

WEDG 전극가공에서의 전극표면형상의 실험적 고찰

안현민*, 김영태, 박성준, 이송규(연세대 대학원 기계공학과), 이상조(연세대 기계공학과)

Experimental study on the surface integrity of electrode for WEDG process

H. M. Ahn, Y. T. Kim, S. J. Park, S. K. Lee(Mech. Eng. Dept., YONSEI UNIV),
S. J. Lee(Mech. Eng. Dept., YONSEI UNIV.)

ABSTRACT

Micro-EDM is generally used for machining micro holes, pockets, and 3-D structures. For micro-EDM, first of all, micro-electrode fabrication is needed and WEDG system is proposed for tool electrode fabrication method. When tool electrode is fabricated using WEDG system, its characteristics are under the control of many EDM parameters. Also relations between the parameters affect electrode fabrication. In this study, experiments are carried out to analyze effects of EDM parameters about electrode surface integrity on micro-electrode fabrication. Experimental method and analysis are used to experimental design method. Factors used in experiments are composed of capacitance, resistance, pause time, wire feed rate, spindle rotating speed. As a result of experiments, capacitance and resistance affect electrode surface.

Key Words : Micro-EDM, WEDG, EDM parameters, Experimental design, G(grain size number), ANOVA

1. 서론

고밀도 집적회로를 비롯한 첨단산업기술의 발달과 함께 고정밀도를 요구하는 제품에 대한 수요가 갈수록 요구되고 있다. 이와 같은 제품을 생산하기 위해 많은 가공방법이 이용중이며 현재에도 개발 중에 있다. 미세가공기술이 요구되는 대표적인 생산품으로 반도체소자를 들 수 있으며 이와 같은 제품의 제작에 사용되는 에칭(etching), 침전(deposition), 리소그라피(lithography), 레이저(laser)와 같은 미세공정(micro-fabrication)은 대량생산하에서 표면 구조물을 가공하는데 적당하다. 그러나 이와 같은 가공방법은 가공재료가 실리콘 등의 특정재료에 한정되고 Z축으로의 낮은 가공성 때문에 가공 깊이가 수 μm 에 이르는 등 제약조건이 따르므로 3차원 형상의 구조물을 가공하기 위한 방법으로 마이크로 방전가공(micro electrodischarge machining)이 제안되고 있다⁽¹⁾⁽²⁾.

마이크로 방전가공(micro EDM)은 전통적인 가공방법 또는 슈퍼드릴가공과 같이 공작물과 공구의 직접적인 접촉방식에 의한 가공이 아니라 전기적인 침식(electro-erosion)에 의해 재료를 제거하기 때문에

공구나 가공물의 변형문제에 효과적인 해결방안을 제공하며 재료의 경도나 강도에 상관없이 전기적으로 도체인 재료의 가공에 이용된다.

방전가공에서의 전기적인 침식에 의한 가공은 불규칙적인 방전 표면을 생성하며 방전가공의 커다란 제한점인 가공속도를 개선하기 위해서는 황삭 가공 조건이 필수적이지만 황삭 가공조건에서는 균일한 표면을 얻는 것이 힘들다. 더욱이 미세전극의 가공에 있어서 형상뿐만 아니라 균일한 표면의 형상은 방전가공시 공작물의 형상오차에 영향을 미치고 전극품질을 결정하므로 중요한 인자로 인식되고 있다.

방전가공을 이용한 전극제작에서 가공량, 표면품위를 비롯한 가공특성을 결정하는 가공변수들이 있으며 본 연구에서는 전극제작시 전극표면 형상에 대해서 가공변수들의 기여도와 그들의 관계에 대해 실험계획법을 통해서 알아보도록 한다.

