

# ER 밸브를 이용한 자동 하역 시스템의 제어 (I)

- ER 밸브의 모델링 -

성금길\*, 정달도\*, 최승복\*\*

## Control of Automatic Cargo Handling System Using ER Valves (I)

- Modeling of ER Valves -

Kum Gil Sung\*, Dar Do Chung\* and Seung Bok Choi\*\*

### ABSTRACT

This paper presents two different models of electrorheological (ER) valves which can be applicable to an automatic cargo handling system at the seaport. Four different ER fluids, which are commercially available, are adopted and their Bingham characteristics are experimentally evaluated with respect to the intensity of electric field. The field-dependent Bingham models are used in the design of two types of ER valves; single-type and divided-type. The governing equations of motion of the ER valves are derived and the principal design parameters are determined based on 200ton platform to be vertically controlled by the ER valves. Both pressure drops due to the applied field and current density required to operate the ER valves are analyzed. In addition, the pressure drops of the cylinder system are evaluated for both ER valves.

**Key Words** : Electro-Rheological Fluid (ER 유체), ER Valve (ER 밸브), Bingham Model (빙햄모델), Pressure Drop (압력강하), Automatic Cargo Handling System (자동하역시스템)

### 1. 서론

본 연구에서는 조수간만의 차와 파도에 의한 선박 상하위치의 변화에 관계없이 선적 및 하역을 수행할 수 있는 새로운 자동 하역 시스템을 제안하여 제어한다. 이는 유압장치를 이용하여 상하로 이동할 수 있는 플랫폼(platform)을 부두와 바다사이에 설치하고, 이를 선박의 높이 혹은 부두의 높이로 제어 하는 유압 엘리베이터 방식이다. 이러한 방식은 인천항과 같이 조수간만의 차가 심한 항구에서 적합한 하역시스템이며, 컨테이너 팔레트 운송차(container palette transfer car)를 이용하여

다량의 컨테이너를 동시에 운송할 수 있는 장점이 있다<sup>[1]</sup>.

이러한 자동 하역 시스템의 실용화를 위해서는 플랫폼의 상하 위치제어, 컨테이너의 운송, 선박의 고정 메커니즘 및 전용선박의 개발 등 여러 부분에서 심도 있는 연구가 이루어져야 한다. 이 중에서 플랫폼의 상하 위치제어를 위한 이동 메커니즘은 조수간만의 차 및 파도에 대한 선박의 위치변화를 능동적으로 제어하도록 구성해야 한다. 이에 대한 1차적 연구로서 실험실 차원의 소형 하역 모델(20kg 급 플랫폼)을 제작하여, 자동 하역 시스템에 대한 우수한 제어성능을 실험적으로 입증한 바 있다<sup>[2]</sup>.

2000년 11월 10일 접수  
\* 인하대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 인하대학교 기계공학과

본 연구에서는 자동 하역 시스템에 실제 적용할 수 있는 200ton 플랫폼을 제어하기 위하여 ER 밸브 시스템의 설계, 모델링 및 성능해석을 수행한다. 일반적인 유압시스템에 비해 ER 밸브를 이용한 유압 시스템을 적용하는 경우, ER 유체의 빠른 반응성 및 밸브장치의 단순화 등 많은 장점이 있다. 그러나, 현재 ER 유체가 고가이기 때문에 실제 시스템에 적용되기 어려운 단점이 있다. 이러한 경제성 문제는 ER 유체가 범용화 및 양산화될 경우 해결될 것으로 생각되며, 이에 대비하여 ER 유체를 적용한 유압 시스템에 대한 연구가 심도있게 진행 되어야 할 것으로 생각된다. 기존의 ER 밸브 시스템에 대한 연구 및 실험실 차원의 하역 모델은 소형의 단형 ER 밸브 시스템을 이용하였다<sup>2,3)</sup>. 그러나 이러한 타입은 ER 유체의 소모전류 및 유로저항에 의하여 대용량으로 제작하는데 현실적인 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 상용화 되어있는 ER 유체에 근거하여 실제 하역시스템에 적용이 가능한 새로운 분할형 ER 밸브 시스템을 제안한다. 이는 기존의 단형 ER 밸브의 실현성을 높이기 위하여, 유로를 균등하게 나누는 것이다.

