

# 미세 전해 구멍 가공에서의 가공 조건에 따른 가공 간극 변화 특성

김보현<sup>#</sup>, 박병진\*, 주종남\*

## Effect of Machining Conditions on machining gap in Micro Electrochemical Drilling

Bo Hyun Kim<sup>#</sup>, Byung Jin Park\* and Chong Nam Chu\*

### ABSTRACT

Micro hole is one of basic elements for micro device or micro parts. Micro electrochemical machining (ECM) can be applied to the machining of micro holes less than 50  $\mu\text{m}$  in diameter, which it is not easy to apply other techniques to. For the machining of passivating metals such as stainless steel, machining conditions should be chosen carefully to prevent a passive layer. The machining conditions also affect the machining resolution. In this paper, machining characteristics of micro ECM were investigated according to machining conditions such as electrolyte concentration and pulse conditions. From the investigation, optimal machining conditions were suggested for micro ECM of stainless steel.

**Key Words :** Electrochemical machining (전해 가공), Micro hole (미세 구멍), Machining gap (가공 간극)

### 1. 서론

전해 가공은 금속의 전기 화학적 반응을 이용한 가공법으로 재료의 경도와 무관하게 가공할 수 있어 금형 가공에 많이 이용되었다. 방전 가공이나 초음파 가공처럼 전극 형상이 가공물에 전사되는 특징이 있어 자유 곡면 가공에도 유리하다. 하지만 가공 간극이 다른 가공 방법에 비하여 크기 때문에 정밀한 미세 형상 가공에는 이용되지 못했다. 하지만 초단 펄스를 이용하면 가공 간극이 수  $\mu\text{m}$  정도로 작아지기 때문에 전해 가공으로 미세 형상을 가공 할 수 있다.<sup>1</sup> 미세 구멍은 미세 부품에서

가장 기본적인 요소이다. 최근에는 스테인리스 강과 같은 난삭재에 더 작은 크기와 더 높은 정밀도가 요구되는 미세 구멍의 수요가 늘고 있다. 이러한 미세 구멍 가공 방법으로는 미세 드릴링, 레이저 가공, 미세 방전 가공 등이 있다.<sup>2</sup> 하지만 요구되는 구멍 크기가 수십  $\mu\text{m}$  이하가 되면 이러한 방법의 적용이 용이하지 않다. 특히 공구나 전극의 파손, 마모로 인한 어려움이 생긴다. 하지만 전해 가공에서는 전극의 마모가 발생하지 않으므로 이러한 미세 구멍 가공에 적합하다. Ahn<sup>3</sup> 등은 초단 펄스를 이용한 전해 가공법으로 스테인리스 강에 높은 세장비의 미세 구멍 가공을 하였다. 이러

\* 접수일: 2005년 6월 29일; 게재승인일: 2005년 9월 9일

# 교신저자: 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

E-mail ssborry@snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147

\* 서울대학교 기계항공공학부

한 높은 정밀도의 미세한 구멍 가공을 위해서 가공 간극의 제어에 대해 연구할 필요가 있다. 또한 이러한 간극 제어는 구멍 가공뿐만 아니라 3 차원 형상 가공에도 필수적이다. 일반적으로 전해액의 농도와 펄스 전원의 조건 등이 가공 간극이나 가공 속도에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 전해 가공을 이용한 스테인리스 강 (STS 304)의 미세 구멍 가공에서 가공 조건에 따른 간극 변화 특성을 연구하였다.

## 2. 가공 조건에 따른 가공 특성

### 2.1 전해액의 농도

전해액의 선택은 미세 전해 가공에서 매우 중요하다. 일반적으로 스테인리스 강의 전해 가공에서는 높은 농도의  $\text{NaCl}$  또는  $\text{NaNO}_3$ 를 사용해 왔다. 하지만 미세 전해 가공에서는 가공 정밀도, 가공 간극, 부동태막(pассив film) 생성 방지 등을 고려하여 전해액의 종류와 그 농도를 선택해야 된다. 염화 이온과 같은 할로겐 이온은 부동태막을 부분적으로 파괴를 시킨다고 알려져 있다. Schuster<sup>4</sup> 등은 스테인리스 강의 미세 전해 가공을 위해 염화 이온이 포함된 전해액을 각기 다른 농도로 사용하였으며 그 중 3 M 염산 용액(HCl)과 6 M 불산 용액(HF)을 섞은 전해액이 적합하다고 하였다. 하지만 전해액의 농도가 높고 독성이 높은 단점이 있기 때문에 본 실험에서는 미세 전해 가공을 위해 묽은 황산 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 용액을 사용하였다.

