

## 직경 450 mm Cassegrain 형태 시준장치의 제작

양호순<sup>†</sup> · 이재협 · 이윤우 · 이인원

한국표준과학연구원 광기술표준부  
Ⓣ305-340 대전 유성구 도룡동 1번지

김중운 · 김도형

(주)세트레이이 광학팀  
Ⓣ305-811 대전 유성구 전민동 461-26

(2004년 3월 24일 받음, 2004년 6월 3일 수정본 받음)

고해상도 인공위성용 망원경의 조립 및 평가를 위해서는 평행빔을 만들어주는 시준장치가 꼭 필요하다. 전통적으로 큰 직경의 시준장치로는 비축포물면 거울을 많이 사용하여 왔다. 하지만, 평가대상망원경의 초점거리가 긴 경우 비축포물면은 보다 긴 초점거리를 가져야 하고 공기의 유동효과를 효과적으로 제어하지 못할 경우, 정확한 평가가 이루어지기 어려운 단점이 있다. 이에 비해 Cassegrain 형태 시준장치는 빔을 꺾어 사용하므로, 초점거리에 비해 적은 공간을 차지하고 공기의 유동효과도 상당히 줄일 수 있는 장점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 직경 300 mm 인공위성 망원경을 측정하기 위해 직경 450 mm 의 Cassegrain 형태 시준장치를 설계하고 제작한 과정을 설명한다. 주경 및 부경을 제작한 후 시준장치를 구성한 결과 최종 파면수차는  $0.07\lambda$  ( $\lambda=633$  nm)로 diffraction limited 성능을 보였다.

주제어 : collimator, null lens, Hindle test, tolerance analysis.

### I 서 론

고해상도 인공위성용 망원경의 조립 및 평가에 시준장치(collimator)는 꼭 필요한 장치이다.<sup>[1]</sup> 시준장치는 망원경과 같은 원리나 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 보이므로, 시준장치의 성능은 diffraction limited이어야 한다.

이러한 시준장치는 detector 정렬 및 조립에 사용될 수 있고, 또한 end-to-end imaging test, 초점거리측정, line-of-sight measurement, spectral calibration, radiometric calibration 등 다양한 광학계 평가가 가능하다.<sup>[2]</sup>

시준장치로 가장 많이 사용되는 것은 비축포물면(off-axis paraboloid)이다. 국내에서는 표준과학연구원에 직경 약 400 mm, 초점 거리 약 4 m,  $\lambda/10$  ( $\lambda=633$  nm) p-v의 성능을 가지고 있는 비축포물면이 있다. 비축포물면의 장점으로는 출사동내에 빛을 차단하는 장애물이 전혀 없고, 가시광 영역에서 thermal IR band에까지 넓은 영역을 커버할 수 있으며 대형으로 제작이 가능하다는 점이다. 그러나, 비축포물면이 가지고 있는 단점으로는, 첫째, 비축포물면 한 장만을 사용할 경

우 off-axis에서의 수차증가로 인하여 end-to-end imaging test 하기가 쉽지 않다. 둘째, 초점거리가 긴 경우 공기의 유동으로 인해 깨끗한 상을 얻기 어렵다.<sup>[3]</sup> 테이블 주위에 커튼을 치는 것은 공기의 유동을 줄일 수 있지만 완전히 없앨 수는 없다. 광경로 주위를 모두 차폐시키고 가진공을 만드는 방법이 가장 확실하지만 이것은 비용 및 공간을 많이 필요로 한다. 셋째, 비축포물면의 정렬은 축포물면에 비해 어렵고 많은 시간이 소요된다.<sup>[4]</sup> 정렬후에도 온도변화에 의한 테이블 길이의 변화로 초점위치가 변할 수 있어 시준장치의 성능을 유지하기 위해서는 초점위치의 변화를 보정하기위한 노력을 기울여야 한다.<sup>[5]</sup>

굴절계로 이루어진 시준장치는 이러한 단점들을 상당부분 제거하지만 직경 200 mm 이상을 정밀하게 제작하기 매우 어렵고 색수차로 인해 사용가능한 파장영역이 줄어든다. 따라서, 대구경이 가능하면서 비축포물면이 가지고 있는 단점을 줄이기 위해서는 Cassegrain 형태의 시준 장치가 제일 적합하다. 빔을 꺾어 사용하므로 초점거리에 비해 전체 크기가 크지 않고 축상 대칭이므로 정렬이 쉽다. 주경과 부경을 열팽창계수가 작은 물질로 연결하면 온도에 의한 성능저하 현상을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한 거울만을 사용하므로 비축포물면이 갖는 넓은 파장영역을 마찬가지로 가질 수 있다.

