

◆특집◆ Micro Machining

# 미세형상가공을 위한 방전·초음파 가공기술

주종남\*, 김규만\*, 김성윤\*

## Fabrication of Micro-Shapes Using EDM and Ultrasonic Machining

Chong Nam Chu\*\*, Gyu Man Kim\* and Seong Yune Kim\*

**Key Words** : Micro EDM(미세방전가공), Micro USM(미세 초음파가공), Micro hole(미세구멍), Micro structuer(미세구조물)

### 1. 서론

한국은행의 지식기반산업의 국민경제적 역할 분석에 따르면, 91년부터 99년까지 지식기반산업의 연평균 성장률은 13.7%로 다른 산업의 4.1%보다 3 배 이상 높은 것으로 조사되었다. 그중 항공기, 사무계산 및 회계용기기, 의약품, 영상 음향 통신장비 등 첨단제조업은 이 기간중 연평균 20.1% 성장을 기록하였다. 이와 같은 첨단제조업에서는 제품 내부품의 정밀가공 기술이 필수적이다. 그 중에서도 미세가공에 대한 관심은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 특히, 반도체 제작공정을 이용한 미세가공기술이 발달하고 공정이 복잡해짐에 따라, 반도체 제작공정으로는 제작이 불가능한 금속과 세라믹계 구조부, 고정부(fixture) 등은 기계적인 미세가공이 필요하게 되었다.

기계적 미세가공이란 범용 가공기술을 정밀화, 미세화하여 미세가공에 적용하는 기술로서, 그중 방전가공과 초음파가공은 가공력이 작아 미세공구

의 파손의 우려가 적어 기존 가공법으로 가공이 어려웠던 직경 백 $\mu\text{m}$  이하의 극미세 구멍을 비롯한 기타 미세구조물 가공에 적용 가능한 가공기술이다. 현재, 방전·초음파를 이용한 미세가공기술은 일본을 중심으로 활발히 연구되고 있다.<sup>[1-5]</sup>

본 연구에서는 방전과 초음파를 이용한 미세가공을 위하여 가공기를 개발하고, 금속과 세라믹에 크기 100  $\mu\text{m}$  이하의 미세구멍을 비롯한 여러 가지 미세형상을 가공하였다.

### 2. 미세 공구 가공

방전가공과 초음파 가공의 공통점은, 공구의 형상이 가공물에 전사되기 때문에, 가공에 앞서 가공형상의 공구를 먼저 제작해야한다는 점이다. 크기가 작아질수록 공구의 강도가 현저히 떨어지기 때문에 미세공구의 제작에는 정밀한 가공기술이 필요하다. 미세공구의 성형방법에는 연삭을 이용한 공구 성형법, 방전 성형법<sup>[1]</sup>, 레이저 성형법<sup>[4]</sup>, 압출을 이용한 성형법<sup>[5]</sup> 등을 들 수 있다. 과거에는 공구제작에 연삭이 많이 사용되었으나, 큰 가공력이 작용하기 때문에 가공이 가능한 치수에 한계가 있었다. 레이저 성형법은 용융된 재료가 가공된 표면에 잔류하여 가공면의 표면거칠기가 좋지 않다는

\* 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소

Tel. 02-880-7147, Fax. 02-887-7259

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

Tel. 02-880-7136, Fax. 02-887-7259

Email cnchu@snu.ac.kr

정밀기계가공과 미세가공에 관심을 가지고 연구활동 중이다.

