

천체관측용 적외선 광학계 초정밀 가공 ULTRA PRECISION MACHINING FOR ASTRONOMICAL INFRARED OPTICS

김건희¹, 진 호², 양순철¹, 김명상¹, 국명호¹, 이성호², 육인수²

¹한국기초과학지원연구원

²한국천문연구원

GEON HEE KIM¹, HO JIN², SUN CHOL YANG¹, MYUNG SANG KIM¹, MYUNG HO KOOK¹,
SUNGHO LEE², AND IN-SOO YUK²

¹Korea Basic Science Institute (KBSI), Daejeon 305-333, Korea

E-mail: kgh@kbsi.re.kr

²Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI), Daejeon 305-348, Korea

E-mail: jinho@kasi.re.kr

(Received October 19, 2007; Accepted November 2, 2007)

ABSTRACT

The KASINICS (Korea Astronomy and Space science Institute Near Infrared Camera System) is a ground-based near-infrared (NIR) imaging instrument. KASINICS has offner relay optics to reduce unwanted infrared light. For the offner optics, we adopted an ultra precision machining process which is installed at KBSI (Korea Basics Science research Institute). Since the offner relay optics is made of aluminum 6061 metal material, we did several tests to reach the specification. We found that a 0.497mm radius nose bite and 220m/min machining speed are best tool and condition to make this offner optics with the precision machine. In this paper, we report the technical method of ultra precision machining and results of the KASINICS offner optics.

Key words: instrument : infrared : optics :Ultra Precision Machining

1. 서 론

현대 천문관측기기는 산업사회 첨단기기를 활용하여 제작되고 있으며 광학계 제작의 경우 초정밀 가공기술을 이용하여 금속재질의 반사경 적외선광학계를 만들어 사용하고 있다. 또한 이러한 초정밀 가공기술의 발전은 공공기반의 반도체 및 정보통신산업 등에서도 다양하게 응용되고 있다.

비단 천문관측기기에 사용되는 광학계 이외에도 항공우주에 사용되는 위성 카메라에서도 정밀, 고해상도 광학계가 사용되고 있으며 미국 등의 선진국에서도 기술이전을 매우 기피하는 첨단 기술이다. 하지만 독자적인 관측기기 기술 확보와 기술 개발을 위해서는 천문관측기기 개발을 통한 기술 배양 및 초정밀 기기 제작기술의 확보 또한 절대적으로 필요하다.

국가전략기술지도(NSTRM) 상의 중요 목표 중의 하나인 적외선관련기술에 관하여 다양한 기술적 노력들이 전개되고 있으며, 그 일환으로 한국천문연구원과 한국기초과학지원연구원은 정책 협동 과제로 한국기계연구

원, 적외선영상센서관련 업체와 함께 초정밀가공기술을 이용한 우주용 적외선 냉각시스템을 개발한 바 있으며(남옥원 외, 2006) 지상망원경용 근적외선 카메라 시스템도 개발하였다(강지나 외 2004; 박수중 외 2004; 박수중 외 2005; 육인수 외 2005; 이성호 외 2005; 진호 외 2006).

이러한 기술을 바탕으로 지상망원경용 근적외선 카메라 시스템 (KASINICS; Korea Astronomy and Space science Institute Near Infrared Camera System)에 필요한 적외선 오프너 광학계 시스템 (Offner optical system) 제작을 수행하였다. 오프너 광학계는 망원경으로부터 나오는 불필요한 열복사를 차단하는 역할을 수행한다(Fischer et al. 2003; Graham & Treffers 2001).

오프너 광학계 재질로는 알루미늄을 사용하였다. 알루미늄을 선택한 이유는 열전도율이 높아 냉각 효율이 좋으며 마운트와 동일한 재질이기 때문에 시스템의 열수축에 따른 광학계 특성변화가 적기 때문이다.

오프너 광학계를 정밀하게 제작하기 위해서는 알루미늄

표 1. 초정밀 가공 기기 제원표

<p>Freeform 700A (5축가공기)</p> <ul style="list-style-type: none"> Slide Travel: X-350mm (14") Y-150mm (6") Z-300mm (12") Maximum Feedrate: 1500mm/min. (59"/min.) Spindle Speed: ≤ 5000 RPM <ul style="list-style-type: none"> - Raster/Groove Milling - Tool Normal Diamond Turning, Grinding - Cross Axis, Parallel and 45° Grinding / Fast Tool Servo
<p>Nanoform 600 (2축정밀 가공기)</p> <p>1) Turning</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maximum : 600mm - Surface roughness : Rmax 0.01μm(AI, alloy) <p>2) Grinding</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maximum : 300mm - Surface roughness : max 0.05μm(SF-12 Glass)
<p>KRP-2200F (폴리싱머신)</p> <ul style="list-style-type: none"> - polish aspherical surfaces uniformly. - Accuracy : Ra 1nm, PV: 50nm - X×Y×Z(400×200×150)

