

# 깊은 구멍 가공을 위한 가공액 초음파 가진 미세 방전가공

제성욱\*, 김덕환#, 이해성\*\*, 주종남\*\*\*

## Micro EDM with Ultrasonic Work Fluid Vibration for Deep Hole Machining

Sung Uk Je\*, Duck Whan Kim#, Hae Sung Lee\*\* and Chong Nam Chu\*\*\*

### ABSTRACT

Microholes with high aspect ratio are required in microstructures. Among various methods for producing the microhole, micro electrical discharge machining (MEDM) is very effective and useful process. But, it is difficult to machine the high aspect ratio holes below 100  $\mu\text{m}$  in diameter because machining condition becomes unstable due to bad removal of debris at deep hole. In this paper, ultrasonic vibration is applied to MEDM work fluid to make a high aspect ratio micro hole. It is shown that the vibration is effective in circulating the debris and increasing the machining rate. As a result, produced was a micro hole with 92  $\mu\text{m}$  entrance diameter, 81  $\mu\text{m}$  exit diameter and aspect ratio 23.

**Key Words :** Micro electrical discharge machining (미세 방전 가공), Ultrasonic vibration (초음파 진동), Aspect ratio (세장비)

### 1. 서론

오늘날 미세구멍은 잉크젯 프린터 헤드 노즐 (inkjet printer head nozzles), 광섬유 커넥터 (optical fiber connectors), 방사노즐 (spinneret), 가스배출 오리피스 (gas escapement orifices), 미세 섬유 사출 노즐 (micro fiber injection nozzles), 반도체 검사용 조리개 (apertures), 서보 제어용 밸브, 위성통신용 부품 등에 널리 이용되고 있다. 이러한 미세구멍을 가공하는 방법으로는 마이크로 방전가공을 비롯하여, 마이크로 초음파가공, 마이크로 드릴링, 레이저 빔 가공, 마이크로 편칭 등이 있다.

이러한 가공 방법 중에서 마이크로 방전가공은 비록 전극소모, 낮은 가공속도, 전도성 재질만의 가공 등의 약점을 가지고 있으나 가공물의 경도에 상관없이 일반적인 가공 시 비교적 높은 세장비 8 정도의 미세구멍을 버 없이 (burr-free) 뛰어난 가공정밀도로 가공할 수 있는 장점을 지니고 있어 가장 활용도가 높다. 그러나 전극 직경이 작아짐에 따라 마모가 심해지고 가공 깊이가 깊어짐에 따라 전극과 가공물 사이에 기포나 가공 부스러기들이 잔류하여 방전을 불가능하게 만들기 때문에 8 이상의 높은 세장비의 구멍 가공이 어렵다. 이 문제점들을 해결하기 위해 Masuzawa<sup>1,2</sup> 등

\*\*\* 접수일: 2005 년 1 월 17 일; 게재승인일: 2005 년 5 월 13 일

\* LG 전자 생산기술연구원

# 교신저자: 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail duckzzang@chollian.net Tel. (02) 880-7147

\*\* 서울대학교 대학원 정밀기계설계공동연구소

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

은 수평형 방전가공기를 이용하여 가공 부스러기를 원활하게 배출할 수 있는 다양한 전극 형상을 통해 세장비가 약 10 이고 직경이 50  $\mu\text{m}$  인 깊은 미세구멍을 가공하였으며, 이후 추가적인 축전용량 (additional capacitance)를 이용하여 가공 중에 발생하는 가공 부스러기를 원활하게 배출하는 방법도 제안하였다. 또한 Allen<sup>3</sup> 등은 전극 소모와 가공속도를 높이기 위해, 레이저를 이용하여 구멍을 낸 후 방전가공으로 후가공을 하는 방법을 제안하였고, 이를 이용하여 Kubota<sup>4</sup> 등은 초경합금에 높은 세장비를 가진 구멍을 가공하였다. Zhao<sup>5</sup> 등은 가공 부스러기의 효과적인 배출을 위해 전극에 노치 (notch)를 주어서 가공하고 또한 그 전극에 초음파 진동을 가하여 세장비가 약 15 인 직경 200  $\mu\text{m}$  의 구멍을 가공하였다. 그리고 Yeo<sup>6</sup> 등은 공작물에 초음파 진동을 가하여 높은 세장비의 막힌 구멍을 방전 가공하였다. 하지만, 위와 같이 초음파 진동을 전극이나 공작물에 직접 줄 경우 전극 이송 축 구성이 복잡해지고 전극의 마모와 가공물의 중량이 변함에 따라 초음파 전달 특성이 변하는 문제점이 있다.

