

단결정 다이아몬드공구 제작 기술을 통한 초정밀 미세패턴 가공 연구

정성택¹ · 송기형² · 최영재² · 백승엽[†]

인덕대학교 융합기계공학과^{1,†}

한국생산기술연구원 IT융합공정그룹³

Research on ultra-precision fine-pattern machining through single crystal diamond tool fabrication technology

Sung-Taek Jung¹ · Ki-Hyeong Song² · Young-Jae Choi² · Seung-Yub Baek[†]

Department of Mechanical Convergence Engineering, Induk University^{1,†}

Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), IT Converged Process R&D Group²

(Received September 20, 2020 / Revised September 23, 2020 / Accepted September 30, 2020)

Abstract: As the consumer market in the VR(virtual reality) and the head-up display industry grows, the demand for 5-axis machines and grooving machines using on a ultra-precision machining increasing. In this paper, ultra-precision diamond tools satisfying the cutting edge width of 500 nm were developed through the process research of a focused ion beam. The material used in the experiment was a single-crystal diamond tool (SCD), and the equipment for machining the SCD used a focused ion beam. In order to reduce the influence of the Gaussian beam emitted from the focused ion beam, the lift-off process technology used in the semiconductor process was used. 2.9 μm of Pt was coated on the surface of the diamond tool. The sub-micron tool with a cutting edge of 492.19 nm was manufactured through focused ion beam machining technology. Toshiba ULG-100C(H3) equipment was used to process fine-pattern using the manufactured ultra-precision diamond tool. The ultra-precision machining experiment was conducted according to the machining direction, and fine burrs were generated in the pattern in the forward direction. However, no burr occurred during reverse machining. The width of the processed pattern was 480 nm and the price of the pitch was confirmed to be 1 μm As a result of machining.

Key Words: Diamond Tool Geometry, Focused Ion Beam, Cutting Edge Width, Ultra-Precision Machining, DOE

1. 서 론

최근에 고품위 표면형상과 초정밀 제품을 생산하기 위해 초정밀 미세가공 분야가 이슈 되고 있다. 미세 형상을 요구하는 반도체(Semiconductor), 디스플레이(Display) 및 3차원 형상을 실현하기 위한 홀로그램(Hologram) 기술에 적용된다. 또한, 초정밀 가공 부품의 경우 항공우주 분야에 고부가 가치의 광

학 부품을 생산할 수 있다. 또한, 자유곡면 형상의 광학 소자의 경우 복잡한 광학계(Optical System)로 설계되어 있어 광학계의 부품을 간편하게 대체할 수 있다. 특히, 3차원 자유 곡면(Free-Form Surface)은 초미세패턴으로 되어있으며, 회절광학소자(Diffractive Optical Element)¹⁻³⁾의 경우 1 μm 이하의 서브마이크론(Sub-Micron) 가공기술이 필요하나, 초정밀 절삭가공 기술을 수행하기 위해서는 고도의 장비/공구 기술과 수많은 공정 기술이 요구되어 기술적 접근에 대한 진입 장벽이 높은 문제가 있다.

1,† 교신저자: 인덕대학교 융합기계공학과
E-mail: sybaek@induk.ac.kr

또한, 제품의 미세 형상과 면적에 따라 장비 제어 기술이 필요하며, 제품 특성에 따라 나노/마이크로⁴⁾ 가공기술에 적합한 공정 기술이 필요하다.

