

절삭 깊이의 무작위 제어를 적용한 다이아몬드 선삭공정에서 소재회전 반경에 따른 미세패턴의 크기변화 분석연구

정지영^{1,2} · 한준세² · 최두선² · 제태진[†]
과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과^{1,†}
한국기계연구원 나노공정연구실^{2,†}

A study on size variation of micro-pattern according to turning radius of workpiece in diamond turning with controlled random cutting depth

Ji-Young Jeong^{1,2} · Jun-Se Han² · Doo-Sun Choi² · Tae-Jin Je[†]

Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute of Machinery & Materials^{1,†}

Department of Nano Mechatronics, University of Science and Technology^{2,†}

(Received March 19, 2020 / Revised March 27, 2020 / Accepted March 31, 2020)

Abstract: Ultra-high brightness and thin displays need to optical micro-patterns which can uniformly diffuse the lights and low loss. The micro random patterns have characteristics to rise the optical efficiency such as light extraction, uniform diffusion. For this reason, various fabrication processes are studied for random patterns. In this study, the micro random patterns were machined by diamond turning which used a controlled cutting tool path with random cutting depth. The machined patterns had random shape and directionality along the circumferential direction. The average width and length of machined random pattern according to rotation radius were 40.13 μm ~55.51 μm and 37.25 μm ~59.49 μm , and these results were compared with the designed result. Also, the machining error according to rotation radius in diamond turning using randomly controlled cutting depth was discussed.

Key Words: Diamond Turning, Random Pattern, Uniform Distribution, Depth of Cut

1. 서 론

기존의 디스플레이 장치에는 휘도 향상과 광균일도 향상을 목적으로 일정한 배열과 크기의 마이크로 패턴을 갖는 광학필름이 주로 적용되었다. 그러나 디스플레이 장치가 고휘도화 및 박형화 됨에 따라서 규칙적인 마이크로 패턴에 의한 광학적 규칙성이 사용자에게 시인되는 문제점이 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 크기 및 배열의 무작위성을 갖는 마이크로 랜덤 패턴의 필요성이 제시되고 있다¹⁾. 또한, 광원의 광추출 효율 향상, 빔 형상제어 뿐만 아니라 태양열발전 소자의 집광효율 향상 등에 적용하기 위한 연구가 활발히

진행되고 있다²⁾.

마이크로 랜덤패턴을 제조하기 위한 방법으로는 Lithography, Chemical etching, 다공성 소재를 이용한 전사공정 등이 연구되고 있으나 공정이 복잡하고 광특성을 제어하기 위한 마이크로 패턴의 형상을 제어하기 어려우며 재현성이 낮은 문제점이 있다³⁾.

다이아몬드 선삭 공정은 회전하는 공작물의 표면을 따라 이송하는 절삭공구의 경로를 직교좌표계 상에서 제어하여 고도의 형상 정밀도와 표면 품질을 갖는 렌즈 어레이, 회절격자 등의 미세패턴을 제조할 수 있다. 따라서 절삭 깊이 및 피치와 같은 절삭공구 이송경로의 생성 파라미터에 무작위성을 부여하여 비교적 간단하게 마이크로 랜덤 패턴을 제조할 수 있다⁴⁾. 그러나 가공표면 전체에 균질한 랜덤패턴을 제조하기 위해서는 소재의 회전 반경에 따라 변화하는 가공특성의 분석이 필요하다.

1. 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과
† 교신저자: 한국기계연구원 나노공정연구실
E-mail: jtg@kimm.re.kr

본 연구에서는 다이아몬드 선삭공정에서 절삭 깊이에 무작위성을 부여한 가공경로를 설계하였으며, 이를 이용하여 가공된 평균 미세패턴의 크기 및 폭을 분석하여 소재의 회전반경이 미세 랜덤패턴에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 미세랜덤패턴 가공경로 설계

2.1. 소재표면 가공좌표 생성방법

가공 소재의 회전을 분당 회전수로 제어하는 일반적인 다이아몬드 선삭공정에서는 소재의 회전속도에 비하여 공구의 이송축 구동속도가 현저히 느리기 때문에 마이크로 패턴을 제조하기 어렵다. 이에 미세패턴을 가공하기 위해서는 가공표면을 미세한 점 좌표로 분할하여 표현하고 이를 이용한 가공경로를 설계해야 한다⁹⁾.

