

광시야 망원경 3호기 (NEOPAT-3)의 광학계 특성 및 조정

육인수^{1†}, 경재만¹, 윤요나¹, 윤재혁¹, 임홍서¹, 문홍규¹, 한원웅¹,
변용익², 강용우², 유성렬²
¹한국천문연구원
²연세대학교천문대

OPTICAL PROPERTY AND ALIGNMENT OF KAO WIDE FIELD TELESCOPE (NEOPAT-3)

In-Soo Yuk^{1†}, Jae-Mann Kyeong¹, Joh-Na Yoon¹, Jae-Hyuck Yoon¹,
Hong-Suh Yim¹, Hong-Kyu Moon¹, Wonyong Han¹,
Yong-Ik Byun², Yong-Woo Kang², and Sung-Yeol Yu²

¹Korea Astronomy Observatory, Daejeon, 305-348, Korea
²Yonsei University Observatory, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
E-mail: yukis@kao.re.kr

(Received October 21, 2004; Accepted December 1, 2004)

요 약

광시야 망원경 3호기의 광학계 특성을 조사하고 이를 바탕으로 광학계를 조정하였다. 보정렌즈를 쓰기 때문에 필터는 V, R, I로 제한된다. 광시야 망원경 3호기는 초점비가 작기 때문에 광학계의 정렬 상태에 매우 민감하다. 2도×2도의 시야각 내에서 성상의 RMS 반경을 $8\mu\text{m}$ 이내로 맞추려면 다음의 조건을 만족해야 한다: 1) 관측기기는 초점면에 대하여 0.05도 이상 기울어지면 안된다. 2) 주경과 보정렌즈의 축간 거리(decenter)를 1mm 이내로 맞추어야 한다. 3) 주경과 보정렌즈 사이를 최적 거리에서 2.3mm 이내로 맞추어야 한다. 광시야 망원경 3호기는 곡률감지법을 이용한 수차 측정법으로 광학계를 조정하고 있으며 마무리 단계에 있다. 현재 대덕전파천문대 육상에 임시로 설치되어 시스템 정상화와 인공위성 관측을 수행하고 있다.

ABSTRACT

We have investigated the optical property of the KAO(Korea Astronomy Observatory) wide field telescope (named NEOPAT-3; Near Earth Object and Satellite Patrol-3) and aligned optical system. The NEOPAT-3 is restricted to V,R,I-filters because of the refractive property of the correcting lens system. Because of the fast focal ratio, the optical performance of the NEOPAT-3 is very sensitive to its alignment factors of the optical system. To make the spot radius smaller than $8\mu\text{m}$ in rms over 2degree×2degree field, the optical system must satisfy the following conditions: 1) The tilt error between detector plane and focal plane should be less than 0.05degree. 2) The decenter error between the primary mirror and the correcting lens system should be less than 1mm. 3) The distance error between the primary mirror and the correcting lens system should be less than 2.3mm. In order to align the optical system

[†]corresponding author

accurately, we measured the aberrations of the telescope quantitatively by means of curvature sensing technique. NEOPAT-3 is installed temporary on the roof of the TRAO(Taeduk Radio Astronomy Observatory) main building to normalize system performance and to develop automatic observation.

Keywords: telescopes, aberrations,

1. 서 론

소행성과 혜성 가운데 일부는 본래 궤도를 이탈하여 지구 궤도를 통과하거나 지구 가까이 접근하기도 한다. 이들 천체를 지구접근천체(NEO; Near Earth Object)라 부르며, 지구 최접근 거리 0.05AU 이내, 크기 150미터 이상인 것을 따로 지구위협천체(PHO; Potentially Hazardous Objects)로 분류하고 있다. 전문가들이 추정하는 km급 지구 접근 소행성의 개수는 750개(Rabinowitz et al. 2000)에서 2100개(Morrison et al. 1992)에 이른다. 문제는 NEO의 지구 충돌 가능성을 배제할 수 없기 때문에 체계적이고 지속적인 NEO 탐사 프로그램이 요구된다.

