

# 전극길이 변화에 따른 실린더 형태 ER밸브의 성능고찰

전 영 식\*

## Performance Investigation of Cylindrical-Type ER Valves With Different Electrode Length

Young-Sik Jeon\*

### Abstract

This paper presents performance analyses of three types of the cylindrical-type ER(electro-rheological) valves, which have different electrode length and width but same electrode area. Following the composition of silicone oil-based ER fluid, the field-dependent yield stresses are obtained from experimental investigation on the Bingham property of the ER fluid. The ER valve which is dependent on the applied electric field is devised and its theoretical model is derived. On the basis of the pressure-drop analysis, three types of the ER valves are designed and manufactured. After experimentally evaluating field-dependent pressure drops, PI controller is formulated to achieve tracking control on desired pressure drop. The controller is then experimentally implemented and tracking control performance is presented in order to demonstrate superior controllability of the ER valve. In addition, the response characteristic of the ER valve with respect to the excitation frequency of the electric fields is provided to show the feasibility of practical application.

Keywords : ER Fluid(전기유동유체), ER Valve(ER 밸브), Pressure Drop(압력강하), Electric Field(전기장), Yield Stress(항복응력), PI Controller(PI제어기)

### 1. 서론

유압시스템은 다른 동력전달시스템과 비교할때 자중에 비하여 매우 큰 힘을 낼 수 있고, 시스템의 안정성과 직결되는 댐핑특성이 우수하기 때문에 산업현장에서 많이 이

용되고 있다. 그 중 서보밸브시스템은 전기적, 기계적 신호 입력을 받아서 유체 흐름을 제어하는 시스템으로 유압을 이용한 고속제어시스템에 없어서는 안될 장치이다. 최근 고도의 산업화에 편승하여 모든 산업시스템이 고속, 고정밀화되는 추세에 따라 유압시스템도 이에 따르는 성능

\* 유한전문대학 금형설계과

의 향상이 요구됨으로, 이에 중심이 되는 서보밸브시스템의 성능향상에 많은 연구가 이루어지고 있다. 기존 서보밸브시스템은 유체의 압력과 유량을 기계적인 이동장치에 의해 조절하여 대상 시스템의 전달력을 제어한다. 그러나 기존 서보밸브시스템에서는 스톱이라는 기계적 장치가 갖는 응답 지연과 비선형성은 유압시스템의 고속·고정밀화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서, 최근에는 이러한 문제점을 극복하는 일환으로 소위 스마트(smart)유체라 불리는 ER(electro-rheological; ER)유체를 작동유체로 하여 빠른 응답성과 정밀한 압력 가변성을 장점으로 하는 새로운 밸브시스템(이하 'ER밸브'라 표현)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

ER유체는 부하되는 전기장의 강도에 따라 역학적 특성이 급변하는 유체를 말하며, 외면상 가장 두드러진 특징은 전기장 무부하시 액체상태에서 전기장 부하시 고체 상태로 상변화(phase change)하는 것이다. 이를 역학적 관점에서 표현하여보면 전기장 무부하시의 랜덤 구조를 갖고 있던 뉴토니안(Newtonian)유체가 전기장을 가하면 체인형 구조를 갖게 되어 항복전단응력을 갖는 빙햄(Bingham)유체로 변화하게 된다. 이때 발생하는 ER유체의 항복전단응력은 부하되는 전기장의 함수가 되며, 이 전기장을 조절함으로써 밸브시스템에서 요구되는 압력의 변화를 연속적으로 얻을 수 있다. 그리고 전기장에 대한 ER유체의 반응은 매우 빠르며, 상변화에 요구되는 전기장은 높으나 소요되는 전류는 매우 낮으므로 소비전력이 낮은 장점을 갖고 있다.

설계 및 제작 측면에서 볼 때, 기존 서보밸브장치는 복잡하고 정밀한 부품들로 구성되어 있는 반면에 ER밸브는 기계적 이동장치없이 압력과 유량을 조절하기 위한 전극만이 필요하다. 다시 말하여 작동기 및 밸브가 하나의 단일구조로 형성되어 있어 설계의 단순화와 이에 따른 경제적 이득을 꾀할 수 있다. 한편 제어성 측면에서는 요구 압력과 유량을 단지 전기장만의 조절로 연속적인 제어가 가능하기 때문에 신뢰성과 정밀성이 높은 다양한 제어이론을 적용할 수 있는 폭 넓은 자유도가 보장된다. 그러나 ER유체의 개발초기에는 정확한 ER효과 메커니즘 현상에 대한 이해 부족으로 인하여 많은 성과를 얻지 못하였으나, 1980년대에 들어 이에 대한 심도 있는 연구결과와 전기공학, 전자공학 그리고 자동화 기술의 발달과 더불어 고전압의 전기장을 발생시킬 수 있는 장치와 소재들이 개발됨에 따라 ER유체에 대한 연구가 중흥기를 맞고 있다. 영국, 일본, 미국을 비롯한 여러 선진국에서 우수한 ER유체와

ER유체의 특성을 이용한 현가장치, 제진대, 엔진마운트 등의 가변감쇠기구<sup>1)~3)</sup> 및 지능구조물<sup>4)</sup>에 대한 응용연구가 자동차산업 및 군수산업을 비롯한 많은 분야에서 활발히 진행되고 있다.

