

# 방전 가공을 이용한 미세 구멍 가공 시 발생하는 테이퍼 형상의 제어

김동준\*, 이상민#, 이영수\*\*, 주종남\*\*\*

## Control of Taper Shape in Micro-Hole Machining by Micro-EDM

Dong Jun Kim\*, Sang Min Yi#, Young Soo Lee\*\* and Chong Nam Chu\*\*\*

### ABSTRACT

When a micro hole is machined by EDM with a cylindrical electrode, the hole diameter is different at the inlet and the outlet of the micro hole. The taper shape of the micro hole is caused by not only wear of the electrode but the eroded particles. The eroded particles cause secondary discharge during machining the micro hole. As a result, the diameter of the inlet becomes larger than that of the outlet. In this paper, a new method is proposed to reduce the difference in diameter between the inlet and the outlet of the hole. Observed was that the feed depth and machining time affect the formation of taper shape. On this experimental basis, ultrasonic vibration was applied to reduce machining time, and capacitance was changed during machining to use the difference in discharging energy of different capacitances. Using the proposed method, a straight micro-hole was fabricated.

**Key Words** : Micro-EDM (미세 방전 가공), Taper shape (테이퍼 형상), Ultrasonic vibration (초음파 진동), Capacitance change (축전 용량 변화)

### 1. 서론

최근 산업 제품의 소형화 추세에 따라 미세 형상 가공 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 광학기기, 의료기기, 디젤엔진 부품 등 여러 산업 분야에서 미세 구멍을 가공할 수 있는 기술이 요구되고 있다. 이러한 추세와 관련해 미세 구멍을 가공할 수 있는 여러 방법들이 개발되었다. 마이크로 초음파 가공, 마이크로 드릴링, 레이저 빔 가공, 마이크로 펀칭, 마이크로 방전 가공 등이 그것이다.

이러한 방법들 중 마이크로 방전 가공은 비접촉식 가공 방법으로 전도성 재료에 대해 경도에 상관없이 가공이 가능하고 다른 미세 가공 방법들에 비해 높은 정밀도로 미세 구멍을 가공할 수 있다는 장점이 있다.<sup>1</sup> 그러나 전극의 마모나 높은 세장비 (aspect ratio)를 가지는 미세 구멍 가공의 한계 등 해결해야 할 문제점도 가지고 있다. 또한, 마이크로 방전 가공을 이용하여 미세 구멍을 가공할 때 가공 후 구멍의 입구와 출구에서 직경의 차이가 발생하는 것은 잘 알려진 문제점이다. 이러한 문

접수일: 2004년 10월 4일; 게재승인일: 2005년 1월 21일

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

# 교신저자: 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail air9@dreamwiz.com Tel. (02) 880-7147

\*\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

제점을 해결하기 위해 Kagawa<sup>2</sup>는 단계별로 직경이 변하는 미세 공구(steped electrode)를 사용하여 입구와 출구의 직경이 일정한 구멍을 가공하였다. 그러나 이러한 미세 공구는 가공하는데 시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라 공구의 길이 방향과 반경 방향의 마모 때문에 한 번 가공된 공구로는 한 개의 구멍밖에 가공하지 못한다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 단순한 원기둥 형상의 공구를 사용하여 미세 구멍의 테이퍼를 줄이는 연구를 수행하였다. 단순한 원기둥 형상의 공구를 사용하면 하나의 공구로써 여러 개의 구멍을 가공할 수 있을 뿐만 아니라 공구의 가공과정도 단순화 할 수 있어 가공 시간을 줄일 수 있는 장점도 있다.

## 2. 마이크로 방전 가공

### 2.1 실험 장치

실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 X, Y 축 이송 스테이지 위에 시편을 장착할 수 있는 수조를 위치시켰으며, Z 축 이송 스테이지 위에 만드렐 방식의 카트리지 주축(mandrel type cartridge main shaft)을 장착할 수 있는 V 홈을 위치시켰다. 전극을 만드렐 방식의 카트리지에 장착한 후 카트리지의 주축을 V 홈에 위치시켰다. 주축의 외경 부위에 위치한 만드렐과 주축 회전용 모터를 벨트로 연결하여 전극을 회전시켰다. X, Y 축의 이송 스테이지는 Parker Automation 사의

