

## 피에조밸브를 적용한 전자유압브레이크의 압력제어

°독고 종훈\*, 박귀태\*\*  
고려대학교 지능시스템연구소

### Advanced Pressure Control of Piezoelectric Valve on Electro-hydraulic Braking

Jong Hun Docko, Gwi Tae Park  
Intelligent System Research Lab., Korea Univ.

**Abstract** - As a intelligent valve piezoelectric valve is applied to various fields of application. Piezoelectric valves have fast response time and good linearity for pressure control but its hysteresis displacement by its stack actuator influences on pressure control in electro-hydraulic braking. Solenoid valves are traditional element to control hydraulic pressure but this paper proposes piezoelectric valve for brake pressure control with hysteresis compensation.

위하여 그림1과 같은 간략화된 단일 채널의 모델을 구성해 볼 수 있다. 실린더의 볼륨은 유입되는 유량 Q1에 의해서 증가되며 이는 실린더 변위가 x만큼 이동하므로 브레이크 패드를 브레이크 라이닝에 밀착 시키게 된다. 반대로 Q2를 증가 시키면 브레이크 실린더의 볼륨이 감소하며 이는 x가 감소하게 되고 빠진 유량은 유압펌프에 의해서 다시 마스터 실린더로 리턴된다.

#### 1. 서 론

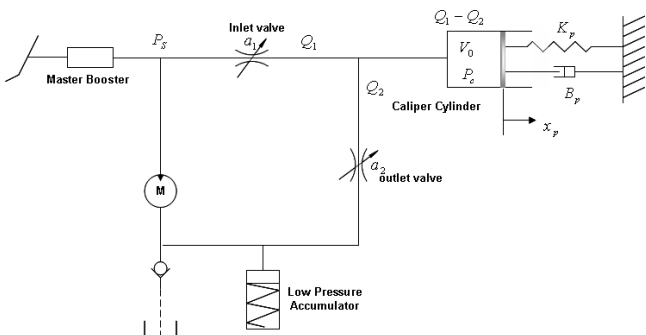
빠른 응답성과 선형성을 가지는 피에조 밸브는 현재 다양한 분야에서 이용되고 있으며 그 범위를 넓혀가고 있다. 기존의 솔레노이드 밸브는 솔레노이드 코일의 특성상 전류에 의한 전자력을 형성하는데 코일의 저항과 인덕턴스에 의한 지연시간으로 상대적으로 느린 응답성을 가지며 선형성을 증가시키기 위해서는 효율이 떨어지는 단점을 들 수 있다. 반면 피에조 밸브는 적은 충전전류로 빠른 시간 내에 선형성을 가지도록 밸브 설계가 가능하다. 이를 전자제어 브레이크 시스템에 사용할 수 있는데 이 경우 정확한 압력제어를 위해서 피에조 밸브가 가지는 히스테리시스를 개선할 필요성이 있다. 본 논문에서는 히스테리시스를 개선한 피에조밸브를 전자제어브레이크 적용하여 압력제어의 정확성을 높였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 피에조 밸브를 적용한 전자유압 브레이크 시스템

전자유압 브레이크 시스템은 기본적으로 각 자동차 휠 실린더에 전달되는 마스터 실린더의 브레이크 압을 제어함으로써 차량의 브레이크 힘을 조절할 수 있도록 하여 휠의 Locking을 방지하거나 적절한 차속을 유지하게 하는데 사용 될 수 있다. 이러한 브레이크 시스템에서 사용되는 밸브는 유로의 오리피스를 제어함으로써 압력 기울기를 제한 하는데 특히 Inlet valve의 오리피스를 가변함으로써 브레이크 실린더의 압력을 비례적으로 제어 할 수 있다.

