

레이저 보조 모듈을 이용한 Si 소재의 절삭조건 및 보정가공에 관한 연구

박영덕^{1,*}

국립한밭대학교 기계소재융합시스템공학과^{1,*}

A Study on Cutting Conditions and Finishing Machining of Si Material Using Laser Assisted Module

Young-Durk Park^{1,*}

Department of Mechanical Materials Convergence System Engineering, Hanbat National University ^{1,*}

(Received June 26, 2023 / Revised June 27, 2023 / Accepted June 30, 2023)

Abstract: In this study, a diamond turning machine and a laser-assisted machining module were utilized for the complex combined cutting of aspheric shapes and fine patterns on the surface of high-hardness brittle material, silicon. The analysis of material's form accuracy and corrective machining was conducted based on key factors such as laser output, rotational speed, feed rate, and cutting depth to achieve form accuracy below 1 μm and surface roughness below 0.1 μm . The cutting condition and corrective machining methods were investigated to achieve the desired form accuracy and surface roughness. The rotational speed of the spindle and the linear feed rate of the diamond turning machine were varied in five stages for the cutting condition test. Surface roughness and form accuracy were measured using both a contact surface profilometer and a non-contact surface profilometer. The experimental results revealed a tendency of improved surface roughness with increased rotational speed of the workpiece, and the best surface roughness and form accuracy were observed at a feed rate of 5 mm/min. Furthermore, based on the cutting condition experiments, corrective machining was performed. The experimental results demonstrated an improvement in form accuracy from 0.94 μm to 0.31 μm and a significant reduction in the average value of the surface roughness curve from 0.234 μm to 0.061 μm . This research serves as a foundation for future studies focusing on the machinability in relation to laser output parameters.

Key Words: Aspheric Lens, DTM, Free-form, Ultra-Precision machining, Laser-assisted machining

1. 서론

최근 우주/국방, 항공/자동차, 반도체/디스플레이, IT/신산업(AR/VR) 등 광 응용 산업분야에서 다양한 고정밀 광학부품이 폭넓게 적용되고 있으며, 특히 비구면/자유형상의 광학 렌즈와 초미세 패턴형상에 대한 수요증가로 초정밀 가공시스템을 활용한 금형가공 기술이 지속적으로 요구되고 있다.

초정밀 가공기술은 형상 정밀도(Form accuracy)와 표면 거칠기(Surface roughness)를 만족시키기 위해 그 시대에서의 가공 정밀도 한계를 추구하는 최고의 정밀도를 실현하는 가공법이라 할 수 있으며, 장

비, 공구, 가공공정, 측정/평가 등 개발된 기술이 많지 않으며 대부분의 시설/장비는 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서 수입하여 활용되고 있다. 가공공정 기술 또한 기초기술 임에도 불구하고 아직까지 많은 연구개발이 안되어 있어 고정밀도의 광학부품은 대부분 수입에 의존하고 있다.

초정밀가공기(Ultra precision machine)는 최첨단 유정압 이송 슬라이드 및 제어 기술, 초정밀 스핀들 제어기술을 바탕으로 절삭가공 시 발생하는 열과 진동의 간섭요인을 최소화하기 때문에 나노단위의 가공결과를 얻을 수 있다.⁽¹⁾ 기본적으로 절삭공구와 피삭재 사이의 위치결정 성능에 의해서 형상 정밀도와 형상 오차가 결정되고, 위치결정 안정성과 정밀도에 의해 표면 거칠기가 결정된다. 즉, 장비의 정밀도와 정확도, 공구와 소재의 절삭공정이 가공품의 정밀도를 결정하는 중요한 요소가 된다.

† 교신저자: parkyd@hanbat.ac.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

우주/국방, 반도체 등 특수용으로 사용되는 광학 소자는 소재의 특성으로 인해 초정밀 절삭가공이 어려운 소재들이 사용되며, 이러한 난삭 소재는 고강도, 고경도, 취성 등 기계적 성질로 인해 절삭 가공 시 공구마모로 인한 형상 정밀도 및 표면 거칠기를 확보하는데 애로점이 있으며, 비구면/자유형상의 고정밀 광학부품으로 개발하기 어려운 실정이다. 초정밀가공 장비, 공구, 소재의 연관관계를 Fig. 1에 나타내었다.

