

ER 브레이크를 이용한 와이어 방전가공기의 장력제어

김기선*, 조명수⁺

(논문접수일 2004. 3. 15, 심사완료일 2004. 6. 16)

Tension Control of a Wire Cut Discharge Machine Using ER Brake

Key-Sun Kim*, Myung-Soo Cho⁺

Abstract

This paper presents the tension control of a wire-cut discharge machine using electrorheological(ER) fluid based brake system. On the basis of the tension level required in the machine, an appropriate size of the ER brake which features design simplicity, fast response and salient controllability is designed. Considering the Bingham property of ER fluid and actuator response time, the governing equation of the ER brake is derived. And a tension propagation of wire electrode is modeled via frequency response. The tension control performance of the discharge machine is simulated by using a robust sliding mode controller.

Key Words : Wire-Cut Discharge Machine(와이어 방전 가공기), Electro-Rheological Brake(ER 브레이크), Tension Control(장력 제어), Sliding Mode Controller(슬라이딩 모드 제어기)

1. 서론

와이어 방전가공은 직경 0.05~0.3mm 범위의 가는 와이어 전극(electrode)에 장력을 준 상태로 와이어 전극을 이송하면서 피가공물과 전극인 와이어 사이에 방전을 발생시켜 그 방전 에너지에 의하여 피가공물을 절단하는 기계 가공법이며 공작물이 설치된 테이블이 임의의 형상에 따라 구동하면서 가공하는 것이다.

Fig.1 (a)는 기존의 와이어 방전가공기의 개략도를 나타

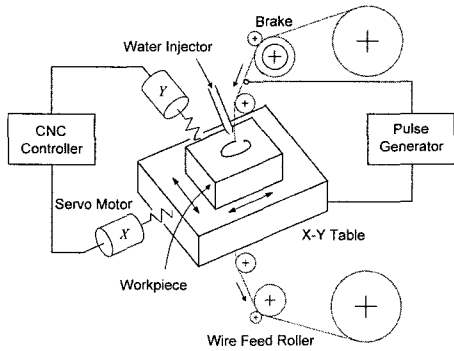
낸 것이다. 크게 공작물 이송 테이블과 방전펄스 공급장치, 와이어 송출 장치 그리고 가공액 공급장치 등으로 이루어져 있다. 그 중 와이어 이송 톨러는 와이어를 정속도로 이송 시키는 역할을 하며 상단의 브레이크에서 적절한 와이어 장력을 발생시키는 구조이다. Fig.1 (b)는 와이어 가인의 한 원인이 되고 있는 가공액 공급장치의 구성으로 와이어 전극의 진행방향과 일치하도록 구성되었다.

와이어 전극은 진동이 없는 것이 좋으나 가공 시 전극의 이송, 방전으로 인한 반발력 그리고 가공액 분사 등으로

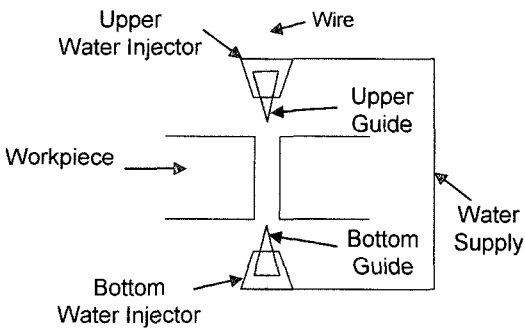
* 국립천안공업대학 기계과 (kskim@cntc.ac.kr)

주소: 330-717 충남 천안시 부대동 275번지

+ 인하대학원 기계공학과



(a) 시스템 구성



(b) 가공액 분사장치

Fig. 1 와이어 방전가공기

인한 와이어 전극의 진동은 피할 수는 없으며, 이 진동으로 인한 가공면의 진직도 저하로 연삭 등의 후가공을 하여야 할 문제점이 있다. 최근 이를 극복하기 위해 와이어 전극의 거동 및 와이어 방전가공의 정밀도 향상 그리고 와이어 전극의 장력제어에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다⁽¹⁻⁵⁾. 그러나 기존의 전자식 브레이크를 이용한 와이어 전극 장력제어 시스템은 방전 반발력 및 가공액 분사 등으로 발생하는 외란에 대하여 적절히 대응치 못할 뿐 아니라 1초에 수백번의 on/off를 반복하여 일어나는 방전력에 의한 와이어 전극의 진동을 제어하기에는 기계 및 메커니즘의 구성에서 기인하는 매우 낮은 수준의 반응속도가 문제시 되어 일정한 설정값으로 작용하여 사용되고 있다. 일반적으로 와이어의 장력이 증가될수록 공작물 절단면의 진직도는 향상되나 방전 열로 인하여 와이어의 부식된 부분이 쉽게 단선되어 장력을 크게 하는데 문제가 된다.

