

## 직경 1 m 비축포물면의 가공 및 평가

양호순 · 이재협 · 전병혁 · 이윤우<sup>†</sup>

한국표준과학연구원 우주광학연구단  
☎ 301-040 대전시 유성구 도룡동 1번지

이경묵

삼성탈레스주식회사 광전자시스템그룹  
☎ 446-712 경기도 용인시 기흥구 농서동 산14-1

최세철 · 김종민

국방과학연구소 기술연구본부  
☎ 305-600 대전시 유성우체국 사서함 35-5

(2008년 7월 18일 받음, 2008년 8월 14일 수정본 받음, 2008년 8월 19일 게재 확정)

망원경의 조립 및 평가를 위해서는 평행광선을 만들어주는 시준장치가 반드시 필요하다. 최근에 고해상도 카메라의 초점거리가 길어짐에 따라 상대적으로 적은 부피를 차지하는 Cassegrain 형태의 시준장치가 많이 사용되고 있다. 하지만 이러한 형태는 적외선 광학계를 평가할 때 부경이 가지는 온도로 인하여 불필요한 열복사선을 방출하여 적외선 광학계의 평가 정밀도를 떨어뜨리게 된다. 본 논문에서는 직경이 800 mm이고 초점거리가 2 m인 적외선 광학계를 평가하기 위하여 초점거리는 6 m이고 물리적인 직경 1 m, 유효 직경이 930 mm인 비축포물면을 Zerodur를 이용하여 가공하고 측정된 과정을 설명한다. 약 4개월간의 작업 끝에 면의 최종 파면 수차는 30.4 nm rms( $\lambda/138$ ,  $\lambda=4.2 \mu\text{m}$ )를 얻어서 적외선 광학계뿐만 아니라 가시광 영역 광학계도 측정 가능한 성능을 보유했다.

주제어: Telescope, Off-axis collimator, Infrared optics, Large optics

### I. 서 론

고해상도 카메라의 조립 및 평가에는 시준장치(collimator)가 반드시 사용된다.<sup>[1]</sup> 시준장치는 망원경과 같은 원리이나 사용하는 방법은 정반대이다. 즉, 망원경은 무한 광원을 초평면에 맺혀주는 역할을 하나, 시준장치는 초평면에서 나간 빛을 무한광원처럼 만들어준다. 따라서 시준장치의 구성은 망원경과 기본적으로 동일하다. 하지만, 시준장치를 이용하여 망원경을 평가할 경우, 시준장치가 가지고 있는 수차로 인하여 망원경의 성능이 저하된 것처럼 보이면 안 되므로, 시준장치의 성능은 회절한계 이하이어야 한다.

이러한 시준장치는 검출기의 정렬 및 조립에 사용될 수 있고, 또한 물체면과 상면사이의 영상시험(end-to-end imaging test), 초점거리측정, 시야(line-of-sight) 측정 및 복사 교정 등 다양한 광학계 평가가 가능하다.<sup>[2]</sup>

시준장치의 구경은 측정하고자 하는 광학계에 광썰림현상(vignetting)을 주지 않을 정도로 충분히 커야하고 초점거리는 측정대상 광학계보다 적어도 두배 이상 길어야 한다. 최근 국내에서 개발되고 있는 고해상도 카메라들은 구경이 800 mm 이상이고 초점거리 또한 10 m 이상으로 매우 길다. 이러한 카메라를 실험실에서 평가하기 위해서는 위에서 언급

한 조건들을 만족하는 Cassegrain 형태의 시준장치를 갖추어야 한다. 광선을 꺾어 사용하므로 초점거리에 비해 전체 크기가 크지 않고 축상 대칭이므로 정렬이 쉽다. 주경과 부경 사이를 열팽창계수가 작은 물질로 연결하면 온도에 의한 성능저하 현상을 줄일 수 있다. 또한 거울만을 사용하므로 넓은 파장영역을 가질 수 있다.

하지만 Cassegrain 형태는 적외선 광학계를 평가하기에 쉽지 않은 구조물이다. Cassegrain의 부경은 하나의 열원에 해당되므로 측정하고자 하는 적외선 광학계에 원치 않은 열복사선을 방출할 수 있기 때문이다. 이러한 열잡음의 효과는 부경의 배경에 대한 온도차, 부경의 면적, 평가되는 광학계의 구경, 초점거리 및 검출기의 양자효율등 여러 가지 요인에 의해 그 영향이 달라질 수 있다. 그러나 고정밀의 적외선 광학계의 온도차 분해능(NETD, Noise Equivalent Temperature Difference)가 수십 mK인 점을 감안하면 이러한 부경에 의한 열잡음의 효과는 무시할 수 없다. 그래서 적외선 광학계를 성능평가하기 위해서는 출사동내에 빛을 차단하는 장애물을 가지고 있지 않는 비축포물면(Off-axis paraboloid)을 많이 사용한다. 그림 1은 비축포물면을 시준장치로 사용하여 적외선 광학계를 평가하는 개념을 그린 것이다. 흑체에서 나온 빛은 표적을 지나서 비축포물면에 의하여 평행광이 되고 이 빛이 시험 광학계를 거쳐 검출기에 표적의 영상이 맺히면 이 영상을 분석함으로써 성능을 평가한다.