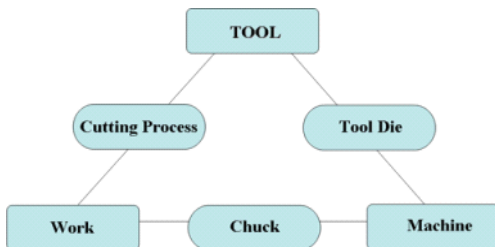


Fig. 1 Connections between ultra-precision machining equipment, tools, and materials

광학부품 금형을 제작하는 대표적인 초정밀가공 장비로 다이아몬드터닝머신(DTM : Diamond turning machine)을 사용한다. 이 장비는 소재의 표면을 제거하는 방식의 선삭가공 장비로 비구면/자유형상을 가공할 수 있으며 연마 공정, 연삭 공정보다 우수한 가공성을 가지고 있다.

또한, 레이저 보조 모듈(Laser assisted module)이 탑재되어 고경도 취성재료의 가공에 있어 취성파괴가 방지되는 장점이 있으며, 고경도 취성이 있는 난삭 소재의 가공공정에 활용이 가능하다.⁽²⁾

대표적인 난삭 소재로 게르마늄(Ge), 불화칼슘(CaF₂), 불화 마그네슘(MgF₂), 실리콘(Si) 등이 있으며, 이러한 소재들은 일반적인 렌즈가공용 광학소재에 비해 탄소 함량이 높아서 선삭가공 시 공구마모가 발생되어 가공 정밀도 확보가 어려운 실정이다.

이러한 문제해결을 위한 연구로 초정밀가공 장비와 부가적인 장치를 이용해 금형의 형상 정밀도와 표면 거칠기를 만족시키는 제조방법과 난삭 소재를 피삭재로 사용할 경우 레이저 보조 모듈을 통해 피삭재를 국부적으로 가열시켜 연화시킴으로써 소재의 절삭성을 향상시킬 수 있는 다양한 연구가 시도되고 있다.

차세대 광학계 렌즈로 주목받고 있는 비구면/자유형상의 렌즈와 회절광학소자(DOE) 금형은 유리

소재로 성형 시 고열로 인하여 금형의 손상이 발생되며 수명이 짧은 단점이 있다. 이러한 문제점 해결 방안으로 실리콘(Si), 실리콘 카바이드(SiC), 텅스텐 카바이드(WC) 등의 고경도 소재를 사용한다.

본 논문에서는 고경도 난삭 소재인 실리콘 소재 표면에 비구면 형상과 미세패턴이 복합된 절삭가공을 위해 다이아몬드터닝머신 장비와 레이저 보조 모듈 장치를 사용하였으며, 복합 선삭가공 시 주요 인자로 레이저 출력, 회전 속도, 이송 속도, 절삭 깊이 등의 변수에 따른 소재의 형상 정밀도 분석과 보정가공을 수행하였으며, 형상 정밀도 1 μ m이하, 표면 거칠기 0.1 μ m이하 확보를 위한 절삭조건 및 보정가공 방법을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

광학부품 금형을 제작하기 위해 비구면/자유형상 광학설계 및 기구설계와 초정밀 가공기를 사용하여 프레넬렌즈, 회절 광학 소자 렌즈를 가공하였으며, 가공소재의 정밀도 시험/분석 위해 접촉식 비구면 자유형상 측정기(PGI Freeform Form Taylor surf Series, RTH사)와 비접촉 3차원 공초점 레이저 현미경(3D Laser Confocal Microscope)를 이용하여 형상 정밀도와 표면 거칠기를 측정하였다.

2.1. 초정밀가공기

실험에 사용한 장치는 미국 AMETEK Precitech사의 다이아몬드 터닝머신(Diamond Turning Machine, DTM) Nanoform Xtc 장비는 μ -LAM사의 레이저 보조 모듈이 탑재되어 난삭 소재를 평면, 구면, 비구면, 자유형상 등 다양한 형상을 가공할 수 있다.