ER브레이크는 전기장 강도의 변화만으로 제동력을 변화시킬 수 있으며 빠른 반응속도로 실시간 연속제어가 가능하

다. 또한 기계적으로는 내·외경 드럼만 있는 매우 단순한 구조로써 간단하면서도 보다 효과적으로 실시간 제동 토크를 발생시킬 수 있는 브레이크 시스템으로 많은 연구가 이루어지고 있다. Stevens⁽⁶⁾ 등은 실험을 통해 ER유체의 가변 토크 특성을 장력 제어 등에 응용할 수 있는 가능성을 제시하였고 Carlson⁽⁷⁾ 등은 ER 브레이크 및 클러치의 기초적 형태를 제안하였다. Johnson⁽⁸⁾ 등은 실험을 통한 실질적인 응용성을 강조 하였으며 Choi⁽⁹⁾ 등은 ER브레이크를 이용한 실시간 장력 제어 시스템을 실험적으로 구현하였다.

본 연구에서는 와이어의 진폭이 최대가 될 때에만 적절한 장력을 공급하고 진폭이 작을 경우에는 장력을 풀어주는 방법으로 장력 인가시간을 최소화 함으로써 진직도 향상과 와이어 단선 방지라는 서로 상반되는 두 가지 조건을 충족시키려 한다. 이를 위하여 빠른 응답특성과 제어 용이성을 지닌 ER브레이크를 이용한 와이어 전극의 장력 제어 시스템을 제안하기 위한 기초단계 연구로서 장력제어 시스템의 설계, 모델링 그리고 제어기 구성 및 시뮬레이션을 통한 성능 평가를 하였다. 우선, 성능이 우수한 분산계 ER유체를 자체 조성 하였으며 조성된 ER유체의 방형모델을 바탕으로 ER브레이크를 설계하였으며, 모델링 시 작동기 이상수를 고려하였다. 와이어의 길이방향 진동에 대한 모델링을 수행하였으며 장력제어를 위한 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였고 시뮬레이션을 통해 요구 장력에 대한 장력제어를 수행함으로써 ER브레이크의 성능을 평가하였다.

향후 장력조건 변화에 따른 가공면의 진직도 및 방전 갭의 변화를 측정하여 ER브레이크가 발생시킨 장력과 가공물의 진직도와와의 관계를 확립하여 와이어 방전가공기의 실시간 장력 및 진동 제어 알고리즘 개발을 위한 기초적 자료를 얻어내고자 한다.

2. 시스템 모델링

Fig. 2는 본 연구에서 구성코자 하는 와이어 전극의 장력 제어 시스템의 구성도이다. 와이어의 장력은 로드셀로 측정되어 요구 장력과 비교되어지고 제어기로부터 계산된 적절한 전기장이 ER브레이크에 인가됨으로써 와이어의 요구 장력을 실시간으로 추적제어 할 수 있도록 구성되었다.

2.1 ER브레이크 모델링

빠른 응답속도 및 큰 요구 장력을 발생시키기 위한 ER브레이크는 Fig. 3과 같이 구성한다. 고정된 내부 전극과 회전하는 외부전극의 간극에 ER유체를 봉입하여 ER브레이크