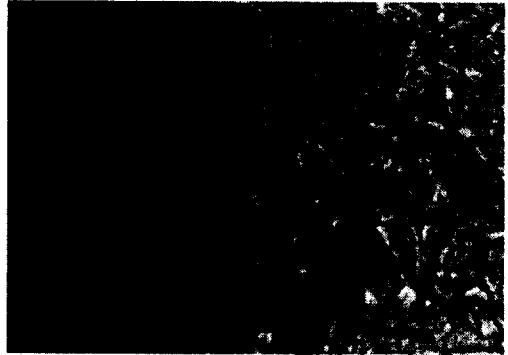
ER밸브에 대한 연구동향을 살펴보면, Simmonds<sup>5)</sup>는 평판형의 ER밸브를 제안하여 전기장에 따른 압력강하를 고찰하였고 이를 바탕으로 실용화를 위한 문제점과 설계 방향을 제시하였다. Brooks<sup>6)</sup>는 ER밸브를 이용한 유압회로를 구성하여 성능시험을 수행하였으며 이를 응용한 연구분야에 대하여 언급하였다. Nakano<sup>7)</sup> 등은 평판형 밸브를 통과하는 ER유체를 하겐-포아젤(Hagen-Poiseuille) 흐름으로 해석하고 전기장 부하시의 압력강하에 대한 과도응답과 ER유체의 압축성 효과를 고찰하였다. Whittle<sup>8)</sup> 등은 전기장 부하에 따른 압력강하특성을 고찰한 후 ER밸브시스템을 선형 2차 시스템으로 모델링하였다. 한편 국내에서도 다단 실린더형 ER밸브를 제안하여 전기장 세기와 유량에 따른 압력강하를 실험적으로 고찰한 연구가 있다<sup>9)</sup>. 그러나 지금까지의 연구는 ER밸브자체의 모델링과 전기장부하에 따라 어느 정도의 압력강하가 발생하는가에 대한 성능시험연구가 대부분이며 ER밸브의 중요변수에 하나인 전극의 형태나 크기선정 기준에 대한 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 동일한 전극표면적을 갖으나 전극 너비와 길이를 변화시킨 3종류 형태의 실린더형 ER밸브를 설계, 제작하고 이에 대한 성능변화를 고찰하였다. 먼저 ER유체를 자체 조성하여 ER유체의 고유특성치인 항복전단응력값을 전기점도계(electroviscometer)를 이용하여 측정하고, 이로부터 조성된 ER유체의 전기장 부하에 대한 빙햄모델을 도출하였다. ER유체의 특성이 전기장 변화에 따라 ER밸브에 미치는 영향을 고려하여 밸브의 모델링을 수행하였고, 이 모델링과 도출된 빙햄모델을 근거하여 구조의 단순성과 빠른 응답성을 장점으로 하는 ER밸브를 설계 및 제작하였다. 제작된 ER밸브의 전극은 실린더형태로 동일한 전극 표면적을 갖으나 전극 너비와 길이를 변화시킨 3종류로 제작하였다. 이 3종류 형태의 ER밸브에 대해 전기장 부하에 따른 압력강하시험을 수행하여, 전극 표면적은 동일하나 전극 너비와 전극 길이의 변화가 ER밸브에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, PI 제어기를 사용하여 정현파형태의 요구압력곡선에 대한 ER밸브의 압력추적제어를 수행하였고, 전기장 부하에 따른 ER밸브의 응답특성시험을 주파수 영역의 bode곡선으로 고찰하였다.

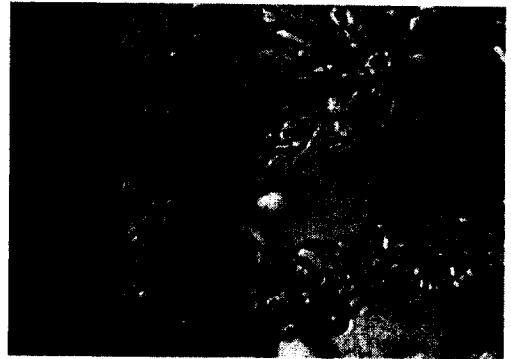
## 2. ER유체의 역학적 특성

### 2-1. ER유체의 일반적 거동

ER유체는 일반적으로 비전도성 용매에 전도성을 갖는 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이며, 1949년 Winslow<sup>10)</sup>가 처음 그 역학적 특징을 보고한 이후 Winslow 유체라고도 칭하고 있다. 전기장 무부하시, ER유체는 비전도성 용매중에 분산된 입자가 자유로이 운동을 하는 뉴토니안 유체와 같은 거동을 나타내지만 전기장 부하시에는 입자가 대전되어 체인형 구조를 형성하여 일정한 항복전단응력을 갖는 빙햄(Bingham)유체의 거동을 나타낸다. Fig.1은 전기장 무부하시와 부하시의 ER유체의 마이크로 구조 모델을 도식화한 것이다. 이러한 기동 모양의 클러스터 구조는 전기장 방향으로 형성되며, 이와같이 형성된 입자들의 결합력에 의하여 외부에서 가해지는 전단력에 대해 전기장 부하시 ER유체는 유동저항을 갖어 유체의 유동을 제한한다. 이러한 ER유체의 거동현상을 현미경을 통하여 관찰하여 보면 Fig.2와 같다. 사진에서 알 수 있듯이 전기장 무부하시에는 입자들이 전극 사이에 자유로이 분포하고 있지만 Fig.2(b)에 나타난 바와 같이 4kV/mm



(a) no voltage applied



(b) 4kV/mm applied

Fig.2 Photomicro-structure of an ER fluid

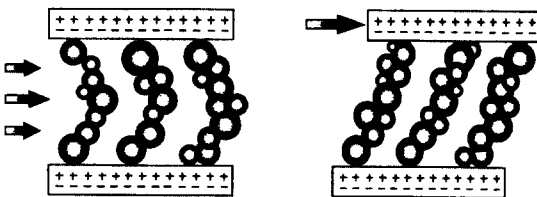
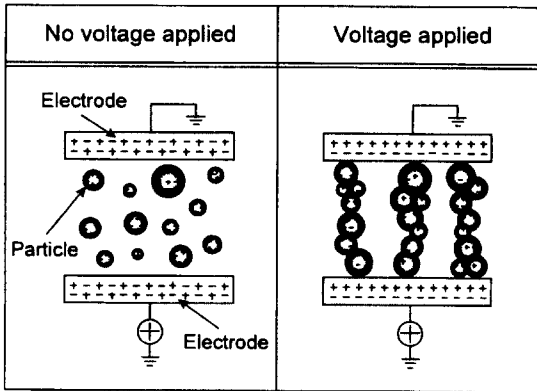


Fig.1 Micro-structure of the ER fluids

의 전기장을 부하하면 입자들이 전기장과 평행하게 클러스터를 형성하여 양쪽의 전극을 향하여 배열함을 확인할 수 있다.

