

## 광학소자의 초정밀절삭 특성에 관한 연구

김주환\*, 박원규 (충남대 대학원 기계공학과), 김건희 (한국기초과학지원연구원),  
원종호 (충남대 기계공학과)

### The Characteristics of Ultra Precision Machining of Optical Crystal

J. H. Kim\*, W. K. Park(Graduate School, Mech. Eng. Dept., CNU), G. H. Kim(KBSI),  
J. H. Won(Mech. Eng. Dept., CNU)

#### ABSTRACT

Machining technique for optical crystals with single point diamond turning tool is reported in this paper. The main factors influencing the machined surface quality are discovered and regularities of machining process are drawn. Optical crystals have found more and more important applications in the field of modern optics. Optical crystals are mostly brittle materials of poor machinability. The traditional machining method is polishing which has many shortcomings such as low production efficiency, poor ability to be automatically controlled and edge effect of the workpiece. The purpose of our research is to find the optimum machining conditions for ductile cutting of optical crystals and apply the SPDT technique to the manufacturing of ultra precision optical components of brittle materials. As a result, the surface roughness is good when spindle speed is 200m/min, and feed rate is small. The influence of depth of cut is very small.

**Key Words** : Brittle materials(취성재료), SPDT(단결정 다이아몬드 선삭), Surface roughness(표면거칠기)

#### 1. 서론

광학용 유리는 현대 광학분야에서 더욱더 중요한 부분을 차지하고 있다. 초정밀 가공분야에서는 이들 재료들에서 어느 정도의 광학표면을 얻을 수 있느냐가 중요한 문제로 되어왔다. 광학용 유리는 대부분 가공성이 좋지 않은 취성 재료들이다. 전통적인 가공방법으로는 낮은 생산 효율과 자동으로 조절 능력이 부족하고 공작물의 Edge effect와 같은 많은 결점을 가진 폴리싱이 있다. 게다가 폴리싱은 수요가 증가하고 있는 비구면을 가공할 수 없다. 단결정 다이아몬드 선삭은 적당한 인성 때문에 가공하기 쉬운 알루미늄, 동과 같은 비철금속의 광학 반사경 제조에 널리 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 그러나 최근의 광학 재료들은 우수한 품질의 광학 표면을 얻기가 곤란하고, 높은 취성을 갖는다. 만약 이런 취성재료들의 가공 조건들이 최적화되지 않는다면 절삭영역에서 결정재료의 미세 분열 때문에 가공표면에 피치와 크랙이 남게 될 것이다. 그러나 우리는 파쇄기구로부터 크

랙 발생과 전파가 재료의 긴장상태에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다.<sup>[2]</sup> 다른 한편으로는 절삭영역에서 긴장 영역은 절삭 매개 변수들과 절삭공구 형상을 조절함으로써 최적화 될 수 있다. 그래서 미세 균열을 피할 수 있고 마치 연성재료들의 가공처럼 소성변형에 의해 물질을 제거할 수 있는 최적 조건하에서의 취성물질의 가공을 "연성 절삭" 이라고 한다.

산업용 CO2 Laser는 국내에 이미 Drilling, Cutting, Marking, Welding, 의료용 등의 목적으로 많이 보급화 되어 있으며, Laser 부품의 대부분은 수입에 의존하고 있다. Microvia Laser Drilling을 위한 렌즈는 현재 핸드폰의 기관 천공 등에 사용되어지며, 100% 수입에 의존하고 있다고 정밀, 고성능의 천공을 위한 CO2 Laser용 Driller에는 정밀한 렌즈가 필수적으로 장착되며, 국내의 산업용 Laser driller를 사용하는 기업이나, Laser driller를 제조 판매하는 회사에 반드시 국산화 및 수입대체가 이루어져야 할 부분이다.