인공위성 광학 추적 감시는 위성체의 정밀 위치를 파악하는 유일한 방법으로서 위성체의 발사에서 폐기에 이르기까지 지속적으로 이루어져야 할 필요가 있다. 2004년 6월 현재 지구 궤도상에는 2980여 개의 우주 잔해물이 선회하고 있다. 이 가운데 84% 이상이 미국과 러시아 소유이며, 상당수가 군사 및 첩보 위성인 것으로 알려졌다. 각국은 국방과 산업첩보를 목적으로 인공 위성을 발사하는 한편, 자국 영공을 통과하는 위성체를 감시하기 위하여 전용 관측 시설을 운영하고 있다.

한국천문연구원은 지구접근천체 감시연구(NEOPAT; Near Earth Object PATrol)에 착수했으며, 2000년 6월 과학기술부는 이 과제를 국가지정연구실 사업으로 선정하였다. 한국천문연구원과 연세대학교는 공동으로 광시야 망원경 1,2,3호기, 인클로저, 컴퓨터 시스템과 자동 기상 측정기, GPS(global positioning system) 수신기, 대기 투명도 감시 카메라 등 관측소 시스템을 구축했으며, 2002년 4월 광시야 망원경 1호기를 남아공관측소에 설치하여 현재 무인원격제어를 통하여 자동으로 운영하고 있다. 두 기관은 2004년 광시야 망원경 2호기를 호주 사이딩스프링 천문대에 이전 설치하여 자동 운영할 예정이다. 한국천문연구원과 연세대학교는 또한 광시야망원경 3호기의 광학계를 공동으로 설계하여 독일 제작사에서 제작하였으며, 양 기관과 한국기계연구원 공동 설계로 한국기계연구원에서 초고속 마운트를 제작, 광학계와 조립하여 현재 한국천문연구원에서 원격으로 관측할 수 있게 되었다. 광시야 망원경 3호기는 2005년 중에 칠레에 이전 설치되어 광시야 망원경 1,2호기와 함께 NEO 및 변광천체 모니터링 연구에 활용될 예정이다.

광시야 망원경 3호기는 직초점 방식의 독특한 망원경으로서 국내에는 처음으로 도입되는 망원경이다. 시야가 넓기 때문에 광학계의 정렬 상태에 따라 광학 성능이 크게 좌우된다. 시야의 중심에서 멀어질수록 성상의 크기가 증가하는 이유는 주로 망원경의 광학계가 이상적인 상태에서 벗어났기 때문이므로 광학계를 조정하여 망원경의 성능을 최상의 상태로 유지하는 것이 매우 중요하다. 우리는 이를 위하여 망원경의 광학적 특성을 조사한 후, 이를 근거로 광학계의 광축을 조정하였다. 망원경의 광학계는 먼저 눈으로 비초점 영상을 보고 광학계의 상태를 판단하여 조정한다음, 곡률감지

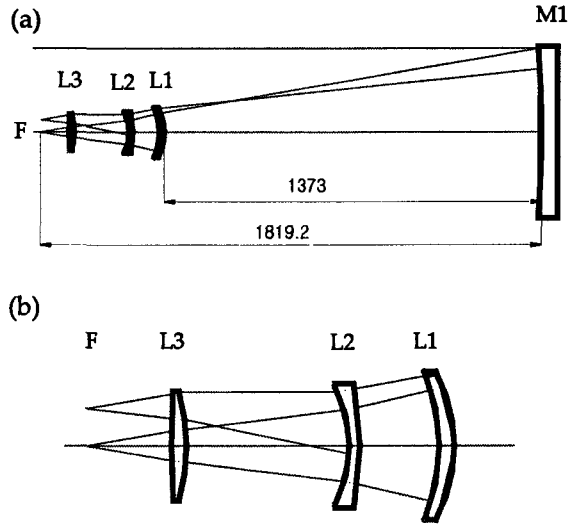


그림 1. 광시야 망원경 3호기의 광학계. (a)광학계 전체 모습. M1은 주경이며, L1, L2, L3는 보정렌즈이다. F는 초점면을 의미한다. (b) 보정 렌즈의 모습.

표 1. 광시야 망원경 3호기의 특성.

주경의 지름	60cm
초점비	f/2.92
유효초점거리	1754mm
초점방식	직초점 방식(prime focus)
후초점 거리	102.468mm
광손실	초점면 지름 84mm에서 20% 손실
성능	초점면 지름 84mm에서 80%의 빛이 0.02mm안에 모임
건판척도	$1\mu\text{m} = 0.1155''$

법(Roddier 1988)을 이용한 수차 측정법을 이용하여 정량적으로 수차를 측정하여 정밀한 광학계 조정을 실시하였다.