일반적으로 ER유체의 항복전단응력  $\tau_y(E)$ 는 빙햄모델로 표현될 수 있으며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau_y(E) = aE^\beta \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 유체의 전단응력을 나타내고,  $\eta$ 는 유체의 점도를 나타내며  $\dot{\gamma}(= du/dy)$ 는 전단속도비이다. 또한,  $u$ 는 전극간극사이의 유체의 속도이고  $y$ 는 전극간극방향으로의 길이이다.  $\tau_y(E)$ 는 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로 전기장 ( $E$ )의 증가와 더불어 지수함수적으로 증가된다. 여기서  $a$ 와  $\beta$ 는 ER유체의 용매종류, 입자종류, 입자중량비와 용매의 점성등 ER유체의 조성 조

건에 영향을 받는 ER유체의 고유상수이다. 그리고, 식(1)에서 나타난 바와같이 ER유체는 외부에서 부하되는 전기장에 대하여 함수 관계를 갖기 때문에 전하나 이온의 이동에 영향을 미치는 입자의 결정구조, 용매와 입자 사이의 투자율(permittivity)의 차이, 입자 내의 불순물 및 입자 내의 수분 함유량에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 전기장의 증가에도 불구하고 전단응력과 전단속도비의 관계가 전기장 무부하시와 동일한 기울기를 갖지 않고 전단력이 감소하는 경우도 있는데, ER유체가 전기장 뿐만 아니라 전단 속도비의 변화에 의해서도 ER유체의 전단력이 영향을 받기 때문이다. 식(1)과 같은 함수식으로부터 전기장의 증가와 외부에서 가해지는 전단속도비의 증가에 따른 전단응력의 증가와 항복응력의 증가를 예상할 수 있다. 또한, 이 함수식을 이용하여 응용장치 설계시 설계조건과 치수를 정하기 위한 이론해석을 할 수 있다.

### 2-2 ER유체의 빙헴특성실험

본 연구에서는 ER유체를 직접조성하고, 이에 대한 빙헴특성실험을 수행하여, 조성된 ER유체의 항복전단응력을 도출하고자 한다. 일반적으로 ER유체의 항복전단응력은 유체가 유동을 일으키기 시작하는 순간의 전단응력을 의미하는데 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 발생하고 또한 불규칙적인 거동을 하므로 항복전단응력을 정확히 측정하기는 어렵다. 따라서 많은 연구자들은 전단속도비의 값이 영(zero)일 때의 절편값을 항복전단응력으로서 취급한다.

본 연구에서 조성된 ER유체의 용매는 실리콘 오일(점성:30cs)을 사용하였으며, 전도성의 입자는 특수 화학 처리된 전분계를 사용하여 용매에 대한 무게 중량비를 30%가 되도록 ER유체를 조성하였다. 이때 사용된 입자의 크기는, 유압 회로내의 원활한 유동을 고려하여 26~88  $\mu\text{m}$ 로 제한하였다. ER유체의 역학적 특성을 고찰하기 위하여 전기점도계가 사용되었다. 전기점도계는 동축 실린더의 couette형으로, 안쪽 실린더와 바깥쪽 실린더에 전극부를 만들어 전기장을 형성할 수 있도록 하였고 그 구체적인 형상은 Fig.3과 같다. 실험조건으로는, 밸브 시스템의 작동온도를 고려하여 온도를 50 $^{\circ}\text{C}$ 로 고정하고, 형성된 전극을 통하여 전기장을 0~2kV/mm까지 0.5kV/mm씩 증가시켰다. 그리고 전기장을 가하면서 바깥쪽 실린더의 회전속도를 0~700rpm까지 단계적으로 증가시켰다. 이때, 전극간극 사이에 채워진 ER유체로부터 전달되는 토오크를 측정하여 유체의 전단응력으로 환산하였다.

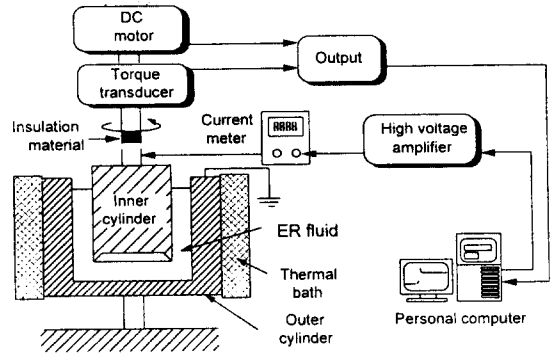
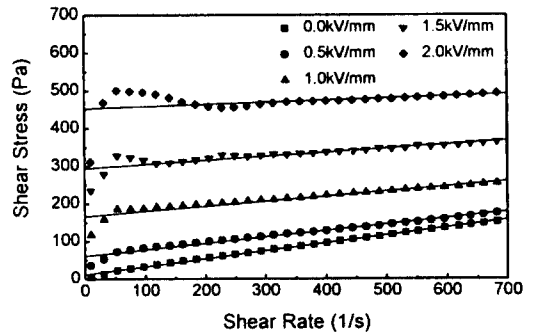
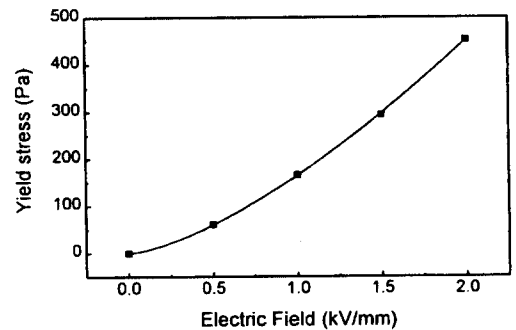


Fig.3 Experimenta setup for Bingham test



(a) shear stress



(b) yield stressed

Fig.4 Field-dependent Bingham characteristics of an ER Fluid

Fig.4는 실험에서 얻은 빙헴특성결과를 나타낸 것이다. Fig.4(a)는 전기장 증가에 따른 ER유체의 전단속도비와 전단응력과의 관계를 나타내고 있다. 그럼에서 알수 있듯이 전기장이 증가할수록 동일한 전단속도비에 대한 ER유체에서 전단응력의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 또

한, 일정한 전기장의 크기에 대하여 유동이 시작된 후에는 전단응력이 전단속도비에 대하여 전기장 무부하시의 경우와 유사한 비율로 증가함을 알 수 있다. Fig.4(b)는 전기장 증가에 따른 ER유체의 항복전단응력의 변화를 나타내는 것으로 항복전단응력의 변화를 식(1)의 표현과 같이 전기장에 의한 항복전단응력  $\tau_y(E)$ 로 표현하면 전기장  $E$ 에 대하여  $164.5E^{1.46}$  Pa의 관계가 된다.

실험에서 고찰한 바와 같이 ER유체의 특성 변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의 크기가 매우 중요하다는 사실을 알 수가 있다. 이상에서 고찰된 ER유체의 특성 결과는 ER밸브의 성능에 큰 영향을 미치며 밸브 설계시 알맞는 제원 결정에 매우 중요한 기초적 자료가 된다.

