

ER 제동장치를 적용한 와이어 컷 방전의 가공 특성

김기선[#]

Machining Characteristics of Wire EDM Using ER Brake System

Key Sun Kim[#]

ABSTRACT

This paper presents vibration characteristics of a wire cut discharge machine in which an electro-rheological brake actuator is used to control the wire tension. The ER brake actuator has several advantages including design simplicity, fast response time and real-time controllability. On the basis of the tension level required in the machine an appropriate size of the ER brake actuator is devised. The ER brake actuator is then incorporated with the machine and the field-dependent wire tension is experimentally evaluated. The straightness of the workpiece is also empirically investigated by changing the intensity of the electric field.

Key Words : Wire EDM(와이어컷 방전 가공기), Electrorheological fluid(전기유동유체), ER brake actuator (전기유동유체 브레이크), Electrical Discharge machine (방전가공)

기호 설명

τ_t = shear stress of ER fluid
 η = apparent viscosity of ER fluid
 $\dot{\gamma}$ = shear rate of ER fluid
 $\tau_y(E)$ = yield stress of ER fluid
 J = the density of the electric field.

1. 서론

최근 반도체 등 초정밀 금형과 복잡한 형상의 가공에 와이어 컷 방전 가공기(wire cut discharge machine : 이하 Wire EDM.)가 사용된다. Wire EDM는 0.05mm - 0.33mm 직경인 와이어 전극이 연속하여 세로이 이송하면서 공작물을 방전에 의하여 절단하는 정밀한 공작기계의 일종이다. 그러나 가공 시, 와이어

전극에 진동이 발생하며 이 진동으로 인한 공작물 절단면의 진직도가 나빠지고 코너 가공 시 모서리의 휨으로 정밀도를 손상시킨다.¹ 이 때문에 연삭 등으로 다시 정삭 가공하여야 하는 어려움이 있으며 그나마 소형 정밀부품은 복잡한 형상과 좁은 홈으로 인하여 정삭방법이 용이하지 않다. 와이어 진동은 와이어 이송속도와 와이어 직경크기, 가공 중 발생하는 방전 반발력 및 가공액 불출 등이 주원인으로 알려져 있다.² 이를 방지하지 하기 위한 기존 장치는 설정된 값에 따라 장력 하중을 일정하게 유지하는 장력 일정 제어 방법이다. 그러나 이 시스템의 문제점은 와이어 직경크기, 방전 반발력 및 가공액 불출 등의 변화에 따라 발생하는 불규칙한 외란에 대하여 적응하지 못할 뿐 아니라 항상 설정된 일정한 장력 값으로 유지 할 뿐이다.^{3,4} 본 논문에서는 와이어 진동을 실시간 제어

접수일: 2004년 3월 24일; 게재승인일: 2004년 8월 13일
[#] 천안공업대학 기계공학과
 E-mail kskim@cnc.ac.kr Tel. (041) 550-0246

하기 위하여 전기유동유체(Electro Rheological Fluid: 이하 ER유체)를 이용한 브레이크 시스템을 제안한다.⁵ ER유체는 전기장의 크기에 따라 항복응력이 변하며 유체자체에 대한 실용화의 문제점으로 적은 항복응력과 양금이 생기는 문제가 있으나 최근 동질성물체를 개발하여 많이 개선⁶되었고 ER유체를 응용한 연구가 제어 가능한 가변 감쇠 기구, 자동차 산업 및 군수산업을 비롯한 분야에서 진행되고 있다.^{7,8} 최근 일본에서 모형용 절단기계의 XY테이블 이송기구 및 보링머신 피드 시스템 등절삭 공작기계에 적용하려는 연구^{9,10}가 활발히 진행되고 있으나 방전 가공기 등 특수 분야에는 적용하지 못하고 있는 실정으로 이를 용도에 맞추어 정밀기계에 적용하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서 제안한 Wire EDM 용 ER 제동장치의 구조는 와이어 진동을 센서에 의하여 실시간 검출 한 후, 제어 알고리즘을 통하여 제어기에 출력하면 전압 증폭기에서 고전압이 발생되며 이 에너지로 ER 브레이크가 작동되도록 한다. 방전가공은 1초에 수 백 번 on/off 반복하여 일어나며, 가공 시 방전력에 의하여 와이어는 진동력을 받게 된다. 이를 제어하기 위해서는 수 ms의 반응속도로 장력을 제어하여야 하나 기존의 전자식 브레이크는 기계 및 메커니즘의 구조로 되어있어 반응속도가 이에 미치지 못하기 때문에 실시간 제어가 불가능하여 일정 크기의 장력을 계속하여 인가하고 있는 실정이다.¹¹ ER유체를 이용한 브레이크 (이하 ER 브레이크) 특징은 전기장 강도의 변화만으로 시스템의 제동력을 변화시킬 수 있으며, 수 밀리초(ms)의 빠른 반응속도로 실시간 연속제어가 가능하다. 또한 기계적으로 내외경 드럼만 있는 구조로 기존장비 보다 극히 간단하여 추가로 기계적 운동 부분이 없어 장치의 단순화가 가능하다. ER 브레이크는 가해진 전기장에 의해서 원하는 제동력을 발생시키므로 능동적으로 와이어 진동을 감쇠시킬 수 있는 큰 특성이 있다.

