

◆특집◆ 초정밀가공기술

# 적외선 광학소자 게르마늄의 초정밀 절삭 특성

양순철\*, 김건희\*\*, 김효식\*\*, 이상용\*\*, 복민갑\*\*, 원종호\*\*\*

## The Characteristics of Ultra Precision Machining of Optical Element Germanium

Sun Choel Yang\*, Geon Hee Kim\*\*, Hyo Sik Kim\*\*, Sang Yong Lee\*\*, Min Gab Bok\*\* and Jong Ho Won\*\*\*

**Key Words** : SPDTM(Single Point Diamond Turning Machine), Brittle material (취성재료), Surface Roughness (표면 거칠기), Cutting force (절삭력)

### 1. 서론

현대 산업사회 첨단제품의 발전을 주도하고 있는 반도체 및 정보통신을 포함한 제반 첨단산업은 하드웨어 면에서 초정밀(ultra-precision)이라는 기술적 특성을 공공기반으로 하고 있다. 이는 반도체의 고집적화, 광자기 메모리의 고용량화, 광섬유 활용 다채널 고속 통신망, 그리고 고 분해능 레이저 프린터 등의 대표적인 예를 통해 쉽게 짐작할 수 있다.

그러므로 초정밀을 향한 정밀 핵심기술의 보유는 한 국가의 제반 첨단산업의 국제적 경쟁력 확보를 위한 필수적인 공통 기반기술로서 자리 매김을 하고 있다.<sup>1</sup>

현대 광학분야에서 광학용 유리는 대부분 가공성이 좋지 않은 취성 재료들이므로 초정밀 가공

분야에서는 이들 재료에서 어느 정도의 광학표면을 얻을 수 있느냐가 중요한 문제로 되어왔다.

전통적인 가공방법으로는 낮은 생산 효율과 자동 조절 능력이 부족하고 공작물의 치수효과와 같은 많은 결점을 가진 폴리싱이 있다. 게다가 폴리싱은 수요가 증가하고 있는 비구면을 가공할 수 없지만 단결정 다이아몬드 선삭은 적당한 연성 때문에 가공하기 쉬운 알루미늄과 동 같은 비철금속의 광학 반사경 제조에 널리 사용되고 있다. 하지만 최근의 광학 재료들은 우수한 품질의 광학 표면을 얻기가 곤란하고, 높은 취성을 갖는다. 만약 이런 취성 재료들의 가공 조건들이 최적화 되지 않는다면 절삭영역에서 결정재료의 미세 분열 때문에 가공표면에 피치와 크랙이 남게 될 것이다. 여기서 우리는 파쇄 기구로부터 크랙 발생과 전파가 재료의 응력 상태에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다.<sup>2</sup> 다른 한편으로는 절삭영역에서의 응력 분포상태는 절삭 매개 변수들과 절삭공구 형상을 조절함으로써 최적화 될 수 있다. 그래서 미세균열을 09 피할 수 있고 마치 연성재료들의 가공처럼 소성변형에 의해 물질을 제거할 수 있는 최적 조건 하에서의 취성 물질의 가공을 “연성 절삭”이라고 한다. 이러한 취성 광학재료들을 초정밀

\* 한국기초과학지원연구원  
Tel. 042-865-3462, Fax. 042-865-3469  
Email md941057@kbsi.re.kr

\*\* 한국기초과학지원연구원

\*\*\* 충남대학교 기계공학과

생산 시스템 특히, 초정밀 가공, 폴리싱 가공 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

가공으로 우리가 필요한 성능의 광학렌즈를 얻을 수 있고 또한 취성재료의 초정밀 절삭특성을 통하여 최적가공조건을 얻을 수 있다.

현재 많이 사용되고 있는 F- $\theta$  렌즈는 국내에 이미 미세드릴, 절삭, 마킹, 용접, 의료용 등의 목적으로 많이 보급화 되어 있으며, 레이저 부품의 대부분은 수입에 의존하고 있다. 미세 레이저 홀가공(Microvia Laser Drilling)을 위한 렌즈는 현재 핸드폰의 기관 천공 등에 사용되어지며, 100% 수입에 의존하고 있다. 고정밀, 고성능의 천공을 위한 CO<sub>2</sub> 레이저용 홀 가공기에는 정밀한 렌즈가 필수적으로 장착되며, 국내의 산업용 레이저 홀가공기를 사용하는 기업이나, 레이저 홀 가공기를 제조 판매하는 회사에 가공 정밀도의 향상과 수용에 부합되는 형상가공을 위하여 반드시 국산화 및 수입대체가 이루어져야 할 부품이다.