초정밀 동작기계의 요소설계 기술은 제어 기술이 높기에 수많은 고려가 필요하다. Park⁵⁾은 대형 시료 (600x2,500mm)에서 미세패턴을 가공하기 위해 원통형 롤 금형 가공기를 설계, 제작하여 평가하고자 FEM 모델을 통해 구조 공진 주파수와 변위를 분석하였다. Nakao⁶⁾은 초정밀 동작기계의 베어링과 스피들 동적 특성을 실험과 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

Back⁷⁻¹⁰⁾은 집속이온빔 가공기술을 통해 빔 스케닝 방법과 빔 전류, tilting angle에 따라 다이아몬드 공구 제작 기술에 대한 공정을 연구를 수행하여 FIB-Milling 공정에 대한 적정조건을 제시하였다. Choi¹¹⁾는 Pt 코팅 공정 기술을 통해 확보한 결과를 가지고 다이아몬드공구 제작기술에 대하여 제시하였다. Kang^{12,13)}은 전자빔(Electron Beam)과 집속이온빔(Focused Ion Beam)의 기술적 차이에 대하여 제시하고 플라즈마 전자빔 가공기술에 통해 소재의 상태변화에 대하여 분석하였다.

연구자들은 비구면 렌즈(Aspherical Lens)¹⁴⁾를 가공하기 위해 초정밀 연삭 및 폴리싱 기술을 통해 기술적 진보를 수행하였으며, 크라운 유리(BK7)를 가공하기 위해 다이아몬드 휠을 가지고 비구면 렌즈의 가공 면 표면 조도(Surface Roughness)를 높이기 위한 연구를 제시하였다.

반도체 리소그래피(Lithography)¹⁵⁾ 공정 기술은 3차원 곡면상에 미세패턴을 구현하는 것이 불가능하나, 직접식 가공 기술의 경우 자유곡면에 미세패턴을 가공하는 것이 가능한 이점이 있다. 이에 본 연구에서는 앞선 연구사례를 통해 다이아몬드공구의 제작 기술을 극복하고 초정밀 금형가공 장비를 통해 초정밀 미세패턴을 구현하고자 한다. 또한, 서브마이크론(Sub-Micron) 단결정 다이아몬드공구를 개발하여 Cu 코팅 소재에서 가공 방향에 따라 미세패턴을 형성하고 있는 패턴과 가공 결과들에 대해 살펴보고자 한다.

2. 단결정 다이아몬드공구 제작

2.1. 다이아몬드공구의 제작 준비

초정밀 다이아몬드공구를 제작하기 위해 소재의 선정은 가공하기 위한 인서트 팁 부분을 단결정 다이아몬드 (Single Crystal Diamond)로 선정하였고, 인서트 (Insert) 부분을 초경합금 (Cemented Carbide)의 재질을 이용하여 미세가공 패턴을 가공하기 위한 적합한 재질을 사용하였다.

서브마이크론(Submicro)이하의 초미세 패턴을 가공하기 위해서는 예리한 절삭날(Cutting Edge)이 필요하다, 초정밀 연삭(Superprecision Grinding) 가공기술로는 한계가 있다. 이에 본 논문에서는 집속가공에서의 한계를 극복하고자 집속이온빔(Focused Ion Beam) 가공기술을 통해 다이아몬드 가공을 수행하였다. 실험에서 사용한 장비는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 Field Electron and Ion Company의 Nova 600 Nanolab 장비를 사용하였다.

FIB-Milling을 위한 이온 소스를 액체 금속 이온 원을 Ga+ (Gallium) 소스를 사용하였다. 또한, 집속이온빔 장비의 챔버 내에서 진공도를 8×10^{-5} Pa로 유지하였고, FIB-Milling 가공 시 레스터 스캔 (Raster Scan) 방법을 Fig. 1에서 알 수 있듯이 Fig. 2(a)는 벡터 스캔(Vector Scan) 방법이며, Fig. 2(b)는 레스터 스캔(Raster Scan) 방법에 대하여 나타내었다. 이온빔 가공 시 두 가지의 스캔 방법을 사용하여 다이아몬드 가공에서 발생하는 가공 시간을 단축하고 공구의 표면을 개선하기 위해 공정을 선정하였다.



