

전해방전 가공을 이용한 유리의 고세장비 미세 채널 가공 Fabrication of high aspect ratio glass microchannel using electrochemical discharge machining process

*한민섭, #민병권, 이상조

*M.-S. Han, #B.-K. Min (bkmin@yonsei.ac.kr), S. J. Lee
연세대학교 기계공학부

Key words : Surface roughening, Glass machining, ECDM, SACE

1. 서론

전해방전 가공은 초음파, 레이저, 파우더 블래스팅 및 습식 에칭 가공과 더불어 비전도성 재료의 미세 가공 방법의 하나로 제시되어 왔다. 전해방전 가공은 전해작용 중 음전극 표면에서 생성되는 기체 절연막에 의해 전기적인 스파크가 발생하는 현상을 응용한 것으로 방전 가공으로 가공이 어려운 유리 및 세라믹 등과 같은 고경도 취성 재료의 미세 구멍 또는 미세 채널 가공에 적용할 수 있다. 가공용 음전극은 일반적으로 텅스텐, 구리 등과 같은 전도성 재료의 원통형 전극을 주로 사용하는데 이 때 전극 끝단에서 발생하는 스파크의 열에너지를 이용하여 재료를 제거할 수 있다.¹

그러나 전해방전 가공은 기체 절연막의 불균일한 형성으로 인하여 가공 정밀도 및 표면 품질이 낮은 문제점을 지니고 있다. Zheng et al 은 펄스 전압과 전극의 회전(tool rotation)을 이용하여 미세 채널 및 3 차원 구조물 가공의 형상 정밀도를 개선하였다.² 펄스 전압은 주기적인 off time을 통해 스파크 열에너지가 가공물에 지속적으로 주입되는 것을 억제하고 전해액의 냉각효과를 향상시키는 장점을 지니고 있다. Han et al 은 측면 절연 전극을 이용하여 전해작용을 국소화(localization)하여 기체 절연막의 기하학적 안정화를 유도하였다.³

전해방전 가공이 지니고 있는 또 다른 단점은 제한된 가공 깊이로 인한 낮은 재료 제거율(material removal rate)이다. 미세 구멍 가공의 경우 가공 깊이가 증가할수록 전극과 가공물 사이로의 전해액의 공급이 어렵기 때문에 스파크 발생 빈도가 급격하게 감소한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 Wüthrich et al 은 전극을 30 Hz의 낮은 주파수로 진동시켜 재료 제거율을 2 배 향상시켰으며⁴ Han et al 은 전해액내의 초음파 진동을 적용하여 구멍의 가공 깊이 및 형상 정밀도를 향상시켰다.⁵

본 연구에서는 전해방전을 이용한 미세 채널 가공에서의 가공 깊이 향상을 위해 방전가공을 이용하여 전극 표면 거칠기를 증가시켜 전기장 집중 효과를 향상시켰다. 이를 이용하여 미세 채널 가공 실험을 수행한 결과 전극 끝단 및 측면에서 활발한 스파크 발생을 유도하여 가공 깊이를 향상시킬 수 있었다.

2. 미세 채널 가공

그림 1 은 미세 채널 가공을 위해 제작된 전해방전 전극을 보여주고 있다. 초기 직경 200 μm , 표면 거칠기(R_a) 0.5 μm 의 황동 전극을 방전 가공 공정을 이용하여 직경 100 μm , 표면 거칠기 1.5 μm 전극으로 제작하였다. 기존 일반 전극의 경우 전극 끝 단에서의 스파크 집중으로 인하여 가공 깊이에 제한이 따른다. 그림 2 는 일반 전극($R_a=0.5 \mu\text{m}$) 과 표면 거칠기가 증가한 전극($R_a=1.5 \mu\text{m}$)에서의 스파크 분포도를 비교하고 있다.