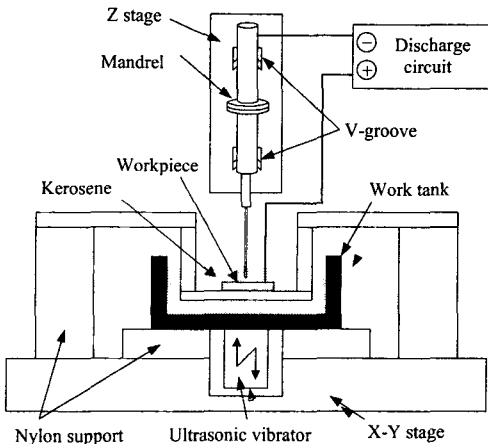


Fig. 1 Schematic diagram of micro-EDM system

315082AT 모델을 사용하였으며, Z 축은 404200XR 모델을 사용하였다. 각각의 이송축은 스텝 모터로 동작하며 1 카운트당 0.1  $\mu\text{m}$ 의 분해능을 갖는 리니어 인코더를 사용하여 위치를 제어하였다. 주축 회전용 모터는 Animatics 사의 Smartmotor 2315D DC brushless type 을 사용하였다. 절연액으로는 등유(kerosene)를 사용하였으며 초음파 진동자를 수조의 아래쪽에 부착하여 초음파 진동을 절연액을 통해 간접적으로 부가하였다. 진동자는 공진 주파수 40 kHz 를 가지고 있는 BLT 방식의 전액 진동자(NTK 4050)를 사용하였으며, 진동자를 구동하기 위해 자력 발진기(self-oscillator) 회로를 사용하였다. 초음파 진동이 시편과 이송 스테이지에 미치는 영향을 최소화 하기 위해 초음파 진동자와 이송 스테이지, 이송 스테이지와 시편 사이에 나일론(Nylon) 재질의 구조물로서 진동 절연하였다.<sup>3</sup> 이렇게 절연액에 초음파 진동을 부가하는 방법은 시편이나 전극에 직접 초음파 진동을 부가하는 방법<sup>4, 5</sup>에 비해 시스템이 간단하고 제어가 쉽다는 장점이 있다. 방전회로로는 0.1  $\mu\text{s}$  이내의 짧은 펄스 폭과 상대적으로 높은 전류 피크치를 얻을 수 있어 저에너지, 고주파 방전이 요구되는 마이크로 방전회로에 적합한 RC 방전회로를 사용하였다.

### 2.2 와이어 방전가공을 이용한 미세공구의 제작

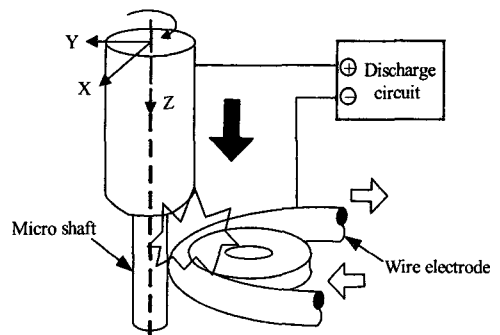


Fig. 2 Machining electrode by WEDM

Fig. 2는 와이어 방전 가공을 이용하여 미세 공구를 가공하는 과정을 보여준다. WEDM(wire electro-discharge machining)<sup>6</sup>은 와이어를 공구로 사용하여 전극을 미세하게 가공하는 방법이다. 와이

어를 일정 속도로 주행시키기 때문에 와이어 방전 가공 중에는 공구의 마모로 인하여 발생하는 전극의 형상 왜곡이 없어 보다 정밀한 미세 전극을 가공할 수 있다.

### 2.3 마이크로 방전 가공을 이용한 미세 구멍의 가공

와이어 방전가공을 통해 제작된 미세 공구를 사용해 스테인리스 강 시편(304 stainless steel)에 미세 구멍을 가공하였다. 공구의 직경은 95  $\mu\text{m}$  이고 시편의 두께는 500  $\mu\text{m}$ , 축전용량은 1000 pF 이다. 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.