본 연구의 제 (I)편에서는 ER 밸브의 모델링에 주안점을 두고 있으며, 제 (II)편에서는 설계된 분할형 ER 밸브 시스템을 이용한 하역시스템의 모델링과 제어에 초점을 두고 있다. ER 밸브의 설계를 위하여 4 가지 종류의 ER 유체에 대하여 유동모드 하에서 전기장의 함수로 표현되는 빙햄모델을 실험적으로 도출하였다. 이 모델과 전기장 무부하시의 점성에 의한 압력강하 및 부차적 수두손실을 연계하여 분할형 ER 밸브 시스템의 압력강하모델을 도출하였다. 이러한 압력강하모델은 전극길이 및 간극 등 중요 설계 변수를 고려하여 결정되었다. 분할형 ER 밸브 시스템의 지배방정식을 이용하여, 전기장의 강도에 따른 압력강하를 도출하였다. 또한 분할형 ER 밸브 시스템과 이와 동일한 전극 면적을 가진 단형 ER 밸브 시스템의 압력강하 특성을 비교하였다.

## 2. ER 유체의 빙햄특성

ER 유체를 이용한 응용장치들은 ER 유체와 전극사이의 상대운동에 따라 세가지 형태로 분류된

다. 첫번째 형태는 전단모드(shear mode)로 평행한 두개의 평판 중 한쪽의 전극은 고정되어 있고, 다른 한쪽이 회전이나 이동을 하는 형태이다. 유체의 이동과 전극의 움직임이 평행하게 일어나는 클러치 및 브레이크 시스템이 이 형태에 속한다. 두 번째 형태는 두 전극이 고정되어 있고, 고정된 전극 사이로 유체가 이동하는 형태로 유동모드(flow mode)라 한다. 이 형태는 엔진마운트, 댐퍼 그리고 본 연구에서 사용될 밸브 등과 같이, 일반적으로 유체가 흐르는 관내에서 유체의 압력 변화와 유량 변화가 동시에 일어나는 형태이다. 세 번째 형태는 유체의 유동과 전극의 움직임이 수직한 방향으로 일어나는 압착모드(squeeze mode)이다. 이 형태는 전극과 유체의 유동은 매우 적게 일어나지만, 엔진마운트, 스마트 구조물 등에 응용하려는 연구가 수행되고 있다.

이러한 세가지 형태의 모드를 갖는 응용장치를 설계할 경우 각각의 모드에 맞는 실험장치에서 얻은 전기장의 변화에 대한 항복응력의 변화 그리고 전기장 변화에 대한 전류밀도의 변화 등과 같은 ER 유체의 빙햄특성에 대한 자료가 필요하다<sup>4)</sup>. 유동모드 하에서 ER A, ER B, ER C 및 ER D의 빙햄특성실험을 수행하여, 각각 Fig. 1에 도시하였다. ER A와 ER B는 각각 저온용과 고온용 폴리우레탄계 입자, ER C는 합성 고분자계 입자, ER D는 화학 처리된 전분계 입자를 사용한 유체이다. Fig. 1(a)에 나타낸 30°C에서 전기장에 따른 항복전단응력을 비교하면 4 가지 ER 유체 모두 비슷한 성능을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 ER A의 경우 전류밀도가 높아 3.5kV/mm 까지 전기장을 부하하였으며, ER C의 경우는 비교적 낮은 전류밀도 하에서도 가장 높은 항복응력을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 1(b)는 50°C에서의 항복전단응력과 전류밀도를 나타내며, ER 유체 온도의 상승으로 인하여 모든 ER 유체의 항복응력과 전류밀도가 상승되었음을 알 수 있다. 이중에서 ER A와 ER C의 경우는 비교적 높은 전류 밀도로 인하여 부하하는 전기장이 각각 1.4와 3.5kV/mm로 제한되었으며, ER B와 ER D는 비교적 낮은 전류밀도 하에서도 높은 항복응력을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 실험결과를 바탕으로 전기장에 따른 항복전단응력과 전류밀도의 크기를  $\alpha E^\beta$  식으로 수식화 한 것을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Bingham models of different ER fluids in flow mode.

ER Type	Voltage Limit [kV/mm]		Yield Stress [Pa]		Current Density [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	
	30°C	50°C	30°C	50°C	30°C	50°C
ERA	3.5	1.4	$525.034 E^{1.892}$	$1136.758 E^{2.412}$	$4.033 E^{2.130}$	$40.921 E^{2.534}$
ERB	4	4	$565.278 E^{1.551}$	$454.430 E^{1.896}$	$0.852 E^{1.509}$	$1.874 E^{1.706}$
ERC	4	3.5	$656.689 E^{1.689}$	$1581.938 E^{1.486}$	$1.298 E^{1.975}$	$3.712 E^{2.615}$
ERD	4	4	$688.874 E^{1.575}$	$1211.272 E^{1.170}$	$0.002 E^{6.539}$	$0.038 E^{4.841}$