또한 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>3-5</sup> 하지만 독자적인 위성영상의 자율적인 획득 및 관리를 위해서는 고해상도 위성카메라의 자체개발이 필수적이며 광학설계, 제작 및 평가기술의 확보가 절대적으로 필요하다

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 한국기계연구원, 적외선영상센서관련 업체와 함께 우주용 적외선 냉각시스템을 개발하고 있다.

본 연구에서는 레이저 홀 가공기에 사용되는 광학소자인 게르마늄의 연성 절삭에 대한 이송속도와 절삭속도에 따른 표면거칠기 특성을 파악하여 최적의 초정밀 가공조건을 찾아내고, F- $\theta$  렌즈의 가공과 우주적외선 냉각시스템 시험모델(Protomodel of Space Infrared Cryogenic System, PSICS)의 광학계로 사용되는 적외선 광학소자인 게르마늄 렌즈가공을 위한 초정밀 절삭에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 초정밀 가공기는 RTH 사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신(SPDTM)이다.

다이아몬드 터닝머신은 두 개의 유정압 안내면과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스피들들로 구성되어 있다. 두 안내면은 각각 X 축과 Z 축으로 T 형태의 직교를 이루며 구동한다. X 축의 중심부에 해당하는 안내면에 주축 스피들이 고정되어 회전하며, 안내면의 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. Z 축 구동안내면 위에는 공구대가 고정되어 다이아몬드 바이트를 설치 할 수 있으며, 스피들 구동 방향과 수직방향으로 구동한다.<sup>3-6</sup>

안내면의 위치결정정도는 0.25  $\mu\text{m}/300 \text{ mm}$ , 분해능은 1.25 nm의 성능을 가지고 있으며, 선삭의 경우 최대  $\varnothing 600 \text{ mm}(125 \text{ kg})$ , 연삭의 경우  $\varnothing 300 \text{ mm}$ 까지 가공이 가능하다. Fig.1 은 초정밀 가공 시스템을 나타낸다.

초정밀 가공실은 온도  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , 습도  $30 \pm 5\%$ , Clean Room class 10,000 인 항온항습의 크린룸이며, 장비의 진동방지를 위한 독립지반구조로서 장비 하부는 3Point Air Bag 으로 지지된다.

표면 거칠기 측정 장비로는 비 접촉식 표면형상 측정기 WYKO 사의 NT 2000 을 사용하였다. 측정기의 측정범위는 최대  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  이며, 측정범위로는 0.1 nm~150  $\mu\text{m}$ 이며, 분해능은 0.1 nm이고 자동 포커싱 타입이다.

Fig. 2 는 가공된 Ge 의 표면 거칠기를 측정하는 모습입니다.