<sup>†</sup>E-mail: ywlee@kriss.re.kr

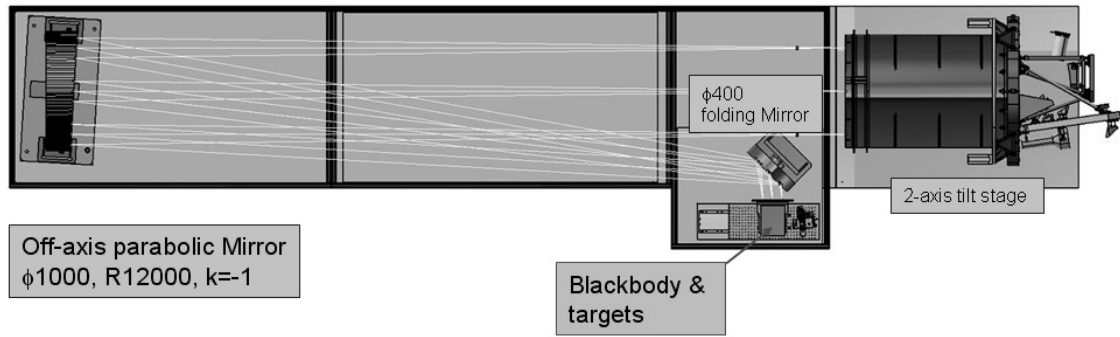


그림 1. 비축포물면을 이용한 IR 광학계의 평가.

본 논문에서는 직경이 800 mm이고 초점거리가 2 m인 적외선 광학계를 평가하기 위하여 직경이 1000 mm이고 초점거리가 6 m인 비축포물면을 제작하고 측정한 과정에 대해서 다루었다. 비축포물면의 사양에 대하여 검토하고 제작 과정 및 형상 측정 방법에 대하여 설명하였다. 그리고 비축포물면의 최종 파면오차를 보여주고 그 의미를 간단히 언급하였다.

## II. 비축포물면의 사양 결정

그림 2는 비축포물면의 크기를 결정하기 위한 개념을 나타낸 것으로 비축포물면과 적외선 광학계를 각각 하나의 렌즈로 간략히 표현하였다. 여기서  $D_{col}$ 은 비축포물면의 유효직경,  $D$ 는 적외선 광학계의 구경제한판(Aperture Stop)의 직경,  $R$ 은 비축포물면과 구경제한판 사이의 거리,  $F_{col}$ 은 비축포물면의 초점거리,  $dT$ 는 표적의 대각선길이를 나타낸다. 이 그림으로부터 적외선 광학계에 광선잡림효과가 일어나지 않도록 하기 위해서는  $D_{col}$ 은 다음 식 (1)을 만족해야 함을 알 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$D_{col} = D + R \times \frac{dT}{F_{col}} \quad (1)$$

$F_{col}$ 은 표적의 위치오차 및 비축포물면의 제작 오차에 의한 광학계 평가 오차를 줄이기 위하여 일반적으로 시험 광학계의 초점거리의 다섯 배 이상으로 만들게 되는데 본 개발에서는 시험 광학계의 초점거리가 2 m로 길어 비축포물면의 초

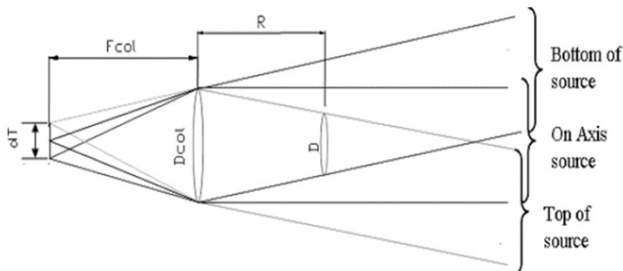


그림 2. 비축포물면의 크기를 결정하기 위한 개념도.<sup>[3]</sup>

점거리를 이보다 다섯 배 긴 10 m로 잡게 되면 일반적인 실험실 수준에서 평가하기에는 너무 길게 된다. 따라서 본 개발에서는 시험 광학계의 초점거리보다 세 배 긴 6 m를 비축포물면의 초점거리로 정하였다. 이러한 사항을 고려하면 각 변수들은 다음 값을 갖는다.

