

# 미세구멍의 미세방전 가공에서 가공율과 전극소모 특성

김규만\*, 김보현\*\*, 주종남\*\*\*

## Machining Rate and Electrode Wear Characteristics in Micro-EDM of Micro-Holes

Gyu Man Kim\*, Bo Hyun Kim\*\*, and Chong Nam Chu\*\*\*

### ABSTRACT

Micro-EDM is widely used in machining of micro-parts such as micro-shafts and micro-holes. In order to select proper machining conditions and to reduce the machining time, it is necessary to understand machining characteristics under various machining conditions. Micro-hole machining tests were performed with round shape electrodes with different capacitances and voltages of the power source. The effects of the electrode rotational speed and diameter on the machining rate were also observed. From the experimental results, it was found that capacitance and voltage have significant effects on machining rate and the machined surface integrity. With higher capacitance and higher voltage, higher machining rate was observed together with poorer surface integrity. The electrode diameter was also found to have an effect on the machining rate and electrode wear.

**Key Words :** Micro-EDM (미세방전가공), Micro-hole (미세구멍), Electrode wear (전극소모), Material removal rate (가공율), Clearance (간극)

### 1. 서론

다가오는 21세기 산업구조는 대량생산형에서 벗어나 정보통신, 반도체, 전자 및 메카트로닉스 등 차세대 지식기반경제를 주축으로 한 기술혁신형으로 전환될 것으로 예측되고 있다. 특히 제품의 경박·소형화 추세와 더불어 미세가공기술 분야의 기술력이 궁극적으로 차세대 상품의 경쟁력을 좌우할 것으로 예상된다. 이러한 측면에서 선진국을 중심으로 오래 전부터 미세가공기술에 관한 연구가 진행되어 왔다. 그 중 하나인 MEMS에 대한 가시적인 결과가 실제 산업에 응용되고 있으나 현재의 기술

수준에서는 관련 분야 일부에 극히 제한적으로 응용되고 있는 실정이다. 따라서 최근 일본에서는 전통적인 가공방식에 의한 미세가공기술에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며 이러한 미세가공기술은 경박·소형화 제품에 응용되어 가전, 통신 관련제품에서 가격경쟁력의 핵심을 이루고 있다. 그 중에서도 미세방전 가공기술은 비접촉 가공특성을 지니므로 가공력이 다른 가공방법에 비하여 극히 작아 미세가공에 매우 적합한 방법이다. 미세전극 가공을 위한 와이어 방전연삭법<sup>[1]</sup>이 제안된 이후 응용 사례 별로 많은 연구가 발표되었으나<sup>[2,3]</sup> 가공특성에 대한 체계적인 연구는 적은 실정이다. 본 연구

\* 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소

\*\* 서울대학교 대학원

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

에서는 미세구멍의 방전가공 시 가공조건과 형상에 따른 가공특성을 살펴봄으로써 향후 가공조건 설정과 가공 효율화 등에 응용하고자 한다.