따라서 본 논문에서는 일반적인 방전가공법으로는 가공이 불가능한 세장비가 높은 미세 구멍을 가공하기 위하여 가공액에 초음파를 가할 수 있는 마이크로 방전가공기를 개발하였고, 이를 통해 초음파 부가 방전가공의 특성과 그에 따른 세장비 향상을 살펴보았다.

## 2. 초음파 부가 마이크로 방전가공 시스템

### 2.1 마이크로 방전가공 시스템

Fig. 1 은 3 축 이송 자유도와 주축 회전 자유도를 가지고 있는 가공기 사진이다. 이송축은 Parker Automation 의 제품이며, 리니어 엔코더를 사용하여 0.1  $\mu\text{m}/\text{count}$  의 분해능을 가지고 있다. X, Y 축은 가공물의 형상 제어, Z 축은 전극과 가공물사이의 간극 제어의 역할을 한다. 스피들은 만드렐을 이용하였다. 주축과 V 흡이 닿는 지점은 세라믹으로 처리하여 열변형과 마모를 방지하였고, 공구 장착 오차를 줄이기 위해 주축의 끝 단은 세라믹 가이드 (guide)를 사용하였다. 이로 해서 주축 카트리지를 재장착 하더라도 회전 오차를 최소한으로 줄일 수 있다.

방전회로는 RC 방전회로를 사용하였으며 포토

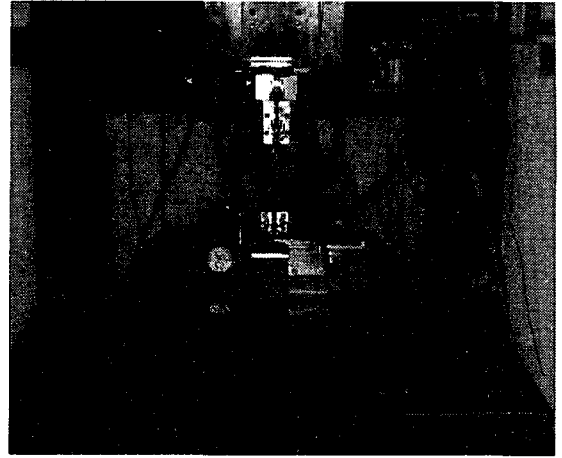


Fig. 1 Photograph of MEDM system

모스릴레이를 사용하여 축전용량을 제어할 수 있도록 하였다. 또한 Masuzawa<sup>7</sup>가 제안한 와이어 방전 가공을 이용하여 전극 회전 중심과 구멍 가공시의 회전 중심이 동일한 전극을 제작함으로써 장착 오차를 줄였다. 실험에 사용한 실험조건은 Table 1 에 정리하였다.

### 2.2. 초음파 부가 시스템

Fig. 2 는 초음파 진동자가 부착된 가공조와 현가 지그의 개략도를 보여주고 있다. 진동자는 공진 주파수 40 (kHz)를 가지고 있는 BLT 방식의 전액 진동자 (NTK 4050,  $\phi$  45 mm)를 사용하였고 304 SS 로 제작된 가공조 아래 면에 전도성 에폭시를 이용하여 접착하였다. 진동자를 구동하기 위한 발진기로는 자력 발진기 (self-oscillator) 회로를 사용하였으며, 구조물의 공진주파수에 맞게 회로를 꾸몄다. XY 스테이지 면으로 초음파 진동이 전달되

Table 1 Machining conditions

Applied voltage ( $V_E$ )	100 V
Charging resistance (R)	1 k $\Omega$
Capacitance (C)	400 pF
Programmed feedrate	2 - 5 $\mu\text{m}/\text{s}$
Electrode material	Tungsten carbide (WC)
Electrode diameter	$\phi$ 30 $\mu\text{m}$ , $\phi$ 50 $\mu\text{m}$
Workpiece	304 stainless steel
Dielectric fluid	Kerosene