### 3. ER밸브의 모델링 및 제작

본 연구에서 제안된 ER밸브의 전극형상을 도시하면 Fig.5와 같다. 제안된 ER밸브는 그림과 같이 튜브형태의 전극을 갖고 있는 실린더(cylindrical valve)형으로 내부 실린더에는 고전압 전원장치의 (+)전원이 외부실린더에는 (-)전원에 연결되어 있어 전극판으로서 작용한다. 이러한 간극 사이로, ER유체가 유입될 때 요구되는 전기장을 전극판에 부하하여 요구하는 압력강하성능을 얻을 수 있다.

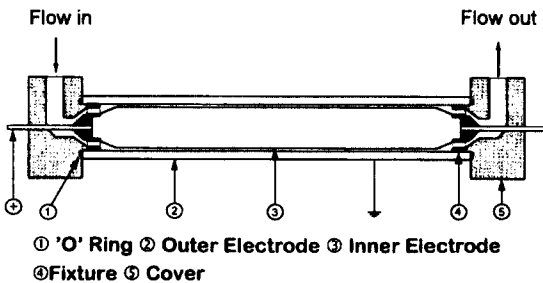


Fig. 5 Schematic diagram of the cylindrical-type ER valve

실린더형 ER밸브 모델링에 대한 관계식을 도출하기 위해 먼저 전기장을 가하지 않은 경우를 살펴보면 압력강하는 전적으로 유체의 점성에 기인하며, 틈새를 통과하는 유량에 비례한다. 그러므로 전기장 무부하시 틈새에 걸친 압력강하  $\Delta P_\eta$ 는 다음식으로 표현된다.

$$\Delta P_\eta = \frac{12\eta L}{bh^3} Q \quad (2)$$

여기서 나타난 설계 변수를 살펴보면  $b$ 는 실린더를 평판으로 환산한 너비이고  $h$ 는 전극의 간극,  $L$ 은 밸브 전극의 길이이며  $Q$ 는 유량을 나타낸다.

ER유체에 전기장이 가해지면 ER유체의 항복전단응력  $\tau_y(E)$ 로 인해 ER밸브는 유체의 유속과는 무관하게 일정한 크기까지 압력을 발생시킨다. 따라서 전기장 부하시 ER유체의 항복전단응력 증가에 의한 압력강하는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>11)</sup>.

$$\Delta P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) \quad (3)$$

다시말하면, 식(3)은 전기장 부하에 따른 ER유체의 거동을 나타내고 있다.

ER밸브에서 발생하는 전체 압력강하는 유체 점성에 의한 성분과 전기장 부하에 따른 성분으로 구성되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_\eta + \Delta P_{ER} \\ &= \frac{12\eta L}{bh^3} Q + 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)를 살펴보면, 전기장을 가하지 않았을 경우에는 전기장에 의한 항복전단응력  $\tau_y(E)$  값이 없으므로 전체 압력은 밸브내의 ER유체의 점성에 의해서만 영향을 받는다. 그러나 전기장을 가했을 경우에는 전체 압력  $\Delta P$ 가  $\Delta P_{ER}$ 을 초과하지 않을 경우에는 유체의 흐름이 나타나지 않다가, 전기장의 크기 만큼 발생한 저항력을 초과하는 순간부터 유체의 흐름이 다시 발생되게 되는 것이다. 또한 식(4)로부터 알 수 있듯이, ER밸브의 성능은 전극의 너비와 길이 및 간극 등과 같은 설계변수와 전기장에 따른 항복전단응력의 크기에 따라 영향을 받는다. 특히 전기장의 변화에 따른 압력강하에 직접적인 영향을 주는 것은 ER유체의 항복전단응력으로서 이에 대한 정확한 실험적 병행 모델이 필요하다.

앞선 병행특성실험으로부터, 전기장에 따른 압력강하와 유체점성에 의한 압력강하 등을 분석한 후 알맞은 크기의 실린더형 ER밸브를 설계, 제작하였다. Fig.6은 제작된 ER밸브의 사진을 나타낸다. 제작된 ER밸브는 3종류로 동일한 전극 표면적을 갖으나 전극너비와 길이를 3가지 형태로 변화시켜 가공되었다. 형태1의 ER밸브는 전극길이  $L$ 이 386mm이고 전극너비  $b$ 는 33mm의 지름을 갖

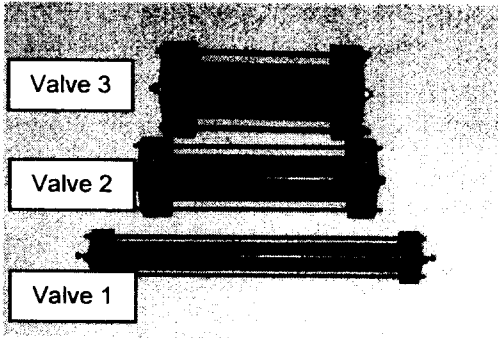


Fig. 6 Photograph of the cylindrical-type ER valves

는 실린더를 평판으로 환산하여 전체 104mm이다. 형태2의 ER밸브는 전극길이가 202mm이고 전극너비는 63mm의 지름을 갖는 실린더로부터 환산하면 198mm이다. 또한 형태3의 ER밸브는 전극길이가 145mm이고 전극너비는 88mm의 지름을 갖는 실린더로부터 환산하면 276mm이다. 그리고 유체가 흘러들어갈 수 있는 전극의 간극  $h$ 는 전부 1.0mm이다. 전기장 부하시 ER밸브의 최대 압력 강하는 밸브의 누유(leakage)를 고려하여 10bar(1MPa)이하로 제한하였다. 제안된 ER밸브의 전극은 실린더형으로 강(steel) 재질의 외부 전극과 내부전극이 일정 간격으로 유지되도록 가공하고, MC 플라스틱으로 지지부를 만들어, 유로를 만들고 동시에 두 전극의 간극이 유체의 빠른 흐름에도 일정하게 유지되도록 하였다. ER밸브의 제작시 가장 중요한 것은 압력이 가해졌을 때 누유(leakage)를 막는 것과 전극부에 고전압이 가한 상태로 단락 현상 없이 전기장이 유지되도록 하는 것이다. 누유를 방지하기 위해선 실링(sealing)이 중요하고, 전극 전체에 일정 전기장이 유지되기 위해선 전극부의 조도가 고와야 한다. 따라서 본 연구에서는 내, 외부 실린더의 표면을 호닝처리하여 전극부를 제작하고, 오링('O' ring)으로 누유를 방지하였다.