그림1에서는 운전자가 브레이크 페달을 밟게 되면 약 150bar의 압력이 발생되고 이는 Inlet valve의 오리피스를 통과하여 브레이크 실린더에 유압이 전달되는 형태의 단일채널 전자유압 브레이크 시스템으로 브레이크 실린더의 압력을 낮추고자 할 때 outlet valve를 열게 되면 브레이크 실린더의 스프링이 작용하여 패드를 밀어내면서 브레이크 힘이 작아지게 된다



〈그림 1〉 단일채널 브레이크 유압회로

##### 2.1.1 브레이크 모델[2]

피에조 밸브의 오리피스 a1을 조정하여 브레이크 압력 제어를 하기

$P_s$	hydraulic line pressure
$P_c$	caliper chamber pressure
$x_p$	caliper piston displacement
$V_0$	initial chamber volume
$Q_1$	flow rate from inlet valve
$Q_2$	flow rate from outlet valve
$a_1$	orifice area for inlet valve
$a_2$	orifice area for outlet valve
$a_p$	caliper piston area
$M$	mass of the piston
$B_p$	damping coefficient
$K_p$	effective spring constant
$x(s)$	piezoelectric valve spool displacement
$v$	piezoelectric valve drive voltage
$m$	valve spool mass

그림1에서 브레이크 유입되는 유량과 브레이크 실린더의 변위에 대하여 운동방정식을 유도하면,

$$M_p \ddot{x}_p + B_p \dot{x}_p + K_p x_p = P_c \cdot a_p - F_{k0} \tag{1}$$

$$Q_1 - Q_2 = a_p \dot{x}_p + \frac{V_c + V_0}{\beta} \frac{dP_c}{dt} \tag{2}$$

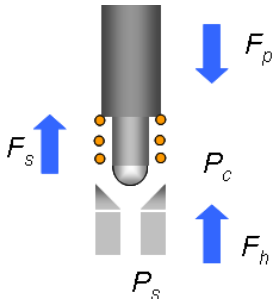
$$V_c = a_p \cdot x_p \tag{3}$$

$$Q_1 = C_d \cdot a_1(x(s)) \sqrt{\frac{2 \cdot (P_s - P_c)}{\rho}} \tag{4}$$

$$Q_2 = C_d \cdot a_2(x(s)) \sqrt{\frac{2 \cdot P_c}{\rho}} \tag{5}$$

여기서 오리피스 면적은 (4),(5)식에서 볼 수 있듯이 피에조밸브 스풀의 변위의 함수가 되어 변위에 따라 유량을 변화시킬 수 있다. Inlet valve는 Normal Open type이므로 변위가 최대가 될 경우 유량은 최소가 되

고 변위가 최소 일 때 유량이 최대가 된다. 반대로 Outlet valve는 Normal Close type이므로 변위가 최대일 때 유량이 최대가 되고 변위가 최소일 때 유량이 최소가 된다.  
그림2는 피에조 밸브에 미치는 힘을 표시한 것으로 운동방정식을 유도하면 다음과 같다



<그림 2> 피에조 밸브 모델

**Piezoelectric Force:**  $F_p = K_p \cdot v$

**Spring Force:**  $F_s = K_s \cdot (x + x_0)$

**Hydraulic Force:**  $F_h = A \cdot (P_s - P_c) - F_{flow}$   
 $= A \cdot \Delta P - 2Cd \cdot Cv \cdot A \cdot \Delta P \cdot \cos\theta$   
 $= K_c \cdot \Delta P$

$$m \cdot \ddot{x} + b\dot{x} + K_s \cdot x = F_p - F_h - K_s \cdot x_0, 0 \leq x \leq x_{Max} \quad (6)$$

밸브 스펴의 질량이 작고 마찰력이 무시할 수 있다고 가정하고  $F_p \gg F_h$ 이므로 식(6)은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

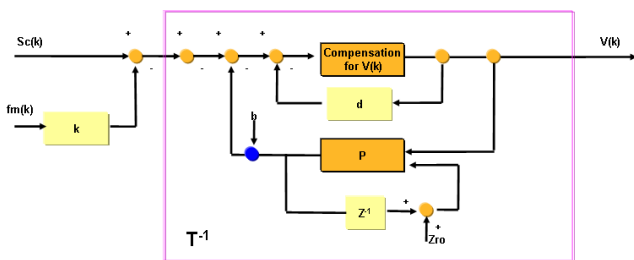
$$K_s \cdot x = K_p \cdot v - K_s \cdot x_0$$

$$x = K_p / K_s \cdot v - x_0, 0 \leq x \leq x_{Max} \quad (7)$$

식(7)에서와 같이 스펴의 변위는 피에조 입력전압 v에 비례하게 된다.