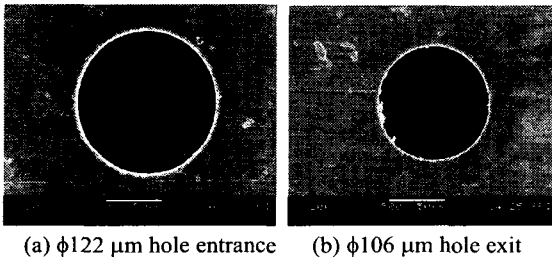


Fig. 3 Entrance and exit of a micro hole machined by micro-EDM

Fig. 3은 위의 과정을 통해 가공된 미세 구멍의 입구와 출구의 SEM 사진이다. Fig. 3에서 관찰할 수 있듯이 직경이 일정한 원통형 미세 공구를 사용하여 구멍을 가공했음에도 구멍의 입구와 출구 사이에는 16  $\mu\text{m}$ 의 직경 차이가 존재한다. 이것은 가공 중에 일어나는 2차 방전의 영향에 따른 결과이다.<sup>7</sup> 마이크로 방전가공을 이용하여 미세 구멍을 가공할 때 공구와 구멍의 벽면 사이에는 가공 부스러기들(debris)이 존재한다. Fig. 4에 보이는 것과 같이 이러한 가공 부스러기들이 구멍의 입구를 통해 빠져 나오면서 구멍의 벽면과 의도하지 않은 2차 방전을 일으키게 되고 상대적으로 2차 방전이 일어나는 시간이 긴 입구 부분의 직경은 시간이 지날수록 점점 커지게 된다. 결국 가공된 미세 구멍의 단면은 입구가 넓고 출구가 좁은 사다리꼴 형상이 된다.

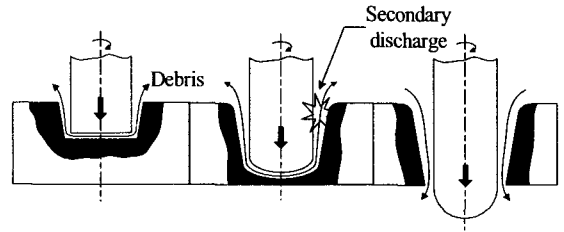


Fig. 4 Secondary discharge during machining a hole by micro-EDM

## 3. 테이퍼 형상의 제거

### 3.1 가공 조건에 따른 테이퍼 형상의 발생 특성

미세 구멍 가공에서 발생하는 테이퍼 형상을 제거하기 위해서는 먼저 가공 조건에 따른 테이퍼 형상의 생성 특성을 살펴 볼 필요가 있다. 테이퍼 형상에 영향을 미칠 수 있는 가공 조건으로는 축전용량, 가공 시간, 공구의 이송 깊이가 있다. 이러한 가공 조건들이 테이퍼 형상의 생성에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위해 각각의 조건들을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 이 때 공구의 직경에 의한 영향을 배제하기 위해 공구의 직경은 95  $\mu\text{m}$ 로 일정하게 유지하였다.

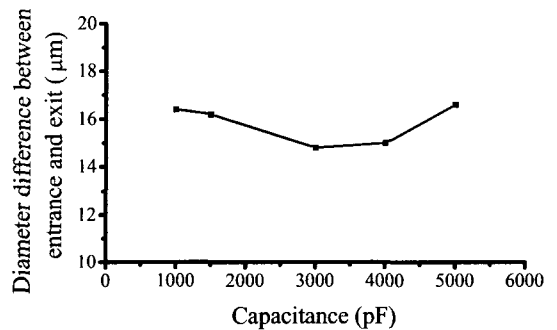


Fig. 5 Diameter difference between entrance and exit of a hole according to capacitance (workpiece thickness: 500  $\mu\text{m}$ , applied voltage: 100 V)

축전용량에 따른 구멍의 입, 출구의 직경 차이를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5와 같이 축전용량이

1000 ~ 5000 pF 으로 변화하는 동안 직경 차는 15 ~ 16.5  $\mu\text{m}$  정도로 큰 변화가 없다. 이것은 축전용량이 커짐에 따라 입구와 출구에서 방전 간극이 모두 커지기 때문이다. 가공 시간의 변화에 따른 입, 출구 직경차이의 변화를 Fig. 6 에 나타내었다. 가공 시간이 증가함에 따라 입, 출구 직경의 차이가 커짐을 볼 수 있다. 이 결과는 테이퍼 형상이 가공 부스러기에 의한 2 차 방전으로 인해 생기므로 가공 시간이 길어지면 상대적으로 장시간 2 차 방전의 영향을 받는 입구의 직경이 더 커져 입, 출구의 직경 차가 커지게 된다는 것을 실험적으로 보여준다.