본 논문에서는 직경 300 mm급 우주용 카메라를 시험하기 위한 Cassegrain 형태의 시준장치의 제작에 관해 다루었다. 이를 위해 시준장치의 설계 및 공차분석에 관하여 논의하고

<sup>†</sup>E-mail: hsy@kriss.re.kr

각 거울의 제작과정 및 평가 방법에 대해서 설명하였다. 마지막으로 정렬 및 조립후의 최종 성능에 관하여 간단히 언급하였다.

## II. 광학계 설계 및 공차 분석

그림 1은 설계된 시준장치의 전개도 및 반시야각 내에서의 파면수차를 보여준다. 시준장치의 광학계는 두장의 비구면 거울로 구성되어 있다. 다양한 실험실 조건에서 만족스러운 성능을 나타내기 위해 거울은 열팽창계수가 매우 낮은 Zerodur로 제작되었으며, 주경과 부경사이에는 Invar로 거리를 유지시켜준다. 주경의 크기는 직경 450 mm이며 부경의 크기는 직경 85 mm이다. 유효초점거리는 7500 mm로 설계되었다. 한 장의 비축포물면으로 이를 구현할 경우 두개의 광학 테이블을 붙이거나, 광선을 여러번 꺾어 사용해야 한다. 하지만 여기서 설계된 Cassegrain 형태로는 주경과 부경사이가 1 m 정도면 충분하여 한 테이블위에 시준장치와 평가대상물을 놓고 사용할 수 있다. 또한 긴 유효초점거리는 시준장치의 수차를 줄이는데 유리하며, 이보다 짧은 유효초점거리를 갖는 평가대상물의 측정시 시준장치의 영향을 보다 적게 준다.<sup>6)</sup> 설계된 시준장치는 end-to-end imaging 평가가 가능하도록 시야각을 약 0.18도로 정하였다. 이러한 시야각과 유효초점거리를 가지면, 일반적으로 많이 사용되는 물체인 USAF를 이용한 상전송이 가능하다. 설계상으로 전체적인 파면수차는 0.015 λ 이하를 유지하였다.

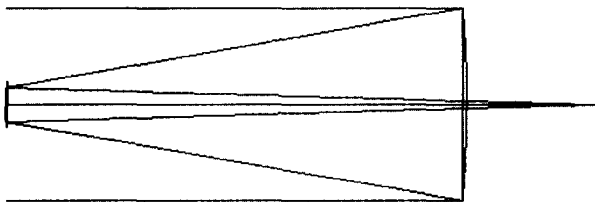
대부분 광학계의 성능평가를 위해 주로 MTF를 측정한다. 따라서, 시준장치의 제작 및 정렬 공차를 정할 때 단순히 시준장치 자체만을 보지 않고 평가대상물의 MTF값에 미치는 영향을 조사하여 결정하였다. 이를 위하여, 평가대상물로는 초점거리 2 m이고 중심부에 150 mm의 장애물이 있는 직경 300 mm의 수차가 없는 이상적인 광학계로 정하였다. ZEMAX 광학설계 프로그램을 사용하여 시준장치의 물체에서 나온 빛이 시준장치 및 평가대상물을 거쳐 다시 영상이 구현되는 시스템을 구성하고, 시준장치의 공차에 따른 평가

표 1. 공간주파수 72 lps/mm에서 시스템 MTF 값의 변화

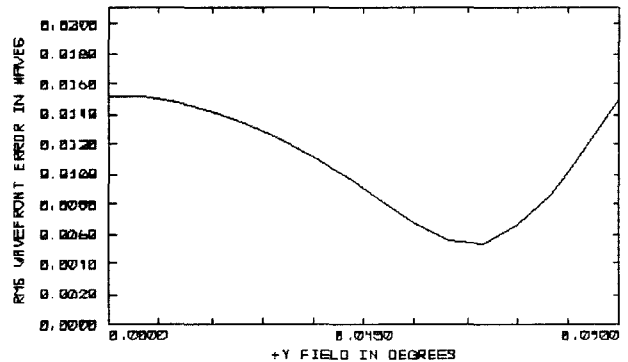
항 목		공 차	ΔMTF (%)
파면수차	주경	λ/30 RMS	0.00
	부경	λ/30 RMS	0.00
자중 및 열변화에 의한 면의 변형	주경	λ/100 RMS	0.00
	부경	λ/100 RMS	0.00
곡률반경	주경	5 mm	0.10
	부경	2 mm	0.03
거리	주경-부경(1)	0.005 mm	0.00
	주경-부경(2)	0.001 mm	0.07
	주경-물체	0.01 mm	0.02
중심이동	부경	0.02 mm	0.04
기울기	부경	0.01 degree	0.05

대상물을 포함한 광학계의 MTF의 변화를 알아보았다.