가공 정밀도를 높이기 위해서는 전극과 공작물의 사이의 가공 간극이 최소화가 되도록 가공 조건을 설정해야 된다. 일반적으로 전해액의 농도가 낮을수록 간극이 감소하지만 너무 낮으면 가공 자체가 안될 수 있다. 따라서 농도에 따른 가공 간극의 변화를 살펴보았다. 실험 방법은 지름 35  $\mu\text{m}$ 의 미세 전극으로 Fig. 1과 같이 깊이 10  $\mu\text{m}$ 의 구멍을 가공한 뒤 구멍의 지름을 측정하여 간극의 크기를 평가하였다. 구멍의 모서리가 날카롭게 가공이 안 된 경우는 구멍의 가장 바깥쪽 지름을 측정하였다. 전극의 이송 속도는 0.1  $\mu\text{m/sec}$ 으로 일정하게 하였다.

Fig. 2는 전해액의 농도에 따른 가공 간극의 변화를 나타낸 그래프이다. 전해액의 농도는 0.1, 0.5, 1 M로 실험을 하였으며 6 V, 60 ns 펄스 폭의 펄스를 인가하여 가공하였다. 전해액의 농도가 낮아질

수록 간극이 줄었으며 0.1 M 농도에서는 간극이 약 6.5  $\mu\text{m}$  이었다. 하지만 농도가 0.1 M 보다 더 낮아지면 가공 자체가 불안정해지고 단락이 많이 발생하였다. 이는 간극에서 이온의 고갈로 인해 안정적인 전해 반응이 일어나지 못하기 때문이다. 따라서 본 실험에서는 가공 정밀도와 안정적인 가공을 고려하여 전해액으로 0.1 M의 황산 용액을 선택하였다.

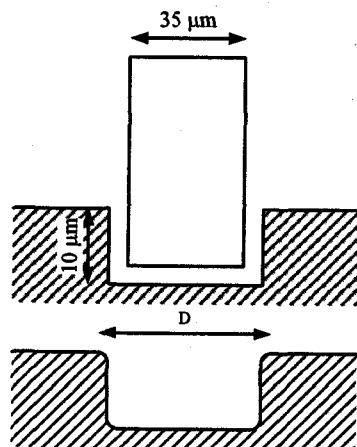


Fig. 1 Hole machining for measuring machining gap

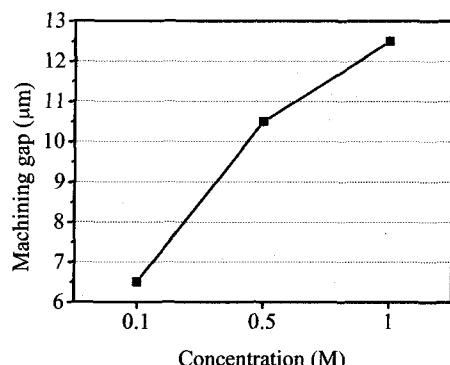


Fig. 2 The machining gap according to electrolyte concentration (sulfuric acid, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1  $\mu\text{s}$  period)

### 2.2 펄스 조건

미세 전해 가공에서 펄스 조건은 가공 간극과 가공 속도를 결정하는 중요한 인자 중 하나이다. 전기 화학적 반응 속도는 인가 전위에 비례해서 증가하므로 가공 속도와 간극은 인가되는 펄스의 전압, 펄스 폭 그리고 가공 시간에 영향을 받는다.

