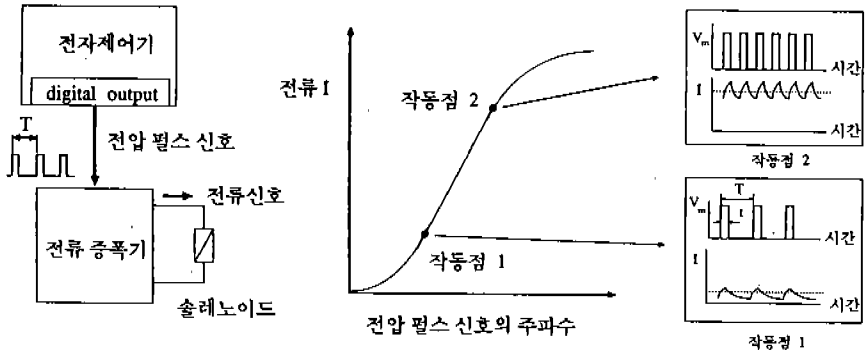


그림 4 전류 증폭기의 작동방식



- a) pulse frequency modulation의 신호흐름      b) pulse frequency modulation의 효과

그림 5 디지털 펄스 신호에 의한 Pulse Frequency Modulation

lse frequency modulation) 방식으로 전류증폭기에 펄스신호를 출력시키는 방법이 있다. 그림 5는 이 방식을 설명한 것으로서, 전자제어기에서는 사전에 결정된 알고리즘에 따라 펄스 주파수를 결정하여 펄스신호를 계속 출력시켜야 한다.

직류솔레노이드를 PFM 방식에 의해 제어하는 경우 솔레노이드 코일의 시간상수가 자화도에 따라 변하므로 펄스 주파수와 출력전류 간에는 일반적으로 엄밀한 비례관계가 성립되지 않는다. 이러한 비선형성은 필요에 따라서 전자제어기에서 software적으로 보상할 수 있다.

2) 개폐제어방식

개폐제어방식에 있어서는 전류증폭기와 전기유압 제어밸브가 두 가지 상태의 작동조건만을 갖는다. 즉, 전기유압밸브는 완전히 열리거나 완전히 닫히는 기능만을 갖는다. 유압시스템의 제어변수, 즉, 작동압력이 원하는 크기를 갖도록 제어하는 기능은 유압실린더로 유입되는 유량을 변조함으로써 얻어진다. 전기유압밸브를 얼마나 오래 열고 얼마나 오래 닫을 것인가를 결정하기 위해서는 제어 플랜트의 출력변수를 센서로 측정하여 제어오차를 전자제어기가 산출하여야 하고, 신호 출력의 시기는 PWM 제어방식이나 bang-bang 제어방식을 응용하여 결정할 수 있다(그림1참조). 따라서 이 작동방식에 있어서는 유량이나 압

력제어 기능이 밸브 자체에서 요구되지 않으므로 밸브의 구조는 그림 2의 방향 제어밸브와 같은 형태이면 충분하다. 그리고 전기-기계 신호 변환기로서도 직류 switching solenoid가 적합하다.

개폐제어방식에 있어서는 유압시스템의 1차 시간 지연을 이용하는 것이므로 유압시스템의 시간상수( $\tau_{hyd} = V_t / (2 \cdot K_q \cdot E_{oil})$ :  $V_t =$  유압실린더의 오일 체적,  $K_q =$  유압밸브의 유량 gain,  $E_{oil} =$  오일의 탄성계수)를 기준으로 변조 주파수를 정해야 한다. 과다하게 낮은 변조 주파수는 인간이 감지할 수 있는 기계적인 진동을 발생시키므로 바람직하지 않고 높은 변조 주파수를 실현시키려면 유압 밸브의 시간 응답특성이 좋아야 한다.

개폐제어방식에서는 전기유압밸브의 구조가 간단하다는 장점이 있으나 밸브가 지속적으로 개폐작동을 해야 하므로 내구성을 만족시키기 위한 구조를 갖추어야 한다. 그리고 밸브가 열린 상태에서는 유로 손실이 거의 없어야 하고 반대로 닫힌 상태에서는 유로의 밀폐가 완벽해야 유압동력의 손실이 최소화된다. 또한 밸브의 동적인 응답지연이 짧아야 전체 시스템의 안정된 작동은 물론 교축손실을 최대한 줄일 수 있다.