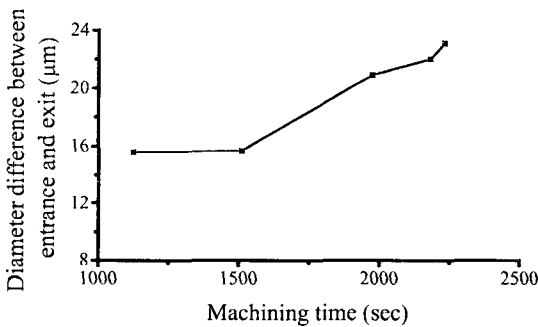


Fig. 6 Diameter difference between entrance and exit of a hole according to machining time (workpiece thickness: 500  $\mu\text{m}$ , applied voltage: 100 V)

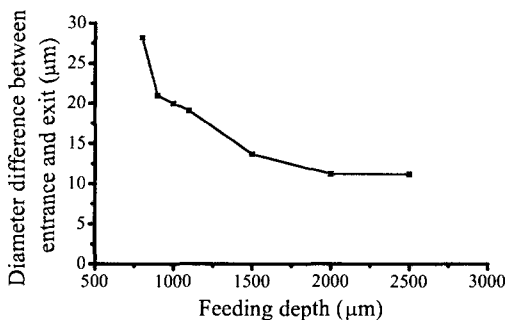


Fig. 7 Diameter difference between entrance and exit of a hole according to feeding depth (workpiece thickness: 500  $\mu\text{m}$ , applied voltage: 100 V)

Fig. 7 은 공구의 이송 깊이에 따른 입, 출구의 직경 차이 변화를 보여준다. 이송 깊이가 깊어질수록 직경 차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 시편을 가공하는 동안 공구는 길이 방향뿐만 아니라 반경 방향으로도 마모된다. 이 때문에 공구가 시편을 관통한 직후에는 공구의 끝 부분의 직경이 반경 방향의 마모로 인해 처음의 직경에 비해 작다. 따라서, 관통 직후에는 출구의 직경이 입구에 비해 작아지게 된다. 그러나, 공구의 이송 깊이가 깊어짐에 따라 구멍의 출구는 상대적으로 반경 방향 마모량이 적은 공구의 중간 부분의 영향을 받게 되므로 직경이 조금씩 커진다. 그러나 이송 깊이가 2000  $\mu\text{m}$  이상이 되면 이송 깊이가 증가하더라도 더 이상 직경 차가 줄어들지 않았다. 즉, 입구 부분의 2 차 방전으로 인한 영향을 공구의 이송 깊이의 증가만으로는 상쇄할 수 없다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 가공 중 축전용량의 변화

2 차 방전으로 인해 발생하는 테이퍼 형상을 제거하기 위해 구멍의 가공 중에 축전용량을 변화시켰다. 단발 방전 에너지는 축전용량에 비례하므로 방전 간극 또한 축전용량이 증가하면 커진다. 따라서, 입구 근처에서는 작은 축전용량으로, 출구 근처에서는 큰 축전용량으로 미세 구멍을 가공하였다.

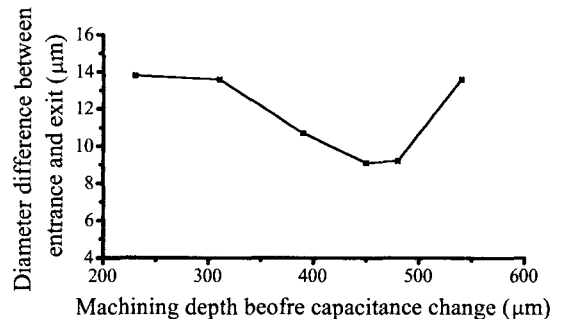


Fig. 8 Diameter difference between entrance and exit hole according to machining depth before capacitance change from 1000 pF to 3000 pF (workpiece thickness: 500  $\mu\text{m}$ , applied voltage: 100 V)

