

# ER 브레이크와 클러치를 이용한 이송 테이블의 위치 제어

## Position Control of a Moving Table Using ER Brake and ER Clutch

김승래(인하대 대학원)\*, 최승복(인하대 기계과), 정재천(인하대 기계과)  
S. L. Kim(Inha Univ. Graduate Scholl)\*, S. B. Choi(Inha Univ.), C. C. Cheong(Inha Univ.)

### ABSTRACT

This paper presents an active position control of a moving table utilizing ER(electro-rheological) brake and ER clutch. A transformer oil-based ER fluid is composed and its Bingham properties are evaluated with respect to electric fields. The dynamics of the actuators : ER brake and ER clutch, are identified through experiments, and subsequently the governing equation of motion of the moving table system is formulated from the governing equation, a sliding mode controller is designed to achieve an accurate position control. Both simulation and experimental results and presented in order to demonstrate the effectiveness of the proposed control methodology

Key word : Electro-Rheological Fluid (전기유동유체), ER Brake (ER 브레이크), ER Clutch (ER 클러치), Table Position Control (테이블 위치 제어), Sliding Mode Control (슬라이딩 모드 제어)

### 1. 서론

최근 산업화 과정에서 나타나는 일반적인 현상은 제품의 소형화 및 고기능화이다. 이를 위해서 제조업 분야에서 널리 쓰이고 있는 공작기계에는 높은 정밀도의 이송시스템과 제어가 용이한 서보모터를 필요로 한다. 이송시스템으로는 규격화가 되어 있어 사용이 편리하고 이송질량의 영향을 적게 받는 볼스크류가 널리 쓰여진다. 특히 이송시스템에 토크를 공급하는 서보모터는 제어가 손쉬운 반면에 고가이다. 그러나 여기에는 정밀도를 악화시키는 여러 인자들이 존재하는데, 그 중에서 심각하게 논의되는 것은 마찰이다. 마찰은 상대 운동을 하는 곳에서 운동을 방해하는 형태로 발생한다. 그리고 마찰은 심한 비선형성을 가지고 있고, 온도, 습도, 마모 정도 등에 의해 그 값이 크게 달라져서 정확한 값을 예측하는 것은 어렵다. 마찰이 이송시스템에 미치는 영향으로는 위치제어 수행시 오차를 발생하는 등의 성능저하를 가져오고, 심한 경우 시스템을 불안정하게 한다.

지금까지 이러한 마찰 문제를 해결하기 위해 많

은 연구가 수행되었으며, 다음의 세가지로 분류된다. 첫번째로는 서보모터의 마찰에 대한 제어이다. 많은 연구성과가 이루어졌으나, 고가의 서보모터를 사용한다는 단점을 가지고 있다. 두번째로는 마찰의 영향을 줄이기 위해 제어입력신호에 높은 주파수 성분의 노이즈를 첨가하는 디더링(dithering)이다. 그러나 이것은 모터와 부하 사이의 사용된 커플링(coupling)의 탄성으로 인하여 진동을 유발하고, 시스템 작동기의 수명저하를 가져온다.<sup>(1)</sup> 마지막으로 높은 이득을 가지는 제어기를 이용한 것이다. 이것의 단점은 마찰의 비선형성은 높은 이득에도 불구하고 여전히 작은 오차를 유발하고, 시스템의 안정성을 저하시킨다.

한편 기존의 것과 전혀 다른 방법의 하나로, 전기유동유체(Electro-Rheological fluid, 이하 'ERF')를 위치제어에 응용할 수 있다. ERF는 전기장에 따라 항복전단응력(yield shear stress)이 변하는 빙햄(Bingham)특성을 지닌 유체로, 전기장에 의한 반응속도가 빠르고, 전력소모가 작다는 장점을 가지고 있어서 그 응용연구가 활발하다. 응용분야에는 속압소바, 엔진마운트 및 ER브레이크와 ER클러치 등이

있다.