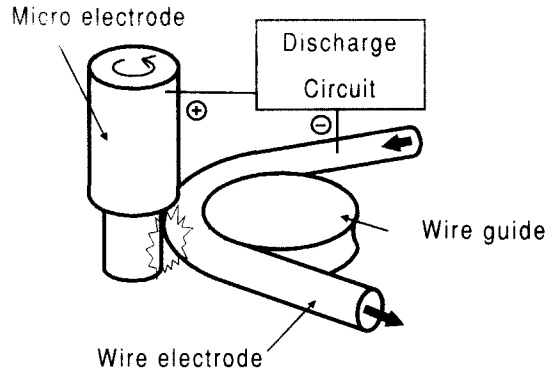
## 2. 미세방전가공

### 2.1 미세방전 가공원리

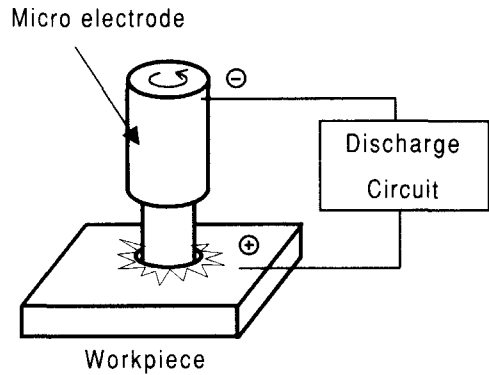
절연액속에서 미세한 간격으로 떨어져 있는 전극과 가공물 사이에 일정값 이상의 전위차가 발생하면 전극 혹은 가공물의 한 점에서 국부적으로 절연상태가 파괴되어 순간적으로 전하의 이동이 발생하는데 이를 방전이라 한다. 이 때 발생하는 고온의 열로 재료가 녹거나 증발하게 되는데 이와 동시에 절연액도 국부적으로 급속히 기화하기 때문에 높은 압력이 발생하여 녹거나 증발된 재료가 급속히 제거된다. 가공 원리면에서 미세방전가공은 일반 방전가공과 같지만 피가공물의 크기와 강성이 매우 작기 때문에 단발 방전에너지를 극히 작게 유지하여야 한다는 점에서 차이가 있다. 또한 미세구멍 가공 시 필요한 전극 직경이 수백  $\mu\text{m}$  이하로 매우 작기 때문에 범용 가공으로는 전극제작이 불가능하므로 전극가공용 보조전극을 이용한 미세방전으로 전극을 가공해야 한다. 이때 보조전극의 소모에 따른 형상오차를 줄이기 위해 가공 중에 새로운 보조전극을 지속적으로 공급할 필요가 있다. 이러한 개념으로부터 미세전극 가공용 와이어 방전연삭이 제안되었다<sup>[1]</sup>. Fig.1 (a)는 와이어방전연삭의 원리를 보이고 있다. 보조전극으로 와이어 전극을 사용하고 와이어 가이드를 따라 와이어 전극을 일정한 속도로 공급함으로써 전극소모의 영향 없이 미세전극을 가공할 수 있다. 미세구멍을 가공할 때에는 와이어 방전연삭으로 가공된 미세전극을 이용하여 극성을 바꾸어 가공한다(Fig.1 (b)).

### 2.2 미세방전 가공 시스템

본 연구자들은 미세구멍가공용 미세방전가공기를 제작하였다<sup>[4]</sup>. 가공기는 XYZ 3축과 주축 C축을 제어할 수 있고 주축에 연결된 미세전극을 회전하면서 Z축 방향으로 미세전극을 이송시켜 가공을 수행한다. 방전상태는 전극과 가공물간의 간극에 가장 밀접한 관계가 있으므로 일정한 간극을 유지하여 안정된 방전상태를 지속하여야 한다. 이를 위하여 방전회로로부터 가공 중 방전상태를 검출하고 Z 축 방향 전극이송을 제어하여 일정한 간극을 유



(a) Micro-electrode machining



(b) Micro-hole machining

Fig. 1 Micro-hole machining process

지하였다. 방전회로의 간극 전압을 측정하여 전극과 가공물의 단락(short circuit)여부를 판단하고 전극 이송속도를 결정하여 전극 이송을 제어하였다. 방전전원으로는 RC 회로와 트랜지스터 회로가 주로 사용되는데, 트랜지스터 회로는 방전전원의 파형의 제어와 전원의 인가 및 휴지 시간 조절이 용이하여 방전효율면에서 이점이 있지만 트랜지스터 특성상 발생 가능한 전원과 주파수에 한계가 있다. 미세방전에서는 단발방전에너지가 매우 작기 때문에 가공효율 측면에서 고주파 전원이 필요하므로 RC회로를 사용하였다. Fig.2는 사용된 방전전원 회로도도를 보이고 있다.

## 3. 미세방전가공의 주요 특성

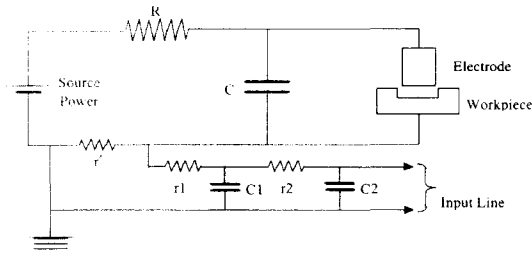


Fig. 2 Electrical discharge circuit

### 3.1 단발방전 에너지

방전이 발생하면 전극과 공작물간의 절연상태가 파괴되어 가공물이 제거되고 일정 시간 후 다시 절연상태를 회복하게 된다. 이 과정을 반복함으로써 가공이 이루어지는데 하나의 방전이 지나는 가공에너지를 단발방전에너지라 한다. 단발방전에너지는 가공율, 가공속도, 가공력, 가공물 표면거칠기와 밀접한 관계를 지닌다. 전원회로로 RC회로를 사용하는 경우 단발방전에너지  $E$  는 다음과 같이 축전용량  $C$  와 방전전압  $V_d$  로 근사할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} (C + C_{st}) V_d^2 \quad (1)$$

여기서  $C_{st}$  는 부하용량(stray capacitance)이다.