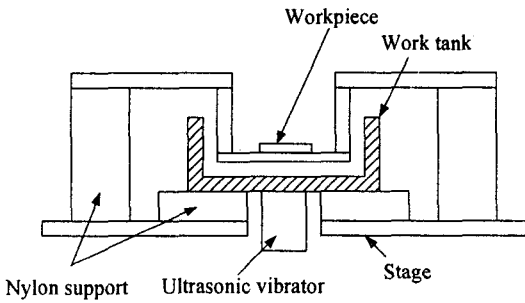


Fig. 2 Schematic diagram of the ultrasonic vibration system

는 것을 막기 위해서 음향 에너지의 감쇠가 큰 나이론 재질로 스테이지와 가공조 사이를 연결하였다. 또한 가공물이 가공조에 직접적으로 닿아있지 않고 가공액 중간에 떠 있게 하기 위해서 외부에서 교각 형태로 가공물 고정 구조를 구성하였다. 가공액을 통해서만 음향 에너지가 전달되도록 교각도 음향 에너지의 감쇠가 큰 나이론 재질로 제작하였다.

초음파 진동자가 가공조의 바닥에 부착되어 있고 가공조 안의 액체의 높이가 초음파 파형의 파장,  $\lambda$ 일 때 가공조 내의 음압 (sound pressure)과 매질의 변위를 Fig. 3 에 나타내었다. 이 때, 초음파 파형을 평면파로 가정하면, 음압  $P$  와 매질의 변위  $u$  는 1 차원 파동방정식으로 표현될 수 있다.<sup>8</sup>  $x$  를 바닥 면에서부터의 거리,  $t$  를 시간이라 하면, 음압과 매질의 변위는 각각 식 (1)과 (2)로 표현된다.

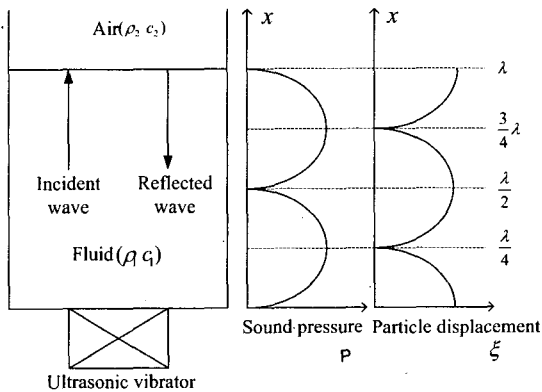


Fig. 3 Sound pressure and particle displacement distribution in the ultrasonic tank

$$P = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (1)$$

$$u = \frac{P}{\rho c} = \frac{1}{Z_0} Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (2)$$

여기서  $w$  는 진동수이며,  $k$  는 위치에 따른 상 변화율이다. 또한  $Z_0$  는 고유 음향 임피던스,  $A$  는 음압 진동의 진폭을 의미한다. 음압 진동의 진폭은 음향강도  $I$  를 이용하여 구할 수 있다. 이 시스템에서 액에 전달되는 음향강도는  $4000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ 으로 측정되었으며 이를 식 (3)에 대입하면 입자 진동의 진폭  $\zeta$ , 최대 속도  $u_{\max}$ , 최대 가속도  $a_{\max}$  를 구할 수 있다. 측정된 음향강도를 대입해서 이를 구하면 최대 변위는  $0.35 \text{ (}\mu\text{m)}$ , 최대 입자 속도  $0.0893 \text{ (m/s)}$ , 최대 입자 가속도는  $22400 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 이 된다.

$$I = P_{rms} \cdot V_{rms} = \rho c \cdot V_{rms}^2$$

$$P_{rms} = \frac{(P_+)_MAX}{\sqrt{2}}, \quad V_{rms} = \frac{(u_+)_MAX}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

$$a = 2\pi f \cdot u_+ = (2\pi f)^2 \cdot \zeta$$

초음파가 바닥에서 액면을 향해서 전달될 때 액면에서의 음압의 반사율  $R_p$  는 식 (4)과 같이 주어진다.