표1은 시준장치의 제작 및 정렬 공차와 이에 따른 전체 평가대상물의 MTF 변화량을 72 lps/mm에서 조사한 결과이다. 곡률반경, 중심이동 및 기울기는 정렬공차를 나타내는 것으로, ΔMTF는 주경과 부경사이의 거리, 그리고 주경과 물체사이의 거리를 조절하여 보정한 결과를 나타낸다. 표1에서 제시된 시준장치의 제작 및 정렬 공차가 일반적인 수준인 것을 감안하면, 설계된 시준장치가 평가대상물에 미치는 영향은 극히 미미하다는 것을 알 수 있다. 표1의 거리 공차는 환경 특이온도와 관련이 있다. 본 시준장치의 운용온도는 20±5℃이고, 작동 중 청정실의 온도변화 ±1℃ 안에서 시준장치가 평가대상물에 주는 영향은 MTF 값의 변화가 0.1% 미만이어야 한다. 주경-부경(1)은 운용할 때의 주변온도와 처음 조립했을 당시의 온도차에 의한 거리변화에 대한 공차이고, 주경-부경(2)는 시준장치의 사용 중 온도변화에 의한 거리공차이다. 주경-부경(1)의 공차가 주경-부경(2)보다 큰 이유는 시준장치를 사용하기 전에 물체의 위치를 재조정할 수 있는 여유를 두었기 때문이다. 하지만, 측정이 이루어지는 동안은 물체의 위치를 재조정할 수 없으므로, 주경-부경사이의 거리변화는 그



Optical layout



RMS versus Field

그림 1. 시준장치 구성 및 설계 성능.

대로 측정결과에 영향을 미치게 된다. 주경과 부경사이의 거리가 약 1 m 정도이므로, 열팽창계수가 1 ppm/°C 인 Invar를 사용하여 거리를 유지한다고 하여도 ±5°C 범위내에서 5 μm 이상 거리가 변한다. 전산 모사 결과 이러한 변화는 약 0.2% 정도 MTF 측정값의 감소를 가져올 수 있다. 하지만, 사용전에 물체위치를 재조정해준 경우 표에서 보듯이 평가대상물의 MTF 측정에 거의 영향주지 않음을 알 수 있다. 또한, 물체의 위치를 재조정 할 수 없는 경우에도 ±1°C 이내의 온도 변화, 즉 ±1 μm 이내의 거리변화에 대해서는 MTF 측정값에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

한편, 구성품의 정열문제와는 별개로 각 거울의 형상오차가 평가대상물의 MTF 값에 미치는 영향은 정확히 예측하기 어렵다. 거울의 형상오차를 공간주파수별로 크게 figure, ripple, micro-ripple 오차로 분류하는데,<sup>[7]</sup> ripple과 micro-ripple은 Zernike 36 terms으로 표현할 수 없는 공간 주파수이므로, Code V나 ZEMAX등 상용프로그램을 이용하여 분석하기 어렵고 확률적으로 고려해야하는 경향이 많다. 따라서, 본 시준장치의 공차분석에서는 거울의 figure 오차, 즉 Seidel 3차수차만 고려하여 전산모사를 수행하였다. 이러한 경우 figure 오차가 high-precision 영역인 λ/30 이하에서는 MTF 측정에 영향을 주지 않음을 전산모사를 통하여 확인하였다.

### III. 부경의 제작 및 평가

부경의 직경은 약 85 mm이고 가운데 직경 10 mm의 구멍이 뚫려져 있어 시준장치의 물체에서 나온 빛이 반사되어 다시 물체로 되돌아가 ghost image가 생기는 것을 방지해 준다. 가공시 면의 가장자리 부분은 연마공구가 불완전하게 접촉함으로 해서 일반적으로 심하게 마모되는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 극복하고 85 mm 안에서 원하는 면의 정확도를 얻기 위해 부경보다 직경이 약 65 mm 정도 더 크고 가운데 구멍의 직경이 85 mm인 유리를 원재료에 추가로 덧대어 총 직경 150 mm의 유리블록을 연마하였다.