Fig. 1 Photograph of focused ion beam system (FEI, NOVA 600 Nanolab)

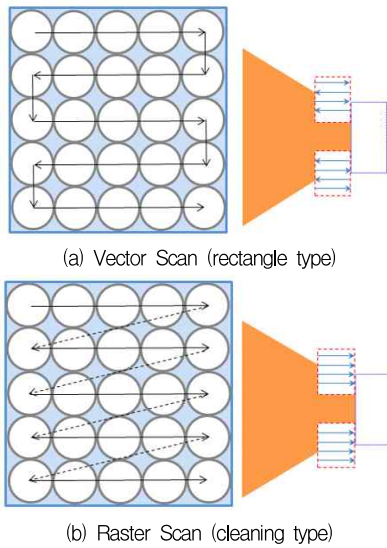


Fig. 2 Schematic image of the scanning method on focused ion beam: (a) vector scan; (b) raster scan

2.2. 초정밀 다이아몬드공구의 제작 기술

본 연구에서는 초정밀 다이아몬드공구를 제작하기 위해 준비한 시료를 Fig. 3에서 나타내었으며, 집속이온빔에서 발생하는 가우시안(Gaussian) 빔 형상으로 인해 엣지 부분에 라운드가 발생하기 때문에 다이아몬드 가공에서 발생하는 영향을 줄이고자 반도체 공정에서 사용하는 리소그래피(Lithography) 기술 중 리프트 오프(Lift-off) 공정 기술을 사용하였다.

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 다이아몬드공구의 표면 위에 백금(Platinum)을 스퍼터링(Sputtering) 기술을 이용하여 적층하였다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 Pt 코팅을 $2.9 \mu\text{m}$ 만큼 스퍼터링 하였고, Fig. 4(b)는 SEM 측정을 통해 다이아몬드공구를 정면에서 모습을 나타내었으며, Pt 코팅의 폭을 $2.79 \mu\text{m}$ 코팅하였다.

다이아몬드공구를 가공하기 위해 집속이온빔의 가공조건을 Table 1에서 알 수 있듯이 가속전압(Acceleration Voltage)을 30kV에서 고정하였다. 공정 조건 1번의 경우 벡터 스캔 방법을 선정하여 전류를 13nA로 높게 사용하였으며, 공정 2번부터는 레스트 스캔 방법을 통해 전류의 조건을 1nA, 0.1nA 낮추어 레스트 스캔을 방법을 사용하였다. 레스트 스캔의 경우 집속이온빔 가공 시 빔 조사가 일정간격으로 빔을 이동시켜 가공하기 때문에 가공 시간은 증가하나, Cleaning 작업을 할 수 있다.

Table 1 Process conditions of focused ion beam

No	Type	Voltage (kV)	Current (nA)
1	Rectangle	30	13
2	Cleaning		1
3	Cleaning		0.1
4	Cleaning		0.1
5	Cleaning		0.1

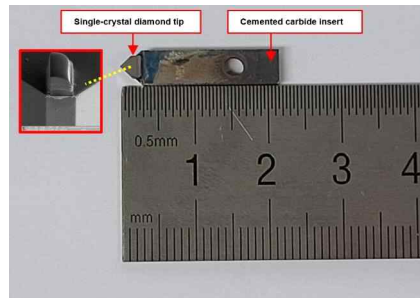


Fig. 3 Photograph of single-crystal diamond sample prepared with ultra-precision grinding

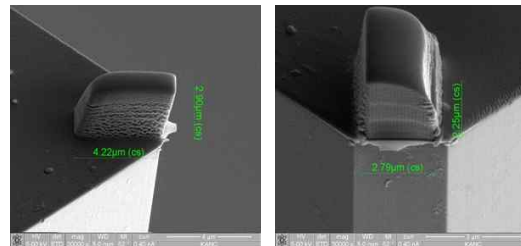


Fig. 4 SEM image of cutting edge width with Pt coating applied to an ultra-precision diamond tool. (a) side view sample (b) front view of sample. ($2.9 \mu\text{m}$ Pt coating layer)

