

마이크로 방전가공기를 이용한 미세전극 가공특성

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

Micro-electrode machining characteristics using the Micro-EDM

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

ABSTRACT

Micro-EDM is generally used for machining micro 3-D structure. 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 on micro-electrode fabrication. Experimental method and analysis are used to experimental design method. Factors used in experiments are composed of applied voltage, capacitance, wire feed rate, spindle rotating speed, machining time. As a result of experiments, wire feed rate, machining time and capacitance is proportional to gap distance(material removal), the other parameters(applied voltage, spindle rotating speed) and relations between the parameters have little influence on machining.

Key Words : Micro-EDM, Micro-electrode, WEDG, EDM parameters, Experimental design

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 다르므로 3차원 형상의 구조물을 가공하기 위한 방법으로 마이크로 방전가공(micro electrodischarge machining)⁽¹⁾이 제안되고 있다.

마이크로 방전가공(micro EDM)은 전통적인 가공방법 또는 수퍼드릴가공과 같이 공작물과 공구의 직

접적인 접촉방식에 의한 가공이 아니라 전기적인 침식(electroerosion)에 의해 재료를 제거하기 때문에 공구나 가공물의 변형문제에 효과적인 해결방안을 제공하며, 재료의 경도나 강도에 상관없이 전기적인 도체재료의 가공에 이용된다.

미세방전가공을 이용하여 요구되는 형상을 제작하기 위해서는 공구에 해당하는 전극의 제작이 선행되어야 한다. 또한 전극의 제작을 위한 방법으로 와이어방전 연삭법(WEDG : Wire Electrode Discharge Grinding)을 이용하며 이미 이 방법에 의한 전극의 제작도 이루어져 있다.⁽¹⁾⁽⁷⁾ 그리고 전극의 제작에 있어서 가공을 결정하는 중요한 가공변수들이 있으며 본 연구에서는 가공변수들에 대하여 각각의 기여도와 그들의 관계에 대해서 실험계획법을 통해 알아보도록 한다.

2. 실험계획법

2.1 실험계획법의 개요

실험계획법은 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 data를 얻고 이를 분석함으로써 올바른 행동방안 즉, 제품의 최적 제조 조건을 경제적으로 찾아내고자 하는 학문으로 간단히 말하면 실험에 대한 계획 방법을 의미한다. 해결하고자 하는 문제에 대하여 1) 실험을 어떻게 행하고, 2) data를 어떻게 취하며, 3) 어떠한 통계적 방법으로 data를 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 DATA에 대한 최적 분석 방법을 선택하였다는 것을 말한다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

2.2 직교배열표

실험에서 일반적으로 고려해야 할 인자의 수는 많다. 인자의 수가 많은 경우에는 보통 인자의 주효과와 기술적으로 보아서 있을 것 같은 2인자 교호작용만 검출하고 나머지는 희생하여 실험횟수를 줄이는데 이와 같은 상황에서 실험계획을 용이하게 할 수 있도록 만들어 놓은 표를 직교배열표(table of orthogonal array)라 한다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 본 실험에서는 3수준 5인자를 위한 직교배열표 L₂₇(3¹³)을 선택하였다.

2.3 실험계획법의 순서도

이와 같은 실험계획법을 행함에 있어서 다음과 같은 순서에 의해서 행한다.