본 연구에서는 Wire EDM에 ER브레이크를 부착하여 전기장의 변화와 와이어 가공조건에 따른 변화에 따른 가공 특성을 규명하고자 한다. 이에 대한 기초 실험으로 자체 조성한 ER유체를 사용하여 이에 맞는 ER브레이크를 설계 및 제작한 후 Wire EDM에 ER브레이크를 부착하여 전기장의 크기 및 가공조건에 따른 실제 가공된 면의 형상 공차 변화를 관찰하였다. 이를 토대로 후일 외부 조건에 따라 변동되는 진폭을 실시간으로 제어하여 공작물의 진폭도를 향상시킬 수 있는 Wire EDM용 ER브레이크를 개

발하려는데 그 목적이 있다.

2. ER 유체 조성 및 실험

전기유동유체라 함은 부하되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체로 정의하며 기본적으로는 비전도성의 용액에 전도성이 좋은 입자를 분산시킨 콜로이드 액이다. ER유체의 특성은 부하 되는 전기장에 의하여 항복응력과 가점성이 증가하며 그 반응은 매우 빠르고 전기장 부하에 대하여 가역적인 반응을 나타낸다. 또한 부하 되는 전기장의 크기에 따라 국부적으로 유동을 제어할 수 있는 특성을 갖고 있다.¹² 부하 되는 전기장 강도에 대하여 항복응력이 발생되어 빙햄 플라스틱 거동(Bingham plastic behavior)을 하게 된다. 이러한 ER유체의 거동을 수학적으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\tau_t = \eta \dot{\gamma} + \tau_y(E) \quad (1)$$

여기서 τ_t 는 외부에서 가해지는 전단에 대한 ER유체의 전단응력(shear stress)을 나타내며 η 는 ER유체의 점성계수(plastic viscosity), $\dot{\gamma}$ 는 전단 속도비(shear rate), 그리고 $\tau_y(E)$ 는 전기장 E 의 함수인 ER유체의 항복응력(yield stress)을 나타낸다. ER유체의 항복응력은 전기장 E 의 크기에 대하여 지수함수의 관계를 갖으며, 이로부터 식(1)을 다시 쓰면 다음과 같이 식 (2)이 된다.

$$\tau_t = \eta \dot{\gamma} + \alpha E^x \quad (2)$$

여기서 상수 α, x 는 ER유체의 용매 종류, 용매의 점도, 입자 종류, 입자의 중량비, 입자의 크기 및 모양, 입자의 수분함량 그리고 ER유체의 사용 온도 등 ER유체의 조성 조건에 따라 달라지는 ER유체의 고유값이다.

한편 일반적으로 전류밀도는 부하 되는 전기장에 대하여 지수 함수적으로 비례하는 것으로 알려져 있으며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \alpha_1 E^\beta \quad (3)$$

여기서 상수 α_1, β 는 항복응력의 α, x 와 같이 ER유체의 고유값이다. 본 ER 조성 실험에서는 실리콘유와 corn starch입자로 조성한 ER유체(입자 중량비 25%)를 자체 조성하여 부하되는 전기장

세기의 변화에 대하여 전단응력과 전단 속도비와의 관계를 실험하였으며 전기장 부하시와 무부하시의 미시적 거동을 Fig. 1에 나타냈다. 여기에서 전기장 무부하시 Fig. 1(a)처럼 입자가 랜덤한 배열로 뉴토니안 유체(Newtonian fluid) 거동을 보이지만 전기장 부하시 입자간 체인구조배열로 되어 유체의 흐름을 막아 항복응력이 발생되어 빙행 플라스틱 거동하는 것을 Fig. 1(b)에서 관찰되었다. 조성한 ER유체를 전기장 강도에 따른 전단응력과 전단 속도비를 구하기 위하여 상용 점도계(HAAKE VT500)를 사용하여 측정하였다.