본 연구에서는 앞서 Table 1에서 선정한 공정조건을 통해 집속이온빔 가공을 수행하였다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 Rectangle 공정조건으로 가공을 수행하였다. Fig. 5(a)는 가공 후 공구의 측면에서 $2.06 \mu\text{m}$ 의 공구의 길이를 측정하였고, Fig. 5(b)는 공구형상이 정면의 모습이며, 절삭가공 시 가장 중요한 절삭날 폭(Cutting Edge Width)을 측정하였다. 높은 전류조건으로 인해 다이아몬드를 가공하는 제거량이 많아졌으며, 공구의 측면에서 가공 후 형성된 다이아몬드의 표면이 좋지 않은 것을 확인하였다. 또한, 다이아몬드공구의 절삭날 폭은 $1.59 \mu\text{m}$ 로 측정되었

고, 공구의 형상은 빔의 영향으로 인해 역삼각형 형상으로 도출되었다. SEM을 통하여 측정을 수행한 Fig. 6은 Cleaning 공정을 통해 다이아몬드공구 가공을 결괏하며, 가속전압을 30kV에서 고정하고 빔의 전류를 0.1nA에서 수행하였다. Fig. 6(a)은 FIB-Milling 가공 후 측면에 측정한 결과이며, 각 공정에 따라 공구의 길이를 2.48 μm 까지 가공하였다. 또한, Fig. 6(b)에서 알 수 있듯이 492.19 nm의 절삭날을 가지는 초정밀 다이아몬드공구를 확보하였다.

집속이온빔을 통해 가공한 초정밀 다이아몬드공구의 표면 위에 남아있는 Pt를 제거하기 위해 Fig. 7에서 나타낸 초정밀 연삭 공정을 통해 Pt를 제거하였다. 초정밀 연삭의 경우 Pt층을 제거할 수 있으나, 다이아몬드공구의 파손을 초래할 수 있다. 초정밀 연삭 가공을 통해 Pt를 제거한 결과를 Fig. 8에서 나타내었다. Fig. 8(a)에서 나타낸 다이아몬드공구의 측면을 알 수 있듯이 기존 공구의 Pt층이 제거된 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)의 경우 연삭 가공 후 다이아몬드공구의 표면이 미세한 칩핑 현상을 확인하였으나, 가공에 직접적인 영향을 주는 절삭날에는 영향이 없는 것으로 분석된다.

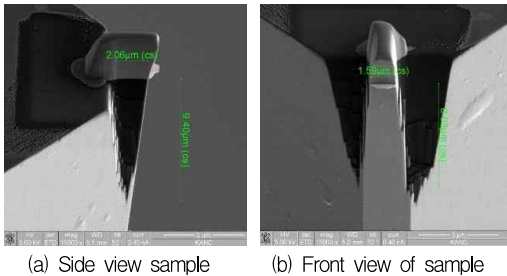


Fig. 5 SEM images of 1.59 μm cutting edge width tool by the focused ion beam machined (beam current: 13 nA, voltage: 30 kV); (a) side view of sample (b) front view of sample

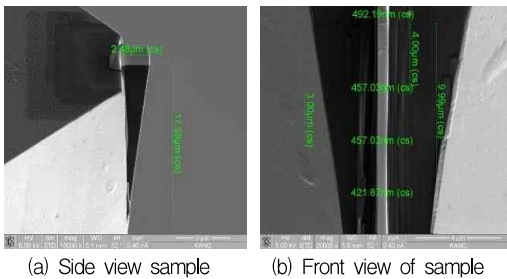


Fig. 6 SEM images of 492.19 nm cutting edge width tool by the focused ion beam machined (beam current: 0.1 nA, voltage: 30 kV); (a) side view of sample (b) front view of sample