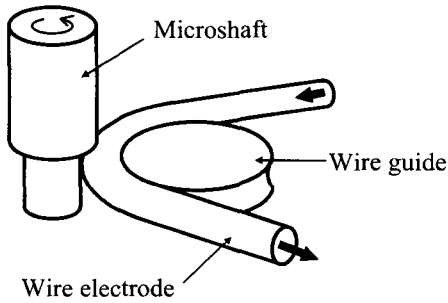


Fig. 1 Principle of WEDG

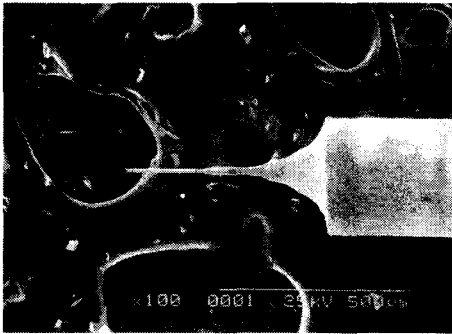


Fig. 2 Micro electrode :  $\phi 6\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$

단점이 있다. 압출 성형법은 가공 가능한 재질이 저용점 비철금속으로 제한된다.

반면, 방전가공은 가공 중 가공물과 전극의 접촉이 없어 가공력이 작기 때문에 극미세 가공이 가능하다. 또한 방전가공은 초경합금을 비롯한 고경도 금속의 가공이 가능하다는 장점을 지니고 있어 미세가공에 매우 적합한 가공법이다. 그러나 가공이 진행됨에 따라 발생한 전극의 소모량이 가공형상에 직접적인 영향을 주는 단점이 있다.

이와 같은 단점을 극복하기 위하여 와이어 방전연삭법(WEDG, wire electro discharge grinding)이 제안되었다<sup>[1]</sup>. Fig 1 은 와이어 방전연삭의 원리를 보이고 있다. 와이어 방전연삭은 와이어전극을 보조전극으로 사용하여 방전가공으로 미세공구를 성형하는 가공법이다. 원형 공구를 가공할 경우, 회전하는 가공물을 가공물 축방향으로 이송하여 미세공구를 성형한다. 가공 중 와이어 전극을 와이어 가이드

를 따라 주행시켜 새로운 전극을 지속적으로 공급함으로써 전극소모의 영향을 최소화 한다. 본 연구에서는 와이어 방전연삭법을 사용하여 미세공구를 제작하였다. Fig. 2 는 성형된 미세공구의 예를 보이고 있다. 미세공구의 직경은  $6\mu\text{m}$  이다. 이와 같이 와이어 방전연삭을 사용하면 극미세 공구의 성형이 가능하다.

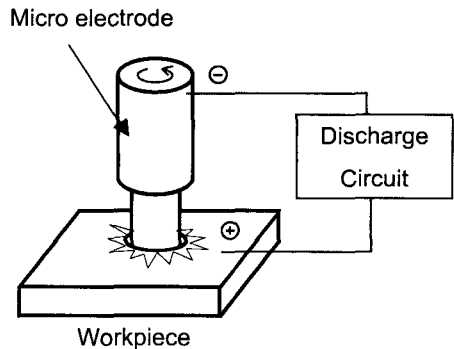


Fig. 3 Micro-hole machining process

### 3. 미세 방전 가공

#### 3.1 가공원리 및 주요특성

Fig. 3 은 가공된 미세공구를 전극으로 이용한 미세방전 가공의 원리를 간략화한 그림이다. 원하는 형상으로 성형된 미세 전극과 가공물 사이에 방전전원을 연결한 후 미세 전극을 이송하면 전극의 미세형상이 가공물에 전사된다. 미세 방전가공은 단발 방전에너지를 최소화하여 단발 방전에 의한 가공력과 가공물 제거량을 작게 한다. 이로 인하여 표면거칠기가 작고 경계부가 날카로운 미세형상 가공이 가능하다. 한편, 단발방전에 의한 가공량이 작아서 가공속도가 떨어지기 쉽기 때문에 방전 주파수를 높여야 한다. 방전 주파수를 높이기 위해선 방전 전원회로로 RC 회로를 사용한다. 그 이유는 트랜지스터 회로를 사용할 경우 트랜지스터의 단락시 시간지연효과로 높은 방전 주파수를 얻을 수 없기 때문이다. 또한, 안정된 방전을 유지하기 위해