- $F_{col} = 6000 \text{ mm}$
- $R = 6250 \text{ mm}$ (시준장치의 경통끝단과 시험 광학계의 구경제한판 사이의 거리가 500 mm인 경우)
- $D = 715 \text{ mm}$
- $dT$ : 비축포물면의 시야각을 시험 광학계의 시야각인 1.4도보다 약간 큰 1.5도로 정하면 표적의 대각선 길이  $dT = 2 \times \tan(0.75) \times F_{col} = 157 \text{ mm}$
- $D_{col} = 878 \text{ mm}$ (식 (1)을 이용한 최소크기)

그러나 실제로는 시험 광학계의 구경 제한판 중심과 비축포물면의 중심을 정확히 맞출 수 없으므로 이러한 정렬오차를 감안하여 비축포물면의 유효직경을 930 mm로 정하였다. 이를 바탕으로 비축포물면은 직경 1 m인 Zerodur를 사용하여 제작하였다.

비축포물면의 또 다른 사양은 비축거리(OAD, Off-Axis Distance)이다. 이것은 광축과 비축포물면의 안쪽 가장자리 사이의 거리를 가리킨다. 이 거리가 클수록 광원이 비축포물면의 출사동을 가릴 확률이 적어 사용에 편리하지만 sag가 커서 가공시간이 늘어나고 면의 정밀도도 떨어지게 된다. 본 개발에서는 그림 1과 같이 표준 광학테이블의 폭인 1.5 m 위에서 비축포물면과 45도 반사경이 같이 놓일 수 있는 것을 요구조건으로 삼았을 때 비축거리는 200 mm이어야 함을 알 수 있었다. 이러한 경우 비축포물면의 초점거리는 6 m이지만 비축포물면의 중심과 초점사이의 거리는 6 m가 아니라 6.0204 m가 되는데 이것을 비축포물면의 외견상의 초점거리(AFL, Apparent Focal Length)라고 한다.

이러한 비축포물면의 초점심도(Depth of Focus)를 계산하여 보았다. 일반적인 초점심도에 관한 표현은 defocus와 관련하여 식 (2)와 같이 표현한다.<sup>[4]</sup>

$$\Delta f = \pm 8 \lambda a_{020} F \#^2 \quad (2)$$

여기에 Rayleigh 기준( $a_{020} = \pm 1/4$ )을 적용하고 파장을  $4 \mu\text{m}$ 로 계산하면 초점심도는 식 (3)과 같이 약  $338 \mu\text{m}$ 가 된다.

$$\Delta f = \pm 8 F \#^2 = \pm 8 (6.5)^2 = \pm 338 \mu\text{m} \quad (3)$$

이 정도의 양은 일반적인 기계 공차를 고려하였을 때 충분히 큰 값이다. 예를 들면 비축포물면과 표적이 강철(열팽창 계수  $10 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{K}$ )로 만들어진 광학 테이블위에 설치되었고 표적은 비축포물면으로부터  $6 \text{ m}$  떨어진 위치에 정렬을 하였다면 실험실 온도가  $1^\circ$ 도 변하였을 때 표적의 위치는 비축포물면으로부터 약  $60 \mu\text{m}$  정도 변하게 되지만 초점심도 이내에 위치하므로 성능에 별로 영향을 주지 않게 된다.

### III. 비축포물면의 가공

비축포물면의 크기가 크지 않는 경우에는 보다 큰 모재 (mother piece)를 가공하고 해당부분을 잘라내는 방식을 많이 사용한다.<sup>[5]</sup> 그러나 본 비축포물면과 같이 직경이  $1 \text{ m}$ 이

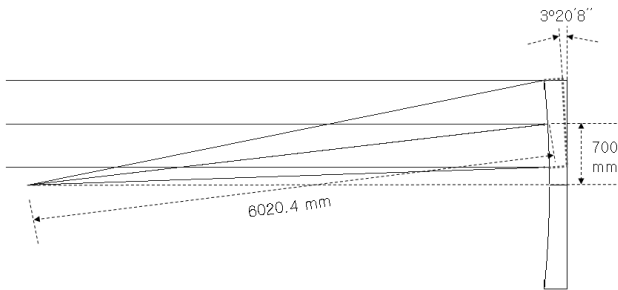


그림 3. 비축포물면 제작을 위한 비축포물면의 위치(가공하고자 하는 비축포물면은 모재내에서 점선으로 표시됨).

