

# 다결정 다이아몬드를 이용한 미세 공구 제작과 이를 이용한 미세 복합 가공

## Fabrication of PCD Micro Tool and its Hybrid Micro Machining

도안카오후안<sup>1</sup>, 김보현<sup>2,✉</sup>, 정도관<sup>1</sup>, 주종남<sup>1</sup>

Cao Xuan Doan<sup>1</sup>, Bo Hyun Kim<sup>2,✉</sup>, Do Kwan Chung<sup>1</sup> and Chong Nam Chu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

<sup>2</sup> 숭실대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Soongsil Univ.)

✉ Corresponding author: bhkim@ssu.ac.kr, Tel: 02-820-0653

Manuscript received: 2011.3.16 / Accepted: 2011.4.26

*Since polycrystalline diamond (PCD) has high hardness like diamond, it has been used as tool material for lathe and milling of non-ferrous material. A micro tool fabricated from PCD material can be used for micro machining of hard material such as tungsten carbide, glass, and ceramics. In this paper, micro PCD tools were fabricated by micro EDM (electrical discharge machining) and used for micro grinding of glass. Craters generated on the tool surface by EDM spark work as like grits in grinding process. The effects of tool shapes, tool roughness and PCD grain size were investigated. Also studied was a hybrid process combining electrochemical discharge machining (ECDM) and micro grinding for micro-structuring of glass.*

Key Words: Polycrystalline Diamond (다결정 다이아몬드), Micro Machining (미세 가공), Glass (유리), Grinding (연삭)

### 1. 서론

최근 유리, 세라믹, 초경합금 등 고경도 취성 재료의 정밀 미세 가공에 대한 수요가 높아지고 있다. 이러한 취성 재료는 일반적으로 가공이 쉽지 않아, 이를 가공하기 위해 높은 경도와 내마모성의 공구가 요구된다. 다결정 소결 다이아몬드 (polycrystalline diamond, PCD)는 다이아몬드의 입자와 함께 코발트 등의 결합제를 소결하여 만든 것으로 다이아몬드와 비슷한 경도를 갖고 있어 비철계 재료의 선삭, 밀링 가공을 위한 공구의 재료로 사용되고 있다.<sup>1</sup> 이러한 높은 경도의 PCD를 이용하여 미세 공구를 제작하면 초경 합금과 같은 고경도 비철 금속이나 유리, 세라믹과 같은 취성 재료에 미세 가공을 할 수 있다.

PCD는 전기가 통하는 도체이므로 방전 가공으로 가공할 수 있다. 일반적으로 방전으로 재료를 가공하면, 방전 스파크로 인해 피가공물 표면이 크기가 수 마이크로에서 수 십 마이크로 미터의 방전흔(crater)들로 뒤덮이게 된다. 이러한 방전흔은 PCD 표면에서 마치 연삭 스톨의 연삭 입자와 같은 역할을 하게 된다. 따라서 PCD를 미세 방전 가공으로 미세 공구를 제작한 뒤 이를 회전시켜 재료를 가공하면 미세 연삭의 스톨과 비슷한 효과를 얻을 수 있다. 또한 기존 초경합금 재료의 미세 절삭 공구보다 경도가 높기 때문에 공구 마모에 대한 우려가 줄어든다.

Morgan 등은 미세 방전 가공으로 제작한 지름 50  $\mu\text{m}$  PCD 공구를 이용하여 유리에 미세 가공을 할 수 있음을 보였으나, 100 nm의 가공 깊이와 1

μm/s 의 낮은 공구 이송 속도 등 가공 속도가 느린 한계점이 있었다.<sup>2</sup> 한편, 최근에는 이러한 낮은 가공 속도를 높이기 위해, PCD 공구의 기계적 가공과 함께 공구 끝에 전해 방전(electrochemical discharge)을 발생시켜 유리나 세라믹 등 취성 재료를 가공하는 복합 가공에 대한 연구도 소개되었다.<sup>3,4</sup> 하지만 이러한 복합 공정은 기본적으로 전해 방전의 열에 의해 가공면이 영향을 받기 때문에 아직까지는 날카로운 모서리 등을 가공하는데 한계가 있다.

본 논문에서는 PCD 재료를 이용한 미세 공구 제작과 이를 이용한 유리의 미세 형상 가공에 대해 기초적인 연구를 하였으며, 생산성과 가공 정밀도 향상을 위해, 전해 방전 가공(electrochemical discharge machining, ECDM)과 PCD 이용 미세 연삭 가공을 순차적으로 적용한 복합가공 기술에 대해 연구하였다.

