

텅스텐 미세 전극을 이용한 전해가공 Electrochemical Machining Using Tungsten Microelectrode

*#류시형¹, 유종선², 변정원³

*#S. H. Ryu(ryu5449@chonbuk.ac.kr)¹, J. S. Yu², J. W. Byun³

¹ 전북대학교 기계공학과, ²전북대학교 대학원 기계공학과, ³서울대학교 대학원 기계항공공학부

Key words : Electrochemical machining, Tungsten microelectrode, Micro drilling, Micro milling, Citric acid, Stainless steel

1. 서론

초단펄스를 이용하면 전해가공을 통해 마이크로미터 이하의 미세 구조물 제작이 가능하다는 획기적인 연구 성과가 보고된 이후에 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻³ Ahn은 황산 전해액을 이용하여 스테인레스 스틸에 미세 구멍을 가공하고 전해 조건에 따른 구멍의 형상과 가공 간극의 크기를 고찰하였다.⁴ Kim은 미세 방전을 이용하여 특수형상의 공구 전극을 제작하고 구멍 가공이나 캐비티 가공에서 형상 정밀도를 향상시키는 연구를 수행하였다.⁵ Park은 대면적 미세 전해가공 기술 개발을 위해 전극 어레이를 제작하고 초단펄스의 순차적 분배를 통해 다수의 미세 구멍을 동시에 가공하였다.⁶ Ryu는 환경친화적 전해가공 기술을 개발할 목적으로 구연산 수용액에서 미세 구멍이나 캐비티를 가공하는 연구를 수행한 바 있다.⁷ 그러나, 테이퍼 형상의 STM 프로브를 공구 전극으로 사용함으로써 미세 구멍 또한 테이퍼진 형태로 가공되었으며 미세 캐비티 가공에서도 형상 정밀도가 좋지 않았다. 본 연구에서는 구연산 전해액에서 직경 10 μm 의 텅스텐 미세 전극을 이용하여 스테인레스 스틸에 진직도가 높고 크기가 작은 미세 구멍을 가공하고, 미세 공구 전극의 삼차원 이송을 통한 전해밀링의 가능성도 함께 살펴보았다.

2. 텅스텐 미세 전극을 이용한 전해 가공

미세 전극의 직경이 작아지면 전해 가공시 생성되는 산소 기포에 의하여 공구 전극이 흔들리게 되고 과도한 기포 발생은 형상 정밀도를 저해하는 요인으로 작용한다. 본 연구에서 사용된 미세 전극은 Nilaco 사의 직경 10 μm 텅스텐 와이어이며, 전해 가공 실험에서 공구 전극의 길이는 1~2 mm의 범위를 사용하였다. Fig. 1에서 보듯이 피에조 스테이지 위에 전해셀을 위치시켜 3 축 이송 제어하며, 펄스발생기로 공구 전극과 공작물의 양단에 펄스를 인가하여 구연산 수용액에서 SS 304를 전해 용출시킨다. 고주파 오실로스코프와 비전시스템을 이용하여 극간 전압을 모니터링하고 전해 상태를 관찰한다. 2 mm 이상으로 공구 전극의 길이가 길어지면 발생하는 산소 기포에 의해 공구 끝이 과도하게 흔들리게 되며 이러한 경우 입구부의 형상이 좋지 않았다.

