PCD 공구를 이용한 전해방전-기계적밀링 하이브리드 가공 공정

Electrochemical discharge-mechanical milling hybrid machining process using PCD microtool

*한민섭, 허세곤, 김 웅, #민병권, 이상조
*M.-S. Han, S. Heo, W. Kim, #B.-K. Min (bkmin@yonsei.ac.kr) and S. J. Lee
연세대학교 기계공학부

Key words : Polycrystalline diamond tool, electrochemical discharge, gas film

1. 서론

전해방전 가공은 전해작용 중 기체 방전에 의해 음전극에서 발생하는 열에너지를 이용한 특수 가공법의 하나이다. 방전 가공과는 달리 가공전극 주변에 생성된 기체 절연막이 절연 매개체 역할을 수행하여 방전을 발생시키기 때문에 비전도성 재질인 유리, 또는 세라믹 등의 미세 가공이 가능하다.[1] 그러나 전해방전 가공 시 스파크 열 에너지의 불균일성은 가공 재현성 및 정밀도를 저하시키는 가장 큰 원인 중의 하나이다. 이를 극복하기 위해 제시된 연구들로는 펄스 전압 및 측면 절연 전극의 사용 등을 예로 들 수 있다. 기체 절연막의 안정적인 생성 시간을 고려하면 40 VDC 가공 전압에 대해 약 2 msec 정도의 펄스 입력 시간이 주로 사용되고 있는데 이때 수백 rpm 의 공구 회전은 가공물 표면에 보다 균일한 열에너지를 전달하여 가공 정밀도를 향상시킬 수 있다.[2] 또한 측면 절연 전극의 사용은 기체 절연막의 보다 안정적인 형성을 유도하여 가공 에너지의 균일성을 증가시킨다.[3] 가공 속도 향상과 관련하여 Wüthrich et al 과 Han et al 은 각각 가공 전극과 전해액에 진동을 적용하여 전해액 순환 강화를 통해 재료 재거율 및 가공 깊이를 향상시켰다.[4,5] 미세 채널 가공 공정에서의 가공 깊이 향상을 위해서는 전극 표면에 마이크로 텍스쳐(micro-textures)를 형성하여 전극 측면에서의 스파크 발생을 강화시킨 예가 있다.[6] 가공전극의 표면 거칠기 증가는 기체 절연막 내의 전기장 집중효과를 유도하여 가공 전압을 낮추고 방전 주파수를 증가시킬 수 있다.

최근 유리, 세라믹 등과 같은 비전도성 취성재료의 미세 밀링 가공 용 공구로 PCD(Polycrystalline diamond)를 사용하고 있다. PCD 는 미세한 다이아몬드 입자와 결합재의 소결 공정을 통해 제조되는데 이때 결합재로 사용되는 텅스텐, 코발트 등의 입자에 의해 전기적 전도성을 지니게 되어 방전가공으로 미세 공구 제작이 가능하다. 주로 WEDG (wire electrical discharge grinding)을 통해 직경 수십 μm 의 원통형 공구를 제작하는데 추가 공정으로 레이저를 이용하여 특수한 형상의 절삭 날을 형성하는 방법도 제시 제시된 바 있다.[7] Morgan et al 은 미세 방전가공을 통해 제작된 직경 50 μm PCD 공구를 이용하여 유리의 미세 절삭가공을 수행하였다.[8] 연성모드 절삭공정 시 공구마모의 감소 및 1 nm 내외의 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그러나 연성모드 절삭가공은 1 μm 이내의 매우 낮은 가공 깊이와 느린 연삭 속도 등이 문제되고 있다. 본 연구에서는 유리의 미세 가공을 위한 전해방전 공정에서 PCD 공구를 적용하여 재료의 기계적 가공 및 열에너지 가공을 복합적으로 수행하는 방법을 제시하였다. 유리의 미세 밀링 가공 실험을 통해 가공 전압이 채널 형상 및 표면 품위에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 유리 미세 가공 실험

그림 1(a) 는 본 연구에서 적용된 가공용 PCD 공구를 보여준다. 초기 직경 1 mm 의 PCD blank 를 브레이징 공정을 통해 tool shank 에 접합한 후 WEDG 를 이용하여 직경 40 μm 미세 밀링 공구를 제작하였다.