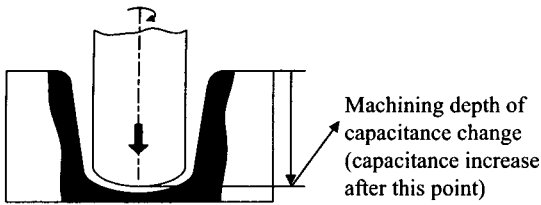


Fig. 9 Machining depth before capacitance change

Fig. 8 은 가공 중에 축전용량을 1000 pF 에서 3000 pF 으로 변화시키는 깊이에 따른 입, 출구의 직경 차이를 나타낸다. 축전 용량의 변화는 Fig. 9 에서와 같이 시편의 두께 방향의 특정 가공 깊이에서 변화시켰다. Fig. 8 에서 나타나듯이 축전용량을 변화시키지 않고 가공했을 때보다 전반적으로 입, 출구 직경 차가 줄어들 것을 볼 수 있다. 특히, 축전용량 변화 깊이가 450 ~ 500  $\mu\text{m}$  사이일 때 직경 차가 가장 많이 줄어든 것을 볼 수 있다. 축전용량 변화 시점이 빠를 경우 직경 차가 커지는 것은 입구에서 큰 축전용량의 영향을 받아 입구가 넓어 지기 때문이고, 500  $\mu\text{m}$  이상에서 직경 차가 커지는 것은 관통 후 출구 부분이 큰 축전용량의 영향을 적게 받아 출구의 직경 확대 효과가 적어지기 때문이다. 이렇게 축전용량의 변화로써 테이퍼 형상을 어느 정도 제거 할 수 있지만 그 차이를 8  $\mu\text{m}$  이하로 줄일 수는 없었다. 이것은 비교적 긴 가공 시간 때문인 것으로 생각된다. 위의 실험 조건과 같이 세장비가 비교적 큰 구멍(aspect ratio > 5)을 가공할 때는 일정 깊이 이상에서 가공 부스러기(debris)의 배출이 원활하지 못해 단락(short circuit)이 많이 발생하므로 가공 시간이 길어지게 된다. 3.1 절에서 보듯이 가공 시간이 길어지면 2 차 방전의 영향이 커져 테이퍼가 커지므로 가공 시간을 보다 더 단축시킬 필요가 있다.

### 3.3 초음파 진동을 부가한 가공

가공 시간을 줄이기 위해 절연액에 초음파 진동을 부가하여 구멍을 가공하였다. 방전 가공 중에 부가된 초음파 진동은 공구와 시편 사이의 방전 분산을 용이하게 하여 가공 효율을 증가시키고 이로 인해 가공시간을 크게 줄일 수 있다.<sup>3</sup> 가공 시간이 감소하면 구멍의 입구측 벽면과 가공부스러기 사이의 원치 않는 2 차 방전 횟수가 줄어들고 이로 인해 구멍의 테이퍼가 감소하게 된다.

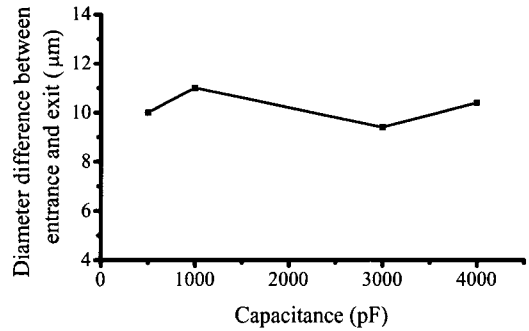


Fig. 10 Diameter difference between entrance and exit of a hole according to capacitance with ultrasonic vibration (workpiece thickness: 500  $\mu\text{m}$ , applied voltage: 100V)

가공물에 효율적 초음파 전달을 위해 매질 내 최대 입자 가속도와 최대 압력 변동을 받을 수 있는 위치에 가공물을 위치시켰다. 부가한 초음파의 진동수는 40 kHz 이고 실제로 절연액인 등유로 채운 다음 가공조 내의 공작물 위치에서 측정된 음향 파워와 가공액에 전달되는 초음파의 음향 세기는 각각 20 W 와 4000  $\text{W}/\text{m}^2$ 이다. 이때 가공물이 위치한 곳의 매질 내 입자의 최대 변위는 약 0.35  $\mu\text{m}$ 이다.<sup>3</sup> Fig. 10 은 초음파 진동을 부가하면서 가공할 때 축전용량에 따른 입, 출구부의 직경 차이를 보여준다. 그래프에서 볼 수 있듯이 초음파를 부가하지 않았을 때보다 입, 출구의 직경 차가 5 ~ 6  $\mu\text{m}$  정도 줄어들 것을 볼 수 있다. 이것은 초음파 부가로 인해 가공 시간을 50 % 이하로 줄일 수 있었기 때문이다.