그림 2는 이러한 준비작업을 한 부경의 모습이다. 원재료와

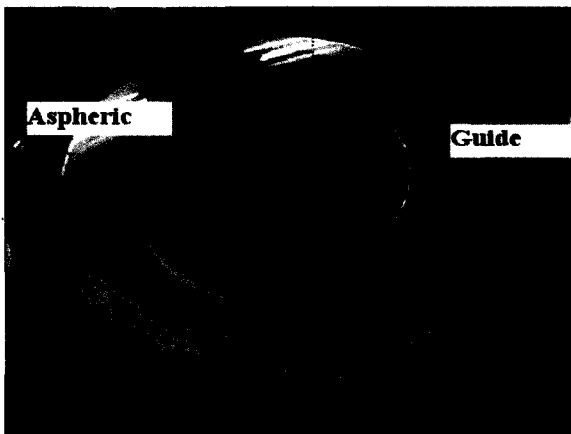


그림 2. 부경과 부경을 둘러싼 보조유리.

추가로 덧댄 유리블록 사이는 접착제 (송진:파라핀=3:7)로 고정시켜 연마 후 열을 가하면 쉽게 떨어질 수 있도록 하였다.

원재료의 준비와 함께 제작 전에 미리 계산되어야 할 것이 바로 면의 비구면 정도 또는 sag data이다. 이것은 면이 중심으로부터의 거리에 따라 기준구면에서 얼마나 벗어나는지 보여주는 표이다. 처음 재료를 grinding 할 때 기준구면에 맞춰 가공한 후 이 표에 따라 연마할 양을 조절하면 우리가 원하는 비구면이 된다.

표 2는 우리가 제작하고자 하는 부경의 거리에 따른 sag data이다. 기준구면의 곡률반경은 부경의 중심에서의 곡률반경 즉, 516.665 mm로 정하였다. h는 기준구면의 sag data이고, z는 부경의 sag data이다. 따라서 h-z은 재료를 초기 기준구면으로 grinding 한 후 그 지점에서 연마하여야 할 양이 된다. R'는 비구면의 위치에 따른 곡률반경을 나타내며, R'-R은 그 지점에서 기준구면과의 곡률반경의 차이를 나타낸다. 이 표에서 실제로 많이 쓰이는 정보는 h 및 h-z이다. 표를 이용하는 방법은 다음과 같다.

1. 먼저 적당한 크기의 구면계(spherometer)를 평면에 대해서 calibration 시킨다.
2. 곡률반경을 알고 있는 기준구면을 사용하여 면의 h를 구하고 이를 통해 그 지점에 해당하는 반경을 구한다.
3. 부경을 측정하여 기준구면과의 차이를 구한 후 위에서 구한 반경에 해당하는 h-z 값과 비교한다.
4. 이 결과 표의 h-z보다 크면 면을 더 연마해야 하고 작으면 면이 너무 연마되었음을 보여준다.

형상오차가 약 2 μm 정도까지는 구면계를 이용한 이러한 측정법이 유효하나, 그 이후에는 좀 더 정밀한 측정법이 필요하다. 이를 위하여 정밀한 볼록비구면 측정을 위하여 많이 사용되는 Hindle test<sup>[8]</sup>를 구현하였다. 이를 위해서는 부경보

표 2. 부경의 위치에 따른 비구면 정도 (sag data)

$$R = 516.665$$

$$K = -1.9493$$

D/2	h	Z	h-Z	R'	R'-R
1	0.00097	0.00097	1.76656E-09	516.666	0.00094
5	0.02419	0.02419	1.10418E-06	516.689	0.02358
10	0.09678	0.09677	1.7667E-05	516.759	0.09431
15	0.21779	0.2177	8.94404E-05	516.877	0.21218
20	0.38724	0.38696	0.000282681	517.042	0.37715
25	0.6052	0.6045	0.000690154	517.254	0.58918
30	0.87171	0.87027	0.001431143	517.513	0.84821
35	1.18685	1.1842	0.002651458	517.819	1.15417
40	1.55072	1.5462	0.004523452	518.172	1.50699
45	1.96341	1.95617	0.007246034	518.572	1.90657
50	2.42505	2.41401	0.011044697	519.018	2.3528
55	2.93577	2.9196	0.016171543	519.511	2.84557
60	3.49571	3.4728	0.022905318	520.05	3.38475