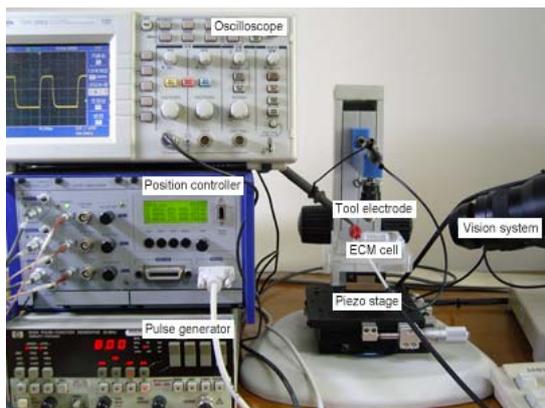


Fig. 1 Micro electrochemical machining system

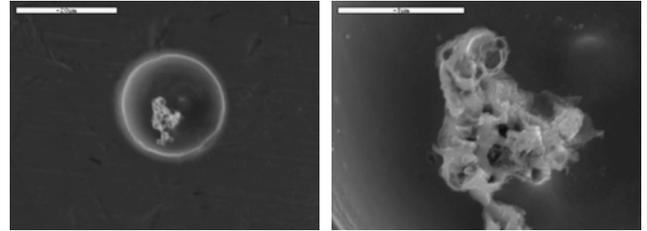
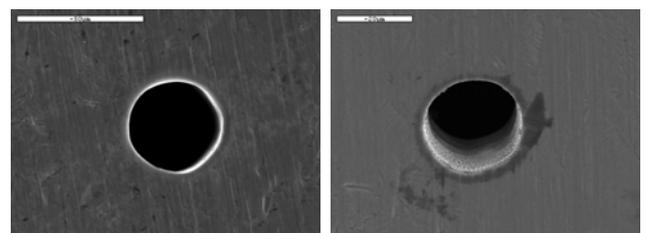


Fig. 2 Metal oxide generation during electrochemical drilling

공구 전극의 길이가 1 mm 이하에서는 전해액의 수면과 미세 전극 체결부 사이의 거리가 가까워, 모세관 현상으로 인해 전해액이 공구 체결부까지 상승하여 전해액 브릿지를 형성하게 됨으로써 원활한 가공이 진행되지 않았다. 최대 전압의 크기가 13 V 이상으로 커지고 공구 전극의 길이가 길어질 경우에는 공구 전극과 공작물의 단락 시 공구의 중간부가 적열되어 파괴되거나, 공구의 끝이 공작물에 눌러 붙게 되는 일종의 마이크로 전기 용접 현상이 발생하였다. 펄스 지속 시간이 300 nsec 이하인 경우에는 가공 중 전기적 단락이 일어나지 않았음에도 불구하고, Fig. 2와 같이 금속 산화물이 구멍 내부에 형성되어 공작물이 관통되지 않았다. 이러한 금속 산화물은 미세 전극을 휘어지게 하면서 구멍 내부로의 전극 이송을 방해하기 때문에 구멍이 관통되지 않는 것으로 생각된다. 최대 전압(peak voltage)이 11.5 V 이고 공구 전극 전압(off-time voltage)이 -3.5 V 일 때 전극간의 단락이 발생하지 않으면서 형상이 우수한 미세 구멍이나 홈을 가공할 수 있었다. 펄스의 길이는 350~380 nsec의 범위에서 가공 특성이 우수하였으며, 펄스의 주파수는 1 MHz로 유지하였다.

3. 실험 및 결과

Fig. 3 (a)는 100 μm 두께의 SS 304에 0.1 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 이송 속도로 미세 구멍을 가공한 사진이다. 입구부 직경은 37 μm 이었으며 출구부 직경은 34 μm 이었다. STM 텅스텐 프로브를 전극으로 사용했을 때에 비해 관통된 구멍의 크기가 작아졌으며, 테이퍼 형상도 크게 개선되었음을 확인할 수 있다.⁷ 공구의 직경을 고려할 때 가공 간극의 크기는 13 μm 임을 알 수 있다. Fig. 3 (b)는 50 μm 두께의 SS 304에 구멍을 가공한 사진으로, 입구부 직경은 26 μm 이며 출구부 직경은 23 μm 이다. 따라서, 가공 간극은 8 μm 이며 A/R은 2에 해당한다.



