

WEDG 방법을 이용한 마이크로 구조물 가공용 미세공구 제작

박성준*, 안현민⁺, 이교승⁺⁺

(논문접수일 2005. 2. 24, 심사완료일 2005. 8. 9)

Fabrication of Micro Tool Electrode for Machining Micro Structures using Wire Electrical Discharge Grinding(WEDG)

Sung-Jun Park*, Hyun-Min Ahn⁺, Kyo-Seung Lee⁺⁺

Abstract

Micro EDM process is generally used for machining microholes, cavities, and three dimensional shapes. For machining micro structures, first of all, micro tool electrode is indispensable and WEDG system is proposed for tool fabrication method. When using WEDG, its machining characteristics are highly affected by many EDM parameters such as applied voltage, current, rotation speed, capacitance, and pulse duration. Therefore, the design of experiment is introduced to fully understand the effect of the EDM parameters on machining tool electrode. And an attempt has been made to develop the mathematical model for predicting the size of the tool electrode by calculating spark distance. The suggested model was verified with experiment and predicted working gap distance is in good accord with the measured value.

Key Words : Micro EDM(마이크로 방전가공), Micro tool electrode 미세 전극, WEDG(와이어 방전 연삭), Design of experiment (실험계획법)

1. 서론

최근 첨단 산업기술의 발달과 함께 기계 기술은 기능면에서의 다양화, 고성능화, 고정밀도화 및 소형화하는 추세에 있다. 이러한 동향은 반도체, 통신, 자동차, 바이오 분야 등

거의 모든 산업분야에 적용되고 있다. 따라서, 초미세부품을 생산하기 위한 다양한 공정 및 기술이 개발되고 있다. 초미세 가공기술의 대표적인 기술로는 에칭(etching), 증착(deposition), 리소그래피(lithography) 등이 있으며 이러한 방법은 대량생산으로 표면 구조물을 가공하는데 적당하다. 하

* 삼성전기 중앙연구소 (sung-jun.park@samsung.com)

주소: 443-743 경기도 수원시 영통구 매탄동 314

+ 연세대학교 대학원 기계공학과

++ 경기공업대학 자동차학과

지만 가공재료가 실리콘 등의 특정재료에 한정되고 자유로운 3차원 형상의 구조물을 제작하기 힘들다는 단점이 있다.

기존의 가공방법을 scale-down한 대표적인 기술로는 미세 공구를 사용하는 마이크로 밀링과 드릴을 들 수 있다. 절삭가공의 소형화는 공구 제작의 어려움, 높은 비용 및 제작된 공구의 강성이나 절삭성 등의 성능문제에 의하여 원하는 가공 정밀도와 가공성능을 얻기가 힘들다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 대안으로 마이크로 방전가공(micro electro-discharge machining)이 제안되고 있다^(1~3).

미세 공구에 의한 마이크로 방전 가공은 전통적인 절삭가공과 마찬가지로 공구 형상과 공구 경로에 의해 공작물을 제거하지만, 물리적인 접촉에 의한 가공방식이 아닌 전기적인 에너지에 의한 침식(electro-erosion)에 의해 재료를 제거하므로 미세공구의 파괴 및 변형에 효과적인 해결방안이며 재료의 경도에 상관없이 전기적으로 도체인 재료를 대상으로 한다.

마이크로 방전가공을 이용하여 요구되는 형상을 제작하기 위해서는 공구에 해당하는 방전 전극의 제작이 선행되어야 하며 일정한 치수를 가진 전극의 반복적인 제작이 필수적이다. 미세 전극 제작을 위한 방법으로는 소형의 연삭술을 이용하여 성형하는 방법 또는 와이어 방전연삭(WEDG : Wire Electro-Discharge Grinding)⁽⁴⁾ 등이 있는데, 이러한 방법 중에 기장에서 전극을 제작하는 방법인 WEDG 방법을 적용하였다.

본 연구에서는 미세 전극의 제작과정에서 방전 간극 및 가공특성을 결정하는 인가전압, 전류, 축전용량, 펄스 지속시간, 와이어 이송속도 및 전극회전속도에 대해 실험계획법을 통해 각각의 기여도와 방전 간극에 미치는 영향에 대하여 자세하게 살펴보았다. 또한, 재현성 있는 전극제작을 위해 방전 간극을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하여 예측된 방전 간극값을 통해 정밀한 미세 전극을 제작하였다.