### 3. ER 밸브의 모델링

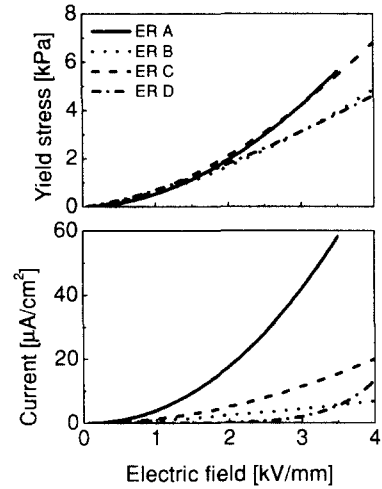
본 연구에서 제안된 단형(single-type) ER 밸브의 전극형상을 간략하게 도시하면 Fig. 2(a)와 같다. 그림과 같이 동심환형관(concentric annulus) 형태의 전극을 가지고 있는 실린더형 ER 밸브에 전기장을 인가하였을 때 발생하는 압력강하는 ER 유체 특성에 의한 영향, 점성에 의한 영향 및 형상에 따른 압력손실 영향으로 나누어 계산할 수 있다. 먼저 Fig. 2(a)로부터 ER 유체 특성에 의한 압력강하  $\Delta P_{ER}$  은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) = 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta \quad (1)$$

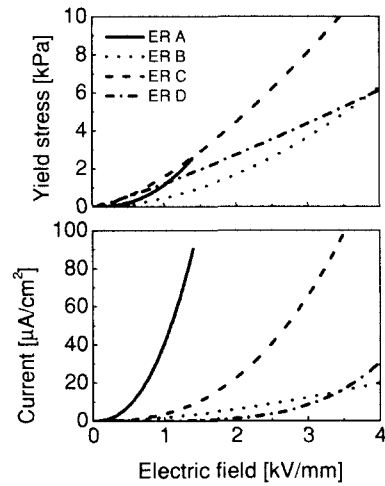
여기서,  $L$  은 ER 밸브의 전극길이,  $h$  는 전극사이의 간극,  $\tau_y(E)$  는 전기장의 세기  $E$  에 따라 일정한 크기로 발생하는 ER 유체의 항복응력의 크기를 나타내며,  $\alpha$  와  $\beta$  는 Table 1 과 같이 실험에 의하여 구해진다. 동심환형관으로 해석한 경우 ER 유체 점성에 의한 압력강하  $\Delta P_\eta$  는 다음과 같이 주어진다<sup>[5]</sup>.

$$\Delta P_\eta = 8\eta \frac{L}{\pi \{r_D^4 - r_d^4 - (r_D^2 - r_d^2)^2 / \ln(r_D / r_d)\}} Q_E \quad (2)$$

여기서,  $\eta$  는 ER 유체의 점성계수,  $r_D$ ,  $r_d$  은 각각 전극의 바깥쪽 반지름과 안쪽 반지름,  $Q_E$  는 전기장 부하 시 간극사이를 통과하는 유량이며,  $\ln(\cdot)$  은 자연대수함수 이다. 그리고 유체가 유동할 때 발생할 수 있는 형상의 변화에 따른 압력손실  $\Delta P_v$  는 다음과 같이 주어진다.



(a) 30°C



(b) 50°C

Fig. 1 Bingham characteristics of ER fluids in flow mode.

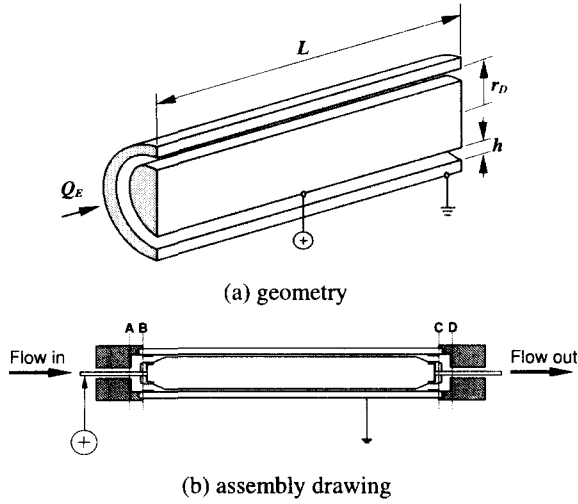


Fig. 2 The configuration of the ER valve.

