

## 탈이온수를 절연액으로 사용한 미세 방전 밀링

정도관<sup>1)</sup>, 김보현<sup>2)</sup>, 주종남<sup>3)</sup>

### Micro EDM Milling Using Deionized Water as Dielectric Fluid

Do Kwan Chung, Bo Hyun Kim, Chong Nam Chu

Key words : Micro EDM(미세 방전 가공), Deionized water(탈이온수)

Abstract : Micro EDM milling using deionized water as dielectric fluid was investigated. After machining micro grooves using deionized water with different voltage, capacitance, and resistivity of deionized water, machining characteristics were investigated. The wear of a tool electrode and the machining time can be reduced by using deionized water instead of kerosene. Micro hemispheres were machined in deionized water and kerosene and their machining characteristics were compared.

#### 1. 서 론

미세 3차원 형상 가공 기술은 첨단 전자 산업 및 반도체 기술의 급성장과 맞물려 그 중요성이 갈수록 증대되고 있다. 지금까지의 기술은 대부분이 반도체 공정을 통해 실리콘 웨이퍼에 미세 형상을 만드는 것에 초점이 맞추어져 있었다. 최근에는 LIGA 기술의 발전으로 수십에서 수백 마이크로에 이르는 구조물을 제작할 수 있게 되었다. 하지만 이와 같은 방법들은 재료의 한계가 있고, 복잡한 단계의 공정을 거쳐야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 전통적인 절삭 가공과 특수 가공으로 미세한 크기의 구조물을 만드는 방법이 연구되어 왔다. 이와 같은 방법들로는 드릴링, 방전 가공, 초음파 가공, 전해 가공, 편칭 등이 있다. 이 중 미세 방전 가공은 와이어 방전 가공을 이용한 미세 전극 제작 기술이 개발된 이래 미세 형상의 적절한 가공법으로써 널리 응용되고 있고<sup>1)</sup>, 전극 마모에 의한 형상 오차 보정, 가공 효율 향상 등 정밀도 향상을 위한 다양한 연구가 수행되고 있다.<sup>2,3)</sup>

미세 방전 가공은 전도성을 갖는 공작물과 금속 전극에 전기를 걸어주어 발생하는 방전 현상을 이용하여 가공을 하는 방법이다. 방전 현상은 절연액 안에서 이루어지므로 절연액의 특성에 따라 가공이 영향을 받는다. 일반적으로 방전 가공

에서는 절연액으로 등유(kerosene)를 사용한다. Masuzawa는 방전 가공에서 탈이온수를 절연액으로 사용하여 가공 효율을 높일 수 있음을 보였다.<sup>3)</sup> 등유를 사용하는 경우에 비하여 탈이온수를 사용하면 전극의 마모량은 줄어들고, 가공속도는 빨라진다.<sup>3,4)</sup> 따라서 탈이온수를 사용하여 형상을 가공하면 등유를 사용하는 경우보다 더욱 효율적이다.

본 논문에서는 탈이온수를 절연액으로 사용한 미세 방전 밀링의 가공 특성을 실험적으로 살펴 보았다. 전압, 축전용량, 탈이온수의 비저항 등의 조건에 따라 미세 홈 (micro groove)을 가공하여 가공 간극의 변화를 살펴보았다. 그리고 탈이온수와 등유를 사용하는 경우에 대하여 가공 간극, 전극 마모량, 가공 속도, 가공 표면 형상 등을 비교하였다. 또한 미세 반구 형상을 가공하여 탈이온수와 등유를 사용하는 경우에 대하여 가공 효율을 비교하였다.

1) 서울대 대학원 기계항공공학부  
E-mail : dogani04@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-7147 Fax : (02)887-7259  
2) 서울대 정밀기계설계공동연구소  
3) 서울대 기계항공공학부

## 2. 미세 방전 가공

### 2.1 방전 가공 원리

절연액 안에 있는 두 전도성 재료 사이에 높은 전압이 가해지면 두 재료의 거리가 가장 가까운 곳에서 절연 파괴가 일어난다. 절연 파괴가 일어나면 급속히 전자가 이동하여 국부적으로 재료에 높은 열을 발생시킨다. 발생된 열로 재료가 용융 또는 증발하여 재료가 제거된다. 방전이 이루어지고 난 후 다시 절연 회복이 되고 위의 과정이 반복됨으로써 가공이 이루어진다.