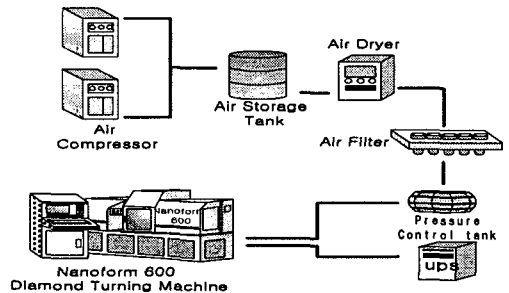


Fig. 1 The system of ultra precision lathe

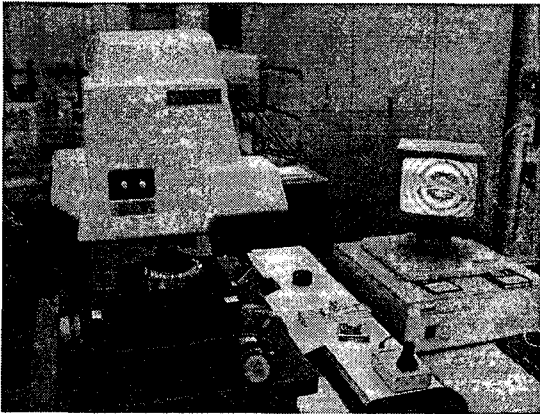


Fig. 2 Measurement of workpiece

Table 1 Experimental Condition

Item	Cutting condition
Work piece	Ge
Rake angle (°)	-5, -15, -25
Nose radius(mm)	0.8, 0.4
Cutting speed (m/min)	140, 160, 180, 200, 220, 240
Feed rate(mm/min)	1, 2, 4, 8, 12
Depth of cut(μm)	0.1, 0.5, 1, 2, 4
Vacuum pressure(in.Hg)	-20
Cutting fluid	Air+EDM oil

## 2.2 실험방법

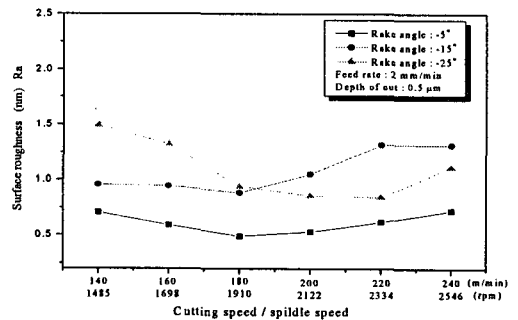
시작품 재료인 Ge 의 초정밀 최적 가공조건을 찾기 위하여  $\varnothing 40$  mm, 두께 15 mm의 시편을 제작하여 주축회전속도와 절삭깊이, 이송속도에 대하여 표면 거칠기를 측정하였다. 실험을 수행하기 전에 Ge 를 주축의 진공척에 -20in.Hg 로 고정하여 회전시켰으며, 이때 사용되는 절삭유의 급유방식은 압축공기와 절삭유인 방전유를 혼합하여 분사하는 극미량(MQL)분사방식을 사용하였다. 또한 절삭 후 측정 방법은 시편의  $\varnothing 30$ mm 되는 부분을 선정하여 시편의 네 포인트를 지정하여 항상 같은 위치에서 16 번 반복측정하여 그 중 오차 범위가 큰 값을 제외하고 데이터의 평균을 내어 측정값을 얻었다. 본 실험을 통하여 Ge 의 최적 초정밀 가공조건을 찾아내었다. Table 1 에서 실험조건을 나타낸다.

## 3. 실험결과 및 고찰

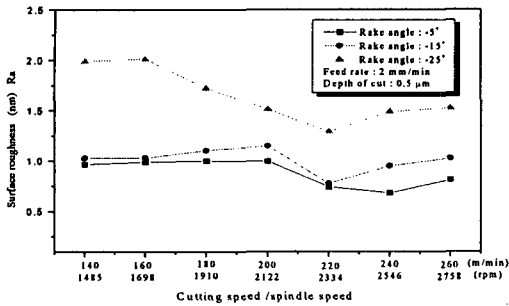
### 3.1 절삭속도 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 3 은 절삭깊이 0.5 μm, 이송속도 2 mm/min 에서 각각의 노우즈 반경 0.4 mm와 0.8 mm 에 대한 절삭속도에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. Fig. 3(a)와 같이 절삭속도를 단계적으로 140~240 m/min 까지 변화 시켰으며, Fig. 3(b)에서는 필요에 따라 260 m/min 까지 변화 시켰다. 그 결과 노우즈 반경 R0.8 mm 다이아몬드 바이트를 사용한 실험에서는 대체적으로 절삭속도가 140 m/min 에서부터 표면 거칠기가 양호해지며 180 m/min 이후에는 표면 거칠기가 악화 되는 것을 알 수 있다. 그러나 노우즈 반경 R0.4 mm 다이아몬드 바이트를 사용한 실험에서는 240 m/min 에서 가장 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 경사각(Rake angle) 에 대한 표면 거칠기의 변화는 거의 같은 경향을 나타냈으며 경사각이 적을수록 보다 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있었다. 이는 경사각이 커질수록 공작물과 접촉되는 절삭면적이 커지므로 표면 거칠기가 좋지 않는 결과를 낳는 것으로 사료된다. 실험 결과로 Ge 의 미소 절삭에서 절삭속도는 140 m/min 이상으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 도움을 주며, Fig. 4 에서 보여 지듯이 노우즈 반경 R0.8 mm, 절삭속도 180 m/min, 이송속도 2 mm/min, 절삭깊이 0.5 μm, 경사각 -5° 일 때 0.49 nm Ra 로 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었다

따라서 절삭공구의 선정에 있어서 가공물의 형상에 따라 적용 하는 것은 차이가 있겠지만 노우즈 반경이 큰 공구를 선택해야 한다.