미세가공에서는 가공물의 크기 때문에 강성이 작으므로 가공력이 작아야 한다. 따라서 단발방전 에너지를 작게 유지할 필요가 있다. 단발방전에너지는 방전전압과 축전용량과 밀접한 관계가 있으나 낮은 방전전압은 불안정한 방전을 야기하므로 미세 방전에서는 작은 용량의 축전기를 사용하는 것이 바람직하다. 또한 축전용량이 커질수록 단발방전에 의한 방전흔은 커지게 되어 가공면의 표면거칠기는 악화된다. 그러나 절연회복 특성으로 인하여 방전 주파수에 한계가 있어서 축전용량이 너무 작으면 가공속도가 느려지므로 적절한 축전용량 선정이 필요하다. 부하용량은 방전부 주위 금속부 간에 존재하는 축전용량으로 사용자 설정이 불가능한 조건이므로 방전부 주위에 되도록 절연성 부품을 사용함으로써 이를 최소화하는 것이 바람직하다.

### 3.2 가공율(Material Removal Rate)

가공율은 시간당 제거되는 가공물의 부피로 정

의되며 가공속도와 가공효율을 나타낸다. 방전가공에서 제거율은 단발방전에너지와 밀접한 관계를 가지고 있다. 직경이  $D$  이고 깊이가  $t$  인 미소구멍 가공에서 가공시간이  $T$  일 때 가공율(MRR)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$MRR = \frac{\pi \times D^2 \times t}{4 \times T} \quad (2)$$

### 3.3 전극소모비(Electrode Wear Ratio)

방전이 발생하면 가공물 뿐만 아니라 전극재질도 동시에 제거되기 때문에 전극소모가 일어난다. 구멍가공의 경우 방전은 대부분 구멍의 바닥면에서 발생하며, 따라서 전극은 주로 길이 방향으로 소모되며 반경방향 소모는 무시할 수 있다<sup>[5]</sup>. 길이방향 전극소모량은 가공되는 구멍의 깊이오차에 직접적인 영향을 주기 때문에 가공 시 길이방향 전극소모량에 대한 보정이 필요하다. 전극소모비(electrode wear ratio, EWR)는 가공물 제거율에 대한 전극소모율의 비로 정의되는데 구멍가공에서 전극직경에 비해 방전간극(clearance)이 작은 경우에는 구멍깊이에 대한 축방향 전극소모길이의 비로 근사하여 계산할 수 있다.

$$EWR = \frac{ERR}{MRR} \times 100 [\%] \quad (3)$$

$$\approx \frac{L_e}{t} \times 100 [\%]$$

여기서 ERR 은 전극소모율(electrode removal rate)이고  $L_e$  는 전극소모길이를 나타낸다.

### 3.4 간극(clearance)

방전은 전극과 가공면이 미세한 간격을 두고 절연상태에 있을 때 절연이 파괴되면서 발생하므로 전극과 구멍사이에는 간극(clearance)이 존재한다. 정확한 형상치수의 구멍을 가공하기 위해서는 구멍과 전극 사이의 간극 특성을 정확하게 파악하여야 한다. 간극은 전극의 지름  $d$  와 가공된 구멍의 지름  $D$  를 측정하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$clearance = \frac{D - d}{2} \quad (4)$$