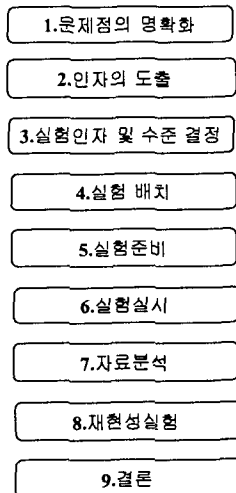


Fig. 1 flow chart of experimental design

3. 와이어방전 연삭법에 의한 전극제작

3.1 와이어방전 연삭법의 원리

마이크로 형상을 가공하기 위해서는 먼저 전극이 제작 되어야 한다. 기존의 전극 제작 방법은 1) 황선에 의해 얻은 가는 선을 가열 확장 등을 함으로서 똑바르게 되도록 교정하여 방전 가공기에 설치하는 방법과 2) 절삭, 연삭 등을 이용하여 작성한 전극을 방전 가공기에 설치하는 방법 등 두 가지가 있다. 그러나, 두 방법 모두 가공기에 설치하였을 때, 수직내기, 중심내기를 하기가 어려워 정밀도, 재현성, 기능 의존성 등에 문제가 많았다. 두 번째 방법의 경우는 제작할 수 있는 전극의 직경이 실용상 50 μ m정도가 한계였다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 화학적 방법을 이용한 에칭 방법, 와이어를 이용하여 가공하는 WEDG(Wire electrode discharge grinding) 방법, LIGA 프로세스에 의한 방법 등으로 크게 나누어 볼 수 있다. LIGA 프로세스에 의한 전극 제작은 동일한 형상의 전극을 한번에 여러 개 만들 수 있고 3차원 형상의 전극도 제약받지 않는 장점이 있지만 아직까지 연구가 초창기 국면에 있으며 가공시간이 길다는 단점이 있다. 화학적 방법에 의한 전극 제작은 단지 원형 공구 형상에 국한되며 다른 형상의 공구를 만들 수 없다. 또한 원형 형상의 전극도 길이 방향으로 정확한 치수를 유지하기 힘들다. 이와 달리 WEDG방법은 다양한 전극 형상을 만들 수 있으며 전극 가공시간도 줄일 수 있다.⁽⁶⁾ Fig. 2은 WEDG 방법의 원리를 보여주고 있다.

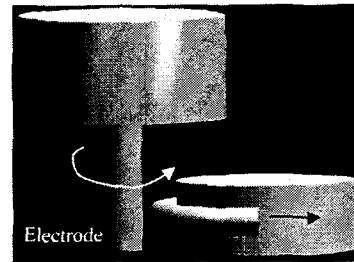


Fig. 2 Schematic diagram of WEDG

이와 같은 WEDG 방법의 특징은 다음과 같다. (1) 와이어는 첨가공 공구로서 기능하므로 형상은 공구제작에 의해서만 생성된다. 따라서 가공정밀도는 와이어 가이드와 전극 소재를 구동하는 NC 장치의 정밀도에 의해 거의 결정되며 작업자의 기능과는 무관해진다. (2) 공구(와이어)의 소모를 고려할 필요가 없다. (3) 방전틈새가 작아져 그 변동의 영향이 적으므로 보다 가는 전극도 가공할 수 있게 된다.⁽¹⁾

3.2 방전가공변수

방전현상에 영향을 미치는 인자들은 가공현상을 규명하는데 필수적이며 축전용량, 인가전압, 와이어

전극, 절연액 등의 변수들이 있다.

3.2.1 축전용량

미세 방전 가공에 있어서 가공현상은 단발방전의 누적효과로 단발 방전 에너지에 의존적이며 RLC 회로를 사용하는 방전가공의 경우 콘덴서의 축전용량으로 에너지를 제어할 수 있다.⁽⁷⁾

3.2.2 인가전압

인가전압(applied voltage)은 전원으로부터 콘덴서에 인가된 전압을 말한다. RLC 회로를 사용하는 방전가공의 경우 방전이 발생하는 동안에 gap에서의 전압은 인가전압보다 낮은 것이 일반적이나 회로의 인덕턴스(inductance)의 효과에 의해 전압입력의 초기 상태에 인가전압보다 높아질 수 있으며 인덕턴스의 크기에 비례하여 감쇠진동을 한다.⁽⁸⁾

3.2.3 와이어전극

WEDG 방식에서 전극으로 사용되는 와이어는 직진성을 유지하고 진동의 증폭을 최소화하기 위해 장력을 크게 유지시킨다. 방전시 와이어에서 스파크에 의한 침식 때문에 와이어의 인장강도가 약해지고 이것은 가공중의 와이어 파단의 중요한 원인이 된다. 따라서 일정한 장력유지와 와이어의 이송속도 또한 가공변수로서 중요하다.⁽⁸⁾

4. 실험장치

4.1 실험에 사용된 방전회로

실험에 사용된 방전 회로는 RLC 회로를 기본으로 하고있다. 이의 원리는 콘덴서에 충전된 전하를 방전하는 방식이며 특징으로는 전류의 피크치 I_p 가 높고 전류의 펄스폭 τ_p 가 짧은 방전전류를 얻기 쉽기 때문에 사상가공에 적합하다. 하지만 방전 집중현상이 유발될 가능성이 크다.⁽⁶⁾ Fig. 3은 제작된 방전 가공기에 장착된 RC회로도도를 보여주고 있다. 전원은 0V에서 300V까지 가변 가능하며 허용 전류는 1A로 하였다.