## 2. 가공 시스템

미세 PCD 공구를 이용한 가공 시스템은, Fig. 1 과 같이 크게 미세 방전 와이어 연삭(WEDG, wire electrical discharge grinding)<sup>5</sup>을 이용한 공구 가공 부분과 연삭 가공 부분으로 이루어져 있다. 분해능 1 μm 의 X-Y-Z 스테이지 위에서 미세 공구 제작을 위한 WEDG 장치와 연삭 가공 장치를 하나의 기계 위에서 구현하여, 공구의 교체 없이 바로 가공할 수 있게 하였다. 이는 미세 공구를 장착할 때 발생하는 런아웃을 제거하는데 많은 도움이 된다. 유리 가공 시 가공힘의 크기는 로드셀을 이용하여 측정하였으며, 일정 기준치(30 mN)보다 측정값이 큰 경우 공구의 이송을 반대 방향으로 하여 공구의 파손을 방지하였다. 실험에 사용된 가공물은 소다라임 유리를 사용하였으며, PCD 는 ILJIN Diamond Co. Ltd 의 제품을 사용하였다. PCD 제품명 및 재료 성분은 table 1 에 나타내었다.<sup>1</sup>

## 3. 방전 가공을 이용한 미세 PCD 공구 제작

PCD 는 결합제로 금속을 이용하기 때문에 전기가 잘 통하며 이 때문에 방전 가공으로도 가공할 수 있다. 실제로 상용 PCD 재료는 주로 연삭이나 와이어 방전 가공으로 가공하고 있다.

본 연구에서는 Fig. 2 와 같이 일반 범용 와이어 방전 가공으로 PCD 디스크를 지름 1 mm, 길이 5

mm 의 환봉 모양으로 가공한 뒤, 이를 다시 미세 와이어 방전 연삭으로 지름 50 - 60 μm 내외의 미세 공구 형상으로 가공하였다. 보통 PCD 는 초경합금(WC) 기저(base)에 PCD 가 부착되어 있으며, Fig. 2(a)와 같이 초경합금 기저에 두께 500 μm 의 PCD 가 결합되어 있다. Fig. 2(b)는 이 PCD 를 WEDG 를 이용하여 지름 60 μm 의 미세 공구로 제작한 예이다.

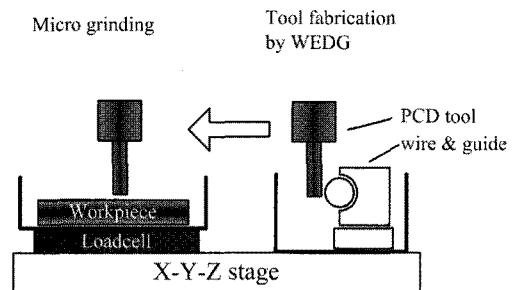
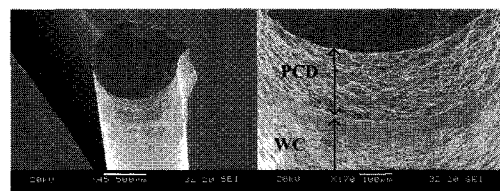


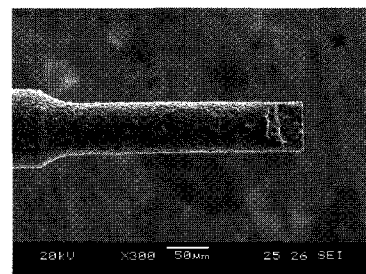
Fig. 1 Schematic diagram of hybrid machining system (WEDG, Grinding and ECDM)

Table 1 Properties of PCD

Model	Grain size (μm)	Diamond (vol %)
IPOL-CMW	10	90
IPOL-CUF	2	90



(a)



(b)

Fig. 2 PCD for tool material: (a) cylindrical PCD rod machined by wire EDM (Ø 1 mm), (b) micro tool machined by WEDG (Ø 60 μm)