표 2. 측정장비 제원표

<p>Surface Measurement system NT2000 (광학표면측정)</p> <ul style="list-style-type: none"> - optical phase shifting and vertical scanning interferometer - Resolution : 0.1 nm - Vertical resolution : 0.1 nm - Vertical measurement range : 0.1 nm ~ 150 μm - Stitching measurement range : 100 mm × 100 mm - Focusing type : auto
<p>Laser Interferometer WYKO 6000 (간섭계 측정기)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Measurement equipment of plane and aspheric surface - Wave length : 632.8nm - Accuracy : λ /100 PV at 632.8nm - Resolution : λ / 1,024 - Transmission sphere : f/0.75, f/3.2 f/7.0
<p>Form Talysurf series 2 (비구면 측정기).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Range : 120 mm - Data resolution : 0.25 μm - Precision : 0.5 μm / 120 mm, 0.2 μm / 20 mm - Standard stylus : 2 μm radius

높은 합금의 초정밀가공 최적 절삭조건을 찾아야 한다. 이에 본 연구에서는 초정밀가공기(Nanoform600)에 천연다이아몬드 바이트를 장착하여 주축속도, 이송속도, 절삭깊이 변화에 따른 초정밀 절삭시 발생하는 절삭력과 각 절삭조건에 따른 표면거칠기 측정으로 최적 초정밀가공 절삭조건을 찾아내었으며, 이를 활용하여 근적외선 카메라용 주·부 반사경을 제작한 결과를 소개한다.

2. 초정밀 가공시스템

초정밀 절삭은 공작물을 공기 베어링 주축에 고정하여 회전시키고, 정밀한 형상의 다이아몬드 공구를 X축과 Z축 방향으로 이송시키면서 공구와 공작물 사이의 정확한 상대 운동을 통해 공작물에 공구의 형상을 전사하는 기술이다. 이러한 정밀가공을 위해서 기초과학지원연구원에서는 5축(X, Y, Z, C, B) 제어를 통한 나노단위 기계가공을 수행할 수 있는 국내 유일의 자유곡면 초정밀가공 장비인 Freeform 700A을 비롯한 Nanoform 600, 4축 동시제어 자유형상 폴리싱머신과 Laser Interferometer, Form Talysurf, NT2000의 나노단위 형상측정시스템을 구축하고 있다.

2006년 8월 설치된 Freeform 700A는 세 개의 유정압 안내면과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링

스핀들과 유정압 회전테이블로 구성되어 있다. 두 축 안내면은 각각 X축과 Z축으로 'T' 형태의 직교를 이루며 구동되며, X축의 중심부에 해당하는 안내면에 주축스핀들이 고정되어 회전한다. Z축 구동 안내면 위에는 공구대가 고정되어 바이트나 연삭 휠을 설치할 수 있으며, 스핀들 구동 방향과 수직방향으로 구동된다. 추가적으로 FTS(Fast Tool Servo)를 설치하여 광컨넥터 등에 사용되는 Lens Array와 같은 초미세 Grid가공이 가능하다. 초정밀 가공실은 온도 20±1℃, 습도 30±5%, Clean Room class 10,000인 항온항습의 크린룸이며, 장비의 진동방지를 위한 독립지반구조로써 장비 하부는 3 Point Air Bag으로 지지된다.

또한 초정밀 가공에서 가장 중요시 되는 것은 표면 거칠기에 관계되는 공작물과 공구의 관계이다. 공구 재료로 다이아몬드가 사용되고 있는 이유는 우선 경도가 가장 강한 결정이고, 예리한 형상 가공이 가능하기 때문이다. 즉 초정밀 가공은 미세한 칩을 내는 가공이므로 칩이 1 μ m 이하가 되면 절삭을 위한 전단응력이 급격히 증가하여 대부분 재료의 표준 이상 전단응력에 가까운 값이 된다. 따라서 일반적인 고속도강 및 초경합금 뿐 아니라 스톤의 A(알런덤), C(카보런덤) 입자조차도 그 강도에 견디지 못하므로 현재로서는 단결정 천연다이아몬드만이 유일한 공구재료로 사용하고 있으며 이