Nanoform Xtc 장비와 μ -LAM의 상세한 성능은 아래 Fig. 2, Table 1과 같다.



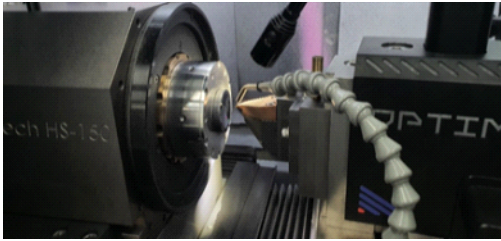


Fig. 2 Diamond Turning Machine & Laser assisted module

Table 1 Performance and specifications of DTM & LAM

Capacity	
Travel in X-axis	220 mm
Travel in Z-axis	220 mm
Travel in C-axis	Bi-directional Infinity 360°
Max. Swing capacity	300 mm diameter
Speed and Feed-rate	
Max. Traverse Speed X, Z	4,000 mm/min
Max. Spindle speed	10,000 RPM
C-axis Control Max. Speed	2,000 RPM
Accuracy	
X, Z Horizontal Straightness	≤0.2 μm
Spindle motion accuracy	Axial/Radial ≤20 nm
Typical Form accuracy results	100 nm under(P-V)
Typical Surface Roughness results	1.0 nm under(Ra)
Laser Assisted Module	
Laser Source	Nd:YAG
Laser wavelength	1,064 nm
Max. laser power	50 W

2.2. 측정/분석 장치

초정밀 미세가공에서 측정/분석과 평가는 반드시 수행되어야 한다. 가공 시편에 대한 정확한 측정과 분석을 통해 최적의 가공 조건 및 절삭 방법을 찾을 수 있으며, 가공된 시편의 측정 정밀도를 향상시키기 위해 이를 검증할 수 있는 측정 기술 및 검사 방법이 확보되어야 한다.

일반적으로 절삭가공 후 시료의 표면을 측정/검사하는 방법에는 미세한 촉침(프로브)으로 가공면을 긁어서 알아내는 접촉식 방법과 광원에서 출발한 레이저 빔이 집속 렌즈를 통해 시료 표면에 조사되어 시료 표면에서 반사되어 나오는 빔의 세기 변화를 검출하여 표면의 정보를 획득하는 비접촉

측정방법이 있다.⁽²⁾

초정밀가공 실험 결과 측정/분석을 위해 비접촉식 장비와 접촉식 장비를 동시에 사용하였으며, 접촉식 측정 장비로 미국 Taylor Hobson사의 PGI Free-form XL을 사용하였으며, 비접촉식 공초점 레이저 현미경은 일본 Olympus사의 OLS-5000LAF 모델을 사용하였다. Fig. 3은 접촉식 표면 형상측정에 사용한 측정기를 나타내며, Fig. 4는 비접촉 표면거칠기 측정에 사용한 공초점 레이저 현미경을 나타낸다.

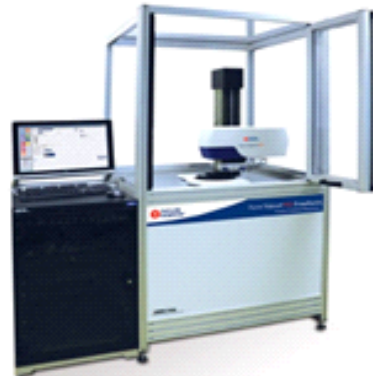


Fig. 3 Equipment for measurement - PGI Freeform



Fig. 4 Equipment for measurement - 3D Laser Confocal Microscope

실험에서 가공소재의 비접촉식 3차원 표면 거칠기와 형상정밀도 측정을 위해서 사용된 장비는 최대 17,280배의 배율을 갖고 있으며, 구성은 20x의 접안렌즈와 5x, 10x, 20x, 50x, 100x 의 레이저 타입 대물렌즈로 구성되어 있다. 광원은 가시광 영역의 405 nm 파장대를 갖는 Laser 광원을 사용하며, 장비의 수직 분해능 (Vertical Resolution)은 0.5 nm 이고, 수평 분해능 (Horizontal Resolution)은 1 nm 로 구성되어 있다.