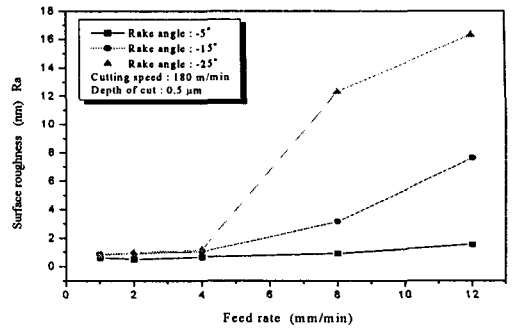


(a) Nose radius R0.8 mm



(b) Nose radius R0.4 mm

Fig. 3 Surface roughness versus of cutting speed



(a) Nose radius R0.8 mm

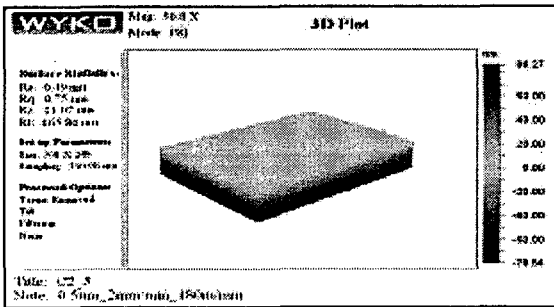
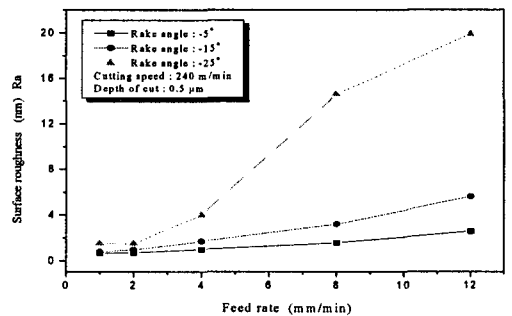


Fig. 4 Surface measurement of Ge sample



(b) Nose radius R0.4 mm

Fig. 5 Surface roughness versus feed rate

Fig. 6 은 노우즈 반경 R 0.8 mm, 이송속도 12 mm/min, 절삭속도 180 m/min, 절삭깊이 0.5 μm의 절삭조건에서 실험한 2 차원적인 형상을 보여주는 것으로 공구의 형상이 가공표면에 그대로 전사됨을 볼 수 있다.

### 3.2 이송속도 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 5(a)는 노우즈 반경 R0.8 mm, 절삭속도 180 m/min, 절삭깊이 0.5 μm 에서, Fig. 5(b)는 노우즈 반경 R0.4 mm, 절삭속도 240 m/min, 절삭깊이 0.5 μm에서 각각 이송속도에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다.

이송속도가 증가하면서 표면 거칠기가 나빠지는 경향을 볼 수 있으며, 이러한 실험 결과는 이송방향의 표면 거칠기는 인선반경과 공작물의 1 회전당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면 거칠기와 유사한 경향을 나타내고 있다. 가장 양호한 표면 거칠기를 나타내는 공구는 노우즈 반경 R 0.8 mm의 공구이며, 실험 결과는 일반적으로 노우즈 반경이 커짐에 따라 표면 거칠기는 양호하게 나타나는 이론적인 거칠기와 비슷한 경향의 측정결과를 나타내었다.

Ge 의 경우, 2 mm/min 정도의 이송속도로 가공할 경우 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있다.