2. 이론적 배경

2.1 WEDG(와이어 방전연삭)

와이어 방전연삭방법은 미세한 와이어를 이용하여 기장에서 전극을 직접 제작하는 방법이다. 개략적인 가공원리는 Fig. 1에 나타내었다. 이송하는 와이어를 음극(-)으로 하고 전극재료를 양극(+)으로 하여 가깝게 접근시키면 방전가공의 원리와 마찬가지로 스파크가 발생하여 전극재료를 용융시켜 제거하게 된다. 이와 같은 현상을 이용하여 전극을 축

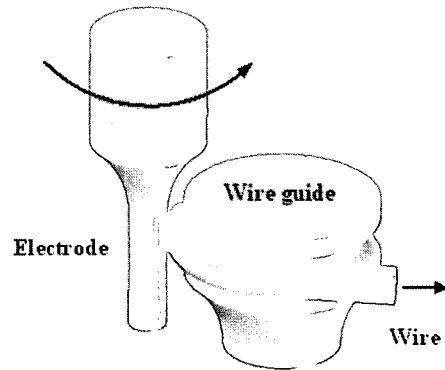


Fig. 1 Principles of WEDG

방향 및 반경방향으로 이송하게 되면 임의의 형상의 전극을 제작할 수 있다. 이와 같은 WEDG 방법의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다. (1) 와이어는 마주하는 전극에 대해서 점가공 공구로서 기능하므로 형상은 전극의 이동궤적에 의해서 생성된다. 따라서 가공정밀도는 와이어 가이드와 전극 소재를 구동하는 이송장치의 정밀도에 의해 거의 결정되며 작업자의 기능과는 무관해진다. (2) 와이어는 계속하여 이송하게 되므로 공구(와이어)의 마모에 의한 가공오차를 고려할 필요가 없다. (3) 전극재료와 와이어가 서로 비접촉인 상태에서 가공이 이루어지게 되기 때문에 직접적인 접촉에 의한 연삭방식과 비교하여 보다 미세한 전극 제작이 가능하다.

가공기 상에 이러한 WEDG 시스템을 구축하게 되면 전극을 주축에 장착한 채로 전극제작을 하게 되기 때문에 가공기에 공구를 장착할 때 발생하는 척킹 오차(chucking error)와 런아웃(run-out), 공구축의 이동(shift), 기울어짐(tilting) 등의 오차의 영향이 최소화 된다. 이와 같은 오차의 원인은 공구의 크기가 작아질수록 공구의 형상 및 가공물 치수에 지배적인 영향을 미치게 된다. WEDG 방법은 동일한 가공기에서 공구를 제작하고, 제작된 공구를 이용하여 가공에 직접 이용하므로 오차를 최소화하고 공구 재성형이 가능한 획기적인 방법이다.

2.2 방전가공변수

마이크로 방전현상에 영향을 미치는 인자들은 방전가공 현상을 규명하는데 필수적이며, WEDG 방식을 이용한 미세 전극가공에서 지배적인 가공변수로는 축전용량, 전류, 충격계수(duty factor), 와이어 이송속도 및 전극 회전속도를 들 수 있다. 각각의 인자들에 대해 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1 축전용량

미세 방전가공에 있어서 가공현상은 단발방전이 누적되어 생기는 것으로 단발 방전에너지에 의존적이며 RLC회로를 사용하는 방전회로의 경우 콘덴서의 축전용량으로 에너지를 제어할 수 있다⁽³⁾.

2.2.2 전류

전류는 방전기에 인가된 전압으로 형성되며 방전에너지를 구성한다. 인가전압(applied voltage)은 전원으로부터 콘덴서에 인가된 전압을 말한다. RLC 회로를 사용하는 방전가공의 경우 방전이 발생하는 동안에 간극에서의 전압은 인가전압보다 낮은 것이 일반적이나 저항의 인덕턴스(inductance)의 효과에 의해 전압입력의 초기상태에 인가전압보다 높아질 수 있으며, 인덕턴스의 크기에 비례하여 감쇠진동을 한다.