2. 광학계 특성

광시야 망원경 3호기의 광학계는 독일 Astrooptik사에서 제작하였으며, 구조는 그림 1과 같다. 광시야 망원경 3호기는 표 1에 제시된 바와 같이 주경의 지름이 60cm이고 초점비가 f/2.92인 직초점(prime focus) 방식의 망원경이다. 3개의 렌즈로 구성된 보정 렌즈를 초점면 앞에 장착하여 상의 왜곡을 방지하였다. 그러나 보정렌즈로 인해 발생한 색수차 때문에 V, R, I-필터만이 사용 가능하다.

직초점 방식의 망원경이기 때문에 관측기기는 주경의 앞 단에 장착된다. 관측기기가 보정렌즈보다 큰 경우 주경으로 입사하는 빛을 보정렌즈가 가리는 것보다 관측기기가 가리는 것이 크게 되어 광손실이 추가로 발생하게 되므로 필터 박스나 관측기기를 설계할 때에 보정렌즈 보다 크지 않도록 유

표 2. 광시야 망원경 3호기의 광학계 사양.

주경 M1	곡률반경 R	-3600mm
	원뿔상수 k	-1
	지름 D	600.4mm
	두께 t	70mm
	재질	LK5(Pyrex)
보정렌즈 L1	곡률반경 R1	-184.5mm
	곡률반경 R2	-225.4mm
	지름 D	180mm
	두께 t	18.03mm
	재질	F2
보정렌즈 L2	곡률반경 R1	-361.1mm
	곡률반경 R2	-147.23mm
	지름 D	154mm
	두께 t	12.73mm
	재질	F2
보정렌즈 L3	곡률반경 R1	-232.8mm
	곡률반경 R2	1148.2mm
	지름 D	130mm
	두께 t	18.13mm
	재질	BK7
거리	M1-초점면	1819.2mm
	M1-L1	1373mm
	L1-L2	95.792mm
	L2-L3	199.038mm
	L3-초점면	102.468mm

의해야 한다. 또한 관측기기의 무게가 무거울 경우 하중으로 인해 경통이 변형되어 광축이 흐트러질 수 있기 때문에 주의하여야 한다. 보정렌즈와 초점면 사이의 거리가 102.468mm로 협소하기 때문에 필터 박스 설계가 까다롭다.

광시야 망원경 3호기의 광학계의 자세한 규격은 표 2와 같다. ZEMAX로 광학계의 특성을 조사한 결과, 광시야 망원경 3호기의 전반적인 성능은 보정 렌즈의 곡률반경과 위치에 민감하며 그 중 보정 렌즈 L3의 곡률반경의 영향이 가장 크다. 주경 M1의 곡률반경은 보정렌즈에 비하면 상대적으로 영향이 작은 편이다. 표 3에 광축이 정확히 일치하였다고 가정한 경우 광시야 망원경 3호기의 광학 성능에 영향을 미치는 광학 부품의 요소를 순서대로 나열하였다.

이상으로 볼 때 보정 렌즈를 가장 정밀하게 가공하여야 하고, 다음으로 주경의 가공이 잘 되어야 한다. 보정렌즈가 망원경의 광학계에 미치는 영향이 크기 때문에 렌즈의 광학계가 변형되지 않도록 취급에 주의를 기울여야 한다.

3. 관측기기 장착 시 유의사항

광시야 망원경 3호기에 관측기기를 장착하는 경우, 검출기 면이 초점면과 일치하도록 각별히 유

표 3. 광시야 망원경 3호기의 sensitivity table. 광학계의 성능을 저하시키는 정도가 큰 항목부터 나열하였음. Root-sum-square method과 몬테카를로 모의 실험에 의하면 rms spot radius가 기준값 3.021 μm 에서 3.282 μm 으로 성능이 변화함.