### 3.4 초음파 진동과 축전용량 변화의 복합 적용

마지막으로 축전용량의 변화와 초음파 진동의 부가를 함께 적용하여 구멍을 가공하였다. 초음파 진동을 부가하지 않았을 경우 1000 pF 미만의 축전용량에서는 가공물이 떨어져 가공 시간이 길어 지지만 초음파 진동을 부가하면 그 보다 작은 축전용량에서도 원활한 가공이 가능하였다. 따라서 초음파를 부가하여 가공하면 가공 시간을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 입구 부분을 더 작은 축전용량

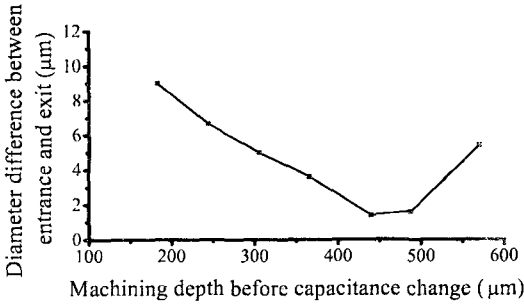
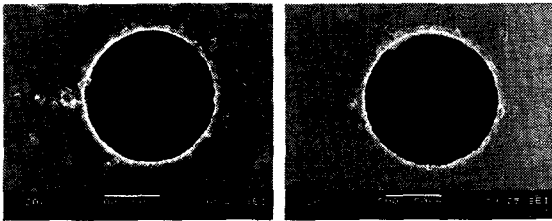


Fig. 11 Diameter difference between entrance and exit of a hole according to machining depth before capacitance change from 500 pF to 3000 pF (workpiece thickness: 500 μm, applied voltage: 100 V)



(a) φ117.0 μm hole entrance (b) φ115.6 μm hole exit

Fig. 12 Straight micro hole machined by EDM with capacitance change and ultrasonic vibration

으로 가공함으로써 입구에서의 방전 에너지를 줄여 입구 직경을 줄일 수 있었다. Fig. 11은 초음파 진동을 절연액에 추가하면서 가공하고 동시에 축전 용량을 500 pF에서 3000 pF으로 변화시켰을 때 축전용량 변화 깊이에 따른 입, 출구부의 직경 차이를 나타낸다. 축전용량 변화 깊이가 증가할수록 입, 출구의 직경 차이가 감소하다가 450 μm 부근에서 최소가 되는 것을 볼 수 있다. 그 이후의 위치에서 축전용량을 변화시켰을 때 직경 차가 다시 증가한다. 이것은 관통 후에는 구멍의 출구부가 큰 축전용량의 영향을 적게 받아 출구의 직경 확대 효과가 적었기 때문이다. 결과적으로 Fig. 5에서 16 ~ 17 μm에 달하던 입, 출구의 직경 차이를 1 μm 정도까지 줄일 수 있었다. Fig. 12는 테이퍼가 제거된 미세 구멍의 입, 출구의 SEM 사진이다.

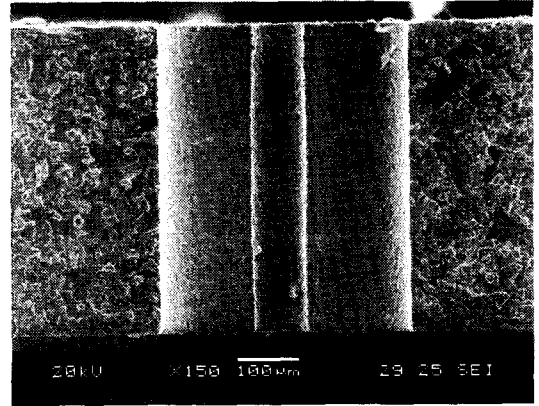


Fig. 13 Cross section of a straight micro hole machined by EDM with capacitance change and ultrasonic vibration

Fig. 3과 비교하여 볼 때 입, 출구의 직경 차이가 거의 없어진 것을 볼 수 있다.