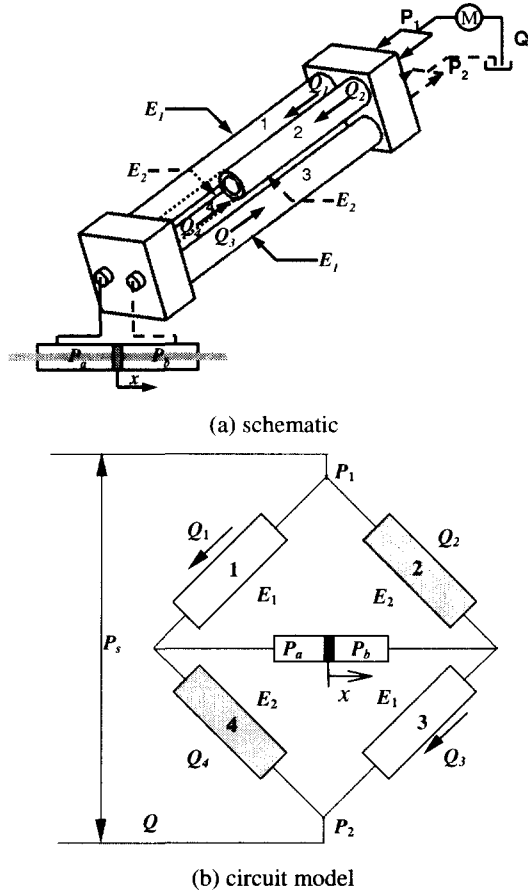


Fig. 3 The hydraulic bridge of single-type ER valve.

$$\Delta P_o = \rho g h_i \quad (3)$$

여기서,  $\rho$  는 유체의 밀도,  $g$  는 중력가속도 그리고  $h_i$  은 Fig. 2(b)의 ER 밸브 도면에서와 같이 유로형상의 변화에 따라 발생하는 손실수두를 나타낸다. 따라서 ER 유체가 전극을 통과할 때 발생하는 압력강하의 합은 다음과 같다.

$$\Delta P_E = \Delta P_{ER} + \Delta P_\eta + \Delta P_o \quad (4)$$

단형 ER 밸브 시스템의 동적모델을 도출하기 위하여 Fig. 3 과 같은 ER 밸브 브리지 모델이 도입되었다. 이때 각각의 ER 밸브에 흐르는 유량을 각각  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  라고 정의하고, 밸브 1, 3 에 가해지는 전기장의 세기를  $E_1$ , 밸브 2, 4 에 가해지는 전기장의 세기를  $E_2$  라고 하면 밸브양단에서 발생하는 압력강하는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_1 - P_a &= RQ_1 + \Delta P_{ER}(E_1) + \Delta P_{o1} \\ P_1 - P_b &= RQ_2 + \Delta P_{ER}(E_2) + \Delta P_{o2} \\ P_a - P_2 &= RQ_4 + \Delta P_{ER}(E_2) + \Delta P_{o4} \\ P_b - P_2 &= RQ_3 + \Delta P_{ER}(E_1) + \Delta P_{o3} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $R$  은 식 (2)로부터  $R = 8\eta L / \pi \{r_D^4 - r_d^4 - (r_D^2 - r_d^2)^2 / \ln(r_D / r_d)\}$  로 정의된다.  $\Delta P_{ER}(E_i)$  는 전기장에 대한 압력강하 식으로, 사용되는 ER 유체에 따라 변하는 시스템의 고유한 특성 식이다.  $\Delta P_{o1}, \Delta P_{o2}, \Delta P_{o3}, \Delta P_{o4}$  는 각 밸브에 작용하는 부차적 압력손실을 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>15)</sup>.

$$\Delta P_{oi} = \rho g h_{ii}, \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

여기서, 수두손실  $h_{ii}$  는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_{ii} &= \frac{v_i^2}{2g} \left( \sum K \right) = \frac{v_i^2}{2g} (K_{se} + K_{gc} + K_{ge} + K_{sc}) \\ &= \frac{Q_i^2}{2g} \left( \frac{K_{se}}{A_{se}^2} + \frac{K_{gc}}{A_{gc}^2} + \frac{K_{ge}}{A_{ge}^2} + \frac{K_{sc}}{A_{sc}^2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

상기식에서,  $A_{se}, A_{gc}, A_{ge}, A_{sc}$  는 각각 유로의 확대, 점진수축, 점진확대, 수축시의 면적이다. Fig.

2(b)의 **A** 에서 관의 확대에 의한 손실계수  $K_{sc}$ , **B** 에서 관의 점진적인 수축에 의한 손실계수  $K_{gc}$ , **C** 에서 관의 점진적인 확대에 의한 손실계수  $K_{ge}$  및 **D** 에서 수축에 의한 손실계수  $K_{sc}$  는 각각 다음과 같이 주어진다<sup>15)</sup>.

$$\begin{aligned} K_{sc} &= (1-r_p^2/r_D^2)^2 \\ K_{gc} &= 0.07 \\ K_{ge} &= 1.2 \\ K_{sc} &= 0.42(1-r_p^2/r_D^2)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $r_p$  는 ER 밸브 시스템에 연결된 파이프 유로의 반지름이며,  $K_{gc}$  와  $K_{ge}$  는 각각 동심환형관의 내경이 점진적으로 수축 및 확대되어 유로가 축소 및 확대되는 경우를 원형관이 점진적으로 수축 및 확대되는 경우로 가정한 것이다. 따라서 식 (7)에 의한 압력손실  $\Delta P_{oi}$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{oi} = \rho \frac{Q_i^2}{2} \left( \frac{K_{sc}}{A_{sc}^2} + \frac{K_{gc}}{A_{gc}^2} + \frac{K_{ge}}{A_{ge}^2} + \frac{K_{sc}}{A_{sc}^2} \right) \quad (9)$$

