

## 적외선 광학소자의 초정밀 절삭특성에 관한 연구

김건희\*, 양순철, 김효식, 신현수(한국기초과학지원연구원), 원종호(충남대)

### The characteristics of Ultra Precision Machine of Optical crystals for Infrared Ray

G. H. Kim, Y. S. Yang, H. S. Kim, H. S. Sin(KBSI), J. H. Won(Dept. of Mechanical Eng. , Chungnam Univ.)

#### ABSTRACT

Single point diamond turning technique for optical crystals is studied in this paper. The main factors which are influential 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 optimal machining conditions for ductile cutting of optical crystals and to apply the SPDT technique to the manufacturing of ultra precision optical components of brittle material(Ge). Many technical challenges are being tried for the large space infrared telescope, which is one of the major objectives of the National Strategic Technology Road Map (NSTRM).

**Key Words** : SPDT(단결정 다이아몬드 선반), Non-ferrous metal(비철금속), Cutting force(절삭력), Surface roughness(표면거칠기)

#### 1. 서론

항공우주에 사용되는 위성 카메라는 생태계 변화나 환경오염 등의 일반적인 지구관측 뿐만 아니라 정밀한 지도제작 등에도 사용될 수 있는 고해상도 광학계이므로 미국 등의 선진국에서도 기술이전을 매우 기피하는 첨단 기술이다<sup>1)</sup>. 단결정 다이아몬드 선삭은 적당한 연성 때문에 가공하기 쉬운 알루미늄, 동과 같은 비철금속의 광학 반사경 제조에 널리 사용되고 있다.<sup>2-4)</sup> 그러나 최근의 광학 재료들은 우수한 품질의 광학 표면을 얻기가 곤란하고, 높은 취성을 갖는다. 만약 이런 취성재료들의 가공 조건들이 최적화 되지 않는다면 절삭영역에서 결정 재료의 미세 분열 때문에 가공표면에 피치와 크랙이 남게 될 것이다. 그러나 우리는 파쇄기구로부터 크랙 발생과 전파가 재료의 긴장상태에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다.<sup>5-6)</sup>

국가전략기술지도(NSTRM) 상의 중요 목표 중의 하나인 대형 적외선 우주 망원경을 성공시키기 위한 다양한 기술적 노력들이 전개되고 있다. 그

일환으로 한국천문연구원과 한국기초과학지원연구원은 정책 협동 과제로 한국기초연구원, (주) 아이스리시시스템과 함께 우주용 적외선 냉각시스템을 개발하고 있다. 본 논문에서는 이렇게 개발중인 우주적외선 냉각시스템 시험모델 (Protomodel of Space Infrared Cryogenic System, PSICS)의 광학계로 사용되는 적외선 광학소자인 게르마늄에 대하여 절삭 깊이, 이송속도에 대한 초정밀 최적가공조건을 찾아내었으며, Kistler 9251A 를 이용하여 절삭력을 측정하였다. 이렇게 얻은 게르마늄의 초정밀가공 특성을 적용하여 우주망원경의 적외선 열화상 카메라에 적용되는 비구면 반사경의 형상정밀도 향상에 관한 연구를 수행하였다.

#### 2. 실험장치 및 방법

##### 2.1 실험장치

실험에서 절삭력을 측정하기 위해 초정밀가공기인 Nanoform600 을 사용하였으며, Fig. 1 과 같은 절삭력 측정 장치를 구성하였다. 절삭력 측정을 위한

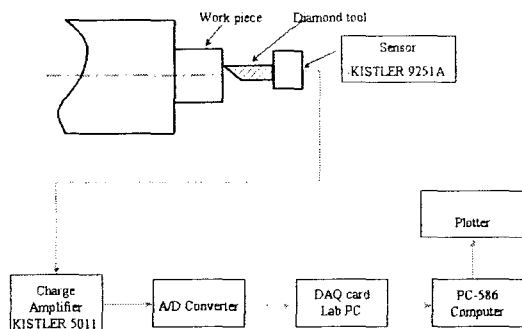


Fig. 1. Experimental setup

공구 동력계로는 Kistler Type 9251A, 충전앰프 (Charge amplifier)는 Kistler Type 5011 을, DAQ card 는 National Instruments(NI)사의 Lab PC+를 사용해 검출한 절삭력 신호를 컴퓨터 응용 소프트웨어를 사용해 구분력과 배분력을 절삭력 데이터로 저장하여 분석하였다.