방전 가공된 PCD 의 표면은 미세한 다이아몬드 입자들로 구성되어 있어 공구의 고속 회전을 통해 기계적 가공을 수행할 수 있다. 또한 다이아몬드 입자 사이에 존재하는 전도성 결합재는 전해작용을 통해 기체 절연막의 형성 및 전해방전을 유도할 수 있다. 이때 전해작용이 일어나는 전극의 실제 표면적은 기존의 일반 전극에 비해 매우 작아지기 때문에 보다 낮은 전압에서 미세한 방전 발생이 가능하고 절연막 형성 시간을 감소시킬 수 있다.[3]

표 1 과 그림 2 는 본 연구에서 적용한 실험 조건 및 이에 따른 미세 채널 가공 결과를 나타내고 있다. 기계적 밀링 공정의 경우(V_a=0) 균일한 채널 폭을 얻을 수 있으나 가공 깊이가 5 μm 일 때 1 μm/s 의 매우 낮은 가공 속도에도 불구하고 그림 3(a) 에서와 같이 공구의 파손에 의해 가공이 중단되었다. 반면 일정 전압을 공구에 적용함으로써 가공 깊이를 20 μm 까지 증가시킨 결과를 그림 3(b)~(d)에 나타내었다. 이때 공구의 이송속도는 3 μm/s 로 고정하였다. 그림 3(b)에서와 같이 V_a=22 VDC 에서 불규칙적인 전해방전에 의해 채널 모서리의 깨짐 현상과 함께 밑면에서는 부분적인 연성 가공면이 존재하는 천이구간이 발생하였다. 또한 V_a=26 VDC 일 때 우수한 표면 품위를 얻을 수 있었으나(Ra=56 nm) V_a=30 VDC 인 경우 과도한 스파크 열에너지에 의해 형상 정밀도의 저하를 발생시킴을 확인하였다. 그림 3 은 가공전압에 따른 채널 밑면의 Ra 값을 나타내고 있다.

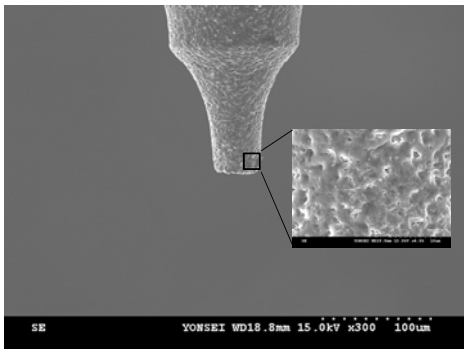
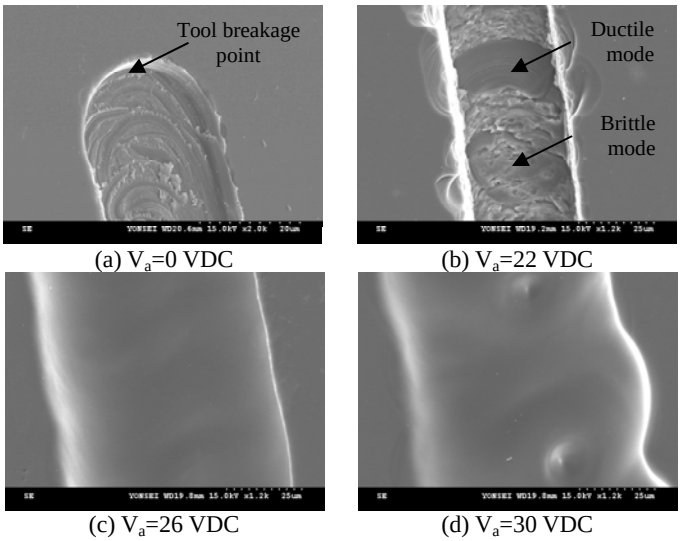


Fig. 1 Micro PCD tool fabricated using WEDG process (diameter=40 μm, Ra=1.0 μm)

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Value
Electrode material	PCD (diameter: 40 μm)
Electrode rotation speed	800 rpm
Range of diamond grain size	8~12 μm
Electrolyte	30 wt. % NaOH
Workpiece	Soda lime glass
Applied voltage (V_a)	22~30 VDC (200Hz, 45% duty)



(a) V_a=0 VDC (b) V_a=22 VDC

(c) V_a=26 VDC (d) V_a=30 VDC

Fig. 2 Characteristics of microchannel fabrications according to the applied voltage