## 4. 미세 PCD 공구를 이용한 유리 가공

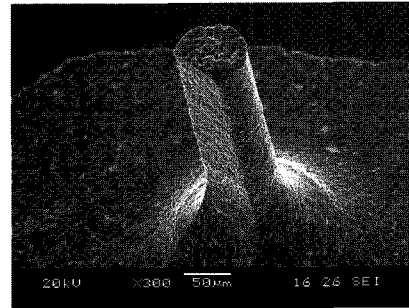
### 4.1 공구 형상

전술한 것처럼 PCD 표면의 방전흔은 가공 중에 연삭 입자의 역할을 하는 것으로 판단된다. 이를 실험적으로 알아보기 위해 다양한 형태의 공구를 제작하여 유리를 가공하였다. 공구의 형상을 Fig. 3 과 같이, 반원형(D형), 삼각형, 원형 모양으로 제작하였으며, 공구의 크기는 형태마다 다르나, 대략 지름 100  $\mu\text{m}$  이내로 가공하였다.

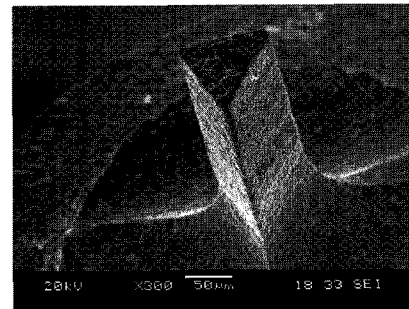
반원형이나 삼각형 형상의 경우, 모서리 부분의 날카로움 정도는 WEDG 에서의 방전 에너지에 의해 결정된다.<sup>6,7</sup> 미세 방전 가공에서는 방전 에너지(discharge energy)를 극히 작게 하여 날끝 반경(edge radius)을 1  $\mu\text{m}$  이하로도 만들 수 있으나,<sup>8</sup> PCD의 방전 가공에서는 금속을 방전 가공할 때보다 상대적으로 더 많은 에너지가 필요하고, 방전 에너지를 너무 작게 하면 가공 시간이 크게 늘어나는 문제도 있었다. 본 실험에서는 방전회로로 RC 회로를 사용하였으며,<sup>5,7</sup> 인가 전압 100 V, 축전 용량 10000 pF, 충전 저항 1 k $\Omega$ 의 가공 조건을 사용하였다. 가공 결과 삼각형 공구의 날끝 반경은 약 10  $\mu\text{m}$  이었다.

앞서 제작한 세가지 공구를 사용하여 Fig. 4 와 같이 미세 홈을 가공하였다. 먼저 ECDM 을 이용하여 유리에 미세 홈을 가공한 후,<sup>9</sup> PCD 공구로 홈의 옆면을 가공하고 가공면을 관찰하였다. 공구의 이송속도는 0.75  $\mu\text{m}/\text{s}$ , 회전속도는 5000 rpm, 그리고 반경 방향 절입량(radial depth of cut)은 5  $\mu\text{m}$  로 설정하였으며, 다른 가공 조건도 동일하게 사용하였다.

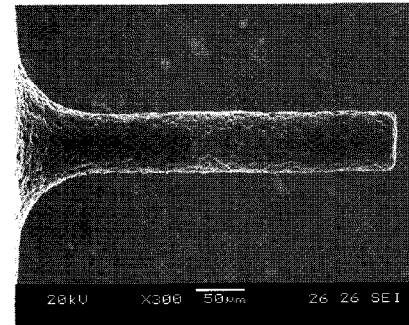
Fig. 5(a) - (c)는 가공면의 SEM 사진이다. 공구의 형상에 따라 큰 차이는 보이지 않았으며, 절삭날(cutting edge)이 없는 원형 공구도 재료를 가공할 수 있음을 볼 수 있었다. 물론 연삭 등으로 보다 날카롭게 제작된 공구를 이용하면 재료가 절삭에 의해 제거되겠지만, 이 실험과 같이 방전 가공에 의해 제작된 PCD 공구의 경우, 절삭(cutting)보다는 PCD 공구 표면의 거친 방전흔에 의해 연삭(grinding) 과정으로 재료가 제거된다고 판단된다.