2.2. 실험방법

본 실험에서 사용한 소재는 고경도 실리콘 소재로 다이아몬드 터닝머신과 레이저 보조 모듈 장치를 사용하여 절삭가공을 진행하였으며, 절삭가공 시 주요인자로 레이저 출력, 회전 속도, 이송 속도, 절삭 깊이에 따른 소재의 형상 정밀도 분석과 표면 거칠기를 측정하였다.

2.3. 실험변수

본 연구의 실험결과에 영향을 미치는 변수로는 다음과 같은 변수들이 있다.

회전 속도(RPM)

DTM 장비의 회전축(C-axis) 회전속도에 따른 변화를 알아보기 위해 회전 속도를 1,500~3,500rpm까지 단계를 5수준 나누어 실험하였다.

Table 2 Experimental condition of RPM

Condition	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
RPM	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
Laser Power	10W				
Feed-rate	3mm/min				
Depth of cut	3 μ m				

이송 속도(Feed-rate)

DTM 장비의 직선축(X-axis) 이송 속도에 따른 변화를 알아보기 위해 이송 속도를 1~5mm/min까지 단계를 5수준 나누어 실험하였다.

Table 3 Experimental condition of Feed-rate

Condition	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
RPM	3,000				
Laser Power	10W				
Feed-rate	1mm/min	2mm/min	3mm/min	4mm/min	5mm/min
Depth of cut	3 μ m				

단결정 다이아몬드공구(SCD-Tool)

DTM 장비에서 절삭가공을 위해 사용되는 공구는 레이저보조가공을 위한 LAM 전용 공구로 단결정 다이아몬드공구를 사용하였다.

Table 5 Diamond Tool detailed specifications

Diamond Tool	Value
Nose Radius	0.5 mm
Rake angle	-35°
Clearance angle	10°
Window angle	120°

Table. 2에서 정리한바와 같이 회전 속도(RPM)에 따른 실험을 위해 레이저 파워를 10W, 이송 속도 3mm/min, 절삭 깊이 3 μ m로 고정하고, DTM의 주축 회전 속도를 1,500~3,500rpm로 변화를 시켰으며, Table. 3은 이송 속도에 따른 실험을 위해 주축 회전 속도를 3,000rpm으로 고정하고, 이송 속도를 변화시키며 실험을 진행하였으며, 절삭가공에 사용된 다이아몬드공구의 사양은 Table. 5에 정리하였으며, Fig. 5는 실험에 사용된 레이저보조가공 전용 다이아몬드공구를 나타낸다.



Fig. 5 Mono-crystalline Diamond Tool for LAM

3. 실험결과 및 분석

3.1. 실험변수 따른 형상 정밀도 분석

초정밀가공 주요인자로 회전 속도에 따른 소재의 형상 정밀도와 표면 거칠기를 분석한 결과, Table 6에서 정리한 것과 같이 회전 속도가 증가함에 따라 중심선 평균 거칠기 측정값(Ra)이 좋아지는 경향을 보이고 있으나, 2,500rpm 이후로는 미미한 차이를 보이고 있으며, 회전 속도에 따라 형상 정밀도(Pt)의 수치는 큰 차이점이 없게 나타났다.

Table 6 Ra and Pt according to rotational speed

RPM	Ra(nm)	Pt(μ m)
1,500	23.1	0.947
2,000	30.3	1.095
2,500	22.9	0.963
3,000	23.3	1.112
3,500	21.4	0.844

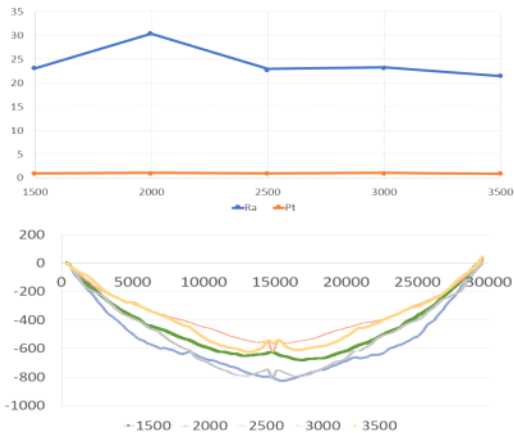


Fig. 6 Analysis of shape precision according to rotational speed

이송 속도에 따른 소재의 가공면 형상 정밀도와 표면 거칠기를 분석한 결과 Table 7에서 정리한 것과 같이 이송 속도 5mm/min에서 중심선 평균 거칠기는 18.4nm로 가장 낮으며, 2mm/min에서 형상 정밀도 1.712nm로 가장 높게 나타났으며, 표면 거칠기 및 형상 정밀도의 수치는 5mm/min에서 좋게 나타났다.

