

## Micro-EDM 공정을 이용한 미세 형상 가공

김영태\*, 박성준#, 이상조\*\*

### Machining of Micro-scale Shapes using Micro-EDM Process

Young-Tae Kim\*, Sung-Jun Park#, Sang-Jo Lee\*\*

#### ABSTRACT

With development of high advanced technologies and skills, micro machining techniques also are being more functional and smaller. Some of the recently developed micro machining technologies are micro drilling, micro EDM, WEDG, LBM, micro milling, micro UVM etc. In these micro machining techniques, Micro-EDM is generally used for machining micro holes, pockets, and micro structures in difficult-cut-materials. For machining micro structures, first of all, tool electrode should be fabricated by WEDG process. In micro-EDM, parameters such as peak current, pulse width, duration time are very important to fabricate the tool electrode and micro structures. Developed experimental equipments are composed of RLC circuit with PWM. In this paper, using developed micro EDM machine, the characteristics of micro electro discharge machining are investigated at micro holes, slot, and pocket machining etc. Also the trends of tool wear are investigated in case of hole and slot machining.

**Key Words :** Micro-EDM (마이크로 방전가공), WEDG (Wire Electro Discharge Grinding, 와이어 방전 연삭), Micro hole (미세 구멍), PWM (펄스 폭 변조)

#### 1. 서론

가공 기술의 급속한 발달과 더불어 기계기술은 점차 소형화, 기능화 및 다양화의 추세로 변화해 가고 있다. 특히, 의료 및 바이오 기술의 발달로 인해 초미세 가공에 대한 요구가 매우 높아지고 있다. 일반적인 마이크로 가공 기술에는 마이크로 드릴링, 마이크로 밀링, 레이저 가공, 마이크로 EDM 및 리소그래피 공정 등이 있다. 반도체 부품 제작에 사용되는 에칭, 증착, 리소그래피와 같은 미세 가공 기술은 마이크로 미터( $\mu\text{m}$ ) 크기

이하의 표면 구조물을 대량으로 제작하는데 적합한 가공법들이다. 그러나, 이와 같은 가공법은 가공재료가 실리콘과 같은 특정 재료에 한정되는 단점과 낮은 가공성이라는 제약조건이 존재한다. 리소그래피의 경우에는 가공 깊이는 깊지만 곡률 가공을 할 수 없는 단점이 있다. 이 때문에 기존의 절삭가공을 소형화 하여 가공 재료의 범위를 넓히면서 3 차원 미세 구조물을 가공하는 연구가 진행되고 있다. 그러나, 절삭 공구 제작이 어렵고 제작된 공구의 강성이나 절삭성이 떨어지는 단점이 존재하므로 이를 극복하기 위한 가공 방법으로 마이

접수일: 2003 년 4 월 21 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일  
\* 연세대학교 대학원 기계공학과  
# 교신저자: 연세대학교 NT 연구단  
E-mail: sjpark@yonsei.ac.kr, Tel: (02) 2123-5813  
\*\* 연세대학교 기계공학부

크로 방전 가공이 적합하다. Fig. 1 은 전통적인 가공방법과 마이크로 가공 방법에 의한 가공범위의 비교를 보여주고 있다. 현재 마이크로 가공은 X-ray 파장 영역의 정도인 나노 미터(nm) 영역에 이르는 범위까지 가공범위가 확대되고 있다.

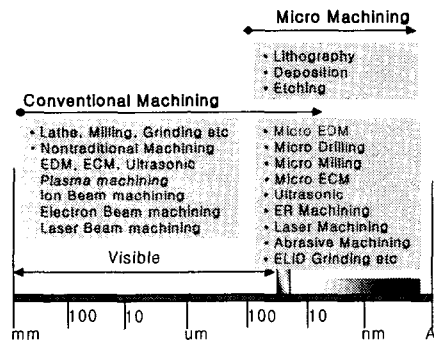


Fig. 1 Machining range between conventional and micro machining

현재 마이크로 방전가공 기술은 터빈 엔진 노즐이나 잉크 제트 노즐, 항공 우주 분야나 의학 분야에서 사용되는 가스나 액체 오리피스, 핵융합 측정 장치, X-ray 전자총이나 고속 컴퓨터의 마이크로 연결부, 마이크로 터빈, 항공기 엔진부 등의 미세 구멍 및 형상을 초정밀로 가공하는데 사용되고 있다<sup>1</sup>. 현재 마이크로 가공법에 의한 구멍 가공의 수준을 Fig. 2 에서 비교하여 보여주고 있다<sup>2</sup>.