고 비축거리가  $200 \text{ mm}$ 에 이르게 되면 모재의 크기가  $2.4 \text{ m}$ 에 이르게 되고 이렇게 큰 모재를 가공하고 해당부분을 잘라 내기에는 가공소요시간 및 제작비 부담이 매우 늘어나게 된다. 따라서 본 제작에서는 비축포물면을 모재에서 잘라내지 않고 직접 가공하는 방식을 취하였다.

또한 일반적인 비축포물면의 경우 광축과 가까운 쪽과 먼 쪽의 가장자리 두께가 달라지는데 본 비축포물면처럼 직경이 큰 경우 두께차이가 많이 날 수 있으며 이것을 마운트 하였을 경우 회전력이 발생하여 반사경의 성능에 영향을 줄 수 있다. 이를 방지하기 위하여 본 비축포물면은 가장자리의 두께가 모두 같도록 제작이 되었다. 즉, 그림 3과 같이 Zerodur 블럭을 모재의 뒷면에 대해  $3^\circ 20' 8''$  각도로 기울이고 Zerodur 중심을 광축으로부터  $700 \text{ mm}$  떨어진 위치에 놓고 가공하게 되면 비축포물면의 가장자리 두께가 같도록 제작할 수 있다.

이러한 경우 일반적인 경우처럼 비구면 반사경의 뒷면을 반사경의 광축으로 사용할 수 없게 되고 광축을 찾기 어려울 뿐만 아니라 향후 가공 후에 다른 광학계와 정렬하여 사용할 경우 정렬이 매우 어렵게 되는 문제점들이 발생한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 비축포물면의 가장자리에 홈을 파고  $3^\circ 20' 8''$  기울어진 프리즘 블럭을 끼워 두었다. 즉 이 프리즘 블럭은 비축포물면의 광축방향을 지시하는 LOS (Line Of Sight) 역할을 하는 반사경이 된다.

비구면 가공 및 측정은 그림 4와 같이 형상가공, 연삭(grinding), 1차 연마(polishing), 2차 연마(polishing) 과정을 거치며, 각각의 과정마다 형상오차 범위가 다른 여러 가지 측정방법을 사용한다. 형상가공은 CNC(Computer Numerical Control)이나 DTM(Diamond Turning Machine)을 사용하며 이때 형상은 삼차원 측정기를 주로 사용한다. 만약 직경이 작은 비구면의 경우에는 Profilometer를 사용하여 측정한다. 비구면 형상오차가 수  $\mu\text{m}$  이내인 경우에는 파장이 긴 적외선 간섭계나 Hartmann 혹은 Shack-Hartmann 파면측정장치를 사용

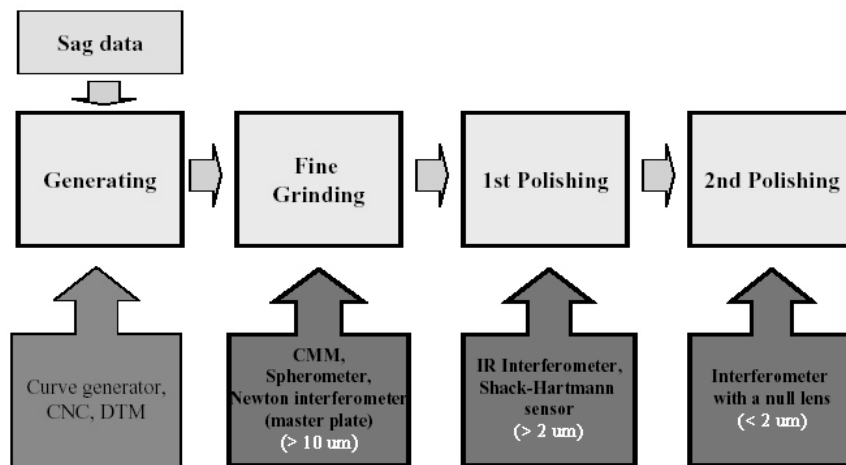


그림 4. 비구면 형상가공 및 측정법.

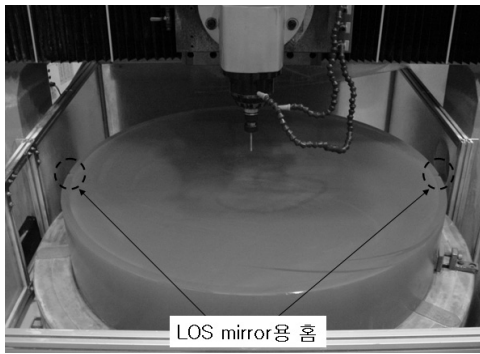


그림 5. CNC를 이용한 비축포물면의 최적곡면 가공.