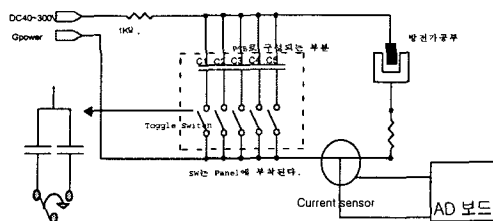


Fig. 3 RLC circuit

Table 1은 황삭일때와 정삭일때 방전회로에 사용되는 콘덴서 용량을 나타낸다.

Table 1. Condenser capacity built in EDM machine

정삭	10pF	50pF	100pF	500pF	1000pF
황삭	3000pF	5000pF		10000pF	

4.2 실험장치의 구성

WEDG 방식을 이용해 미세전극 가공을 행하고 가공한 전극으로 미세 형상을 가공하기 위한 장비이다. 대략적인 구조는 Fig.4 와 같다.

간략하게 설명하면 x축, y축, z축을 이송하기 위한 스텝 모터를 사용하고 z축의 주축(spindle) 회전, 보빈의 회전과 장력을 유지하기 위한 모터를 사용한다. 이와 같은 모터들은 컴퓨터에서 제어되며, μm 이내의 정밀도를 유지하기 위해 linear scale을 이용한 feed back 정밀 이송계를 사용한다. Fig 5.에서는 WEDG 시스템에 의해 전극을 가공하고 있는 모습을 보여주고 있다.

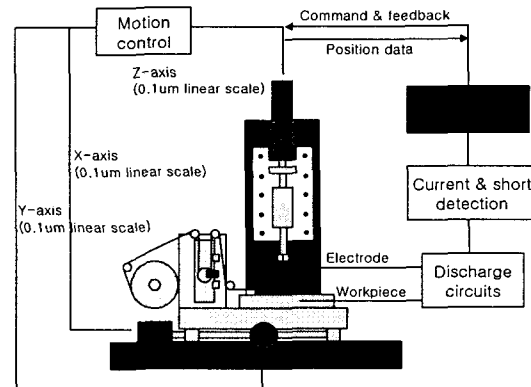


Fig. 4 schematic diagram of experimental set-up

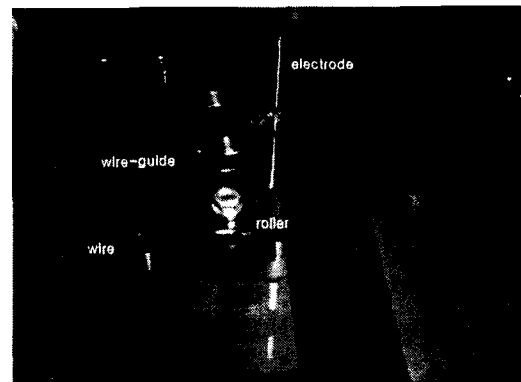


Fig. 5 photography of machining electrode by WEDG system

5. 실험 및 결과분석

5.1 실험

본 실험의 목표는 각 인자에 의한 전극(tool electrode)의 소모 즉 방전에 의해 발생한 간극에 미치는 영향에 대해 알아보는 것으로 그 측정치를 GD(gap distance)로 하였다. 본 실험에서 측정된 GD(gap distance)는 전극의 MMR(material removal rate)뿐만 아니라 전극의 최종 형상의 예측에도 아주 유용한 값이다.

먼저 실험을 실시하기 전에 실험계획법의 적용이 필요하다. 실험목표를 각 인자가 결과값 GD(gap distance)에 미치는 영향으로 정하고 가공변수에 해당하는 각 인자를 선정한다.