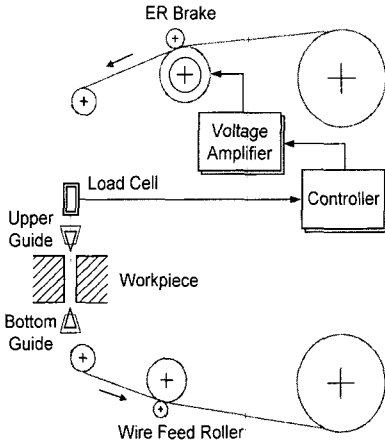


Fig. 2 ER브레이크를 이용한 장력제어시스템

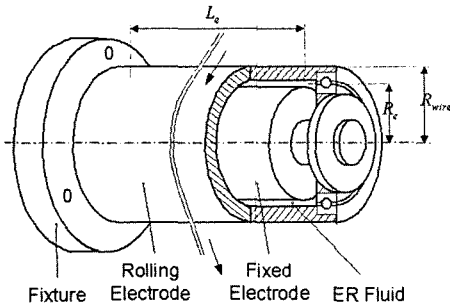


Fig. 3 ER브레이크의 구성

크에 전기장 인가 시 요구 제동 토크를 발생시키도록 하였다. 외부전극은 표면에 실리콘 코팅 처리를 하여 와이어와 충분한 마찰력을 발생시킬 수 있는 절연체 형태로 구성된다. 또한 전극간에 봉입된 ER유체는 전기장 무부하 시의 마찰 제동력을 고려하여 베이스 오일의 점성과 입자 중량비를 결정하여 자체 조성한 유체이다.

ER유체에 전기장을 인가했을 때 발생하는 항복 전단응력(τ_y)은 다음과 같이 나타난다.

$$\tau_y(E) = \alpha \cdot E^\beta \quad (1)$$

여기서 α 와 β 는 실험적으로 얻어지는 ER유체의 고유 특성치이며 각각 $\alpha=389.5$ 이고, $\beta=1.48$ 로 하였다. 이로부터 전기장 인가 시 발생하는 ER 브레이크 작동기에서의 제어 가능한 제동 장력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_c(E) = \frac{2\pi R_e^2 L_e}{R_{wire}} \tau_y(E) \quad (2)$$

여기서 R_e , L_e , R_{wire} 는 ER 브레이크의 유효반경, 유효길이 그리고 와이어 전극의 감김반경이다. 이는 장력 제어 시 요구되어지는 장력의 크기 및 ER유체의 특성치로부터 각각 28.5mm, 100mm 그리고 41mm로 설계되었다. 또한 제작된 ER브레이크의 동특성을 고려할 때 식(2)의 모델은 다음과 같이 시상수 τ 를 갖는 1차 선형 모델로 나타낼 수 있다.

$$\tau \frac{d(T)}{dt} + T = \frac{2\pi R_e^2 L_e \alpha}{R_{wire}} E^\beta \quad (3)$$

2.2 와이어 전극 모델링

Fig. 4와 같이 이송되는 와이어 전극의 미소 요소를 고려할 때 미소 전극요소에는 장력 $f(r, t)$ 이 인가되어 있다. 이때 미소요소에 대한 힘 평형식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2 u(r, t)}{\partial t^2} \quad (4)$$

여기서 ρ 는 와이어 전극 단위길이 당 질량이며 $u(r, t)$ 는 평형상태의 위치에 대한 상대변위를 나타낸다. 이때 ER브레이크와 와이어 전극간의 슬립은 존재하지 않는다고 가정한다. 또한 장력 $f(r, t)$ 는 기계적인 관점에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f(r, t) = EA \frac{\partial u(r, t)}{\partial r} = k \frac{\partial u(r, t)}{\partial r} \quad (5)$$

여기서 E 는 와이어 전극의 영률(Young's modulus)이며, A 는 전극의 단면적, $\partial u(r, t)/\partial r$ 은 변형을 그리고 k 는 와이어의 탄성계수이다.

식 (4)와 식 (5)로부터 와이어 전극의 장력 전파 모델은 다음과 같은 2차 편미분 방정식으로 얻어낼 수 있다.

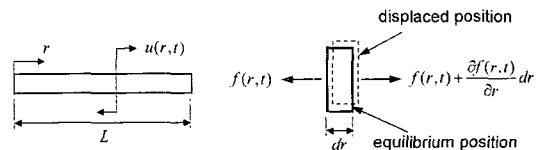


Fig. 4 와이어 전극의 미소요소

$$\frac{\partial^2 f(r,t)}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 f(r,t)}{\partial r^2} = F(r,t), \quad c^2 = \frac{k}{\rho} \quad (6)$$