초정밀 가공 시 절삭력 측정기술은 절삭 다이아믹스를 이해하고 제어기법을 개발하는데 필수적이다. 이 힘들은 단지 다른 기본적인 금속절삭 변수 또는 재료 제거율에 의존하지 않는다. 따라서 정량적인 데이터를 얻기 위해 힘 측정 장치를 설계, 제작하였다.

초정밀 가공기(DTM)에 공구동력계를 장착 할 수 있도록 지그(Jig)를 설계 제작하여 부착하였다. 실험은 단결정 다이아몬드 공구로 40mm 크기의 Ge 를 단면절삭방법으로 절삭 실험을 실시하였다. 초정밀 가공기에 설치된 압전형 공구동력계를 이용하여 얻은 아날로그 3 축 절삭력 신호를 증폭한 후 A/D 변환기를 통하여 PC 에 전송하여 데이터 처리 하였다. 단면 절삭에 의한 절삭력 측정으로 Y 축 방향에 작용하는 힘인 주절삭력을 Ft(Tangential force)로 표기 하였으며, Z 축 방향으로 작용하는 절삭력인 배분력을 Fp(Passive force)로 나타내고, X 축 방향에 작용하는 힘인 이송분력을 Ff(Feed force)로 표기하였다.

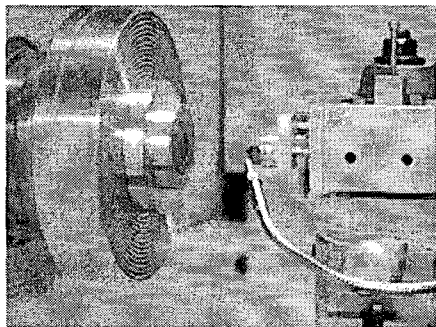


Photo. 1 Cutting experiment apparatus

다이아몬드 공구에는 주로 코너 노즈 반경  $R=0.8$ , 경사각  $-15$  도로 여유각  $10$  도로 예리하게 완성된 바이트를 사용하였다. 또한, 가공액은 방전유를 압축공기와 혼합하여 분사하는 방법을 취하였다. Photo. 1 은 절삭력 측정을 위한 초정밀 가공기와 측정장치 시스템이다.

## 2.2 실험방법 및 실험조건

초정밀 가공기의 절삭력을 측정하기 전에 우선 초정밀 가공기의 특성을 파악하기 위하여 가공을 하지 않을 경우 주축회전속도에 따라 공구 동력계의 신호를 비교 분석하였다. 그리고 절삭조건인 절삭깊이 이송속도에 따른 절삭력을 공구동력계에서 나오는 신호를 컴퓨터에서 분석하였다.

실험방법은 일차 초정밀 가공한 Ge 를 주축의 진공척에 20Psi 로 고정하여 회전시키고 공구대에 천연다이아몬드 공구를 장착한 후 절삭조건에 따라 실험을 수행하였고, 가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 표면거칠기는 비접촉 표면조도 측정기인 NT2000 으로 중심선평균거칠기( $R_a$ )를 측정하였다.

Table 1 은 본 실험에 선정된 절삭 조건들을 나타낸 것이다.