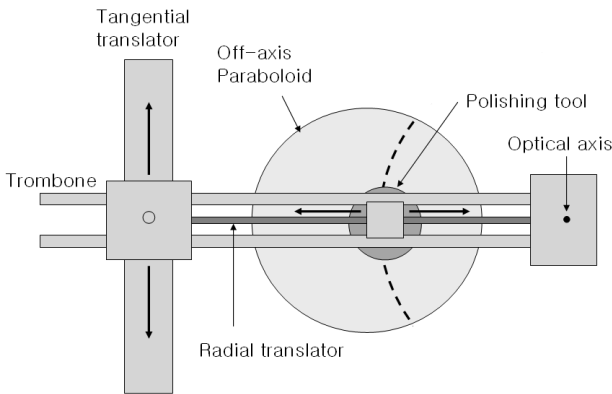


그림 6. 비축포물면 연마기의 구조.

한다. 최종으로 비구면 형상오차가 1  $\mu\text{m}$  이내로 들어오게 되면 간섭계와 null 광학계를 이용한 정밀 측정을 하게 된다. 직경 1 m 비축포물면의 경우 형상가공은 CNC를 이용하여 수행하고 나머지 작업은 아래에서 소개되는 비축포물면 연마기 위에서 수행하였다.

CNC에서 수행하는 형상가공은 면을 최적곡면(best fit sphere)로 가공하는 것이다. 직경 1 m 비축포물면의 곡률반경은 12 m이지만 이대로 형상가공을 하고 비구면 가공에 들어갈 경우 최대 150  $\mu\text{m}$  정도 가공을 하여야 하지만 최적곡률인 12.030 m로 형상을 가공하고 비구면 가공에 들어갈 경우 최대 약 35  $\mu\text{m}$  정도 가공하면 되므로 시간적으로 많은 단축이 된다. 또한 CNC에서 최적곡면을 가공한 후 반사경의 광축을 표시하여 주기위한 크기 20 mm  $\times$  20 mm의 LOS 반사경을 부착하기 위한 홈을 가장자리에 두군데 정밀 가공하였다. 그림 5는 CNC 장비를 이용하여 직경 1 m Zerodur를 형상가공하고 LOS 반사경을 위한 홈을 판 상태를 찍은 것이다.

국내에서 직경 1 m급 대형 광학반사경을 정밀 가공하는 것은 최근 몇 년 사이에 이루어진 일이다. 그동안의 광학반사경은 대칭 비구면으로 가공장비와 측정방법들이 이미 많이 알려져 있었지만 비축포물면은 대칭이 깨진 면이므로 가공 및 측정이 대칭 비구면에 비하면 훨씬 어려운 작업이다. 따라서 본 비축포물면을 가공하기 위하여 일반 비구면 연마기를 특별하게 직접 개조하여 사용하였다.

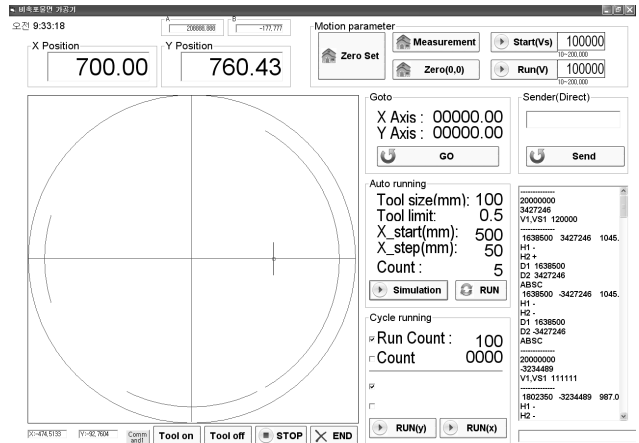


그림 7. 비축포물면 연마기 제어용 프로그램.

그림 6은 개조된 비축포물면 연마기의 가공원리를 묘사한 것이다. 연마공구(polishing tool)를 지탱해주는 트롬본(Trombone)의 한쪽은 접선 이동기(Tangential translator)를 따라 위아래로 움직인다. 이때 트롬본의 반대쪽은 회전운동을 하는 회전판에 고정하게 되면 연마공구는 회전판의 중심에 대해 원운동을 하게 된다. 이 회전판의 중심과 가공하고자 하는 비축포물면의 광축을 일치시키면 연마공구는 광축에 대하여 접선방향으로 이동하게 되어 축대칭 반사경을 가공할 때와 같은 움직임을 가지게 된다. 공구의 가공면상에서의 위치는 반지름방향 이동기(radial translator)를 이용하여 맞추어 준다. 또한 공구에는 회전모터를 장착하여 톨의 회전속도를 조절하여 줌으로서 가공속도를 조절한다.