표 3. 본 실험에서 선정된 초정밀 절삭 조건

Material	Al6061 - T651
Cutting speed(m/min)	110, 150, 190, 220, 260, 300
Feed rate(mm/min)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Depth of cut(μ m)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Vacuum pressure	-20kgf/cm ²
Nose radius (mm)	0.5
Cutting fluid	Air + EDM oil

본 연구에서도 다이아몬드 공구를 사용하였다. 초정밀가공기술은 다양한 사업 분야에 적용하고 있으나, 전문 특성화를 위한 기술로써 적외선 광학계의 초정밀가공, 조립, 평가기술개발을 위하여 초정밀가공 및 측정시스템을 구축하였으며, 초정밀가공 장비와 폴리싱 머신 및 각종 측정 장비의 세부 사양을 표 1과 표 2에 기술하였다.

3. 알루미늄 반사경의 초정밀 가공 특성

3.1. 실험공구 및 방법

본 실험에서 사용된 공구는 천연 다이아몬드 바이트로서 바이트 날 끝 모양이 원통형이며 노우즈 반경 R0.5 mm를 사용하여 실험하였다. 그림 1은 실험에 사용된 천연 다이아몬드 바이트 형상을 보여주며, 노이즈 반경 0.5 mm 다이아몬드 바이트를 측정결과 노이즈 반경은 0.497 mm 이고 Waviness는 0.08 μ m이었다. 이에 요구되는 Waviness는 0.1 μ m 이하 이므로 공구를 사용하기에 적합한 것으로 판단되었다.

실험방법으로는 적외선 카메라용 반사경의 초정밀 최적 절삭 조건을 찾기 위해 그림 2과 같이 시편을 제작하였다. 제작된 시편에 단면 절삭 실험을 시행하였으며, 가공된 표면 거칠기 측정은 비접촉 표면 조도 측정기인 NT2000으로 중심선 평균 거칠기(Ra)를 측정하였다. 이때 측정 방법은 시편의 \varnothing 35 mm되는 부분을 선정하여 가공표면의 4 포인트를 지정하고 항상 같은 위치에서 16번 반복 측정한다. 그 중 오차 범위가 큰 값을 제외하고 데이터의 평균을 내어 측정값을 얻었다.

3.2. 실험결과 및 고찰

그림 3의 상단그림은 Al6061-T651을 단결정 다이아

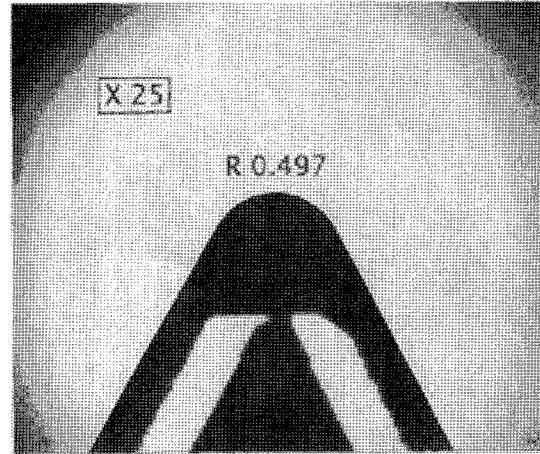
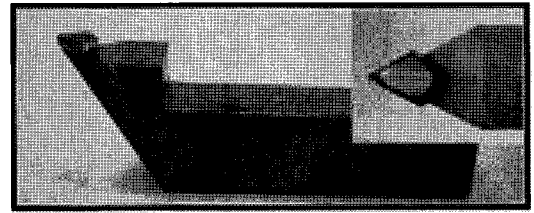


그림 1. 알루미늄 가공에 사용된 다이아몬드 바이트

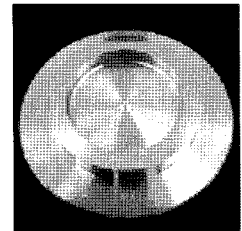
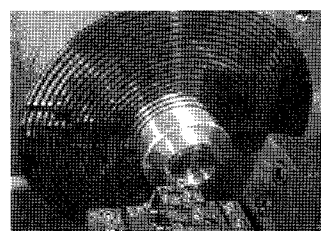
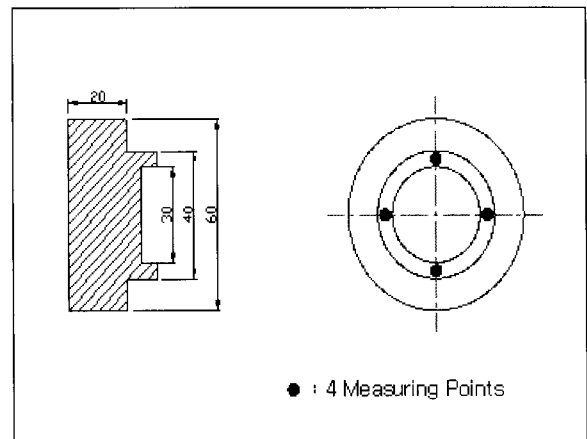