위의 지배 방정식의 해 $f(r, t)$ 와 가진력 항 $F(r, t)$ 는 다음과 같이 i 번째의 모드좌표 $q_i(t)$ 와 모드형상함수 $\Phi_i(r)$ 그리고 일반화 힘 $Q_i(t)$ 로써 표현 할 수 있다.

$$f(r,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i(r) \cdot q_i(t)$$

$$F(r,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i(r) \cdot Q_i(t) \quad (7)$$

위의 식(7)을 이용하여 식(6)의 지배방정식은 다음과 같은 n 모드의 상미분 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \sum_{j=1}^p \Phi_i(r_j) \cdot u_j$$

$$i = 1 \dots n. \quad (8)$$

여기서 ω_i 와 ζ_i 는 i 번째 모드의 고유진동수와 댐핑율을 그리고 P 는 작동기의 개수를 나타낸다. 첫 번째 모드만을 고려할 때 와이어의 모델은 다음과 같다.

$$\ddot{q}_1(t) + 2\zeta_1 \omega_1 \dot{q}_1(t) + \omega_1^2 q_1(t) = \Phi_1(r_1) \cdot u_1 = C_i \cdot T \quad (9)$$

와이어 전극의 전체 장력제어 시스템에 대한 상태변수들 식 (10)과 같이 정의할 때 식 (3)과 식 (9)로 나타나는 시스템의 지배 방정식은 상태공간 상에서 식 (11)과 같이 표현 된다.

$$\mathbf{x}(t) = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [q_1 \quad \dot{q}_1 \quad \ddot{q}_1]^T$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}T_c(E)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\omega_1^2}{\tau} & -\frac{\omega_1^2 \tau + 2\zeta_1 \omega_1}{\tau} & -\frac{2\zeta_1 \omega_1 \tau + 1}{\tau} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_i \\ \tau \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [\Phi_1(r_1) \quad 0 \quad 0] \quad (11)$$

Fig. 5는 고유진동수와 댐핑율과 같은 와이어 전극의 시스템 파라미터 값을 구해내기 위한 실험장치 구성이다. 와이어 전극의 한쪽 끝은 기본 장력을 공급하기 위하여 추를 매달았으며 다른 한쪽은 가진기로부터 랜덤신호로 가진하고 로드셀을 이용하여 와이어의 응답을 측정하였다. Fig. 6은 실험으로부터 얻어진 와이어 전극의 주파수 응답특성이다. 측정 결과로부터 와이어 장력제어 시스템의 응답특성은 1차 모드가 지배적인 특성을 나타내었다. 파선은 시뮬레이션 모델의 주파수 응답특성이며 측정치와 유사함을 알 수 있다.

3. 슬라이딩 모드 제어기

실제 와이어 방전가공의 장력제어 시스템은 많은 불확실성이 있을 뿐만 아니라 방전 반발력, 가이드 롤러의 주기적인 흔들림 및 가공액의 분사 등의 외란 요소가 산재해 있다. 슬라이딩 모드 제어기는 이러한 불확실성 및 외란에 대하여 강건한 성능을 갖는 제어 알고리즘이다. 먼저 SMC 설계를 위한 제어의 목적이 와이어의 장력이 요구 장력과 같도록 하는 것이므로 다음과 같이 오차를 정의할 수 있다.

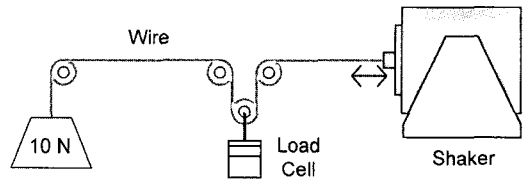


Fig. 5 와이어 전극의 주파수 응답특성

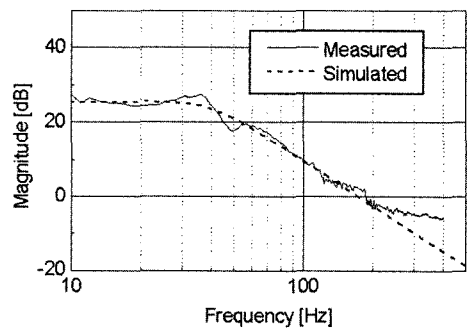


Fig. 6 와이어 전극의 주파수 응답특성

$$e_i = x_i - x_{id}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

여기서 x_{id} 는 와이어의 요구장력이다. 이들 오차로 이루어진 슬라이딩 평면을 다음과 같이 설정한다.