2. 실험계획법

2.1 실험계획법의 개요

실험계획법은 제품의 특성에 영향을 미치는 인

자를 선정하고 인자사이의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 데이터를 얻고 분석함으로써 제품의 최적 제조 조건을 경제적으로 찾아내고자 하는 학문으로 간단히 말하면 실험에 대한 계획 방법을 의미한다. 해결하고자 하는 문제에 대하여 1) 실험을 어떻게 실시하고, 2) 데이터를 어떻게 수집하며, 3) 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수로부터 최대의 정보를 얻을 수 있는 가를 계획하는 것이다. 따라서 하나의 실험계획법을 수립하였다는 것은 1) 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자(Factor)를 선정하고 2) 실험 방법을 택하였으며, 3) 실험순서를 정하고, 4) 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적 분석 방법을 선택하였다는 것을 의미한다⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

2.2 직교배열표와 인자선정

실험에서 일반적으로 고려해야 할 인자의 수는 많다. 인자의 수가 많은 경우에는 보통 인자의 주효과와 기술적으로 보아서 있을 것 같은 2인자 교호작용만 검출하고 나머지는 회생하여 실험횟수를 줄이는데 이와 같은 상황에서 실험계획을 용이하게 할 수 있도록 만들어 놓은 표를 직교배열표(table of orthogonal array)라 한다⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

본 실험에서 사용한 인자는 다음과 같다.

- A : 축전용량(pF)
- B : 저항(Ω)
- C : 휴지시간(μs)
- D : 와이어 이송속도(mm/s)
- E : 스픈들 회전속도(rpm)

인자의 선정에 있어서는 축전용량의 경우 방전가공에너지를 결정하는 지표로서 주요인자로 선정하고 가공에너지에 영향을 미치는 다른 인자로 전류값을 결정하는 저항과 휴지시간을 선정하였으며 3개의 주효과외에 교호작용을 고려하였다⁽⁶⁾⁽⁷⁾.

각 인자의 수준은 3수준으로 하고 각 수준에 따른 인자들의 값은 Table. 1과 같다.

Table 1 Factor and level of experiment

A : 축전용량(pF)	100, 500, 1000
B : 저항(Ω)	200, 300, 500
C : 휴지시간(μs)	1, 3, 5
D : 와이어 이송속도(mm/s)	0.94, 1.88, 3.77
E : 스픈들 회전속도(rpm)	100, 300, 500

각 인자가 3수준이므로 각각의 인자의 자유도가 2이고 교호작용의 자유도가 4이므로 $L_{27}(3^13)$ 형의 직

교배열표를 선정하였다. 주요한 효과로 생각할 수 있는 축전용량, 저항의 크기, 휴지시간 등의 인자에 의한 교호작용을 예상하여 선점도를 작성한 후 직교배열표에 인자를 배치하였다.

3. 와이어방전 연삭법에 의한 전극제작

마이크로 형상을 가공하기 위해서는 먼저 전극이 제작되어야 한다. 본 실험에서 사용된 WEDG(Wire Electrode Discharge Grinding)방법은 다양한 전극 형상을 만들 수 있으며 전극 가공시간도 줄일 수 있다⁽²⁾⁽⁸⁾. Fig. 1은 WEDG 방법의 원리를 보여주고 있다.

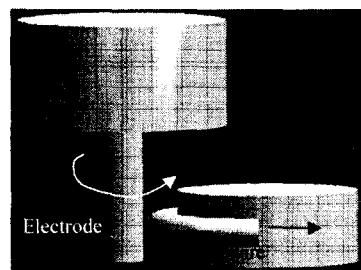


Fig. 1 Schematic diagram of WEDG

이와 같은 WEDG 방법의 특징은 다음과 같다.
(1) 가공정밀도는 와이어 가이드와 전극 소재를 구동하는 장치의 정밀도에 의해 거의 결정되며 작업자의 기능과는 무관하다. (2) 와이어의 소모를 고려할 필요가 없다⁽¹⁾.