Type	Value [mm]	Criteria [μm]	Change [μm]
보정렌즈 L3의 곡률반경 R1	2.185449	3.204	0.182
보정렌즈 L3의 곡률반경 R2	-5.000000	3.125	0.104
보정렌즈 L1의 곡률반경 R1	0.016949	3.124	0.103
보정렌즈 L2의 곡률반경 R2	-0.021456	3.112	0.091
보정렌즈 L2의 두께 t	-0.035996	3.107	0.086
보정렌즈 L1과 L2사이의 거리	-0.038185	3.105	0.084
보정렌즈 L3의 두께 t	0.343420	3.092	0.071
보정렌즈 L2의 곡률반경 R1	0.153935	3.087	0.066
보정렌즈 L1의 두께 t	-0.031605	3.084	0.063
보정렌즈 L1의 곡률반경 R2	-0.030026	3.082	0.061
주경 M1의 곡률반경 R	-0.561283	3.063	0.042

의하여야 한다. 그림 2와 같이 광시야 망원경 3호기에서 CCD가 초점면에 대해서 좌측 상단에서 우측 하단의 대각선 방향으로 0.3도 기울어져 장착된 경우 성상은 CCD의 대각선 방향으로 상의 중앙이 뚫린 환(donut)을 이루고, 시야각 1도에서 상의 RMS 반경이 40 μm 으로 매우 크다. 이는 광시야 망원경의 초점비가 작아서 CCD가 놓인 위치가 초점면에서 조금만 벗어나도 CCD에 맺히는 상의 크기가 크게 변하기 때문이다. 광시야 망원경 3호기에 장착될 CCD의 시야각이 2도 \times 2도이므로 CCD의 네 귀퉁이에서 성상의 RMS 반경을 8 μm 보다 작도록 하려면 CCD를 초점면에 대해서 0.05도 이상 기울여 장착해서는 안 된다.

4. 비점수차(Astigmatism)와 비축수차(Coma)

보정 렌즈의 광학계 정렬이 이루어졌다고 가정할 경우, 광학계 정렬 상태를 몇 가지 형태로 구분할 수 있다.

- tilt : 주경의 중심축과 보정 렌즈의 중심축의 방향이 서로 다른 경우.
- decenter : 주경과 보정렌즈의 중심축의 방향은 일치하나 주경의 중심점이 보정렌즈의 중심축을 벗어난 경우.
- despace : 주경과 보정렌즈 사이의 거리가 최적거리가 아닌 경우.

일반적으로 위의 세 가지 경우가 동시에 발생한다. tilt와 decenter에 의해 발생하는 수차는 비점수차(astigmatism)와 비축수차(coma)이다(Suiter 1995). 비축수차는 tilt가 클수록 증가하며, 그 모양이 혜성과 같기 때문에 영상을 보면 경면이 기울어진 방향을 쉽게 알 수 있다(Welford 1989). 비점수차는 가로 방향과 세로 방향의 곡률이 서로 다른 경우 발생한다. 비점수차의 전형적인 형태는 초점면 안쪽과 바깥쪽에서 상의 방향이 직각으로 교차한다.

초점비가 큰 망원경의 경우 decenter와 tilt에 의해 발생하는 비점수차는 비축수차에 비해서 매우 작다. 또한 decenter와 tilt는 서로 상호 보완하여 비축수차를 상쇄시킬 수 있기 때문에 광축 조정