본 연구에서는 간단한 구조, 능동적인 제어 및 유연한 작동성 등의 장점을 지닌 ERF를 이용한 브레이크와 클러치(이하 'ER브레이크', 'ER클러치'라 칭함)를 일반 모터에 장착하여 기존의 서보모터대신에, 마찰이 존재하는 이송 테이블의 위치 제어를 수행하고자 한다. 이를 위해 ERF를 자체적으로 조성하여 빙햄특성실험을 통해 얻은 자료를 근거로 ER브레이크와 ER클러치의 성능을 해석하였다. 그리고 이송테이블의 위치제어를 위해 ER브레이크와 ER클러치, 마찰 및 이송시스템의 모델을 유도하였으며, 이를 이용하여 마찰 등의 외란에 강건한 슬라이딩 모드 제어기(sliding mode controller, 이하 'SMC'라 칭함)를 설계하였다. 제안된 SMC의 마찰에 대한 강건함과 유용성을 입증하기 위해 볼스크류로 이송테이블시스템을 제작하여 실험을 수행하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교 고찰하였다.

## 2. ERF의 빙햄 특성

점성을 지닌 비전도성 오일과 전도성 입자로 구성된 ERF는 전기장 인가 시 구성요소간의 분극력(polarization force)차이로 인하여 체인 형태의 클러스터(cluster)가 형성되어 유체의 유동특성이 변하는 성질을 가지고 있다. Winslow<sup>(2)</sup>가 ER효과를 처음 발표한 이래로 이에 대한 많은 연구가 수행되어 오고 있다. ERF의 역학적 거동은 다음과 같은 빙햄모델로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} \\ \tau_y(E) &= \alpha E^x \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\tau$  는 전단응력,  $\tau_y(E)$ 는 항복전단응력,  $\eta$ 는 ERF의 점성계수,  $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비를 나타낸다. 이때 전기장의 함수인 항복전단응력은 지수함수의 형태로 표현되며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 빙햄특성실험을 통해 얻는다. 여기서 구한 항복전단응력 수식은 ERF를 이용한 응용장치에서의 성능해석을 위해 쓰인다.

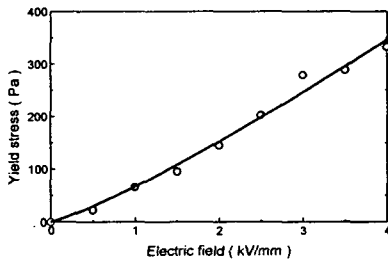


Fig.1 Bingham property of the ERF

Fig. 1은 본 연구에서 사용될 ERF의 빙햄특성으로서 전기장이 증가함에 따라 동적항복응력(dynamic yield stress)이 증가하는 것을 볼수있다.

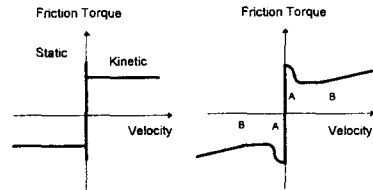
본 연구에서 ER브레이크와 ER클러치의 작동매체로 사용된 ERF의 용매로는 10cs의 점도를 가지는 트랜스포머오일을 사용하였고, 입자중량비는 30%이다.

## 3. 위치제어시스템의 모델링

본 연구에서는 이송테이블의 위치제어를 위해 볼스크류를 사용하여 이송테이블을 구성하였으며, 기존의 서보모터대신 일반 모터에 ER클러치와 ER브레이크를 부착하여 위치제어를 수행한다. 기본 작동원리는, 모터에서 발생한 토크는 제어 전기장인가해진 ER클러치와 ER브레이크를 통해 이송테이블에 전달하여 위치제어를 수행한다. 제어기 설계를 위해 ER브레이크, 클러치, 이송테이블, 마찰토크의 지배방정식을 유도하였다.