4. ASTM Grain Size Number

금속표면의 입자(grain)의 평균 크기를 결정하기 위한 ASTM(American Society for Testing & Materials)의 표준으로 G(ASTM grain size number)가 있다. 이 수는 100배로 확대된 금속 표면 사진으로부터 얻어지는 값으로 그 의미는 제곱인치당 입자의 수이다. 제곱인치당 입자의 수를 N이라 하였을 때 G는 식 (1)과 같이 표시한다⁽⁹⁾.

$$N = 2^{G-1} \quad (1)$$

G(ASTM grain size number)값을 결정하는 방법으로는 Comparison Procedure, Planimetric Procedure, Intercept Procedure가 있으며 이중 가장 일반적이고 정확도가 높은 방법은 Intercept Procedure이다. 본 실험에서는 Intercept Procedure를 사용하였으며 이 방법은 단위 길이당 검사선(test line)과 만나는 입자

의 개수, 입자경계와 만나는 교차점의 개수를 구해 평균 절편길이(ℓ)를 계산한다. 여기서 구한 평균절편길이를 식(2)를 이용해 G를 계산한다.

$$G = 2 \log_2 \frac{l_0}{l} \quad (2)$$

여기서 l_0 는 32mm이며 l 은 표준 배율의 사진에서 구하는 값이다.

G값이 클수록 많은 입자수, 즉 조밀한 입자 크기를 의미한다. 본 실험에서는 SEM사진에 나타난 방전의 흔적을 입자로 확대 적용하여 G값을 구하였다.

5. 실험장치

5.1 실험에 사용된 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 폴스폭 τ_p 가 짧은 방전전류를 얻기 쉽기 때문에 다듬질가공에 적합하다. 하지만 방전 집중 현상이 유발될 가능성이 크다⁽⁶⁾. 이와 같은 단점을 보완하기 위해서 빠르게 절연특성을 회복할 수 있도록 방전전원을 제어하여 원활한 방전을 유도할 수 있는 회로를 제작하였다. Fig. 2는 PWM을 장착한 방전가공기의 회로도를 보여주고 있다. 전원은 0V에서 300V까지 가변 가능하며 허용 전류는 1A로 하였다. PWM은 회로에 흐르는 전류를 0.2μs의 분해능(resolution)으로 제어가 가능하다. 또한 권선저항의 사용으로 인한 인덕턴스(inductance)발생을 최소화 할 수 있는 무유도저항도 장착하였다.

Table 2는 실험장치에 장착된 콘덴서의 용량과 저항을 나타낸다.

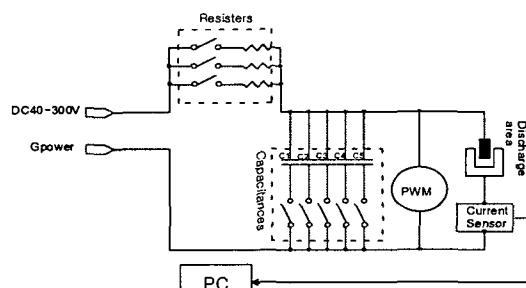


Fig. 2 RLC circuit with PWM

Table 2. Condenser capacity and resistance

콘덴서 (pF)	1	10	30	50	75
유도저항 (Ω)	100	500	681	1000	5000
무유도저항 (Ω)	560	800	1000		

5.2 실험장치의 구성

Fig. 3은 실험장치의 대략적인 구조를 보여주고 있다. WEDG 방식을 이용해 미세 전극을 가공하고 가공한 전극으로 미세 형상을 가공하기 위한 장비이다.

간략하게 설명하면 공작물을 설치할 수 있는 이송테이블과 테이블의 x축, y축, 전극을 장착할 수 있는 z축을 이송하기 위한 스텝 모터, 계속적인 와이어 공급을 위한 보빈과 와이어의 장력을 일정하게 유지하기 위한 와이어공급장치, 보빈과 z축의 주축(spindle) 회전을 위한 모터로 구성되어 있다. 장비에 설치된 모든 이송계는 컴퓨터로 제어하며, 리니어스 케일을 이용하여 정밀 제어가 가능하다.