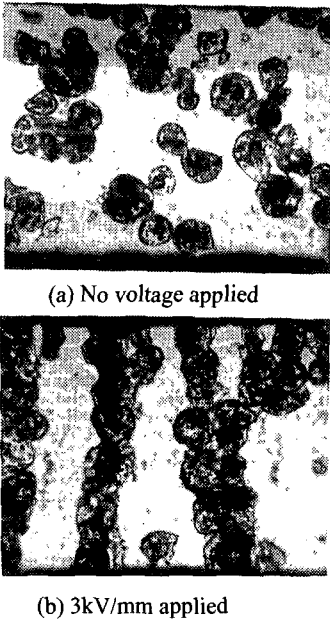


Fig. 1 Photo micro-structure of ER fluid (particle size : above 88 μm)

Fig. 2에서 자체 조성한 ER유체에 대하여 부하되는 전기장 세기의 변화에 따른 전단응력과 전단속도비와의 관계를 도시하였다. 1kV/mm이하의 전기장 부하시에는 전단속도비의 증가에 따른 전단응력의 증가는 전기장 무부하시와 거의 유사하게 나타나고 있지만, 2kV/mm의 전기장 부하 시에는 전단속도비가 증가함에 따라 전단응력이 크게 증가한 후 일정한 전단속도비를 지난 후에는 전단응력이 감소하는 거동을 나타냈다. 전기장 세기에 따른 ER유체의 동적항복응력의 변화를 Fig. 3에 도시하였다.

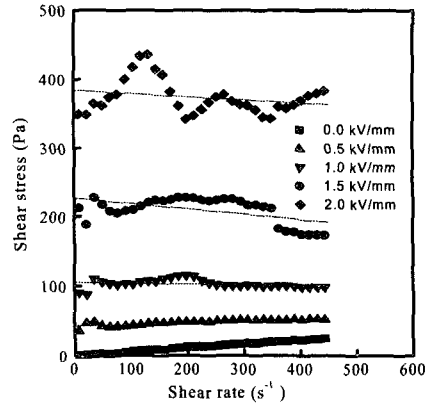


Fig. 2 Shear stress vs. shear rate

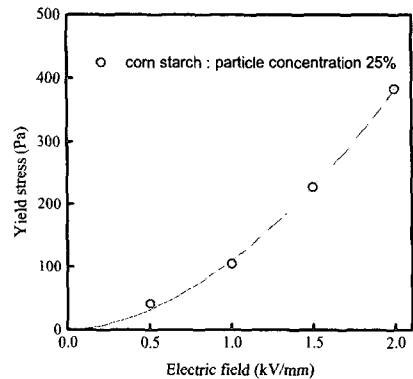


Fig. 3 Yield stress vs. electric field

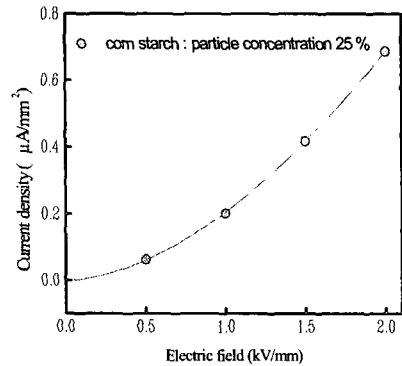


Fig. 4 The variation of current density

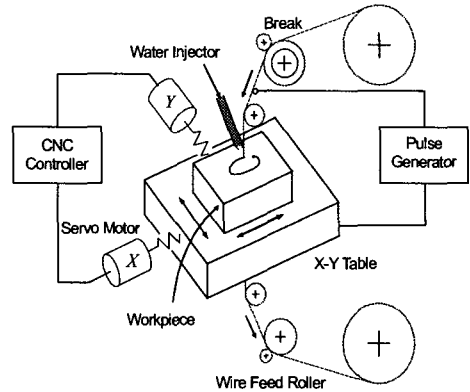
여기에서 전단모드의 유동 곡선에서 각각의 전기장에 대한 전단응력의 분포를 직선 보간하여 y 축과 만나는 절편 값을 동적항복응력으로 고려하여 구한 것이며 여기에서 전단모드에서 구한 동적항복응력은 부하되는 전기장에 대하여 비례적으로 증가하는 경향을 보여 식 (2)에 대하여 $86.20E^{1.67}$ Pa의 실험식을 얻었다.