국내외의 방전가공에 대한 연구를 살펴보면 Kholodnov<sup>3</sup> 는 오버컷(over-cut)에 대한 축전용량의 영향을 연구하였고, Jeswani<sup>4</sup> 는 방전 전압, 축전용량, 전극의 지름 및 구멍의 깊이에 대한 오버컷의 실험식을 정의하였다. Masuzawa<sup>5,6</sup> 등은 단순한 형

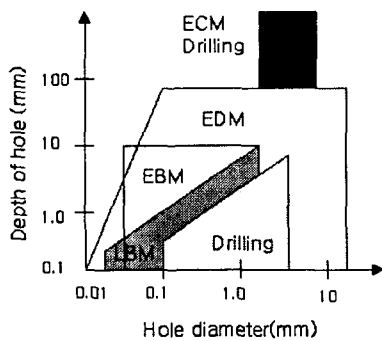


Fig. 2 Aspect ratio according to machining method

상의 전극을 이용한 3 차원 방전 가공 기술을 제안하였으며, 실제 마이크로 방전 가공기를 이용하여 수백  $\mu\text{m}$  크기의 3 차원 미세 형상을 가진 금형 가공에 성공한 사례가 있다. Chu<sup>7</sup> 는 미세형상을 가공하기 위하여 방전가공과 초음파 가공을 적용하는 연구를 하였다.

본 논문에서는 펄스 폭을 조절하기 위해 제작된 PWM 방전 회로와 마이크로 방전 기계를 이용하여 수백  $\mu\text{m}$  치수의 구멍과 슬롯, 그리고 포켓과 같은 미세 형상을 EDM 공정을 이용하여 가공 실험을 하였다. 실험을 통해 방전 전압, 방전 전류, 콘덴서 용량 및 펄스 폭 등과 같은 방전가공 변수가 가공에 미치는 영향과 재료의 제거량, 그리고 가공 중에 발생하는 공구 전극의 마모에 대한 특성들을 살펴 보았다.

## 2. 이론

### 2.1 방전 가공 원리

방전 가공에서 재료 제거의 개략적인 원리를 Fig. 3 에 나타내었다. 가공 도중에 공작물 쪽으로 플라스마 채널이 형성되고 전자가 공작물에 매우 빠른 속도로 충돌하게 된다. 이때 공작물 표면에 순간적으로 고열이 발생하고 공작물의 항복 응력이 낮아져 표면이 떨어져 나가게 된다. 떨어져 나온 입자들은 압력차이에 의해 전극과 공작물의 간극 사이로 빠져 나가게 된다. 이러한 방전 현상이 연속적으로 발생하면서 가공이 이루어진다. 이때 빠져 나오지 못한 입자는 2 차 방전을 일으키는 원인이 된다.

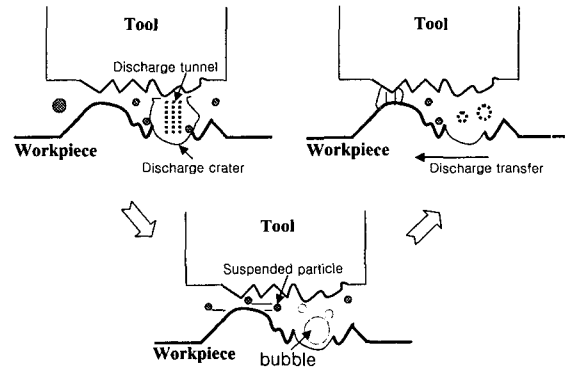


Fig. 3 Principle of EDM

## 2.2 WEDG 원리

연삭이나 에칭, 리소그래피 공정으로 전극을 제작한 후 기계에 장착할 때 발생하는 클램핑이나 척킹 오차는 공구와 공작물 사이의 방전 간극이 균일하지 않은 원인이 되고 가공품의 최종 형상 및 마이크로 부품 조립에 나쁜 영향을 준다. 결국 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 방법이 공구 재료를 기계에 장착한 상태에서 와이어를 사용하여 전극을 가공 제작하는 WEDG (wire electro discharge grinding) 방법이다. WEDG 가공 원리는 Fig. 4 에서 이 원리를 이용하여 실제 가공한 전극을 Fig. 5 에서 보여주고 있다. 실험을 통해 WEDG 방법으로 최종 공구 끝단의 지름이 5.5  $\mu\text{m}$  인 전극까지 제작하였다.

일반적으로 절삭가공에 의해서 가공된 전극의 표면에는 압축 응력이 작용하여 표면에 잔류응력이 존재하게 되지만 방전 가공의 경우에는 인장응력이 표면에 작용한다<sup>8</sup>. 방전 가공에 있어서 또 다른 문제점은 높은 온도에 의한 표면 변질층이 생성된다는 점이다. 실제적으로 가장 이상적인 가공은 표면 변질층의 깊이를 가장 작게 하면서 가

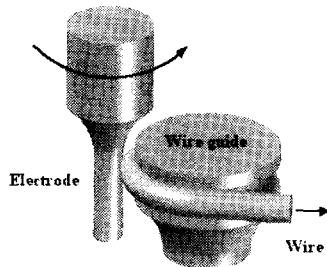


Fig. 4 Principle of WEDG

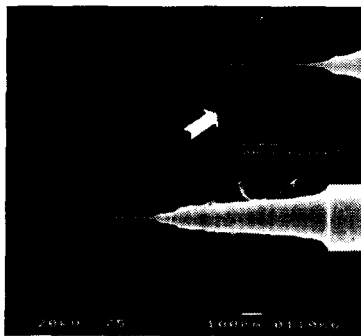
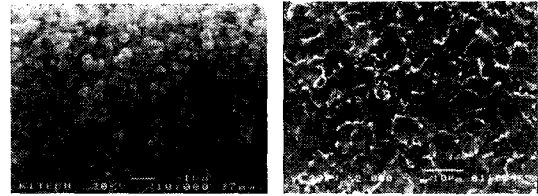