그림 2. 시험용 재료시편과 가공실물

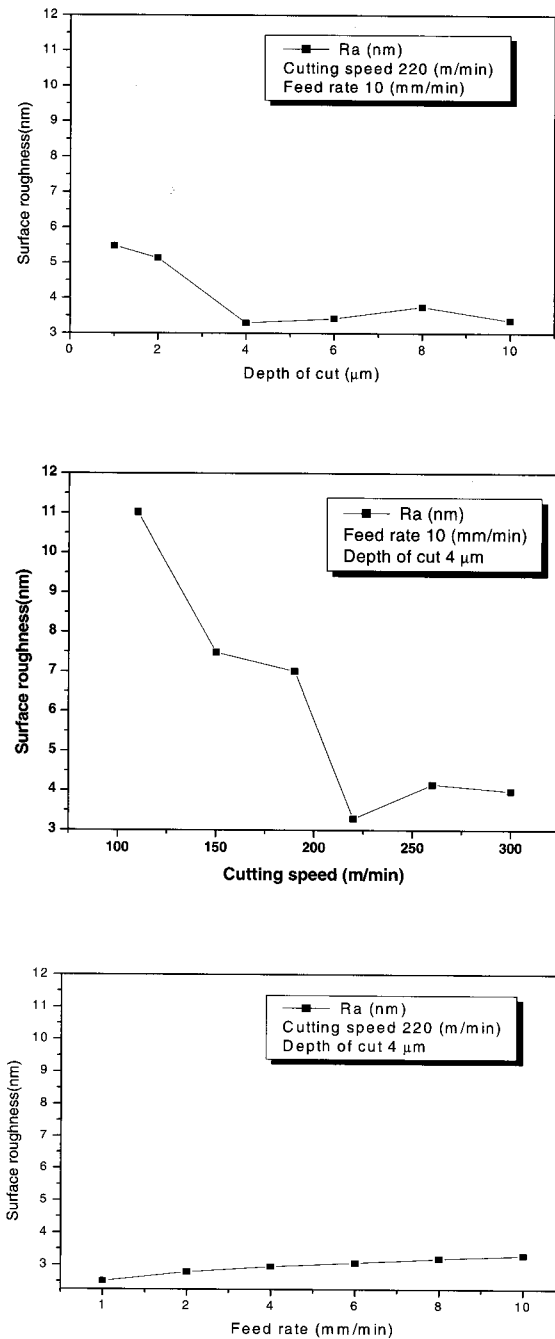


그림 3. 절삭에 필요한 조건 찾기를 위한 실험결과. (상) 주축회전수 변화, (중) 절삭 깊이변화, (하) 이송속도 변화에 따른 결과.

몬드 바이트로 절삭속도 220 m/min, 이송속도를 10 mm/min으로 고정하고, 절삭 깊이 변화에 따른 표면 거

칠기를 측정된 결과이다. 절삭가공에 있어서 이론적 표면 거칠기 값은 절삭 깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 그림 3의 상단그림에서 보인 바와 같이 4 μm까지 표면 거칠기가 급격히 좋아지는 것을 볼 수 있고, 4 μm이상에서는 표면 거칠기가 거의 일정하나 조금씩 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그림 3의 중간 그림은 단결정 다이아몬드 바이트를 사용하여 Al6061-T651을 이송속도 10 mm/min, 절삭 깊이 4 μm로 고정하고, 절삭 조건에서 주축 회전수 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 110~300 m/min까지 절삭속도를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 결과 110 m/min 에서 점점 회전수를 증가시킴에 따라 표면 거칠기가 향상되고 220 m/min 이상의 속도에서는 표면 거칠기의 변화가 거의 나타나지 않는 것을 확인함으로써 220 m/min 이상으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 유리하다는 것을 알 수 있다.

