

# 방전가공을 이용한 미세구멍 가공 시 절연액, 축전용량과 초음파 부가에 따른 가공특성

서동우\*, 박민수#, 이상민\*\*, 주종남\*\*\*

## Machining Characteristics of Micro-EDMed Holes According to Dielectric Fluid, Capacitance and Ultrasonic Vibrations

Dong Woo Seo\*, Min Soo Park#, Sang Min Yi\*\* and Chong Nam Chu\*\*\*

### ABSTRACT

When micro holes are machined by EDM, machining characteristics of machined holes are changed according to the machining conditions. Typical machining conditions are the kind of dielectric fluids, capacitance and ultrasonic vibrations. They influence electrode wear, machining time, radial clearance and taper angle. In this paper, machined holes whose depths are 300, 500, 1000  $\mu\text{m}$  are observed for each machining conditions. Using deionized water as a dielectric fluid makes electrode wear small, machining time short, radial clearance large and taper angle small. High capacitance makes electrode wear high. Ultrasonic vibrations make electrode wear large, machining time short, radial clearance small and taper angle small. From the results of experiments, the optimal machining conditions were obtained to machine highly qualified micro holes.

**Key Words** : Micro-EDM (미세 방전 가공), Deionized Water (탈이온수), Capacitance (축전용량), Ultrasonic Vibrations (초음파 진동), Radial Clearance (반경방향간극)

### 1. 서론

최근 산업 제품의 소형화 추세에 따라 미세 형상 가공 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 광학기기, 의료기기, 전자 부품 등의 여러 산업 분야에서 미세 구멍을 가공할 수 있는 기술이 요구되고 있다. 이러한 추세에 더불어 마이크로 초음파 가공, 마이크로 드릴링, 마이크로 방전 가공

등의 미세 구멍을 가공할 수 있는 여러 방법들이 개발되었다. 이러한 가공 방법 중 마이크로 방전 가공은 전도성을 가진 광범위한 재료에 대한 가공이 가능하고 수십 분의 1  $\mu\text{m}$  정도의 가공정밀도로 가공할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 전극의 마모나 높은 세장비를 가지는 미세 구멍 가공의 한계 등의 문제점도 가지고 있다. 방전 가공 과정에서 전극의 마모를 감소시키고 가공을 원

접수일: 2007년 7월 26일; 게재승인일: 2007년 10월 1일

\* 한국감정원 대전지점

# 교신저자: 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail: pminsoo@prema.snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147

\*\* 삼성전자 LCD 총괄 Mobile Display 개발팀

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

활히 하기 위해서, Kagaya<sup>2</sup>는 탈이온수를 절연액으로 사용하였다. 그리고 Yeo<sup>3</sup>와 Sheu<sup>4</sup>는 공작물에 초음파를 부가하여 가공 속도와 세장비를 높였다. 그러나 현재까지 서로 다른 절연액의 사용과 초음파의 부가에 따른 구멍 가공 특성의 변화 경향에 대한 연구는 부족했다.

본 논문에서는 축전 용량, 절연액의 종류, 초음파의 부가와 같은 가공 조건의 변화에 따른 가공된 구멍의 특성을 살펴보았다. 3 가지 두께의 시편에 각각의 구멍을 가공함으로써 두께에 따른 가공 특성과 가공에 유리한 조건을 찾아보았다.

## 2. 마이크로 방전 가공

### 2.1 실험 장치

실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 X, Y축 이송 스테이지 위에 시편을 장착할 수 있도록 했으며 전극의 주축을 Z축으로 설정하였다. Z축은 두 개의 V홈 위에 올려서 진직도를 유지하였고, Z축의 외경에 장착된 맨드릴(mandrel)과 주축 모터를 벨트로 연결하여 Z축을 회전시켰다. X, Y축의 이송 스테이지는 Parker Automation사의 315082AT 모델을 사용하였으며, Z축은 404200XR 모델을 사용하였다. 각 이송축은 스테핑 모터로 동작하며 1카운트당 0.1 μm의 분해능을 갖는 리니어 인코더를 사용하여 위치를 제어하였다. 주축 회전용 모터는 Animatics사의 Smartmotor 2315D DC brushless type을 사용하였다. 절연액으로는 등유(kerosene)와 탈이온수(deionized water)를 사용하였다. 등유는 수조에 일정량을 공급한 후 사용하였고, 탈이온수는 Millipore사의 Simplicity Ultrapure Water System을 사용하여 공급하였다. 그리고 초음파 진동자를 수조의 아래쪽에 부착하여 초음파 진동을 절연액을 통해 간접적으로 부가하였다.<sup>5</sup> 초음파 진동이 시편과 이송 스테이지에 미치는 영향을 최소화 하기 위해 초음파 진동자, 이송 스테이지와 시편 사이에 나일론(Nylon) 재질의 구조물을 설치하였다. 이렇게 절연액에 초음파 진동을 부가하는 방법은 시편이나 전극에 직접 초음파 진동을 부가하는 방법에 비해 시스템이 간단하고 제어가 쉽다는 장점이 있다. 방전회로는 0.1 μs 이내의 펄스 폭과 상대적으로 높은 전류 피크치를 얻을 수 있어 저에너지, 고주파 방전이 요구되는 마이크로 방전회로에 적합한 RC 방전회