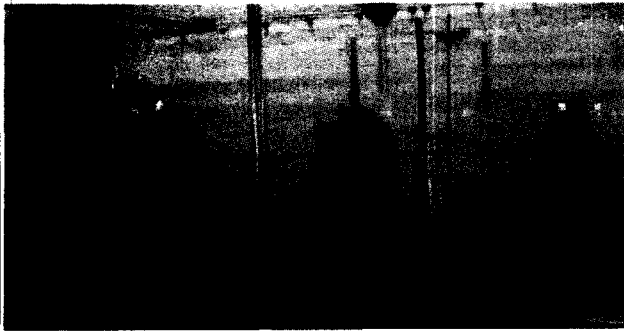


그림 3. 부경의 Hindle test. 중간의 직선은 광경로를 보여준다.

다 정밀하게 제작된 기준경을 제작하였다. 기준경의 직경은 약 360 mm이고 가운데 부분에 빛이 통과할 수 있도록 직경 약 48 mm의 구멍을 뚫었다. 재질은 pyrex이며 중력에 의한 변형을 막기 위해 중심 두께를 약 60 mm 정도로 두껍게 하였다. 면의 곡률반경은 900 mm로 제작하였다. 간섭계에 의한 기준구면의 측정 결과 파면수차는 약  $\lambda/10$  p-v로 부경의 제작을 위한 기준면으로 사용이 가능하다.

그림 3은 Hindle test 방법으로 부경을 측정하는 모습이다. 간섭계에서 나오는 구면파의 중심을 부경의 한 초점에 위치시키면, 부경을 거친 후 부경의 또다른 초점을 중심으로 하는 구면파를 형성하게 되며, 이 초점과 기준구면의 곡률중심을 일치시키면, 기준구면을 거친 빔은 정확히 같은 광경로를 따라 간섭계에 도달한다. 이러한 측정결과에 따라 튀어 나온 부분에 대한 부분 연마를 반복 수행하면, 원하는 형상에 접근하게 된다. 그림 4는 부경의 최종형상에 대한 Hindle test 결과이다. 부경의 최종 파면수차는  $0.255 \lambda$  p-v 또는  $0.038 \lambda$  RMS 로 목표치인  $\lambda/30$  RMS에 거의 근접함을 알 수 있다.

#### IV. 주경의 제작 및 평가

주경의 제작과정은 부경의 제작과정과 비슷하다. sag data

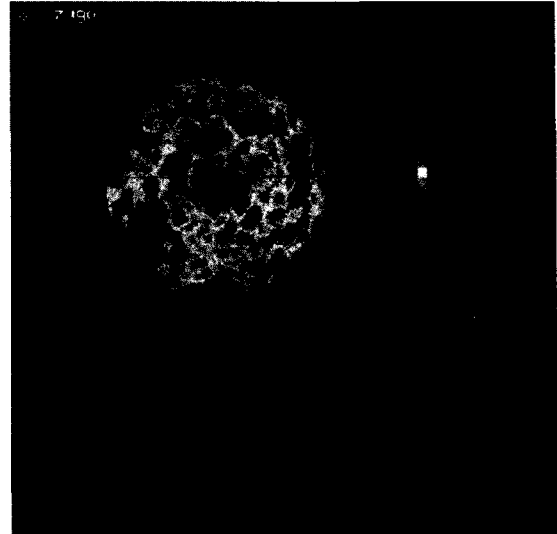
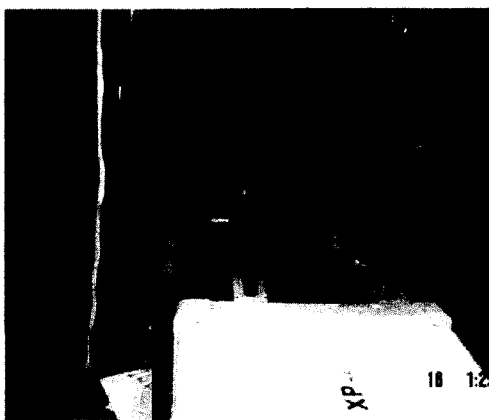


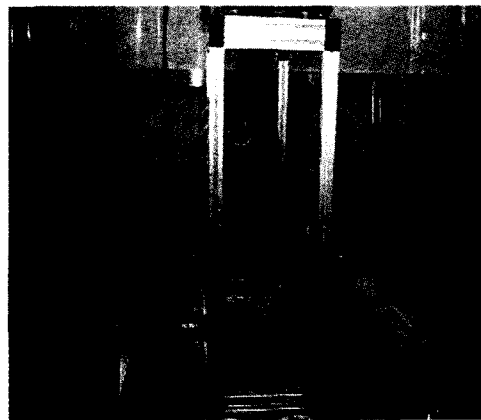
그림 4. 부경면의 최종 파면수차.