본 연구에서는 Laser driller에 사용되는 광학소자 중 ZnSe의 인성 절삭에 대한 최적의 가공조건을 찾는 것이며 취성 재료의 초정밀 광학 요소들을 제조하는데 다이아몬드 전삭 기술을 적용함으로써 수입 의존도가 매우 큰 자외선영역에 사용되는 렌즈의 국산화 및 수입 대체 효과가 기대된다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구는 초정밀가공기인 RTH사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신(DTM)을 이용하였다. 실험에 사용된 공구는 노우즈 반경 0.4 mm, Rake angle  $-5^{\circ}$ ,  $-15^{\circ}$ ,  $-25^{\circ}$ 의 원인다이아몬드를 사용하였으며, 측정장비로는 WYKO사의 비접촉 광학식 측정기(NT2000)와 Laser interferometer WYKO6000 및 RTH사의 미구면 측정기인 Form Talysurf series2를 사용하였다. Fig. 1은 초정밀 가공 시스템을 나타낸다.



Fig. 1 The system of ultra precision lathe

초정밀 가공실은 온도  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ , 습도  $30 \pm 5\%$ , Clean room class 10,000인 항온항습의 크린룸이며, 장비의 진동방지를 위한 독립기반구조로써 장비 하부는 3Point Air Bag으로 지지된다. 초정밀 가공기는 X·Z축의 테이블 이송부는 유정압베어링, 주축은 공기 정압베어링으로 100~3,000RPM, Feedback System Resolution은 1.25nm로 Zygo Laser Interferometer System을 사용하였다.

Table 1 Specification of precision stage

Feedback system resolution		1.25nm (0.05 $\mu\text{m}$ )
Slid (X & Z axes)	Design	Hydrostatic oil bearings
	Travel	(X-axis) : 300mm (12") (Y-axis) : 300mm (12")
	Horizontal straightness	$\leq 0.2\mu\text{m}$ (8 $\mu\text{m}$ )full travel & $\leq 0.025\mu\text{m}$ / 25mm(1 $\mu\text{m}$ /inch)
	Squareness	$\leq 0.5$ arc seconds
	Velocity	0.25 to 250mm/min (0.01" to 10" /min)

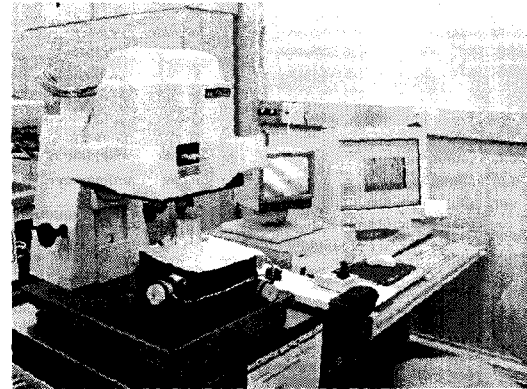


Fig. 2 Measurement System (NT2000)

실험에 사용된 재료는 CO2 Laser용 Driller에 사용되는 렌즈로 ZnSe를 선정하였으며,  $\emptyset 38\text{mm}$ 크기의 재료를 단면절삭하는 방법으로 초정밀 절삭 실험을 실시하였다. Table 1은 초정밀가공기의 정밀도를 나타낸 것이며, Fig. 2는 비접촉식 측정기인 NT2000이다.

### 2.2 실험방법

시작품 재료인 ZnSe의 초정밀 최적 가공조건을 찾기 위하여  $\emptyset 38\text{mm}$ , 두께 14 mm의 시편을 제작하여 주축회전속도와 절삭깊이, 이송속도에 대하여 표면거칠기를 측정하였다. 실험을 수행하기 전에 ZnSe를 주축의 진공척에 20 psi로 고정하여 회전시켰으며, 이때 사용되는 절삭유의 급유방식은 압축공기와 절삭유인 방절유를 혼합하여 분사하는 극미량(MQL) 분사방식을 사용하였다. 또한 절삭 후 측정 방법은 시편의  $\emptyset 30\text{mm}$ 되는 부분을 선정하여 항상 같은 위치에서 이리번 반복 측정 후 평균하여 측정 값을 얻었다. 본 실험을 통하여 ZnSe의 최적 초정밀 가공조건을 찾아내었으며, 그 가공조건을 이용하여 CO2 Laser용 Driller에는 정밀한 미구면 렌즈를 제작하였다.