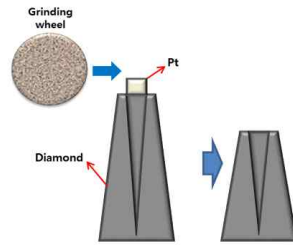
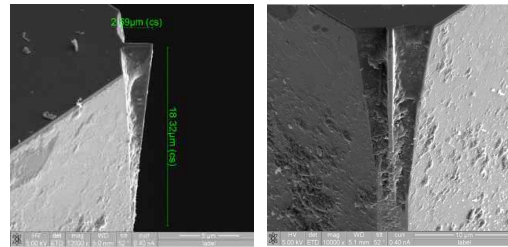
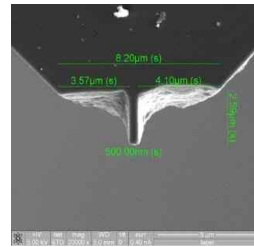


Fig. 7 Schematic diagram of process study for removing Pt coating on ultra-precision diamond tools



(a) Side view sample (b) Front view of sample



(c) Front view of sample

Fig. 8 SEM images of removing Pt coating layer using ultra-precision grinding

3. 초정밀 절삭가공

3.1. 초정밀 가공실험 준비

본 장에서는 제작된 초정밀 다이아몬드공구를 통해 절삭실험에 대하여 살펴보고자 한다. 초정밀 절삭가공을 수행하기 위해 사용된 가공기는 Fig. 9에서 나타낸 바와 같이 Fig. 9(a)는 Toshiba ULG-100C(H3) 3축 터닝 가공기를 사용하였다. 또한, 다이아몬드공구를 통해 동 도금 소재에 절삭실험을 수행하고자 Fig. 9(b)에서 Cu 코팅된 시료를 준비하였다.

절삭가공의 선정은 Table 2에서 알 수 있듯이 주요 절삭 파라미터를 5가지로 선정하고 서브마이크로 패턴 가공의 피치 사이즈(Pitch size)를 1 μm 로 선정하였다. 또한, 초정밀 절삭실험에서 1 μm 의 간격으로 패턴을 가공하였다. 초미세 절삭가공에서는

패턴 가공에서의 영점세팅이 중요하게 작용한다. 영점세팅의 오차로 인하여 공구와 시료의 위치 오차로 인해 다이아몬드공구가 파손으로 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Video Microscope를 통해 공구의 위치를 확인하여 3축에 대한 영점을 보정하였다.

Table 2 Machining conditions for ultra-precision cutting

Parameters	Value	
	forward machining	reverse machining
Feed Rate (mm/min)	0.005	0.005
Cutting depth	300	700
RPM	1000	1000
Pitch number	200	100
Pitch size	1	1

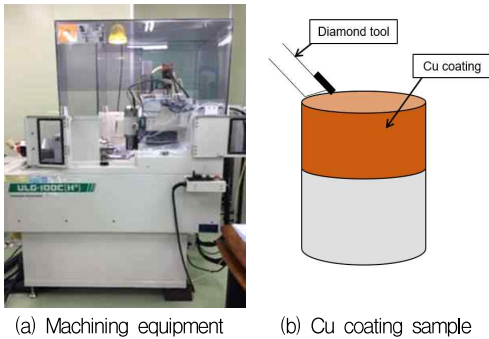
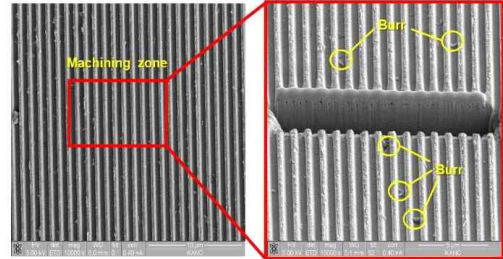


Fig. 9 Photograph of preparation of experiments to process ultra-precision fine patterns; (a) Axis machining equipment (b) Cu coating sample.