Fig. 5 Fabricated electrode ( $\phi 10 \mu\text{m}$ , length: 200  $\mu\text{m}$ )



(a) Ground surface (b) WEDG surface

Fig. 6 Machined surface

공표면 거칠기를 원하는 수준에 맞추는 가공 조건에서 가공하는 것이다. Fig. 6 에서 연삭 가공과 방전 가공에 의한 표면 상태를 비교한 사진을 보여주고 있다. 연삭에 의한 표면보다 방전에 의한 표면 상태가 불균일함을 볼 수 있다.

## 3. 실험 장치

### 3.1 방전회로

실험에 사용한 방전 회로는 RC 회로를 기본으로 하고 있다. 이 회로는 콘덴서에 충전된 전하를 방전하는 방식이며 특징으로는 전류의 피크치  $I_p$  가 높고 전류의 펄스폭  $\tau_p$  가 짧은 방전전류를 얻기 쉽기 때문에 다듬질가공에 적합하다. 하지만 방전 집중 현상이 유발될 가능성이 크다<sup>6</sup>.

실제 개발한 마이크로 방전 가공기에 부착된 방전회로부를 Fig. 7 에 나타내었다. 전원은 0V 에서 300V 까지 가변 가능하며 허용 전류는 최대 1A 이다. 콘덴서 용량과 저항의 크기를 선택할 수 있도록 제작되었고 펄스 폭 제어를 위해 200ns 단위로 조절 가능한 PWM 회로를 추가하여 인위적으로 방전지속시간(on-time)과 휴지시간(off-time)을 조절 하였다. 방전 회로의 duty factor 와 방전 펄스 폭에 관한 데이터 그래프는 Fig. 8 에 제시하였다.

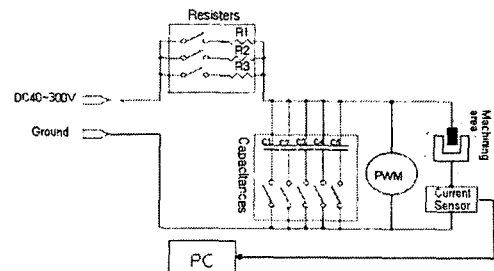


Fig. 7 RC circuits equipped with PWM

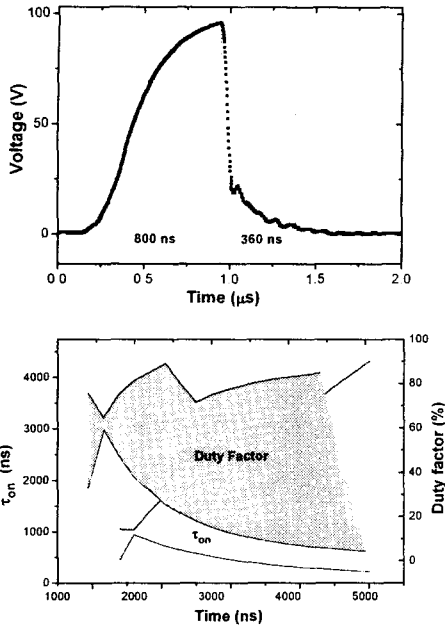


Fig. 8 Duty factor of PWM circuits

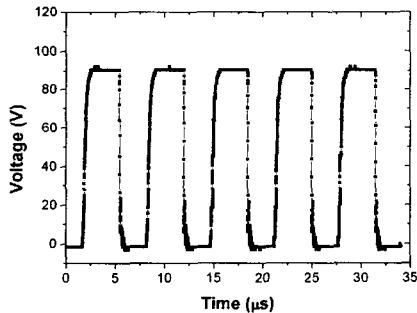


Fig. 9 Pulse signal of PWM circuits

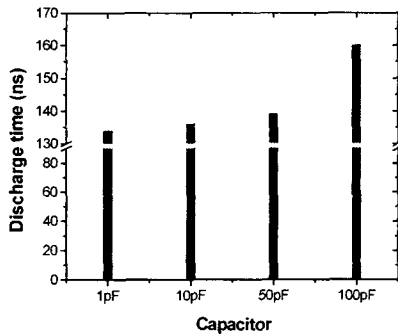


Fig. 10 Discharge times with capacitors

Fig. 9 에 PWM 회로에 의해 제어되는 전압 파형의 형태를 나타내었다.

PWM 회로의 장착으로 인해 RC 회로의 장점을 가지는 것과 동시에 펄스 폭을 제어하여 절연 현상을 강제적으로 회복할 수 있는 회로를 구성할 수 있다. 실제 방전이 발생할 때 방전되는 시간을 측정한 결과값을 Fig. 10 에 나타내었다.