Fig. 1은 일정각도로 분할하는 방법과 일정한 호의 길이로 분할하는 방법에 대한 모식도를 보여주며, Fig. 1 (a) Constant Angle Method는 소재의 회전반경과 관계없이 일정한 각도로 분할하는 경우로서

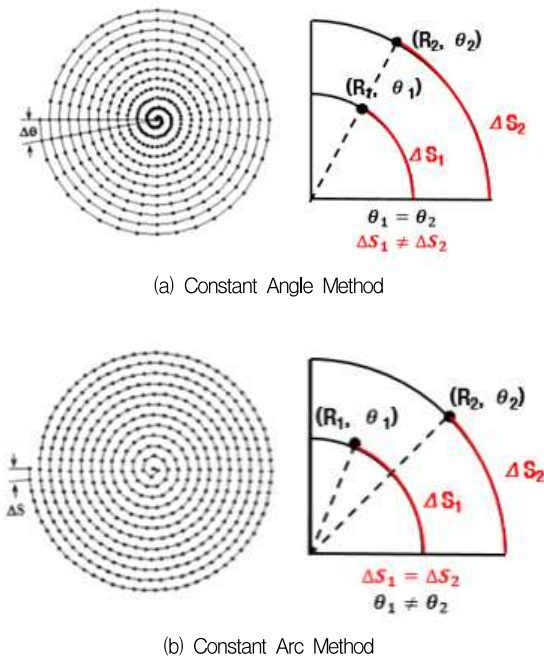


Fig. 1 Generating methods of cutting path coordinates in diamond turning using slow tool servo (a) constant angle method, (b) constant arc method

회전반경(R)에 따라 회전거리가(ΔS)가 변하기 때문에 가공표면 전체에 균질한 미세패턴을 제조하기가 어렵다. 따라서 미세패턴을 균질하게 제조하기 위해서는 R이 변화하여도 ΔS 가 동일하게 유지되는 Fig. 1 (b) Constant Arc Method를 적용해야 한다.

2.2. 공구반경과 절삭 깊이에 따른 절삭폭

미세 랜덤패턴의 폭과 길이는 절삭공구의 형상과 각 가공지점별 절삭 깊이에 따라서 결정된다. Fig. 2는 소재의 좌표가 C_0 에서 C_2 로 회전하는 원호형의 인선을 갖는 절삭공구로 절삭 깊이를 0-Z-0으로 변화시키며 가공하였을 때 생성되는 미세패턴을 나타낸 모식도이다.

패턴의 폭은 절삭공구 인선의 반경, 패턴의 길이는 소재의 회전각도(거리)에 의해 결정된다. Fig. 3는 원호형상 절삭공구 인선의 반경(R_{ce})과 가공깊이(C_d)에 의한 절삭 폭의(C_w) 상관관계를 보여주며, 절삭인선의 반경과 절삭 깊이에 따른 절삭 폭은 아래와 같은 관계식 (1)로 구할 수 있다.

$$C_w = 2\sqrt{R_{ce}^2 - (R_{ce} - C_d)^2} = 2\sqrt{2R_{ce}C_d - C_d^2} \quad (1)$$

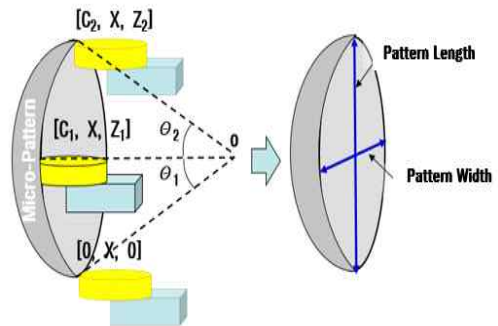


Fig. 2 Schematic diagram of pattern length and width generated by variation of cutting depth and rotating angle