### 2.2 미세 방전 가공 시스템

Fig. 1에 미세 방전 가공 시스템의 개략도를 나타내었다. 그림과 같이 공작물을 X, Y 축 이송 스테이지 위에 위치시키고, 공구 전극은 Z 축 스테이지 위에 위치시켰다. 공구 전극과 공작물에는 방전 회로를 통해 각각 (-)극과 (+)극이 연결된다. 공구 전극과 공작물은 절연액 안에 놓여 있다. 방전 회로는 RC 회로를 사용하였다. RC 방전 회로는 펄스폭과 방전 주기의 비로 정의되는 충격계수(duty factor)가 낮기 때문에 가공 속도가 낮고 전극 소모가 크지만 방전주파수(discharge frequency)와 방전 전류 피크치가 높고 펄스 폭을 짧게 하는 것이 용이하여 미세 가공에 적합한 회로이다.<sup>5)</sup>

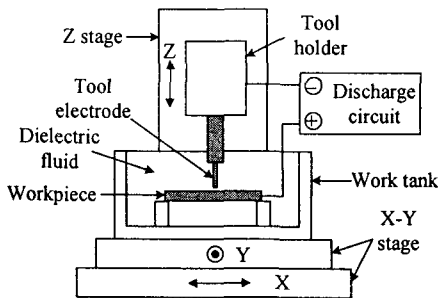


Fig. 1 Micro EDM system

### 2.3 절연액

방전 가공은 절연액 안에서 공구 전극과 공작물 사이의 전기적 방전 현상으로 가공이 이루어지므로 절연액에 따라 가공 특성이 달라진다. 절연액으로 등유를 사용하는 경우는 방전 간극이 수 마이크로 이내로 일정한 결과를 보인다. 반면 공구 전극에 탄화물이 흡착하여 가공을 방해하고<sup>3)</sup>, 공구 전극에 상당한 마모가 발생하며 가공 속도가 느린 단점이 있다. 이에 반해 탈이온수를 절연액으로 사용하면 전해 작용으로 등유에 비해 전극의 마모가 적고, 가공 속도는 빠르다.<sup>3,4)</sup> 탈이온수의 전해 작용은 비저항에 따라 그 정도가 결정된다. 비저항이 낮아질수록 전해 작용은 증가한다.

## 3. 미세 방전 밀링

미세 홈을 가공하여 가공 조건에 따라 탈이온

수를 사용한 방전 밀링의 가공 특성을 살펴보았다. 실험에 사용한 공구 전극의 재료는 텅스텐카바이드(WC)이고, 공작물 재료는 스테인리스 강(STS304)이다.

### 3.1 탈이온수 방전 밀링 특성

#### 3.1.1 전압의 영향

탈이온수를 절연액으로 사용한 경우의 전압에 따른 가공 간극의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 직경 50  $\mu\text{m}$ 의 전극으로 깊이 105  $\mu\text{m}$ , 길이 1000  $\mu\text{m}$ 의 미세 홈을 가공하여 너비 방향 간극을 측정하였다. 전압은 40 V-100 V를 사용하였고, 축전 용량은 400 pF로 일정하게 유지하였다. 탈이온수는 가공 시작 전 비저항이 2.5 M $\Omega\text{cm}$ 를 유지하도록 했다. Fig. 2에서 나타나듯이 전압이 증가할수록 간극도 증가하였다. 40 V 조건에서 간극이 8.5  $\mu\text{m}$ 로 가장 작다. 40 V 이하의 조건에서는 전기적 단락이 많이 발생하는 등 가공이 원활히 이루어지지 않음을 실험적으로 확인하였다.

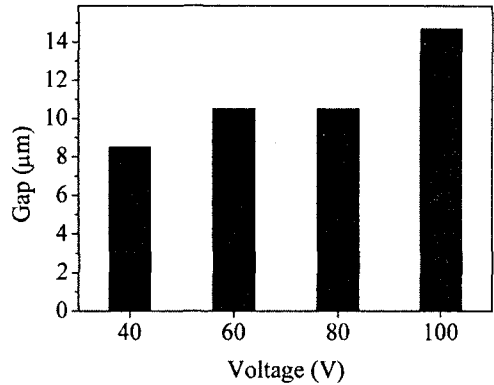


Fig. 2 Machining gap according to voltage ( $\varnothing$  50  $\mu\text{m}$  tool electrode, 400 pF, 2.5 M $\Omega\text{cm}$ )