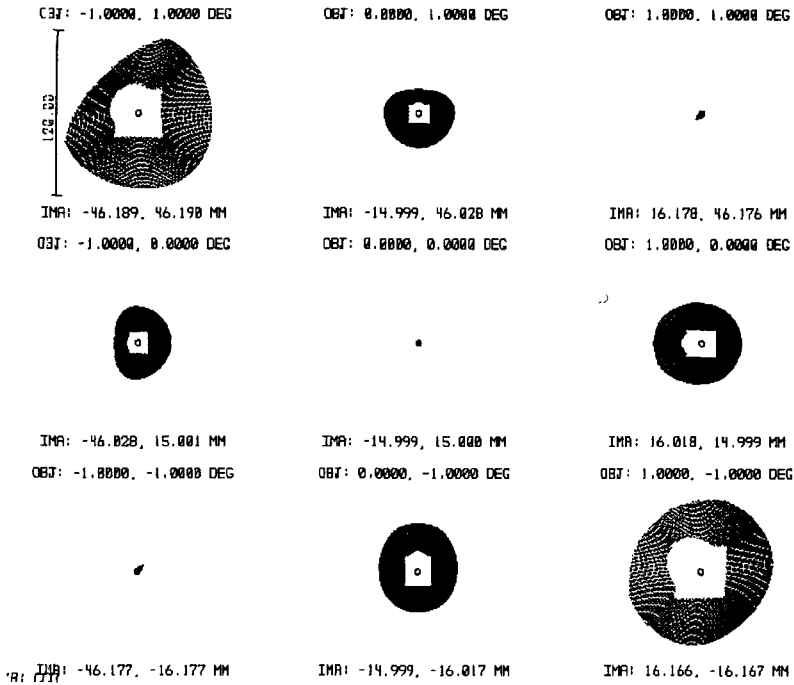


그림 2. 관측기기를 광시야 망원경 3호기의 초점면에 대하여 좌측상단에서 우측하단의 대각선 방향으로 0.3도 기울여 장착한 경우에 2도×2도 시야각에서 성상의 spot diagram. 중심에서 성상의 rms 반경이 0.7 μ m인데 비해 초점면에서 많이 벗어난 왼쪽 상단과 오른쪽 하단에서는 40 μ m로 매우크다.

은 decenter 또는 tilt 중 한가지를 택하여 행해진다. 하지만 초점비가 작은 광시야 망원경은 tilt로 광축을 정렬 시키는 것으로는 충분하지 않다. 광시야 망원경의 경우에는 decenter의 값도 정밀하게 맞추어야 한다. 왜냐하면 decenter와 tilt에 의한 비점수차의 증가율이 서로 달라서 비록 decenter를 조정하여 tilt에 의해 발생한 비점수차를 상쇄시키더라도 비점수차는 상쇄되지 않고, 또한 decenter와 tilt에 의해 발생한 비점수차가 무시할 수 없을 정도로 증가하기 때문이다. 이런 이유로 광시야 망원경의 경우 CCD 중심에서는 비점수차가 없더라도 CCD 외곽에서 비점수차가 크게 나타날 수 있기 때문에 수차를 측정하여 decenter를 정밀하게 조정해야 한다.

표 4와 그림 3은 시야각이 2도×2도인 4K-CCD를 사용한 경우 광시야 망원경 3호기에서 발생하는 수차의 크기를 계산한 결과이다. 광학계에 tilt와 decenter가 없는 경우 성상의 RMS 반경은 전체 영역에 걸쳐서 3 μ m 이내이고 비축수차와 비점수차의 크기가 매우 적다. 그러나 주경의 decenter가 10mm정도이고, 이를 보정하기 위하여 주경을 -1.35도 기울인 경우, 비축수차는 서로 상쇄되어 사라졌지만 비점수차는 제거되지 못하고 남아서 성상의 RMS 반경이 CCD 중심에서는 14 μ m이지만 CCD 주변에서는 64 μ m으로 매우 커짐을 알 수 있다. 이 경우 성상의 지름이 일반적인 대기의 시상인 2arcsecs 정도 보다 훨씬 큰 15arcsecs 이상이 되어 영상의 질이 크게 저하된다. 그림 3에 보이는 것처럼 CCD 중심을 기준으로 비점수차가 점점 커지고 이에 따라 성상의 크기도 커짐을 알 수 있다. 이런 현상은 광시야 망원경으로 관측한 영상을 보면, CCD 주변에서 성상이 빙글빙글 회전하는 것처럼

표 4. 시야각 2도×2도 범위에서 광시야 망원경 3호기가 decenter와 tilt에 의해 발생하는 수차의 범위.

(decenter-y,tilt-x) ([mm],[deg])	(0.0,0.0)	(1.0,-0.12)	(5.0,-0.67)	(10.0,-1.35)
RMS radius [μm]	0.5~3.2	1.1~6.9	4.3~31.4	14.3~64.1
Astigmatism 0deg	-0.3~0.3	-1.2~0.9	-4.9~4.5	-9.5~9.1
Astigmatism 45deg	-0.3~0.3	-1.1~1.1	-4.8~4.8	-9.4~9.4
Coma X	-0.1~0.1	-0.1~0.1	-0.1~0.1	-0.1~0.1
Coma y	-0.1~0.1	-0.1~0.1	-0.1~0.1	-0.1~0.2