사용되는 4 개 밸브의 모든 조건이 같다고 가정하면, 식 (5)로부터  $P_a$  및  $P_b$  를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} \{ P_1 - R(Q_1 - Q_4) + (\Delta P_{ER}(E_2) - \Delta P_{ER}(E_1)) + (\Delta P_{o4} - \Delta P_{o1}) \} \\ P_b &= \frac{1}{2} \{ P_1 + R(Q_3 - Q_2) - (\Delta P_{ER}(E_2) - \Delta P_{ER}(E_1)) + (\Delta P_{o3} - \Delta P_{o2}) \} \end{aligned} \quad (10)$$

한편, 실린더와 단형 ER 밸브 시스템의 운동방정식으로부터 다음식을 유도해 낼 수 있다<sup>16)</sup>.

$$\begin{aligned} Q_a &= Q_1 - Q_4 = A\dot{x} + C_a \frac{dP_a}{dt} \\ Q_b &= Q_3 - Q_2 = A\dot{x} - C_b \frac{dP_b}{dt} \\ C_a &= \frac{V_a}{\beta_{ER}}, \quad C_b = \frac{V_b}{\beta_{ER}} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $V_a$  는 검사체적(control volume)  $a$  의 부피,

$V_b$  는 검사체적  $b$  의 부피이고,  $\beta_{ER}$  은 ER 유체의 체적탄성계수이다.  $A$  는 유체의 압력과 유량이 전달되는 실린더램의 면적이다. 이제, 식 (9)와 (11)을 식 (10)에 대입하게 되면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} \left\{ P_1 - R \left( A\dot{x} + C_a \frac{dP_a}{dt} \right) + (\Delta P_{ER}(E_2) - \Delta P_{ER}(E_1)) + (\Delta P_{o4} - \Delta P_{o1}) \right\} \\ P_b &= \frac{1}{2} \left\{ P_1 + R \left( A\dot{x} - C_b \frac{dP_b}{dt} \right) - (\Delta P_{ER}(E_2) - \Delta P_{ER}(E_1)) + (\Delta P_{o3} - \Delta P_{o2}) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

그리고 식 (5)로부터  $P_1$  을 구하면 다음과 같다.

$$P_1 = RQ + \Delta P_{ER}(E_1) + \Delta P_{ER}(E_2) + \Delta P_{o1} + \Delta P_{o2} + \Delta P_{o3} + \Delta P_{o4} \quad (13)$$

여기서,  $Q = Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$  이며, 위 식을 식 (12)에 대입하면  $P_a$  및  $P_b$  는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} \left\{ -R \left( A\dot{x} + C_a \frac{dP_a}{dt} \right) + RQ + 2\Delta P_{ER}(E_2) + \Delta P_{o2} + \Delta P_{o3} + 2\Delta P_{o4} \right\} \\ P_b &= \frac{1}{2} \left\{ +R \left( A\dot{x} - C_b \frac{dP_b}{dt} \right) + RQ + 2\Delta P_{ER}(E_1) + \Delta P_{o1} + 2\Delta P_{o3} + \Delta P_{o4} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

상기 식에서  $\Delta P_{ER}(E_1)$ ,  $\Delta P_{ER}(E_2)$  는 전기장 부하 시 단형 ER 밸브에서의 압력강하를 나타내므로 항상 양(+)의 값을 갖는다. 식 (10)을 식 (14)에 대입한 후  $\dot{P}_a$  와  $\dot{P}_b$  에 대하여 정리하면 다음과 같은 단형 ER 밸브 시스템의 동적 모델을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_a &= -\frac{A}{C_a} \dot{x} - \frac{2}{C_a R} P_a + \frac{2}{C_a R} \Delta P_{ER}(E_2) + \frac{Q}{C_a} + \frac{\Delta P_{o2} + \Delta P_{o3} + 2\Delta P_{o4}}{RC_a} \\ \dot{P}_b &= \frac{A}{C_b} \dot{x} - \frac{2}{C_b R} P_b + \frac{2}{C_b R} \Delta P_{ER}(E_1) + \frac{Q}{C_b} + \frac{\Delta P_{o1} + 2\Delta P_{o3} + \Delta P_{o4}}{RC_b} \end{aligned} \quad (15)$$