$$R_p = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (4)$$

$\rho_1, c_1$  는 액체의 밀도와 액체 내의 음속을,  $\rho_2, c_2$  는 공기의 밀도와 공기 내의 음속을 표시한다.  $\rho_1$  은  $810 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ,  $c_1$  은  $1301 \text{ (m/s)}$  이며,  $\rho_2$  는  $1.21 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ,  $c_2$  는  $343 \text{ (m/s)}$  이다. 각 값을 대입하여 공기와 백등유 (Kerosene) 사이의 음압 반사율  $R_p$  를 계산하면  $-0.999$  의 값을 가진다. 이는 초음파가 액면에서 99.9 % 역위상으로 반사되어 가공조 내에서 정재파 (standing wave)가 형성되는 것을 의미한다. 이때 음압이 최대가 되는 지점은 식 (5)와 같다.

$$x = \frac{\lambda}{4} (2n + 1), \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (5)$$

백등유 가공액 내에서 전달되는 진동 주파수가  $40 \text{ kHz}$  인 초음파의 파장  $\lambda$  는  $33 \text{ mm}$  이므로

최대 압력 지점은 가공조 바닥에서부터 8 mm, 24 mm 떨어진 곳이다. 따라서 가공액 깊이는 정제과 형성에 유리하도록  $\lambda/2$ , 즉 17 mm 가 되도록 했으며 가공물은 가공조 바닥에서 8 mm 지점에 위치하도록 교각 구조를 설계하였다.

### 3. 일반 방전가공과 초음파 부가 마이크로 방전가공 특성 비교

일반 RC 방전 시스템에서 백등유를 사용하여 직경 50  $\mu\text{m}$  이하의 공구로 가공할 수 있는 세장비는 8 정도이다.<sup>9</sup> 세장비 8 이상 증가하게 되면 가공 중 발생된 부스러기가 제대로 배출되지 않아 전극의 마모만 발생한다. 서론에서 전술했듯이 이를 개선하기 위해 많은 시도가 행해졌다. Zhao<sup>5</sup> 등은 노치 전극을 이용하고 전극에 초음파를 부가하여 세장비 15 정도의 구멍을 가공하였다. 여기서는 이 이상인 세장비 20 이상의 구멍을 가공하기 위해 가공액에 초음파 진동을 부가하는 마이크로 방전 가공기를 제작하였다. 이를 이용해서 우선 일반 RC 방전과 초음파 부가 RC 방전의 특성을 비교하였다. 전극으로는 와이어 방전으로 가공한 직경 30  $\mu\text{m}$  의 텅스텐 카바이드를 사용하였고, 축전용량은 400 pF, 설정 이송속도 2  $\mu\text{m/s}$  로 가공하였다. 가공 깊이 또는 가공 시간에 따른 가공특성을 알아보기 위해 전극을 총 1000  $\mu\text{m}$  이송하는 동안 200  $\mu\text{m}$  마다 전극 마모량, 구멍의 직경, 가공시간을 측정하였다.

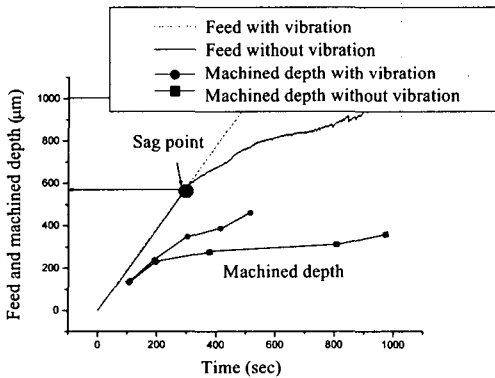


Fig. 4 The electrode feed and machined depth with and without ultrasonic vibration vs. time (2  $\mu\text{m}/\text{sec}$ , 30  $\mu\text{m}$  electrode in diameter)