Table 1. Cutting condition

Item	Cutting condition
Cutting speed(rpm)	800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400
Feed rate(mm/min)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Depth of cut( $\mu\text{m}$ )	0.1, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10
Vacuum pressure	20 kg f/cm <sup>2</sup>
Cutting fluid	Air+EDM oil

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 절삭력에 대한 고찰

#### 3.1.1 절삭깊이 변화에 따른 절삭력

Fig. 3 은 Ge를 주축 회전수 1400rpm, 이송속도 5mm/min의 절삭 조건에서 절삭깊이 변화에 따른 동적 상태의 절삭력을 측정한 결과이다. 주분력이 가장 크게 나타나고 이송분력 배분력 순으로 나타나고 있다. 절삭깊이 1  $\mu\text{m}$ 에서 절삭력이 작아지는 이유는 절삭깊이가 극히 작을 경우(1  $\mu\text{m}$ 이하)에는 경사각의 절삭깊이가 공구 날끝 부위의 R값보다 작아 절삭할 때에 음의 공구상면경사각으로 절삭되어 러빙이나 버니싱 같은 소성 변형이 절삭보다 크게 작용하기 때문에 공구와 공작물 사이의 절삭압력이 상당히 증가된다.<sup>16)</sup> 이와 같은 경우 손상된 표면의 공작물을 공구 선단이 심하게 누르게 되면 공작물 표면 거칠기에도 악영향을 미칠 수 있다.

### 3.1.3 이송속도 변화에 따른 절삭력

Fig. 4는 Ge를 주축회전수 1400rpm, 절삭깊이 5  $\mu\text{m}$ 의 절삭조건에서 이송속도 변화에 따른 동적 절삭력을 측정된 결과이다. 삼분력이 일정하며 이송속도 6 mm/min 이상에서 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 이유는 이송속도가 증가하면 절삭면적이 넓어지기 때문에 절삭력이 증가한다. 이송속도 변화에 따른 절삭력은 주분력과 배분력, 이송

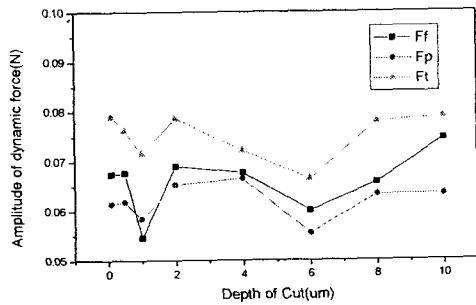


Fig. 3 Dynamic cutting force versus depth of cut of Ge (spindle speed: 1400rpm, Feed : 5mm/min)

분력이 일반 선삭가공과 같이 주분력, 배분력, 이송분력 순으로 낮은 절삭력을 보이지 않고, 이송분력이 배분력보다 크게 작용함을 알 수 있다. 이는 정적인 절삭이 아닌 동적절삭특성을 분석한 결과로 인하여 본 실험조건에서는 취성재료를 단면절삭방식으로 낮은 절삭깊이로 가공함에 따라 취성이 강해져서 이송할 때 공구와 공작물 사이의 접촉이 원활하지 않기 때문으로 판단된다.

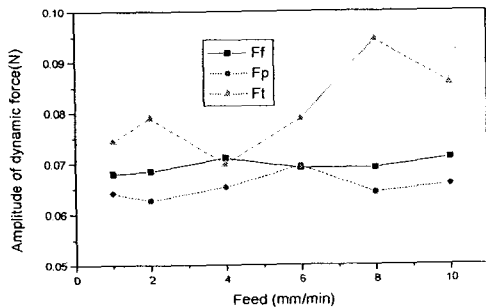


Fig. 4 Dynamic cutting force versus feed of Ge (Spindle speed: 1400rpm, Depth of cut: 5  $\mu\text{m}$ )

### 3.2 절삭조건에 따른 표면 거칠기 특성

주축속도에 따른 표면거칠기 특성은 회전속도가 증가할수록 표면거칠기가 양호하나 공구의 마모 등을 고려하여 1400 rpm을 기준 절삭조건으로 표면특성 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 주축회전수 1400rpm 일 때 절삭깊이와 이송속도 변화에 따른 다른 표면 거칠기를 나타낸다. 단결정 실리콘의 주축회전수 1400 rpm에서, A