(a) D-shape tool



(b) Triangle-shape tool



(c) Cylindrical tool

Fig. 3 Micro PCD tools with various shapes

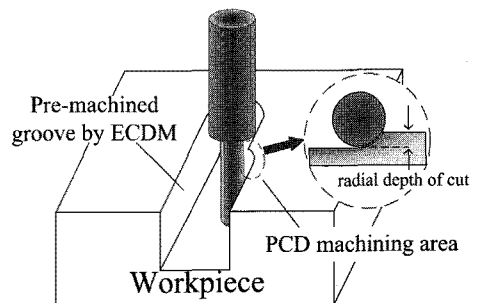


Fig. 4 Micro grinding of ECDMed grooves

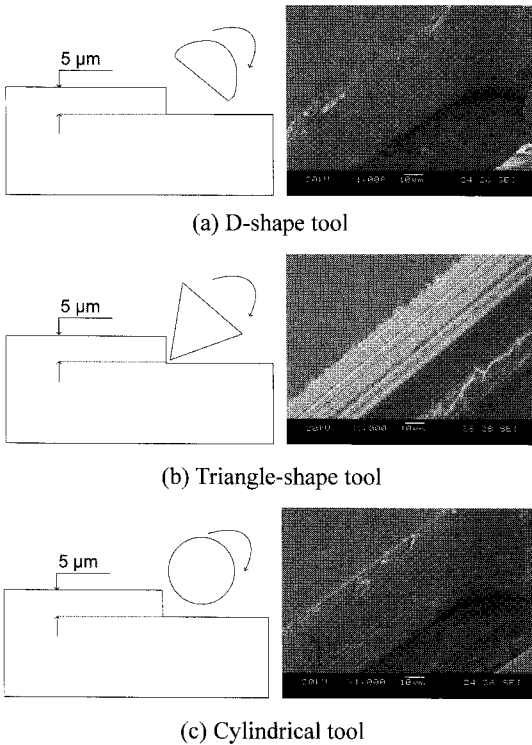


Fig. 5 Micro grooves machined by micro PCD tools of various shapes

4.2 공구 표면 거칠기

방전 가공에 의해 생성되는 방전흔의 크기는 공구 표면 거칠기에 영향을 미치며, 방전흔은 연삭 입자 역할을 하기 때문에 이는 바로 가공물 표면 거칠기에 영향을 미친다. 방전흔의 크기는 방전 가공 시 인가하는 방전 에너지, 즉, 전압과 축전 용량에 의해 달라지기 때문에 PCD 를 먼저 큰 방전 에너지로 황삭 가공한 후, 정삭 가공에서 400, 5000, 10000 pF 로 축전 용량을 달리하여 그 결과를 비교하였다. Fig. 6 은 정삭 후의 미세 PCD 공구와 이를 이용하여 가공한 유리 표면의 SEM 사진이다. 공구와 유리의 표면 거칠기를 비접촉 조도측정기로 측정하였으며, table 2 에 측정값을 나타내었다. SEM 사진 속 화살표는 측정 영역 및 방향을 의미하며, 길이 방향으로 약 100 μm 영역을 측정하였다.

Table 2 에 나타난 것처럼, 축전용량이 작아질수록 공구의 표면 거칠기가 작아지며 이는 방전흔의 크기가 작아졌기 때문이다. 또한 공구의 표면 거칠기가 커지면, 가공 표면도 거칠어지는 것을 볼

수 있다. 이는 실질적으로 공구의 표면에 형성되어 있는 방전흔이 유리를 깎아내면서 가공하기 때문에 방전흔이 거칠면 가공면도 당연히 거칠어지기 때문이다. 한편 가공물 표면의 거칠기는 공구의 표면 거칠기보다 작아지는 것을 알 수 있는데, 이는 공구 표면에 따라 분포되어 있는 방전흔 중, 가장 바깥쪽 있는 방전흔만 가공에 참여하기 때문이다.

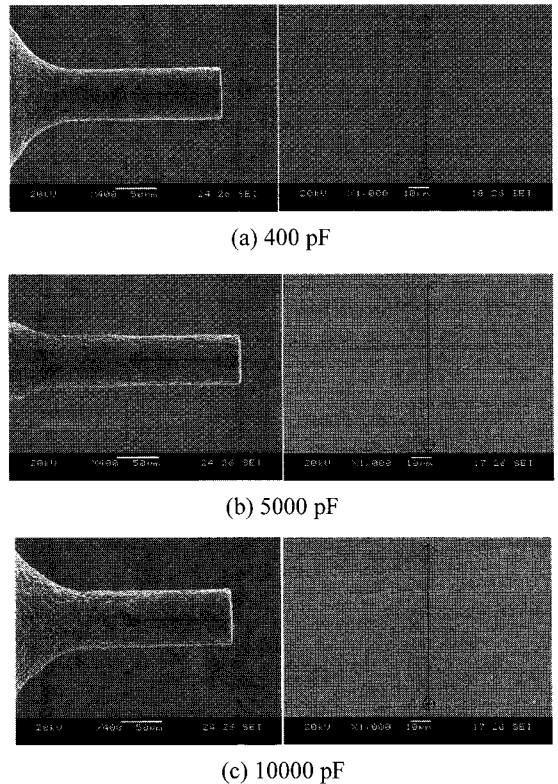


Fig. 6 Micro tools machined with different capacitors and machining surfaces of glass