로를 사용하였다.

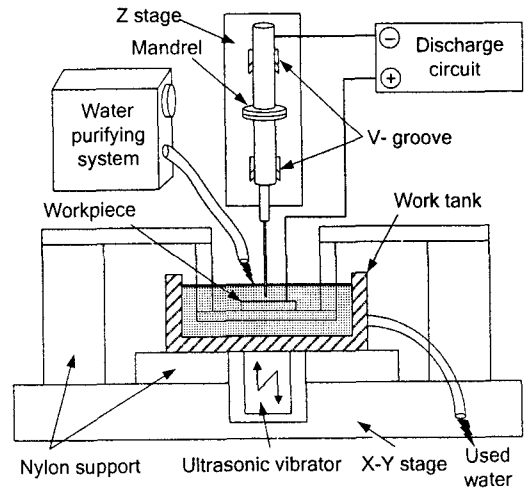


Fig. 1 Schematic diagram of micro-EDM system

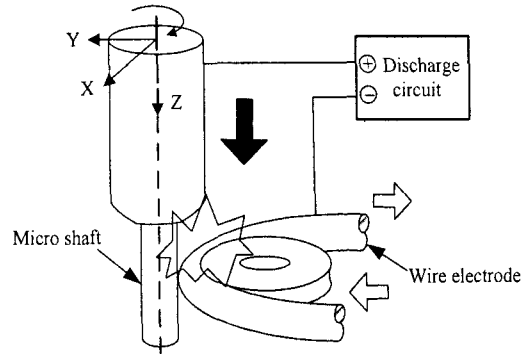


Fig. 2 Machining an electrode by WEDM

### 2.2 와이어 방전가공을 이용한 미세전극의 제작

WEDM (wire electro-discharge machining)은 와이어를 공구로 사용하여 전극을 미세하게 가공하는 방법이다.<sup>6</sup> 와이어를 일정 속도로 주행 시키기 때문에 와이어 방전 가공 중에는 공구의 마모로 인하여 발생하는 전극의 형상 왜곡이 없어 보다 정밀한 미세 전극을 가공할 수 있다. Fig. 2는 와이어 방전 가공을 통해 전극을 가공하는 과정을 보여준다. 그림과 같이 전극의 회전 축을 와이어 가이드의 가공 위치까지 이송시킨 후 Z축을 조금씩 이송시키면서 전극과 와이어 사이에 방전을 일으

킴으로써 미세 전극을 가공할 수 있다.

### 2.3 마이크로 방전가공을 이용한 미세 구멍의 가공

와이어 방전가공을 통해 제작된 미세 전극을 사용해 스테인리스 스틸 시편(304 stainless steel)에 미세 구멍을 가공하였다. 미세 구멍을 가공할 때 방전 회로로부터의 방전 전류를 측정하여 공구와 시편 사이의 접촉(short circuit) 여부를 판단하였다. 이를 바탕으로 Z 축의 전, 후진 여부를 결정하고 이송속도를 조절하였다. 전극의 이송속도는 가공 상황에 따라 변하게 설정하였다. 가공이 원활히 이루어지면 속도를 빠르게 해서 가공 시간을 줄였고, 가공 상에 문제가 생겼을 때에는 속도를 줄여서 가공의 안정성을 늘리도록 하였다. 이와 같이 전극의 이송 속도를 변화시킴으로써 특히 탈이온수를 절연액으로 사용하고 초음파를 부가하였을 때에 가공 시간을 상당히 줄일 수 있었다.<sup>7</sup>