### 3.1 시간에 따른 전극의 이송

일반 RC 방전과 초음파 부가 RC 방전을 이용해서 가공할 때 전극을 1000  $\mu\text{m}$  까지 이송한 경우의 이송 그래프와 이송량에서 마모량을 뺀 값을 Fig. 4 에 나타내었다. 그래프를 보면 초음파 부가와 상관없이 전극 이송 거리 600  $\mu\text{m}$  까지는 설정 이송속도와 실제 가공속도에 차이가 없다. 이는 가공된 깊이가 작아서 가공 중 발생된 부스러기가 방전 폭발력과 전극의 회전만으로도 방전면으로부터 충분히 배출이 되고 있기 때문이다. 하지만, 일반 RC 방전의 경우 전극 이송 거리 600  $\mu\text{m}$  지점을 지나면서부터는 설정 이송 속도를 따라 가지 못하고 있다. 본 논문에서는 이 지점을 처짐 점 (sag point) 이라 하기로 한다. 이처럼 처짐점이 발생하는 이유는 방전면에 존재하는 가공 부스러기로 인한 지속적인 단락으로 전극이 전진과 후퇴를 거듭하기 때문이다. 그 결과 처짐 점을 지나면서 설정 이송 속도를 유지하지 못하고 가공 상태가 불안정해지게 된다. 처짐 점은 전극의 직경과 가공조건에 따라 발생하는 지점이 달라진다. 초음파 부가 방전가공에서 1000  $\mu\text{m}$  내에서는 이러한 처짐 점을 발견할 수 없다.

### 3.2 전극 마모율 (Wear ratio)

가공된 깊이에 대한 전극 마모 길이를 전극 마모율 (wear ratio)로 정의하고 이 마모율을 일반 RC 방전과 초음파 부가 RC 방전에 있어서 살펴 보고자 한다.

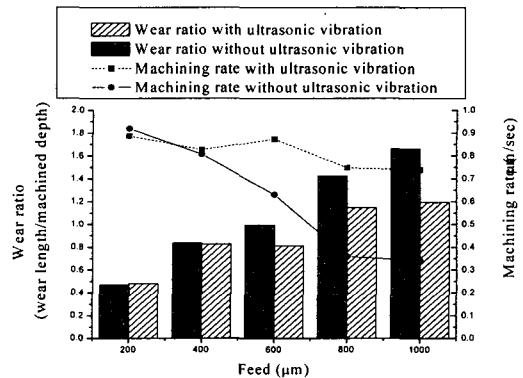


Fig. 5 Wear ratio and machining rate with and without ultrasonic vibration vs. feed (2  $\mu\text{m}/\text{sec}$ , 30  $\mu\text{m}$  electrode in diameter)

주어진 이송에서 일반 RC 방전과 초음파 부가 RC 방전으로 가공했을 경우에 각 단계에서의 마모율을 Fig. 5 에 나타내었다. 본 실험 조건에서 일반 RC 방전은 처짐 점인 전극 이송 거리 600  $\mu\text{m}$  지점을 지나면서부터 전극 마모율이 1.5 정도까지 증가한다. 이는 가공 부스러기에 의한 지속적인 단락이 전극의 마모를 증가시킨다는 것을 보여준다. 전극 이송 거리가 1000  $\mu\text{m}$  일 때 단위 가공깊이 당 전극 마모를 나타내는 마모율은 초음파 부가 RC 방전이 일반 RC 방전에 비해 35 % 정도 더 작다.

### 3.3 가공 속도 (Machining rate)

축전용량 400 pF, 설정 이송 속도 2  $\mu\text{m/s}$  로 가공했을 경우 이송 거리 별 평균 가공 속도를 Fig. 5 에 나타내었다. 여기서 가공 속도는 구멍의 깊이 증가 평균속도를 의미하며 가공된 깊이를 총 가공 시간으로 나누었다. 초음파 부가 RC 방전은 이송이 진행되면서도 설정된 이송속도의 70 % 수준을 유지하면서 가공속도가 줄어들지 않는다. 이에 반해 일반 RC 방전은 지속적으로 가공속도가 떨어지게 되는 것을 볼 수 있다. 이는 일반 RC 방전 가공의 경우에 깊이가 깊어짐에 따라서 지속적인 단락에 의해 전극의 마모가 늘어나고 이로 인해 가공속도가 낮아지기 때문이다.