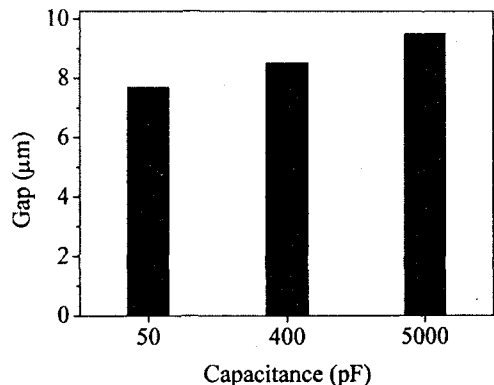


Fig. 3 Machining gap according to capacitance ( $\varnothing$  50  $\mu\text{m}$  tool electrode, 40 V, 2.5 M $\Omega\text{cm}$ )

#### 3.1.2 축전용량의 영향

축전 용량에 따른 가공 간극의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 마찬가지로 직경 50  $\mu\text{m}$  공구 전

극으로 길이 1000  $\mu\text{m}$ , 깊이 105  $\mu\text{m}$ 의 미세 홈을 가공하여 너비 방향의 가공 간극을 측정하였다. 전압은 40 V로 일정한 조건을 사용하였고, 비저항은 가공 시작 전 2.5  $\text{M}\Omega\text{cm}$ 로 일정하게 유지시켰다. Fig. 3에서 축전 용량이 증가할수록 가공 간극도 증가한다. 50 pF의 조건에서 간극이 가장 작지만 이 조건에서는 가공 중 단락이 많이 발생하는 등 가공이 불안정해지고, 가공된 표면 형상이 고르지 못하다.

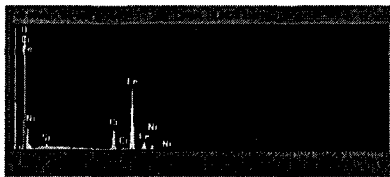
### 3.1.3 절연액의 비저항 영향

탈이온수의 비저항은 시간이 지남에 따라 감소한다. 비저항이 2.5  $\text{M}\Omega\text{cm}$ 인 탈이온수를 사용하여 가공하면 30분 후에 약 1  $\text{M}\Omega\text{cm}$ 로 비저항이 감소한다. 가공에 사용하지 않고 공기 중에 둔 탈이온수의 비저항은 2.5  $\text{M}\Omega\text{cm}$ 에서 30분 경과 후 2  $\text{M}\Omega\text{cm}$ 로 감소하였다. 탈이온수의 비저항이 변하면 가공 특성이 달라지지만 실험적으로 0.5-2.5  $\text{M}\Omega\text{cm}$ 의 범위에서는 가공 간극이 일정하다는 것을 확인하였다. 하지만 비저항이 0.01  $\text{M}\Omega\text{cm}$ 로 매우 작아지면 길이 1000  $\mu\text{m}$ , 깊이 105  $\mu\text{m}$ 의 미세 홈 가공 시 가공 간극은 약 50  $\mu\text{m}$ 로 매우 넓어진다. 탈이온수의 비저항이 낮아지면 전해 작용이 증가하여 가공 간극이 넓어지게 되는 것이다.

비저항이 낮아지면 공구 전극에 증착이 일어나게 된다. 비저항이 낮아질수록 공구 전극에 증착되는 양은 늘어난다. Fig. 4는 증착이 일어난 공구 전극 사진과 증착된 성분 물질을 EDS(Energy Disperse Spectroscopy)로 분석한 결과를 나타내고 있다. Fig. 4(b)에서 알 수 있는 바와 같이 공구 전극에 증착된 물질은 시편인 Stainless steel 성분과 같은 Fe, Cr, Ni 이 주 성분이다. 그리고 산소도 검출되었는데 이것은 전해작용의 결과로 공구 전극에 Fe, Cr, Ni 등이 산소와 함께 증착된 것이다. 증착된 물질은 초음파 진동을 가하면 쉽게 제거되며, 실험적으로 전기가 통하지 않는다는 것을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) SEM image of the tool electrode after micro EDM and (b) EDS analysis of the tool electrode.