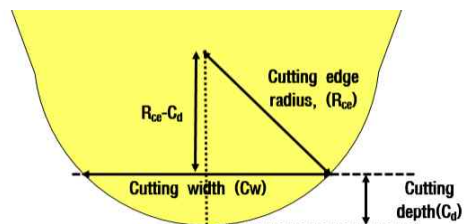


Fig. 3 Correlation of cutting width by radius of cutting edge and cutting depth

Fig. 4는 절삭공구 인선 반경과 절삭 깊이 변화에 따른 절삭 폭의 변화를 그래프로 나타낸 것으로 절삭인선의 반경이 커질수록 절삭 폭이 급격하게 증가하는 경향을 확인 할 수 있다. Fig 5는 절삭 깊이는 0~5 μm 의 범위에서 균일분포로 생성된 난수를 소재의 회전반경 4, 8, 12mm에서 Constant Arc Method으로 회전각도 0.1432°, 0.0716°, 0.0477°로 각각 분할 생성된 좌표에 적용된 가공경로를 보여준다. 본 연구에서 가공하고자 하는 미세 랜덤패턴의 크기는 50 μm 수준으로 가공하고자 하였으며, 이에 가공경로에 반영된 절삭 깊이 범위 0~5 μm 에서 절삭 폭 50 μm 영역을 많이 포함하는 반경 100 μm 의 단결정다이아몬드를 가공공구로 선정하였다.

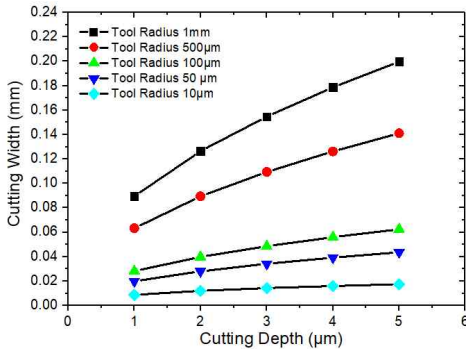


Fig. 4 Variation of cutting width according to radius of cutting edge and cutting depth

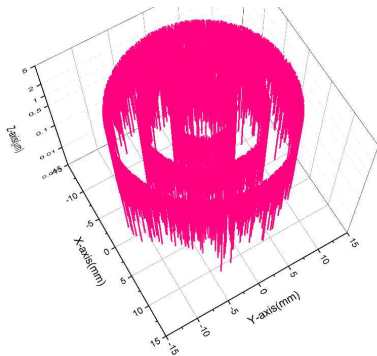


Fig. 5 Cutting tool path for fabricating micro-random pattern

3. 실험장치 및 방법

Fig. 6은 미세 랜덤패턴 가공실험에는 이송 분해능 1nm의 X, Y, Z축과 회전분해능 0.000001°의 C축으로 구성된 Diamond turning machine(DTM,

Nanotech 350FG)이 사용되었다. 본 논문의 2장에서 생성된 가공경로 Fig. 5를 이용하여 직경 30mm의 64 황동소재 표면에 미세패턴을 가공하였으며, Fig. 7은 가공에 사용된 반경 100 μm 의 단결정 다이아몬드를 보여준다.