#### 4. ER밸브의 성능 실험

전기장 부하에 따른 ER밸브의 압력강하에 대한 성능과 압력추적제어성능을 고찰하고자 한다. 압력강하성능의 경우, 동일한 전극 표면적을 갖으나 전극너비와 길이가 다른 3종류의 ER밸브의 성능을 전기장 증가에 따라 비교, 고

찰하였다. 압력추적제어성능의 경우, 주기함수인 정현파 형태의 요구압력강하 곡선을 ER밸브가 얼마나 빨리 그리고 정확히 추적할 수 있는가를 고찰하였다.

Fig.7은 ER밸브의 성능시험을 위해 사용된 시험장치의 사진을 나타낸 것이다. 유량을 공급하기 위해 사용된 유압펌프는 ER유체와 같이 유체내에 작은 입자들이 포함되어있는 특수한 형태의 유체를 이송시키기에 적합한 외접기어형 정유량펌프가 사용되었다. 그러나 이 유압펌프는 유체 이송시 유체와의 마찰에 의해서 온도가 상승하게 된다. 이 온도의 상승은 펌프의 내구성에 문제를 일으킬 뿐 아니라 작동유체인 ER유체의 특성을 변화시키게 한다. 따라서 본 실험에서는 시스템의 온도를 적정 수준으로 유지하기 위하여 온도계와 냉각기가 사용되었다. ER밸브 양단의 압력강하를 측정하기 위해 ER밸브의 유입부와 유출부 두 부분에 압력센서를 부착하였다. 따라서 일정 유량이 ER밸브로 유동될 때 ER밸브에 부하되는 전기장을 증가시켜 가면서 이때 발생하는 밸브의 압력강하를 측정하였다. 이 압력센서신호는 A/D변환기 역할을 하는 DSP 보드(UEIDAQ WIN30)를 통하여 컴퓨터(IBM CPU486)로 읽어, 저장하였고, 이때의 샘플링 시간은 0.4ms이다. 또한 압력센서신호에 포함된 잡음(noise)을 제거하기 위하여 저주파수대역 노이즈필터를 사용하였다.

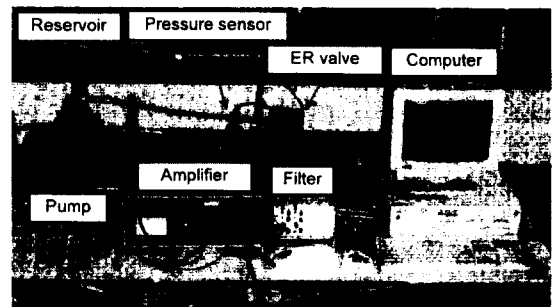
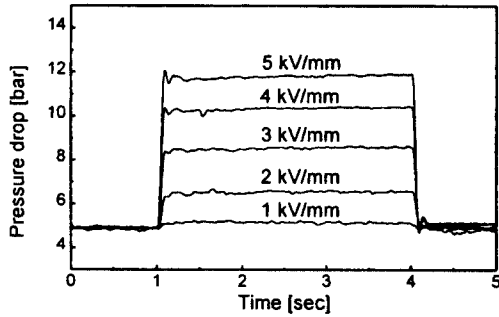


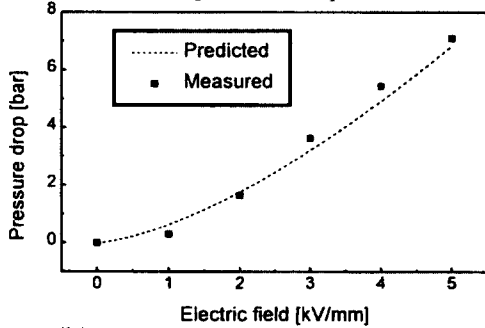
Fig.7 Experimental configuration for the performance analysis of the ER valve

##### 4-1 전기장에 따른 성능

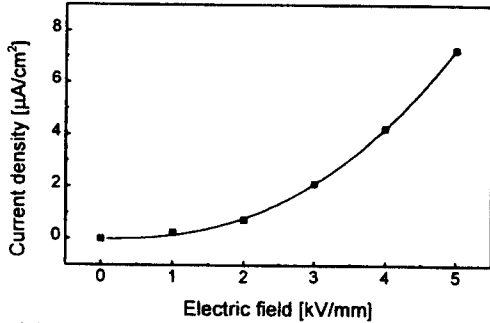
Fig.8, Fig.9, Fig.10은 전극의 표면적은 동일하나 전극너비와 길이를 변화시킨 3종류 형태의 ER밸브에 대한 압력강하성능을 전기장 증가에 따라 고찰하였다. 이 경우 ER밸브에 유입되는 유량  $Q$ 는 11.5 l/min로 일정하게 유지하였고 밸브에 부하되는 전기장은 0~5kV/mm로



(a) pressure drop



(b) pressure drop due to ER effect



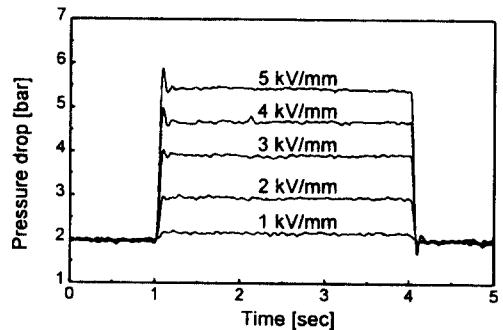
(c) Field-dependent performance responses

Fig. 8 Field-dependent performance responses of the ER valve(valve 1)

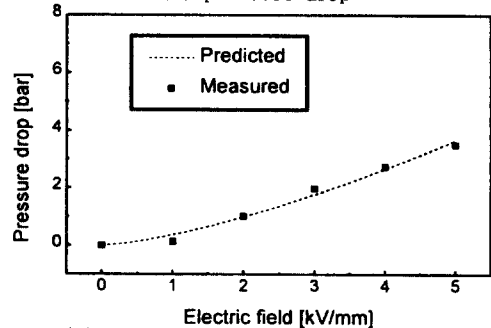
1kV/mm씩 증가시켰다. 또한, 모든 실험시 ER유체의 온도는 50°C로 유지하였다.