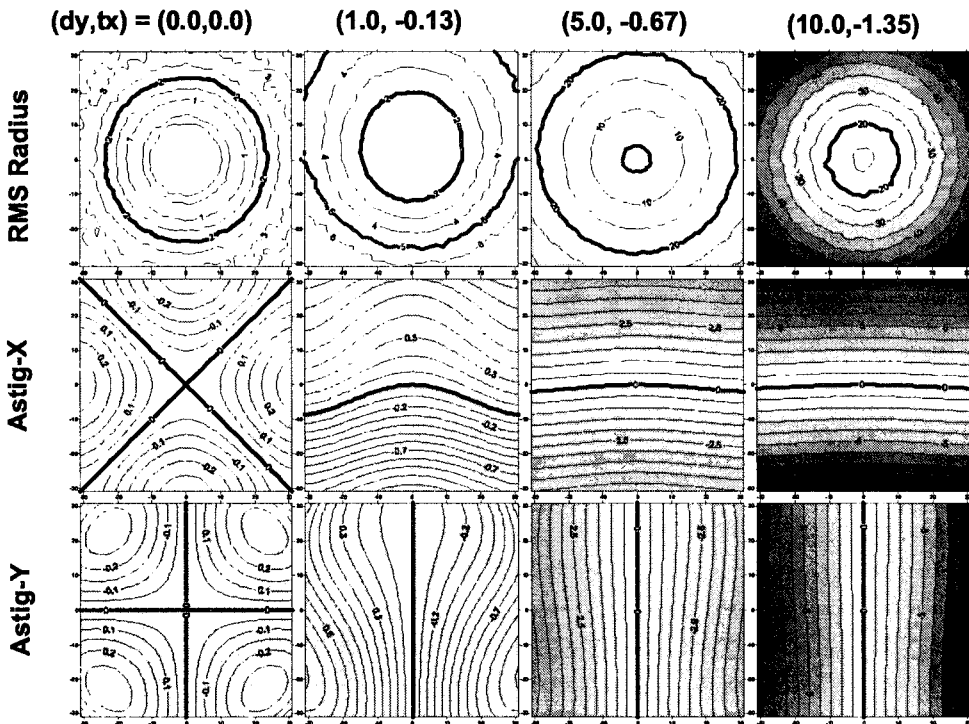


그림 3. 시야각 2도×2도 범위에서 decenter-y와 tilt-x값에 따른 성상의 RMS 반경과 비점수차의 분포. 그림에서 dy는 decenter-y 값이고 tx는 tilt-x 값이다. 선택한 값들은 decenter-y와 tilt-x가 비점수차를 상쇄시키는 조합이다. 그림에서 decenter와 tilt가 작은 경우 비점수차가 작기 때문에 전체 시야에 걸쳐서 성상의 크기가 작게 나타나지만, decenter와 tilt가 큰 경우 비점수차는 없지만 비점수차가 중심에서 멀어질수록 증가하여 성상의 크기도 증가한다.

럼 보인다. 광시야 망원경 3호기의 경우 CCD 주변에서 광학계에 의한 성상의 RMS 반경을 $8\mu\text{m}$ 이 내로 하려면 decenter의 크기를 1mm 이내로 맞추어야 한다.

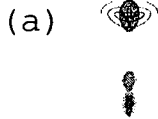
5. 구면수차

구면수차는 경면의 형태뿐만 아니라 주경과 보정렌즈 사이의 거리가 적정 위치보다 크거나 작은

표 5. 광시야 망원경 3호기에서 despace에 의해 발생하는 구면수차.

despace [mm]	RMS radius [μ m]	BFL [mm]	defocus [mm]	Spherical Aberration	Astigmatism 45degree
-10.0	29.9	112.0	9.5	0.242	1.830
-5.0	16.3	107.3	4.8	0.109	0.914
-2.3	7.9	104.7	2.2	0.039	0.410
0.0	2.5	102.5	0.0	-0.020	-0.026
2.3	8.6	100.2	-2.2	-0.078	-0.468
5.0	19.7	97.6	-4.9	-0.145	-0.991
10.0	37.2	92.6	-9.8	-0.267	-1.992