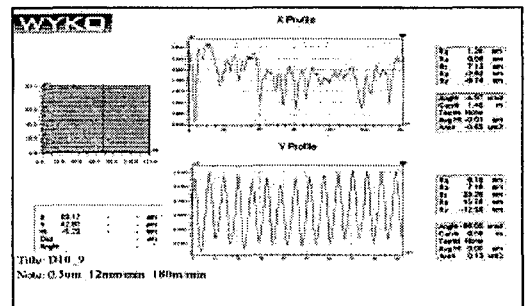
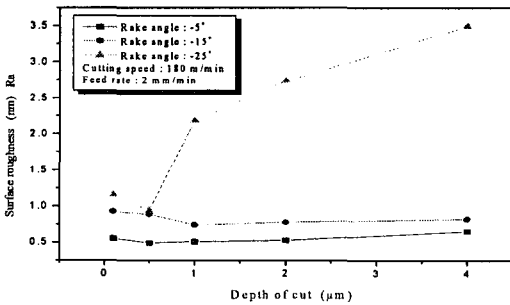


Fig. 6 2-dimensional shape of the surface roughness for machined surface of Ge

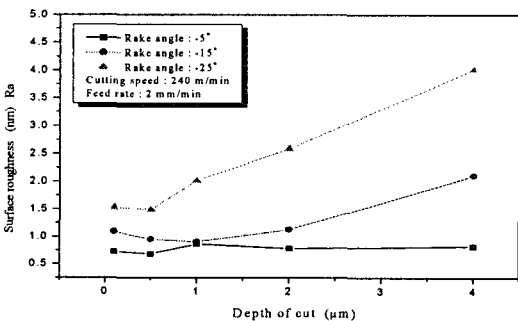
### 3.3 절삭깊이 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 7(a)는 노이즈 반경 R0.8 mm, 절삭속도 180 m/min, 이송속도 2 mm/min 에서, Fig. 7(b)는 노이즈 반경 R0.4 mm, 절삭속도 240 m/min, 이송속도 2 mm/min 에서 각각의 절삭 깊이에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다.

일반적인 절삭가공에 있어서 이론적 표면 거칠기 값은 절삭깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 Fig.7의 결과로 볼 때 절삭깊이가 작을 때 표면 거칠기가 떨어지는 경향을 볼 수 있다. 이러한 것은 절삭깊이가 아주 작을 경우의 칩 배출 과정은 주로 러빙(rubbing)이나 버닝(burning)같은 소성변형에 의해 원활하게 이루어지지 못하며, 소성 변형을 일으킨 표면에서는 큰 잔류 응력이 형성되어 표면의 질에 악영향을 끼치기 때문이다.



(a) Nose radius R0.8 mm



(b) Nose radius R0.4 mm

Fig. 7 Surface roughness versus depth of cut

절삭날은 완전하게 날카롭지 못하므로 절삭날 날끝 부분을 확대하여 모델화하면 실린더형으로

가정할 수 있다. 이 때 실린더 부분에 작용하는 힘을 플로잉 힘(plowing force)이라고 한다. 일반적인 절삭가공에 있어서는 절삭 깊이가 절삭날 날끝 반경에 비하여 상당히 크기 때문에 플로잉 힘이 전체 절삭력에 미치는 영향은 거의 없어 무시할 수 있지만, 절삭 깊이가 감소할수록 플로잉 힘은 비례적으로 커져 무시될 수 없게 된다. 이러한 힘의 존재로 절삭깊이가 감소할수록 비절삭 에너지(specific cutting energy)가 증가하는 치수 효과가 나타난다. 초정밀가공에서는 이러한 치수 효과를 잘 보여준다.

이러한 결과로부터 미소 절삭시 표면 거칠기는 절삭 깊이의 증가와 관련이 있다고 할 수 있다.

### 3.4 F-θ 렌즈 가공

Fig. 8은 실제 F-θ 렌즈 앞면 게르마늄 렌즈 평면부분을 가공 하는 사진이다. 최종적으로 게르마늄 소재의 렌즈를 가공하는데 요구되는 형상 공차는  $\lambda/10$ ( $\lambda=10.4\sim 10.9 \mu\text{m}$ )로 전체 가공면에 대하여 가장 높은 지점에서 가장 낮은 지점간의 오차인 Rt 값은 약  $1 \mu\text{m}$  이하를 요구한다. Fig. 9는 최종적으로 가공한 게르마늄 렌즈의 모습이다. 렌즈 가공 후 Form Talysurf Series2를 이용하여 측정한 결과 비구면 Rt 값이  $0.3913 \mu\text{m}$ 이며 평면 Pt 값이  $0.4245 \mu\text{m}$ 으로 나왔다. 이로써 게르마늄 렌즈에 요구되는 가공정밀도에 벗어나지 않음을 알 수 있다. Fig. 10은 각각의 비구면과 평면의 측정결과를 나타낸다.