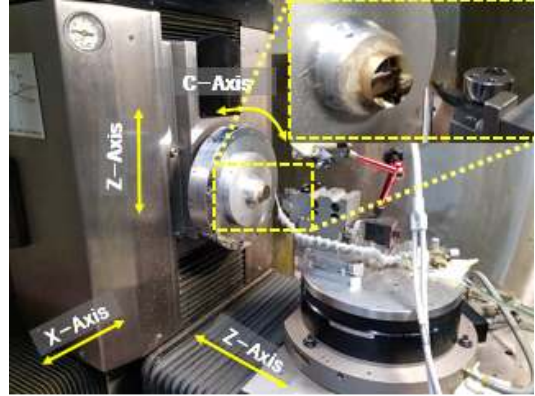


Fig. 6 Diamond turning system for fabrication of micro-random pattern

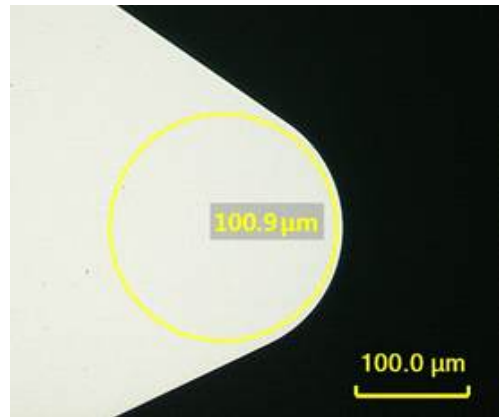
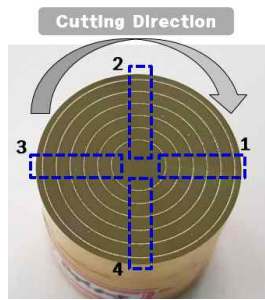


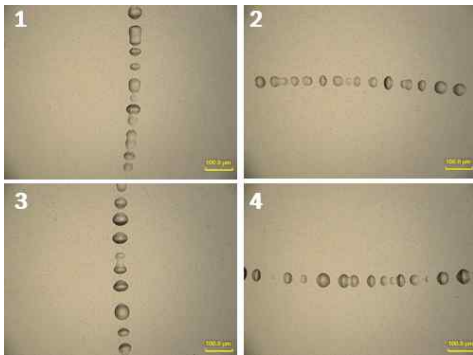
Fig. 7 Single crystal diamond cutting tool with radius of 100 μm

4. 실험결과 및 분석

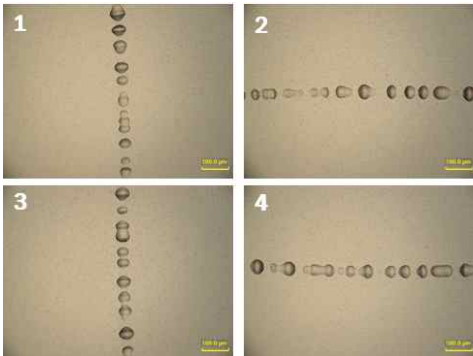
Fig. 8 (a)는 미세 랜덤패턴이 가공된 황동시편을 보여주며 각 회전반경에서 측정 위치별 변화에 따른 측정오차 영향을 줄이고자 0, 90, 180, 270도의 위치마다 가공된 미세랜덤 패턴의 폭과 크기를 측정하였다. Fig. 8 (b), (c), (d)는 회전반경 4, 8, 12mm에서 측정된 미세패턴의 표면형상을 보여준다. 각각의 회전반경에서 가공된 미세패턴들은 독립적인 형태를 갖는 마이크로 렌즈 형상과 미세패턴끼리 연



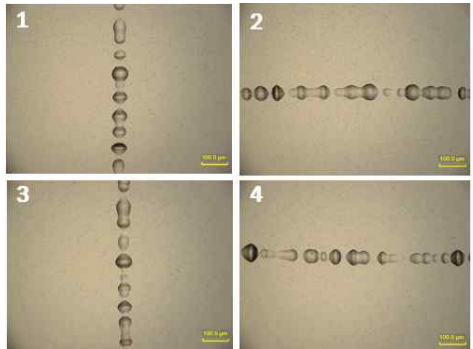
(a) Machined workpiece with micro-random pattern



(b) Machined surface at rotating radius of 4mm



(c) Machined surface at rotating radius of 8mm



(d) Machined surface at rotating radius of 12mm

Fig. 8 Machined workpiece and surfaces at rotating radius (a) 4, (b) 8, (c) 12mm

Table 1 Size of micro-random patterns machined at each rotating radius and measurement position angle 0° to 270°

Rotating radius(mm)	Measurement position angle(°)	Average widths(μm)	Average lengths(μm)
4	0	46.16	41.03
	90	45.81	37.58
	180	40.13	37.25
	270	52.51	48.83
8	0	49.18	45.68
	90	49.12	50.85
	180	47.69	53.67
	270	50.73	44.09
12	0	53.33	50.59
	90	53.39	48.2
	180	55.51	58.67
	270	54.83	59.49