OBJ: 0.0000, 1.0000 DEG

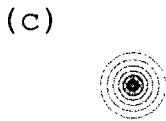


OBJ: 1.0000, 1.0000 DEG



IMA: 0.000, 31.022 MM

OBJ: 0.0000, 0.0000 DEG



IMA: 0.000, 0.000 MM

IMA: 31.177, 31.177 MM

OBJ: 1.0000, 0.0000 DEG



IMA: 31.022, 0.000 MM

그림 4. 시야각 2도×2도 범위에서 U, B, V, R, I 파장대의 spot diagram. (c)는 중심영역이고 (b)는 가장자리이다. 각 영역마다 가장 바깥쪽의 성상이 U 필터에 의한 것이며, 다음으로 멀리 떨어진 것이 B 필터에 의한 것이다. V, R, I 필터에 의한 성상은 서로 겹쳐서 구분되지 않는다.

경우에도 발생한다. 표 5는 주경과 보정렌즈 사이의 거리를 변화시킴에 따라 발생하는 구면수차의 크기를 보여준다. 주경과 부경의 거리를 적정위치에서 10mm 줄이면 성상의 RMS 반경은 33.8 μ m으로 커진다. RMS 반경이 증가하는 원인은 구면수차와 비점수차가 발생하기 때문이다. 더불어 후초점 거리가 9.5mm 정도 늘어난다.

광시야 망원경 3호기의 경우 후초점 길이가 102.458mm에 불과하다. 따라서 필터를 장착하는 경우 필터 박스의 두께를 CCD가 최적 초점 위치를 벗어나지 않도록 설계하여야 한다. 후초점 길이를

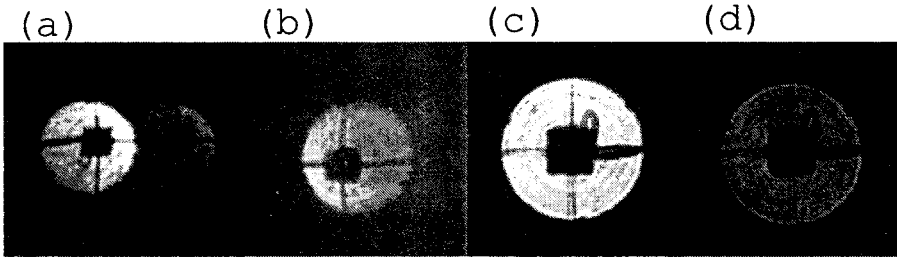


그림 5. 비축수차의 방향으로 광시야 망원경 3호기의 광축을 조정하는 과정. (a) 광시야 망원경 3호기의 광학계를 설치한 직후에 얻은 비초점 영상. (b) 1차 조정 후 얻은 비초점 영상. (c) 광학계 조정을 수차례 반복한 후에 얻은 비초점 영상. (d) 더이상 비축수차의 방향으로 광학계를 조정할 수 없는 상태의 비초점 영상.

늘이기 위하여 초점비가 큰 망원경에서처럼 주경과 보정렌즈의 거리를 변경하면 후초점 길이는 소폭 늘어나는 것에 비해 구면수차가 무시할 수 없을 정도로 커지게 되므로 이러한 시도를 해서는 안 된다.

광시야 망원경 3호기의 경우 성상의 RMS 반경을 $8\mu\text{m}$ 이내로 맞추고자 하면 despace를 2.3mm 이내로 정밀하게 맞추어야 한다. 광시야 망원경 3호기의 경우 despace는 주경의 지지점을 전체적으로 올리거나 낮추어서 맞춘다.

6. 색수차

광시야 망원경 3호기는 보정 렌즈를 사용하기 때문에 색수차가 존재한다. 렌즈는 파장에 따라 굴절률이 다르기 때문에 파장에 따라 초점의 위치가 다르고, 초점면에서 상이 맺히는 위치도 변한다. 렌즈를 사용함으로써 인해 발생하는 색수차를 제거하기 위하여 서로 다른 재질의 렌즈를 다중으로 사용하는데 광시야 망원경 3호기의 경우도 3개의 보정렌즈를 사용하여 색수차를 줄이고 있다.