Fig.8은 전기장 증가에 따른 형태1 ER밸브의 압력강하성능을 도시한 것이다. Fig.8(a)는 ER밸브에 스텝(step)형태의 전기장을 증가시켰을 때의 밸브양단의 압력강하증가를 나타내는 것으로, 전기장 증가에 따라 압력강하의 증가가 연속적으로 발생됨을 알 수 있다. Fig.8(a)에 얻어진 결과로부터 전기장 부하에 따른 압력강하증가

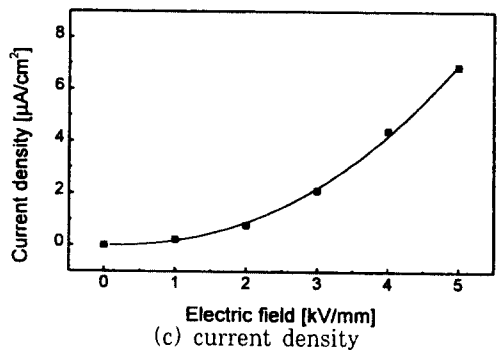
폭을 Fig.8(b)에 도시하였다. 이때 점선으로 표시된 곡선은 이론 예상압력강하치로, 전기점도계를 이용한 병행특성 시험으로부터 얻어진 결과와 ER밸브의 수학적 모델을 근거로 예측되었다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험에서 얻어진 압력강하가 예상치와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 전기장 증가에 따라 ER밸브양단의 압력강하가 지수적으로 증가됨을 알 수 있다. Fig.8(c)는 ER밸브에 ER효과가 발생되기 위해 필요한 전류소모를 전기장 증가에 따라 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 전류소모도 전기장



(a) pressure drop



(b) pressure drop due to ER effect



(c) current density

Fig. 9 Field-dependent performance responses of the ER valve(valve 2)

증가에 따라 지수적으로 증가됨을 알 수 있다. 또한, 소요된 전류밀도의 값이 매우 작음을 알 수 있는데, 이는 실제 ER밸브가 상용화되어 사용될 경우, 적은 전력에서 작동될 수 있음을 의미한다.

Fig.9는 전기장 증가에 따른 형태2 ER밸브의 압력강하성능을 도시한 것으로, Fig.9(a)는 스텝(step)형태의 전기장을 증가시켰을 때의 밸브양단의 압력강하증가를 나타내고 있다. 형태1 ER밸브를 사용한 Fig.8(a)와 비교하여 볼 때, 전기장 무부하시 형태1 ER밸브에 비해 형태2 ER밸브의 압력강하가 낮은 것을 알 수 있다. 이는 식 (4)의 수식에서 알 수 있듯이 형태2 ER밸브가 형태1 ER밸브에 비해 전극길이  $L$ 이 짧고 전극 너비  $b$ 가 넓어 전기장 무부하시의 유체저항이 작아지기 때문이다. 또한, 동일한 전기장 부하시에 대해서도 형태2 ER밸브가 형태1 ER밸브에 비해 더 작은폭의 압력강하가 발생됨을 알 수 있다. 이는 형태2 ER밸브가 형태1 ER밸브에 비하여 전극길이  $L$ 이 짧기 때문으로 전극길이의 감소는 전기장 무부하시의 압력강하 뿐아니라 전기장 부하시의 압력강하량  $\Delta P_{ER}$ 도 감소시키게 한다. 이러한 결과를 전기장 증가에 따른 압력강하 증가폭 곡선인 Fig.9(b)로부터 명확히 확인할 수 있다. 한편, ER효과 발생에 필요한 전류밀도곡선을 나타내는 Fig.9(c)의 경우, 형태1 ER밸브의 전류밀도곡선과 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 형태1의 ER밸브와 형태2의 ER밸브가 동일한 전극 표면적을 갖기 때문이다. 이때 소요되는 전류의 양은 동일하게 된다.

Fig.10은 전기장 증가에 따른 형태3 ER밸브의 압력강하성능을 도시한 것이다. 이 형태3의 ER밸브는 형태1의 ER밸브보다 더 크게 전극길이  $L$ 이 감소되고 전극너비  $b$ 가 증가된 형태로 전기장 무부하시 압력강하가 더 작게 발생됨을 알 수 있다. 또한, 전기장 부하시도, 형태1과 형태2의 ER밸브에 비하여 형태3 ER밸브가 더 작은폭의 압력강하를 발생시킴을 알 수 있다. Fig.10(c)는 형태3 ER밸브가 ER효과를 발생하기 위해 소요된 전류밀도 곡선을 도시한 것으로, 형태1과 형태2의 ER밸브에서 소요된 전류밀도와 형태3의 ER밸브에서 소요된 전류밀도가 거의 동일함을 확인할 수 있다.

Fig.11은 3종류 형태의 ER밸브의 전기장 증가에 따른 압력강하증가폭과 소요된 전류밀도를 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 알 수 듯이 전기장 증가에 따라 형태1의 ER밸브가 가장 큰 압력강하증가폭을 나타냄을 명확히 확인할 수 있다. 그러나 ER효과를 발생하기에 소요되는 류

밀도는 3종류의 ER밸브 모두 거의 동일함을 확인 할 수 있는데 이는 3종류의 ER밸브 모두 동일한 전극 표면적을 갖기 때문이다.