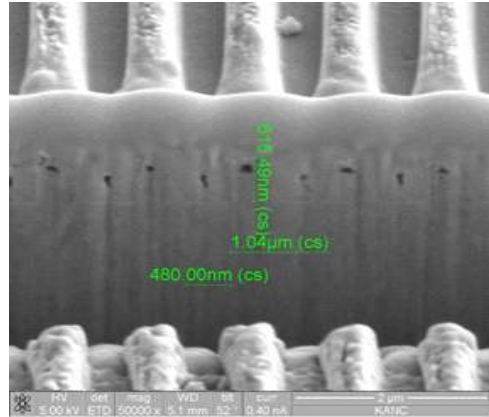
3.2. Cu coating 소재를 이용한 패턴 가공

절삭날이 500 nm 급을 만족하는 서브마이크론 공구를 이용하여 Cu 코팅 소재를 가공하였다. 가공되는 진행 방향에 따라 분석하기 위해 정방향과 역방향에 따라 실험을 수행하였다. Fig. 10의 결과는 700 nm cutting depth의 조건으로 Cu 코팅 샘플을 100개의 패턴을 정방향으로 가공한 결과이다. 가공 후 시료를 분석하기 위해 집속이온빔을 통해 홈 가공을 수행하였고, Fig. 10(a)은 패턴을 가공에 대한 중간 영역의 결과이며, Cu 코팅의 낮은 경도로 인하여 가공 후 소성변형이 생기는 것을 확인하였으며, 가공 후 패턴에 버(burr)가 많이 생기는 것을 확인하였다. 이는 가공 중에 소재와 공구로부터 발생하는 열에너지로 인해 소재에 버가 발생하는 것으로 분석된

다. 또한, 가공 후 절삭공구의 마모를 관찰한 결과 마모가 거의 발생하지 않았다. Fig. 10(b)에서 나타난 바와 같이 가공된 패턴의 폭은 480 nm이며, 피치의 간격은 1.04 μm 로 확인되었다.



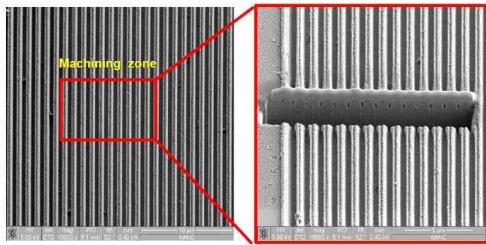
(a) Surface analysis through ultra-precision machining



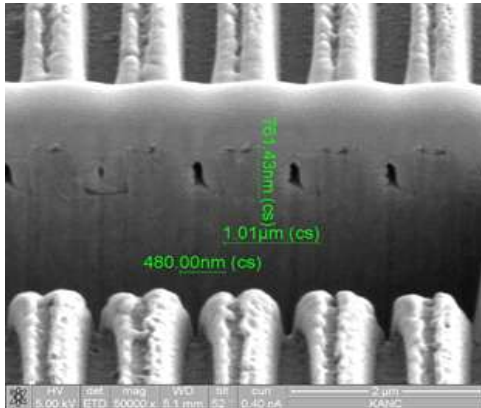
(b) Cross section analysis of fine pattern machining samples

Fig. 10 Analysis result of ultra-precision fine pattern through forward rotation machining (Pattern pitch: 480 nm, Width of pattern: 1.04 μm)

Fig. 11의 실험 결과는 역방향으로 가공하여 나타난 결과이다. Fig. 11(a)은 앞선 실험 결과와 동일하게 미세패턴을 분석하기 위해 홈 가공을 수행하였으나, 기존 실험 결과와 비교했을 때 버(burr)가 발견되지 않은 것을 확인하였다. Fig. 11(b)은 패턴을 확대하여 홈 가공 부분과 피치를 측정하였다. 가공된 부분에서는 앞선 실험과 동일하게 480 nm가 확인되었고, 피치는 1.01 μm 의 결과를 확보하였다. 두 실험에서의 공통된 결과는 비교했을 때 실험 후 패턴의 끝단 부분에서 직각이 아닌 라운드가 발생하였다. 이는 초정밀 다이아몬드공구를 집속이온빔으로 가공하여 cutting edge sharpness 부분이 수십 나노미터로 형성되어 있어서 가공 중에 패턴이 직각으로 형성되지 않고 라운드가 형성된 것으로 분석된다.