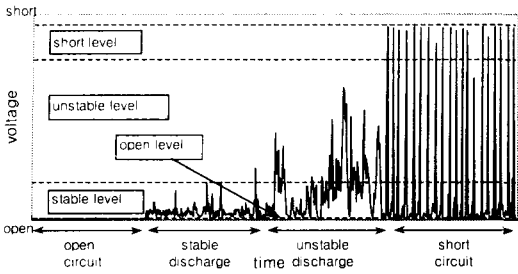


Fig. 4 Variation of Gap Voltage according to Discharge Condition

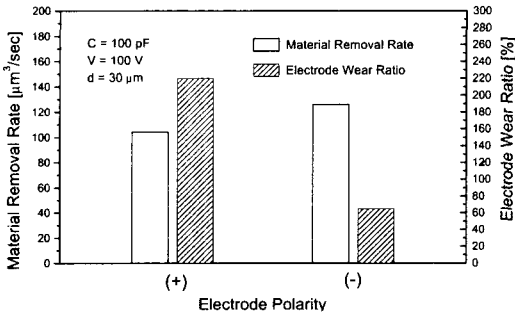


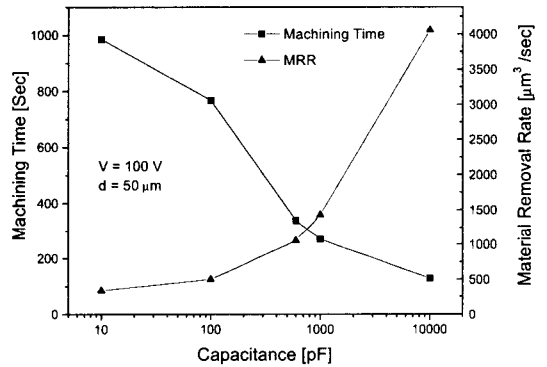
Fig. 5 Electrode polarity characteristics

선 공작물과 전극간의 간극을 일정하게 유지하여야 한다.

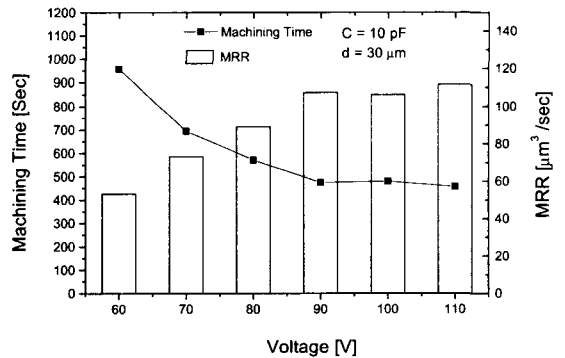
따라서 간극측정회로로부터 측정된 간극 신호를 이용하여 방전 상태를 추정하고 방전 상태에 따라 전극이송을 제어한다. Fig. 4 는 측정된 간극신호와 이에 따라 4가지 영역으로 구분되는 방전 상태의 예를 보이고 있다. 방전가공은 가공물의 제거와 동시에 전극의 소모가 발생한다. 전극의 소모량은 그대로 가공오차와 연관된다. 특히, 미세가공에서는 전극소모의 영향이 커진다. 방전의 가공 메커니즘에 따라, 가공물의 제거율이 클수록 전극소모율 역시 증가하는 것은 당연한 사실이다. 따라서 전극소모 특성에 따라 전극저소모 조건의 선정이 필요하다. Fig 5 는 전극극성에 따른 가공율과 전극소모 특성을 보이고 있다. 전극에 (-) 전원을 연결하는 정극성 조건에서 높은 가공율과 적은 전극소모를 보이고 있다.