또한 ER 효과를 나타내기 위하여 필요한 전력 소모의 관계를 예측할 수 있는 전류밀도를 실험을 통하여 Fig. 4에 도시하였다. ER유체의 전류밀도는 전기장 세기에 대하여 실험 유체의 식 (3) α_1, β 는 각각 0.063, 1.63으로 측정되었다. 상기 실험으로 두식(2), (3)의 값들은 설계 파라메타에 적용하여 ER 브레이크를 설계하였다.

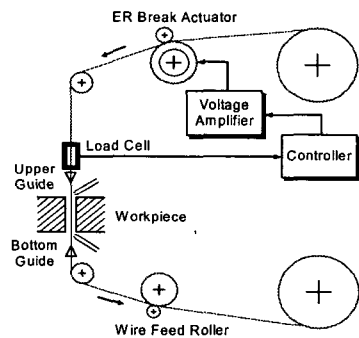
3. ER 브레이크 시스템 설계 및 제작

일반적으로 종래의 Wire EDM 장력제어장치는 Fig. 5(a)와 같이 구성되며 와이어 전극의 장력은 전자식 브레이크에 의하여 일정한 하중값으로 고정된다. 본 실험에서는 Fig. 5(b)와 같이 구성하였으며 종래의 브레이크를 제거하고 제한한 장치로 교체하여 구성하였으며 기계에 설치된 사진이 Fig. 5(c)에서 보인다. 와이어의 속도일정제어는 와이어 주행 장치에 의하여 발생되고 와이어 장력은 ER 제동장치에 의하여 발생되며 ER 제동장치는 ER 유체에 인가되는 전기장의 제어에 의하여 장력제어가 이루어진다. 이곳에 인가되는 장력은 로드셀에 의하여 검출되어 마이크로프로세서(Controller)에 보내져 제어 후 고전압 발생 장치에 신호를 보내 전기장의 크기를 제어하여 ER 제동장치의 제동력을 제어하도록 고안하였다. 실측된 장력값과 예측 목표값과 비교되어 전기장의 제어에 의하여 보상하게 된다. 이 연구에서는 원통형의 ER 제동장치를 Fig. 6(a)과 같이 고안 하였다. 내부 실린더를 고정시키고 외부 실린더가 회전하도록 되었으며 그 사이에 자체 조성한 ER유체를 충전 시켰으며 내외경 실린더에 각각 +, -의 고압을 걸어 작용하도록 하였다. 설계 파라메타는 전극길이 100mm, 내경실린더의 반경 40mm, 외부 실린더의 바깥 반경은 46mm이며 전극 간 간극은 1mm로 결정하여 설계 하였으며 이를 토대로 시작품을 Fig. 6(b)과 같이 제작하였다. 실린더는

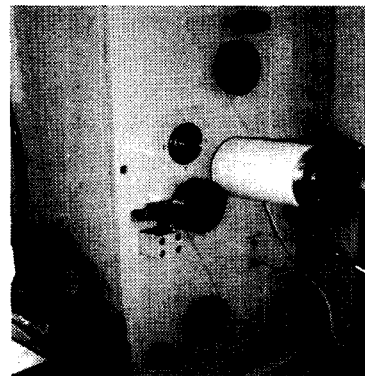
스테인레스강을 사용하였으며 외경 실린더는 표면에 미끄럼이 발생되지 않도록 실리콘으로 코팅하였고 외경과 내경 실린더가 절연되도록 세라믹 베어링을 사용하여 지지하였다.