및 구면계와 master plate를 이용하여 면의 형상오차를  $2 \mu\text{m}$  이내로 만든 후 간섭계를 이용한 정밀 측정을 통하여 형상오차를 줄여나가는 방법을 취하였다. 하지만, 부경에 비해 가공 면적이 넓고 무게 (45 kg)가 많이 나가 가공 및 측정이 쉽지 않다. 면의 형태가 포물면이므로 여러 가지 방법으로 측정이 가능하다. null lens를 사용하거나, 가운데 구멍이 뚫린 평면 거울을 이용한 자동시준 (autocollimation) 방법을 사용할 수 있고, 또 이미 제작된 부경을 이용한 측정도 가능하다. 본 제작에서는 두장의 null lens<sup>[8-9]</sup>를 이용한 방법을 주로 사용한다. 또한 null lens의 제작 공차 및 정렬 공차에 의한 측정 오차를 파악하기 위하여 null lens test 중간에 자동시준 방법을 이용한 측정을 수행하여 null lens test를 검증하였다.

그림 5는 주경을 평가하기 위해 사용된 두가지 방법에 대한 그림이다. 주경은 5축의 자유도를 갖는 마운트위에 고정되었으며, 두장의 null lens 역시 각각 5축의 자유도를 갖는 마운트에 고정하였다. 두장의 null lens 사이의 거리를 정확



(a)



(b)

그림 5. 주경의 형상오차 측정 방법 (a) Null lens (b) 자동시준.



(a)



(b)

그림 6. 서로 다른 방법을 이용한 주경면의 파면 수차 측정 (a) null lens (b) 자동시준.

히 조절하기 위해 간섭계의  $f\# = 3$  transmission sphere 와 confocal configuration이 되도록 설계하였다. 또한 자동시준 방법을 위해서 직경 1 m에 달하는 기준 평면 ( $\lambda/10$  p-v)을 사용하였다. 간섭계에서 나오는 빛은 기준평면을 먼저 맞고 주경을 맞으면 평행광이 되어 다시 기준평면을 맞고 간섭계로 되돌아오는 원리이다. 그림 6은 두 가지 측정방법으로 측정한 주경의 형상오차이다. 두 결과 모두 안쪽으로부터 계단 모양의 연마자국이 일치되어 보이며 정렬오차에 의해 생겨날 수 있는 형상오차는 보이지 않는다. 두 결과에서 자동시준 방법의 파면수차 p-v 가 null lens 방법보다 두 배 가량 큰 이유는 자동시준 방법이 주경을 두 번 측정하기 때문이다. 따라서, null lens의 제작 및 정렬은 별 문제없이 이루어졌음을 알 수 있다.

그림 7은 주경의 최종 측정 결과이다. 전체면에 대한 파면 수차는  $0.62\lambda$  p-v,  $0.072\lambda$  RMS로서 목표치인  $0.033\lambda$  RMS보다 다소 떨어지는 수치를 보이고 있다. 여러 가지 원인중에 대표적인 것은 부경에 비해 가공 면적이 넓어 가공 시간이

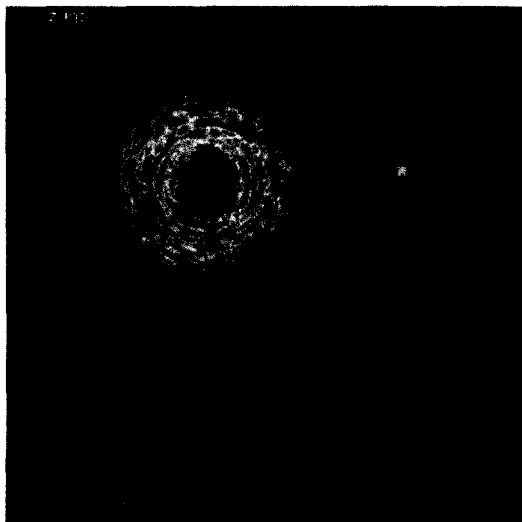


그림 7. 주경면의 최종 파면수차.