Table 1 에 가공할 때 방전회로에 사용되는 인가전압의 크기, 콘덴서 용량, 저항의 크기 및 펄스 지속시간의 범위를 나타내었다. 저항의 경우 오실레이션이 발생하지 않는 무유도 저항과 오실레이션으로 인해 콘덴서 충전시에 실제 인가 전압보다 수배 이상 진동을 하는 권선 저항 2 가지를 설치하였다. 권선 저항의 경우에 실제 인가 전압보다 4-6 배 이상 전압이 상승하게 되므로 가공 에너지가 순간적으로 증가하여 가공 효율을 높일 수 있게 된다. 사용된 전극의 재질은 텅스텐 카바이드(WC)이며 공작물은 텅스텐(W)과 SUS304 이다.

Table 1 The specification of EDM circuit

Units	Specification
Power supply (V)	DC 0~300
Resistors ( $\Omega$ )	560, 800, 1000 (metal blade resistors) 100, 200, 300, 500, 1000 (coil resistors)
Capacitors (pF)	1, 10, 30, 50, 75, 100, 500, 680,1000, 5000
PWM (ns)	600~4000

### 3.2 실험장치 구성

WEDG 방법을 이용하여 미세전극을 가공하고 제작된 공구를 사용하여 미세 구멍이나 미세 형상을 가공할 수 있는 마이크로 방전 가공기의 기본적인 구조를 Fig. 11 에 나타내었다. 개발된 기계는 각각 x 축, y 축 및 z 축의 3 축 이송계로 구성되며 스텝 모터를 사용하여 구동하였다. 이외에 스펀들 구동부와 와이어 보빈 구동부로 구성되어 있으며, 와이어의 장력 제어를 위하여 스프링을 장착하여 스프링 반력에 의해 장력을 일정하게 유지하는 시스템을 부착하였다.

각 축에는 0.1  $\mu\text{m}$ 의 분해능을 가지는 리니어 스케일이 부착되어 있으며 각 축의 구동부는 컴퓨터에서 MMC 보드에 의해 PID 제어 되고 공구경로는 G code 를 사용하여 생성하였다.

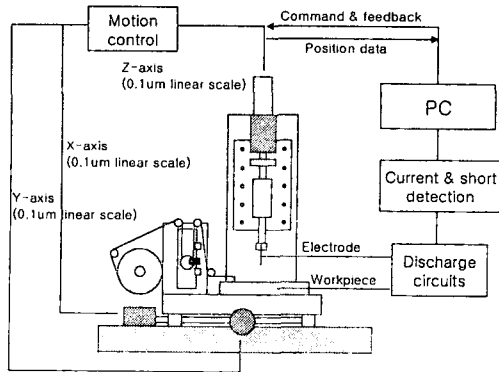


Fig. 11 Schematic diagram of Micro-EDM machine

#### 4. 실험 및 결과분석

제작된 마이크로 방전 가공기를 이용하여 전극 가공 실험과 미세 형상 가공 실험을 행하였다. 먼저 WEDG 가공방법을 이용하여 다양한 직경의 전극을 가공하여 제작하였으며 그때의 표면의 상태를 살펴 보았다. 전극은 와이어의 진동에 매우 민감하게 영향을 받으므로 와이어의 장력에 대한 제어가 매우 중요하다.

##### 4.1 전극 가공

Fig. 12 에 WEDG 방법으로 실제 가공된 전극 형상을 나타내었다. 실험을 통해서 최소 직경 5.5  $\mu\text{m}$ , 길이 200  $\mu\text{m}$  되는 전극까지 가공하였다. 실험에서 와이어의 진동에 따라 가공되는 전극의 진폭도에 영향을 미치게 된다. 전극 직경의 제어를 위해서 실험 계획법을 이용하여 원하는 직경의 전극을 가공하는 실험을 행하여 원하는 직경의 전극을 가공하고 이것을 공구로 하여 다시 홀과 슬롯 및 형상 가공을 행한다. 실험 계획법을 통한 전극 가공시에 원하는 직경과 표면 형상을 제어하여 전극을 가공할 수 있다.<sup>9,10</sup>

인가 전압이 200 V 일때와 140 V 일때 전극의 가공 표면 사진을 Fig. 13 에 비교하였다. 방전 전압에 따라서 가공 면에 유입되는 에너지가 크게 차이가 있으며 발생하는 플라즈마 채널의 지름에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 일반적으로 플라즈마 채널의 크기는 0.5  $\mu\text{m}$  이내이며 방전 시간에 따라서 그 크기는 변화하게 된다. 이러한 결과를 통해 방전 전압에 따라 가공 표면의 정도가 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