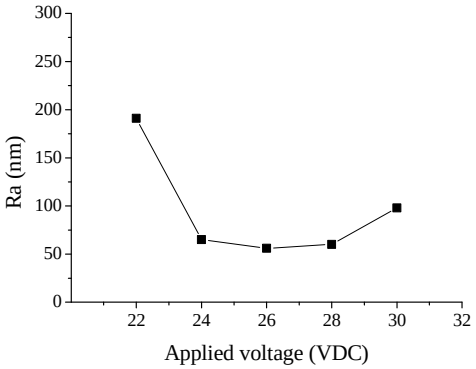
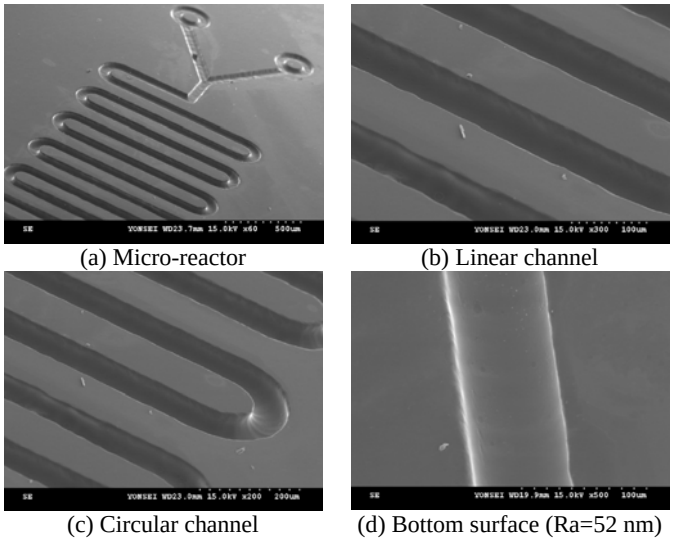


Fig. 3 Surface roughness according to the applied voltage



(a) Micro-reactor (b) Linear channel

(c) Circular channel (d) Bottom surface (Ra=52 nm)

Fig. 4 Prototype of micro-reactor fabricated by hybrid ECDM process using PCD tool

Table 2 Measurement of microchannel geometry

Channel		#1	#2	#3
Width	*m*	85.7 μm	82.0 μm	86.4 μm
	σ	1.5 μm	2.8 μm	2.4 μm
Rz	*m*	0.59 μm	0.51 μm	0.51 μm

그림 4 는 PCD 공구를 적용한 하이브리드 전해방전 가공을 통해 제작된 micro-reactor 의 prototype 을 보여주고 있다. 입력전압 26 VDC, 펄스 조건 200 Hz, 45 % duty 그리고 가공 깊이 20 μm 의 조건 하에 가공을 수행하였다. 가공된 형상의 정밀도를 정량적으로 평가하기 위해 백색광 간섭계(Zygo NV6300)을 이용하여 임의의 3 개 채널의 폭과 밑면의 Rz 값을 측정하였다. 10 μm×25 μm 의 측정 영역에 대해 Rz (mean peak to valley height) 값을 각 채널에 대해 5 회 측정하였으며 이 때 산출된 평균(*m*) 및 표준편차(σ) 값을 표 2 에 나타내었다.

3. 결론

본 연구에서는 전해방전가공의 형상 정밀도를 향상시키기 위해 PCD 공구를 이용한 하이브리드 전해방전 가공 공정을 제시하였다. 기존의 취성 재료 정밀 가공을 위한 연성 모드 절삭 가공과 스파크 열에너지를 이용한 전해방전 가공을 결합하여 향상된 가공 속도 및 가공 깊이를 유도해낼 수 있었다. WEDG 공정을 통해 제작된 직경 40 μm 의 PCD 공구를 적용하여 다양한 입력 전압에 대한 유리의 미세 채널 가공 실험을 수행한 결과 펄스 전압 26 VDC (200 Hz, 45 % duty) 에서 표면 거칠기를 약 52 nm 까지 낮출 수 있었다. 이 때 제작된 micro-reactor 의 채널의 폭은 평균 값 84.7 μm, 표준편차 3 μm 이내로 높은 형상 정밀도를 확보하였으며 채널 밑면의 Rz 는 1 μm 이내로 측정되었다.

후기

본 논문은 지식경제부의 청정제조기반 산업원천기술 개발사업 “나노기반 초정밀/초미세 hybrid 가공 시스템 기술 개발” 과제의 지원 하에 수행되었습니다.

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 **19** 065004, 2009.
6. Han, M.-S., Min, B.-K., and Lee, S. J., “High efficiency electrochemical discharge machining process for glass micromilling,” ASPEN 2009
7. Amamoto, Y., Kawakami, T, Itoh Y. and Semba, T., “Microgrinding Tool Made of Polycrystalline Diamond Fabricated Using Pulsed Fiber Laser,” ASPEN 2009.
8. Morgan C. J., Vallance R. R. and Marsh E. R., “Micromachining glass with polycrystalline diamond tools shaped by micro electro discharge machining,” Journal of Micromechanics and Microengineering **14** 1687-1692, 2004