2.2.3 충격계수

주기적인 방전의 펄스에 있어서 인가지속과 휴지에 의한 1사이클 중에 방전전류가 흘러서 가공에 기여하고 있는 시간비율을 충격계수(duty factor)로 나타낼 수 있다. 충격계수를 D라 하면 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

$$D = \frac{\tau_p}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (1)$$

여기서 τ_{on} 은 방전전압 인가시간, τ_{off} 는 방전전압의 휴지시간, τ_p 는 피크전류의 펄스폭이다. Fig. 2는 본 실험에서 사용한 실제 마이크로 방전 가공 중의 초미세 펄스신호를 보여주고 있다. on, off 시간과 방전시간을 나타내주고 있으며 이것을 이용하여 충격계수를 구할 수 있다.

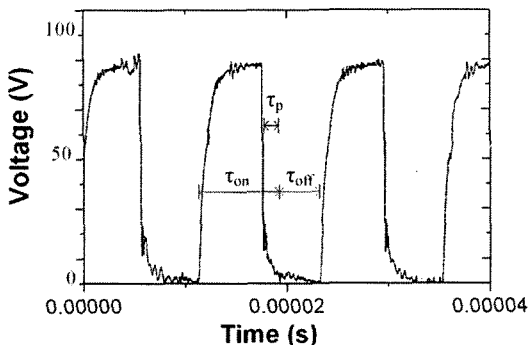


Fig. 2 Pulse signal

일반적인 방전회로로 사용되는 RLC회로는 방전전류의 인위적인 제어가 힘들지만 PWM(pulse width modulation)을 사용하여 펄스신호의 지속 및 휴지제어가 가능하다.

2.2.4 와이어전극

WEDG방법에서 전극으로 사용되는 와이어는 직진성을 좋게 하고 진동의 영향을 최소화하기 위해 장력을 크게 유지시킨다. 방전발생시 와이어에서 스파크 발생에 의한 침식 때문에 와이어의 인장강도가 약해지는데 이것은 가공중의 와이어 파단의 중요한 원인이 된다. 따라서 일정한 장력유지와 와이어의 이송속도 또한 가공변수로서 중요하다.

2.3 실험계획법

방전현상에 관계되는 변수는 여러 가지가 있으나 WEDG 방법을 이용한 마이크로 공구제작에서 가공에 주요하게 작용하는 변수를 본 논문에서는 다음과 같이 결정하였다.

- (1) 콘덴서의 용량(capacitance)
- (2) 방전전류(electrical discharge current)
- (3) 전압유지시간(on time)
- (4) 와이어의 이송속도(wire feed rate)
- (5) 스핀들의 회전속도(spindle rotating speed)

위의 가공변수를 인자로 하고 실험을 용이하게 하기 위해서 직교배열표(orthogonal array)를 사용한다. 직교배열표는 인자의 수가 많은 경우에 보통 인자의 주효과와 기술적으로 보아서 있을 것 같은 2인자 교호작용만 검출하고 나머지는 희생하여 실험계획을 용이하게 할 수 있도록 만들어 놓은 표이다^(6,7).

2.4 직교배열표와 인자선정

실험을 실시하기 이전에 실험계획법의 적용이 필요하므로 직교배열표를 작성하였다. 인자의 선정은 축전용량과 전류, 방전전압 인가시간을 방전가공 에너지를 결정하는 지표로서 주요인자로 선정하고 3개의 주효과 외에 교호작용을 고려하였다. 나머지 2인자는 주효과만 고려하였다.

각 인자의 수준은 3수준으로 하였으며 각 수준에 따른 인자들의 값은 Table 1에 정리하였다. 각 인자가 3수준이므로 각각의 자유도가 2이고 교호작용의 자유도가 4이므로 $L_{27}(3^{13})$ 형의 직교배열표를 선정하였다. 교호작용이 예상되는 축전용량과 전류, 전압 인가시간을 고려하여 선점도를 작성한 후 직교배열표에 인자를 배치하였다

Table 1 Factors and levels

Factor	Level		
	1	2	3
A: capacitance (pF)	100	500	1000
B: current (A)	0.5	0.34	0.2
C: on time (μs)	1	3	5
D: wire feed rate (mm/s)	0.94	1.88	3.77
E: spindle rotation (rpm)	100	300	500