### 3. 마이크로 방전가공을 이용한 구멍 가공 특성

#### 3.1 실험 조건

와이어 방전가공으로 전극을 제작하여 지름이 50 ~ 55  $\mu\text{m}$  사이의 값을 갖도록 하였다. 세 가지 두께의 시편에 등유와 비저항치가 다른 세 종류의 탈이온수 등의 4 가지 조건의 절연액을 사용하여 가공을 하였다. 각 경우에 대해 축전용량을 3 단계로 변화시켰고 초음파를 부가한 경우와 부가하지 않은 경우에 대해서 실험하였다. 시편의 두께는 300, 500, 1000  $\mu\text{m}$  의 세 가지 경우를 이용하였고, 절연액은 등유와 비저항치가 1.5, 2.0, 5.5  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$  인 탈이온수를 사용하였으며, 축전용량은 500, 1000, 3000 pF 의 세 단계로 설정하였다. 전극의 이송 속도는 가공 상황에 따라 적절하게 변경시켰다. 오차를 줄이고 결과값의 신뢰성을 높이기 위해 동일한 조건의 대해 3 번씩 실험을 수행하여 평균값을 사용하였다. 일반적인 조건은 Table 1 에 나타냈다.

#### 3.2 가공 조건에 따른 전극 마모량의 변화

절연액의 종류를 변경하고 축전용량을 다르게 설정하고 초음파의 부가 여부를 바꾸면서 300, 500, 1000  $\mu\text{m}$  의 시편에 관통구멍을 가공한 후에 전극의 마모량을 측정 한 결과가 Fig. 3, Fig. 4 와 Fig. 5 에

제시되어 있다. 초음파를 부가하였을 때가 일반적으로 초음파를 부가하지 않은 경우보다 30 ~ 50 % 만큼 마모량이 증가하였고, 절연액으로 등유를 사용한 경우가 탈이온수를 사용한 경우보다 마모량이 두 배 이상 된다. 등유를 절연액으로 사용하면 가공 중에 탄화물이 생겨서 가공면에 흡착되어 가공을 방해하기 때문이다. 그리고 구멍의 깊이가 증가할수록 마모량은 큰 폭으로 증가한다. 이는 가공 깊이가 깊어질수록 가공이 불안정해지기 때문이다. 또한 축전용량이 증가함에 따라서 전극의 마모량이 증가하였다. 이는 가공 과정 중에 단발

Table 1 Machining conditions

Electrode	Material	WC
	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	50 ~ 55
Workpiece	Material	304 SS
	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	300, 500, 1000
Dielectric fluid	Deionized water(1.5, 2.0, 5.5 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ), Kerosene	
Ultrasonic vibration	Frequency	40 kHz
Electric condition	Applied voltage	80 V
	Capacitance (pF)	500, 1000, 3000
Feed rate	variable (0.5 ~ 50 $\mu\text{m}/\text{sec}$ )	

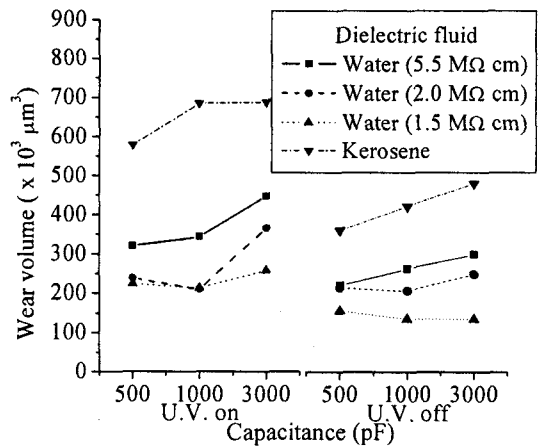


Fig. 3 Wear volume of the tool according to the change of dielectric fluid, capacitance and ultrasonic vibrations (hole depth: 300  $\mu\text{m}$ )

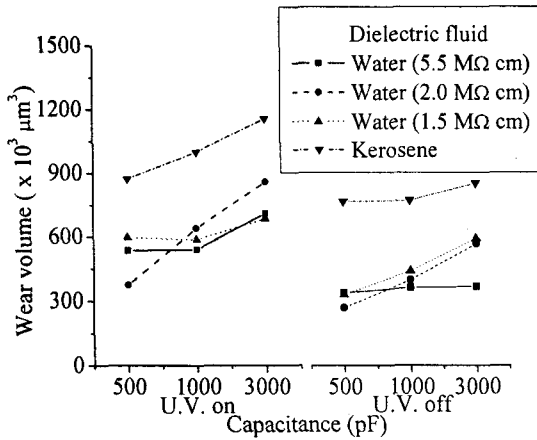


Fig. 4 Wear volume of the tool according to the change of dielectric fluid, capacitance and ultrasonic vibrations (hole depth: 500  $\mu\text{m}$ )