### 3.1 마찰 모델링

마찰은 상대 운동이 일어나는 모든 부분에서 발생하며, 여러 요인에 의하여 그 값이 영향을 받기때문에, 그 값을 정확히 예측하는 것은 어렵다. 그러나, 여러 부분에서 발생하는 마찰의 형태는 전체적으로 같은 형태를 가지고 있으며, Fig.2 (a)에서 간단한 마찰모델을 나타내고 있으며, Fig.2 (b)에는 보다 실질적인 모델을 나타내었다



(a) kinetic/static model (b) complex model

Fig.2 Friction versus velocity

Fig.2 (b)의 영역A에서의 마찰은 속도가 증가함에 따라 감소하며, 안정된 시스템의 제어를 불안정하게 한다. Fig.2 (b)의 영역 B에서의 마찰은 속도가 증가함에 따라 커진다. 본 논문에서는 Fig.2 (b)의 모델을 이용하였으며, 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_f &= [\alpha_0 + \alpha_1 \exp(-\beta|\dot{\theta}|)] \text{sign}(\dot{\theta}) \\ \text{sign}(x) &= \begin{cases} +1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\dot{\theta}$ 는 각속도이다.

### 3.2. 작동기의 모델링

본 연구에서는 작동기로 ER브레이크와 ER클러치를 사용한다. 첫번째로 ER브레이크는 평판형으로 제작되었으며 사진을 Fig.3에 나타내었다. 2개의 판은 바깥 본체와 1mm의 간격을 유지하며 간극 사이에 조성된 ERF로 채워진다.

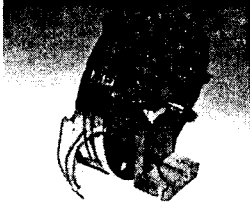


Fig.3 The proposed ER brake actuator

ER브레이크에서 발생하는 토크는 전기장 인가시에 발생하는 항복응력에 의한 제동토크, 오일의 점성에 의한 점성토크, 및 마찰토크의 합으로 나타낼 수 있다. 그러나 이들 토크 중에서 전기장에 의해 제어 가능한 것은 제동토크이며, 점성토크는 전체 시스템의 운동방정식에서 점성항으로 된다. 마찰토크는 시스템의 불확실성에 속한다. 이들 토크는 단위면적당 발생하는 항복전단응력을 전체적인 면적에 대하여 적분함으로써 얻을 수 있으며 다음과 같다.

$$T(E, r) = N \int \tau \cdot r dA + T_f$$

$$= \frac{2}{3} \pi N \alpha E^x (r_2^3 - r_1^3) + \frac{1}{2} \pi N \frac{\eta}{h} (r_2^4 - r_1^4) \omega + T_f \quad (3)$$

이거서 첫번째 항은 제동토크이고, 두번째 항은 점성토크이고, 마지막 항은 마찰토크이다.  $N$ 은 간극 수이고,  $(r_2 - r_1)$ 은 유효반지름이다. 그리고  $E$ 는 전기장이고,  $h$ 는 간극 사이의 간격이고,  $\omega$ 는 각속도이다.

ER브레이크의 성능평가 및 동특성을 고찰하기 위해 직류모터와 절연커플링, 토오크트랜스듀서로 실험장치를 제작하였다. 실험방법은 브레이크를 일정한 각속도로 회전시키면서 전기장을 가하여 발생한 제동토크를 토크 트랜스듀서를 통해 측정하였으며, 그 결과를 Fig.4 (a)에 나타내었다. 또한, ER브레이크의 동적특성을 살펴보기위해 계단입력에 대한 과도응답실험을 수행하였다. Fig.4 (b)에 나타난 결과를 살펴보면 ER브레이크는 약 10.6msec의 시상수를 지닌 1차 시스템의 거동을 보인다. 이와 같은 응답속도는 시스템의 응답속도에 비해 매우 빠르기 때문에 ER 브레이크의 동적특성을 정적관계로 근사화하였다.