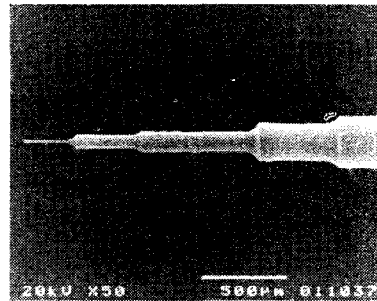
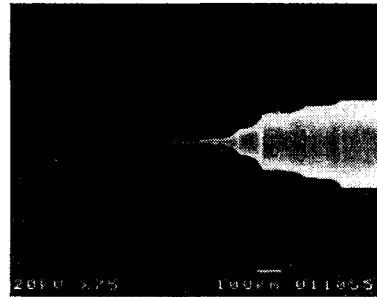


Fig. 12 Tool electrodes machined by WEDG

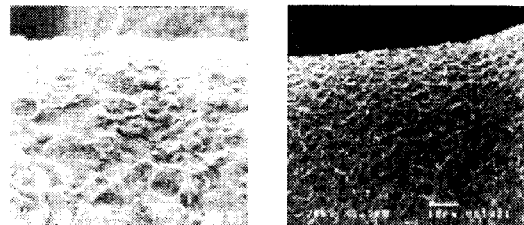


Fig. 13 Surfaces of tool electrode machined by WEDG

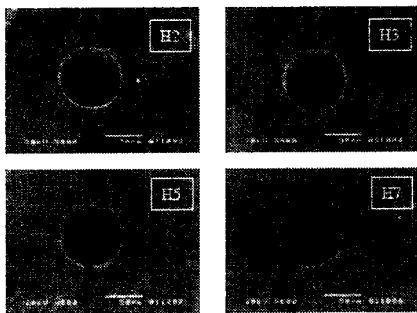
##### 4.2 미세 구멍 가공

50  $\mu\text{m}$ 와 100  $\mu\text{m}$  전극을 이용하여 미세 구멍 가공 실험을 실시하였다. 가공 조건은 Table 2 와 같다. 각 조건에 대하여 미세 구멍을 가공하고 입구 측 지름과 출구 측 지름의 변화를 살펴 보았다. 또한 SEM 사진을 통해 구멍 벽면 내부의 표면 상태를 관찰하였다.

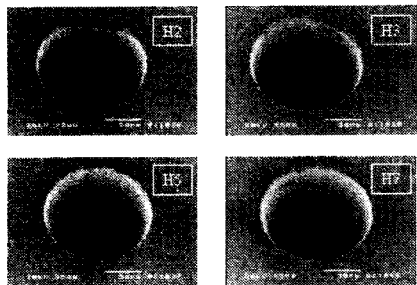
Fig. 14 에 Table 2 의 가공 조건에 따라 각각 100  $\mu\text{m}$  전극과 50  $\mu\text{m}$  전극을 이용하여 가공한 구멍의 사진을 보여 주고 있다. 가공된 공작물은 두께가 200  $\mu\text{m}$ 인 텅스텐 박판이다. 결과를 보면 실제 전극 길이보다 좀더 큰 지름의 구멍이 가공되었다. 이것은 초기 공구의 런아웃과 방전 간극에 의한 영향 때문이다. 조건에 따라 방전 간극은 10-20  $\mu\text{m}$  까지 존재한다.

Table 2 The machining conditions of hole EDM drilling

Hole No.	Capacitance (pF)	Voltage (V)	Feedrates ( $\mu\text{m/s}$ )	Resistor ( $\Omega$ )	Spindle speed (rpm)
H1	1	120	0.1	1000	500
H2	10	120	0.1	1000	500
H3	50	120	0.1	1000	500
H4	100	120	0.1	1000	500
H5	10	120	0.1	560	500
H6	10	120	0.1	800	500
H7	10	140	0.1	1000	500
H8	10	100	0.1	1000	500



(a) 50  $\mu\text{m}$  electrode tool

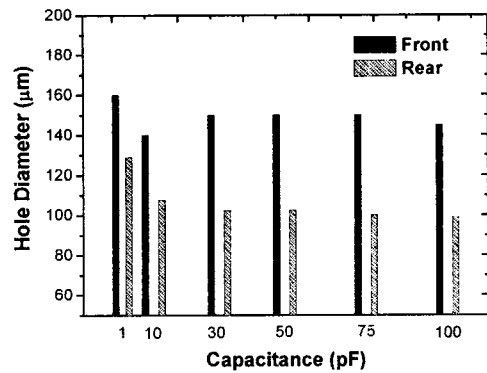


(b) 100  $\mu\text{m}$  electrode tool

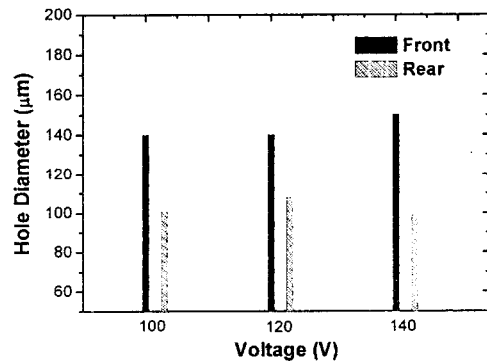
Fig. 14 The SEM photograph of machined hole

Fig. 15는 100  $\mu\text{m}$  전극을 사용하여 각각 가공된 구멍의 지름이 (a) 콘덴서의 용량 변화, (b) 전압 변화, 그리고 (c) 저항값의 변화에 따라 달라지는 결과를 그래프로 나타내었다. 콘덴서 용량 실험에서 10pF 일 때, 전압 실험의 경우에는 100V, 그리고 저항값은 1000  $\Omega$  일 때가 방전 간극이 가장 작았다. 이는 방전이 발생할 때 유입되는 에너지가 다른 조건에 비해 작았기 때문이다. 또 입구부의 구멍 지름이 상대적으로 크고 출구부의 지름이 작은 테이퍼 형상의 구멍이 가공됨을 볼 수 있다.