미세방전의 가공율(Material Removal Rate)은

RC 방전회로 조건과 밀접한 관계가 있다. Fig. 6 은 방전회로에 사용된 축전용량과 인가전압에 따른 가공시간과 가공율의 변화를 보이고 있다. 축전용량과 인가전압이 높을수록 가공율은 증가하고 있다. 그 이유는 단발방전 에너지의 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나, 단발방전 에너지가 클수록 가공흔이 커지게 되어 가공면의 표면거칠기가 악화되므로 가공 목적에 따른 적절한 조건의 선정이 필요하다. 인가전압이 90V 이상일 경우 가공율의 증가가 큰 차이를 보이지 않는다. 그 이유는 방전개시전압이 전극과 가공물 극간의 절연상태와 관련이 있기 때문에 전압이 방전개시 전압 이상으로 인가되어도 가공율에 큰 영향을 주지 않기 때문이다.



(a)



(b)

Fig. 6 Machining rate variation due to : (a) capacitance; (b) power source voltage

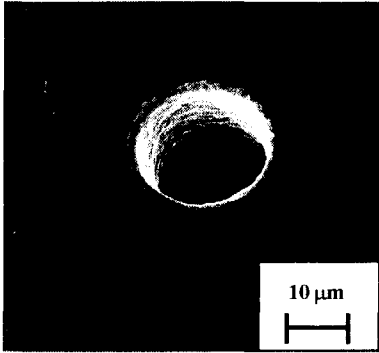


Fig. 7 Micro hole :  $\Phi 20\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$

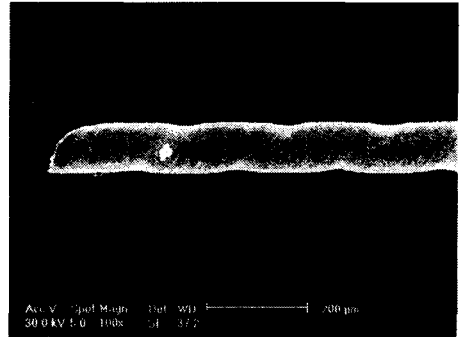


Fig. 10 Micro groove in micro shaft :  $\Phi 50\mu\text{m}$  ; pitch  $200\mu\text{m}$

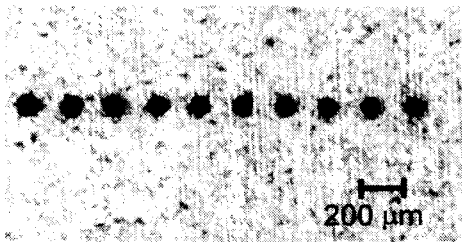


Fig. 8 Ink jet printer nozzle :  $\Phi 100\mu\text{m}$ ; pitch  $204\mu\text{m}$

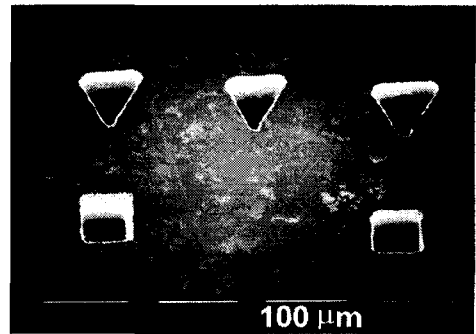


Fig. 11 Polygon hole

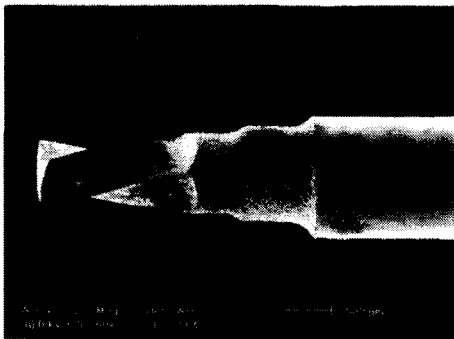


Fig. 9 Micro end mill :  $\Phi 300\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ ;  
WC alloy; 4 flutes