Fig. 8 Cutting of F-θ lens

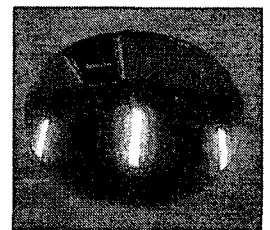
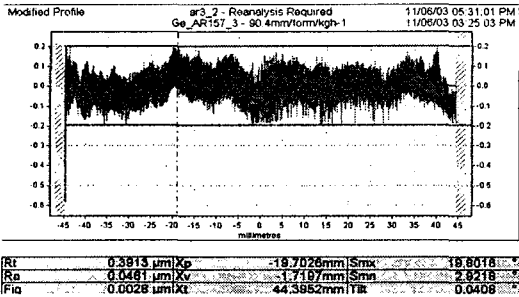


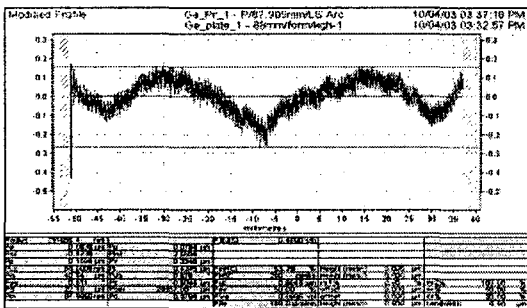
Fig. 9 F-θ lens after Machining

### 3.5 우주 망원경용 적외선 렌즈의 가공

우주적외선 냉각시스템 시험모델(PSICS)의 광학 계로 사용되는 게르마늄 렌즈를 비구면으로 초정밀가공 하였다. 실험을 통하여 얻어진 최적절삭 조건을 이용하여 외경 40 mm, 두께 8 mm, 곡률



(a) Measure surface of aspheric



(b) Measure surface of Flat

Fig. 10 Measure surface of F- $\theta$  lens

반경 131.75 인 평볼록형상의 비구면 렌즈를 제작하였다. Vacuum chuck 의 진공압력에 의한 제품의 변형을 방지하기 위하여 특수한 지그를 설계 제작이 필요하였으며, 이에 일반적인 평판형상의 지그를 사용한 결과보다 양호한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 11 은 최적절삭조건으로 SPDTM 을 이용하여 가공하는 사진을 보여주며, Fig. 12 는 비구면형상측정기인 Form Talysurf Series2 를 이용하여 가공한 후 비구면 형상을 측정한 결과표면 거칠기를 측정한 결과  $R_t 0.5992 \mu\text{m}$  를 얻었다.

Fig. 13 은 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. 14 는 적외선용 망원경에 사용되는 Ge 렌즈의 전 후면사진으로 (a)는 비구면 형상을 (b)는 평면형상의 초정밀가공 결과를 나타낸다.