#### 4. 실험 및 결과

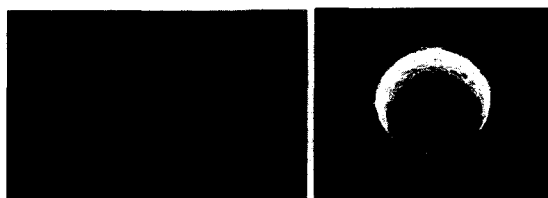
##### 4.1 실험 개요

가공조건에 따라 전술한 미세구멍 가공특성을 알아보았다. 우선 초경합금 재료의 미세전극을 와이어방전연삭을 이용하여 제작한 후 SUS 304 재료의 가공물에 미세구멍을 가공하였다. 가공조건을 변화시키면서 미세구멍을 가공하고 가공조건에 따른 가공율과 전극소모비, 간극(clearance) 등 가공특성을 관찰하였다. 모든 실험에서 가공깊이는 100 $\mu$ m로 설정하였고 두께 100 $\mu$ m 판의 관통 순간까지 가공시간을 측정하여 전극소모길이의 영향을 배제한 상태에서 가공율을 계산하였다. 전극소모비는 가공전과 가공후의 전극길이를 측정하여 계산하였다. 간극은 전극과 가공된 구멍직경을 측정하여 계산하였다. 방전분산이 용이하도록 원형전극을 회전시키면서 가공하였고, 전극의 회전속도는 1200 rpm으로 설정하였다. Fig. 3은 가공에 사용된 전극과 구멍의 예이다.

##### 4.2 결과 및 고찰

###### 4.2.1 가공반복성

Fig. 4는 동일가공조건에서 미세구멍가공의 반복성 결과이다. 실험에 사용된 축전용량은 500 pF이고 전원회로 전압은 100 V이다. 직경 50  $\mu$ m 전극으로 동일한 가공을 20번 반복하고 가공시간과 전극소모를 측정하였다. 실험결과 가공시간의 표준편차는 62초이고 전극소모비는 3.6%로 충분한 가공반복성을 나타내었다. 따라서 이후 실험에서는 동일한 조건에서 가공을 3회 반복하고 측정값들을 평균하여 가공특성을 해석하였다.



(a) Electrode (b) Microhole  
Fig. 3 Example of electrode and microhole  
(Electrode diameter 50 $\mu$ m)

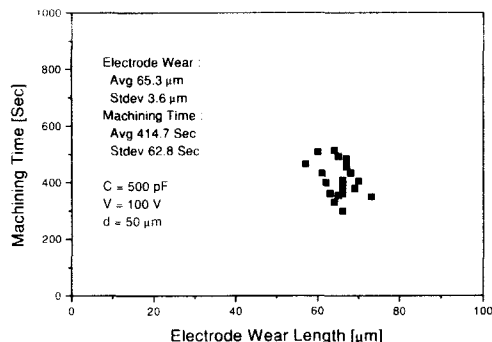


Fig. 4 Machining repeatability

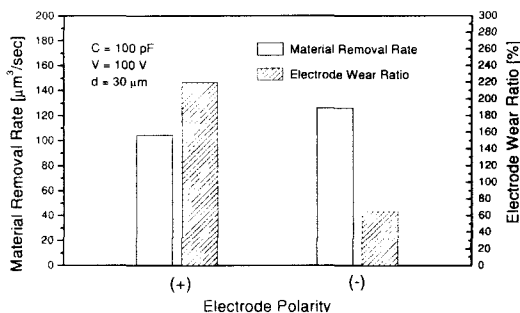


Fig. 5 Electrode polarity characteristics

###### 4.2.2 전극극성의 영향

Fig. 5는 전극과 가공물의 극성에 따른 실험결과이다. 전극지름은 30 $\mu$ m 이고 축전용량은 100pF이다. 전극에 (-) 전원을 연결하는 정극성의 경우가 가공율도 높고 전극의 소모도 작게 나타났다. 이 이유는 펄스폭이 작은 미세방전의 경우 이온전류에 의한 가공이 주로 일어나서 양극의 가공량이 많아지기 때문이다. 이후 실험에서는 정극성으로 전원을 인가하였다.