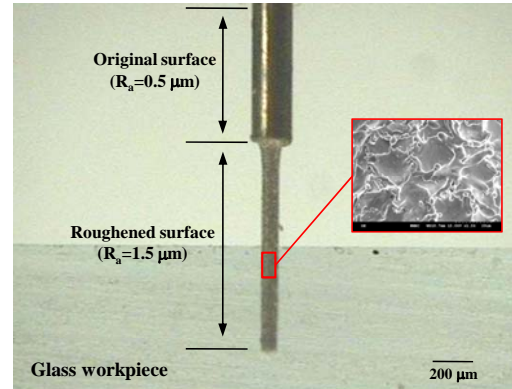
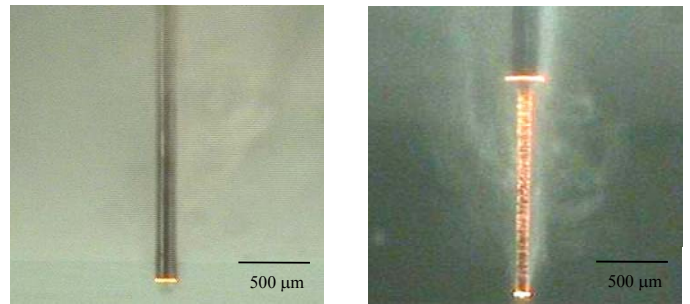


Figure 1. Image of surface roughened tool



(a) Conventional tool

(b) Surface roughened tool

Fig. 2 Comparison of spark discharge activity at tool side surface: applied voltage: 35 VDC (pulse condition: 100 Hz, 50% duty); electrolyte: 20 w. % NaOH

전극의 표면 거칠기가 절연과피 강도에 미치는 영향을 설명하기 위해 McAllister et al 은 surface roughness factor (ξ)를 아래와 같은 식으로 정의하였다.⁶

$$\xi = \zeta_a / \zeta \quad (1)$$

ζ_a : Actual curvature factor

ζ : Curvature factor of Idealized smooth surface

이때, ζ_a 과 ζ 는 각각 실제 전극의 표면 곡률(actual surface curvature)과 이상적인 표면 곡률(idealized surface curvature)을 나타낸다. 즉 전극 표면에 존재하는 미세한 공동(micro-cavity) 또는 미세한 돌출(micro-protrusion)과 같은 표면 결함(surface defects)은 절연 파괴 강도를 낮춰주는 효과를 통해 동일한 입력 전압 조건에서 스파크 발생을 보다 강화시킬 수 있다. 이와 유사한 원리로 Han et al 은 전해액에 미세한 전도성 입자를 첨가하여 기체 절연막의 절연과피 강도를 저하시켜 보다 낮은 에너지의 스파크 발생을 유도한 바가 있다. 그러나 전극 표면에서의 스파크 위치를 제어하는 데는 그 한계를 지니고 있다.

Table 1 Experimental condition

Parameters	Value
Tool	Brass (diameter: 100 μm)
Tool surface roughness	Original: 0.5 μm ; roughened: 1.5 μm
Electrolyte	20 wt. % NaOH
Applied voltage	35 VDC (100Hz, 50% duty)

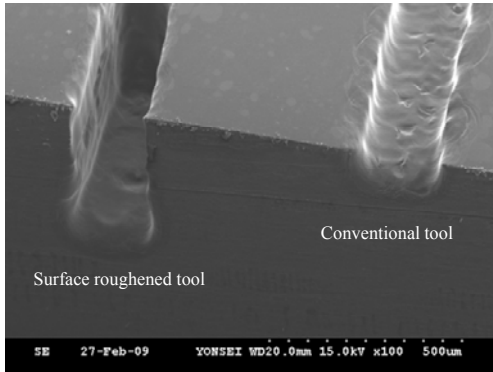
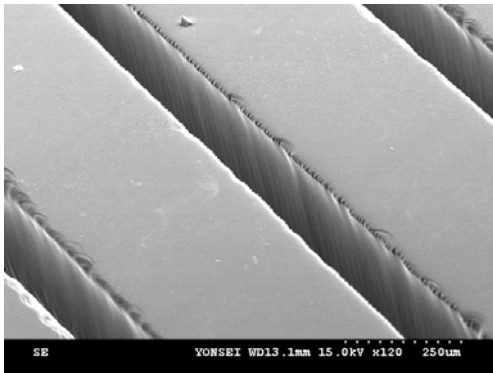
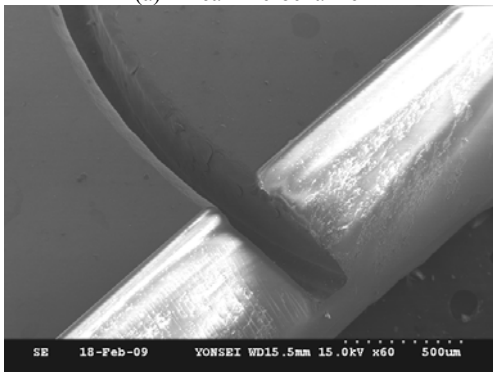