**2.1.2 피에조 밸브의 히스테리시스 보상**

피에조 밸브의 스펴변위는 입력전압에 비례하는데 식(4)에서 유량은 이 변위의 함수 이므로 유량을 조절하여 압력 Pc의 증가율 및 감소율을 제어 할 수 있는데 히스테리시스에 의하여 변위가 영향을 받게 되면 제어 하고자 하는 유량을 맞추기 힘들기 때문에 다음과 같은 히스테리시스 역변환 모델을 구성하였다.[3]



<그림 3> Hysteresis T 역변환 모델

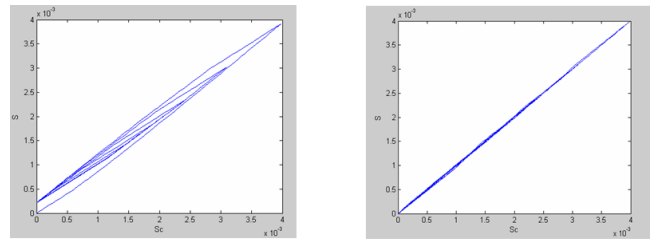
피에조 소자의 변위는 Creep 효과와 Hysteresis 효과에 의하여 영향을 받는데 Creep효과는 Hysteresis효과에 비하여 매우 작기 때문에 여기서는 Hysteresis 효과만을 고려하여 이산시간 역변환 모델을 구성하였다. v(k)는 피에조 밸브 구동 전압이며 Sc(k)는 기준변위로 피에조 밸브의 변위 x는 Sc의 함수가 된다. fm(k)는 Hydraulic flow force에 의한 외력으로 볼 수 있다.

P는 play operator이며 6개 b값을 사용하여 hysteresis 역모델을 구성하였다. 출력 v(k)는 히스테리시스를 고려한 전압이 발생되기 때문에 피

에조 소자에 인가될 경우 변위에 대한 Hysteresis를 보상한다. 실제 출력변위는 s로 표현한다.

**2.2 모의시험**

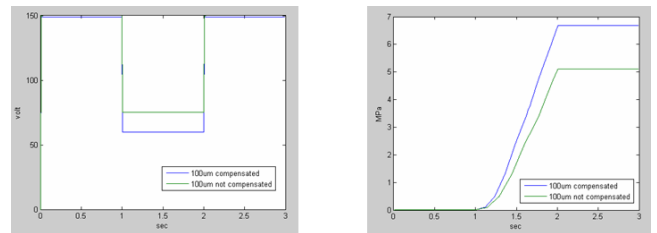
앞의 브레이크 모델, 밸브모델과 히스테리시스 보상 로직을 적용하여 브레이크 실린더 압력의 변화를 고찰하기 위해 다음의 조건으로 Simulation을 실시하였다



Output displacement vs Desired displacement before compensation / Output displacement vs Desired displacement after compensation

<그림 5> T역변환 모델에 의한 히스테리시스 보상

- Target : 100um piezoelectric valve displacement
- Condition
  - Master pressure : 15MPa
  - Valve open time : 1sec
- Voltage command
  - Compensated voltage : 60V
  - Uncompensated voltage : 75V



Valve open voltage command / Cylinder Pressure

<그림 6> 100um spool 변위 인가시 브레이크 실린더 압력변화

**3. 결 론**

본 논문에서는 전자유압 브레이크의 피에조 밸브를 적용할 경우 문제점의 하나인 히스테리시스를 개선하기 위한 방안을 모의시험을 통하여 구현해 보았으며 향후 피에조 밸브의 실제 적용시 활용할 수 있을 것으로 보인다.

**[참 고 문 헌]**

[1] Xuele Qi, Jian Song and Huiyi Wang, "Influence of Hydraulic ABS Parameters on Solenoid Valve Dynamic Response and Braking Effect". SAE 2005-01-1590  
 [2] Qingyuan Li, Keith W. Beyer and Quan Zheng, "A Model-Based Brake Pressure Estimation Strategy for Traction Control System". SAE 2001-01-0595  
 [3] Klaus Kuhnen, Hartmut Janocha, "Operator-Based Compensation of Hysteresis, Creep and Force-Dependence of Piezoelectric Stack Actuators". 2000 IFAC  
 [4] Kuhnen, K., Janocha H., "Compensation of the Creep and Hysteresis Effects of Piezoelectric Actuators with Inverse System". 1998 Proc. of Int. Conf. on New Actuators 98. Messe Bremen GmbH. pp. 309-312