###### 4.2.3 축전용량에 따른 가공특성

Fig. 6은 축전용량에 따른 가공특성이다. 축전용량이 증가할수록 가공율이 증가하여 가공시간이 단축되었다. 그 이유는 축전용량이 커질수록 단발방전에너지가 커지므로 가공이 빠르게 진행되기 때문이다. 그러나 단발방전에너지가 증가함에 따라 단발방전으로 인한 제거량이 커지므로 표면거칠기가 나빠졌다. Fig. 7은 축전용량을 달리한 경우 가공된 구멍의 사진이다. 따라서 가공면 품질이 중요한 경우에는 가공성이 떨어지더라도 축전용량을 작게 할

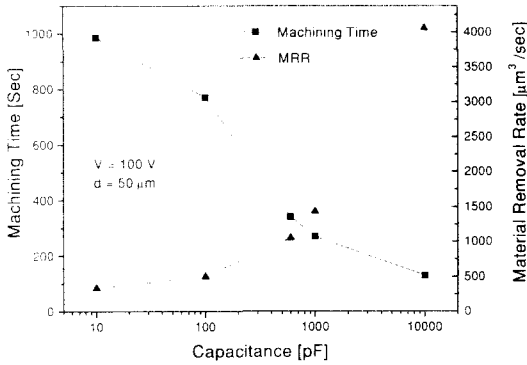


Fig. 6 Machining rate variation due to capacitance

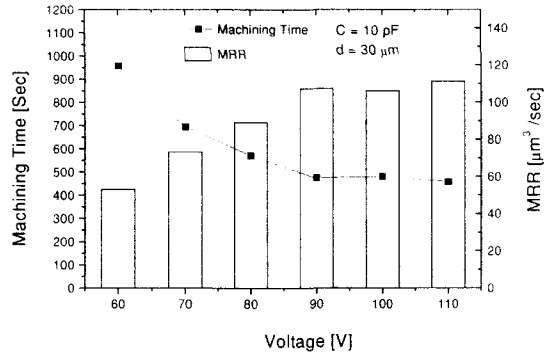


Fig. 9 Machining rate variation due to power source voltage



(a) 1000 pF (b) 10 pF

Fig. 7 Machined hole shape due to capacitance

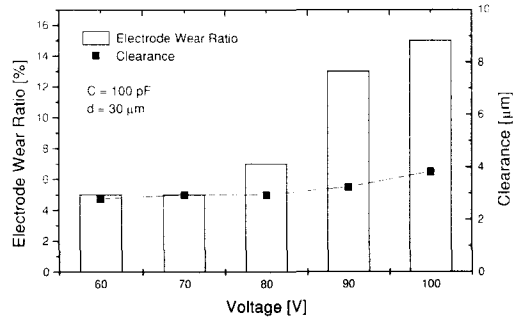


Fig. 10 Electrode wear and clearance variation due to power source voltage

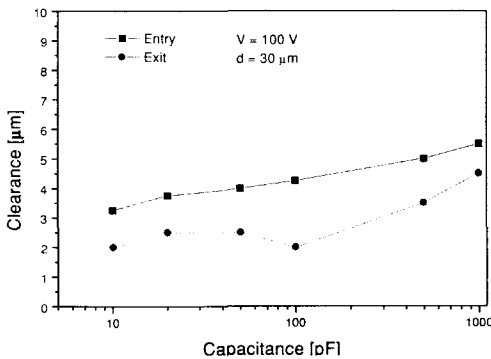


Fig. 8 Clearance variation due to capacitance

필요가 있다. Fig. 8은 축전용량에 따른 입구측과 출구측의 간극(clearance) 변화이다. 평균적으로 2 $\mu\text{m}$  이상의 간극이 발생하고 있으며 축전용량이 커질수록 간극도 증가하고 있다. 입구측 간극이 출구측보다 약 1 $\mu\text{m}$  정도 크게 나타나 구멍 내부에서 약 1도 정도의 테이퍼가 발생하고 있다.

#### 4.2.4 전원회로 전압에 따른 가공특성

Fig. 9는 공급전원 전압을 변화시키면서 SUS304를 가공한 경우 가공시간과 가공율의 변화이다. 전극지름은 30 $\mu\text{m}$ 이고 축전용량은 10pF이다. 전원전압 80V 이하에서는 전원전압이 증가함에 따라 가공율이 증가하다 90V 이상에서는 큰 차이를 보이지 않는다. 그 이유는 낮은 전원전압에서는 방전개시전압이 낮기 때문에 방전상태가 불안정하여 가공율이 낮아지는 반면 방전개시전압은 전극과 가공물 극간 절연상태와 관련이 있기 때문에 공급전원을 방전개시전압 이상으로 전압을 높여도 단발방전에너지와 이에 따른 가공율이 증가하지 않는 것으로 추측된다. Fig. 10은 축전용량 100pF로 직경 30 $\mu\text{m}$  전극으로 황동(Brass)을 가공한 경우 전원전압에 따른 전극소모와 간극특성이다. 전원전압이 증가할수록 단발방전에너지가 증가하여 전극소모량도 증가하고