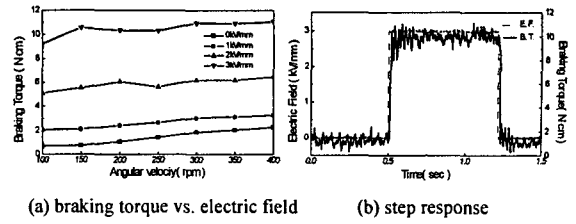


Fig.4 The performance of ER brake

다음으로 ER클러치는 실린더형으로 제작되었으며 사진을 Fig.5에 나타내었다. 두개의 실린더는 1mm의 간극을 유지하도록 설계되었으며 간극 사이에 자체 조성한 ERF를 함유한다.

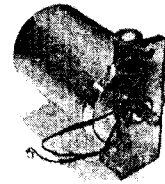


Fig.5 The proposed ER clutch actuator

ER브레이크와 마찬가지로 ER클러치에서도 동력이 전달되는 요인으로는 ERF의 항복전단응력, 오일의 점성 및 마찰이 있다. 그러나 이 중에서 동력전달에 크게 기여하는 것으로는 ERF의 항복전단응력이다. 이것은 전기장에 의해 제어가 가능하다. 이것 또한 단위면적당 발생하는 ERF의 항복전단응력을 전체 면적에 대하여 적분하여 얻을 수 있으며, 다음과 같다.

$$T(E) = \int \tau r dA$$

$$= 2\pi r_1^2 l \alpha E^x \quad (4)$$

여기서  $r_1$ 은 내부 실린더의 반지름이고,  $l$ 은 내부 실린더의 길이이다.

ER클러치의 성능평가 및 동특성의 고찰은 ER브레이크와 같은 방법으로 수행하였다. Fig.6 (a)에 나타난 결과를 살펴보면 위 식에서 주어진 바와 같이 전기장에 따라 전달되는 토크의 양을 가변할 수 있음을 알수있다. 그리고 동적특성실험은 Fig.6 (b)에서 나타내었다. 이것으로부터 ER클러치는 시상수가 144 msec로 ER브레이크보다 느린 1차 선형 시스템의 거동을 보인다. 따라서 ER클러치의 모델의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$T(E, t) = (2\pi r_1^2 l \alpha E^x) (1 - \exp^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5)$$

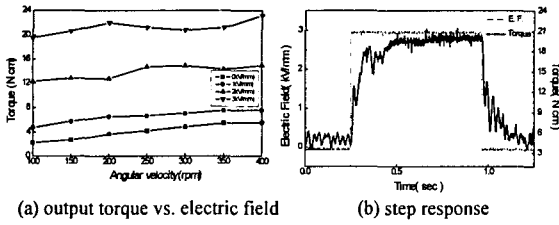


Fig.6 The performance of ER Clutch

### 3.3 이송 테이블의 모델링

이송 테이블은 볼스크류와 직선운동 가이드를 사용하여 구성하였다. ER클러치와 ER브레이크에서 볼스크류에 공급된 토크와 부하에 전달되는 힘과의 관계는 다음과 같다.

$$\tau_{in} = l F_{out} \quad (6)$$

여기서  $l$ 은 볼스크류의 리드(lead)로 볼스크류가 한 번 회전 시, 너트가 전진하는 거리를 나타낸다.  $\tau_{in}$ 은 입력토크이고,  $F_{out}$ 은 이송테이블에 가해지는 힘이다. 이와 같은 관계로부터 이송 테이블의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} &= \tau_a - \tau_l - \tau_f \\ \tau_l &= ml^2\ddot{\theta} \\ x &= l\theta \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $J$ 는 볼스크류, ER브레이크, ER클러치 및 모터의 관성 모멘트(moment of inertia)이다.  $c$ 는 점성항으로 ER브레이크 등에서의 점성마찰로 나타낸다.  $\tau_a$ 는 ER클러치와 ER브레이크를 통해 전달된 토크를 나타낸다.  $\tau_l$ 은 테이블을 포함한 이송 질량의 가속 및 감속을 위해 요구되어지는 힘을 토크로 변환한 것이다. 마지막으로  $\tau_f$ 는 마찰토크이다.