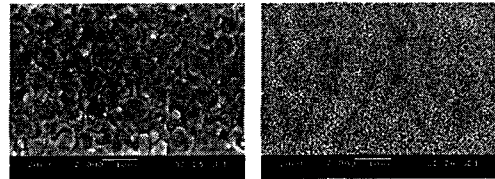
### 3.2 절연액에 따른 가공 특성

절연액으로 등유를 사용하는 경우와 탈이온수를 사용하는 경우의 가공 특성을 Table 1에 나타내었다. 길이 1000  $\mu\text{m}$ , 깊이 105  $\mu\text{m}$ 의 미세 홈을 가공하여 가공 특성을 비교하였다. 탈이온수의 경우는 가공 전 비저항이 2.5  $\text{M}\Omega\text{cm}$ 인 조건으로 실험하였다. 최대 이송 속도(Max. feedrate)는 전극이 이송하면서 가공을 할 때 단락이 발생하지 않고 가공이 원활이 진행되는 최대 속도를 나타낸다.

탈이온수를 사용하는 경우, 등유보다 약 3배 정도 빠른 이송 속도를 얻을 수 있는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한 전극 마모량은 약 90% 이상 줄어드는 것을 볼 수 있다. 탈이온수를 절연액으로 사용하면 가공 시 방전 가공뿐만 아니라 전해 가공도 동시에 일어나기 때문에 가공 속도도 빨라지고 전극 마모도 줄어들기 때문이다. 하지만 전해 가공 때문에 가공 간극은 늘어나는 단점이 있다.

Table 1 Machining characteristics according to dielectric fluids

Dielectric fluid	Deionized water		
	Kerosene		
Tool dia.	59 $\mu\text{m}$	55 $\mu\text{m}$	55 $\mu\text{m}$
Voltage	100 V	100 V	40 V
Capacitance	400 pF	400 pF	400 pF
Max. feedrate	10 $\mu\text{m/s}$	32 $\mu\text{m/s}$	25 $\mu\text{m/s}$
Gap	5 $\mu\text{m}$	14.7 $\mu\text{m}$	8.5 $\mu\text{m}$
Wear	93 $\mu\text{m}$	3.5 $\mu\text{m}$	4.5 $\mu\text{m}$



(a)

(b)

Fig. 5 Surface profiles of grooves machined by micro EDM using (a) kerosene (80 V, 400 pF) and (b) deionized water (40 V, 400 pF, 2.5  $\text{M}\Omega\text{cm}$ )

Fig. 5는 등유를 절연액으로 사용한 방전 가공과 탈이온수를 절연액으로 사용한 경우의 가공 표면을 나타내고 있다. 가공 조건은 Fig. 5(a)의 경우는 등유를 사용했고, 80 V, 400 pF의 조건에서 가공하였다. Fig. 5(b)의 경우 절연액으로 탈이온수를 사용했고, 비저항은 2.5  $\text{M}\Omega\text{cm}$ 이다. 전압은 40V, 축전용량은 400 pF이다. 등유를 사용한 경우는 일반적인 방전 가공과 같이 재료가 용착되어 표면이 방전흔(crater)으로 구성되어있다. 반면 탈이온수를 사용한 경우는 가공 표면에 방전흔은 보이지 않고 1-2  $\mu\text{m}$  크기의 미세한 구멍(pit)이 관찰된다. 이것은 방전과 함께 전해 작용이 일어나면서 표면에 방전흔이 남지 않고 전해에 의해 가공이 되면서 미세한 구멍들이 형성된 것으로 생각된다. 가공 표면 거칠기를 보기 위하여 표면 조

도 측정기(Talysurf, Taylor-Hobson, Co.)를 이용하여 표면 조도를 측정하였다. 등유를 사용한 경우는  $R_a = 0.12 \mu\text{m}$ 이고 탈이온수를 사용한 경우는  $R_a = 0.08 \mu\text{m}$ 이었다. 따라서 표면 조도는 탈이온수를 사용한 경우가 등유보다 더 좋다.

### 3.3 미세 반구 형상 가공

미세 방전 가공에서는 전극의 마모 때문에 정밀한 3차원 형상을 가공하기 위해서는 전극의 마모를 보정해주어야 한다. 하지만 탈이온수를 사용하면 전극의 마모를 상당히 줄일 수 있기 때문에 전극 마모 보정량도 작아지고 가공 속도가 빠르기 때문에 가공 시간을 줄일 수 있는 등, 가공 효율성을 높일 수 있다. 이를 비교하기 위하여 등유와 탈이온수를 사용하여 미세 반구 형상을 가공하였다(Fig. 6).