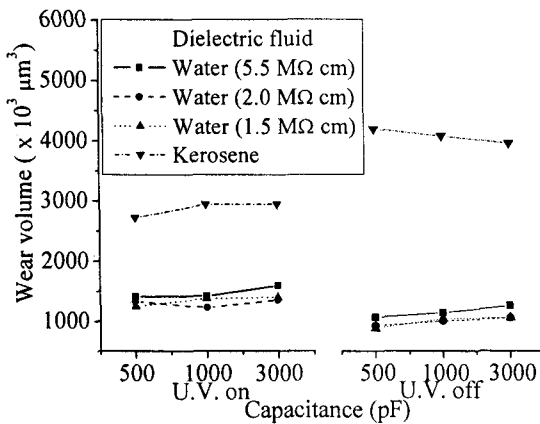


Fig. 5 Wear volume of the tool according to the change of dielectric fluid, capacitance and ultrasonic vibrations (hole depth: 1000  $\mu\text{m}$ )

방전 에너지가 커짐에 따라, 가공물의 제거량도 커지지만 전극의 마모량 또한 커지기 때문이다. 등유를 사용하고 초음파를 부가하지 않은 조건에서는 가공이 불안정해져서 구멍의 관통이 쉽지 않고, 전극의 마모량이 상당히 커진다. 일반적으로도 이러한 조건에서는 세장비 10 이상인 구멍을 가공하는 것이 쉽지 않은 것으로 알려져 있다.<sup>5</sup>

### 3.3 가공 조건에 따른 가공 시간의 변화

Fig. 6 은 절연액과 초음파의 부가 여부에 따른

가공 시간의 변화를 보여준다. 축전 용량에 따른 가공 시간의 변화가 크지 않기 때문에 평균값을 취하여 그래프를 작성하였다. 가공 시 초음파를 부가하면 가공 시간을 70 ~ 80 % 정도 단축할 수 있다. 등유를 절연액으로 사용하였을 때에는 탄화물이 생성되고 이에 의해 가공이 어려워진다. 그러므로 탈이온수를 사용하였을 때가 가공 속도가 증가한다. 초음파를 부가하지 않았을 때에는 탈이온수의 비저항치가 낮아짐에 따라 가공 속도가 조금씩 빨라짐을 알 수 있는데 초음파를 부가하였을 때에는 비저항치가 변화하더라도 가공 속도에는 별 차이가 없다. 깊이 1000  $\mu\text{m}$  의 구멍을 가공할 때 초음파를 부가하지 않고 등유를 절연액으로 사용한 경우는 구멍이 관통되지 않았기 때문에 그래프에 표기하지 않았다. 깊이 1000  $\mu\text{m}$  의 구멍을 가공할 때에는 탈이온수의 비저항치가 낮아짐에 따라 가공 시간도 감소하였다. 탈이온수의 비저항치가 낮아짐에 따라 전해 가공의 발생이 증가하게 되므로 가공 속도가 빨라지게 된다. 가공이 원활한 깊이 300  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  의 구멍을 가공할 때에는 이러한 현상이 큰 영향을 주지 못하지만, 가공이 어려운 깊이 1000  $\mu\text{m}$  의 구멍을 가공할 때에는 영향을 주게 된다. 그래서 1000  $\mu\text{m}$  깊이의 구멍을 가공할 때에는 비저항치가 낮아질수록 가공 시간이 줄어든다.

### 3.4 가공 조건에 따른 반경 방향 간극의 변화

Fig. 7 은 절연액과 초음파의 부가 여부에 따른 반경 방향의 간극의 변화를 나타낸다. 탈이온수를 사용한 경우에는 등유를 사용한 경우보다 반경 방향 간극이 절반 이하로 줄어들게 된다. 탈이온수는 등유에 비해 절연강도가 매우 낮기 때문에 탈이온수를 절연액으로 사용한 경우 등유를 사용했을 때보다 반경 방향 간극이 넓어진다. 또한 초음파를 부가하여 가공 하면 반경 방향 간극이 작아지게 된다. 초음파를 부가함으로써 가공 시간이 줄어들게 되고 이로 인해 전극과 구멍의 옆면 사이에 발생하는 이차방전의 영향이 줄어들기 때문이다. 깊이 500  $\mu\text{m}$  와 1000  $\mu\text{m}$  인 구멍을 가공하였을 때는 탈이온수의 비저항치가 낮아지면 반경 방향 간극이 조금 늘어나게 된다. 비저항치가 낮아지면 전해 현상의 발생이 증가하기 때문에 반경 방향 간극이 늘어나게 되기 때문이다. 그러나 이

러한 현상은 반경 방향 간극에 크게 영향을 주지 못함을 그래프에서 알 수 있다.