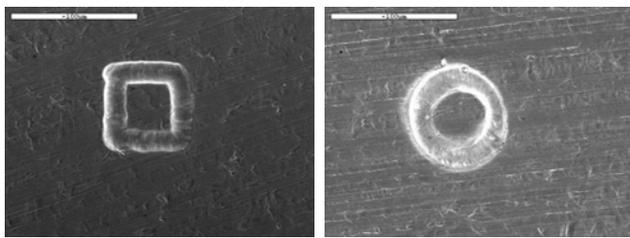
(a) ϕ 37 μm with 100 μm in depth (b) ϕ 26 μm with 50 μm in depth

Fig. 3 Micro hole drilling

Fig. 3의 실험 결과를 볼 때 인가된 펄스 조건이 완벽한 전해 국부화 조건이라고 볼 수 없으나, 펄스의 길이가

더욱 짧아지게 되면 구멍이 관통되지 않는 문제가 발생하였다. 이러한 원인은 가공 간극이 작아질 경우 용해된 금속 이온이 확산이나 대류에 의해 구멍 밖으로 배출되기가 쉽지 않으며, 발생하는 산소 기포가 전해액의 강제 대류를 돕는 것으로 해석할 수 있다. 결국 과도한 기포는 가공물의 형상을 왜곡시키기도 하지만, 전해액의 대류를 활발하게 하여 미세 구멍 관통이 가능하게 함을 알 수 있다. Fig. 3 (b)의 SEM 사진에서 구멍 내벽에 1 μm 이하의 분화구 형상들이 다수 관찰되었으며, 이러한 원인이 SS 304 합금 성분의 전해 특성이나 재료 조직에 기인하는 것인지, 또는 기포가 미세 전극을 덮음으로 인해 발생할 수 있는 방전가공에 의한 것인지 현재로서는 판단하기 어렵다.

Fig. 4는 텅스텐 미세 전극의 X, Y 축 이송을 통해 제작된 미세 사각형 그루브와 원형 그루브를 나타낸다. 3 μm 의 스텝으로 5 회 가공하였으며, 공구 전극의 이송 속도는 1 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이다. 사각형 그루브에서 공구 전극의 흔들림이 보이고 원형 그루브의 경우에도 형상의 왜곡이 관찰되지만, 직경 10 μm 텅스텐 전극을 이용한 미세 홈 가공이 가능함을 확인할 수 있다. 미세 홈의 폭은 사각형과 원형에 관계없이 18 μm 로 측정되었으며, 가공 간극은 4 μm 이다.



(a) Micro square groove (b) Micro circular groove
Fig. 4 Micro groove machining

미세 구멍이나 홈 가공 등 단순 형상의 미세 전해 밀링 기술을 확장하여 자유곡면의 삼차원 전해 기술을 개발할 필요성이 있다. Fig. 5는 미세 전극의 3 축 이송을 통하여 SS 304에 손바닥 형상을 가공한 사진이다. 손바닥의 길이와 폭은 각각 80 μm 과 65 μm 이다. 전극의 이송 속도는 1 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이며 3 μm 스텝으로 2 회 가공하였다. 손가락 형상을 포함하여 가공된 형상이 비교적 뚜렷함을 볼 수 있다. 따라서, 직경 10 μm 의 미세 전극의 3 축 이송을 통하여 복잡한 형상의 전해 밀링이 가능함을 확인할 수 있다.