3. 실험장치

3.1 방전회로

실험에 사용된 방전 회로는 PWM(pulse width modulation)을 장착한 RLC 회로를 기본으로 하고 있다. RLC회로의 원리는 콘덴서에 충전된 전하를 방전하는 방식이며 특징으로는 전류의 피크치 I_p 가 높고 전류의 펄스폭 τ_p 가 짧은 방전전류를 얻기 쉽기 때문에 다듬질가공에 적합하다. 하지만 방전 집중 현상이 유발될 가능성이 크다⁽⁴⁾. 이와 같은 단점을 보완하기 위해서 빠르게 절연특성을 회복할 수 있도록 방전전원을 제어하여 원활한 방전을 유도할 수 있는 회로를 제작하였다. Fig. 3은 PWM을 장착한 방전가공기의 회로도도를 보여주고 있다. 전원은 0V에서 300V까지 가변 가능하며 허용 전류는 1A로 하였다. PWM은 회로에 흐르는 전류를 최소 400ns에서부터 0.2 μs 의 분해능으로 제어가 가능하다

방전회로에서 저항의 인덕턴스는 콘덴서에 전류가 흐를 때 인가된 전압보다 4~6배에 이르는 순간적인 전압상승을 가져오며 이때 감쇠진동을 하게 된다. 이러한 전압상승은 저항의 인덕턴스의 크기에 비례한다. 그리고 RLC 회로에서의 순간적인 전압상승은 에너지의 증가로 이어져 가공효율을

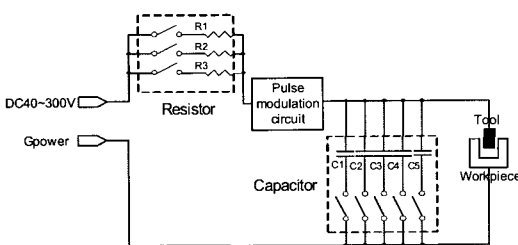


Fig. 3 EDM circuits

높이는 효과가 있으나 반대로 가공된 표면의 상태는 악화되는 결과를 가져온다. 따라서, 권선저항의 사용으로 인한 인덕턴스(inductance)발생을 최소화 할 수 있는 무유도저항을 장착하여 사용하였다.

Table 2에는 방전회로에 부착되어 있는 콘덴서의 용량과 저항의 크기를 정리하였다.

3.2 가공기의 구조

WEDG 방법을 적용하여 미세전극 가공을 하고 가공한 전극으로 미세 형상을 가공하기 위한 마이크로 방전가공기의 대략적인 구조는 Fig. 4에 나타내었다.

간략하게 구조 및 기능에 대하여 설명하면 다음과 같다. 기본적으로 x축, y축, z축의 3축 이송계로 이루어져 있으며 각 축을 이송하기 위한 구동계는 스텝 모터를 사용하였다. 이외에 z축의 주축(spindle) 회전, 보빈의 회전과 장력을 유지하기 위한 모터를 추가로 사용하였다. 이와 같은 이송계와 구동시스템은 PID 방식으로 제어되며, 이송 정밀도를 높이기 위하여 0.1 μm 분해능의 리니어 스케일을 이용한 피드백 정밀 이송계를 사용한다. Fig. 5에서는 WEDG 시스템에 의해 전극을 가공하고 있는 모습을 보여주고 있다.

Table 2 Capacitors and resistors used in EDM circuit

capacitor (pF)	1	10	30	50	75
		100	500	680	1000
resistor (Ω)	100	200	300	500	1000