### 4. 제어기 설계

본 논문에서 제안된 이송테이블 시스템에서 발생하는 마찰은 요구되어지는 제어성능에 나쁜 영향을 미친다. 따라서 이와 같은 영향으로부터 만족할 만한 제어성능을 얻기 위하여 외란에 강건한 제어기의 설계가 필요하다. 본 논문에서 제안된 슬라이딩 모드 제어기(sliding mode controller, 이하 'SMC')는 강건제어기의 일종으로, 성능이 우수하고 설계 및 실험적 구현이 용이한 장점을 지니고 있다.<sup>(3)</sup>

슬라이딩 모드 제어기를 위하여 설정한 오차는 다음과 같다.

$$e = x - x_d \quad (8)$$

이때  $x_d$ 의 값은 이송테이블의 요구 이송거리를

나타낸다. 제어입력은 ER브레이크 및 ER클러치에 가해지는 전기장이다. ER클러치에 가해지는 제어입력은 모터로부터 이송테이블의 볼스크류로 전달되는 토크의 크기를 조절한다. ER브레이크에 가해지는 제어입력의 역할은 이송테이블이 요구치에 해당하는 거리만큼 이동하였때, 빠르게 시스템을 정지시키는 역할을 한다. 따라서 SMC의 제어입력은 ER클러치에 가해지기 때문에 다음과 같은 단일 슬라이딩 서피스(sliding surface)를 설정한다.

$$s = ge + \dot{e} = ge + \dot{e}, \quad g > 0 \quad (9)$$

여기서  $g$ 는 슬라이딩 서피스의 기울기이다. 슬라이딩 모드가 존재하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$s\dot{s} < 0 \quad (10)$$

슬라이딩 조건식을 만족하는 불연속 제어기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_a &= \tau_f + cx_2 - (J + ml^2)gx_2 - k \text{sign}(s) \\ (11) \end{aligned}$$

여기서  $k$ 는 불연속 제어 계인이다. 실제적인 제어기 구현하는데 있어서 식(11)과 같은 불연속 제어기는 채터링(chattering)을 발생시켜 제어에 바람직하지 못하므로 정해진 경계조건 영역  $\varepsilon$  안에서 불연속 제어기를 연속제어기로 근사화하여 사용한다. 식(11)의 부호 함수를 다음과 같은 포화함수로 대체한다.

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} s/\varepsilon & \text{for } |s| \leq \varepsilon \\ \text{sign}(s) & \text{for } |s| \geq \varepsilon \end{cases} \quad (14)$$

### 5. 제어결과 및 고찰

제안된 제어기법의 효율성 및 실제 시스템 적용 가능성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 실험장치의 개략도를 Fig.7에 나타내었다. 제어기는 A/D 및 D/A를 내장한 컴퓨터를 사용하였으며, 제어기에서 나온 신호는 1000배 증폭기를 거쳐서 ER클러치와 ER브레이크에 공급된다. 이동거리 측정에는 LVDT가 사용되었다. 샘플링주파수는 100Hz로 설정하였다.

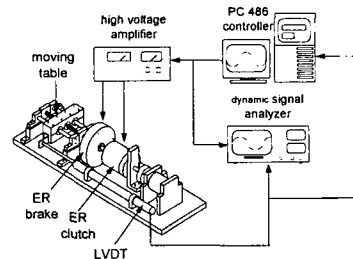


Fig.7 Experimental Configuration

Fig.8은 계단입력에 대한 위치제어결과이다. 이때 설정된 각종 변수 값은  $g = 16.4$ ,  $\varepsilon = 0.6$ ,  $k = 8.3$  이고,  $\tau_f = [0.014 + 0.011 \exp(-9.5|\dot{\theta}|)] \text{sign}(\dot{\theta})$  으로 하였으며, 실험과 시뮬레이션을 위한 시스템의 변수 값은 Table1에 제시하였다. 실험결과로부터 이송시스템은 요구치인 10mm에 비교적 정확하게 정착되는 사실을 알수있으며 시뮬레이션결과와 잘 일치한다.