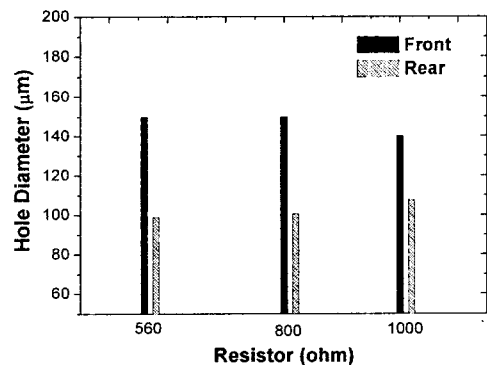
특이한 것은 출구부의 직경이 거의 공구 직경과 같게 나왔는데 이는 공구가 진입하면서 끝단이 불엔드밀과 같은 형상으로 마모됨에 의해 발생하는 결과라 할 수 있다.



(a) Variation of hole diameter with capacitors



(b) Variation of hole diameter with voltages



(c) Variation of hole diameters with resistor types

Fig. 15 Variation of hole diameter according to machining conditions

Fig. 16 은 가공된 구멍의 내부 벽면 사진이다. 사진을 통해서 볼 때 콘덴서 용량이 10pF 일때 가공면의 상태가 좋으며 나머지는 콘덴서 용량의 변화에 따라 가공 면의 상태가 크게 차이가 없는 것을 알 수 있다.

구멍을 가공할 때 벽면과 바닥면의 가공면 상태를 Fig. 17 에서 보여주고 있다. 바닥면은 균일한 형태를 가지는데 반해서 벽면에서는 물결 무늬의 가공 표면이 형성되는데 이는 가공 중에 발생하는 부스러기들이 유동에 의해 벽면에 부딪히면서 연마 입자와 같이 표면을 긁고 나가기 때문이다.

지름 150  $\mu\text{m}$  전극으로 100  $\mu\text{m}$  두께 스테인리스 박판에 구멍을 가공할 때 발생하는 공구 마모의 경향을 Fig. 18 및 Fig. 19 에 나타내었다. 인가 전압은 100V 이며 전극 회전 속도는 250rpm 이다. 저항값이 560  $\Omega$  일때, 즉 전류값이 클 때와 콘덴서 용량이 작을 때 공구 마모가 작아지는 경향을 보였다. 전류값이 큰 경우 공구 마모량이 작은 현상은 방전 플라즈마에 의해 생성되는 가공 압력이 크기 때문에 절연액의 플러싱(flushing) 작용에 의해 가공 부스러기가 더욱 원활하게 배출되었기 때문이라고 생각된다.

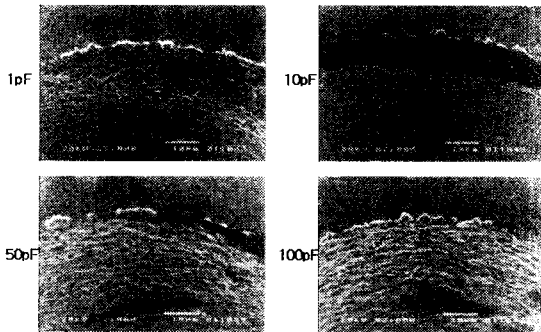
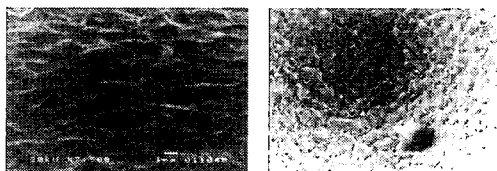