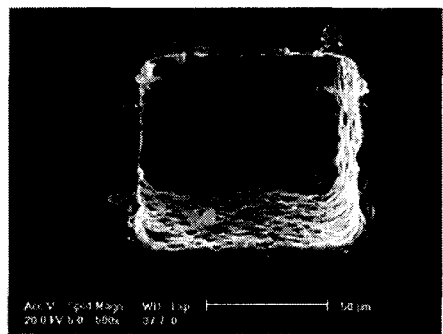


Fig. 12 Micro Cavity machined by MEDM

### 3.2 미세방전가공 예

미세방전가공은 통전성이 있는 모든 금속재질에 가공이 가능하다. 또한 가공 재질의 경도에 무

관하기 때문에 절삭성이 나쁜 난삭재와 고경도 공구합금의 가공이 가능하다. Fig. 7 은 가공된 미세구멍의 예이다. 미세구멍의 직경은  $20\mu\text{m}$  이고 두께

50 $\mu$ m 의 SUS 304 판에 관통하였다. SUS 304 는 좋은 내부식성을 가지고 있으나 인성이 강한 난삭재이다. 원형전극이나 원형 구멍을 가공하는 경우에는 미세전극을 회전시켜서 가공 칩의 배출과 절연액의 순환을 용이하게 하여 가공성을 높인다. 미세구멍을 일정한 간격으로 가공하면 잉크젯 프린터 노즐을 비롯한 여러 가지 노즐 금형과 광섬유 콘넥터 금형, 각종 밸브의 오리피스(orifice) 등으로 폭넓게 응용될 수 있다. Fig. 8 은 가공된 마이크로 노즐의 예이다.

와이어 방전연삭 시 가공물의 이송량과 회전량을 동시에 제어하면 다양한 형상의 미세축을 가공할 수 있다. Fig. 9 는 직경이 300 $\mu$ m 인 초경 미세 앤드밀을 가공한 예이다. 가공물의 회전각과 와이어전극의 축 방향 이송량을 동시에 제어하여 헬릭스각(helix angle)이 30° 인 4개의 절삭날을 가공하였다. Fig. 10 은 직경 50 $\mu$ m 의 미세축에 미세홈을 200 $\mu$ m 피치(pitch)로 가공한 예이다. 또한, 고정된 미세전극의 한면을 가공한 후, 일정한 각도로 회전시키고 미세전극의 가공을 반복하면 다각형 미세전극을 가공할 수 있다. 가공된 미세전극을 이용하여 미세구멍을 가공한다. Fig. 11 은 다각형 구멍을 가공한 예이다. 미세 구멍을 가공한 후 미세전극을 일정 각도로 회전한 후 중첩 가공하면 별 모양 등의 복합형상 구멍 가공이 가능하다. Fig. 12 은 미세공동(micro cavity)의 가공예이다. 미세공동은 미세금형 제작에 필수적인 요소이다. 미세공동을 가공할 때에는 전극의 소모가 공동형상에 크게 영향을 미치므로 전극 소모의 최소화와 전극 소모량 보정에 유의하여야 한다.

#### 4. 미세 초음파 가공

##### 4.1 공구 가공과 초음파 가공 알고리즘

이미 마이크로 공구 가공 과정을 Fig.1에 나타내었다. 후에 마이크로 공구의 소재가 되는 공구 재료를 붙이고, 공구 회전 기구에 의해 공구 재료를 초음파 진동자, 콘, 혼과 일체가 되게 하여 회전시키고, WEDG에 의해 마이크로 공구를 제작한다. 이 마이크로 공구는 공구 재료의 부착할 때 발생하

기 쉬운 편심과 기울어짐에 관계없이 가공기의 이송축을 중심으로 하는 원통형으로 가공된다.

이렇게 가공된 마이크로 공구가 장착된 상태에서, WEDG 장치를 시편고정 장치로 교체시키어 가공을 시작한다. 가공 스톨 입자를 이용해서 초음파 진동으로 시편을 가공하는 단계는 Fig 13과 같다.