이러한 움직임은 모두 서보모터를 사용하여 컴퓨터로 제어할 수 있다. 그림 7은 비축포물면 연마기의 동작을 제어할 수 있는 컴퓨터 프로그램의 실행 화면이다. 이러한 프로그램을 이용하면 원하는 궤적에 원하는 시간만큼 머무는 것이 가능하므로 비축포물면 연마기를 매우 편리하게 사용할 수 있다.

#### IV. 비축포물면의 측정

비구면을 측정하는 일반적인 방법은 재래식 null lens나 CGH (Computer Generated Hologram)을 비구면의 곡률반경 근처 위치에 놓아 간섭계에서 나오는 평면파나 구면파를 비구면에 맞도록 파면을 보정하는 것이다.<sup>[6-8]</sup> 그러나 본 비축포물면과 같이 초점거리가 6 m인 경우 곡률반경은 12 m로 null 광학계와 비축포물면 사이의 거리가 매우 멀다. 이러한 방법을 사용하려면 넓은 작업 공간이 필요할 뿐만 아니라 공기 유동에 의한 측정의 어려움이 발생한다. 또한 좁은 공간에서 측정하기 위해서는 빔을 여러 번 꺾어주어야 하므로 정렬 문제가 발생하고 여러 가지 보조 광학부품이 필요하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 측정에서는 직경 1 m 급 기준평면거울을 사용하여 double-pass 방식을 사용하였다. 그림 8은 이러한 방식을 사용한 측정방법이다. 그림에서 볼 수 있듯이 비축포물면과 기준평면거울사이가 약 6 m로 null 광

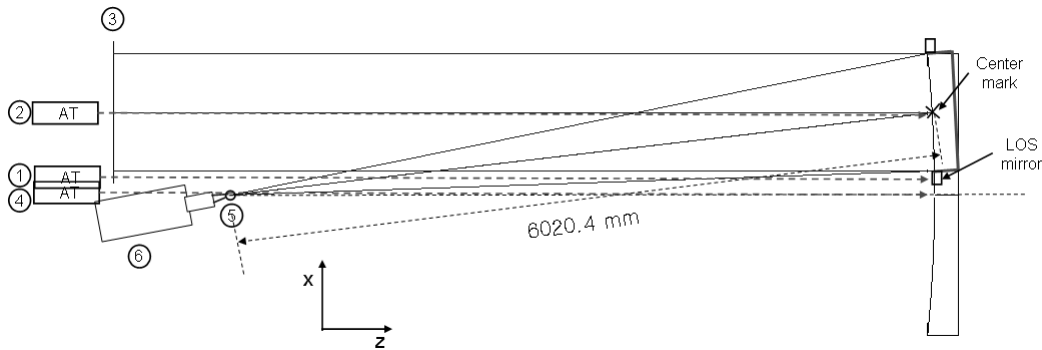


그림 8. 비축포물면의 측정방법.

학계를 사용할 때보다 공간이 반으로 줄고 공기 유동 효과도 감소시킬 수 있다.

다음은 그림 8에서 보여주는 비축포물면의 측정방법을 번호 순서대로 설명하는 내용이다.

- ① 정렬망원경의 방향을 LOS mirror를 이용하여 비축포물면의 광축방향으로 고정시킨다. 이때 정렬망원경의 높이는 비축포물면의 중심과 같도록 조절한다.
- ② 정렬망원경이 비축포물면의 중심표시(center mark)를 쳐다보도록 수평 이동시킨다.
- ③ 직경 1 m 기준평면거울을 위치시킨다. 기준평면거울은 정렬망원경을 이용하여 광축방향과 수직이 되도록 조절한다.
- ④ 정렬망원경을 중심표시로부터 정확히 700 mm 이동시킨다. 그러면 정렬망원경은 비축포물면의 광축과 일치하게 된다.
- ⑤ 직경 1인치의 기준구를 비축포물면의 초점위치에 놓는다. 이때 초점위치는 비축포물면의 중심표시에서 반경이 외견상의 초점거리인 6020.4 mm에 해당하는 원주와 광축이 만나는 곳이다. 비축포물면의 중심표시에서의 거리는 길이를 정확히 알고 있는 막대자에 마이크로미터헤드를 붙여서 측정한다. 정렬망원경은 광축과 일치한 상태에 있으므로 기준구의 중심을 정확히 초점위치에 갖다 놓게 되면 기준구의 중심은 중심표시에서 6020.4 mm 떨어짐과 동시에 기준구에서 반사되는 정렬망원경의 이미지가 정확히 정렬망원경의 가운데에 위치하게 된다.
- ⑥ 간섭계의 위치를 조절하여 간섭계에서 나오는 구면파의 초점을 기준구의 중심에 맞춘다. 기준구의 표면은 가공이 잘 되어 있으므로 기준구에서 반사되어 만들어지는 간섭무늬를 보면 구면파의 초점과 기준구의 중심 사이의 일치여부를 파악할 수 있다.