그림 3의 하단그림은 Al6061-T651의 최적표면을 얻기 위해 표면 거칠기가 가장 좋은 220 m/min의 절삭속도, 절삭 깊이 4 μm로 고정하고 1~10 mm/min까지의 이송속도 변화에 대한 표면 거칠기 실험결과를 나타낸다. 그 결과 본 초정밀 가공에 있어서 가공 표면의 형상은 공작물의 회전과 공구의 이송으로 인한 미세한 나선형의 표면을 형성시키고, 2차원적으로 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송를 만큼 간격을 두고 반복적으로 이루어진다. 이송속도는 동일한 절삭 깊이에서 이송률의 증가에 비례하여 표면 거칠기가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 표면 거칠기 결과를 보면 이송방향의 표면 거칠기는 인선반경과 공작물의 1회전당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면 거칠기($R_{max}=f^2/8R$)와 유사한 경향을 나타내고 있다.

그러나 실험결과와 이론적 표면 거칠기 값과는 차이가 있는데, 이와 같은 이유는 실험에 사용된 알루미늄 합금이 연성이고, 미소한 재료의 용착이 발생하기 때문에 가공면의 표면 거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이 실험결과를 바탕으로 알게 된 절삭조건을 가지고 적외선 반사경 오프너 광학계를 제작하였다.

4. 오프너 광학계 제작 및 측정 결과

4.1. 오프너 광학계 제작

천문 관측용 적외선 카메라 오프너 광학계 반사경의 재질로는 알루미늄을 사용하였다. 알루미늄은 열확산이 빠르기 때문에 냉각 효율이 좋으며 열팽창률이 커서 온도 변화에 따른 변형이 크기 때문에 마운트와 동일한 재질인 알루미늄을 사용하면 온도 변화에 따른 기계적

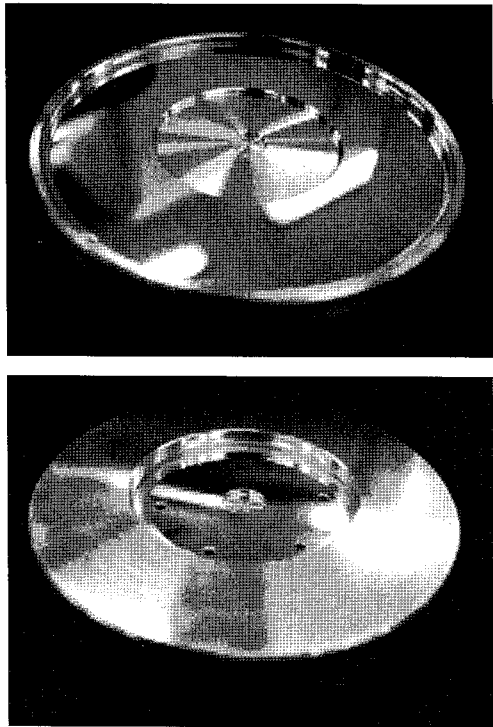


그림 4. 오픈너 광학계 제작을 위한 지지구조물의 초정밀 가공 형상

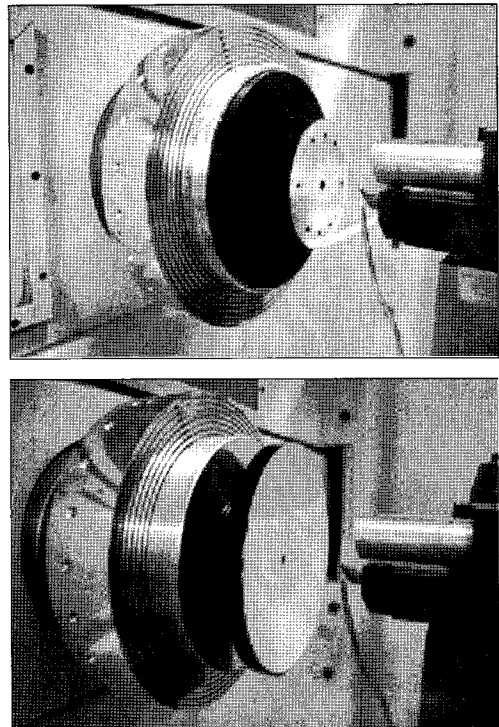


그림 5. (상) 주경마운트의 초정밀가공, (하) 주경반사부 초정밀 가공

피로도가 적어지는 장점이 있다.

오픈너 광학계는 주경과 부경의 조합으로 이루어진 광학계로서 박스모양의 구조물에 장착되는 구조를 가지고 있다 (김건희 외, 2006). 주경의 P-V(Peak to Valley) 값은 $\lambda/4$, RMS(Root Mean Square)는 $\lambda/10$ 유효구경부분은 $\varnothing 50 \sim \varnothing 130$ 에서 적용되며, 부경의 P-V값은 주경과 같으며, RMS는 $\lambda/12$ 값을 만족해야 하는 조건을 가지고 있다.