Fig. 3 Comparison of microchannel fabrication using conventional and surface roughened tool



(a) Linear microchannel



(b) Circular microchannel

Fig. 4 Microchannel fabrication using a surface roughened tool

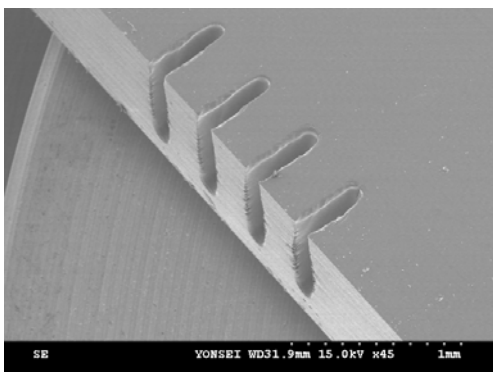


Fig. 5 Same machined channels using surface roughened tool

표 1 은 본 연구에서 적용된 가공 조건을 보여주고 있다. 방전 가공을 통해 표면 거칠기 1.5 μm , 직경 100 μm 의 황동 전극을 제작하였다. 이를 이용하여 35 VDC, 100 Hz, 50 % duty 의 펄스 전압을 입력하여 2 $\mu\text{m/s}$ 의 가공속도로 미세 채널을 제작하였다. 일반 전극을 이용한 밀링 가공과 본 연구에서 제안한 거친 표면의 전극을 이용한 밀링 가공 결과를 그림 3 에서 비교하고 있다. 기존 전해방전을 이용한 밀링 가공의 경우 스파크의 발생이 전극 끝 단에 집중되기 때문에 가공 깊이가 매우 낮아(일반적으로 약 200 μm 내외) 고 세장비 가공을 위해서는 layer-by-layer method 가 주로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 방법은 가공 시간의 증가로 인한 낮은 재료제거율의 문제를 지니고 있다. 그러나 전극 측면의 표면 거칠기를 상승시킨 결과 그림 4 와 그림 5 에서 와 같이 가공 깊이를 2 배 이상 증가시켰으며 높은 가공 재현성(machining repeatability)을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 전해방전가공을 이용한 유리 미세 채널 가공에서의 가공 깊이 향상을 위해 전극 측면의 표면 거칠기를 상승시켰다. 방전 가공을 이용하여 전극 표면에 미세한 크레이터(micro-crater)를 생성시켜 표면 거칠기(Ra)를 0.5 μm 에서 1.5 μm 로 10 배 상승시켰다. 그 결과 거친 표면에서의 전기장 집중 효과로 인하여 동일한 입력 전압 하에서 스파크 발생을 강화시킬 수 있었다. 이를 이용하여 미세 채널 가공 실험을 수행한 결과 전극 끝 단 및 측면에서 스파크 발생을 강화하여 가공 깊이를 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

1. Wüthrich, R. and Fascio, V., "Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon—an overview," International Journal of Machine Tools and Manufacture **45** 1095–1108, 2005
2. Zheng, Z. P., Cheng, W. H., and Huang, F. Y., "3D microstructuring of Pyrex glass using the electrochemical discharge machining process," Journal of Micromechanics and Microengineering, **17**, 960–966, 2007.
3. Han, M.-S., Min, B.-K., and Lee, S. J., "Modeling gas film formation in electrochemical discharge machining processes using a side-insulated electrode," Journal of Micromechanics and Microengineering, **18**, 045019, 2008.
4. Wüthrich, R., Despont, B., Maillard, P., and Bleuler, H., "Improving the material removal rate in spark-assisted chemical engraving (SACE) gravity-feed micro-hole drilling by tool vibration," Journal of Micromechanics and Microengineering, **16**, N28–N31, 2006.
5. Han, M.-S., Min, B.-K., and Lee, S. J., "Geometric improvement of electrochemical discharge micro-drilling using ultrasonic vibrated electrolyte," Journal of Micromechanics and Microengineering. (accepted)
6. Maillard P., Despont B., Bleuler H. and Wüthrich, R., "Geometrical characterization of micro-holes drilled in glass by gravity-feed with spark assisted chemical engraving (SACE)," Journal of Micromechanics and Microengineering, **17**, 1343-1349, 2007