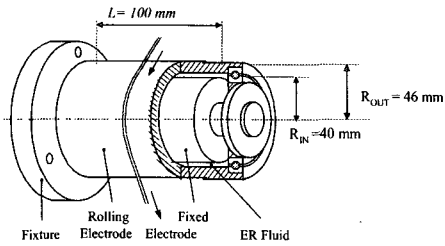
(a) Conventional Wire EDM



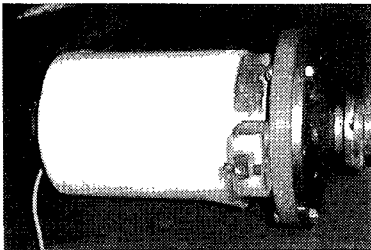
(b) Tension control with ER break actuator



(c) Photograph of installing ER break actuator
Fig. 5 Schematic configuration of Wire EDM



(a) Schematic configuration



(b) Photograph

Fig. 6 Schematic configuration and photograph of ER break actuator

제안된 ER 제동장치의 제동 장력은 식 (4)와 같이 얻어 진다.

$$T_c(E) = \frac{2\pi R_e^2 L_e}{R_{wire}} \tau_y(E) \quad (4)$$

여기에서 $T_c(E)$ 는 식(1)에서 주어지는 ER유체의 항복 전단응력의 크기에 따라 변하는 전기장의 함수이다.

4. 실험 방법

wire cut 방전가공에서의 가공정밀도는 주로 방전갭(gap)에 관계되는 가공면 정도와 가공 구멍간의 pitch, 위치 결정, 가공면 거칠기 및 제품의 진직도 등이 관계되며 이것들을 변화시킬 수 있는 인자는 가공개시전압(no load voltage), 방전전류, 방전전류 pulse폭 (on time), 방전전류, 휴지폭(off time)과 가공속도, 가공액의 비저항값과 유량, wire 장력, wire속도등 많은 인자에 따라 결정되어 진다.¹⁴ 본 실험에 사용된 장비는 일본 FANUC사의

TAPE CUT-Model L 와이어 방전 가공기이며 상기의 각종 가공조건을 Table 1과 같이 일정하게하고 제안한 ER 브레이크에 입력되는 전기장만을 변화시키면서 실험하였다. 본 연구에서 사용된 재질은 합금공구강(STD-11종)을 택하였으며, 통상 와이어 가공에서는 열처리 후 가공되며 그 조건에 따라 방전 갭이 상당한 차이를 보여 본 실험에서는 가장 널리 사용되는 경질처리 조건으로 1050℃에서 40분 가열하여 공냉 시켜 Quenching한 후 200℃에서 3시간 Tempering하였으며 그 화학 성분 및 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Experimental conditions

No load voltage	70 V	
On time	6 μsec	
Off time	14 μsec	
Servo voltage	44 V	
Water flow	15 l/min	
work feedrate	0.4 mm/min	
water	resistivity	$4 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$
	Pressure	0.8 MPa
	Flow rate	15 l/min
Wire electrode	feed	10 m/min
	materials	Brass
	Diameter	Φ0.25 mm
	Tensile Strength	443 MPa

Table 2 Properties of workpiece

Composition [%]					Tensile Strength	Hardness
C	Cr	Mo	Ni	V		
1.53	11.2	0.80	0.10	0.21	1,080 MPa	80 Hs

5. 실험 결과 및 고찰

와이어의 회전 이송 속도는 10m/min로 일정하게 회전토록 하였으며 상부가이드와 하부가이드의 간격을 60mm로 하여 와이어의 스펠길이를 고정시키고 공작물의 이송속도를 0.4mm/min로 일정 속도 제어를 하여 가공하였다. 진직도 시험편은 60mm두께의 판을 원형가공하고 코너 진직도를