Fig. 3은 인가되는 펄스를 개략적으로 나타낸 것이다. 펄스는 펄스 전압(pulse on-time voltage), 펄스 폭(pulse on-time), 펄스 휴지 기간 전압(pulse off-time voltage), 펄스 주기(pulse period)로 나타낼 수 있다. 따라서 이러한 펄스 조건이 가공에 미치는 특성을 살펴보았다.

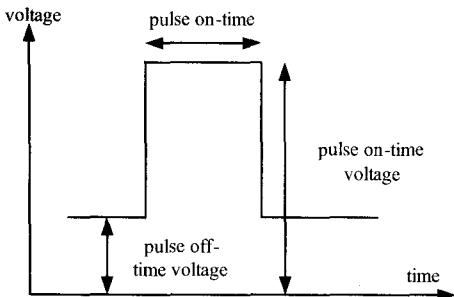


Fig. 3 Schematic diagram of pulse signal

### 2.2.1 펄스 휴지 기간 전압 (pulse off-time voltage)

미세 전해 가공을 위해서는 공구 전극에 인접한 부분에서 공작물의 전해 반응이 균일하게 일어나야 된다. 하지만, 동시에 공작물의 다른 표면에서는 반응이 일어나지 않도록 해야 한다. 따라서 펄스가 인가되는 동안에는 공작물에서 빠르게 반응이 일어나도록 하고, 휴지 기간에서는 반응이 억제되도록 하는 것이 바람직하다. 스테인리스 강과 같은 금속은 부동태막이 생성되는 전위가 존재하며 이 부동태막은 전해 반응을 억제한다.<sup>5,6</sup> 따라서 펄스 휴지 기간의 전위를 이 부동화 전위(passivating potential)로 설정해야 한다. 하지만 가공 영역에 부동태막이 치밀하게 생성되면 가공이 불가능해질 수도 있으므로 그 전위 조건을 잘 설정해야 한다.

금속의 반응 속도는 그 금속이 전해질 용액과의 접촉 부위에서 어떤 전위에 있느냐에 관계된다. 전위에 따라서 스테인리스 강의 전해 반응 전류의 크기를 나타내면 Fig. 4와 같은 순환 전압 전류 그림(cyclic voltammogram)을 얻을 수 있다. 그래프에서 전류가 증가하지 않는 영역이 전해 반응이 일어나지 않는 부동화 영역(passivation region)이며 그 보다 높은 전위에서 전류가 급격하게 증가하는 영역은 과부동화 영역(transpassive region)이다. 따라서

전해 반응이 공작물 표면 전체에서 일어나는 것을 방지하기 위해 펄스 휴지 기간의 전위를 부동화 영역과 과부동화 영역 사이로 설정하는 것이 바람직하다.

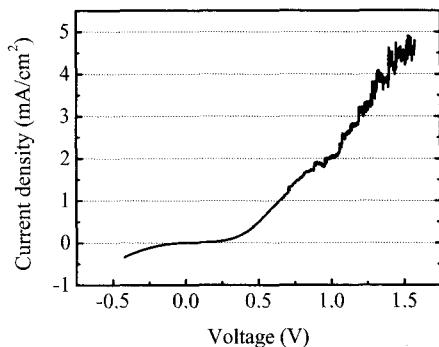


Fig. 4 Cyclic voltammogram (STS 304, two-electrode system, 0.1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; Pt was used for counter electrode and reference electrode)