는 절삭깊이 5  $\mu\text{m}$ 의 조건에서 이송속도 변화에 따른 표면거칠기를 나타내고, B는 이송속도 5mm/min의 절삭조건 하에서 절삭깊이 변화에 따른 표면거칠기를 나타낸다. 절삭깊이보다는 이송속도 변화에 따라 표면거칠기의 변화가 크게 나타나며, 이송속도를 작게 할수록 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있으며, 절삭깊이는 2  $\mu\text{m}$ 이하로 하는 것이 유리함을 알 수 있다. 이송속도 6 mm/min 이하의 영역에서

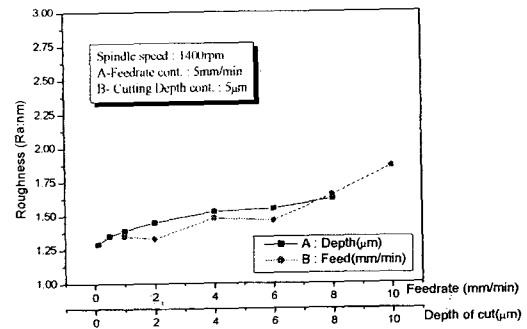


Fig. 5 Roughness(Ra:nm) versus of cutting condition

Ra 1.35 nm 정도의 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다. 취성재료의 연성절삭에는 낮은 이송률이 적합하다는 결론을 얻을 수 있다. 칩 두께는 절삭 영역의 응력이 발생하는 영역과 미세균열의 발생에 영향을 미치는 주된 인자라는 것이 학회에 보고되었다.<sup>4)</sup> 만약 칩 두께가 작은 값으로 유지된다면 절삭 영역의 응력이 집중되는 부분은 작아서 미세균열을 야기 시키지 않을 것이다. 공구 선단을 따라 임계 칩두께  $t_c$ 가 존재하는데,  $t > t_c$ 의 범위에서는 미세균열이 절삭하는 동안 발생하지만,  $t < t_c$ 의 범위에서는 공작물이 균열 없이 소성변형에 의해 제거된다. 따라서 연성가공은 이러한 범위에서 수행된다. 그러나,  $t_c$ 의 위치는 대부분 공구 이송률  $f$ 에 의존한다.  $f$ 가 감소함에 따라 칩두께  $t$ 역시 감소한다. 동시에 공작물이 소성변형에 의해 제거되는 영역은 확장된다. 낮은 공구 이송률이 주어진다면 가공된 평면에 가까운 지역에서 연성가공에 의하여 매끄러운 표면을 얻을 수 있다.

### 3.3 우주망원경용 적외선 렌즈의 가공

우주적외선 냉각시스템 시험모델(PSICS)의 광학계로 사용되는 게르마늄 렌즈를 비구면으로 초정밀가공 하였다. 실험을 통하여 얻어진 최적절삭조건을 이용하여 외경 40 mm, 두께 8 mm, 곡률반경 131.75 인 평볼록형상의 비구면 렌즈를 제작하였다.

Vacuum chuck의 진공압력에 의한 제품의 변형을 방지하기 위하여 특수한 지그를 설계 제작이 필요하였으며, 이에 일반적인 평판형상의 지그를 사

용한 결과보다 양호한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 10 은 SPDTM 을 이용하여 가공하는 사진을 보여주며, Fig. 11 은 비구면형상측정기인 Formtalsurf 를 이용하여 최적절삭조건으로 가공한 후 비구면 형상을 측정한 결과표면 거칠기를 측정한 결과 Rt 0.5992  $\mu\text{m}$ 를 얻었다.

Fig. 12 는 Interferometer WYKO6000 을 이용하여 직경 40 mm 평면을 측정한 결과 P-V 0.127  $\mu\text{m}$ 를 얻을 수 있었다. 요구되는 형상정밀도는 P-V 0.5  $\mu\text{m}$ 이하로써 가공된 Ge 렌즈는 요구사양에 적합하게 제작되었으며, 향후 렌즈 적외선 광학계에 사용하기 위한 투과율 향상을 위한 표면코팅을 하고 제품의 형상 변형량 등을 측정하여 우주적외선 카메라용 렌즈가공기술을 확보하고자 한다.