총 중량 200ton 급 하역시스템의 사양을 만족하기 위하여, 먼저 Fig. 3 과 같이 실린더와 연계된 단형 ER 밸브 시스템을 설계하였다. 여러 조건과 함께 전체 하역시스템의 성능 및 특성 등을 고려하여 주요 설계 변수인 ER 밸브의 전극길이  $L$  은 1m, 전극간격  $h$  는 0.8mm 및 밸브의 외경  $r_D$  는

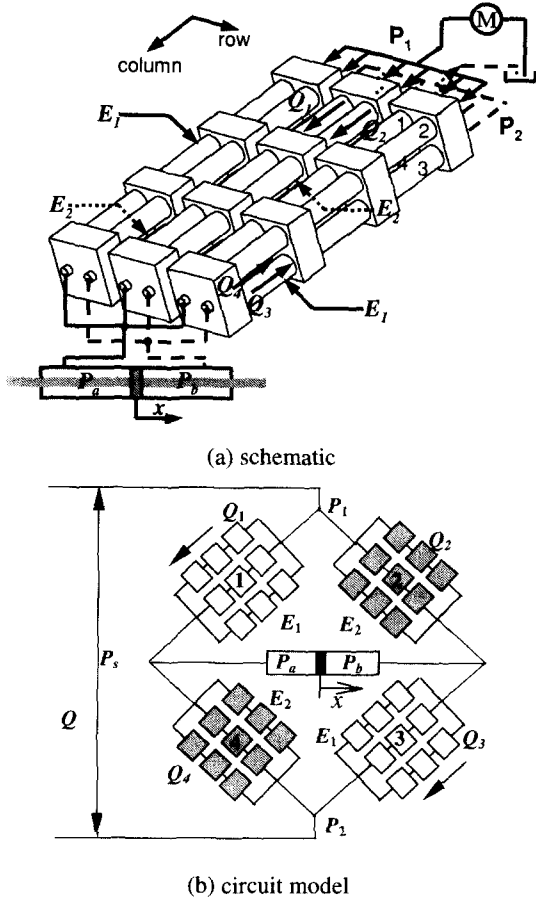


Fig. 4 The hydraulic bridge of divided-type ER valve.

0.81m로 결정되었다. 그리고 0~4kV/mm로 부하 되도록 전기장  $E$ 가 결정되었으며, 단형 ER 밸브 시스템에 공급되는 유량  $Q$ 는 0.018m<sup>3</sup>/s로 결정되었다.

단형 ER 밸브 시스템의 모델을 이용하여 Fig. 4와 같은 분할형(divided-type) ER 밸브 시스템의 모델을 구성할 수 있다. 분할형 ER 밸브 브리지 모델은 행(row) 방향과 열(column) 방향으로 여러 개의 밸브를 배열하여 연결한 형태이다. 분할형 ER 밸브는 단형 ER 밸브의 실제 적용가능성을 보다 증대 시키기 위한 것이다. 행 방향으로 밸브의 수를 증가 시키게 되면, 하나의 밸브 내에 흐르는 유량이 감소 됨에 따라 밸브 유로의 지름 축소가 가능하다. 그리고 열 방향으로 밸브의 수를 증가 시키게 되면, 하나의 밸브에서 발생해야 하는 압

력강하량이 분할 됨에 따라 밸브의 길이가 축소되는 것이 가능하다. 이러한 밸브 구조 분할의 가장 큰 장점은 하나의 밸브에서 필요로 하는 전류의 양이 감소되는 것이다. 또한 여러 개의 밸브를 사용함에 따라 압력강하량의 분할 및 오작동 면에서 밸브의 안정성이 증대되어, 하역시스템의 실제 적용에 보다 유리하다고 할 수 있다.

분할형 ER 밸브 시스템의 유체저항은 다음과 같다 ;

$R^* = 8\eta(m \times L^*) / [n \times \pi \{r_{d1}^{*4} - r_{d2}^{*4} - (r_{d1}^{*2} - r_{d2}^{*2})^2 / \ln(r_{d1}^* / r_{d2}^*)\}]$   
 그리고,  $P_a^*$ ,  $P_b^*$  및  $\dot{P}_a^*$ ,  $\dot{P}_b^*$ 는 식 (14) 및 (15)와 동일 하고, 수두손실  $h_{fi}^*$ 는 다음과 같다.

$$h_{fi}^* = m \times \frac{(Q/n)^2}{2g} \left( \frac{K_{se}^*}{A_{se}^{*2}} + \frac{K_{gc}^*}{A_{gc}^{*2}} + \frac{K_{ge}^*}{A_{ge}^{*2}} + \frac{K_{sc}^*}{A_{sc}^{*2}} \right) \quad (16)$$