(a) Surface analysis through ultra-precision machining



(b) Cross section analysis of fine pattern machining samples

Fig. 11 Fine pattern analysis result of copper corning material through reverse machining (Pattern pitch: 480 nm, Width of pattern: 1.01 µm)

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 회절광학소자를 가공하기 위한 초정밀 가공기술에 대하여 연구를 수행하였다. 초정밀 가공의 경우 정밀한 가공기와 미세패턴을 가공하기 위한 공구가 필요하다. 이에 서브마이크론 다이아몬드를 개발하고자 집속이온빔을 통해 500 nm이하의 단결정 다이아몬드공구를 제작하였다. 집속이온빔 가공은 다이아몬드의 가공 시간과 재료 제거율을 고려하여 레스트 스캔과 벡터 스캔 방법을 동시에 사용하였다. 벡터 스캔의 경우 고전류에서 가공하여 레스터 스캔보다 가공속도는 빠르나 가공 결과에서 다이아몬드공구의 표면이 좋지 않았다. 레스터 스캔의 경우 저출력으로 가공 제어가 가능하나, 가공시간이 긴 단점이 있다.

다이아몬드공구 가공 시 가우시안 빔 영향을 줄이기 위해 반도체 고정기술 중 lift-off 공정 기술을 사용하여 다이아몬드공구의 표면 위에 2.9 µm의 Pt를 코팅하였다. 선정된 조건을 통해 집속이온빔을 가공한 결과 492.19 nm의 절삭날을 확보한 서브마이

크론 공구를 확보하였다. 또한, 제작된 공구의 다이아몬드 표면위에 존재하는 Pt코팅을 제거하기 위해 초정밀 연삭 가공을 통해 제거하였다.

Pt가 제거된 공구를 이용하여 Cu가 코팅된 소재에 미세패턴을 가공하기 위한 실험을 수행하였다. 가공조건은 가공 방향에 따라 미세패턴의 형상을 분석하였으며, 가공 결과 가공된 홈 부분에서 480 nm가 확인되었다. 그러나, 정가공에서는 미세한 burr가 발생하였고, 역가공에서는 burr가 발생하지 않았다. 이는 가공 중에 소재와 공구로부터 발생하는 열 에너지로 인해 소재에 버가 발생하는 것으로 분석된다. 또한, 패턴 부분이 라운드로 형성하고 있어 이는 집속이온빔 가공 시 초정밀 다이아몬드공구의 cutting edge sharpness 부분이 가우시안 빔 영향으로 인해 나노 스케일의 라운드가 형성된 것으로 판단된다. 본 연구에서는 서브마이크론 사이즈의 단결정 다이아몬드공구를 개발하였나, 미세패턴 가공기술이 극복된다면 3차원 자유곡면을 가공할 수 있어 산업에 우수한 기술로 사용될 것으로 전망되어진다.

후기

본 연구는 기계산업핵심기술개발사업 “고정밀 광학부품용 가공기 및 초정밀 Grooving 머신실증” 과제번호(20007244) 연구비 지원으로 진행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) Wildi, T., Kiss, M., & Quack, N., “Diffractive optical elements in single crystal diamond”, Optics Letters, 45(13), pp. 3458-3461, 2020.
- 2) Rhee, H. G., & Lee, Y. W., “Improvement of linewidth in laser beam lithographed computer generated hologram”, Optics express, 18(2), pp. 1734-1740, 2010.
- 3) Ghim, Y. S., Rhee, H. G., Davies, A., Yang, H. S., & Lee, Y. W., “3D surface mapping of freeform optics using wavelength scanning lateral shearing interferometry”, Optics express, 22(5), pp. 5098-5105, 2014.
- 4) Kim, C. S., Ahn, S. H., & Jang, D. Y., “Developments in micro/nanoscale fabrication by

focused ion beams”, Vacuum, 86(8), pp. 1014-1035, 2012.