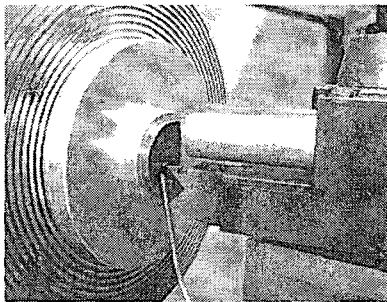
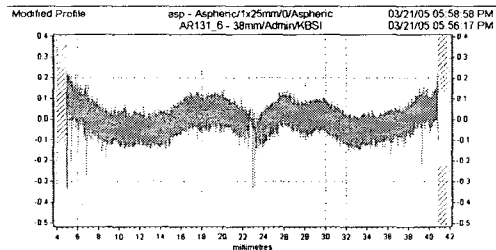


Fig. 10 Machining reflector mirror by SPDTM



Rt	0.5992 $\mu\text{m}$	Xp	-17.7491mm	Smx	16.3868
Ra	0.0458 $\mu\text{m}$	Xv	-0.0208mm	Smn	1.7148
Fig	-0.0385 $\mu\text{m}$	Xt	17.9481mm	Ttt	-0.0256

Fig. 11 Measurement of Ge surface after turning

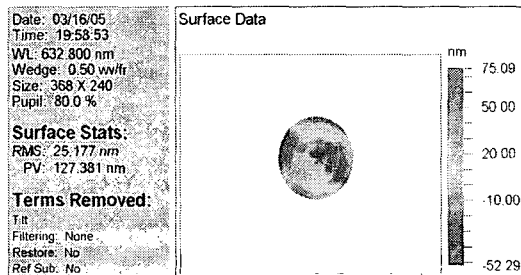


Fig. 12 Measurement of the surface for a large reflector

#### 4. 결론

우주적외선 카메라 렌즈에 사용되는 Ge 를 다이아몬드 공구로 초정밀가공시 절삭조건에 따른 절삭력과 표면거칠기에 관한 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험환경에서 초정밀 가공 시 Ge 의 절삭력은 0.05~0.08N 의 동적 절삭력이 측정 되었다.
2. 주축회전수 1400rpm, 이송속도 5mm/min, 절삭깊이 1  $\mu\text{m}$ 에서 Ra 1.35nm 의 표면거칠기를 얻을 수 있었다.
3. 실험에서 얻은 최적절삭조건을 이용하여 적외선 카메라용 Ge 렌즈의 비구면 형상가공결과 비구면 형상정밀도 Rt0.5996  $\mu\text{m}$ 와 P-V 0.127  $\mu\text{m}$ 의 평면 형상정밀도를 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 이윤우, "고해상도 위성카메라 평가 기술," 측정 표준, 제 22 권, 제 2 호, pp. 29-41, 1999.
2. 이재경, 이응숙, 채태진, 심충건, 종동우, 고태조, "초정밀 경면 절삭 가공 기술 개발", 과학기술처 최종보고서, 1992
3. 성기형, 한복수, 김형철, 김기수, 남궁석, "초정밀 선삭 가공 시스템에 관한 연구", 대한공업교육학회지, Vol. No 2, pp. 116-124.1997
4. Donaldson, D. D. Thompson, "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine." Ann. CIRP, Vol. 35, PP. 373-376, 1986
5. Junyi Yu, Jiwang Yan "Ultraprecision diamond turning of optical crystals" SPIE Vol. 1994/5
6. 한복수, 김기수, "초정밀 공작기계용 공기 정압 스피들 시스템의 강성해석 및 성능평가", 대한공업학회지, 제 21 권, 2 호, pp. 116-124.1997
7. T. Moriwaki, K. Okuda, "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting." Ann CIRP, Vol. 38, pp115-118, 1989