SMC 제어결과의 비교를 위해 Fig.9에 PID 제어기를 사용하여 위치제어를 수행한 실험 및 시뮬레이션을 나타냈었다. PID 제어기는 SMC에 비해 느리고 마찰로 인한 약간의 오차를 발생하는 것을 알수 있다.

Table 1 System parameter of the position control system

Parameter	value	unit
Moment of inertia	0.0131	kg m <sup>2</sup>
Viscosity	0.0523	Nm s
Lead	0.3183	mm/rad
Mass of moving table	0.9	kg

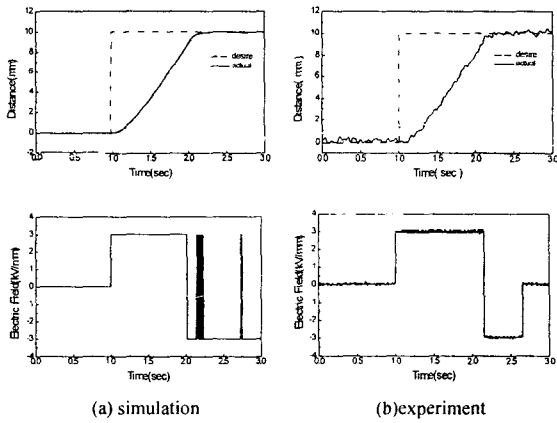


Fig. 8 Step control response using SMC

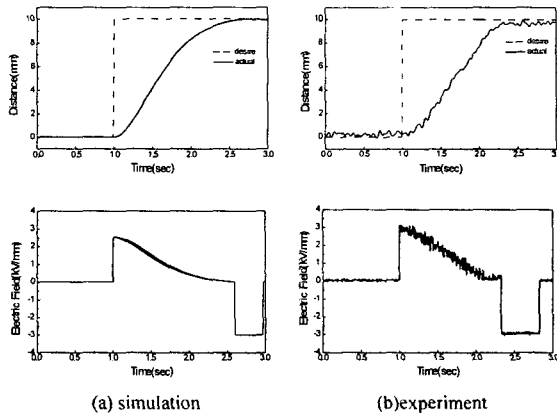


Fig. 9 Step control response using PID

## 6. 결론

본 논문에서는 일반 모터에 ER브레이크와 ER클러치를 부착하여 기존의 서보모터를 대신한 작동기로 이용한 이송테이블의 위치제어를 제안하였다. 이를 위해 ERF를 자체 조성하였고, 빙햄특성실험을 통해 얻은 ERF의 항복전단응력값을 사용하여 ER클러치와 ER브레이크의 성능평가및, 동적모델링을 유도하였다. 또한 마찰과 이송테이블의 모델을 유도하고 이를 이용하여 SMC를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 결과로부터 SMC가 만족스러운 위치제어성능을 가지고 있고 마찰 등의 외란에 강건함을 알 수 있었다. 또한, 작동기로 사용된 ER브레이크와 ER클러치는 모터와 결합하여 서보모터의 성능을 발휘할 수 있다는 잠재성을 제시하였다. 향후 보다 정밀한 위치제어를 위한 새로운 제어기 설계와 ER브레이크와 ER클러치의 개량 및 마찰에 대한 연구를 계속 수행할 예정이다.

## 참고문헌

1. Chih-Jung Huang, Jia-Yush Yen, Shu-Shung Lu, "Stability of PDF Controller with Stick Slip Friction Device", Proceeding of the American Control Conference, pp3289~3293, June 1995
2. Winslow, W. N, "Induced Fibrillation Suspensions", Journal of Applied Physics, Vol 20, pp1137~1140, 1949
3. Choi, S. B. and Park, D, W, "Moving Sliding Surfaces for Fast Tracking Control of Second-Order Dynamics", ASME Journal of Dynamics, Measurement and Control, Vol.116, pp.154~158, 1994