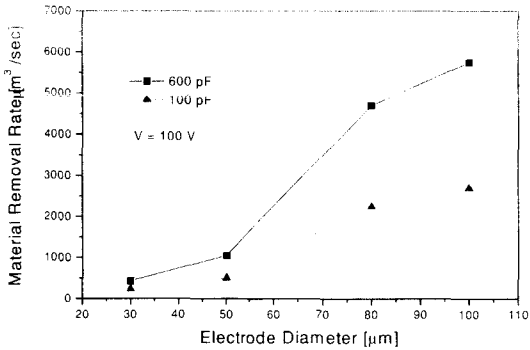


Fig. 11 Machining rate variation due to electrode diameter

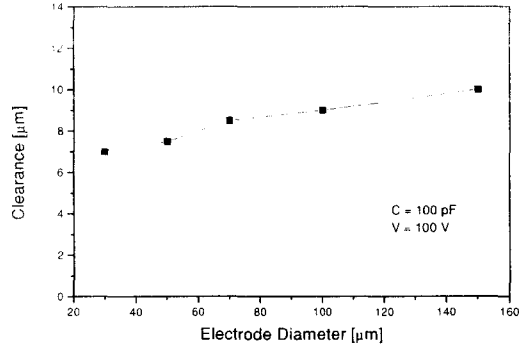


Fig. 13 Clearance variation due to electrode diameter

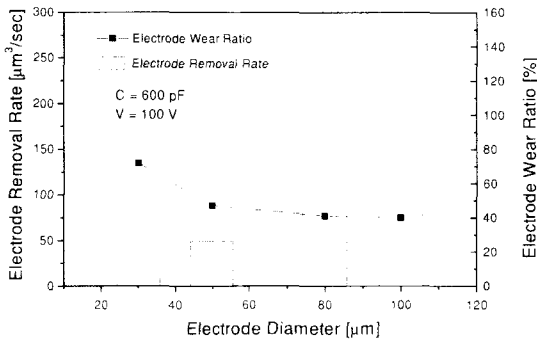


Fig. 12 Electrode wear variation due to electrode diameter

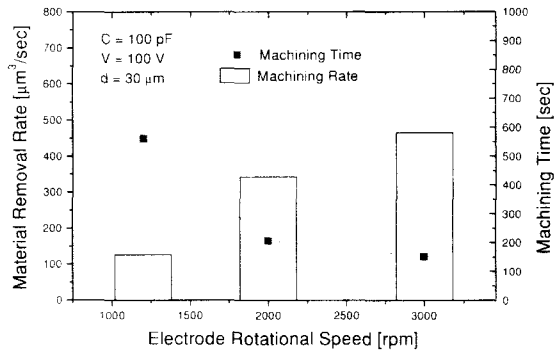


Fig. 14 Machining rate variation due to electrode rotational speed

있으며 큰 차이를 보이지 않지만 전압이 증가하면서 가공 후 입구측 간극도 미소하게 증가하고 있다.

#### 4.2.5 전극지름에 따른 가공특성

Fig. 11은 전극지름에 따른 가공율의 변화이다. 실험결과, 지름이 커질수록 가공율이 커지는 경향을 보이며, 이는 전극지름이 작아질수록 가공면적이 급속히 감소하므로 방전이 한곳에 집중될 가능성이 높아져 가공이 불안정해지면서 가공효율이 감소하는 면적효과에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 12는 전극지름에 따른 길이방향 전극소모비와 시간당 소모율 결과이다. 전극지름이 커질수록 전극소모비는 감소하지만 전극소모율은 증가하는 경향을 보인다. 이 현상도 역시 전극지름에 따른 면적효과에 기인하는 것으로 생각된다. Fig. 13은 전극지름에 따른 입구부 간극의 변화이다. 전극지름이

커질수록 간극도 미소하게 증가하고 있다. 그 이유는 전극지름이 커질수록 가공율이 증가하기 때문으로 생각된다.