많이 필요했고 제한된 시간안에 목표치에 도달하기 어려웠다. 무게가 무거워 연마기로부터 측정기로의 이동이 불편하여 가공시간의 상당부분을 측정에 할애하여야 했다. 또한, 구면연마와 달리 비구면 가공에서는 작은 연마 패드를 써서 부분 수정이 이루어져야 하는데, 이러한 부분적인 연마 자국 때문에 RMS 값이 쉽게 줄어들지 않았다. 결국, 비구면을 원하는 시간안에 원하는 정확도로 가공하기 위해서는 적당한 연마 패드의 선택도 중요하지만, 측정과 가공 사이클이 원활히 이루어질 수 있는 환경조성이 필수적이라는 것을 알 수 있었다. 하지만, 측정 목표로하고 있는 직경 300 mm급 카메라 측정을 위해 사용되는 가운데를 중심으로 한 직경 300 mm 이내에서는 파면수차가  $0.059 \lambda$  RMS 정도로 전체면을 측정할 경우보다 다소 좋았다.

### V. 정렬 및 평가

그림 8은 부경을 주경에 대해 정렬시키는 과정이다. 주경은 kinematic mount를 이용하여 구조물에 부착시키고, 부경은 5축 자유도를 갖는 마운트로 고정시켰다. 간섭계는 주경의 뒷부분에 위치시키고  $f\# 11$  인 transmission sphere를 사

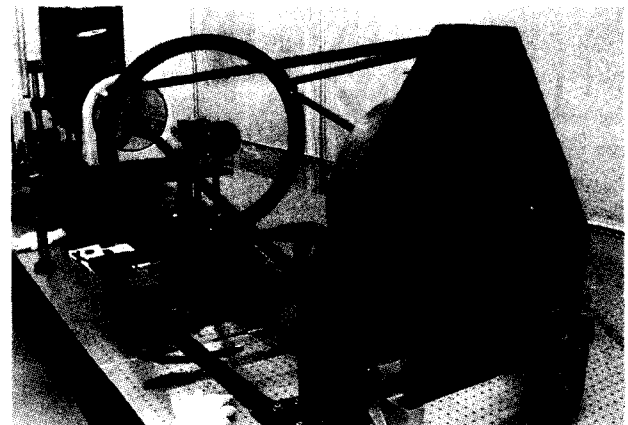


그림 8. 시준장치의 정렬 및 조립 모습.

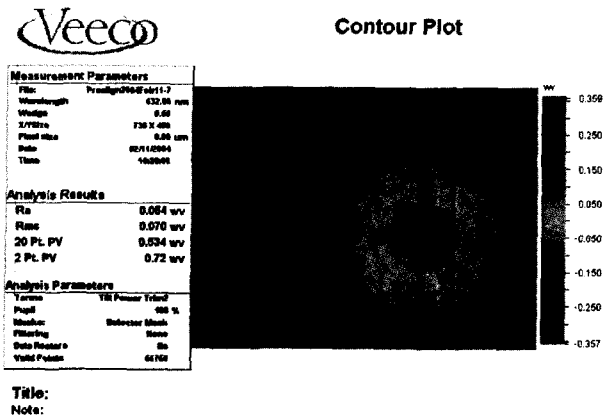


그림 9. 최종적인 파면수차.

용하였다. 전체적인 정렬방법은 자동시준 방법이다. 즉, 간섭계에서 나오는 구면파의 초점을 시준장치의 초평면 근방에 위치시키면, 시준장치를 빠져나오는 빛은 평행광에 가까워진다. 이 빛을 평면거울을 이용하여 되반사 시키면, 간섭계에서 파면수차를 분석할 수 있게 된다.

그림 9는 파면수차가 최소가 되도록 부경의 기울기 및 중심이동을 조절한 후 WYKO 6100 phase shifting interferometer로 측정한 파면수차이다. 자동시준 방법에 사용된 평면거울의 크기가 직경 300 mm이므로 이 영역에서의 파면수차만 얻을 수 있었다. 최종적인 파면수차는 약  $0.07 \lambda$  ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ )이었다. Rayleigh criteria를 따르면 위의 결과는 diffraction limited에 해당한다.<sup>[10]</sup> 따라서, 직경 300 mm 이하의 정밀 광학계를 평가할 수 있는 기준 광학계로 사용이 가능하다.