한편 구멍을 가공하는 중에 축전용량을 증가시키면 구멍의 단면 형상이 변형될 가능성이 있고, 축전용량을 증가시킨 출구 부분만 직경이 커질 가능성이 있다. 이 때문에 시편의 가장자리에 구멍을 가공한 다음 직경 200 μm 공구로 구멍의 절반을 잘라내도록 겹쳐 가공하여 구멍의 단면을 관찰하였다. Fig. 13은 이렇게 얻어진 미세 구멍의 단면 SEM 사진이다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 단면 형상의 왜곡은 나타나지 않았다. 위의 그림에서 중앙에 두 개의 세로줄로 나타난 부분이 테이퍼가 제거된 구멍의 단면이고, 구멍 단면의 지름은 약 85 μm이다. 바깥쪽의 두 세로줄로 나타난 부분은 직경 200 μm의 공구로 겹쳐 가공한 흔적이다.

가공 중 축전 용량을 변화시킬 때 생길 수 있는 또 다른 문제점은 축전 용량의 변화에 따른 방전 에너지의 변화로 인해 구멍 벽면의 표면 거칠기가 나빠지거나 일정하지 않을 수 있다는 것이다. Fig. 14와 Fig. 15에서 볼 수 있듯이 가공 중 축전용량을 500 pF에서 3000 pF으로 변화시킨 경우 500 pF으로 가공한 경우와 비교해서 구멍 벽면의 표면이 전반적으로 거칠어졌다. 그러나 공구와 구멍 벽면 간의 2차 방전으로 인해 입구와 출구의 벽면 모두가 3000 pF의 영향을 받아 입구와 출구의 표면 거칠기가 비교적 균일한 것을 볼 수 있다.

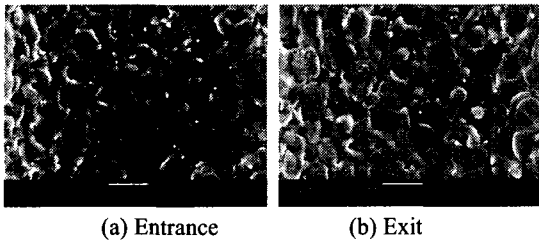


Fig. 14 Enlarged image of the surface of the micro hole machined by EDM with ultrasonic vibration (500 pF)

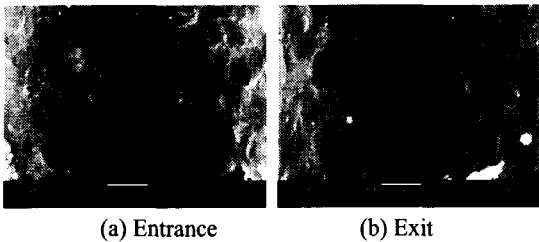


Fig. 15 Enlarged image of the surface of the micro hole machined by EDM with ultrasonic vibration (500 pF → 3000 pF)

### 3.5 두께 1000 $\mu\text{m}$ 시편에서 미세 구멍의 테이퍼 형상 제거 실험

축전용량 변화와 초음파 진동의 부가를 통한 테이퍼 형상 제거 방법이 보다 두꺼운 시편에서도 효과가 있는지를 알아보기 위해 두께 1000  $\mu\text{m}$ 의 시편에서 위와 같은 실험을 수행하였다.

Fig. 16 는 초음파 진동을 부가하여 두께 1000  $\mu\text{m}$  시편을 가공 할 때 축전용량 변화 깊이에 따른 구멍의 입, 출구 직경차이를 보여준다. 두께 1000  $\mu\text{m}$  시편을 가공 할 때 축전용량 변화 깊이에 따른 입, 출구 직경차이가 두께 500  $\mu\text{m}$  시편을 가공하는 경우와 비슷한 양상을 보인다. 즉, 시편을 관통하기 직전의 지점에서 축전용량을 변화시킬 때 테이퍼 제거 효과가 가장 컸으며 관통 후에 축전용량을 변화시켰을 경우 효과가 감소하였다.

결과적으로 축전용량을 변화 시키지 않았을 때와 비교하여 축전용량을 변화시켰을 때 입, 출구의 직경 차이가 10 ~ 11  $\mu\text{m}$  정도 줄어든 것을 볼 수 있다. 테이퍼 감소량은 두께 500  $\mu\text{m}$  시편의 경우와

비슷하였으나 두께 1000  $\mu\text{m}$  시편의 경우 기본적인 가공시간이 길어 입, 출구의 직경 차를 7  $\mu\text{m}$  이하로 줄일 수는 없었다.