### 3.4 반경방향 간극 (Radial clearance)

방전은 전극과 가공물 사이에 미세한 간격에서 절연이 파괴되면서 발생하므로 전극과 구멍 사이

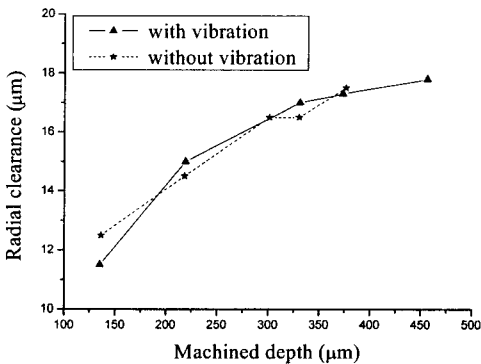
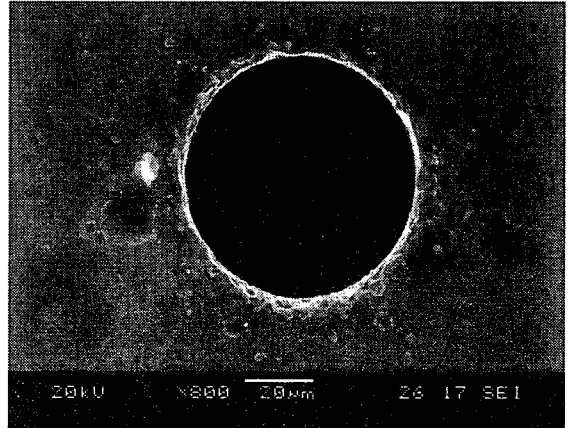
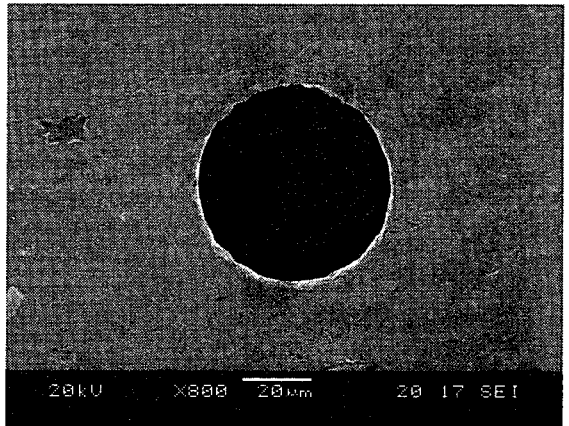


Fig. 6 Radial clearance with and without vibration vs. machined depth (2  $\mu\text{m/sec}$ , 30  $\mu\text{m}$  electrode in diameter)



(a) Entrance ( $\phi$  68  $\mu\text{m}$ )

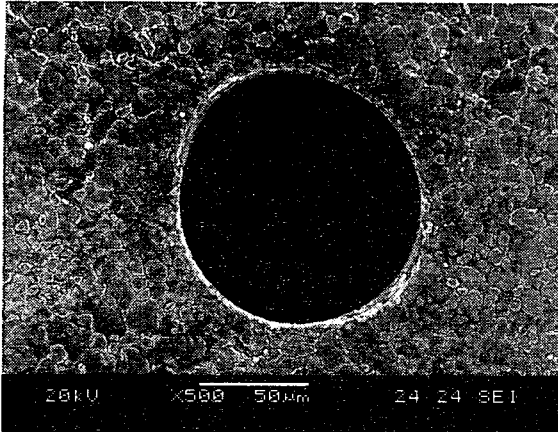


(b) Exit ( $\phi$  54  $\mu\text{m}$ )

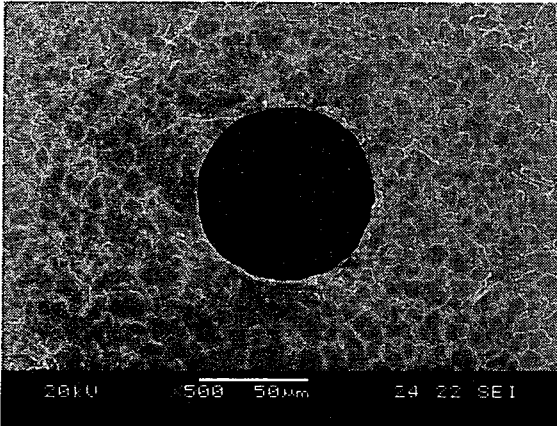
Fig. 7 Machined micro hole (1000  $\mu\text{m}$  depth, and 2  $\mu\text{m/sec}$  feed-rate)

에는 간극이 반드시 존재하게 된다. 이때 미세 전극 직경과 가공된 구멍 직경의 차이를 반경 방향 간극으로 정의하며 가공된 구멍의 직경에서 미세 전극 직경을 뺀 값을 2로 나눠 계산 하였다. 동일 직경의 전극을 사용하면 반경 방향 간극의 경향은 결국 가공된 구멍 직경의 경향을 나타낸다.