시제품 제작은 선반에서 일차 외각을 가공 후 지그를 이용하여 제품을 고정하고, 미구면 세수 수식을 적용하여 미구면 가공 경로의 프로그램을 작성한 후 요구 정밀도에 이내로 가공하였다. 사용된 공구는 원인다이아몬드 공구로써 1차 황삭 가공에는 공구형상정도(Tool form accuracy) 2 $\mu\text{m}$ 인 공구를 사용하였으며, 정삭 가공시에는 노우즈 반경이 0.4 mm인 공구를 사용하여 최종 가공하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 주축회전속도에 따른 표면거칠기

Fig. 3은 절삭깊이 1 $\mu\text{m}$ , 이송속도 4 mm/min일 때 주축회전속도 변화에 따른 경사가  $-5^{\circ}$ ,  $-15^{\circ}$ ,  $-25^{\circ}$

의 변화에 대한 표면 거칠기를 나타내고 있다. 주축 회전속도가 140 m/min에서 200 m/min까지는 표면 거칠기가 양호해지다가 200 m/min 이상으로 증가할 경우 표면 거칠기는 불량해지고 있음을 볼 수 있다. 경사각의 변화에 따른 표면거칠기를 살펴보면 경사각이  $-5^\circ$  로 작은 경우의 표면거칠기가 경사각이 큰 경우의 표면거칠기 보다 양호한 결과로 나타났으며, 경사각  $-25^\circ$  보다는  $-15^\circ$  의 경사각으로 가공했을 때 더 나은 표면거칠기를 얻을 수 있었으며, 주축회전속도 200 m/min 일 때  $-5^\circ$  경사각의 경우 표면거칠기는 9.09 nm Ra로 경변을 얻을 수 있었다. 따라서 주축회전속도는 200 m/min으로 하는 것이 표면 거칠기 향상에 도움을 줄 수 있으며 같은조건에서는 경사각이 작은 경우에 우수한 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

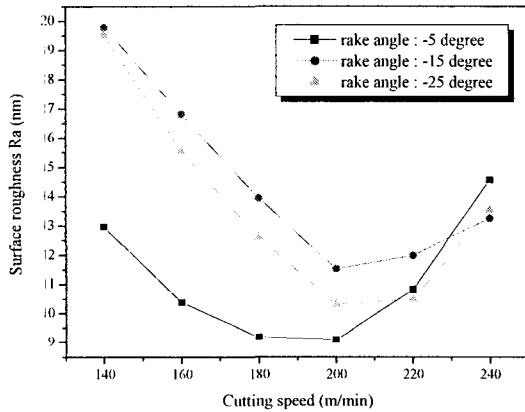


Fig. 3 Roughness(Ra:nm) versus of spindle speed

### 3.2 절삭 깊이에 따른 표면거칠기

Fig. 4는 주축회전속도 200 m/min, 이송속도 2mm/min에서 각각의 경사각에 대한 절삭깊이 변화에 따른 ZnSe의 표면거칠기를 나타내고 있다. 이론적인 표면거칠기에 따르면 절삭 깊이에 대한 영향은 없는 것으로 나타나지만 실제로는 그 변화가 무시할 수 없는 것으로 나타났다. 비록 다른 변수들과 비교하면 그 변화의 폭은 그리 크지 않지만 본 실험결과 절삭 깊이가 증가하면서 표면거칠기 또한 증가하는 것으로 나타났다. 또한 경사각의 변화에 따른 표면 거칠기를 살펴보면 주축 회전속도의 변화에 대한 결과와는 다르게  $-15^\circ$  의 경사각으로 가공했을 때가 같은 조건하에서 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었으며, 반대로  $-5^\circ$  의 경사각으로 가공했을 때 가장 나쁜 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 이것은 ZnSe의 초정밀가공에 있어서 소재 특성으로 사료되며, 절삭깊이가 가장 작은 0.1mm일 때 5.418 nm Ra를 얻을 수 있었다. Fig. 5는 비접촉식 측정기인 NT2000을 사용하여 측정된 결과이다.