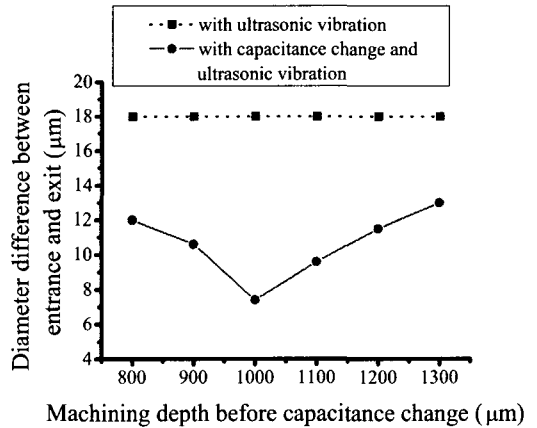


Fig. 16 Diameter difference between entrance and exit hole according to machining depth before capacitance change from 500 pF to 3000 pF (workpiece thickness: 1000  $\mu\text{m}$ , applied voltage: 100 V)

## 4. 결론

본 논문에서는 미세 방전 가공을 이용하여 구멍을 가공할 때 생기는 테이퍼 형상에 대해 고찰하고 이를 제거하기 위한 연구를 수행하였다. 실험을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 축전용량이 클수록 입, 출구의 방전 간극은 커졌으나, 테이퍼에는 큰 영향이 없었다. 가공 시간이 길어질수록 2 차 방전의 영향으로 입구 직경이 커져 구멍의 테이퍼가 증가하였다. 전극 이송 깊이를 깊게 할수록 테이퍼는 감소하였지만 특정 깊이 이상에서는 더 이상 감소하지 않았다.
2. 위 실험 결과를 바탕으로 구멍의 테이퍼 형상을 제거하기 위해 가공 중 축전 용량을 변화시켰으며, 관통하기 직전의 지점에서 축전용량을 증가시켰을 때 테이퍼 제거 효과가 가장 컸다.
3. 가공 시간의 단축을 통해 테이퍼를 줄이기 위해 절연액을 통해 초음파 진동을 부가하였다.
4. 초음파 진동의 부가와 축전용량의 변화를 통

해 두께 500  $\mu\text{m}$  의 304 SS 시편에 가공된 미세 구멍의 입, 출구 직경 차이를 1  $\mu\text{m}$  까지 줄여 테이퍼를 제거할 수 있었다.

5. 가공된 구멍의 단면을 관찰한 결과, 가공 중 축전용량을 증가시켜 테이퍼를 줄이는 방법이 구멍의 내부 형상을 왜곡시키지 않았다. 다만, 구멍의 벽면이 다소 거칠어졌으나, 구멍 벽면 전체의 표면 거칠기는 거의 동일하였다.
6. 두께 1000  $\mu\text{m}$  시편의 경우에서도 관통하기 직전의 지점에서 축전용량을 변화시켰을 때 테이퍼 제거 효과가 가장 컸으나, 긴 가공시간 때문에 구멍 입, 출구의 직경 차이를 7  $\mu\text{m}$  까지만 줄일 수 있었다.

6. Masuzawa, T., Jujino, M. and Kobayashi, K., "Wire Electro-discharge Grinding for Micro Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp. 431-424, 1985.
7. Pahnit, S., Dan, K. and Mart, G. A., "An Experimental Study of Microfabricated Spark Gaps: Wear and Erosion Characteristics," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 165-174, 2001.

## 후기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

## 참고문헌

1. Cho, P. J., Yi, S. M., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Characteristics of RC Circuit with Transistors in Micro-EDM," *Journal of the KSPE*, Vol. 21, No. 12, pp. 44-51, 2004.
2. Kagawa, M., "Study on Straight Micro Hole Machining by EDM Using Stepped Electrode," *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 65, No. 12, pp. 1793-1797, 1999.
3. Je, S. W., "Deep hole micro EDM with Ultrasonic Vibration," Ph.D. dissertation, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 2003.
4. Yeo, S. H. and Tan, L. K., "Effects of Ultrasonic Vibrations in Micro Electro-discharge Machining of Micro Holes," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 345-352, 1999.
5. Sheu, D. Y., Masuzawa, T. and Fujino, M., "Machining of Deep Microholes by EDM," *International Conference on Precision Engineering*, Taipei, Taiwan, pp. 593-596, 1997.