Table 7 Ra and Pt according to feed-rate speed

Feed rate (mm/min)	Ra(nm)	Pt(μm)
1	22.4	0.546
2	25.4	1.712
3	23.3	1.112
4	22.8	1.088
5	18.4	0.566

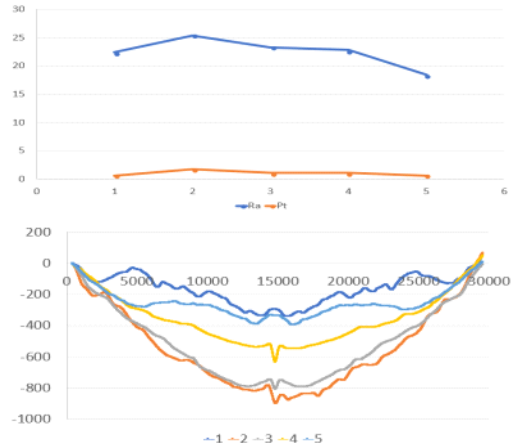


Fig. 7 Analysis of Shape precision analysis according to feed-rate speed

3.2. 보정 가공 실험 및 결과

프레넬렌즈, 회절 광학 소자(DOE) 렌즈는 가공기술이 발전함에 따라 지속적인 연구와 시제품들이 나오고 있지만 기본 렌즈들과는 다르게 가공면에 대한 비구면 형상과 미세패턴이 혼합되어 1차 가공에서 2차 가공으로 보정하는 방법이 매우 제한적이다. 렌즈의 곡률에 대한 형상 정밀도와 패턴의 스펙(Zone)을 맞추기 위해 특수 제작된 툴(half tool)을 사용하는 방법이 있으나, 2차 보정 가공을 위해 LAM 전용공구를 사용하였다.

Fig. 8은 초정밀가공기를 이용하여 비구면과 미세패턴이 혼합된 Si DOE 렌즈를 보정 가공하기 위한 공정(Flow chart)을 보여주고 있다. 가장 중요한 것은 가공된 가공시편을 정확하게 측정하고, 보정을 위한 절차를 반드시 수행되어야 한다는 것이다.

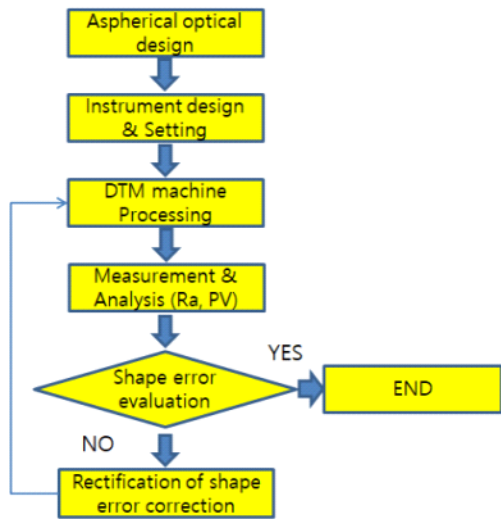


Fig. 8 Flow chart for design of experiment

본 실험에서 고경도 실리콘 소재 가공에 적합한 DTM과 Laser Assisted Module을 사용하여 초정밀가공을 진행하였다. 다이아몬드공구에 레이저가 투과하여 소재의 표면을 국부적으로 용해시켜 가공이 진행되기 때문에 특수제작 툴(half tool)를 사용하지 않고, 레이저 전용 공구를 사용하였다. 1차 가공에 대한 보정은 측정값을 기반으로 Zone의 영역을 구간별로 잘라내고, 보정값으로 인해 Zone에 데미지를 주지 않도록 수정·보완하여 2차 가공을 진행하였고, 가공조건으로는 가공성 확인을 위한 실험에서

고정 변수로 실험한 것과 같이 주축 스피들 회전 속도를 3,000rpm, 이송 속도는 3mm/min 로 하였으며, Laser Power는10W~15W로 설정하였다. 측정 방식은 보정가공을 위해 접촉식 방식으로 진행하였다. Fig. 9는 보정 가공 실험 및 레이저보조가공을 보여준다.