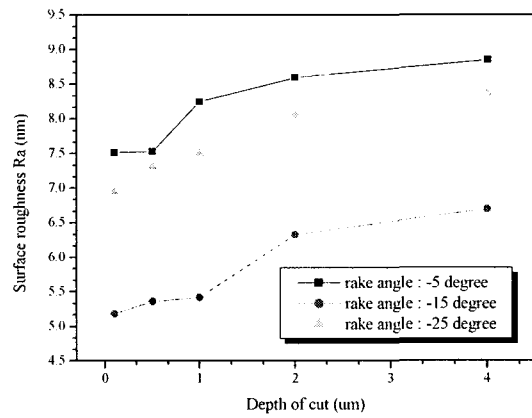


Fig. 4 Roughness(Ra:nm) versus of depth of cut

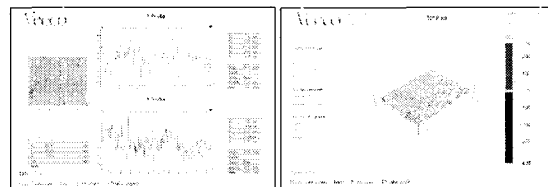


Fig. 5 Measurement of surface roughness by NT2000

### 3.3 이송속도에 따른 표면거칠기

Fig. 7은 주축회전속도 200 m/min, 절삭깊이 1mm에서 이송속도 변화에 따른 각각의 경사각에 대한 ZnSe의 표면 거칠기를 측정된 결과이다.

이송속도에 따른 표면거칠기는 이론식에서 나타난 결과와 같이 비례적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이송속도 2 mm/min에서 표면 거칠기가 가장 양호한 값을 나타내고 있으며, 이송속도 4 mm/min 이상에서는 표면거칠기가 급격히 악화되는 현상이 나타나는데 이는 원활한 절삭칩의 배출이 이루어지지 않음으로써 발생하는 것으로 사료된다. 또한 이송속도가 빨라지면 ZnSe의 단면에 그 결경들이 모두 절삭되지 않고 절정의 경계면이 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있었다. Fig. 6은 이송속도 12 mm/min과 2 mm/min의 가공 표면을 비교한 것이다.

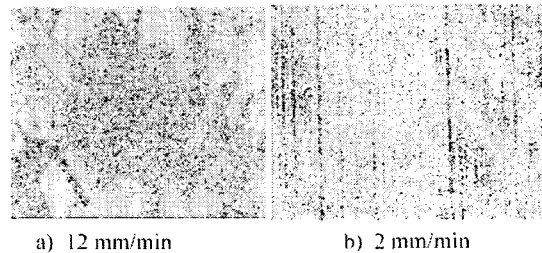


Fig. 6 Relationship surface roughness and feed rate

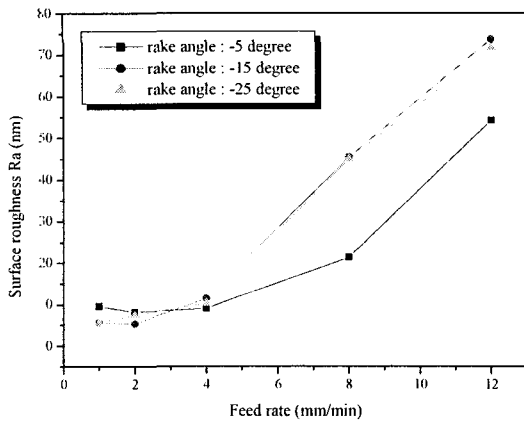


Fig. 7 Roughness(Ra:nm) versus of feed rate

#### 4. 비구면 렌즈 제작

##### 4.1 비구면 렌즈 가공

CO2 Laser용 Driller에 사용되는 비구면 렌즈는 그 정밀도가  $\lambda/10$  P.V 이하가 되어야 하며, 곡률 반경은 약 R0.9mm의 비구면 렌즈로, 가공 요구정밀도는 표면조도가 10 nm Ra 이하의 정밀도를 요구한다.