결되어 있는 형상이 원주방향을 따라 혼재되어 있다. 또한 소재의 회전반경이 증가함에 따라서 미세 패턴의 크기도 커지고 패턴 간에 이어지는 경향도 증가함을 확인하였다. Table 1은 각각의 소재회전 반경에서 측정 위치 1~4번 미세랜덤패턴의 평균 폭과 길이를 정리한 것이다. 패턴의 평균 폭 40.13 μm ~55.51 μm , 평균길이 37.25 μm ~59.49 μm 으로 가공되었으며, 평균 폭과 길이의 최대 차이는 회전반경 4mm 2번 지점에서 약 8.23 μm 이었으며 이외의 영역에서는 모두 5 μm 내외의 차이를 보였다. 이를 통하여 무작위 절삭 깊이로 제어된 가공경로를 이용한 랜덤패턴의 제조에 있어서 형상의 무작위성은 보존하고 크기는 균질하게 제어 할 수 있음을 알 수 있다. 패턴이 가공된 방향에 있어서는 소재의 회전방향을 따라 절삭공구의 인선이 절입과 후퇴를 반복하기 때문에 측정위치 1번과 3번, 2번과 4번에서 서로 반대의 방향성을 갖는 것을 확인하였으나 방향성은 가공경로의 개선을 통해 해결 할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 9는 가공된 미세 랜덤패턴의 길이와 폭을의 평균값을 소재의 회전반경별로 정리하여 그래프로 나타낸 것이다. 미세 랜덤패턴 크기를 평균값으로 정의하는 경우에 본 가공조건을 통해 가공된 랜덤패턴은 폭과 길이가 유사하나 소재의 회전반경이 증가함에 따라 패턴 크기가 증가하고, Standard deviation도 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향의 원인은 회전반경이 증가함에 의하여 소재를 분할하는 각도를 미세화해야 하고 이로 인하여 소재가 매우 짧은 거리를 회전하는 동안 공구 이송

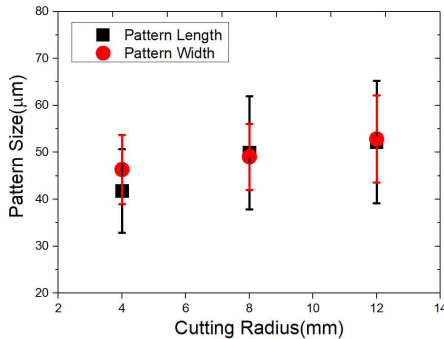


Fig. 9 Size of machined random pattern at rotating radius (a) 4, (b) 8, (c) 12mm

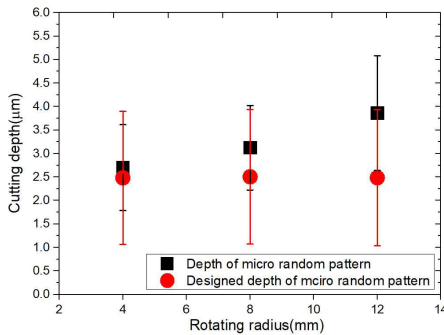


Fig. 10 Comparison graph of measured and designed cutting depth of micro random patterns

축이 가공좌표를 따라 급격한 구동으로 발생하는 위치 오차가 가공깊이를 증가시켰기 때문으로 사료된다.