#### 4-2 압력추적제어 성능

본 연구에서는 주기함수 형태의 요구압력강하곡선에 대한 ER밸브의 압력추적제어성능을 실험하였다. ER밸브에

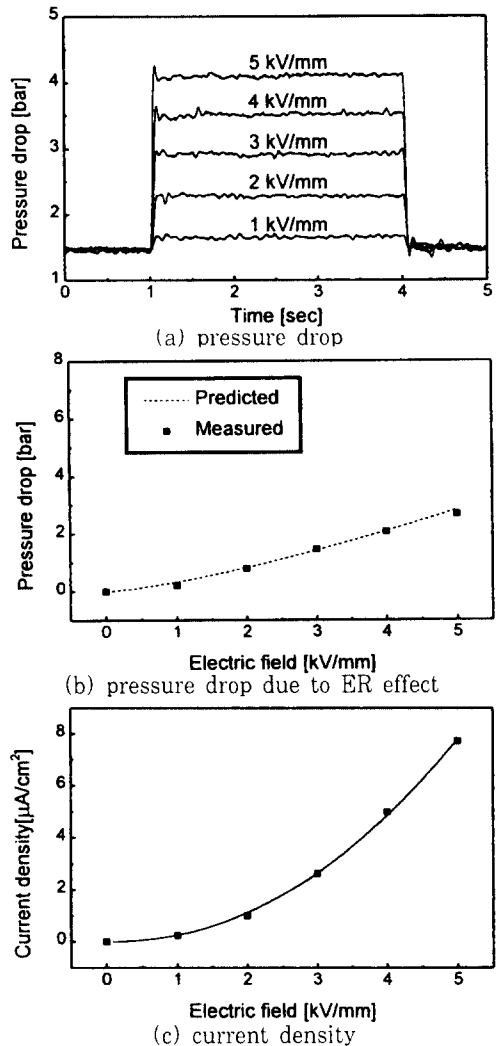
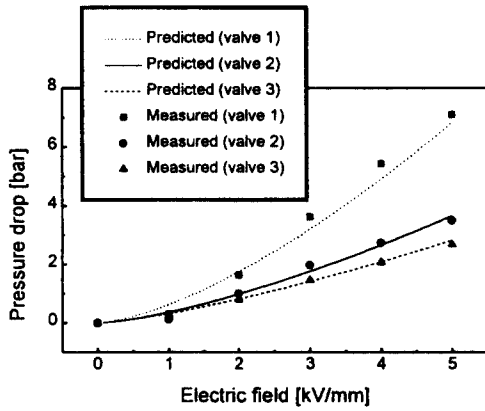
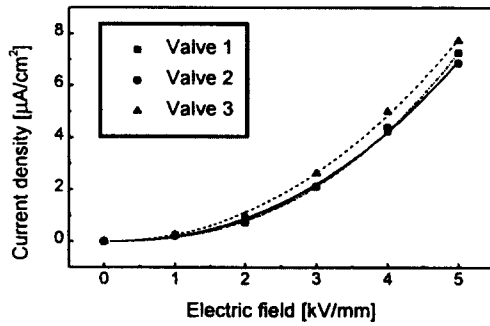


Fig. 10 Field-dependent performance responses of the ER valve(valve 3)



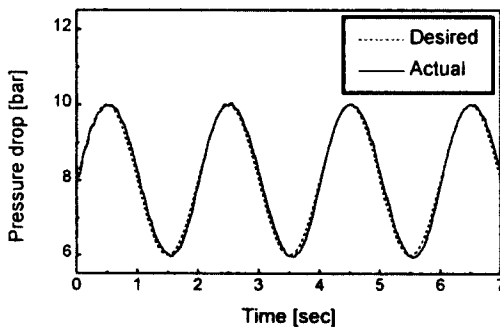


(a) pressure drop due to ER effect

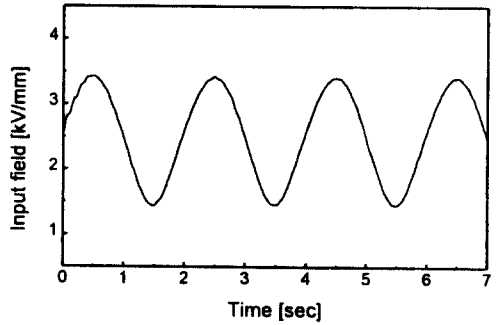


(b) current density

Fig.11 Comparison of field-dependent performance responses

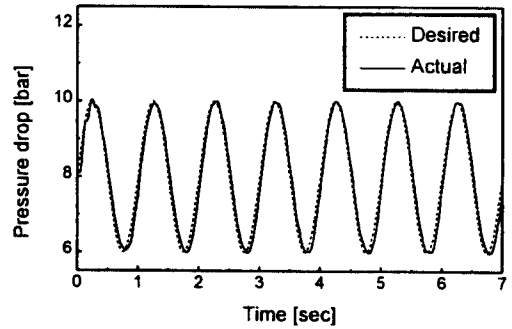


(a) control response

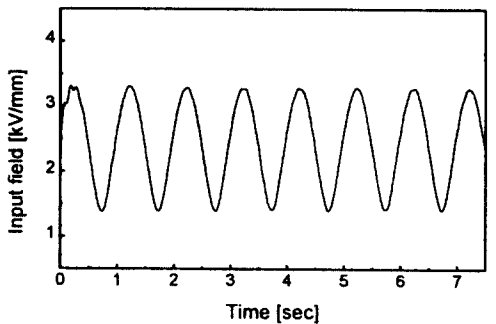


(b) control voltage

Fig. 12 Tracking control on pressure drop of the ER valve(0.5Hz)



(a) control response



(b) control voltage

Fig. 13 Tracking control on pressure drop of the ER valve(1Hz)

부하되는 전기장은 PI제어기를 통해 조절되었고, 요구압력강하곡선으로 주기함수인 정현파가 사용되었다. 또한,

모든 시험에 사용된 ER밸브는 전기장 부하시 가장 많은 압력강하 폭을 발생시킨 형태1 ER밸브이다.

Fig.12는 정현파 형태의 요구압력강하곡선에 대한 ER밸브의 압력추적제어성능을 나타내고 있다. 정현파형태의 요구압력강하곡선은 다음과 같다.

$$\Delta P_d = 8 + 2 \times \sin(2\pi ft) \text{ [bar]} \quad (5)$$

여기서  $f$ 는 주파수를 나타내며, 본 실험에서는  $f=0.5\text{Hz}$ 이다. 그림에서 알 수 있듯이 압력추적제어 수행시 ER밸브는 요구압력강하곡선을 잘 추적하는 것을 볼 수 있다. Fig.12(b)는 이때 ER밸브에 부하된 제어전기장을 나타내는 것으로, 요구압력강하곡선에 따라 전기장이 적절히 조절되고 있음을 알 수 있다.

Fig.13은 요구압력강하곡선의 주파수가 1Hz로 더 빨라진 경우의 정현파 형태의 요구압력강하곡선에 대한 ER밸브의 압력추적제어성능을 나타내고 있다. 이 경우도, 주파수가 0.5Hz인 Fig.12의 경우와 동일하게 ER밸브가 요구압력강하곡선을 잘 추적하고 있음을 확인할 수 있다.