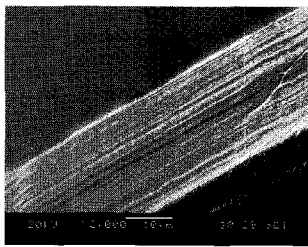
Table 2 Surface roughness of tool and glass surface

Capacitor	Tool (Ra)	Glass surface (Ra)
400 pF	0.085 μm	0.05 μm
5000 pF	0.171 μm	0.07 μm
10000 pF	0.242 μm	0.102 μm

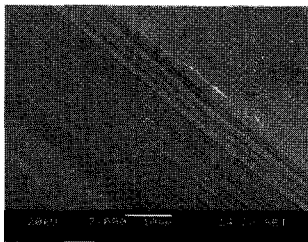
4.3. 다이아몬드 입자 크기

PCD 는 다이아몬드의 함유량이나 다이아몬드 입자 크기에 따라 그 종류와 특성이 달라진다.<sup>1</sup> 본

논문에서도 다이아몬드 입자 크기가 각각 2  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$  인 PCD 재료를 이용하여 유리를 가공하였으며 Fig. 7 에 가공 표면을 나타내었다. 사진에서 볼 수 있듯이 가공물 표면 형상에는 큰 차이가 없었으며 이는 다이아몬드 입자 크기보다 방전 가공에 의해 생기는 방전흔의 크기가 가공물 표면 거칠기에 주로 영향을 미치기 때문이라 판단된다. 하지만 다이아몬드 입자 크기는 공구의 마모나 수명에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다.



(a)

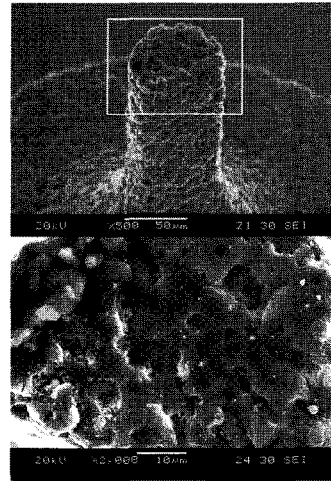


(b)

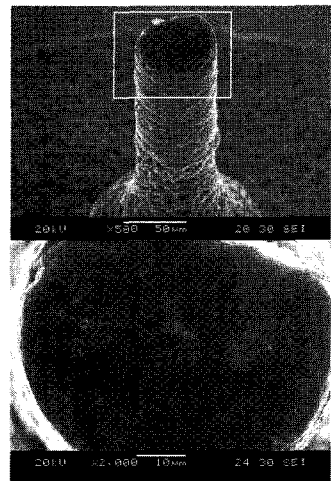
Fig. 7 Glass surface machined by PCD of different grain size: (a) 2  $\mu\text{m}$  (b) 10  $\mu\text{m}$

#### 4.4 가공 후의 공구 표면

가공 전후의 공구 표면을 살펴보았다. Fig. 8(a) 는 가공 전 공구의 표면이고, Fig. 8(b)는 유리 가공 후의 공구의 사진이다. 가공 후 공구 표면에는 가공된 유리 재료가 부착되어 있었으며, 이는 EDX(energy dispersive X-ray) 분석으로 알 수 있었다. 부착된 유리재료로 인해 거친 공구 표면이 매끄러워진 것을 볼 수 있다. 하지만, 공구 표면이 매끄러워진 이후에도 계속 재료를 가공할 수 있었으며, 이는 가공 중에 유리가 붙고 떨어짐이 반복되는 것으로 보여진다. 유리 부착으로 인해 가공력의 증가가 예상되지만, 그 변화가 매우 미미하여 본 실험 장치에서는 그 변화를 측정하기가 어려웠다.