3.3 유압밸브의 정특성과 기본 설계

유압식 구동시스템의 기본적인 구성으로서 일

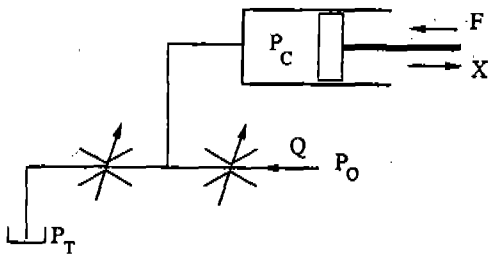


그림 6 hydraulic half bridge

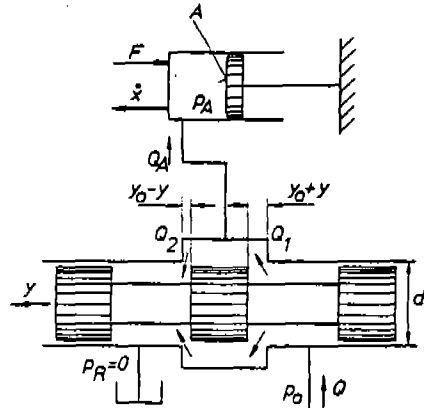


그림 7 3/3-way 방향제어밸브와 유압실린더로 구성된 단위 시스템

유압회로	특성선도	유압회로	특성선도
A : halfbridge with 2 variable orifices		D : halfbridge with 2 fixed orifices	
B : halfbridge with 1 variable orifice		E : equivalent circuit to halfbridge D	
		<p>밸브를 +y 방향으로 움직일 때</p> <p>  opening orifice   closing orifice                 </p>	
C : halfbridge with 1 variable orifice			

그림 8 조합가능한 half bridge의 종류 및 정특성

개 압력 chamber의 압력을 제어하려면 최소 두개의 오리피스가 필요하고 이것을 hydraulic half bridge라고 표시할 수 있다(그림 6). 이 half bridge 두개를 조합하여 full bridge를 구성하면 유압실린더나 유압 모터를 외력없이 양방향으로 구동할 수 있다.

두개의 가변 오리피스를 조합한 hydraulic half bridge의 기본 모델로서(A형) spool 형태의 3/3-way 밸브를 이용한 유압시스템은 그림 7과 같다. 이 시스템의 정특성은 다음의 식들을 이용하여 구할 수 있다.

가) 오리피스의 유량방정식:

$$Q_1 = B(y_0 + y) \sqrt{(p_0 - p_A)},$$

$$Q_2 = B(y_0 - y) \sqrt{p_A}$$

나) 연속방정식:  $Q_A = Q_1 - Q_2 = A \cdot x$

다) 힘 평형방정식:  $F = p_A \cdot A$

그 외에도 hydraulic half bridge는 가변 오리피스와 고정 오리피스를 어떻게 조합하는냐에 따라 그림 8에 도시한 구성이 가능하고, 이들 각각의 정특성은 위의 식들에 해당 조건을 대입함으로써 그림과 같이 도시화할 수 있다.

#### 4. 유압밸브에 작용하는 정적인 외력 및 구조적인 대책

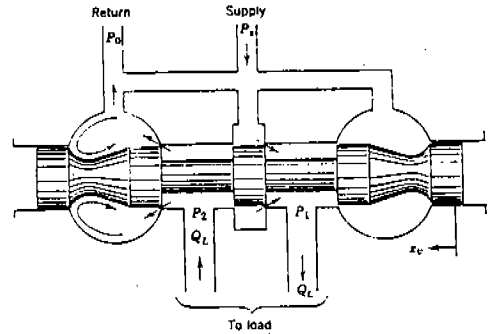
유압밸브의 사용조건상 부하압력이나 제어 유량이 높으면 밸브의 스푼, 포켓 등에 높은 유동력(flow force), 부하압력에 의한 반력 등이 발생되어 소출력의 전기-기계 신호변환기로는 작동이 불가능해진다. 따라서 밸브의 설계 단계에서 다음과 같은 대책에 대하여 검토가 되어야 한다.