가공된 구멍의 품질을 판단하는 기준으로 구멍 입구의 반경방향 간극을 보았다. 세장비가 큰 구멍에서 반경 방향 간극의 크기는 구멍의 품질을 결정하는 중요한 특성으로 이는 세장비가 큰 구멍에서 입구의 직경이 출구의 직경보다 크게 되어 테이퍼가 생기는 현상이 더 심화되기 때문이다.



(a) Entrance ( $\phi$  92  $\mu$ m)



(b) Exit ( $\phi$  81  $\mu$ m)

Fig. 8 Machined micro hole (2000  $\mu$ m depth, and 3  $\mu$ m/sec feed-rate)

가공 깊이에 따른 구멍 입구의 반경 방향 간극을 Fig. 6 에 나타내었다. 이 그래프에서 보듯이 반경 방향 간극은 일반 RC 방전과 초음파 부가 RC 방전이 비슷한 경향을 보이고 크기에도 큰 차이가 없다. 따라서 같은 깊이까지 가공되었을 경우, 가공된 구멍의 품질은 차이가 없다고 볼 수 있다.

### 3.5 초음파 부가 마이크로 방전가공 특성

여러 실험을 통해 초음파 부가 마이크로 방전 가공은 일반 방전 가공에 비해 전극 마모율이 줄어들고 깊은 구멍 가공 시에 가공속도가 향상됨을 알 수 있었다. 또한 구멍 입구의 반경 방향 간극에는 차이가 없어 구멍의 테이퍼 각도에는 차이

가 없음을 알 수 있었다. 따라서 초음파 부가 마이크로 방전 가공이 일반 마이크로 방전 가공에 비해 세장비 20 이상의 구멍 가공에 유리함을 알 수 있다.

## 4. 초음파 부가 마이크로 방전가공 검증

### 4.1 높은 세장비의 미세 구멍 가공

초음파 부가 마이크로 방전가공의 검증을 위해 직경 30  $\mu$ m 와 50  $\mu$ m 의 전극을 가공하여 각각 두께 1000  $\mu$ m, 2000  $\mu$ m 의 304 스테인리스 강판에 구멍 가공을 하였다. Fig. 7 은 직경 30  $\mu$ m 의 전극으로 1000  $\mu$ m 시편에 구멍 가공을 한 사진이다. 반경방향 간극으로 인해 입구 직경이 68  $\mu$ m, 출구 직경이 54  $\mu$ m 인 구멍을 가공하였다. 이는 입출구 평균 직경으로 세장비를 계산 했을 때 대략 16 정도의 세장비이다. 그러나 직경 30  $\mu$ m 의 전극으로 2000  $\mu$ m 두께의 304 스테인리스 강판에는 구멍 관통에 실패하였다. Fig. 8 은 직경 50  $\mu$ m 의 전극으로 2000  $\mu$ m 의 시편에 구멍 가공을 한 사진이다. 입구 직경이 92  $\mu$ m, 출구 직경이 81  $\mu$ m 인 구멍을 가공하였다. 역시 평균 직경으로 세장비를 계산해보면 이 구멍의 세장비는 23 정도이다.

### 4.2 전극 직경에 따른 마모율

초음파를 부가하더라도 직경 30  $\mu$ m 의 전극으로 2000  $\mu$ m 두께의 시편에 구멍 가공에 실패하였다. 이를 고찰하기 위해 두께 2000  $\mu$ m 인 304 스테인레스 강판에 초음파 부가 미세 구멍 가공 시 전극에 따른 마모율을 알아보았다. Fig. 9 는 가공

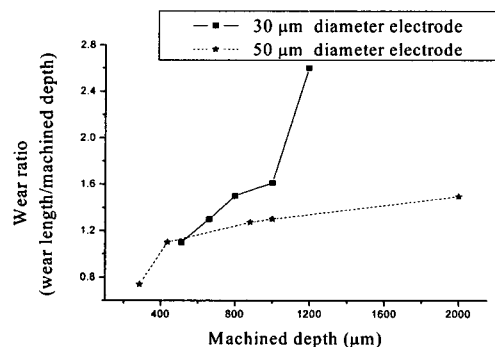


Fig. 9 Wear ratio of electrode of 30 and 50  $\mu$ m diameter vs. machined depth (2  $\mu$ m/sec feed-rate)