#### 4.2.6 전극회전속도의 영향

Fig. 14는 전극의 회전속도에 따른 가공시간과 가공율 변화이다. 전극지름은 100μm 이고 축전용량 100pF, 가공전압 100V의 가공조건을 사용하였다. 실험결과 전극회전속도가 빠른 경우에 더 높은 가공율을 보인다. 그 이유는 전극회전속도가 증가할수록 방전의 분산효과가 커져 방전집중을 방지하고 가공분의 제거가 용이하기 때문이다. 그러나 전극소모와 간극은 전극회전속도에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 전극의 회전속도를 빠르게 설정하면 가공속도를 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 4.3 미세구멍가공 응용에

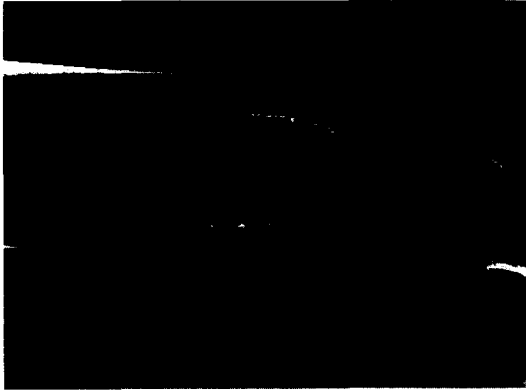


Fig. 15 Machined microhole on injection needle  
(Hole diameter: 50  $\mu\text{m}$ , Pitch: 100  $\mu\text{m}$ )

Fig. 15는 미세방전가공을 이용하여 주사바늘에 구멍을 가공한 예이다. 주사바늘의 직경은 630  $\mu\text{m}$  이고 그 끝부분에 직경 50  $\mu\text{m}$  미세구멍을 100  $\mu\text{m}$  간격으로 가공하였다. 그 외에도 미세방전은 각종 밸브 오리피스와 미세노즐 가공 등에 응용될 수 있다.

### 5. 결론

미세방전가공에서 가공조건과 가공형상에 따른 가공특성을 알아보기 위해 실험을 수행하고 가공율과 전극소모 특성을 관찰한 결과 다음과 같은 경향이 있었다.

(1) 전원회로의 축전용량이 커질수록 가공율이 증가하였다. 이는 단발방전에너지가 커지기 때문이다. 그러나 작은 축전용량 조건에서 보다 좋은 표면거칠기 특성을 보였다. 따라서 가공목적에 따라 적절한 조건 선택이 필요하다. 전원전압이 낮은 경우 방전전압의 저하로 가공율이 감소하였다.

(2) 전극소모율과 간극을 측정한 결과 전극소모율과 간극은 가공율과 비례하는 관계를 보였다.

(3) 전극지름이 작아질수록 가공율은 감소하는 경향이 있었다. 이는 전극지름이 작은 경우 면적효과로 인하여 방전집중에 의하여 가공율이 감소하기 때문이다.

(4) 전극회전속도가 증가할수록 가공율이 증가하였다. 이는 회전속도가 빠를수록 방전 분산과 가

공분 배율이 용이하기 때문으로 판단된다.

(5) 미세방전에서는 방전펄스폭이 작기 때문에 전극음 (-)전원에 연결하는 정극성 연결이 가공효율이 높고 전극소모도 작아 유리하다.

### 후기

본 연구는 동산산업부와 과학기술처 및 정보통신부에서 시행한 전도기술개발사업의 기술개발 결과이다.

### 참고문헌

1. Masuzawa, T., Fujino, M., Kobayashi, K., "Wire Electro-discharge grinding for micro machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, pp. 431-424, 1985.
2. Masuzawa, T., Tsukamoto, J., Fujino, M., "Drilling of deep microholes by EDM," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 195-198, 1989.
3. Masuzawa, T., Kuo, C. L., Fujino, M., "A combined electrical machining process for micronozzle fabrication," *Annals of the CIRP*, Vol. 43, pp. 189-192, 1994.
4. 김규만, 최덕기, 주종남, "미세축·구멍가공을 위한 미세방전가공기의 개발," *한국정밀공학회지*, 제15권, 제12호, pp. 55-61, 1998.
5. Mohri, N., Suzuki, M., Furuya, M., Saito, N., "Electrode wear process in electrical discharge machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 165-168, 1995.