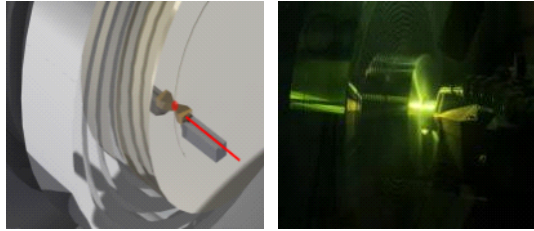
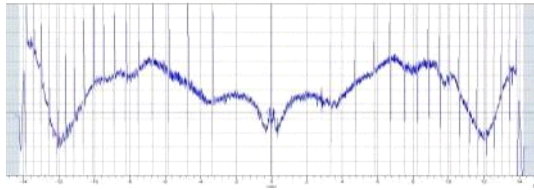


Fig. 9 A Laser assisted machining

측정이 접촉식 방식으로 진행되어 패턴Zone의 edge 부분에서 수치가 튀는 현상을 볼 수 있으며, 측정된 값에서 튀는 구간을 기준으로 Zone에 대한 오차 범위를 선정하고 보정 가공을 위한 경로를 범위에 맞게 잘라내어 영역별 경로를 추출하여 가공을 진행하였다.

<Compensation before>



<Compensation after>

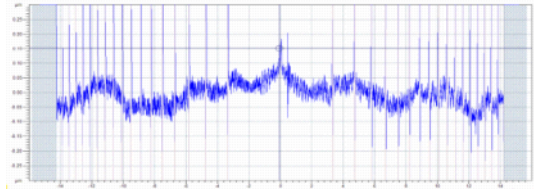


Fig. 10 A result of compensation before and after.

Table 8과 같이 보정 가공 전, 후를 비교하였을 때, 형상 정밀도 측정값(PV: Peak to value)이 0.94 μ m에서 0.31 μ m으로 보정이 되었으며, 표면 거칠기 곡선의 평균값(RMS : Root mean square)에 대해서도 많이 개선되었다. 또한, 보정 가공 후에도 Fig. 11에서처럼 패턴 Zone의 edge 부분이 손상되지 않은 것을 확인하였다.

Table 8 A result of compensation.

	Before	After
P-V(μ m)	0.94	0.31
RMS(μ m)	0.234	0.061



Fig. 11 A DOE Lens and edge of zone after Compensation.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 비구면 자유형상의 렌즈코어 금형을 가공하기 위한 초정밀 가공기술과 기계적으로 가공성이 좋지 않은 대표적 난삭 소재인 Si 소재에 비구면 형상과 패턴이 혼합된 렌즈를 제작하기 위한 절삭가공 특성에 대한 연구를 수행했다.

초정밀 절삭가공 특성 연구를 위해 Nanoform Xtc 다이아몬드 터닝머신과 레이저 보조 모듈 장치를 사용하였다. 실험에 사용된 다이아몬드 터닝머신 장비의 회전축 회전 속도와 직선축 이송 속도를 주요 변수로 하여 실험을 진행 하였으며, 절삭 깊이와 레이저 출력을 고정변수로 하였으며, LAM 전용공구를 사용하여 절삭가공 실험을 진행하였다.

절삭가공 후 가공시편인 실리콘의 가공면을 접촉식 측정기와 비접촉 측정기를 이용하여 표면 거칠기와 형상 정밀도를 측정한 결과, 회전 속도가 증가함에 따라 표면 거칠기 측정값이 좋아지는 경향을 확인하였으며, 이송 속도에 따른 소재의 가공면 형상 정밀도와 표면 거칠기를 분석한 결과 이송 속도 5mm/min에서 표면 거칠기와 형상 정밀도가 좋게 나타났다.