된 깊이에 따른 직경 30  $\mu\text{m}$  와 50  $\mu\text{m}$  전극의 마모율 변화 그래프이다. 직경 50  $\mu\text{m}$  의 전극은 가공 깊이가 증가함에 따라서 마모율이 완만하게 증가하지만 직경 30  $\mu\text{m}$  전극은 가공 깊이가 늘어감에 따라 급격히 마모율이 증가함을 보여준다. 이는 깊이가 1000  $\mu\text{m}$  이상의 영역에서는 가공은 일어나지 않고 전극의 마모만 일어나는 것으로 전극의 직경이 작을 경우 반경방향 간극이 작아져서 가공부스러기의 배출이 용이하지 않아 방전이 불안정해지는 깊이가 낮아지기 때문이다. 따라서 30  $\mu\text{m}$  직경의 공구를 이용하여 구멍 가공을 할 경우에 초음파를 부가함으로써 세장비를 두 배 정도 증가시켰으나 그 이상에서는 직경에 따른 마모율의 증가를 줄이지 못 하였다. 따라서 최대 세장비의 구멍은 직경 50  $\mu\text{m}$  전극을 이용했을 때 얻을 수 있었다. 직경 30  $\mu\text{m}$  전극을 이용해서 더 나은 결과를 얻기 위해서는 텅스텐 카바이드보다 마모율이 작은 재질을 이용하여 휘어짐이 없는 전극을 가공하는 것이 필요하며, 또한 공구에 노치를 주어 가공한 후 가공액 초음파 부가 미세 방전 가공기와 함께 이용한다면 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

## 5. 결론

일반 방전 가공에서의 한계인 세장비 8 이상의 구멍을 가공하기 위해 가공액 초음파 부가 미세 방전 가공기를 제작하였다. 이를 통해 가공액 초음파 가진 미세 방전가공의 특성을 살펴보았다. 가공액 초음파 가진 미세 방전가공은 일반 방전 가공에 비해 전극 마모율이 줄어들고 깊은 구멍 가공시에 가공속도가 향상 됨을 알 수 있었다. 또한 구멍 입구의 반경 방향 간극에는 차이가 없어 구멍의 테이퍼 각도에는 차이가 없음을 알 수 있었다. 따라서 가공액 초음파 가진 미세 방전 가공이 일반 마이크로 방전 가공에 비해 깊은 구멍 가공에 유리함을 알 수 있었다. 또한 실제 세장비 23 의 구멍을 가공함으로써 초음파 부가 마이크로 방전 가공의 성능을 검증하였다.

## 참고문헌

1. Masuzawa, T., Tsukamoto, J. and Fujino, M., "Drilling of deep microholes by EDM," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 195-198, 1989.

2. Masuzawa, T., Kuo, C. L. and Fujino, M., "Drilling of deep microholes by EDM using additional capacity," *Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 275-276, 1990.

3. Allen, D. M., Huang, S. X., "The reduction of tool wear and machining time for the micro-electro-discharge machining of micro-holes by using copper vapor laser machining as a roughing process," *International Journal of Electrical Machining*, Vol. 2, pp. 9-11, 1997.

4. Kubota, S., Uno, Y., Kuribayashi, H. and Yokomizo, S., "Fine deep boring of carbide by EDM with YAG laser," *Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers*, Vol. 35., pp. 19-25, 2001.

5. Zhao, W., Wang, Z., Di, S., Chi, G. and Wei, H., "Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, pp. 101-106, 2002.

6. Yeo, S. H., Tan, L. K., "Effects of ultrasonic vibrations in micro electro-discharge machining of microholes," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 9., pp. 345-352, 1999.

7. Masuzawa, T., Fujino, M. and Kobayashi, K., "Wire electro-discharge grinding for micro machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, pp. 431-424, 1985.

8. Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders, J. V., "Fundamental of acoustics," *John Wiley & Sons*, Fourth ed., 1980.

9. Cho, P. J., Yi, S. M., Choi, D. K. and Chu, C.N., "Characteristics of RC circuit with transistor in Micro-EDM," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 12, pp. 44-51, 2004.