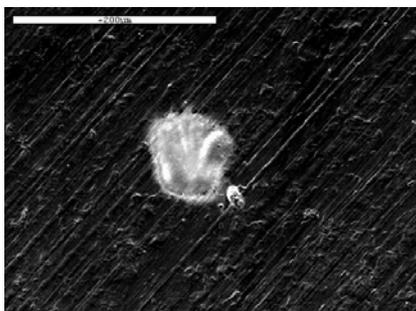


Fig. 5 Micro hand fabricated by electrochemical milling

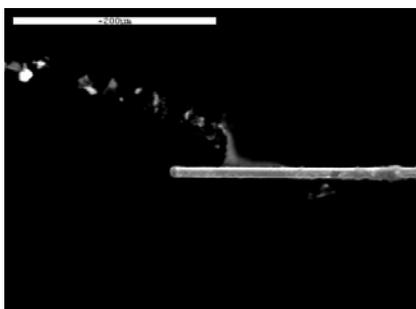


Fig. 6 Tungsten microelectrode after machining

Fig. 6은 가공 후의 텅스텐 미세 전극의 형상을 나타낸다. STM 프로브를 이용한 전해 실험에서도 언급했듯이 용출 금속이나 탄소 등이 공구 전극에 증착되지 않았으며, 간혹 다공성 구조의 텅스텐 산화물이 공구 전극에서 관찰되었다.⁷ 다공성 구조의 산화물에 의한 Fig. 3 (b)의 구멍 내벽 크레이터 발생 가능성을 생각해 볼 수 있으나, 공구 전극이 가공 중 계속 이송된다고 보았을 때 연관성은 높지 않은 것으로 판단된다.

4. 결론

직경 10 μm 의 텅스텐 미세 전극을 이용하여 스테인레스 스틸에 미세 구멍과 홈, 삼차원 형상 구조를 가공하였다. 0.3 M 구연산 전해액에서 최대 전압 11.5 V, 오프 타임 전압 -3.5 V, 펄스 주파수 1 MHz 와 펄스 지속 시간 350~380 nsec 의 조건에서 가공된 미세 구조물의 형상이 우수하였다. 두께 100 μm 와 두께 50 μm 의 SS 304 판에 각각 직경 37 μm 와 직경 26 μm 의 진직도가 우수한 미세 구멍을 가공하였다. 공구 전극의 X, Y 방향 이송을 통하여 홈의 폭이 18 μm 인 사각형과 원형 그루브를 가공하였다. 또한, 삼차원 전해 밀링을 통하여 길이와 폭이 각각 80 μm 과 65 μm 인 손바닥 형상을 SS 304 판 위에 가공하였다. 고전압하에서 공구 전극의 길이가 길어질 때 미세 전극의 적열 파괴와 마이크로 용접 현상이 관찰되었으며, 공구 길이가 짧아질 때는 모세관 현상이 일어나 원활한 전해 작용을 방해하였다. 미세 전극 사용 시 과도한 산소 기포는 공구 전극을 흔들어 가공성에 좋지 않은 영향을 주지만 전해액을 구멍 내부로 공급하는 긍정적인 역할도 동시에 수행한다. 300 nsec 이하의 펄스 조건에서의 구멍 내부의 금속 산화물 생성과 억제 방법, 구멍 가공에서 내벽에 형성되는 미세 분화구 구조에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

후기

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00029).

참고문헌

- Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P., and Etrl, G., "Electrochemical Micromachining," *Science*, **289**, 98-101, 2000.
- Kirchner, V., Cagnon, L., Schuster, R., and Etrl, G., "Electrochemical Machining of Stainless Steel Microelements with Ultrashort Voltage Pulses," *Applied Physics Letters*, **79**, 1721-1723, 2001.
- Rajurkar, K. P., Levy, G., Malshe, A., Sundaram, M. M., McGeough, J., Hu, X., Resnick, R., and DeSilva, A., "Micro and Nano Machining by Electro-Physical and Chemical Processes," *Annals of the CIRP*, **55**, 643-666, 2006.
- Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K., and Chu, C. N., "Localized Electro-chemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, **20**, 213-220, 2003.
- Kim, B. H., "Taper Reduction by Disk-type Electrode in Micro Electrochemical Machining," Ph. D. dissertation, Seoul National University, 2005.
- Park, M. S., "Micro Electrochemical Machining Using Multiple Tool Electrodes," Ph. D. dissertation, Seoul National University, 2007.
- Ryu, S. H., "Micro Electrochemical Machining of Stainless Steel Using Citric Acid," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, **25**, 134-140, 2008.