$$s = g_1 e_1 + g_2 e_2 + e_3 \quad (13)$$

여기서 g_1, g_2 는 슬라이딩 평면의 계수를 나타낸다. 이때 슬라이딩 평면이 안정되도록 g_1, g_2 를 설계하고 오차 공간상에 있는 RP(representative point)를 슬라이딩 평면 위로 보낸다면 추적 오차는 점근적으로 영이 될 것이다. 이것은 SMC 제어 시스템이 다음과 같은 슬라이딩 모드 존재 조건을 만족함으로써 성취될 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$s \cdot \dot{s} < 0 \quad (14)$$

식 (14)에 근거한 SMC를 설계하기 이전에 제한된 시스템의 작동기 불확실성을 변수변동으로 고려할 수 있으며, 정합조건을 만족한다고 가정할 때 이러한 변수변동은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_n + \Delta\alpha = \alpha_n(1 + \gamma_1), \quad |\gamma_1| < \phi_1 < 1 \\ \tau &= \tau_n + \Delta\tau = \tau_n(1 + \gamma_2), \quad |\gamma_2| < \phi_2 < 1 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 α_n, τ_n 는 ER유체의 특성치와 작동기 시상수의 공칭값을 나타내고 $\Delta\alpha, \Delta\tau$ 는 각각의 변수변동을 나타낸다.

이제 변수변동이 내포된 시스템에 대하여 슬라이딩 모드 존재조건 식 (14)를 만족하는 불연속 제어를 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_c(E) = \frac{1}{C_i(1-\phi_1)} & \left[(1 + \tau_n(1 + \phi_2))(2\zeta_1\omega_1 - g_2)|x_3| \right. \\ & + (2\zeta_1\omega_1 + \tau_n(1 + \phi_2)(\omega_1^2 - g_1))|x_2| + \omega_1^2|x_1| \\ & \left. + \tau_n(1 + \phi_2)(g_1|x_{2d}| + g_2|x_{3d}| + |\dot{x}_{3d}|) \right] + K \cdot \text{sgn}(S) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 K 는 양의 값을 갖는 불연속 제어 이득치이다. 실제적인 제어기의 구현에 있어 위와 같은 불연속 제어기는 바람직하지 못하므로 정해진 경계영역 ε 에서 불연속 제어를 연속 제어기로 근사하기 위하여 식 (16)의 부호함수를 다음과 같은 포화 함수로 대체한다.

$$\text{Sat}(S/\varepsilon) = \begin{cases} S/\varepsilon & \text{for } |S| \leq \varepsilon \\ \text{Sgn}(S/\varepsilon) & \text{for } |S| > \varepsilon \end{cases} \quad (17)$$

4. 장력제어 시뮬레이션

와이어 방전가공기의 장력제어 시뮬레이션을 위한 ER 유체는 실리콘 오일을 비전도성 유체로 하고 중량비 50%로 화학 처리된 전분입자를 분산시킨 ER 유체를 기준으로 하였으며 특성치는 실험으로부터 각각 $\alpha = 389.5$ 와 $\beta = 1.48$ 을 얻어내었다.