Fig. 16 Inner wall surfaces of machined hole



(a) Side wall surface (b) Bottom surface

Fig. 17 Surfaces of machined pocket hole

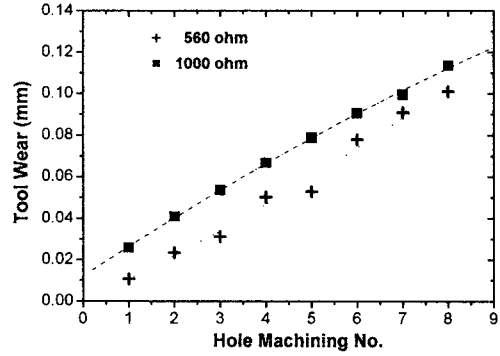


Fig. 18 Tool wear trend with resistors

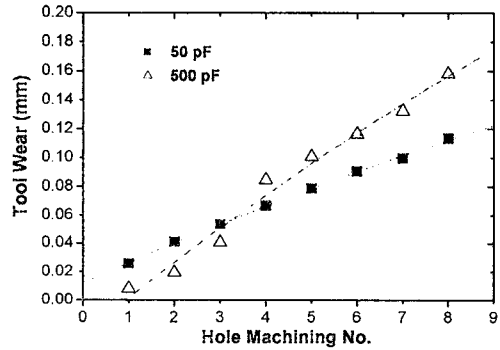


Fig. 19 Tool wear trend with capacitors

#### 4.3 홈(slot) 가공 및 포켓(pocket) 가공

실제 3 차원 형상 가공을 하기 위해서는 홈 가공과 포켓가공이 필수적이다. 슬롯 가공은 Fig. 20 과 같이 실시하였으며 슬롯의 깊이는 3~5  $\mu\text{m}$ , 길이는 900  $\mu\text{m}$ 이고 공작물 재질은 SUS304 이다. 홈 가공에서 이송 속도에 따른 재료 제거율(MRR)의 변화를 콘덴서 용량이 각각 1, 50pF 일 때 실험을 통해 얻은 값을 Fig. 21 에 나타내었다. 이송 속도가 빨라짐에 따라 비례적으로 MRR 값이 증가하는 것을 확인할 수 있고 콘덴서 용량이 1pF 일 때 50pF 일 때보다 더 큰 재료제거량을 가진다. 콘덴서 용량이 작은 경우가 상대적으로 큰 재료 제거량을 가지는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 콘덴서 용량이 작게되면 1 회 방전시에 공작물로 유입되는 에너지가 상대적으로 작지만 콘덴서 충전간격이 짧아서 더 많은 회수의 스파크가 발생하게 된다. 따라서, 단위시간당 공작물에 전달되는 전체 에너지는 커지게 된다.

Fig. 22 는 이송속도와 펄스 폭(on-time)에 따라 가공되는 슬롯의 깊이와 공구 마모량의 변화를 나타내었다. 이송 속도가  $0.5 \mu\text{m/s}$  이상일 때 가공 깊이는 거의 일정한 값을 가지며 공구 마모는 이송속도가 증가할수록 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 방전 유지시간(on-time)의 변화에 따라서는 방전 유지시간이 긴 쪽이 오히려 공구 마모가 작았으며 가공 깊이는 방전유지시간이 작을 때 이송 속도에 따라 거의 변화가 없었다.

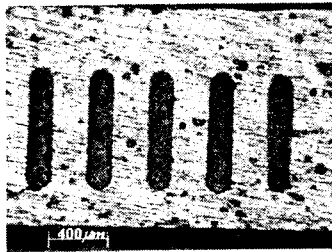


Fig. 20 Slot machining

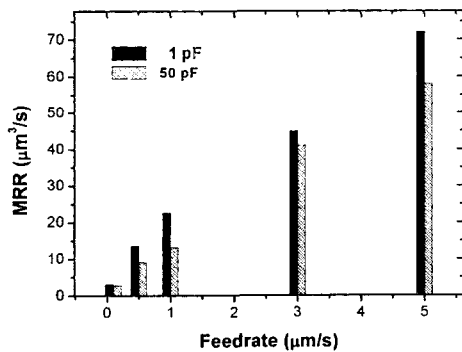


Fig. 21 MRR variation with feedrates

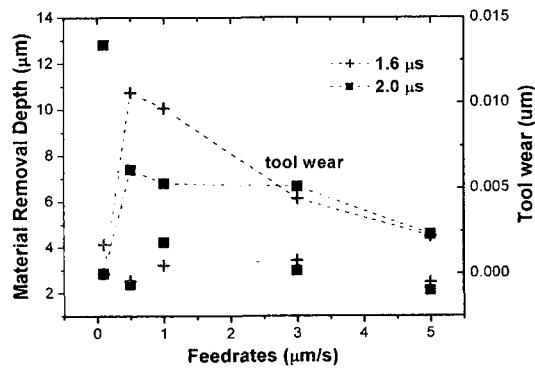


Fig. 22 MRD & tool wear variation with feedrates

Fig. 23 에 포켓 형상을 가공한 결과를 나타내었다. 포켓 가공의 깊이는  $40 \mu\text{m}$ 이며 측정은 표면 거칠기 측정 장치를 이용하였다. 포켓 형상에서 깊이가 균일하지 않았는데 이는 가공 중에 발생하는 전극의 마모에 의한 영향이다. Fig. 24 에서 이러한 현상을 더욱 확실하게 관찰할 수 있다. Fig. 24(a)와 같은 공구경로로 깊이  $80 \mu\text{m}$ , 단차  $60 \mu\text{m}$  를 가진 포켓을 가공하였지만 실제 가공깊이는 최고  $15 \mu\text{m}$ 밖에 되지 않았다. 가공 중에 공구의 마모가  $65 \mu\text{m}$  이상이 진행된 결과이다. 실제 미세 형상 가공에서 가공 정밀도를 높이기 위해서는 공구 마모량에 대한 보정이 반드시 필요하다.