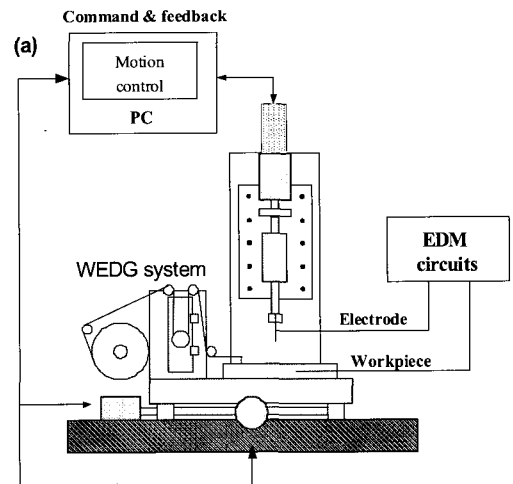


Fig. 4 Schematic diagram of EDM machine

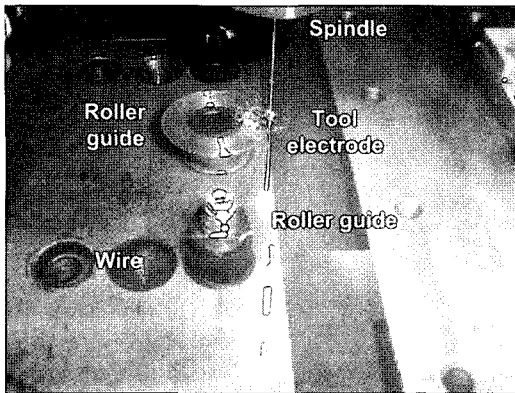


Fig. 5 Micro tool fabrication using WEDG

4. 실험 및 실험결과

4.1 실험

실험계획법을 통해 각 인자에 대한 전극의 가공깊이 즉, 방전거리에 미치는 영향에 대해 조사하였으며 결과값을 GD(gap distance)로 하였다. 여기서, GD는 와이어전극에서 공구까지의 거리를 의미한다. 본 실험에서 측정한 GD는 전극의 최종 크기 예측에 아주 유용한 값이다. 실험순서는 특정효과에 치우치지 않게 하기 위해서 랜덤화하여 실시하였고 실험결과는 3회 측정한 평균값이다. 수준에 따른 인자의 범위는 최적조건을 도출하기 위한 기초실험을 바탕으로 하여 결정하였다. 와이어의 재질은 구리이며 지름은 200 μ m이다. 공구의 재료는 대표적인 전극재료인 텅스텐 카바이드이다. 절연액은 등유를 사용하였으며 Table 3에 인자의 배치와 각각의 실험 결과를 나타내었다.

4.2 결과 분석

Table 4는 실험결과를 분산분석(analysis of variance : ANOVA)을 이용하여 해석한 것이다. 여기서, S는 변동, Φ 는 자유도, V는 분산, F_0 는 F검정값이며, p 는 기여도이다.

위의 결과를 살펴보면 B인자가 5%, C인자가 1%, A인자와 A×B의 교호작용이 유의수준 25%로 유의하다. 유의하지 않은 나머지 인자들을 풀링(pooling)하면 Table 5와 같다. 풀링 후의 분산분석 결과를 살펴보면 축전용량과 전류, 그리고 인가된 방전전압의 유지시간이 방전간극에 주된 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Table 3 Experimental results

No	A (pF)	B (A)	C (μ s)	D (mm/s)	E (rpm)	GD (μ m)
1	100	0.5	1	0.94	100	18.59
2	100	0.5	3	1.88	300	23.36
3	100	0.5	5	3.77	500	26.81
4	100	0.34	1	1.88	300	17.61
5	100	0.34	3	3.77	500	21.96
6	100	0.34	5	0.94	100	21.44
7	100	0.2	1	3.77	500	15.21
8	100	0.2	3	0.94	100	20.43
9	100	0.2	5	1.88	300	18.63
10	500	0.5	1	1.88	500	17.32
11	500	0.5	3	3.77	100	24.85
12	500	0.5	5	0.94	300	23.19
13	500	0.34	1	3.77	100	20.65
14	500	0.34	3	0.94	300	25.58
15	500	0.34	5	1.88	500	23.35
16	500	0.2	1	0.94	300	20.4
17	500	0.2	3	1.88	500	20.81
18	500	0.2	5	3.77	100	21.68
19	1000	0.5	1	3.77	300	17.24
20	1000	0.5	3	0.94	500	23.56
21	1000	0.5	5	1.88	100	22.63
22	1000	0.34	1	0.94	500	20.52
23	1000	0.34	3	1.88	100	24.89
24	1000	0.34	5	3.77	300	26.28
25	1000	0.2	1	1.88	100	18.48
26	1000	0.2	3	3.77	300	20.26
27	1000	0.2	5	0.94	500	18.86

Table 4 ANOVA table

Factor	S	Φ	V	F_0
A	10.80	2	5.40	2.05
B	48.12	2	24.05	9.15*
C	108.90	2	54.45	20.70**
D	3.61	2	1.80	0.69
E	1.69	2	0.84	0.32
A×B	27.98	4	6.99	2.66
B×C	3.02	4	4.78	1.82
A×C	19.12	4	0.75	0.29
e	10.52	4	2.63	
T	233.78	26		

Table 5 ANOVA table after pooling

Factor	S	Φ	V	F_0	ρ (%)
A	10.80	2	5.40	2.28	4.61
B	48.12	2	24.05	10.13	20.57
C	108.90	2	54.45	22.94	46.58
A×B	27.98	4	6.99	2.95	11.96
e	37.97	16	2.37		16.24
T	233.78	26			100

5. 방전간극의 수학적 모델

전절에서 적용한 실험계획법을 통해 선정된 방전간극에 미치는 주요한 인자인 축전용량, 전류, 그리고 인가된 방전 전압 유지시간의 영향을 기초로 하여 방전간극을 가공조건에 따라서 예측할 수 있는 모델을 개발하였다.