a) 구동력이 높은 전기-기계 신호변환기를 사용하는 방법

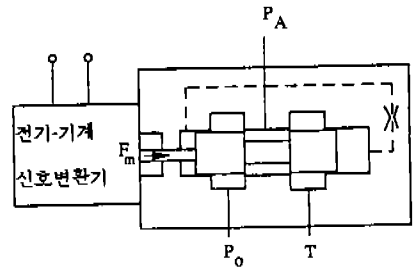
b) 밸브에서의 유동력, 부하압력에 의한 반력을 구조적으로 보상시키는 방법(그림 9 참조)

c) 밸브의 구조를 two-stage로 하여 밸브 자체 내에서 전기-기계 신호 변환기의 구동력을 유압식으로 증폭시키는 방법

a)와 b)의 방법은 전기-기계 신호 변환기 로 밸브를 직접 구동시키는 single-stage 형



a) 유동력이 보상된 4/3-way 방향변환밸브



b) pressure balanced 비례감압밸브

그림 9 flow force compensation과 pressure balance의 일례

태의 밸브에 해당되는 것으로서, a)의 방법은 밸브의 구조가 간단해 지나 전기-기계 신호 변환기의 전력소비가 높다는 단점이 있다.

b)의 방법은 반력 보상이 효율적으로 이루어지면 낮은 출력의 전기-기계 신호 변환기를 사용할 수 있으나 구조가 복잡해진다. 이러한 single-stage 밸브는 높은 주파수의 응답특성을 얻을 수 있으나 밸브의 응답특성 자체의 진동감쇄에 대한 특별한 대책이 요구된다.

Tow-stage 밸브는 매우 높은 부하조건에서도 사용할 수 있으나 원하는 성능을 얻을 수 있는 설계가 쉽지 않고 pilot-stage의 작동을 위한 밸브 자체에서의 동력손실과 오일의 오염에 민감한 점 등을 감수해야 한다.

#### 5. 자동차용 전기유압밸브의 응용사례

그림 10은 3/3-way 방향제어밸브를 이용한 개폐제어식 유압시스템의 일례로서 승용차용 Antilocking-Brake-System의 구성을 보인 것이다. 전체 시스템은 PWM 방식으

로 제어되고 펄스신호의 duty ratio를 결정하는 것은 차륜 속도의 변화로부터 감지한 차륜의 슬립율이 원하는 범위에 들도록 결정 한 제동압력의 변화 구배를 기준으로 한다.