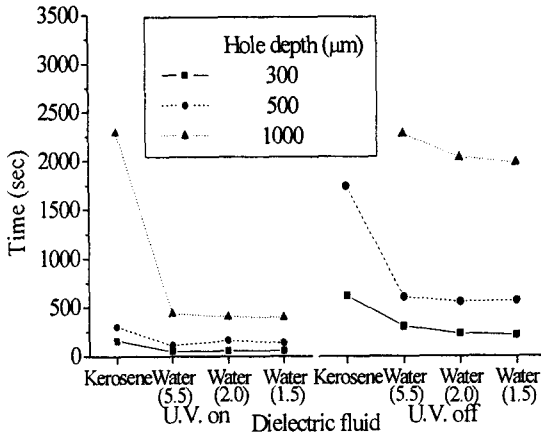


Fig. 6 Machining time according to the change of dielectric fluid and ultrasonic vibrations

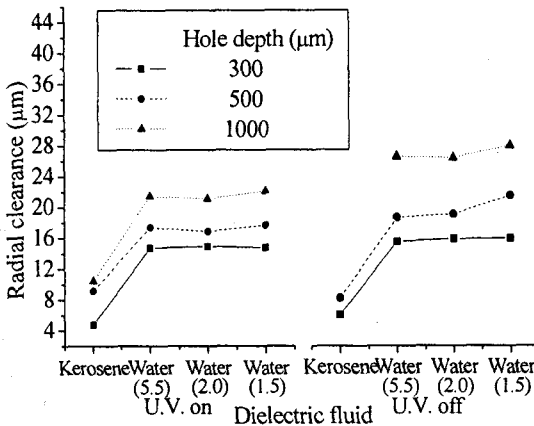


Fig. 7 Average clearance of the entrance and exit according to the change of dielectric fluid and ultrasonic vibrations

### 3.5 가공 조건에 따른 테이퍼 각도의 변화

입구와 출구의 반지름의 차이를 구멍의 깊이로 나눈 후 아크탄젠트 (arctan)를 취한 값으로 테이퍼 각도를 정의한다. 입구와 출구의 직경차이가 크다면 테이퍼 각도가 커진다. Fig. 8 은 절연액의 종류와 초음파의 부가 여부에 따른 테이퍼 각도를 나타낸다. 테이퍼 각도는 절연액으로 등유를 사용하

였을 때보다 탈이온수를 사용하였을 때가 작은 값을 가진다. 등유를 사용하면 가공 시간이 증가해서 이차 방전에 의해 입구 쪽 직경이 커지기 때문에 테이퍼 각도가 증가한다. 초음파를 부가하면 테이퍼 각도가 작아진다. 이는 가공 시간이 짧기 때문이다. 깊이 1000 μm 의 구멍을 가공한 결과에서 초음파의 부가 여부가 테이퍼 각도에 미치는 영향이 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 이차 방전으로 인한 직경의 증가가 테이퍼 각도에 미치는 영향이 감소하기 때문이다.

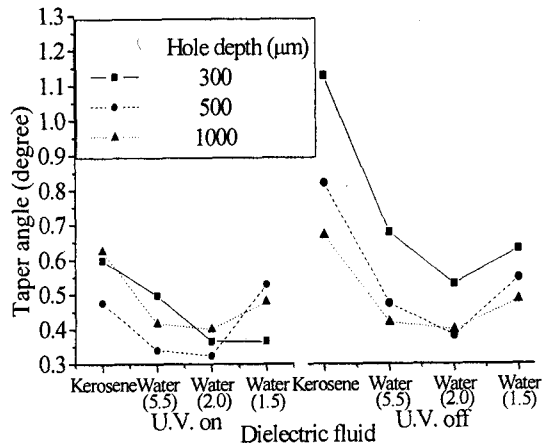


Fig. 8 Taper angle according to the change of dielectric fluid and ultrasonic vibrations