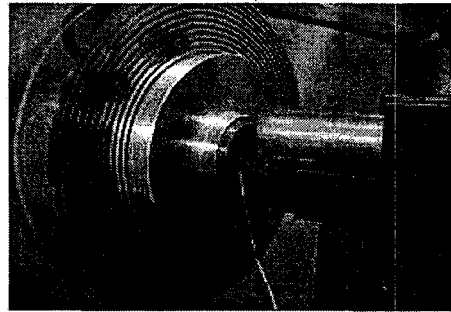


Fig. 11 Machining Ge lens by SPDTM

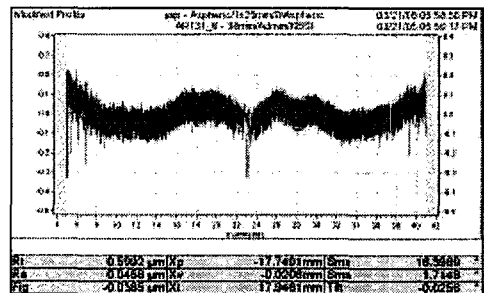


Fig. 12 Measurement of Ge surface after turning

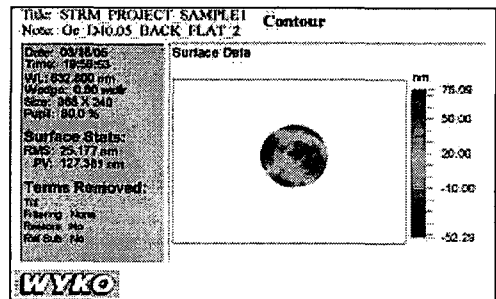
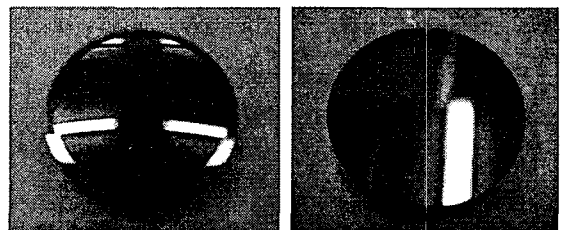


Fig. 13 Measurement of the Ge lens surface by WYKO6000



(a)Aspheric surface (b) Plane surface

Fig. 14 Result of Machining Ge lens by SPDTM

#### 4. 결 론

본 연구에서는, Ge 의 초정밀 가공 특성을 파악하기 위하여 천연다이아몬드 공구를 사용하였으며 노우즈 반경, 절삭속도, 이송속도, 및 절삭깊이에 따른 표면 거칠기를 측정하였다. 이러한 Ge 의 초정밀 가공 특성을 바탕으로 미세 홀 레이저 가공기의 F-θ 렌즈와 우주 망원경용 적외선 렌즈를 초정밀 가공 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Ge 의 소재 가공에 관한 초정밀 절삭특성을 통하여 Ge 의 최적 가공조건은 노우즈 반경 R0.8 mm, 절삭속도는 180 m/min, 이송속도는 2 mm/min, 절삭깊이는 0.5 μm일 때 가장 양호한 표면 거칠기 0.49 μm Ra 를 얻을 수 있었다.

2. 천연다이아몬드 공구의 노우즈 반경에 따른 표면 거칠기 평가에서는 공구의 노우즈 반경 R0.4 mm보다 큰 R0.8 mm에서 가장 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.

3. 일정한 절삭조건 하에서 초정밀 가공 시 -25°와 -15°의 경사각에 비해 -5°의 경사각을 가진 다이아몬드 공구의 표면 거칠기가 양호하게 나타났다.

4. 초정밀 가공기를 이용하여 F-θ 렌즈의 핵심 부품인 게르마늄 렌즈의 표면에 요구되는 비구면 형상정밀도에 만족하는 0.3913 μm Rt 와 평면 0.4245 μm Pt 의 결과를 얻었다.

5. 실험에서 얻은 최적절삭조건을 이용하여 적외선카메라용 Ge 렌즈의 비구면 형상가공결과 비구면 형상정밀도 Rt 0.5996 μm와 P-V 0.127 μm의 평면 형상정밀도를 얻었다.

#### 참고문헌

1. McKeown, P., "Manufacturing - how small can we go? The challenge and opportunities of the nanometre age," The British Association Lecture, 1996.
2. Donaldson, D. D. T., "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine," Ann. CIRP, Vol. 35, pp. 373~376, 1986.
3. Ko, J. B., Kim, G. H. and Won, J. H., "A Study on the cutting characteristics of non-ferrous metals using diamond turning machine," Trans. of KSMTE., Vol.10, No.5, pp.124-129, 2001.
4. Ko, J. B., Kim, G. H., Hong, K. H., Song, H. D. and Won, J. H., "Nanometer Scale Ultra Precision Machining of Oxygen-free Copper," KOSTET REVIEW, Vol.6, No.2, pp.77-82, 2001.
5. Kim, G. H., Hong, K. H., Kim, S. S. and Won, J. H., "Nano-turning Technology Using Ultraprecision Machining System," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.19, No.1, pp.18-24, 2002.