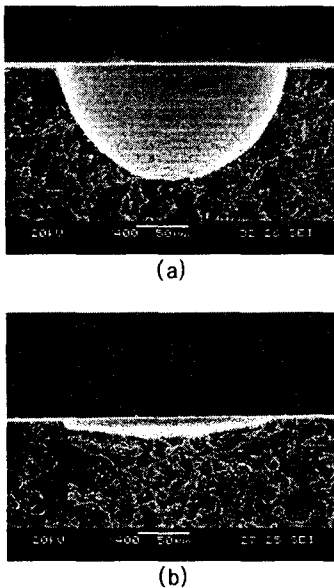


Fig. 6 Hemispherical shape machined by micro EDM milling using (a) deionized water (40 V, 400 pF, 2.5 MΩcm) and (b) kerosene (100 V, 400 pF)

Table 2 Machining conditions

Dielectric fluid	Kerosene	Deionized water
Voltage	100 V	40 V
Capacitance	400 pF	400 pF
Tool dia.	23 $\mu\text{m}$	23 $\mu\text{m}$
Feedrate	7 $\mu\text{m/s}$	15 $\mu\text{m/s}$

가공 조건은 Table 2에 나타내었다. 탈이온수의 경우는 가공 조건으로 가공 간극이 가장 작고, 가공이 안정적인 조건을 사용하였다. 두 경우 모두 공통적으로 23  $\mu\text{m}$ 의 직경의 톨 전극을 사용하였고, 반지름이 100  $\mu\text{m}$  인 미세 반구를 가공하였다. Fig. 6(a)에 나타난 것과 같이 탈이

온수를 사용한 경우는 공구 전극의 마모량이 적어 반구 형상에 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 가로 방향의 반구 직경이 222  $\mu\text{m}$ 로 가공 간극이 11  $\mu\text{m}$ 이다. 깊이 방향의 가공 깊이는 109  $\mu\text{m}$ 이다. 반면 Fig. 6(b)의 등유를 사용한 경우는 공구 전극의 마모량이 많아 깊이 방향으로 가공이 거의 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 가로 방향의 반구 직경은 204  $\mu\text{m}$ 로 가공 간극은 2  $\mu\text{m}$ 이다. 하지만 깊이 방향으로 가공된 깊이는 17.5  $\mu\text{m}$ 로 전극의 마모량이 매우 많았음을 알 수 있다.

탈이온수를 절연액으로 사용하면 미세 구조물 가공에 매우 효율적이라는 것을 알 수 있다. 따라서 탈이온수를 사용한 미세 방전 밀링은 미세 금형 가공이나 연료전지 채널 가공 등의 응용분야에 적용될 수 있을 것이다.

### 4. 결론

본 논문에서는 탈이온수를 절연액으로 사용한 미세 방전 밀링의 가공 특성을 살펴보고, 등유를 사용하는 경우와 비교하였다. 실험을 통해 얻은 적절한 조건으로부터 미세 반구 형상을 가공하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 미세 방전 가공에서 탈이온수를 절연액으로 사용하는 경우에 전압, 축전 용량이 커지면 가공 간극이 커진다. 비저항은 낮을수록 가공 간극이 커진다.
2. 탈이온수를 사용하는 경우에 전해 작용으로 가공 표면에 미세한 구멍(pit)이 생긴다. 표면 조도는 등유를 사용하는 경우보다 좋아진다.
3. 탈이온수를 사용하면 등유에 비해 가공 간극은 크지만, 가공 속도는 빠르고 공구 전극 마모량은 적다. 따라서 방전 밀링으로 미세 형상을 가공할 때 탈이온수를 사용하면 등유를 사용하는 경우보다 가공 효율성이 높다.

### References

- [1] T. Masuzawa, M. Fujimoto and K. Kobayashi, 1985. "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining", Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 1, 431-434
- [2] Z. Y. Yu, T. Masuzawa and M. Fujino, 1997. "Micro-EDM for Three-Dimensional Cavities - Development of Uniform Wear Method-", Annals of the CIRP, Vol. 47, No. 1, 169-172
- [3] T. Masuzawa, J. Tsukanoto and M. Fujimoto, 1989. "Drilling of Deep Microholes by EDM", Annals of the CIRP, Vol. 38, 195-198
- [4] S. L. Chen, B. H. Yan and F. Y. Huang, 1999. "Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, 107-111
- [5] P. J. Cho, 2002. "Characteristics of RC circuit with Transistor in Micro-EDM", Ph.D dissertation, Seoul National University