오픈너 광학계의 초정밀 가공과정은 광학계가공을 지지하는 구조물을 먼저 가공하고 지지구조물에 가공할 광학계를 결합하여 실제 광학계의 초정밀 가공을 수행하게 된다. 지지구조물 어댑터의 경우 광학계 초정밀 가공시 발생하는 변형을 줄이기 위해 정밀 제작된다. 이러한 정밀가공용 어댑터를 지그라고 부른다. 기본적으로 광학계 제작시 형상 공차 및 표면 거칠기를 향상시키기 위해서는 이러한 정밀 지그를 제작하여야만 하고 이 지그도 여러 실험을 통해 안정된 형상으로 가공하였다.

그림 4는 제작된 지그를 나타내고 있으며, 정밀 형상 공차 및 정밀 치수 공차에 만족하기 위해서 마운트면의

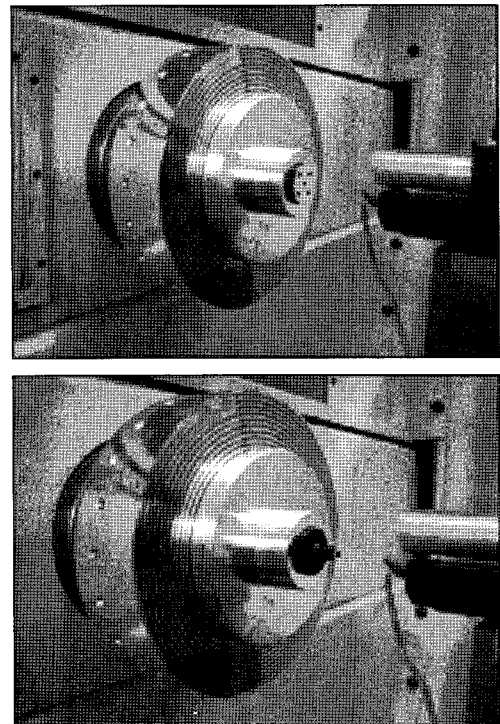


그림 6. 오픈너 부경의 초정밀 가공 모습

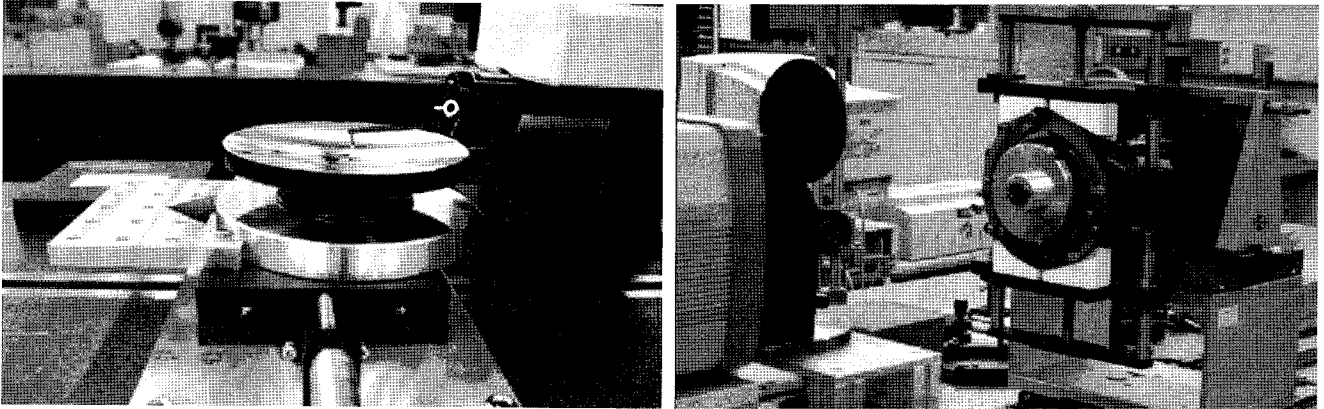


그림 7. (좌) Form Talysurf series2를 이용한 주경 형상 측정
(우) Laser Interferometer(WYKO 600)로 부경 형상 측정