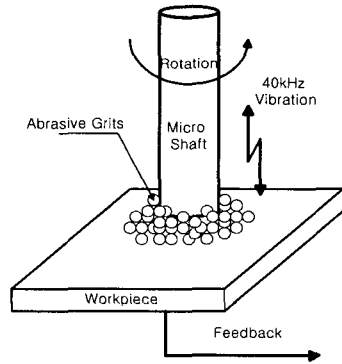


Fig. 13 MUSM process

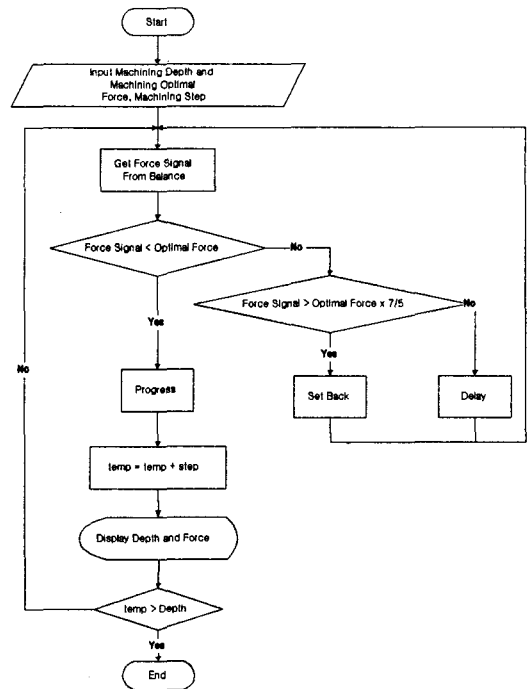


Fig. 14 Machining flow chart

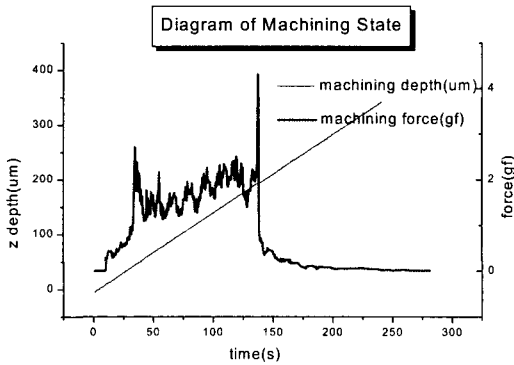


Fig. 15 Machining state diagram

미세 초음파 가공의 알고리즘은 가공 상태를 세 단계로 구분하여 각각에 따라 가공이 이루어지도록 하였다. 가공상태의 판단은 시편과 미세 공구 사이에서 발생하는 힘을 피드백을 받아서 수행하였다.

첫 번째 가공상태는 가공이 정상적으로 이루어지고 있는 경우로서, 가공된 칩이 원활히 제거되기 때문에 일정한 속도와 이송간격(대략  $1.2\mu\text{m} \sim 0.4\mu\text{m}$ , 보통  $0.8\mu\text{m}$ )으로 전진하게 된다. 이때의 속력은 대략  $1.4\mu\text{m/s} \sim 1.6\mu\text{m/s}$ 가 되도록 하였다. 이송은  $0.8\mu\text{m}$  씩 진행하도록 하였다. 가공상태를 판단하기 위한 기준 정압력은 기초실험을 통하여 구하였으며, 3gf를 사용하였다.

두 번째 가공상태는 가공된 칩이 원활하게 제거되지 못하였거나 가공입자의 파쇄가 진행되어 가공 효율이 저하됨에 따라 가공이 이루어져 공구의 이송을 진행하기 어려운 상태이다. 이때 공구는 이송시키지 않고 그 상태에서 가공력이 기준 정압력의 이하로 될 때까지 가공을 수행한다. 대략 0.5초 정도를 전진 및 후퇴를 하지 않고 멈춘 상태에서 가공을 계속하게 된다.