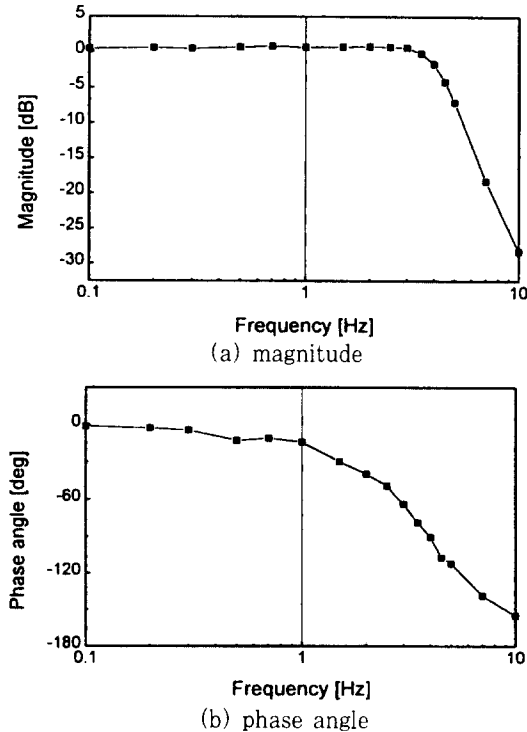


Fig. 14 Bode plot of the ER valve

본 연구에서는 ER밸브의 주파수대역 성능을 도출하고자, 부하되는 전기장에 따른 ER밸브의 압력강하 응답특성 시험을 수행하였다. Fig.14는 입력에 대한 출력의 주파수 응답특성인 Bode곡선으로, 입력으로는 ER밸브에 부하되는 전기장의 이론압력강하치를 사용하고 출력으로는 실제 측정 압력강하치를 사용하였다. 부하되는 전기장은 다음과 같은 정현파 형태로 전기장에는 (+)와 (-)의 값이 동일하므로 한쪽으로 편향(bias)지게하여 변화되도록 하였다.

$$E = 3 + E_0 \times \sin(\omega t) \text{ [kV/mm]} \quad (6)$$

여기서  $\omega$ 는 원주파수(circular frequency)이고  $E_0$ 는 전기장의 진폭으로 1kV/mm이다. 그림에서 알 수 있듯이 ER밸브는 1차 요소 시스템의 특성을 나타내고 있다. 이 경우, -3dB를 나타내는 절점주파수  $\omega_c$  (corner frequency)는 4.29Hz이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 동일한 전극표면적을 갖으나 전극너비와 길이를 변화시킨 3종류 형태의 실린더형 ER밸브를 설계, 제작하고 이에 대한 성능변화를 고찰하였다. 먼저 ER유체를 자체 조성하여 ER유체의 고유특성치인 항복전단응력 값을 전기점도계를 이용하여 측정하고, 이로부터 조성된 ER유체의 전기장 부하에 대한 빙햄모델을 도출하였다. ER유체의 특성이 전기장 변화에 따라 ER밸브에 미치는 영향을 고려하여 밸브의 모델링을 수행하였고, 이 모델링과 도출된 빙햄모델을 근거하여 구조의 단순성과 빠른 응답성을 장점으로 하는 ER밸브를 설계, 제작하였다. 제작된 ER밸브의 전극은 실린더형태로 동일한 전극 표면적을 갖으나 전극너비와 길이를 변화시킨 3종류로 제작하였다. 이 3종류 형태의 ER밸브에 대해 전기장 부하에 따른 압력강하시험을 수행결과, 전극너비는 좁고 전극길이가 긴 형태1 ER밸브가 가장 큰 압력강하증가폭을 나타내었으며 이때 소요된 전류밀도는 3종류 ER밸브 모두 동일함을 알 수 있었다. 그후 PI 제어기를 사용하여 정현파형태의 요구압력곡선에 대한 ER밸브의 압력추적제어를 수행하였다. 제어수행결과, 전기장만의 제어로 ER밸브가 요구압력강하곡선을 잘 추적함을 확인하였고 전기장 부하에 따른 ER밸브의 압력강하 응답특성시험을 통하여 제안된 ER밸브의 적용가능 주파수 대역이 도출되었다.

## 후 기

본 연구에 실험준비와 자료정리에 많은 도움을 준 인하대학교 대학원의 최영태, 김형석 군에게 감사의 뜻을 전합니다.

## 참 고 문 헌

1. Petek, N. K., Romstadt, D. J., Lizell, M. B. and Weyenberg, T. R., "Demonstration of an Automotive Semi-Active Suspension Using Electrorheological Fluid", SAE Technical Paper Series 950586, 1995.
2. Stanway, R., Sproston, J. L., Prendergast, M. J., Case, J. R. and Wilne, C. E., "ER Fluids in the Squeeze-Flow Mode : An Application to Vibration Isolation", Journal of Electrostatics, Vol.28, pp.89-94, 1992.
3. Choi, S. H., Choi, Y. T., Choi, S. B. and Cheong, C. C., "Performance Analysis of an Engine Mount Featuring ER Fluids and Piezoactuators", International Journal of Modern Physics B, Vol.10, Nos.23&24, 1996.
4. Choi, S. B. and Park, Y. K., "Active Vibration Control of a Cantilevered Beam Containing an Electro-Rheological Fluid", Journal of Sound and Vibration, Vol.172, No.3, pp.428-432, 1994.
5. Simmonds, A. J., "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", IEE Proceeding-D, Vol.138, No.4, pp.400-404, 1991.
6. Brooks, D. A., "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", Journal of Modern Physics, Vol.6, pp.2705-2730, 1992.
7. Nakano, M. and Yonekawa, T., "Pressure Response of ER Fluid in a Piston Cylinder-ER Valve System", Proceedings of the 4th International Conference on Electrorheological Fluids, pp.477-489, 1994.
8. Whittle, M., Firoozian, R. and Bullough, W. A., "Decomposition of Pressure in an ER Valve Control System", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.5, No.1, pp.105-111, 1994.
9. Kim, K. S., Jung, D. D., Lee, H. J., Choi, S. B. and Cheong, C. C., "Performance Investigation of a Cylindrical Valve Featuring Electro-Rheological Fluids", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.11, No.4, pp.148-157, 1994.
10. Winslow, W. H., "Induced Fibration Suspensions", Journal of Applied Physics, Vol.20, pp.1137-1140, 1949.
11. Phillips, R. W., "Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress", Ph. D. Dissertation, University of California, Berkely, 1969.