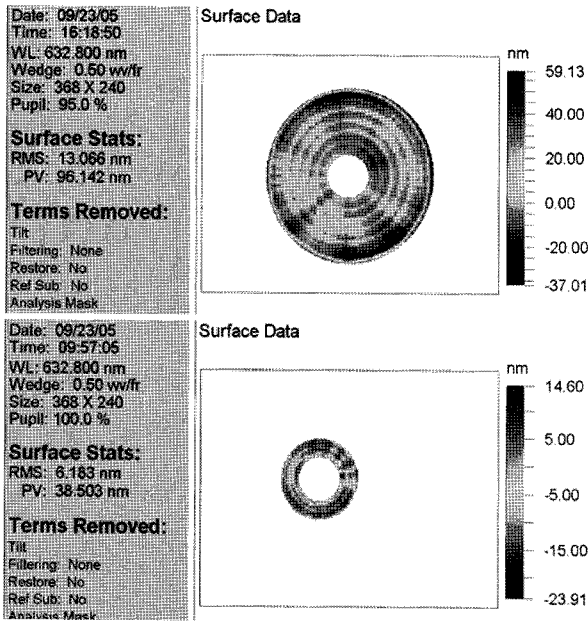


그림 8. 주부경의 표면 형상측정결과. 주경 P-V는 96nm, 부경은 38nm로서 요구조건에 부합된다.

초정밀 가공으로 제작되었다. 광학계의 초정밀 가공 전 광학계 구조물형상에서 빛의 반사를 줄이고 열복사율을 줄이기 위해 무광택 Anodizing 처리를 하였으며, Helicoil은 Anodizing 후에 삽입하였다. 주경 마운트면의 초정밀 가공시에는 파라핀을 측면에 녹여 고정하여 가공을 진행하였으며, 반사면 가공시에는 6개의 볼트를 사용하여 일정 토크(0.4~0.6Kg/f)로 체결하여 가공을 진행하였다. 그림 5는 초정밀 지그에 부착되어 초정밀 가공되고 있는 주경의 모습을 보여주고 있다.

부경은 주경과는 달리 외경 치수가 작고 내경까지 $\varnothing 3$ 으로 가공 되어 접촉식 측정기인 Form Talysurf series2를 사용하여 측정하기엔 정확한 데이터를 얻을 수 없을 것으로 판단하여 외경이 $\varnothing 12$ 인 시험 시편을 제작하였다. 시험시편을 부경과 같은 R150인 구면을 가공 후 Form Talysurf series2로 측정하였으며, 검증한 후 부경의 초정밀 가공을 진행하였다. 그림 6에서는 알루미늄(AI6061-T6) 소재인 반사경이 지그에 조립되어 초정밀 가공하고 있는 사진을 나타낸다.

4.2. 오프너광학계 반사경의 측정결과

적외선 카메라 반사경의 표면 형상측정은 압전소자를 이용한 접촉식 형상 측정기 Form Talysurf series2와 레이저 간섭현상을 이용한 비접촉식 측정기기 Laser Interferometer WYKO 6000을 이용하여 표면 형상 측정을 수행 하였다.

그림 7은 Form Talysurf series2를 이용하여 주경의 표면 형상 측정을 하는 그림이며, 주경의 구면 측정 결과, 최적 곡률값은 R299.9879 mm 이다. 주경의 유효 구경 영역인 $\varnothing 50 \sim \varnothing 130$ 부분을 측정하기 위하여 $\varnothing 0 \sim \varnothing 45$ 구간과 $\varnothing 133 \sim \varnothing 140$ 구간을 제외하고 레이저 간섭현상을 이용한 비접촉식 측정기인 Laser Interferometer WYKO 6000을 이용하여 표면을 측정한 결과, P-V값 96.142 nm, RMS값 13.066 nm을 얻을 수 있었으며, 이는 요구 형상 정밀도에 만족하는 값을 나타내고 있다.

KASINCS Ofnner 부경은 Form Talysurf series2를 이용하여 직접 측정하기 어렵기 때문에 시험시편을 초정밀 가공한 후 Form Talysurf series2 측정기를 이용하여 측

정하였으며, 그 결과 최적 곡률값은 R 149.9986 mm을 얻을 수 있었다. 그림 8은 주경과 부경을 Laser Interferometer WYKO 6000을 이용하여 표면을 측정한 그림이며, 부경의 P-V값은 38.503 nm, RMS값은 6.183 nm, 주경의 P-V값은 96.142 nm, RMS값은 13.066 nm 의 측정값을 얻을 수 있었다.