(a)



(b)

Fig. 8 Surface of micro tool (a) before and (b) after machining of glass (radial depth of cut: 10  $\mu\text{m}$ , machining length: 600  $\mu\text{m}$ )

#### 5. 전해방전가공과 미세 연삭을 이용한 복합 가공

PCD 공구를 이용하여 유리를 연삭 가공하는 경우 형상 정밀도와 표면 품질은 우수하지만, 공구 파손을 방지하기 위해 공구 이송 속도를 0.1  $\mu\text{m/s}$  내외로 설정해야 하고 절입량도 크게 할 수 없으므로 가공 속도가 매우 느리다.

한편, 유리의 미세 가공 기술 중 하나인 전해방전 가공(ECDM)은 공구 끝단에서 발생하는 스파

크를 이용해 유리를 열로 녹여 제거하는 기술이다. ECDM 은 유리나 세라믹 등 전기가 통하지 않는 재료도 가공할 수 있지만, 재료가 열에 녹아서 제거되기 때문에 형상 정밀도가 높지 못하고, 표면 품질이 낮은 문제가 있다.<sup>9</sup> Fig. 9 는 ECDM 으로 유리에 미세 홈을 가공한 예이다. 사진에서 볼 수 있듯이 표면이 균일하지 못하며, 날카로운 모서리를 가공하기가 매우 어렵다.

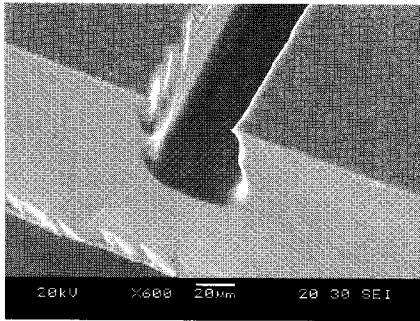
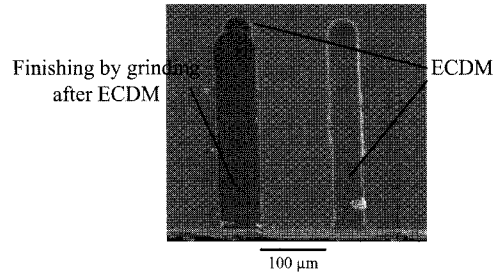


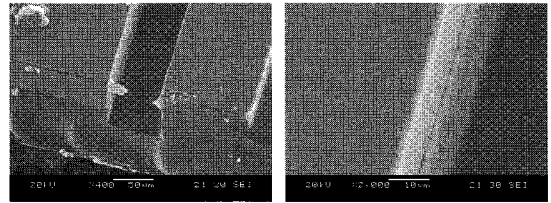
Fig. 9 Micro groove by ECDM (soda-lime glass, 30 %wt KOH, 23 V, 1ms/1ms pulse on/off-time)

PCD 연삭 가공의 느린 가공 속도와 ECDM 의 낮은 표면 품질을 개선하기 위해 ECDM 으로 황삭 가공을 한 후, PCD 공구를 이용한 연삭으로 정삭 가공을 하는 복합 가공 공정을 적용하였다.

즉, ECDM 으로 최대한 최종 형상에 가깝게 가공한 뒤 연삭 가공을 적용하면, 연삭에서의 절입량을 최소화할 수 있기 때문에 공구 파손과 가공물 표면의 크랙 발생을 방지할 수 있는 동시에, ECDM 의 낮은 형상 정밀도나 표면 품질도 향상시킬 수 있다. 또한 ECDM 은 본 논문의 연삭 가공보다 가공 속도가 높기 때문에, 가공 시간 측면에서 효율적이다. Fig. 10 은 ECDM 으로 가공한 홈과 ECDM 및 연삭의 복합 가공을 적용한 홈의 예이다. 복합 가공 전후의 사진을 비교했을 때 표면 품질과 형상 정밀도가 향상됨을 볼 수 있다. Fig. 11 은 복합 가공을 이용하여 유리에 3 차원 미세 기둥 형상을 가공한 예이다. 먼저 ECDM 으로 25 μm 깊이로 한 층씩 가공하여(layer-by-layer) 사각 기둥 모양을 가공하였으며, 그 다음 연삭 공정에서는 5 μm 깊이로 벽면을 가공하여 마무리 가공을 하였다. ECDM 과 연삭에 쓰인 가공 조건을 table 3 에 나타내었다.