### 3.6 구멍의 깊이에 따른 가공 특성

앞에서 각각의 가공 특성에 관해 정리해 보았는데 이번에는 구멍의 깊이를 기준으로 각각의 가공 특성을 분류하였다. Fig. 9 는 구멍의 깊이에 따른 전극의 마모량을 나타낸다. 구멍의 깊이가 깊고 절연액의 비저항치가 높아질수록 마모량은 증가하였다. 등유를 절연액으로 사용한 경우 탈이온수를 절연액으로 사용할 때보다 마모량이 2 배 이상 되었다. 절연액으로 등유를 사용했을 때 세장비가 낮은 경우 초음파를 부가한 경우 전극의 마모량이 약간 증가하는 현상을 보였지만 세장비가 높아지면 초음파를 부가하지 않은 경우의 전극 마모량이 상당히 커진다. Fig. 10 은 구멍의 깊이에 따른 가공 시간을 나타낸다. 초음파를 부가하는 경우 가공 시간이 크게 줄어들었고 탈이온수를 절연액으로 사용한 경우 가공 시간이 줄어들었다.

탈이온수의 비저항치에 의한 가공 시간의 변화는 크지 않았다. Fig. 11 은 구멍의 깊이에 따른 반경 방향 간극을 나타낸다. 절연액으로 탈이온수를 사용하면 반경 방향 간극이 커진다. 탈이온수의 비저항치가 낮아지면 반경 방향 간극이 약간 증가하는 경향을 보인다. 그리고 초음파를 부가하면 가공 시간이 짧아지므로 반경 방향 간극이 줄어든다. Fig. 12 는 구멍의 깊이에 따른 테이퍼 각도의 변화를 나타낸다. 절연액으로 탈이온수를 사용하면 테이퍼 각도가 작아지고, 초음파를 부가한 경우에도 테이퍼 각도가 작아지게 된다. 초음파를 부가한 경우 깊이 500  $\mu\text{m}$  보다 깊이 1000  $\mu\text{m}$  의 구멍을 가공할 때의 테이퍼 각도가 증가했는데 이는 가공시간 증

가에 따른 입구 직경 증가가 영향을 주었기 때문으로 보인다. 초음파를 부가하지 않은 경우 테이퍼 각도가 증가하지 않았는데, 이는 입구 직경 증가가 테이퍼 각도의 변화에 미치는 영향이 상대적으로 작았기 때문으로 보인다.

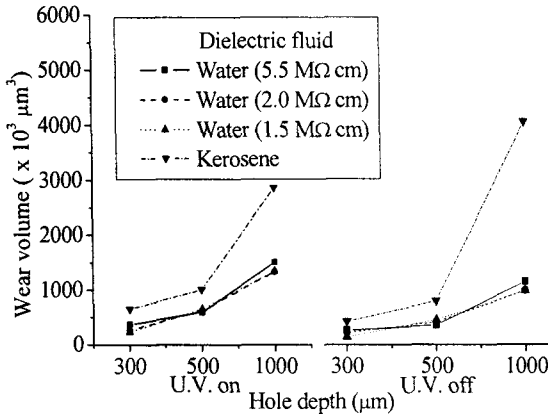


Fig. 9 Wear volume of the tool according to the change of hole depth, dielectric fluid and ultrasonic vibrations

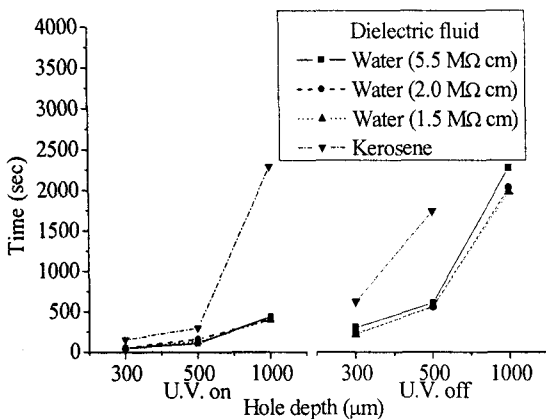


Fig. 10 Machining time according to the change of hole depth, dielectric fluid and ultrasonic vibrations

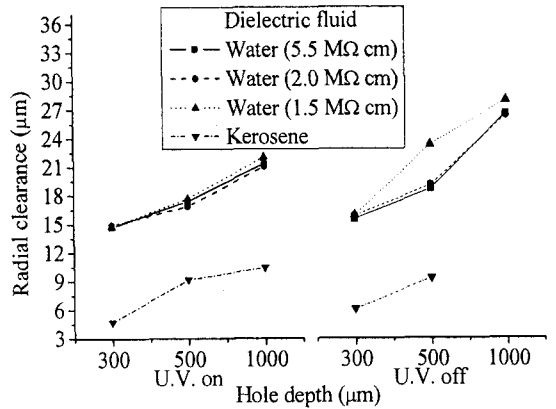


Fig. 11 Radial clearance according to the change of hole depth, dielectric fluid and ultrasonic vibrations