위한 시험편은 10mm두께의 판을 사각 가공하여 측정하였으며 Fig. 7 은 상기 조건으로 가공한 공작물의 모형이며 그 결과는 사진과 같다. Fig. 8은 Wire EDM에서 전기장의 변화에 따라 발생하는 와이어 장력을 측정된 결과이다. 전기장이 증가할수록 와이어 장력은 직선적으로 증가하며 전기장이 인가하지 않을 시 3.85N 이던 것이 전기장을 1.75KV/mm으로 인가하였을 때 16.2N이 발생하였다. 이것은 식 (1)에서 계산한 목표값과 잘 일치하였다. 기계성능 평가를 위하여 직경 0.25mm의 황동 와이어를 사용하여 가공하였으며 공작물은 STD 11종에 대한 결과이다. 본 실험에서 Fig. 9은 전기장을 달리하였을 때 방전갭의 거리를 측정된 결과이다. 여기에서 표면에서 공작물의 중앙에 갈수록 방전갭이 증가하여 정 중앙에서 최대값을 보여 복 형상이 되는 것을 확인하였으며 이것은 와이어의 처짐에 의한 것이 주원인으로 사료된다. 또한 전기장이 증가할수록 중앙의 방전갭은 작아지는 것을 확인하였다. 전기장 무부하시 방전갭이 225 μ m 이었으나 전기장을 1.35kV/mm 인가시 203 μ m 으로 22 μ m 감소하였으며 이는 공차관리가 양호해지는 것이다. 전기장 크기에 의해 작동되는 ER브레이크에 의한 것으로 결국 이것이 제어할 수 있는 범위의 영역임을 확인하였다. Fig 10은 공작물의 원통 직경 변화를 알아 보기위하여 가공된 공작물의 직경(D₁)을 깊이에 따라 측정된 결과를 나타낸 것으로 가공물 표면으로부터의 깊이가 깊어질수록 직경이 감소 함을 알 수 있다. 또한 표면부 직경이 전기장 무부하시 7.650mm 이던 것이 1.35 kV 인가시 7.672mm로 설정값을 기준으로 0.022mm 향상되었으며 가공물의 중심 부위인 25mm 위치에서는 전기장 무부하시 7.62mm이고 1.35kV 부하시 7.652mm로 0.032mm 더욱 향상됨을 볼 수 있다. 표면과 중앙의 직경차는 가공 시 와이어의 휨으로 인한 결과이며 휨이 최대가 되는 양 고정단의 중앙 부위에서 가공물 직경이 최소가 됨을 알 수 있다. 또한 같은 위치에서도 브레이크에 입력 전기장이 커질수록 가공 직경이 커짐을 알 수 있다. 이는 장력이 커지면 와이어의 휨이 줄어들기 때문이다. Fig. 11는 공작물의 형상공차 중 진직도를 측정된 결과이다. 전기장의 크기가 증가 할수록 진직도가 양호해지는 것을 볼 수 있으며 전기장 없이 작용할 때 진직도가 15 μ m 였으나 전기장을 1.5kV/mm 인가시 10 μ m로 감소되는 결과를 얻었다. 한편 Fig. 12는 5mm두께의 합

금 공구강으로 만든 시험편으로 사각형상 가공 중 코너 모서리에서 생기는 휨 정도를 알기위해 형상 오차 길이를 측정된 것이다. 여기에서 전기장 무부하시 I₂에 대하여서는 약 14 μ m 정도 오차가 발생하던 것이 전기장이 증가하여 1.35 kV/mm 부하시 약 9 μ m 정도로 오차가 감소하였으며 약 5 μ m 정도 양호한 진직도를 보였다. 또한, I₁길이의 오차에서는 I₂보다 적은 길이의 오차를 보였다. Fig. 13은 I₁길이의 I₂길이의 차인 코너 오차의 비대칭 크기를 나타냈다. 여기에서 전기장 무부하시 약 4 μ m 정도의 오차가 발생하던 것이 전기장이 점점 커져 1.35kV/mm 부하시 약 2 μ m 정도로 오차가 감소하였으며 약 2 μ m 정도 양호한 결과를 얻었다. 이 실험을 통하여 코너 형상 가공시 전기유동유체를 이용하여 장력 조절로 좀더 대칭적으로 가공할 수 있음을 관찰하였다.

결과적으로 본 실험을 통하여 와이어 방전 가공시 직진도가 향상됨을 관찰하였으며 이는 전기장이 가해지면 전기유동유체의 항복응력이 변하고 그로 인하여 ER브레이크의 제동력이 발생되어 와이어에 가해지는 장력이 커져 진폭이 줄어들었기 때문이며 이는 브레이크의 작용이 원활히 수행됨을 알 수 있다.