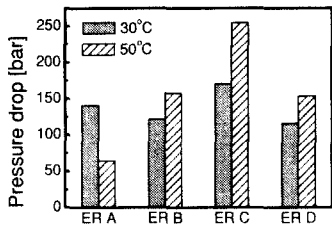
따라서,  $\dot{P}_a$ 와  $\dot{P}_b$ 에 대하여 분할형 ER 밸브 시스템의 동적 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_a &= -\frac{A}{C_a} \dot{x} - \frac{2}{C_a R^*} P_a + \frac{2}{C_a R^*} \Delta P_{ER}(E_2) + \frac{Q}{C_a} + \frac{\Delta P_{o2}^* + \Delta P_{o3}^* + 2\Delta P_{o4}^*}{R^* C_a} \\ \dot{P}_b &= \frac{A}{C_b} \dot{x} - \frac{2}{C_b R^*} P_b + \frac{2}{C_b R^*} \Delta P_{ER}(E_1) + \frac{Q}{C_b} + \frac{\Delta P_{o1}^* + 2\Delta P_{o3}^* + \Delta P_{o4}^*}{R^* C_b} \end{aligned} \quad (17)$$

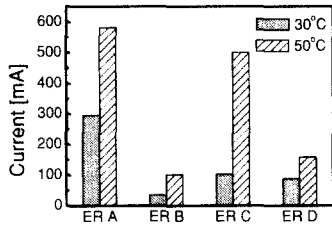
분할형 ER 밸브 시스템의 모델링 특성은 단형 ER 밸브 시스템과 동일하며, 전극길이  $L^*$ 은 0.33m 밸브의 외경  $r_o^*$ 는 0.27m로 결정되었다. 그리고 행 방향 밸브의 수  $m$ 과 종 방향 밸브의 수  $n$ 은 모두 3으로 결정하였으며, 단형 ER 밸브 시스템과 유로단면적 및 전극면적이 동일하도록 하였다.  $m$ 과  $n$ 은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 실제 제작 시 적합하다고 생각되는 임의의 개수를 선택한 것이며, 이러한 방법을 통하여 single-type ER 밸브에서 결정된 제원을 divide-type ER 밸브의 제원에 적용하는 것이 가능하다.

#### 4. ER 밸브의 성능해석

Fig. 5는 단형 ER 밸브 시스템에 최대 4kV/mm 까지 부하 가능한 전기장을 인가하였을 때 ER 유체에 따른 압력강하 및 전류를 나타낸다. ER A의 30°C와 50°C, ER C의 50°C는 전류량의 과대로

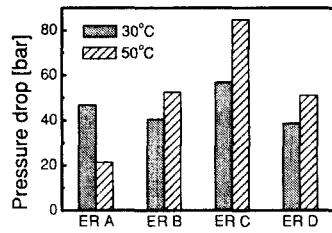


(a) pressure drop

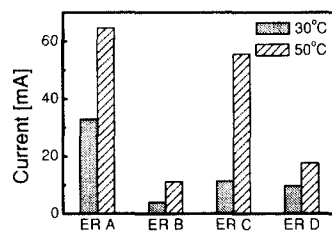


(b) current

Fig. 5 The pressure drop and current range of single-type ER valve.

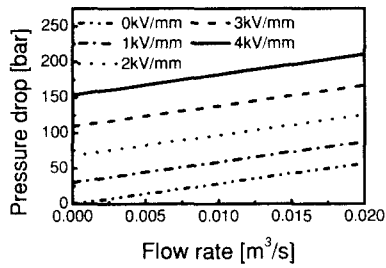


(a) pressure drop

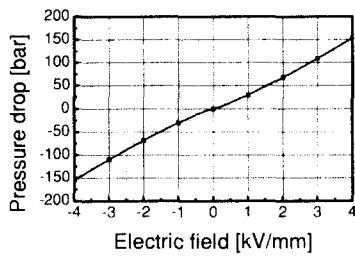


(b) current

Fig. 7 The pressure drop and current range of divided-type ER valve.

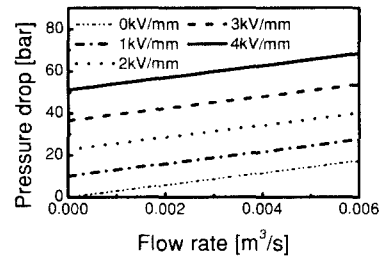


(a) ER valve

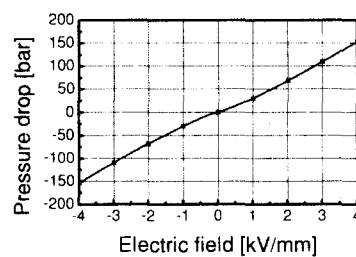


(b) cylinder

Fig. 6 The Pressure drop characteristics of single-type ER valve system with ER D.



(a) ER valve



(b) cylinder

Fig. 8 The pressure drop characteristics of divided-type ER valve system with ER D.