절삭 깊이의 오차를 산정하기 위해 본 논문 2장의 계산식 (1)을 이용하여 마이크로 랜덤 패턴의 측정 폭과 공구인선 반경 값으로 절삭 깊이를 역으로 계산 하였으며, Fig. 10에 정리하여 나타내었다. 소재의 회전반경이 증가함에 따라 설계대비 실제 절삭 깊이가 최대 약 $1.5\mu\text{m}$ 증가하였으며, 무작위 절삭 깊이를 적용한 미세랜덤패턴의 가공에서 소재의 회전반경에 따른 오차 값을 보정하여 가공한다면 보다 균질한 랜덤패턴의 제조가 가능할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 절삭 깊이의 무작위 제어를 적용한 가공경로의 설계와 이를 이용한 미세랜덤 패턴의 초정밀 다이아몬드 선삭 가공에서 소재의 회전반경

에 따른 가공특성을 분석하는 연구를 수행하였다. 그 결과 측정 위치별로 평균 폭 $40.13\mu\text{m}$ - $55.51\mu\text{m}$, 평균 길이 $37.25\mu\text{m}$ - $59.49\mu\text{m}$ 의 미세랜덤 패턴을 제조하였으며, 소재의 회전반경이 증가함에 따라 가공오차가 증가하여 패턴 크기가 커짐을 확인하였다. 향후에는 본 연구를 통해 얻어진 가공반경에 따른 오차를 고려하여 가공경로를 보정하고 이를 통해 설계된 가공경로와의 가공오차를 개선하여 균질한 마이크로 랜덤패턴을 제조할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 정부(산업통상자원부)의 기계산업핵심 기술개발사업 “형상정밀도 100nm 급 차세대 모바일용 광학렌즈 고균질 제조를 위한 4축 초정밀 가공 시스템 및 렌즈모듈 제조 원천기술 개발”과 “고정밀 광학부품용 가공기 및 초정밀 Grooving 머신실증”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) T Guo, C Yu, H Li, C Su, Y Bi and X Liu, “Microlens Array Diffuser with Randomly Distributed Structure Parameter”, Journal of Physics: Conference Series, pp. 1-6, 2016.
- 2) S Katz, N Kaplan and I Grossinger, “Using Diffractive Optical Elements”, Optik&Photonik, pp. 83-6, 2018.
- 3) L Zhou, X-Y Xu, G-L Bai, Y-F Zhu, Q-Dong Ou, Y-L Ma, H-X Wei and Y Zhou, “Built-in Random Inverted Micro-cone Arrays: Nanosecond Laser-induced Surface Texturing for Optical Outcoupling Enhanced Flexible White Organic Light-emitting Diodes”, Organic Electronics, pp. 1-34, 2018.
- 4) J-Y Jeong, E-c Jeon, J-R Lee and T-J Je, “Fabrication and Optical Characterization of Micro Random Patterns On a Roll Metal Mold”, Micro and Nano Engineering Conference, p. 1, 2017.
- 5) J-Y Jeong, E-c Jeon, D-S Choi, J-R Lee and T-J Je, “Fabrication and Optical Characterization of Micro Random Patterns On a Roll Metal Mold”, Micro and Nano Engineering Conference, p. 1, 2017.

저자소개

정 지 영(Ji-Young Jeong) [정회원]



- 2015년 2월: 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2015년 9월~현재: 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과 (석박사 통합과정)

< 관심분야 >

초정밀 기계가공, 금형 및 광학부품가공, 롤투롤 제조공정

한 준 세(Jun-Sae Han) [학생회원]



- 2017년 2월 : 포항공과대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2017년 3월~2018년 11월 : 삼성전자 TP 센터, 책임연구원
- 2018년 11월~현재: 한국기계연구원 나노융합기계연구본부, 선임연구원

< 관심분야 >

분말사출성형 및 금형가공, 융복합 가공기술

최 두 선(Doo-Sun Choi) [정회원]



- 1989년 ~ 1990년 : (주)LIG 넥스원, 연구원
- 2002년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1990년~현재: 한국기계연구원 나노융합기계연구본부, 책임연구원

< 관심분야 >

나노/마이크로 패턴 가공 및 성형기술, 초정밀 3D 금속 하이브리드 프린팅시스템 기술

제 태 진(Tae-Jin Je) [정회원]



- 2004년 8월 : 금오공과대학교 기계설계공학과 (공학박사)
- 1982년 8월~현재: 한국기계연구원 나노융합기계연구본부, 책임연구원
- 2011년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과, 겸임교수

< 관심분야 >

초정밀 기계가공, 금형 및 광학부품가공, 사출 및 프레스성형