이러한 작업이 끝난 후 기준구를 제거하면 비축포물면이 이상적으로 만들어졌을 경우 간섭계에 비축포물면의 형상이 바로 나타난다. 실제로는 여러 가지 오차요인에 의하여 간섭

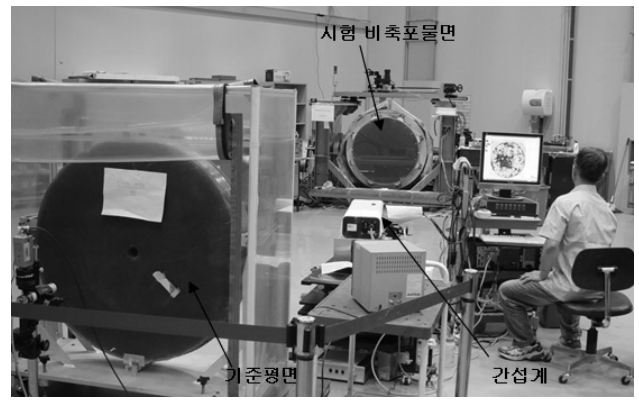


그림 9. 간섭계를 이용한 비축포물면의 형상측정 사진.

계의 위치를 조절함으로써 비축포물면의 형상을 측정할 수 있다.

그림 9는 간섭계를 이용한 비축포물면의 형상 측정장치이다. 시험 비축포물면은 측정을 위하여 연마기에서 수직으로 회전된다. 간섭계의 광선은 시험면에 반사되어 평행광선이 되며 기준평면에서 다시 반사되어 재입사 된다. 간섭계는 4D Technology사의 PhaseCam 4010이며 진동에 매우 둔감하다. 기준 평면은 직경이 1 m이며 평면도는 11 nm rms이다.

그림 10은 가공이 완료된 비축포물면의 최종 파면오차를 보여준다. rms값으로 30.4 nm로 빛의 파장을 4.2 μm로 하였을 때 λ/138에 해당하고 빛의 파장을 0.633 μm로 하였을 때 λ/20.8에 해당한다. 따라서 적외선 광학계를 평가할 때 완전하게 이상적인 시준장치로 사용될 수 있고 가시광 영역 광학계를 평가할 때에도 별 문제 없이 사용될 수 있음을 알 수 있다.

비축포물면의 최종 초점위치는 이론적인 위치에서 x방향으로 4.4 mm, y 방향으로 -3.5 mm, z 방향으로 11.8 mm 이동하였음을 확인하였다. 이러한 초점위치 오차는 비축포물면의 형상 가공시 가공된 최적구면의 곡률반경 오차와 그림 6의 비축포물면 연마기에서 연마틀을 광축에 대하여 원운동을 하도록 만드는 고정핀의 위치오차(광축과의 상대적인 위치)가 원인인 것으로 생각된다. 그러나 이 정도의 오차는 비축포물면의 곡률반경과 비교하면 매우 작은 값으로 실제 비

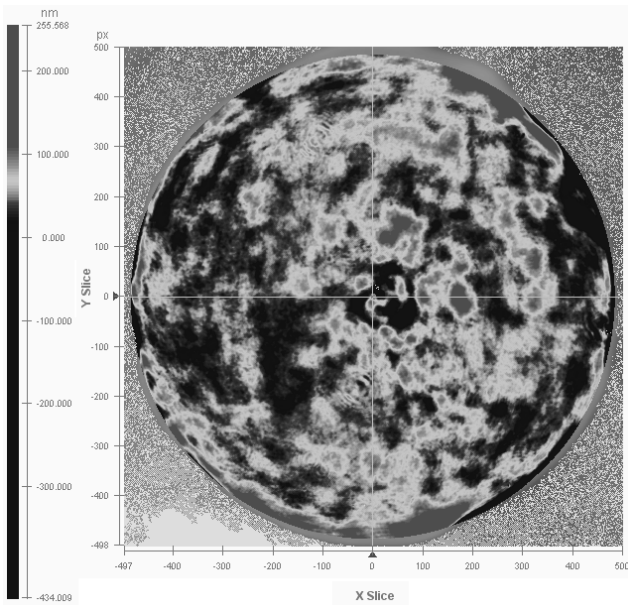


그림 10. 비축포물면의 최종 파면오차. PV로는 689 nm이고 rms 값으로 30.4 nm이다.