펄스 휴지 기간 전압이 가공에 미치는 영향을 알아보기 위해 각기 다른 전압을 인가하여 구멍 가공을 하였다. 먼저 펄스 휴지 기간 전압을 부동화 영역인 0 mV으로 설정하여 구멍을 가공하였다. 펄스 전압은 6 V, 펄스 폭은 60 ns, 펄스 주기는 1 μs이다. Fig. 5는 이 펄스를 인가하여 스테인리스 강에 구멍을 가공할 때 전극의 이송을 나타낸 그레프이다. 가공 도중에 단락이 많이 발생하여 전극이 뒤로 이송하는 것을 볼 수 있으며 그 때문에 가공 시간도 많이 걸리는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 가공한 구멍의 사진이다. 사진에서 보는 것처럼 구멍 가운데에 원래의 재료 표면과는 다른 물질이 보인다. 이 물질은 일반적인 부동태막과 다른 공극 구조(porous structure)를 가지고 있다. 일반적으로 스테인리스 강에서 생기는 부동태막은 두께가 5 nm 이내이며 매우 치밀한 구조를 갖고 있다.<sup>7</sup> Fujimoto<sup>8</sup> 등은 스테인리스 강(304 SS)에 사각 파형의 전위 펄스를 인가하여 펄스의 전압(on-time voltage)과 휴지 기간의 전압(off-time voltage)이 각각 부동화 영역과 과부동화 영역에 위치하는 경우 표면에 매우 두꺼운 공극 구조의 산화막(porous oxide film)이 형성된다는 것을 보였다. 이 연구에 따르면, 펄스 전압이 과부동화 영역인 경우, Cr<sup>6+</sup> 이온이 용출되었다가, 펄스 휴지 기간에는, Cr<sup>3+</sup> 이

온으로 환원이 된다. 이 때  $\text{Fe}^{3+}$  이온에서 환원된  $\text{Fe}^{2+}$  이온과 함께 공극 구조의 산화막을 형성한다. 이 산화막의 두께는 펄스를 인가한 시간에 비례하여 증가한다.

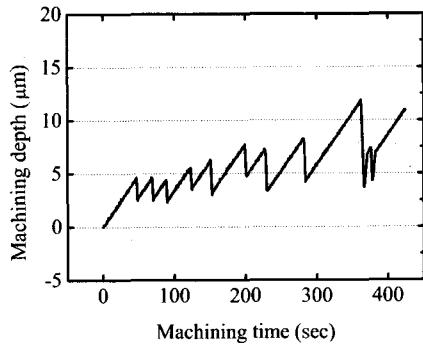


Fig. 5 Electrode feed during machining of 10  $\mu\text{m}$  deep hole (6 V, 60 ns pulse on-time, 400 mV off-time voltage)

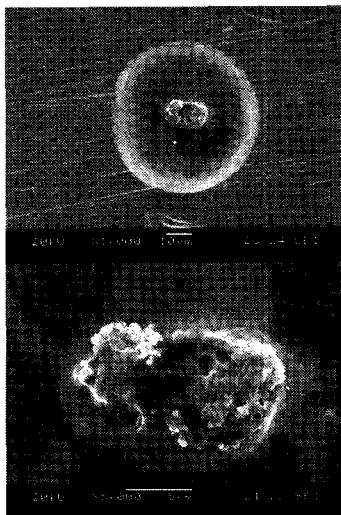


Fig. 6 Electrochemically machined hole and thick oxide layer (6 V, 60 ns pulse on-time, 0 mV off-time voltage)

이 물질의 성분을 알아 보기 위해 EDX (energy dispersive X-ray analysis)를 사용하여 성분 분석하였다. Fig. 7은 구멍 표면의 EDX 분석 결과를 나타낸 그림이다. 공극 구조의 물질은 원래의 스테인리스 강 (Fig. 7(a)) 보다 산소와 크롬을 상대적으로 많이 포함하는 것을 볼 수 있다(Fig. 7(b)). 따라서 이 물질은 크롬 산화막으로 판단된다. 즉 스테인리스 강

표면에 이 크롬 산화막이 형성되어 가공이 진행되지 못하고 단락을 반복하게 된다. Fig. 8은 펄스 휴지 기간 전압이 0 mV인 펄스를 사용하여 가공했을 때 생성된 산화막의 예이다.