5. 결론

지상 광학 망원경에 부착하여 천문관측을 수행하는 근 적외선 카메라 카시닉스(KASINICS : KASI Near-Infrared Camera System)의 오프너 광학계를 초정밀 가공기술로 제작하였다. 적외선 시스템의 경우 내부가 모두 극저온인 80K 이하로 냉각되기 때문에 반사경의 경우 내부와 동일한 재질로 제작된다. 시스템 내부에 포함되는 반사경 형태의 적외선 광학계는 최근의 초정밀 가공기술의 발달로 가능하였다. 이번의 오프너 광학계 제작은 국내에서 처음으로 제작된 것으로서 시스템에 조립되어 광학시험을 한 결과 성능을 만족하는 결과를 확인할 수 있었다(목승원 외 2006). 알루미늄을 이용하여 반사경을 제작하는 이번 초정밀가공 시험결과는 알루미늄 6061 T6 재질의 가공특성을 면밀히 볼 수 있었으며 절삭속도는 220m/min, 절삭바이트 노우즈는 반경0.5mm 정도의 크기가 적절함을 알 수 있었다. 이러한 초정밀 가공기술 습득은 금속재질의 적외선 반사경을 국내에서 설계하고 제작하여 시스템에서 활용 할 수 있다는 점에서 매우 좋은 결과로 판단된다.

이에 향후 적외선 관측기기개발 뿐만 아니라 천문관측기기에 필요한 비구면 렌즈등과 같은 초정밀 가공품을 지속적으로 개발함으로써 초정밀 가공기술에 대한 보다 다양한 경험의 축적이 필요하다. 이 기술을 지속적으로 배양하여 지상관측용 기기뿐만 아니라 우주관측에 활용할 수 있는 광학계 제작까지 국내 독자 기술로써 초정밀 가공 분야의 연구 영역을 확대하고자 한다.

참고 문헌

강지나, 이성호, 진호, 박수중, 문봉곤, 김상호, 박장현, 2004, 적외선 카메라 KAONICS의 열해석, 한국우주과학회지, 21, 467

김건희, 김효식, 양순철, 이규황, 복민갑, 이인제, 양진석, 김명상, 이상용, 신현수, 2006, 천문관측용 적외선 카메라 시스템 제작기술개발에 관한 연구 (대전 : 한국기초과학지원연구원 위탁연구개발과제보고서)

남옥원, 이대희, 진호, 이성호, 육인수, 한원용, 박

장현, 김동락, 양형석, 김건희, 김효식, 양순철, 신현수, 이인제, 이상용, 양진석, 2006, 우주망원경냉각시스템 개발 (기초기술 연구회 연차실적계획서)

목승원, 이성호, 육인수, 박영식, 진호, 한정열, 문봉곤, 차상목, 김건희, 임명신, 2006, KASINICS 오프너 광학계의 부품 가공 및 정렬, 천문학논총, 21, 43

박수중, 한원용, 남옥원, 박장현, 육인수, 진호, 선광일, 이대희, 경제만, 천무영, 김영수, 성연창, 이성호, 문봉곤, 공경남, 강지나, 한정열, 장유성, 박영식, 손종대, 2004, 적외선관측기술개발 (대전 : 한국천문연구원 기관고유사업보고서)

박수중, 진호, 육인수, 이성호, 남옥원, 한원용, 박장현, 이대희, 경제만, 박영식, 문봉곤, 공경남, 한정열, 조승현, 차상목, 목승원, 2005, 적외선관측기술개발-II (대전 : 한국천문연구원 기관고유사업보고서)

육인수, 이성호, 진호, 선광일, 박수중, 이대희, 남옥원, 문봉곤, 차상목, 한정열, 경제만, 김건희, 양진석, 2005, KASINICS의 광기계부 설계, 천문학논총, 20, 143

이성호, 육인수, 진호, 박수중, 한정열, 이대희, 공경남, 조승현, 박영식, 박장현, 한원용, 2005, KASINICS 광학계의 고스트 분석, 천문학논총, 20, 151

진호, 육인수, 이성호, 남옥원, 경제만, 박영식, 문봉곤, 공경남, 조승현, 차상목, 목승원, 2006, 적외선관측기술개발-III (대전 : 한국천문연구원 기관고유사업보고서)

Fischer, J., Vrba, F. J., Toomey, D. W., Lucke, B. L., Wang, Shu-i., Henden, A. A., Robichaud, J. L., Onaka, P. M., Hicks, B., Harris, F. H., Stahlberger, W. E., Kosakowski, K. E., Dudley, C. C., & Johnston, K. J., 2003, ASTROCAM: offner re-imaging 1024 X 1024 InSb camera for near-infrared astrometry on the USNO 1.55-m telescope, SPIE, 4841, 564

Graham, J. R. & Treffers R. R., 2001, An Infrared Camera for Leuschner Observatory and the Berkeley Undergraduate Astronomy Lab, PASP, 113, 607