인하여, 각각 3.5, 1.4, 3.5kV/mm 까지만 고려되었다. 그림에서와 같이 ER A 및 ER C 는 필요한 전류량

이 높아 하역시스템에 적용 시 고전류용량 또는 다수의 고전압 증폭기가 필요하게 된다. 압력강하

측면에서는 ER C가 가장 우수한 성능을 나타내고 있으며, 전류밀도가 매우 높은 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 하역시스템에 적용될 단형 ER 밸브 시스템은 ER D를 사용하는 것이 항복응력 및 전류 면에서 적합하다고 할 수 있다.

결과적으로 Fig. 6에 ER D를 실제 작동 온도인 50°C로 고려하여 단형 ER 밸브 시스템에 적용할 경우의 압력강하 특성을 도시하였다. Fig. 6(a)는 유량에 따라 ER 밸브 양단에 발생하는 압력강하량이다. 이때 부차적손실의 크기는 매우 작게 나타나며, 양단에 발생하는 최대압력강하는 유량에 관계없이, 전기장 4kV/mm에서, 153bar임을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 실린더의 양단에 발생하는 압력차를 고려하기 위하여, 실린더 피스톤이 고정 ( $Q_1 - Q_4 = Q_3 - Q_2 = 0$ )되어 있고 이에 따른 부차적 손실을 무시할 경우의 압력강하를 전기장에 따라 도시하였다. 전기장이 양(+)인 경우는  $E_1 = 0$ 인 경우이며, 음(-)인 경우는  $E_2 = 0$ 인 경우이다. 하역시스템의 플랫폼을 구동하기 위한 실린더의 압력이 -153~+153bar임을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 분할형 ER 밸브 시스템에 최대 4kV/mm까지 부하 가능한 전기장을 인가하였을 때 ER 유체에 따른 압력강하 및 전류를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 단형 ER 밸브에 비하여 분할형 ER 밸브 하나에 작용하는 압력은 1/3로 줄었으며, 전류는 1/9로 감소하였다. ER D의 경우 20mA 이하의 전류량은 현재 일반적으로 사용되는 고전압 증폭기의 사양을 만족하는 수준이므로, 분할형 ER 밸브를 이용한 실제 하역시스템에 적용이 가능하다고 할 수 있다. 분할형 ER 밸브에서 ER D가 실제 작동 온도인 50°C인 경우의 압력강하 특성을 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8(a)는 유량에 따라 하나의 ER 밸브 양단에 발생하는 압력강하량이다. 이때 부차적손실의 크기는 매우 작게 나타나며, 양단에 발생하는 최대압력강하는 유량에 관계없이, 전기장 4kV/mm에서 51bar임을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8(b)에서와 같이 분할형 ER 밸브 시스템의 경우에도 실린더의 양단에 발생하는 압력차는 -153~+153bar임을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 새로운 형태의 자동 하역시스템에 적용하기 위하여, ER 유체를 이용한 ER 밸브

시스템을 모델링 한 후 압력강하 특성을 고찰하였다. 유동모드 하에서 4가지 종류의 ER 유체에 대하여 빙햄모델을 실험적으로 도출한 후, 단형 및 분할형 ER 밸브의 모델을 도출하고 해석을 통하여 설계변수를 결정하였다. 설계된 단형 및 분할형 ER 밸브 시스템에 50°C의 ER D를 적용하여 해석한 결과 두 형태의 ER 밸브 시스템 모두 만족할 만한 압력 특성을 얻었다. 그러나 분할형 ER 밸브 시스템의 경우가 하나의 밸브에 발생하는 압력이 낮아 안정성이 증대되고, 소모 전류량이 낮아 현재 상용화되어 있는 고전압 증폭기의 적용이 가능하다. 이로부터 제안된 분할형 ER 밸브 시스템이 새로운 자동 하역시스템에 실제 적용이 가능하다는 것을 판단할 수 있다.

### 참고문헌

1. Lee, J. W., Choi, S. B. and Kim, K. S., "Automatic Cargo Handling System for Seaport," Korea Patent, No. 0208916, 1999.
2. Choi, S. B., Sung, K. G., Chung, D. D. and Kim, H. S., "Active Control of ER Valves with Application to Seaport Cargo Handling System," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 10, No. 9, pp. 732-736, 2000.
3. Choi, S. B., and Choi, W. Y., "Position Control of a Cylinder using a Hydraulic Bridge Circuit with ER Valves," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 122, No. 1, pp. 202-209, 2000.
4. Lee, H. G., Choi, S. B., Han, S. S., Kim, J. H. and Suh, M. S., "Bingham and Response Characteristics of ER Fluids in Shear and Flow Mode," Proceedings of the 7th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, pp. 117-118, 1999.
5. White, F. M., Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 1986.
6. Watton, J., Fluid Power Systems, Prentice Hall, 1988.