세 번째 가공상태는 가공이 전혀 이루어지지 않는 경우로서, 공구의 이송이 과다함에 따라 가공에 필요한 압력 이상의 부하가 발생하는 경우이다. 따라서, 공구는 가공 간격만큼 후퇴하도록 하였다.

가공 Flow Chart를 Fig.14에 나타내었다. 가공 정압력을 받아서 가공 단계를 결정하고 입력된 가공 깊이만큼 가공된 후에는 가공이 중지되도록 하였다. 가공력 측정장치를 가공물 고정장치에 부착하고 신호처리장치를 통하여 이를 획득함으로써 가

공상태 제어가 가능하도록 하였으며, 동시에 이들 신호를 저장장치에 저장함으로써 위치에 따른 가공 정압력과 가공 경과 시간을 측정, 마이크로 초음파 가공특성을 해석할 수 있도록 하였다.

세라믹 시편(알루미나)의 두께  $200\mu\text{m}$ , 미세 가공 축 직경  $300\mu\text{m}$ 로 가공 할 때의 가공 상태도를 살펴 보면 Fig 15.와 같다

가공 깊이는 실제  $200\mu\text{m}$ 이지만 미세 가공 축이 테이퍼 형상을 이루기 때문에 가공 구멍이 관통되고 난 뒤에도  $200\mu\text{m}$ 를 더 가공을 하였다. 전체 가공 시간은  $400\mu\text{m}$  깊이까지 대략 300초 가량이 걸렸으며, 실제 가공시간은 발생하는 가공부하가 완전히 제거된 때로서 가공력이 급격히 저하되는 부분으로 판단할 수 있으며 약 150초가 소요되었다.

직선으로 이루어진 가공 상태를 살펴보면 전진과 멈춤이 반복되고 있다. 가공 정압력의 경우는 150초 근처에서 힘이 가장 크게 걸리는데 그 이유는 시편이 관통되기 전에 얇은 시편이 부위에서 깨짐이 일어나서 가공 충격량이 커졌기 때문으로 분석되어 진다.

위의 가공 상태도에서는 가공 멈춤 상태와 가공 후퇴 상태가 전혀 일어나지 않고 있다. 단지 가공이 끝난 150초 근처에서는 몇 번의 가공 멈춤 상태가 이루어지고 있을 뿐이다. 위의 가공 조건은  $0.8\mu\text{m}$  간격에 3gf의 가공 정압력이다.

#### 4.2 미세 초음파 가공 예

미세 초음파 가공은 방전가공과 달리 비전도성, 취성재료에 대한 가공이 가능하다. 또한 레이저나 방전가공은 재료에 국부적인 열에너지를 가하여 재료를 녹여내는 것과 달리 초음파 가공은 가공입자에 의한 기계적인 가공으로 재료 표면에 열변형을 가하지 않으므로 더 좋은 가공표면을 제공한다.

Fig.16은 WEDG로 가공한 직경  $300\mu\text{m}$ 의 초경 공구를 회전시키면서  $200\mu\text{m}$ 두께의 세라믹( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 판에 가공한 원형구멍의 현미경사진이다.

일반적으로 초음파 가공에서 가공면의 상태는 가공입자의 크기에 의해서 좌우된다. 가공입자의 크기가 커지면 가공시간은 줄어들지만 공구의 마모량이 증가하고 가공면은 나빠진다. 초음파 가공은 공구와 가공물 사이의 가공입자가 가공물의 표면에 칩핑(chipping)현상을 일으켜서 재료를 가공하므로, 가공면은 가공입자의 크기에 따라 달라지게 된다.