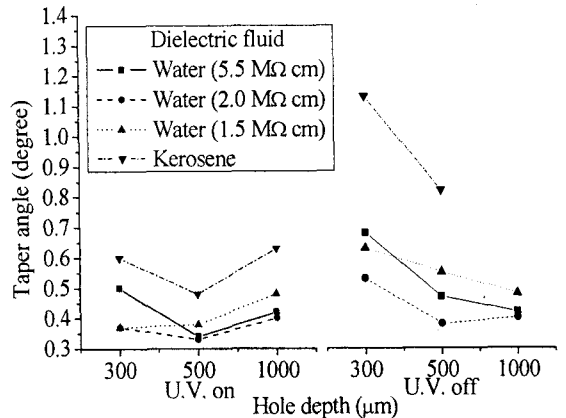


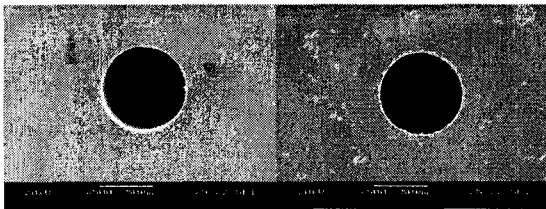
Fig. 12 Taper angle according to the change of hole depth, dielectric fluid and ultrasonic vibrations

#### 4. 최적 가공 조건의 선정

실험을 통해 얻어진 결과들로 최적 가공 조건을 선정하기 위해서 Table 2 를 제작하였다. 각 조건에 따라 행을 분리하였고, 가공 특성에 따라 열을 분리하였다. 가공 조건 별로 특성이 가장 우수한 경우를 기준값 100 으로 설정하여 상대적인 값

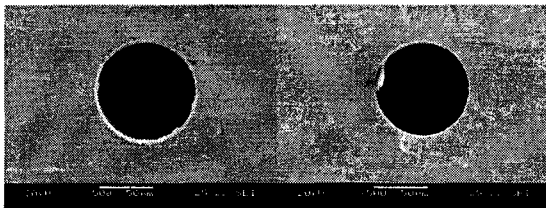
Table 2 Summary of machining characteristics

Fluid	Thick- ness Proper- ty U.V.	300 μm				500 μm				1000 μm			
		Wear	Time	Clear- ance	Taper	Wear	Time	Clear- ance	Taper	Wear	Time	Clear- ance	Taper
Kerosene	on	21.9	31.9	100	61.7	35.2	37.3	100	68.8	34.4	17.3	100	63.5
	off	33.9	8	78	32.7	44.7	6.4	98.5	40.2	24.3	0	0	0
Water(5.5 MΩ·cm)	on	38.4	100	32.1	74	59.7	100	52.8	97.1	65.6	91.1	48.7	95.2
	off	54.7	16.4	30.4	54.4	100	18.5	49.1	70.2	85.9	17.4	39.3	95.2
Water(2.0 MΩ·cm)	on	52.4	93.4	31.6	100	57	69	54.4	100	73.9	98.1	49.5	100
	off	63.8	21.6	29.8	69.8	86.6	20	48.1	86.8	99.8	19.5	39.6	100
Water(1.5 MΩ·cm)	on	61.3	89.5	32	100	54.2	82.3	51.8	86.8	73.6	100	47.2	83.3
	off	100	23	29.7	58.7	78.4	19.7	39.4	60	100	20	37.3	83.3



(a) φ 82 μm hole entrance (b) φ 78 μm hole exit

Fig. 13 SEM images of machined hole (dielectric fluid: deionized water of 2.0 MΩ·cm, capacitance: 500pF, ultrasonic vibration induced, workpiece thickness: 500 μm)



(a) φ 94 μm hole entrance (b) φ 88 μm hole exit

Fig. 14 SEM images of machined hole (dielectric fluid: deionized water of 2.0 MΩ·cm, capacitance: 500pF, ultrasonic vibration induced, workpiece thickness: 1000 μm)

을 표기하였다. 각 항목의 가중치를 같게 주어서 최적 조건을 선정하였는데 그 결과 2.0 MΩ·cm 의 비저항치를 갖는 탈이온수를 절연액으로 사용하고,

축전 용량은 500 pF 로 설정하고 초음파를 부가하였을 때가 최적 조건으로 선정되었다. 이에 선정된 조건 하에서 지름이 55 μm 인 전극을 사용하여 구멍 가공을 수행하였다. Fig. 13, Fig. 14 와 같이 다양한 두께에 대해서 우수한 품질의 관통 구멍을 얻을 수 있었다.