식 (3)으로부터 ER브레이크에 전기장 인가에 따라 발생 하는 장력은 Fig. 7과 같이 예측할 수 있으며 이는 와이어

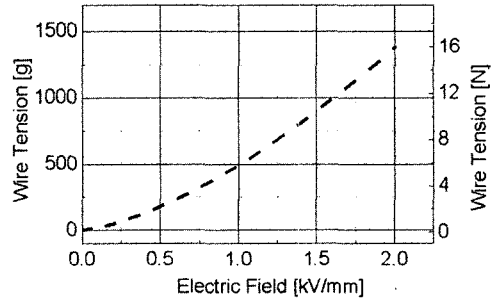


Fig. 7 전기장에 따른 와이어 장력 예측

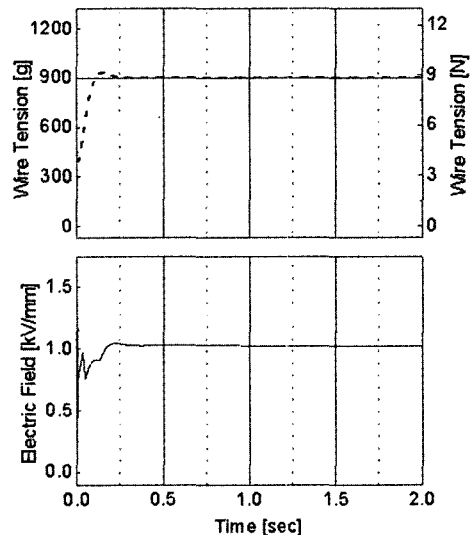


Fig. 8 와이어 장력의 정착제어 시뮬레이션

전극이 이송하기 위하여 발생하는 기본 장력을 제외한 추가적인 제어 부분만을 나타낸 것이다. Fig. 8은 900g 요구 장력에 대하여 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 정착제어 시물레이션을 수행한 결과이며 ER 브레이크에 적절한 제어 입력이 인가되어 오차 없이 잘 정착 됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 빠른 응답특성과 제어 용이성을 갖고 있는 ER브레이크 작동기를 이용하여 와이어 방전가공기의 와이어 장력을 적절히 제어함으로써 가공물의 가공 정밀도 및 직진도를 향상시키기 위한 기초연구로서 와이어 장력제어를 위한 ER브레이크 작동기의 설계 및 모델링을 하였으며, 와이어의 길이방향 장력 전파를 모델링 하였다. 시스템 불확실성에 대하여 강건한 제어 성능을 갖도록 변수변동을 고려한 시스템에 대하여 슬라이딩 모드 제어를 설계하였으며 장력 제어를 시물레이션 한 결과 ER브레이크에 적절한 제어 입력이 인가되어 요구장력을 오차 없이 빠르게 잘 정착 됨을 확인했다.

향후 방전가공중의 와이어 장력제어를 위하여 시스템 불확실성 및 방전 반발력 등의 외란을 고려한 제어를 설계할 것이며, 레이저 센서와 같은 비접촉 진동 계측시스템을 연계하여 와이어 전극의 횡방향 진동특성 및 이에 대한 모델링과 ER 브레이크의 장력제어에 대한 특성분석을 실시하는 등 와이어 전극의 파단을 막는 동시에 공작물의 직진도 향상을 위한 연구를 계속할 것이다.

참고 문헌

(1) Dauw, D. F., Sthioul, H., Delpretti, R., and Tricarico, C., 1989, "Wire Analysis and Control for Precision EDM Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 191~194.

(2) Magara, T., Yamada, H., Yatomi, T., and Kobayashi, K., 1993, "Study on Improvement of Surface Straightness in Wire-EDM," *Journal of Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 54, No. 4,

pp. 619~624.

(3) Obara, H., Tsuji, M., Ohsumi, T., and Hatano, M., 2001, "Development of Measuring System Equipped with Probe to Measure Fine Contour of Specimen," *J. of Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 67, No. 4., pp. 555~567.

(4) Guo, Z. N., Lee, T. C., Yue, T. M., and Lau, W. S., 1997, "Study on The Machining Mechanism of WEDM with Ultrasonic Vibration of The Wire," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 69, pp. 212~221.

(5) Gökler, M. I., and Ozanözgu, A. M., 2000, "Experimental Investigation of Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness in The WEDM Process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 1831~1848.

(6) Stevens, N. G., Sproston, J. L., and Stanway, R., 1998, "An Experimental Study of Electro-Rheological Torque Transmission," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 110, pp. 182~188.

(7) Carlson, D., and Duclos, T. F., 1990, "ER Fluids Clutches and Brakes-Fluid Property and Mechanical Considerations," *Proceedings of the 2nd International Conference on ER Fluids*, pp. 353~367.

(8) Johnson, R., Bullough, W. A., Firoozian, R., Hosseini-Sianaki, A., Makin, J., and Xiao, S., 1991, "Testing on a High Speed Electro-Rheological Clutch," *Proceeding of the 3rd International Conference on ER Fluids*, pp. 424~441.

(9) Choi, S. B., Cheong, C. C., and Kim, G. W., 1997, "Feedback Control of Tension in a Moving Tape Using An ER Brake Actuator," *Mechatronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 53~66.

(10) Utkin, V. I., 1974, *Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems*, MIR Publishers, Moscow.