5.1 모델링

마이크로 방전가공에서 전원의 구조는 RLC 회로를 기본 구조로 하고 있으며 콘텐서를 가진 회로의 에너지는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다^(9,10).

$$E = (C + C') \frac{V^2}{2} \quad (2)$$

여기서, E 는 전기에너지 [J], C 는 콘텐서의 용량 [pF]을 V 는 인가전압 [V]을 나타낸다.

C 는 방전회로에 장착된 콘텐서의 용량을 C' 는 전극과 방전기 사이의 축전용량 즉, 절연액의 축전용량을 나타낸다. 실제 C 의 값은 매우 작으며 가공 시 동일하게 작용한다는 가정 하에 무시할 수 있다. 그리고 콘텐서의 전기에너지는 실제 가공에 영향을 미치는 전기적인 에너지로 나타낼 수 있고 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E_{\text{machining}} = V_d \cdot I_d \cdot \tau_d \quad (3)$$

여기서, V_d 는 방전전압, I_d 는 방전전류, τ_d 는 방전시간을 나타낸다. RLC회로에서 방전 전압은 다음 식을 따른다.

$$V_d = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t_c}{CR}}\right) \quad (4)$$

여기서, V_0 는 인가전압(applied voltage), R 은 저항, t_c 는 방전이 발생되기까지의 충전시간이다.

인덕턴스와 콘텐서의 영향에 의해 RLC 회로는 진동감쇠

회로가 되고 방전 회로에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$I \approx \frac{E_d - e_g}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \cdot \sin \frac{t}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

여기서, e_g 는 아크전압을 L 은 인덕턴스[H]를 나타낸다. 가공에 직접적으로 관여하는 것은 피크 전류이고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_p = \frac{(E_d - e_g)}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (6)$$

방전전류의 유입은 전압인가 시간동안 일어나며 전류의 실제 유입시간인 방전전류펄스폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_p = \pi \sqrt{LC} \quad (7)$$

일반적인 RLC회로에 PWM을 장착함으로써 스위칭 회로를 구성하였으므로 전류의 on, off가 가능하게 되었다. 따라서 전체 시간에 대한 가공전류에 대한 비를 충격계수(duty factor)로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표시한다.

결론적으로 가공에너지에 의해 가공물이 소거되는 메커니즘은 다음식과 같이 간단히 표시할 수 있다.

$$GAP_{\text{max}} = A \cdot I_p^\alpha \cdot \tau_p^\beta \cdot D^x \quad (8)$$

여기서, GAP은 WEDG방식을 사용하여 미세공구를 제작할 때 와이어전극에 의해 공작물로 발생하는 방전스파크가 미치는 간극을 나타내며, 위 식은 방전전류와 전류가 흐르는 시간으로 방전에너지를 형성하는 것을 나타내고 있다. WEDG방식을 사용하여 공구를 제작할 때 영향을 미치는 다른 인자들, 충분한 장력을 가진 와이어의 이송속도와 공구를 지지하는 스피들의 회전속도는 일정수준 이상의 값을 유지할 때 위식은 지극히 타당하다.

회귀분석을 사용하여 위 모델의 계수를 결정할 수 있다. 앞의 실험을 이용하여 계수를 결정하면 다음과 같다.

$$GAP_{\text{max}} = 5.818 \cdot I_p^{0.2797} \cdot \tau_p^{0.1960} \cdot D^{-0.0515} \quad (9)$$

여기서, I_p 는 피크전류값으로 단위는 [mA], τ_p 는 피크전류의 펄스폭으로 단위는 [μ s]이다. 와이어의 이송속도가 0.94mm/s 이상, 공구를 회전시키는 스피들의 회전속도가 100rpm 이상에서 위의 방전간극 예측 수식은 타당하며 가공조건을 통해서 가공거리 예측이 가능하다.