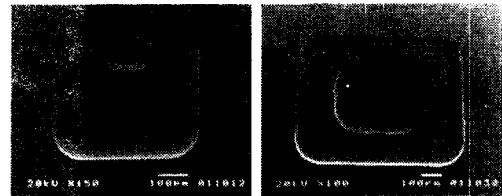
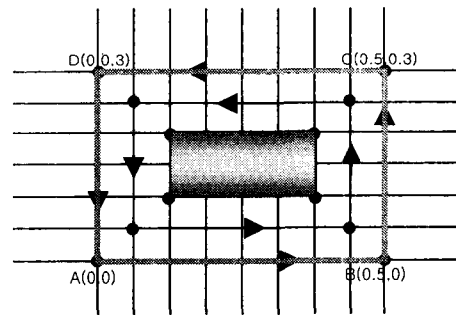
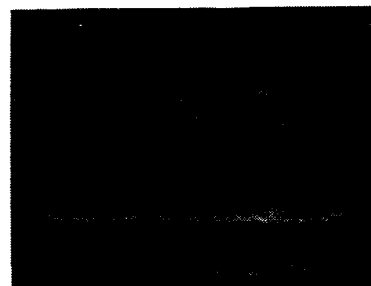


Fig. 23 Pocket machining



(a) Tool path



(b) Pocket machining (roughing)

Fig. 24 Pocket machining with island shape



## 5. 결론

개발한 마이크로 방전 가공기계를 이용하여 미세 구멍 및 슬롯형상, 그리고 포켓 형상에 대한 가공 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) WEDG 가공에서 인가 전압이 전극 가공 표면 상태에 큰 영향을 미치며 전압의 크기가 작을수록 표면의 상태가 양호하다. 인가전압의 크기는 방전 전류의 세기와 직접적으로 연관되며 전류 값이 클수록 순간적인 방전현상에서 전극과 공작물 사이에 발생하는 플라즈마 채널 지름이 커지게 된다. 플라즈마 지름의 크기는 공작물에 생기는 크레이터 지름과 깊이를 결정한다.

(2) 형상가공의 경우 이송속도가 빠르고 콘텐츠 용량이 작은 경우 재료제거율이 증가한다. 이송속도가 0.5  $\mu\text{m/s}$  이상이 되면 가공 깊이는 거의 일정한 값을 가지게 되며 공구 마모율은 이송속도가 빨라질수록 감소한다. 또한 방전 유지시간(on-time)이 길수록 오히려 공구 마모가 작으며 가공 깊이는 방전 유지시간이 작을 때 이송속도에 따라 거의 변화가 없다.

(3) 슬롯형상이나 포켓형상 가공의 경우에는 방전가공 조건의 설정에 따라서 가공표면의 상태가 매우 달라진다. 실제적으로 임의의 형상을 가공하기 위해서는 예를 들면 황삭가공과 다듬질 가공과 같이 공정을 분리하여 가공효율을 높여야 한다.

(4) 포켓 가공에서는 방전가공의 특성상 필연적으로 공구의 마모가 발생하여 가공정밀도에 크게 영향을 미치게 된다. 차후 연구에서 공구 마모량 보정을 통해 임의의 형상가공에서 원하는 형상정밀도를 얻을 수 있도록 할 예정이다.

## 참고문헌

1. Dario, P., Carrozza, M. C., "Non-traditional Technologies for Microfabrication," J. of Micromech. Microeng., Vol. 5, pp. 64-71, 1995.
2. Snoeys, R., Staelens, F., Dekeyser, W., "Current Trends in Non-Conventional Material Removal Processes," CIRP, Vol. 35, No. 2, pp. 467-480, 1986.
3. Kholodnov, E., Electrosark Machining of Metals, Vol. 2, Consultants Bureau, pp. 120-121, 1964.

4. Jeswani, M. J., "Small Hole Drilling in EDM," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 19, pp. 165-169, 1979.
5. Masaki, T., Kavata, K. and Masuzawa, T., "Micro Electro-Discharge Machining and Its Applications," Proc. MEMS (Napa Valley, CA), pp. 21-26, 1990.
6. Masuzawa, T, Fujino, M., "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34, pp. 431-434, 1985.
7. Chu, J. N., Kim, G. M., Kim, S. Y., "Fabrication of Micro-Shapes using EDM and Ultrasonic Machining," Journal of the KSPE, Vol. 17, No. 7, pp. 20-27, 2000.
8. Masuzawa, T., やさしいマイクロ加工技術, 日刊工業新聞社, 2000.
9. Ahn, H. M., Kim, Y. T., Park, S. J. Lee, S. J., "Machining Characteristics of Tool Electrode using Micro-EDM," Proceedings of the KSPE, pp. 1003-1007, 2002.
10. Ahn, H. M., Kim, Y. T., Park, S. J. Lee, S. J., "Experimental Study on the Electrode Surface in WEDG," Proceedings of the KSPE, pp. 218-222, 2002.