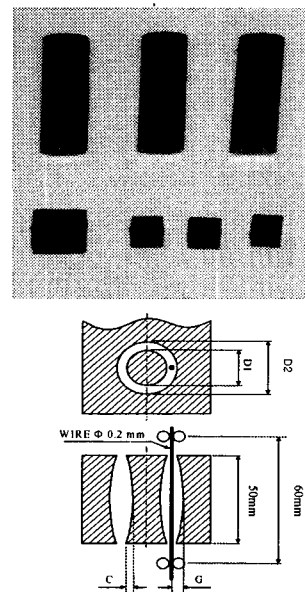


Fig. 7 Shape of cutting workpieces

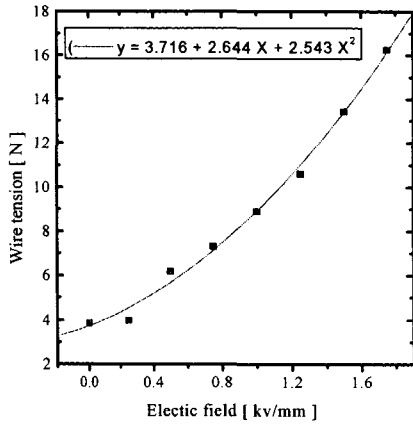


Fig. 8 Breaking tension of ER break actuator

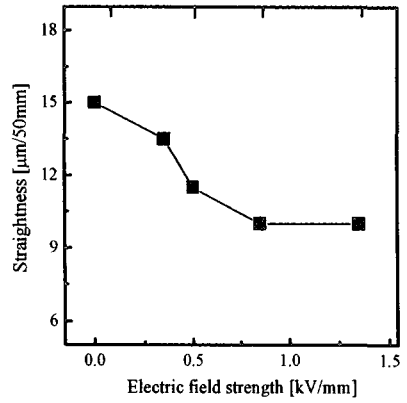


Fig. 11 Straightness of workpiece

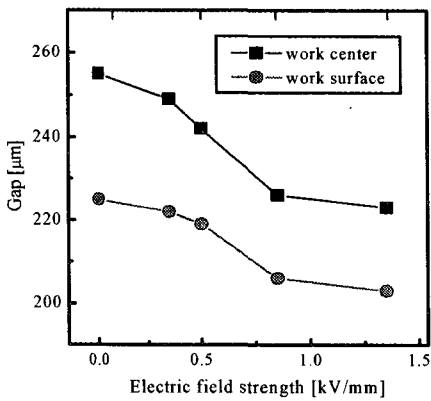


Fig. 9 Discharging gap of workpiece

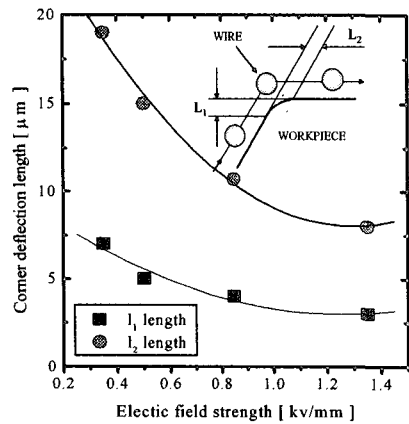


Fig. 12 Corner deflection length

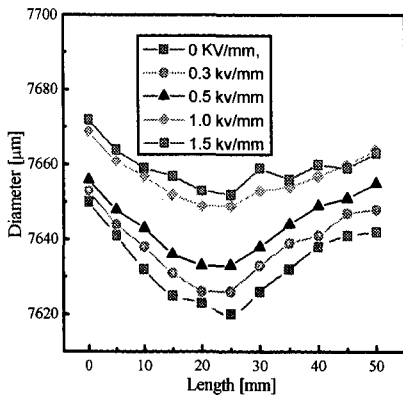


Fig. 10 Workpiece contour for various tension

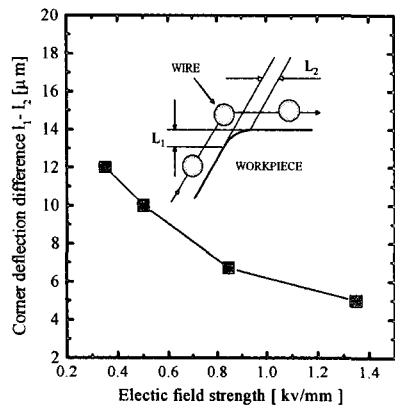


Fig. 13. Corner deflection difference of length

6. 결론

Wire EDM의 와이어 장력을 제어할 목적으로 새로이 ER 브레이크 시스템을 제안하였다. 이를 위하여 ER를 자체 조성하여 전기장 부하에 따른 역학적 거동을 실험을 통하여 항복강도에 대한 관계식을 도출하였다. 그 결과로 ER 브레이크에 적용시켜 설계 하였으며 이를 토대로 실린더형 ER 브레이크 액츄레이터를 제작 한 후 Wire EDM에 부착하여 실제 가공하여 성능을 실험적으로 평가하였다. 그 결과 전기장이 증가할수록 와이어 장력은 직선적으로 증가하며 설계 시 계산한 목표값과 잘 일치하였다. 또한 전기장이 증가할수록 방전갭이 줄어들고 진직도가 양호해지는 것을 확인하였으며 특히 60mm 두께의 공작물에서 진직도가 10 μ m정도 좋아지는 결과를 얻었다.

또한 코너의 와이어 가공 시 경사 각도의 변화에 따라 형상 오차의 길이를 측정 한 결과 ER를 이용하여 장력 조절로 좀더 직선적으로 가공할 수 있음을 관찰하였다. 결국 전기장이 증가에 따라 ER브레이크의 제동력이 증가하여 와이어에 가해지는 장력이 커져 진폭이 줄어들기 때문이며 이는 전기장 크기에 의해 작동되는 ER브레이크에 의한 것으로 결국 이것이 제어할 수 있는 범위의 영역임을 확인하였다. 이는 새로운 형태의 ER 브레이크 액츄레이터의 작용이 원활히 수행됨을 알 수 있었다. 이를 토대로 후일 외부 조건에 따라 변동되는 진폭을 실시간으로 제어하여 공작물의 진직도를 향상시킬 수 있는 Wire EDM용 ER브레이크를 개발 하려한다.

참고문헌

- Magara, T., Yamada, H., Yatomi, T. and Kobayashi, K., "Study on Improvement of Surface Straightness in Wire-EDM," JSPE, 54(4), pp.619-624, 1993.
- Lee, S. E. and Chai, H. J., "Vibration Characteristics and Tension Control of a Wire in WEDM," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol.018, No.011, pp.86-92 11,2001.