### 6. 결 론

직경이 450 mm에 이르는 본 시준장치는 국내에서 처음으로 순수 국산기술을 이용하여 설계, 제작 및 평가되었다. 주경, 부경이 모두 비구면으로 최종 가공된 주경의 파면수차는  $0.072\lambda$  RMS이고 부경은  $0.038\lambda$  RMS이다. 부경을 주경에 대해 조립한 후 가운데를 중심으로 직경 300 mm까지의 파면수차를 측정할 결과  $0.07 \lambda$ 로 diffraction limited 성능을 얻

을 수 있었다. 따라서 본 시준장치를 이용하여 우주용카메라의 MTF 등 성능을 정밀하게 측정하는 것이 가능하다. 또한 전산모사 결과, 설계된 시준장치는 제작, 조립 공차 및 온도에 의한 변화에 대해서도 대상물의 MTF값에 영향을 거의 주지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 향후 본 시준장치는 환경의 영향을 덜 받고 +/-5도에 이르는 넓은 온도범위에서 정밀광학계의 다양한 성능 평가에 이용할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- [1] B. C. Willard, "Wide field-of-view Schmidt-sphere imaging collimator," in Earth Observing Systems IV, W. L. Barnes, Ed., *Proc. SPIE* vol. 3750, pp. 286-295, 1999.
- [2] D. R. Hearn et al., "Spatial calibration of the EO-1 Advanced Land Imager," in Earth Observing Systems IV, W. L. Barnes, Ed., *Proc. SPIE* vol. 3750, pp. 97-108, 1999.
- [3] D. B. Leviton et al., "Wide-field imaging interferometry testbed 3: metrology subsystem," in Interferometry in Space, M. ShaO, Ed., *Proc. SPIE* vol. 4852, pp. 827-838, 2003.
- [4] R. H. Barkhouser, R. G. Ohl, "Interferometric alignment and figure testing of large (0.5 m) off-axis parabolic mirrors in a challenging cleanroom environment," in Optical Manufacturing and Testing III, H. P. Stahl, Ed., *Proc. SPIE* vol. 3782, pp. 601-614, 1999.
- [5] J.W.Figoski, "Alignment and test results of the QuickBird Telescope using the Ball Optical System Test Facility," in Advanced Telescope Design, Fabrication, and Control, W. Roybal, Ed., *Proc. SPIE* vol. 3785, pp. 99-108, 1999.
- [6] G. C. Holst, Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems (SPIE press, Bellingham, 1998), pp. 118-119.
- [7] Rajiv Bhatia, Adriana Ciani, "Defining mirror quality: a global approach," in Advanced Technology Optical Telescopes V, L. M. Stepp, Ed., *Proc. SPIE* vol. 2199, pp. 1065-1073, 1994.
- [8] D. Malacara, Optical Shop Testing (Wiley, New York, 1992), Appendix 2.
- [9] 김연수, 김병윤, 이운우, "쌍곡면 측정 null 렌즈 설계," *한국광학회지*, 제 12권 5호, pp. 352-355, 2001.
- [10] W.J.Smith, Modern Optical Engineering (McGraw Hill, New York, 1990), pp. 336-337.

## Development of diameter 450 mm Cassegrain type collimator

Ho-Soon Yang<sup>†</sup>, Jae-Hyub Lee, Yoon-Woo Lee, In-Won Lee

*Optical Nano Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: hsy@kriss.re.kr*

Jong-Un Kim, Eugene D. Kim

*Optics team, Satrec initiative Co. Ltd., Jeonmin-dong, Yusung-gu, 461-26, Daejeon 305-811, Korea*

(Received March 24, 2004, Revised manuscript, June 3, 2004)

The collimator is necessary for the assembly and evaluation of high resolution satellite telescope. Traditionally, the off-axis paraboloid has been used as a collimator. However, it has some disadvantages in that it can suffer from air turbulence when the focal length of a collimator is long, which may result in some error in the measurement. In contrast, since the Cassegrain type collimator folds the beam, it occupies smaller space compared to the off-axis paraboloid for the same focal length. This can reduce the air turbulence, which can improve the measurement accuracy. In this paper, we explain the process of design and manufacturing of a diameter 450 mm Cassegrain type collimator, to evaluate the diameter 300 mm satellite telescope. After assembly of primary and secondary mirrors, the final wavefront error of the collimator was  $0.07\lambda$  ( $\lambda=633$  nm), which is the diffraction limit.

OCIS Codes : 120.1680, 220.4840.