5.2 모델 검증

무유도저항을 사용한 가공실험의 결과값을 이용하여 모델 검증을 실시하였다. 무유도저항을 사용한 가공은 유도저항에 비해 인덕턴스를 가지지 않아 전압의 증폭이 없을 뿐만 아니라 큰 저항값으로 낮은 에너지를 가지므로 작은 방전가공간극을 가지며 표면품질도 우수해 미세가공에 필수적이다. Table 6에 실험조건과 결과값 그리고 모델링에 의한 예측값과의 비교를 나타내었다.

검증된 모델을 이용하여 앞에서 행한 실험 결과값에 대하여 예측값을 구할 수 있다. Table 7과 Fig. 6은 결과값과 모델에 의한 예측값을 보여주고 있다.

6. 미세 공구 제작

가공조건에 대한 방전간극을 예측하기 위해 개발된 수학

Table 6 Model verification

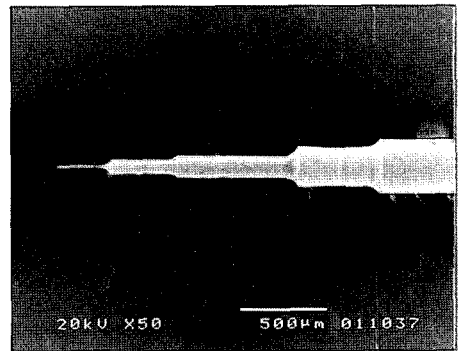
A (pF)	B (A)	C (μ s)	D (mm/s)	E	Predict GD(μ m)	observed GD(μ m)
100	0.1	1.2	1.88	300	15.91	15.58
100	0.125	2.8			13.86	15.66
100	0.178	2			15.63	16.96

Table 7 Predicted and observed gap distance(μ m)

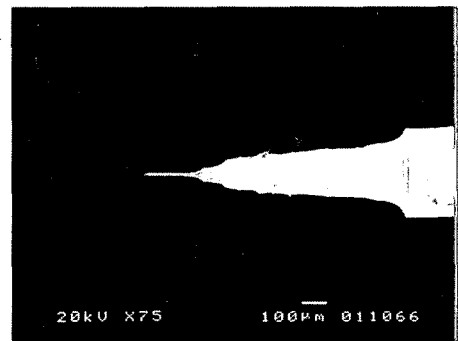
No	observe	predict	No	observe	predict
1	18.59	18.04	15	23.35	23.77
2	23.36	23.54	16	20.4	17.78
3	26.81	24.68	17	20.81	19.96
4	17.61	17.81	18	21.68	20.82
5	21.96	22.52	19	17.24	20.47
6	21.44	23.55	20	23.56	23.42
7	15.21	16.05	21	22.63	24.45
8	20.43	19.16	22	20.52	20.42
9	18.63	19.99	23	24.89	22.53
10	17.32	19.09	24	26.28	23.61
11	24.85	23.78	25	18.48	18.92
12	23.19	24.73	26	20.26	20.61
13	20.65	18.98	27	18.86	21.38
14	25.58	22.70			

적 모델을 통해 예측된 간극값을 이용하여 Fig. 7과 같은 형상을 가진 미세 공구를 제작하였다. 미세 공구 끝 부분의 지름은 각각 10, 7.5 μ m 이며 공구의 길이는 각각 350, 200 μ m 이다. 제작된 공구는 반지름이 각각 3.75, 5 μ m이므로 방전간극이 반지름만큼 잘못 예측될 경우 전극이 완전히 가공된다. 모의실험을 통해 예측된 방전간극은 수 μ m에서 약 30 μ m까지 가공조건에 따라 달라진다. 따라서, 방전간극을 정확하게 예측하지 않고 가공을 할 경우 최종단계에서 전극이 방전간극 내에 위치하여 소멸되게 된다.

미세공구는 방전간극을 고려하여 수십 회의 반복적인 가공정으로 제작하였으며, 와이어 이송속도는 3가지로 하였다. 가공초기에는 0.33, 0.5A, on-time 5 μ s 그리고 1000, 5000pF의 캐패시터를 사용하여 전극으로 에너지 유입량을 늘려 빠른 가공이 이루어지게 한 후 최종적으로 0.1, 0.2A, on-time 1 μ s 와 100pF의 캐패시터로 정확한 치수제작을 하였다. 또한, 공구의 충분한 강성을 유지하기 위하여 단차형상을 가지도록 제작하였다.