- A : 인가전압(V)
- B : 축전용량(pF)
- C : 와이어 이송속도(mm/s)
- D : 스피들 회전속도(rpm)
- E : 가공시간(sec)

인자의 선정에 있어서는 인가전압의 경우 실제 콘덴서 방전회로에서 가공에 직접적 영향을 미치는 것은 전류의 피크치 I_p 와 펄스폭 τ_p 이다. 하지만 콘덴서 방전회로에 의한 실험 장치는 방전현상이 방전 간극에 따라 좌우되고 전류의 피크값 I_p 이 아주 크게 발생하고 펄스폭 τ_p 도 아주 짧아서 측정하기 어렵은 단점이 있다. 이와 같은 이유로 인해 전류의 피크값 I_p 을 대신할 수 있는 인가전압으로 인자를 선정하게 되었다.

각 인자의 수준은 3수준으로 하고 각 수준에 따른 값은 table. 2와 같다.

Table 2 Factor and level of experiment

A : 인가전압(V)	100, 150, 200
B : 축전용량(pF)	50, 100, 1000
C : 와이어이송속도(mm/s)	0, 0.5, 1
D : 스피들회전속도(rpm)	100, 500, 900
E : 가공시간(sec)	10, 60, 180

각 인자가 3수준이므로 각각의 인자의 자유도가 2이고 교호작용을 예상할 수 있기 때문에 최소한 자유도가 10이상이다. 따라서 $L_{27}(3^{13})$ 의 직교배열표를 선정할 수 있다. 주요한 효과로 생각할 수 있는 축전용량과 와이어 이송속도 등의 인자에 의한 교호작용을 예상하여 선점도를 작성한 후 직교배열표에 인자를 배치한다.

5.2 실험결과

직교배열표에 인자를 배치한 후 실험을 총3회 실시한다. 결론적으로 총 실험횟수는 $27 \times 3 = 81$ 회이다. 각 측정값은 평균값으로 나타난다. Table 3에서 실험의 조합과 실험 결과가 나타나 있다. 실험순서는 특정효과에 치우치지 않게 하기 위해서 랜덤화(randomization)하게 실시한다.

Table 3. Experimental results

No.	A(V)	B(pF)	C(mm/s)	D(rpm)	E(sec)	GD(μ m)
1	100	50	0	100	10	8
2	100	50	0.5	500	60	34
3	100	50	1	900	180	50.4
4	100	100	0.5	900	180	41
5	100	100	1	100	10	26.4
6	100	100	0	500	60	4.2
7	100	1000	1	500	60	22
8	100	1000	0	900	180	8.2
9	100	1000	0.5	100	10	14
10	150	50	1	500	180	23.6
11	150	50	0	900	10	10
12	150	50	0.5	100	60	30
13	150	100	0	100	60	8
14	150	100	0.5	500	180	34
15	150	100	1	900	10	54
16	150	1000	0.5	900	10	28.8
17	150	1000	1	100	60	14.4
18	150	1000	0	500	180	5.28
19	200	50	0.5	900	60	28.8
20	200	50	1	100	180	33.6
21	200	50	0	500	10	5.6
22	200	100	1	500	10	40
23	200	100	0	900	60	2.4
24	200	100	0.5	100	180	44.8
25	200	1000	0	100	180	1.6
26	200	1000	0.5	500	10	17.6
27	200	1000	1	900	60	17.12

5.2 실험결과 분석

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

Table 4. ANOVA table

인 자	S	ϕ	V	F ₀
A	20.46	2	10.23	0.19
B	955.52	2	477.76	8.72*
C	3720.10	2	1860.05	33.96**
D	243.85	2	121.92	2.23
E	370.09	2	185.04	3.38
e	876.30	16	54.76	
T	6186.35	26		

분산분석표에 나타난 바와 같이 실험에 가장 영향을 미치는 인자는 C, 즉 와이어의 이송속도이며 이 인자의 F₀값은 33.96으로 유의수준 1%이내에 유의하고 그 다음으로는 B(컨텐서의 축전용량)로 이 인자의 F₀값은 8.72로 역시 유의수준 1%이내에 유의하다. 다음으로는 E(가공시간)이다. 이 인자의 F₀값은 유의수준 5%이내에 유의하지 않다. 하지만 그 다음으로 실험결과에 영향을 미치며 나머지 인자 A(인가전압)와 D(스핀들 회전속도)는 실험 결과에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 그리고 교호작용에 대한 분석 또한 이루어졌으나 본 실험에서는 교호작용에 의한 효과를 무시할 수 있었다.