### 5. 결론

본 논문에서는 미세 방전 가공을 이용한 구멍 가공 시 절연액의 종류, 축전 용량, 가공 깊이와 초음파의 부가 여부에 따른 전극의 마모량, 가공 시간, 반경 방향 간극과 테이퍼 각도의 변화에 관한 특성을 살펴보았다. 축전 용량의 증가로 전극의 마모량이 증가하였지만 가공 시간이나 반경 방향 간극, 테이퍼 형상에는 큰 차이가 없었다. 초음파를 부가하게 되면 전극의 마모량은 증가하지만 가공 시간 상에서 큰 이득을 볼 수 있었고, 이로 인해 반경 방향 간극도 줄어들었으며 테이퍼 각도도 줄어들었다. 절연액으로 탈이온수를 사용한 경우에는 등유를 사용한 경우보다 전극의 마모량이 줄어들었고 가공 시간도 짧았으며 테이퍼 각도도 작았지만 반경 방향 간극은 증가하였다. 구멍 가공 시 실험 결과를 이용하면 적당한 가공 조건을 찾을 수 있다. 직경이 70 ~ 80 μm 이상인 구멍은 탈이온수를 사용하는 편이 마모량이나 가공 시간 면에서 상당한 이득을 볼 수 있다. 그러나 그 이하의 직경을 가진 구멍은 탈이온수를 사용해 가공

하기가 어렵다. 가공 시간의 단축이 중요한 요소라면 탈이온수를 사용하고 초음파를 부가한 상태에서 가공하면 좋다. 탈이온수는 비저항치를 유지하기 쉬운  $2.0 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$  을 사용하면 된다. 특히 깊이  $1000 \mu\text{m}$  이상의 깊은 구멍을 가공할 때에는 초음파를 부가한 상태에서 탈이온수를 절연액으로 사용하여야 한다. 등유를 절연액으로 사용하게 되면 전극의 마모량이 상당히 증가하게 되고, 초음파를 사용하지 않는다면 가공 시간 많이 증가해 비효율적이기 때문이다. 마지막으로 전극의 마모량, 가공 시간, 반경 방향 간극과 테이퍼 각도에 같은 가중치를 두고 가장 좋은 가공 조건을 선정하였다. 그 결과  $2.0 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$  의 탈이온수를 절연액으로 사용하고 가공 시에 초음파를 부가하여 가공하며  $500 \text{ pF}$  의 축전용량을 적용한 경우가 구멍의 깊이에 관계 없이 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

dielectric fluid,” Proceedings of the KSPE Spring Annual Meeting, pp. 244, 2004.

#### 참고문헌

1. Cho, P. J., Yi, S. M., Choi, D. G. and Chu, C. N., “Characteristics of RC Circuit with Transistor Micro-EDM,” Journal of the KSPE, Vol. 21, No. 12, pp. 44-51, 2004.
2. Kagaya, K., Oishi, Y. and Yada, K., “Micro-electrodischarge machining using water as a working fluid-I: micro-hole drilling,” Precision Eng., Vol. 8, No. 3, pp. 157-162, 1986.
3. Yeo, S. H. and Tan, L. K., “Effects of Ultrasonic Vibrations in Micro Electro-discharge Machining of Micro Holes,” Journal of Micromech. Microeng., Vol. 9, Issue 4, pp. 345-352, 1999.
4. Sheu, D. Y., Masuzawa, T. and Fujino, M., “Machining of Deep Microholes by EDM,” International Conference on Precision Engineering, pp. 593-596, 1997.
5. Je, S. W., “Deep hole micro EDM with Ultrasonic Vibration,” Ph.D. dissertation, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University 2003.
6. Masuzawa, T., Jujino, M. and Kobayashi, K., “Wire Electro-discharge Grinding for Micro Machining,” Annals of the CIRP, Vol. 34, pp. 431-434, 1985.
7. Seo, D. W., Yi, S. M. and Chu, C. N., “Drilling of deep micro holes by EDM using deionized water as