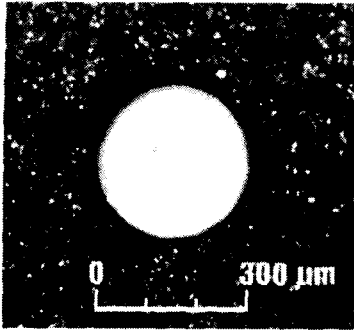


Fig. 16 Micro Hole  
 $\Phi 310\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$

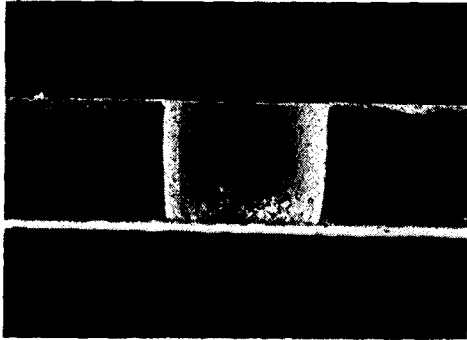


Fig. 17 Lateral shape of machined hole



Fig. 18. Machined surface with 4~8 $\mu\text{m}$  slurry

Fig.17은 500 $\mu\text{m}$  두께의 세라믹( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )판에 가공한 직경 500 $\mu\text{m}$  구멍의 단면이다. 그리고 Fig.18은 Fig.17에서 초음파 가공된 단면의 표면사진이다. 이

실험에서는 4~8 $\mu\text{m}$  크기의 다이아몬드 가공입자를 사용하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서 마이크로 단위의 미세 형상을 가공하기 위하여 방전 가공과 초음파 가공을 마이크로 가공분야에 적용시켜 보았다. 와이어 방전연삭법을 응용하여 장착오프셋이나 편심과 같은 장착오차를 보상할 수 있도록 함으로써 마이크로 단위의 미세 공구를 가공할 수 있었다. 가공된 마이크로 공구를 마이크로 방전가공과 마이크로 초음파 가공에 적용하여 다양한 형상과 재질의 마이크로 구멍을 가공하였다.

방전가공의 경우, SUS와 같은 도전성 물질에 대해서는 최적의 미세가공 방법임을 여러 형상의 가공실험을 통하여 알 수 있었다. 또한, 가공 실험으로부터 전원회로의 축전용량이 가공율과 표면거칠기에 주된 결정인자로 작용하며, 이외에 전원전압에 따른 방전전압도 가공율에 영향을 미침을 알 수 있었다.

초음파 가공의 경우, 세라믹과 같은 비전도성 취성재료에 대하여 효과적인 가공 방법임을 증명하였으며, 가공입자의 크기에 따른 가공율, 공구마모, 가공면 거칠기 등의 변화를 살펴보았다. 그러나, 가공깊이의 향상과 형상오차 감소 등을 위해서는 지속적인 연구가 요구되었다.

## 참고문헌

1. T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, "Wire Electro-discharge grinding for micro machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, pp. 431-424, 1985.
2. T. Masuzawa, J. Tsukamoto, M. Fujino, "Drilling of deep microholes by EDM," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 195-198, 1989.
3. T. Masuzawa, C. L. Kuo, M. Fujino, "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. N. Mohri, M. Suzuki, M. Furuya, N. Saito, "Electrode wear process in electrical discharge machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 165-168, 1995.
  6. V.Soundrarajan, V.Radhakrishnan An Experimental Investigation on The Basic Mechanisms Involved in USM, *Int.J.Mach.Tool Des.Res*, Vol. 20, No. 3, pp. 307~321.
  7. M. Komarariah , P, Narasimha Reddy Relative performance of tool material in ultrasonic machining, *Wear*, 161(193) 1 -10, pp. 1~10.
  8. M.Komaraia, "A Study The Influence of workpiece properties in ultrasonic Machining," *Tool Manufact.*, Vol. 10, No. 10, pp. 495~505, 1998.
  9. G.S.Kainth, Amitav Nandy On The Mechanics of Matearial Removal in USM, *Int.J.Mach.Tool Des.Res*, Vol. 19, pp. 333~41.
  10. M.Komaraia, M.A.Manan, "Investigation of surface Roughness and Accuracy in Ultrasonic Machining," *Precision Engineering*, Vol. 10, No. 10, pp. 59~65, 1998.