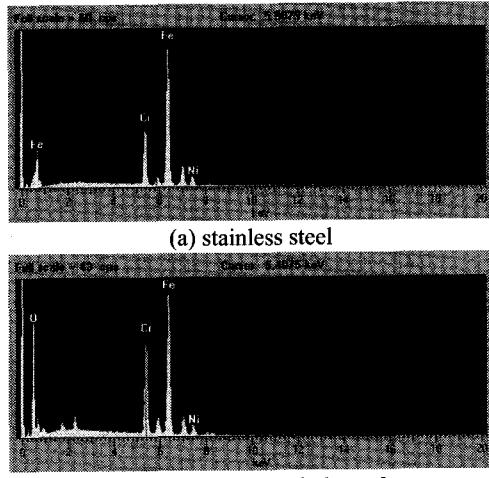


Fig. 7 EDX analysis of machined hole surface (STS 304, 6 V, 60 ns pulse on-time, 0 mV off-time voltage)

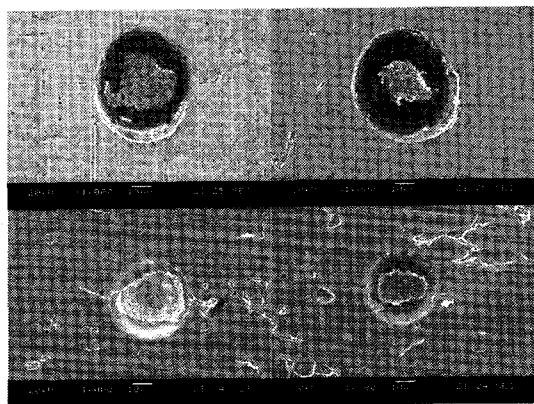


Fig. 8 Examples of thick oxide layers on stainless steel (STS 304, 6 V, 60 ns pulse on-time, 0 mV off-time voltage)

펄스 휴지 기간 전압 0 mV 와 비교하기 위해 부동화 전위와 과부동화 전위의 경계 부근인 400 mV로 설정하여 가공하였다. 다른 가공 조건은 앞의 실험과 동일하다. Fig. 9는 구멍 가공시 전극의 이송을 나타내는 그래프이다. 앞의 실험과는 달리 가공 중에 단락이 발생하지 않았으며 가공도 원활

하게 되었다. Fig. 10 은 이렇게 가공된 구멍의 SEM 사진이며 앞선 실험과 달리 산화막이 없이 균일하게 가공된 것을 볼 수 있다. Fig. 11 은 이 구멍 표면의 EDX 분석 결과이며 Fig. 7(a)의 스테인리스 강의 성분과 동일한 것을 볼 수 있다. 따라서 금속 표면 전체의 전해 반응을 방지하면서 전극 주변에서만 반응을 유지하기 위해 펄스 휴지 기간 전압을 부동화 전위와 과부동화 전위의 경계 부분으로 설정해야 되는 것을 알 수 있다.

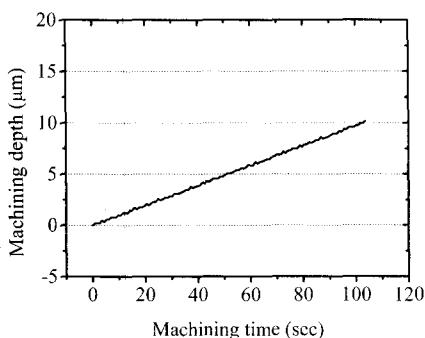


Fig. 9 Electrode feed during machining of 10  $\mu\text{m}$  deep hole (6 V, 60 ns pulse on-time, 400 mV off-time voltage)

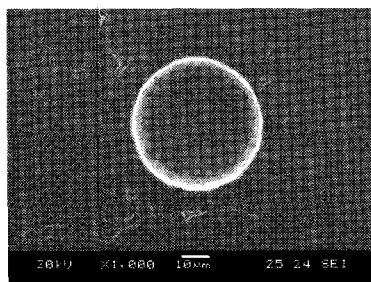


Fig. 10 Electrochemically machined hole surface (6 V, 60 ns pulse on-time, 400 mV off-time voltage)

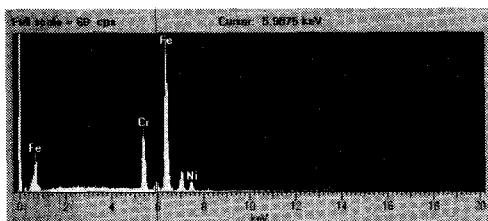


Fig. 11 EDX analysis of machined hole surface (6 V, 60 ns pulse on-time, 400 mV off-time voltage)