축포물면을 광학테이블위에 설치할 때 다른 광학계들에 아무런 영향을 주지 않는 것을 확인하였다.

### V. 결 론

직경 1 m의 비축포물면이 국내에서 처음으로 제작 및 평가되었다. 특히 최종 파면오차가 30.4 nm rms에 불과하여 적외선 광학계뿐만 아니라 가시광 영역 광학계의 평가에도 사용이 가능하다. 또한 본 직경 1 m 비축포물면은 표준과학연구원에서 운영하는 직경 2 m급 박막증착기를 이용하여 알루미늄 반사박막을 증착할 예정이다.

하지만 아직 비축포물면의 초점위치가 설계치로부터 적어도 3.5 mm 이상 벗어나 가공이 된 점은 개선이 되어야 할

점으로 생각된다. 특히 이러한 비축포물면 여러 장이 하나의 주경 또는 부경을 구성하는 경우 초점위치의 정확도는 매우 중요한 요소중의 하나이다. 비축포물면의 제작에서 초점위치의 정확도를 개선하기 위해서는 자체 개발한 비축포물면 가공기의 원점위치 정확도가 매우 중요하다는 것을 파악하였다. 향후 가공기의 원점위치 오차를 1 mm 이내로 줄이기 위하여 추가 연구를 진행할 계획이다.

그동안 국내에서는 축대칭 비구면을 최대 직경 1 m까지 가공하여 왔지만 이보다 가공 및 평가가 어려운 직경 1 m 비축포물면의 제작에 성공함으로써 국내의 대형 광학거울 가공능력을 한 단계 상승시켰다고 볼 수 있다. 앞으로 이러한 기술을 이용할 경우 대형 천체망원경이나 우주용 망원경, 반도체 및 LCD 노광장비 등에 사용되는 비축비구면의 가공이 가능하여 핵심부품의 국산화율이 올라갈 것으로 예상된다.

### 참고문헌

- [1] B. C. Willard, "Wide field-of-view Schmidt-sphere imaging collimator," *Proc. SPIE*, vol. 3750, pp. 286-295, 1999.
- [2] D. R. Hearn et al., "Spatial calibration of the EO-1 Advanced Land Imager," *Proc. SPIE*, vol. 3750, pp. 97-108, 1999.
- [3] G. C. Holst, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems* (SPIE press, 2nd Ed.), pp. 122-123.
- [4] M. C. Ruda, *Fundamentals of Optical Alignment Techniques* (SPIE press, Short course)
- [5] www.sorc.com, "Off axis parabolic mirrors".
- [6] D. Malacara, *Optical Shop Testing* (Wiley, New York, 1992), Appendix 2.32.
- [7] H. S. Yang, Y. W. Lee, J. B. Song, and I. W. Lee, "Null Hartmann test for the fabrication of large aspheric surfaces," *Opt. Express*, vol. 13, no. 6, pp. 1839-1847, 2005.
- [8] H. S. Yang, Y. W. Lee, J. B. Song, and I. W. Lee, "Testing of steep aspheric surface with a Hartmann sensor using a CGH," *Opt. Express*, vol. 14, no. 8, pp. 3247-3254, 2006.

### **Fabrication and Evaluation of Diameter 1 m Off-axis Parabolic mirror**

Ho-Soon Yang, Jae-Hyeob Lee, Byung-Hyug Jeon, and Yun-Woo Lee<sup>†</sup>

*Space Optics Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 301-040, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: ywlee@kriss.re.kr*

Kyoung-Muk Lee

*Optronics System Group, Samsung Thales Co. Ltd., Yongin-City 446-712, Korea*

Se Chol Choi and Jong-Min Kim

*Image Information PEO, Agency For Defense Development, Daejeon 305-600, Korea*

(Received July 18, 2008; Revised manuscript August 14, 2008; Accepted August 19, 2008)

The collimator which makes a collimated beam, is an essential instrument for assembly and evaluation of telescopes. Recently, the Cassegrain type collimator has been widely used for its compact size as the focal length of high resolution cameras becomes longer. However, this kind of collimator has a disadvantage in that the secondary mirror is a heat source which can degrade the evaluation accuracy for an IR camera system. In this paper, we present the fabrication and measurement process for an off-axis parabolic mirror with the physical diameter of 1 m, effective diameter 930 mm, and the focal length 6 m. After four months of works we obtained the final surface wave-front error of 30.4 nm rms ( $\lambda/138$ ,  $\lambda=4.2 \mu\text{m}$ ), which is capable of evaluation of an IR camera as well as a visible camera.

OCIS codes: (120.1680) Collimation; (120.4610) Optical fabrication; (120.4820) Optical systems.