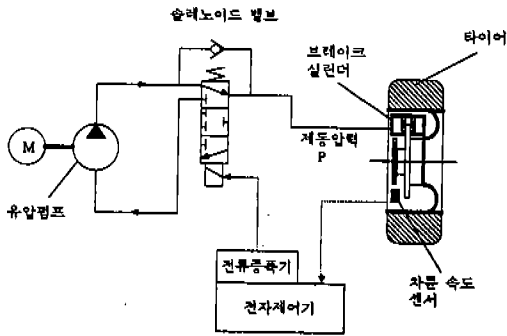


그림 10 ABS의 개념적 도시

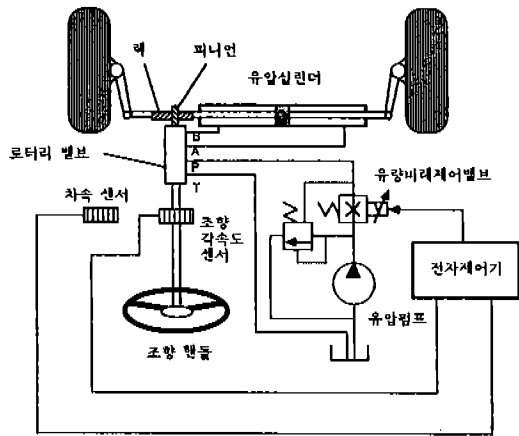


그림 11 EPS의 개념적 도시

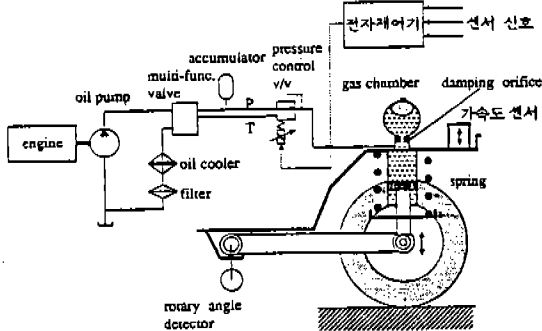


그림 12 ASS의 개념적 도시

그림 11은 비례제어식 유압시스템의 일례로서 승용차용 유량제어식 Electronic Power Steering의 구성을 보인 것이다. Power Steering의 로터리 밸브로 공급되는 작동유의 유량을 제어해 주는 밸브는 전자제어기에서 명령받은 크기 만큼만 펌프의 토출유량을 통과 시킨다. 여기에서 유량비례제어밸브는 자체 구조상 통과유량을 직접 감지하여 제어하는 기능을 갖는다(그림 2 참조).

그림 12는 비례제어식 유압시스템의 다른 일례로서 승용차용 Active Suspension System의 구성을 보인 것이다. 여기에서 전기유압 밸브는 전자제어기에서 명령받은 만큼의 크기로 유압실린더의 작동압력을 비례하게 제어해 주는 비례감압제어밸브로서, 이 경우에는 작동압력을 감지하여 제어해 주는 기능이 전기 유압밸브에 내장된다(그림 2 참조).

## 6. 자동차용 전기유압밸브의 선택

자동차용 전기유압밸브는 전체 시스템의 작동방식에 대한 기본 개념이 정해지면 신뢰성, 신호응답 특성, 가격 등을 고려하여 결정해야 하는 것이 원칙이나 주로 개폐제어식을 위한 직류전자석과 비례제어식을 위한 비례전자석 중 어느 것을 사용할 것인가가 밸브 선택의 핵심이라고 볼 수 있다.

### 1) 제어방식 측면

개폐제어방식은 밸브의 작동빈도가 높기 때문에 내구성이 보장되어야 하나 밸브자체에서 유체를 교축하지 않으므로 유체 손실에 의한 온도 상승이 적다. 따라서 솔레노이드 및 밸브의 설계가 비교적 용이하다.

비례제어방식은 밸브가 원하는 개도에서 지속적으로 유지되므로 작동빈도는 상대적으로 낮으나 유체의 지속적인 교축에 의한 동력손실이 불가피하고 따라서 주변 작동온도가 주된 설계인자가 될 수 있다. 특성면에서는 선형성, 내온성, 동적인 응답특성 등이 보장되어야 하므로 설계가 쉽지 않다.

### 2) 밸브의 구조 측면

스플 형태의 밸브는 셋이상의 유로가 요구



될 때에 유리하나 교축부위의 대칭성, 중립누설(null leakage), center condition 등을 고려한 정밀가공 및 성능검사는 가격 상승의 요인이 된다. 그리고 유체의 오염에 의해 오작동을 일으키기 쉽다. 포켓 형태의 밸브는 구조가 간단하고 단힘 상태에서는 완벽한 밀폐 특성을 얻을 수 있으나 유로의 수에 한계가 있고 밸브의 응답특성에 있어서 진동감쇄 특성이 약하기 때문에 기본적으로 개폐제어 방식에만 적합하다.

자동차용 유압밸브는 사용조건상 대부분의 경우 single-stage 형태의 구조로서 성능을 만족시킬 수 있고 신뢰성이나 경제성, 보수성을 고려할 때 가능한 한 single-stage 형태의 구조를 사용한 것이 바람직하다. 전기-기계 신호변환기의 전력 소모를 최소화하기 위해서는 부하압력이나 유동력의 보상이 효과적으로 이루어져야 하는데 이것이 밸브 설계

의 성패를 좌우한다고 볼 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. W. Backe, "Servohydraulik", 1984, Aachen 공대 강의교재
2. Y. S. Hong, "Berechnug, Verbesserung und Weitentwicklung von Proportionalmagneten als elektromechanischer Signalumformer für Proportionalventile", 1986, Aachen 공대 박사논문.
3. 홍예선, "승용차의 single wheel 에 대한 Antilocking - Brake - System의 구성 및 test-rig 를 이용한 제동실험", 한국자동차공학회지 제 12 권, 5 호, 1990.
4. 홍예선, "전자제어식 조향장치의 개발", '90 한국자동차제어학술회의.