## 2.2.2 펄스 전압과 펄스 폭

펄스 휴지 기간의 전압이 부동태막 형성과 관련이 있는 것에 비해 펄스 폭과 펄스 전압은 가공 속도와 가공 간극, 즉 가공 정밀도와 관계가 있다. 전해 반응 속도는 인가된 전위에 지수 함수적으로 증가한다.<sup>6</sup> 펄스 폭과 펄스 전압이 가공 간극에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 지름 60  $\mu\text{m}$ 의 전극으로 펄스 폭과 펄스 전압을 달리 하여 10  $\mu\text{m}$  깊이의 구멍을 가공한 뒤 간극을 측정하였다. Fig. 12 과 Fig. 13 은 펄스 전압과 펄스 폭이 증가할수록 가공 간극이 증가하는 것을 보이고 있다. 따라서 가공 정밀도를 높이기 위해서는 폭이 작고, 전압이 낮은 펄스를 사용하는 것이 바람직하다. 하지만 전압이 4 V 이하가 되거나, 펄스 폭이 40 ns 이하가 되면 가공 속도가 매우 떨어지고 전극과 가공물의 단락도 많이 발생하여 가공 자체가 안되는 경우도 발생하였다. 4 V 의 전위가 스테인리스 강의 전해 반응이 원활히 이루어지는 과부동화 영역임에도 불구하고 가공이 어려운 이유는 펄스 폭이 너무 짧아 이온 전달이 어렵기 때문이다. 따라서 원활한 가공을 위하여 어느 일정치 이상의 펄스 전압과 펄스 폭이 필요하다. 미세 전해 가공에서 단락이 많이 발생하면 가공 표면 품질에 영향을 미칠 수 있으므로 본 논문에서는 원활한 가공을 위한 펄스 조건으로 60 ns 폭의 6 V 펄스를 선정하였다.

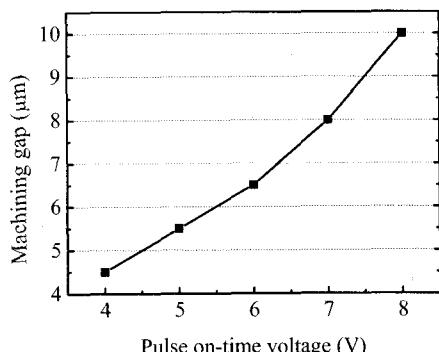


Fig. 12 The machining gap according to the pulse amplitude (0.1 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 60 ns pulse on-time, 1  $\mu\text{s}$  period)

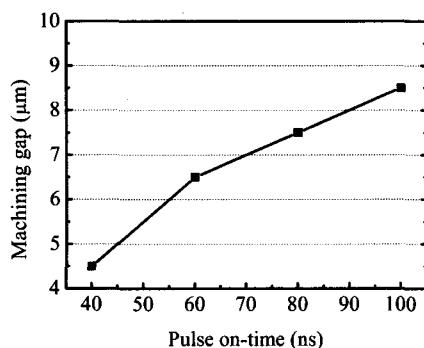


Fig. 13 The machining gap according to the pulse on-time  
(0.1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 6 V, 1 μs period)

### 2.3 가공 시간

Fig. 14는 가공 시간에 따른 간극의 변화를 나타낸 그래프이다. 앞선 실험과 마찬가지로 지름 35 μm의 전극으로 약 0.1 μm/s의 속도로 깊이 10 μm의 구멍을 가공하고 깊이 10 μm 위치에서 일정 시간동안 머무른 뒤 각각의 시간마다 가공된 구멍의 직경을 측정하여 가공 간극을 나타내었다. 가공 시간이 길어질수록 간극은 계속 증가하다가, 시간이 지나면서 점차 그 속도가 느려진다. 또한 간극이 어느 일정 치로 수렴하는 것을 알 수 있다. 일정 시간이 지나면 가공 간극이 수렴하는 것을 이용하여 펄스 폭을 달리 하여 구멍의 테이퍼를 줄일 수 있으며<sup>3</sup>, 특별한 형태의 전극을 이용하여 미세 전해 밀링에서 테이퍼 없는 3차원 구조물을 가공할 수 있다.<sup>9</sup>