- Dauw, D. F., Sthioul, H., Delpretti, R. and Tricarico, "Wire Analysis and Control for Precision EDM Cutting," Annals of the CIRP, 38, pp.191-194, 1989.
- Gokler, M. I. and Ozanozgu, A. M., "Experimental Investigation of Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness in The WEDM Process," Inter. J. of Machine Tools & Manufacture, 40, pp.1831 - 1848, 2000.
- Kim, K. S., Choi, S. B. and Cho, M. S., "Vibration Control of a Wire Cut Discharge Machine using ER Brake Actuator," J. of Intelligent Material Syatems and Structures, Vol.13, October, pp.621-624, 2002.
- Bloodworth, R. and Wendt, E., "Materials for ER Fluids," Proc. of the 5th Conf. on ERF and MR Technology, pp.118-131, 1995.
- Kim, K. S., Choi, S. B. and Cheong, C. C., "ER Suspension System with Energy Generation," Journal of Intelligent Material systems and structures, Vol.10, September, pp.738-742, 2001.
- Song, H. J., Choi, S. B., Kim, J. H. and Kim, K. S., "Performance Evaluation of ER Shock Damper Subjected to Impulse Excitation," J. of Intelligent Material Syatems and Structures, Vol.13, October, pp.625-628, 2002.
- Kondoh, Y. and Yokota, S.S., "Actuators Making use of ER Fluids," Journal of Intelligent Material systems and structures, Vol.10, september, pp.718 -722, 2001.
- Carlson and Duclos, T. F., "ER Fluids Clutches and Brakes-Fluid Property and Mechanical Consideration," Proceedings of the 2nd Inter. Conf. on ER Fluids, pp.353367, 1990.
- Liao, Y. S., Chu, Y. Y., Yan, M. T., "Study of Wire tension process and Monitoring of WEDM," Inter. Journal of Machine Tools & Manufacture, 37(4), pp.555~567, 1997.
- Klass, D. L. and Martnek, T. W., "Electro viscous Fluids Properties," J. Appl. Physics, Vol. 38, No. 1, pp. 67-74, 1967.