앞선 실험에서 확인된 절삭조건을 바탕으로 비구면과 미세패턴이 혼합된 Si DOE 렌즈 형상가공 및 보정 가공 실험을 진행하였다. 가공성 확인을 위한 실험에서 고정 변수로 실험한 것과 같이 주축 스피

들 회전 속도를 3,000rpm, 이송 속도는 3mm/min 로 하였으며, Laser Power는 10W~15W로 설정하여 가공한 결과 형상정밀도가 0.94 μ m에서 0.31 μ m으로 보정이 되었으며, RMS 값에 대해서도 많이 개선됨을 확인하였다. 또한, 가공조건의 주요 인자들이 절삭특성에 미치는 영향을 비교하고, 다이아몬드 터닝머신과 레이저 보조 모듈을 이용한 초정밀 절삭조건 및 보정가공에 대한 특성을 파악하고자 하였다. 이 연구를 기초로 하여 추후에는 레이저 출력 변수에 따른 상관관계 분석에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

후기

본 연구는 2020학년도 한밭대학교 교내학술연구 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- 1) Y. D. Park, Jang, T. S. “A Study on Ultra Precision Machining of Free-form Molds for Advanced Head- up Display Device”, Journal of the Korea Academia- Industrial cooperation Society, 20:1 290-296, 2019.
- 2) Dae Ho Kim, Jun Hee Hong, “Study on Ultra-precision Machining of Si Optics Using Laser-assisted Machining”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 30:5 339~344, 2021.
- 3) Y. D. Park, H. H. Maeng, D. H. Kim, “A Study on the Compensation Machining of Si DOE Lens by using the Laser Assisted Machining” Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 2020.
- 4) S. D. Kang, W. S. Kim, K. H. Jang, S. S. Park, D.H. Kim,. “A Study on the Ultra-precision Compensation Machining of Axisymmetric Lens core” Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 108-114. 2005
- 5) Kim, J. D. and Kim, D. S., “Surface characteristics of magnetic-disk cutting using a single-crystal diamond tool in an ultra precision lathe,” Journal of Materials Processing Technology 59, pp.303-308, 1996.
- 6) T. Moriwaki, K. Okuda, “Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting.” ann CIRP, Vol.38, pp115~118, 1989.
- 7) I Jong Kim, Hong Seung Kim, June Gyu Park, Byung Jun Jeong, Dong Ho Lee, Ji Yong Bae, Dong Uk Kim, Kye-Sung Lee, Geon Hee Kim, and Ki Soo Chang, “Bragg scattering from a millimeter-scale periodic structure with extremely small aspect ratios”, Optics express, Vol. 27, No. 15, 2019.
- 8) Ji-Young Jeong, Jun-Se Han, Doo-Sun Choi, Tae-Jin Je, “A study on size variation of micro-pattern according to turning radius of workpiece in diamond turning with controlled random cutting depth”, J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.14 No.1, 2020
- 9) Sung-Taek Jung, Ki-Hyeong Song, Young-Jae Choi, Seung-Yub Baek, “Research on ultra-precision fine-pattern machining through single crystal diamond tool fabrication technology”, J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.14 No.3, 2020.
- 10) Seok-Jae Ha, Jeong-Yeon Park, Gun-Hee Kim, Gil-Sang Yoon, “Micro cutting process technology for micro molds parts” J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.13 No.1, 2019.
- 11) K. P. Hong, M. W. Cho, I. J. Choi, “A Study on the Machining Characteristics of Co-Cr-Mo Alloy in Turning Process” J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.11 No.1, 2017.

저자 소개

박 영 덕 (Young-Durk Park)



- 2019년 2월: 선문대학교 재료금속공학과 (공학박사)
- 2004년 4월~2020년 2월: 충남테크노파크, 수석연구원(부장)
- 2020년 2월~현재: 국립한밭대학교 기계소재융합시스템공학과 교수

< 관심분야 >

초정밀가공, 금속재료, 기계재료, 디스플레이 광학부품