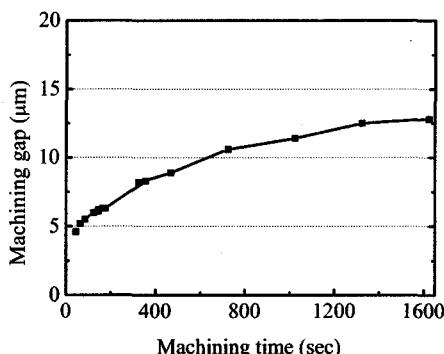


Fig. 14 The machining gap according to the machining time (0.1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

### 3. 미세 전해 구멍 가공

앞의 실험을 통해 구해진 가공 조건으로 스테인리스 강에 미세 구멍 가공을 하였다. 전극은 지름 300 μm의 텅스텐 카바이드 봉을 와이어 방전 가공을 이용하여 지름 25 μm으로 가공한 뒤 사용하였다. 전극의 이송 속도는 약 0.1 μm/s이며 가공 시간은 약 17 분 정도가 소요되었다. 가공 도중에 단락은 거의 발생하지 않았다. 구멍의 지름은 약 40 μm 이내이며 입구의 지름이 출구보다 크다. 이는 가공 시간이 입구 측이 상대적으로 길기 때문이다. 따라서 상대적으로 가공 간극이 크고, 모서리도 날카롭지 못하다. 보다 높은 품질의 구멍 가공을 위한 연구가 좀 더 필요하다.

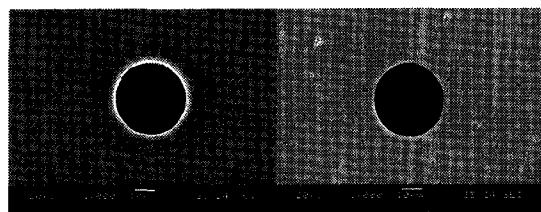


Fig. 15 Micro hole machined by micro ECM (STS 304, Ø 40 μm, 100 μm depth, 6 V, 60 ns pulse on-time, 400 mV off-time voltage)

### 4. 결론

초단 펄스를 이용한 미세 구멍 가공의 가공 특성에 대해 연구를 하였다. 전해 가공에서 전해액과 인가된 펄스의 조건에 따라 가공 간극의 변화를 살펴 보았으며 적절한 가공 조건을 제시하였다. 제시한 가공 조건을 이용하여 스테인리스 강에 깊이 100 μm, 지름 약 40 μm의 미세 구멍을 가공하였다. 가공 조건에 따른 가공 간극 특성은 미세 전해 가공을 이용한 구멍 가공이나 3 차원 구조물 가공에 활용할 수 있다.

### 참고문헌

- Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
- Masuzawa, T., "State of the Art of Micromachining,"

- Annals of the CIRP, Vol. 49, No. 2, pp. 473-488, 2000.
- 3. Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Localized Electro-chemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 8, pp. 213-220, 2003.
  - 4. Cagnon, L., Kirchner, V., Kock, M., Schuster, R., Ertl, G., Gmelin, W. T. and Kück, H., "Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultra Short Voltage Pulses," Zeitschrift für Physikalische Chemie, Vol. 217, pp. 299-313, 2003.
  - 5. Bard, A. J. and Faulkner, L. R., "Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications," 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.
  - 6. Paik, W. K. and Park, S. M., "Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes," Cheongmoongak, Seoul, 2001.
  - 7. Kaesche, H., "Corrosion of Metals," Springer, Berlin, 2003.
  - 8. Fujimoto, S., Tsujino, K., Shibata, T., "Growth and Properties of Cr-rich Thick and Porous Oxide Films on Type 304 Stainless Steel Formed by Square Wave Potential Pulse Polarisation," Electrochimica Acta, Vol. 47, pp. 543-551, 2001.
  - 9. Kim, B. H., Ryu, S. H., Choi, D. K., Chu, C. N., "Micro Electrochemical Milling," J. of Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, pp. 124-129, 2005.