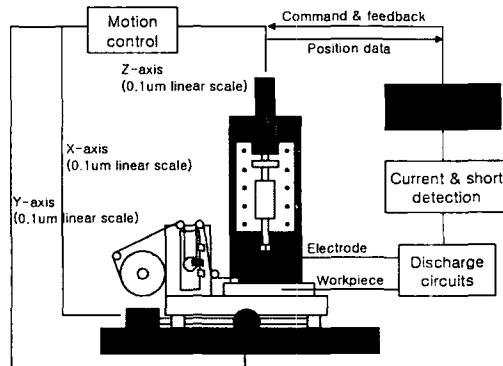


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

6. 실험 및 결과분석

6.1 실험

본 실험의 목표는 각 인자에 의한 전극(tool electrode)의 표면형상 즉, 방전에 의해 발생한 전극 표면의 방전흔적에 미치는 영향에 대해 알아보는 것으로 그 결과값을 G로 하였다. 본 실험에서 측정한 G값은 전극 표면에 생성되는 방전흔적의 평균크기를 나타내는 지표로 이 값을 통해 표면의 균일한 정도를 나타낼 수 있다. 실험순서는 특정효과에 치우치지 않게 하기 위해서 랜덤화(randomization)하여 실시한다.

6.2 실험결과

직교배열표에 인자를 배치한 후 실험을 실시한다. 실험을 실시한 후 각 시편의 표면상태를 SEM으로 촬영하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 각 시편에 대한 표면사진을 나타내고 있다. 각 측정값은 평균값으로 나타난다. Table 3에 실험의 조합과 실험 결과를 정리하였다.

Table 3. Experimental results

No.	A(pF)	B(Ω)	C(μs)	D(mm/s)	E(rpm)	G
1	100	200	1	0.94	100	12.8195
2	100	200	3	1.88	300	12.5568
3	100	200	5	3.77	500	12.4987
4	100	300	1	1.88	300	12.6115
5	100	300	3	3.77	500	12.9358
6	100	300	5	0.94	100	13.0769
7	100	500	1	3.77	500	13.0769
8	100	500	3	0.94	100	13.1469
9	100	500	5	1.88	300	12.8195
10	500	200	1	1.88	500	12.3721
11	500	200	3	3.77	100	12.5594
12	500	200	5	0.94	300	12.2241
13	500	300	1	3.77	100	12.5726
14	500	300	3	0.94	300	12.6902
15	500	300	5	1.88	500	12.5563
16	500	500	1	0.94	300	12.8310
17	500	500	3	1.88	500	12.6267
18	500	500	5	3.77	100	12.6601
19	1000	200	1	3.77	300	12.6737
20	1000	200	3	0.94	500	12.4159
21	1000	200	5	1.88	100	12.5884
22	1000	300	1	0.94	500	12.4748
23	1000	300	3	1.88	100	12.4655
24	1000	300	5	3.77	300	12.7663
25	1000	500	1	1.88	100	12.5524
26	1000	500	3	3.77	300	12.7298
27	1000	500	5	0.94	500	12.4748

결과값인 G가 큰 값을 나타낼수록 입자(grain)의 수가 많고 따라서 입자의 크기는 작은 것을 나타낸다.

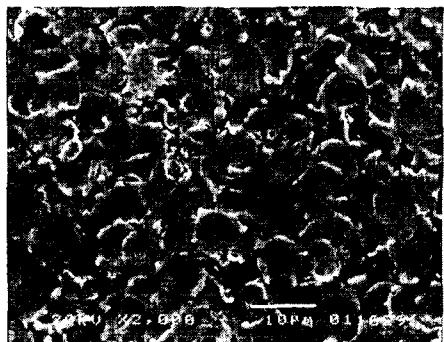


Fig 4. SEM photograph of electrode surface

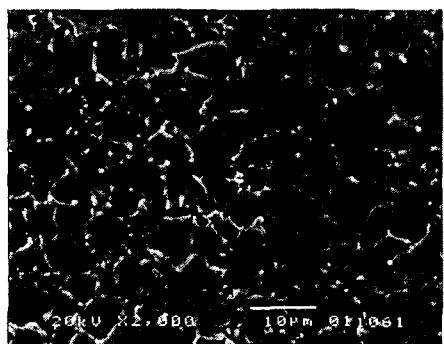


Fig 5. SEM photograph of electrode surface

6.3 실험결과 분석

실험결과는 분산분석(analysis of variance : ANOVA)을 이용하여 나타내며 이에 의한 분산분석 표가 Table 4에 있다.