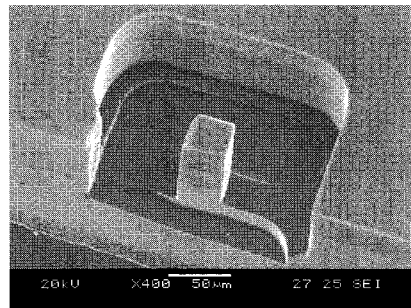


(a)

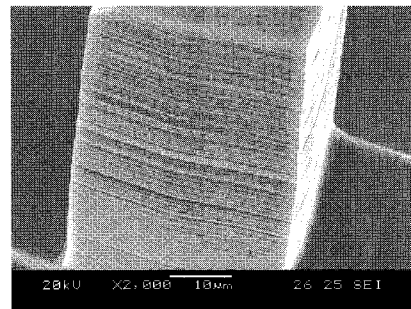


(b)

Fig. 10 (a) Micro grooves machined by ECDM and hybrid process, (b) enlarged view of the groove machined by hybrid process



(a)



(b)

Fig. 11 (a) Micro column machined by hybrid machining(roughing by ECDM, finishing by grinding) and (b) enlarged view of (a)

Table 3 Machining condition for hybrid process

	ECDM	Grinding
tool	Ø 50 µm WC	Ø 60 µm PCD
spindle speed	300 rpm	5000 rpm
feedrate	3 µm/s	0.75 µm/s
depth of cut	25 µm depth of layer (axial depth of cut)	5 µm radial depth of cut
electrolyte	30 %wt KOH	-
voltage- pulse	23 V 1ms/1ms on/off-time	-

### 6. 결론

미세 방전 가공으로 PCD 를 가공하여 미세 공구를 제작하였으며, 이에 대한 기초 실험을 수행하였다. 공구의 형상, 공구 표면 거칠기, 다이아몬드 입자 크기 등의 영향에 대해 연구하였으며 PCD 미세 공구를 이용하여 유리의 미세 형상 가공을 하였다. PCD 공구는 미세 방전 가공으로 쉽게 제작할 수 있어 기존 고가의 미세 공구에 대한 대안으로 사용할 수 있으며, 비교적 가공하기 힘든 취성 재료의 3 차원 미세 형상 가공에 적용할 수 있다. PCD 미세 공구를 이용한 복합 가공은 기존 전해 방전 가공의 문제점인 낮은 형상 정밀도와 표면 품질을 개선할 수 있음을 보였다. 본 연구의 미세 연삭 가공에서는 가공힘(grinding force)의 변화가 매우 작아 이를 정확히 측정하기가 어려웠으며, 보다 정밀한 측정 장비를 이용한 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 PCD 공구의 마모, 초고속 스피들 적용에 따른 가공 특성 등에 대한 연구가 필요하며, 유리뿐만 아니라, 초경합금, 세라믹 재료에의 적용도 기대된다.

### 후 기

이 논문은 2008 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(KRF-2008-331-D00040), 연구에 도움을 주신 일진다이아몬드에 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. <http://www.iljindiamond.co.kr>

2. Morgan, C. J., Vallence, R. R. and Marsh, E. R., "Micro Machining Glass with Polycrystalline Diamond Tools Shaped by Micro Electro Discharge Machining," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, No. 12, pp. 1687-1692, 2004.

3. Han, M.-S., Heo, S., Kim, W., Min, B.-K. and Lee, S. J., "Electrochemical Discharge-mechanical Milling Hybrid Machining Process Using PCD Microtool," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 29-30, 2010.

4. Cao, X. D., Kim, B. H., Oh, Y. T., Chung, D. K., Shin, H. S. and Chu, C. N., "Hybrid Micro Machining of Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Using Electrochemical Discharge Machining and Polycrystalline Diamond Grinding," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 105-106, 2010.

5. Masuzawa, T., Fujimoto, M. and Kobayashi, K., "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 1, pp. 431-434, 1985.

6. Chu, C. N., Kim, G. M. and Kim, S. Y., "Fabrication of Micro-shapes Using EDM and Ultrasonic Machining," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 20-27, 2000.

7. Kim, J. H., Kim, B. H., Ryu, S. H. and Chu, C. N., "Micro-Hole Machining Using MEDM According to Machining Depth," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 227-232, 2003.

8. Yan, J., Uchida, K., Yoshihara, N. and Kuriyagawa, T., "Fabrication of Micro End mills by wire EDM and some micro cutting tests," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 19, No. 2, Paper No. 025004, 2009.

9. Cao, X. D., Kim, B. H. and Chu, C. N., "Micro-structuring of Glass with Features less than 100 µm by Electrochemical Discharge Machining," Precision Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 459-465, 2009.