5) Oh, J. S., Song, C. K., Hwang, J., Shim, J. Y., & Park, C. H., “An ultra-precision lathe for large-area micro-structured roll molds”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 30(12), pp. 1303-1312, 2013.

6) Fedorynenko, D., Kirigaya, R., & Nakao, Y., “Dynamic characteristics of spindle with water-lubricated hydrostatic bearings for ultra-precision machine tools”, Precision Engineering, 63, pp. 187-196, 2020.

7) Baek, S. Y., & Jang, S. M., “Fabrication of Micro/nanoscale Cutting Tool Geometry of Single Crystal Diamond Tool by Focused Ion Beam”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 31(3), pp. 207-213, 2014.

8) Baek, S. Y., “Design and fabrication of nano-scale single crystal diamond cutting tool by focused ion beam (FIB) milling”, In International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2015) (Vol. 9524, p. 95241R). International Society for Optics and Photonics, 2015, July.

9) Baek, S. Y., Choi, W. K., Choi, Y. J., & Lee, E. S., “Controllability study of single-crystal diamond cutting tool focus ion beam milling with different beam current and tilting angle”, In Advanced Materials Research (Vol. 1136, pp. 430-434). Trans Tech Publications Ltd, 2016.

10) Baek, S. Y., Chu, J. H., & Jung, S. T., “A Study on Fabrication of Ultra-Precision Diamond Tool and Length Optimization for Improving the Stability”, In Key Engineering Materials (Vol. 777, pp. 289-293). Trans Tech Publications Ltd, 2018.

11) Choi, W. K., & Baek, S. Y., “Study on platinum coating depth in focused ion beam diamond cutting tool milling and methods for removing platinum layer”, Materials, 8(9), pp. 6498-6507, 2015.

12) Kang, E. G., “High Voltage Plasma Diode Electron Beam Accelerator and Application to Tool Steel Heat Treatment”, Diss. Ph. D. Thesis,

Yonsei University, 2017.

13) Kang, E. G., Kim, J. S., Lee, S. W., Min, B. K., & Lee, S. J., “Emission characteristics of high-voltage plasma diode cathode for metal surface modification”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 16(1), pp. 13-19, 2015.

14) Lee, E. S., & Baek, S. Y., “A study on optimum grinding factors for aspheric convex surface micro-lens using design of experiments”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(3-4), pp. 509-520, 2007.

15) Baek, S. Y., “A study on processing characteristics of plasma etching using photo lithography”, Journal of the Korea Society of Die & Mold Engineering, 12(1), pp. 47-51, 2018.

저자 소개

정 성 태(Sung-Taek Jung)

[정회원]



- 2020년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2018년 3월~현재 : 인덕대학교 산학 협력단, 연구원

< 관심분야 >

스마트 팩토리, 초정밀나노가공

송 기 형(Ki-Hyeong Song)



- 2019년 8월 : 국민대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 2002년 10월~2005년 5월 : (주)프라코, 연구소, 사원
- 2005년 6월~현재 : 한국생산기술연구원, 연구원

< 관심분야 >

정밀가공, 초미세 패턴가공, 공정 모니터링

최 영 재 (Young-Jae Choi)



- 2000년 2월 : 국민대학교 산업기계공학과 (공학석사)
- 1997년~1998년 : 동부엔지니어링
- 1998년~현재 : 한국생산기술연구원, 수석연구원

< 관심분야 >

연삭시스템, 초음파가공, 초미세 패터닝, 공정 모니터링

백 승 엽 (Seung-Yub Baek)

[정회원]



- 2007년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 2월~2009년 2월 : 유한대학교 금형설계과 조교수
- 2009년 3월~현재 : 인덕대학교 융합 기계공학과, 부교수

< 관심분야 >

초정밀나노가공, CAD/CAM/CAE