Table 4. ANOVA table

인자	S	Φ	V	F₀
A	0.4358	2	0.2179	21.40 **
B	0.2795	2	0.1397	13.73 *
C	0.0124	2	0.0062	0.61
D	0.1061	2	0.0530	5.21
E	0.0566	2	0.0283	2.78
AB	0.1166	4	0.0291	2.86
AC	0.0402	4	0.0100	0.99
BC	0.1938	4	0.0484	4.76
e	0.040	4	0.0101	
T	1.2415	26		

분산분석표에 나타난 바와 같이 실험에 가장 영향을 미치는 인자는 A, 즉 콘덴서의 용량이며 이 인자의 F검정값은 21.40으로 유의수준 1%이내에 유의

하고 그 다음으로는 B, 저항에 따른 전류값으로 이 인자의 F검정값은 13.73으로 유의수준 5%이내에 유의하다. 나머지 값은 유의한 값을 나타내지 않지만 와이어의 이송속도와 전류의 크기와 휴지시간의 교호작용이 결과에 영향이 있음을 짐작할 수 있다. 나머지 인자는 결과에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

7. 결론

Micro-EDM 가공기를 이용하여 미세 전극을 제작함에 있어 여러 가지 가공변수가 전극의 표면형상에 영향을 미치는 것을 알아보았다.

(1) 실험결과에 따르면 콘덴서의 용량이 표면형상에 가장 크게 영향을 미친다. 이와 같은 결과는 예상할 수 있는 것으로 RLC 회로를 사용하는 모든 방전가공기의 경우 콘덴서의 용량은 단발 방전 에너지로 직결되고 이 에너지에 의해 방전흔적이 생기므로 콘덴서의 용량은 방전흔적의 크기에 지배적이다. 큰 용량을 가진 콘덴서는 충전시간이 길어지는 반면 한꺼번에 많은 에너지를 방출하여 큰 방전흔적을 남긴다.

(2) 두 번째 인자인 저항의 경우는 이 가공기에서는 전류값의 변화를 저항으로 조절하기 때문에 제어인자로 선택되었다. 이 또한 방전에너지에 중요한 인자로 큰 전류값이 큰 방전흔적을 남기는 것을 알 수 있다.

(3) PWM에 의한 휴지시간의 제어는 원활한 방전을 일으켜서 가공속도 개선과 균일한 방전조건 유도 등의 중요한 역할을 함에도 불구하고 방전흔적의 크기에는 영향을 미치지 아니하였다.

(4) 와이어의 이송속도는 WEDG를 이용한 방전 가공에서 가장 중요한 인자로 고려되고 있는 것이다. 하지만 전극의 표면형상에는 영향을 미치지 아니하는 것으로 나타났다.

(5) 스판들의 회전속도는 방전간극의 절연회복과 debris 제거 등 방전가공을 원활히 하는 기능이 있지만 전극의 표면형상에 있어서는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(5) 이밖에 인자들의 교호작용의 경우는 크게 영향이 나타나지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. K. P. Rajurkar, Z. Y. Yu, "3D Micro-EDM Using CAD/CAM," Annals of the CIRP, Vol. 49, pp. 127-130, 2000.
2. 김창호, 최재찬, 방전가공 형조방전 및 와이어 방전 가공의 완전한 활용법, 기전연구사, 1995.
3. 송서일, 실험계획법, 한경사, 2001.
4. 박동규, 최신실험계획법, 기전연구사, 1999.
5. 박성현, 다구찌 방법을 중심으로 한 실용실험계획법, 영지문화사, 1990.
6. 김창호, 최재찬, 방전가공 형조방전 및 와이어 방전 가공의 완전한 활용법, 기전연구사, 1995.
7. Chien-Nan Yang, "Physical Modeling of Wire-Cut Electrical Discharge Machining," PhD thesis, University of California, USA, 1999.
8. T. A. Spedding, Z. Q. Wang, "Study on modeling of wire EDM process," Journal of Materials Processing Technology 69, pp. 18-28, 1997
9. "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size", ASTM, 2000