6. 결론

Micro-EDM 가공기를 이용하여 미세 전극을 제작함에 있어 여러 가지 가공변수가 전극가공에 미치는 영향과 그의 상호작용에 대해서 알아보았다.

(1) 실험결과에 따르면 인가전압의 경우 전극가공에 거의 영향을 미치지 아니한다. 이 이유는 실험에 사용한 인가전압에 의해 발생하는 전류는 이미 포화영역에 존재하고 따라서 포화영역 이상의 인가전압에 의한 영향이 나타나지 않았기 때문이다. 이것은 직접적으로 가공에 관여하는 전류의 피크값 I_p은 실험에 사용된 인가전압이 낮음에도 불구하고 수십 암페어(Amp)에 이르는 값을 나타내기 때문이며 따라서 인가전압의 변화에 따른 전류의 피크값 I_p은 무시되는 것으로 설명할 수 있다. 수십 암페어(Amp)에 이르는 전류값은 아크방전에 의한 영향으로 생각된다. 따라서 인가전압은 아주 중요한 인자임에도 불구하고 본 실험에서는 그 기여도가 낮았다.

(2) 축전용량의 경우 전극가공에 상당한 영향을 미친다. 방전가공은 단발방전에너지의 연속된 가공이며 이와 같은 단발방전에너지를 결정하는 것은 컨텐서의 축전 용량이다. 하지만 축전용량이 커질수록 충전시간이 커지기 때문에 가공량에 비례적으로 증가되지는 않는다.

(3) 와이어의 이송속도의 경우는 전극가공에 가장 큰 영향을 미친다. 이와 같이 나타나는 이유로 인하여 WEDG방식의 전극가공에서 공구로 사용되는 와이어의 공급과 정확한 형상을 위한 장력유지 및 진동방지를 위한 와이어 가이드의 설계 또한 전극가공에 상당한 영향을 미치기 때문에 상당히 중요한 변수임을 알 수 있다. 또한 빠른 와이어의 이송속도는 전극과 와이어사이의 간극의 절연회복에 도움을 주며 새로운 와이어 전극의 공급은 원활한 방전에 기여한다. 따라서 더욱더 원활한 방전을 유도한다.

(4) 스핀들의 회전속도는 일정 속도이상에서는 전극가공에 크게 영향을 미치지 아니한다. 이와 같은 현상은 스핀들의 회전이 전극과 와이어 사이의 간극의 절연회복에 도움을 주지만 스핀들의 속도가 너무 빠를 경우 방전에너지의 집중이 저하되는 현상이 일어나 너무 빠른 스핀들의 회전속도는 가공에 악영향을 끼칠 수도 있다. 따라서 적절한 스핀들의 회전속도만이 가공에 좋은 영향을 끼친다.

(5) 가공시간은 전극가공에 있어서 절대적 인자이다. 방전에너지에 의한 가공에서 재료의 제거는 순간적으로 발생하고 이러한 현상의 누적으로 재료가 제거되는데 적절한 가공시간의 선정은 가공효율을 높이는 데 필수적이다. 따라서 임의의 조건하에 적절한 가공시간을 산출하는 것은 필요하다.

향후 이와 같은 연구의 결점을 보완하기 위해 새로운 방전회로의 개발이 이루어지고 있으며 그에 따라 새로운 인자의 선정과 함께 실험이 이루어져 더욱더 나은 결과를 도출할 것이다.

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. 주중남, 김규만, 김성윤, "미세형상가공을 위한 방전·초음파 가공기술," *한국정밀공학회지*, 제1권, 제7호, pp. 20-27, 2000.
3. 송서일, 실험계획법, 한경사, 2001.
4. 박동규, 최신실험계획법, 기전연구사, 1999.
5. 박성현, 다구저 방법을 중심으로 한 실용실험계획법, 영지문화사, 1990.
6. T. A. Spedding, Z. Q. Wang, "Study on modeling of wire EDM process," *Journal of Materials Processing Technology* 69, pp. 18-28, 1997.
7. 김창호, 최재찬, 방전가공 형조방전 및 와이어 방전 가공의 완전한 활용법, 기전연구사, 1995.
8. Chien-Nan Yang, "Physical Modeling of Wire-Cut Electrical Discharge Machining," PhD thesis, University of California, USA, 1999.