비구면 렌즈의 형상가공은 일차적으로는 비구면 가공프로그램을 이용하여 NC 프로그램을 작성하고, 최적곡률 반경(Best Radius)을 찾아 구면 가공한다. 곡률 반경과 형상정도를 측정하여 공구의 높이와 X축의 영점을 잡아준다. 공작물의 동심을 1 $\mu$ m 이내로 맞추어 공구를 설치한다. 비구면 프로그램을 이용하여 가공한다. Fig. 8은 비구면 렌즈의 샘플 가공 모습이다.

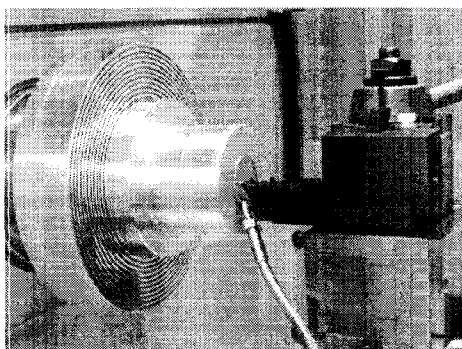


Fig. 8 Ultra precision machining of aspherical lens

##### 4.2 비구면 렌즈 평가

Fig. 9는 접촉식 표면거칠기 측정기 Form Talysurf series2를 이용하여 렌즈의 평면부위를 측정 한 결과를 나타낸다. 초정밀 가공조건은 ZnSe에 대한 초정밀 최적절삭조건 실험을 통하여 찾아내 회전

속도 200 m/min, 이송속도 2 mm/min, 절삭깊이 0.1 $\mu$ m로 가공한 표면의 측정결과이다.

CO2 Laser용 Driller에 사용되는 비구면 렌즈의 가공결과 요구되는 정밀도인 표면거칠기 8.5 nm Ra, 형상정도는 0.2119 $\mu$ m P.V로 가공을 완료하였다.

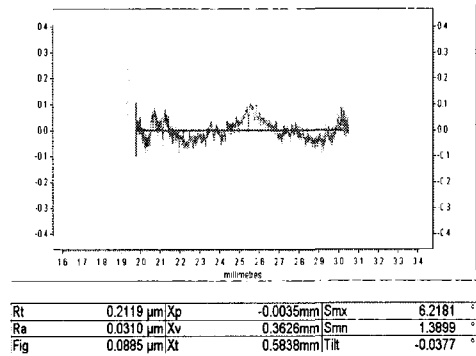


Fig. 9 Measurement of surface roughness by Form Talysurf series2

#### 4. 결론

본 연구에서는 초정밀가공기(Nanoform600)로 천연다이아몬드 공구를 사용하여 ZnSe 광학소재의 최적초정밀 절삭조건을 찾아내었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) ZnSe의 초정밀 최적가공조건은 주축회전속도 200 m/min, 이송속도 2mm/min, 절삭깊이 0.1 $\mu$ m일 때 5.418 nm Ra 정도의 표면거칠기를 얻을 수 있었다.
- (2) 절삭깊이에 따른 영향은 거의 없었으며, 이송속도에 따른 영향이 가장 크게 나타났다. 또한 공구의 경사각은 -15 $^{\circ}$  일 때 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었다.
- (3) CO2 Laser용 Driller에 사용되는 비구면 렌즈의 초정밀 가공 결과 평면은 표면거칠기 8.5 nm Ra, 형상정도는 0.2119 $\mu$ m P.V로 가공을 완료하였다.

#### 참고문헌

1. 이재경, 이응숙, 채태진, 심충건, 송봉우, 고테조, "초정밀경면 절삭 가공 기술 개발," 과학기술지 최종보고서, 1992.
2. 정기형, 한복수, 김형진, 김기수, 남공식, "초정밀 절삭 가공 시스템에 관한 연구," 대한공업교육학회지, Vol. No 2, pp. 116-124, 1997.
3. Donaldson, D. D. Thompson, "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine." Ann. CIRP, Vol. 35, PP. 373-376, 1986.