(a) ϕ 10 μ m L 350 μ m



(b) ϕ 7.5 μ m L 200 μ m

Fig. 7 SEM image of fabricated micro tools

7. 결론

마이크로 방전 프로세스를 이용하여 WEDG 방식으로 미세공구를 제작하는 데 있어서 여러가지 가공변수가 전극가공에 미치는 영향과 각각의 상호작용을 실험계획법을 적용하여 분석하였고, 실험계획법의 결과를 토대로 방전간극을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하였다. 또한, 예측된 방전간극을 이용하여 미세 공구를 제작하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 실험계획법을 통해 실험결과를 분석한 결과 콘텐츠의 용량과 전류값, 펄스지속시간이 방전간극에 주요한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 방전가공의 기본원리는 콘텐츠에 저장된 에너지가 공작물로 전달되는 현상으로 설명할 수 있으며, 전달된 에너지는 방전전류와 전류가 가공물에 유입된 시간의 함수로 나타낼 수 있다.
- (2) 실제 WEDG 가공에서 와이어의 이송속도와 스피들의 회전속도는 영향을 크게 미치나 일정수준이상의 속도영역에서는 직접적인 영향을 미치지 않는다. 특히 와이어는 전극의 형상에 직접적으로 연관되어 있기 때문에 미세한 진동을 방지하기 위해 일정 이상의 장력을 유지하여야 한다. 스피들의 회전은 원통 형상을 가진 공구제작에 필수적이며 와이어와 전극사이에 존재하는 방전 부스러기(debris)를 제거하여 불규칙적인 2차 방전을 억제하여 균일한 전극형성에 도움을 준다.
- (3) 일반적인 RLC 회로에 PWM을 추가함으로써 아크방전을 방지하고 균일한 방전을 이루었으며 전압의 인가시간을 조절함으로써 방전에너지의 제어가 가능하였다. 일반적인 RLC회로는 방전현상이 외부환경에 영향을 받아 제어가 힘들었으나 인위적으로 펄스의 on, off 시간을 조절하여 아크방전의 발생을 방지하고 원활한 방전을 이루어 전극의 균일한 형상을 유도하였다.
- (4) 방전가공에 직접적으로 영향을 미치는 주요한 인자를 이용하여 방전간극을 예측할 수 있는 수식을 도출하였으며 이를 이용하여 실험적으로 검증한 결과 이론과 잘 일치하였다. 또 이 예측 모델을 이용하여 원하는 치수를 가진 미세전극을 제작하였다.

참고 문헌

- (1) Rajurkar, K. P. and Yu, Z. Y., 2000, "3D Micro EDM Using CAD/CAM," *Annals of the CIRP*, Vol. 49, pp. 127~130.
- (2) Chu, C. N., Kim, G. M., and Kim, S. Y., 2000, "Fabrication of Micro-Shapes Using EDM and Ultrasonic Machining," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 20~27.
- (3) Kim, Y. T., Park, S. J., and Lee, S. J., 2003, "Micro-Shapes Machining Using Micro-EDM Process," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 109~117.
- (4) Masuzawa, T., and Fujino, M., 1985, "Wire Electro Discharge Grinding for Micro Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, pp. 431~434.
- (5) Yang, C. N., 1999. *Physical Modeling of Wire-Cut Electrical Discharge Machining*, Ph. D. Dissertation, University of California, USA.
- (6) Montgomery, D. C., 1987, *Design and Analysis of Experiment*, Wiley, New York.
- (7) Taguchi, G., 1991, *System of Experimental Design*, Quality resources, New York.
- (8) Lochner, R. H., and Matar, J. E., 1990, *Designing for Quality - an Introduction to the Best of Taguchi Method and Western Methods of Statistical Experimental Design*, Quality Resources, New York.
- (9) Spedding, T. A., and Wang, Z. Q., 1997, "Study on Modeling of Wire EDM Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 69, pp. 18~28.
- (10) Karthikeyan, P. R., Narayanan, L., and Naagarazan, R. S., 1999, "Mathematical Modeling for Electric Discharge Machining of Aluminium-silicon Carbide Particulate Composites," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 87, pp. 9~63.