그림 4는 광시야 망원경 3호기의 U, B, V, R, I 파장에서 spot diagram을 보여주고 있다. 그림과 같이 U 필터와 B 필터를 가용한 경우 성상의 위치가 V, R, I 필터를 사용한 것과 많이 다르고, 성상의 크기도 크기 때문에 U와 B 필터를 V, R, I 필터와 같이 사용하기는 불가능하다. 이런 이유로 광시야 망원경 3호기는 처음부터 V, R, I 필터에 최적화하여 광학계를 설계하였다.

7. 광학계 조정

광시야 망원경 3호기의 광학계 조정은 두 가지 단계로 실시되었다. 먼저 그림 5와 같이 비초점 영상의 모습을 보고 눈으로 비축수차를 구분할 수 없을 때까지 광학계를 정렬 시킨 후, 이후부터는 그림 6과 같이 곡률감지법을 사용한 수차 측정법을 사용하여 정밀 조정을 수행하였다.

그림 5의 영상 (a)는 광시야 망원경 3호기의 광학계를 설치한 직후에 얻은 비초점 영상으로서 비축수차가 큰 전형적인 모습을 보인다. 영상에 나타난 광량의 분포가 가로 방향으로 치우친 것으로 보아 광시야 망원경 3호기의 주경이 보정렌즈에 대해서 가로 방향으로 기울어져 있거나 또는 주경의 중심이 가로 방향으로 어긋났음을 알 수 있다. 이를 보정하기 위하여 주경을 가로 방향으로 기울인 결과 (b)와 같은 영상을 얻었다. 영상 (b)의 광량의 분포가 영상 (a)와 반대인 까닭은 주경을 과도하

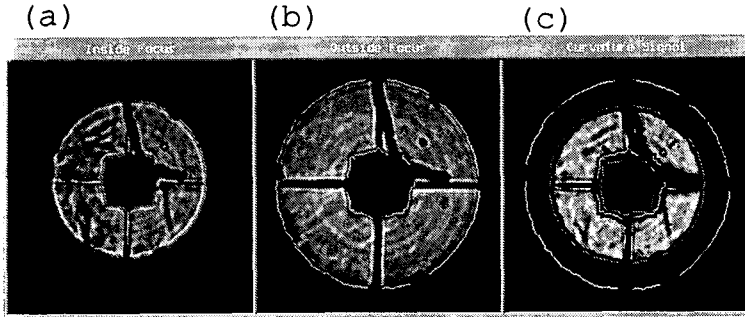


그림 6. 곡률감지법의 입력으로 사용한 광시야 망원경 3호기의 시야 중심에서 얻은 비초점 영상. (a)는 초점면 안쪽에서 얻은 영상이고 (b)는 초점면 바깥쪽에서 얻은 영상이다. (c)는 파면을 계산하기 위하여 (a)와 (b)로부터 구한 감지신호이다. 비초점 영상 (a)와 (b)에서 스파이더 주위의 케이블에 의한 그림자의 방향이 같은 이유는 초점면 바깥쪽에서 얻은 영상 (b)를 180도 회전 시켰기 때문이다.

계 기울인 탓이므로 이전을 값을 감안하여 주경을 다시 반대 방향으로 기울여 준다. 이러한 작업을 수차례 반복하면 영상 (c)와 같이 비초점 영상이 동심원을 그리는 형태로 수렴한다. 비초점 영상에서 더이상 눈으로 광량 분포의 방향을 구분할 수 없는 상태인 영상 (d)를 얻으면 작업을 중지하고 곡률 감지법을 이용하여 수차를 정량적으로 측정하여 광학계를 조정한다.

그림 6은 곡률감지법으로 수차를 측정하기 위하여 초점면의 안쪽과 바깥쪽으로 6.27mm에서 떨어진 곳에서 얻은 시야 중심 부근의 비초점 영상이다. (a)는 초점면 안쪽에서 얻은 영상이고 (b)는 초점면 바깥쪽에서 얻은 영상이다. 영상 (c)는 곡률감지법에서 요구하는 감지신호 S 로 정의되는 양으로서 초점면 안쪽의 영상을 I_{in} 이라하고 바깥쪽에서 얻은 영상을 I_{out} 이라 할 때 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$S = \frac{I_{in} - I_{out}}{I_{in} + I_{out}} \quad (1)$$

안쪽과 바깥쪽의 영상의 크기가 서로 다른 가장 큰 이유는 최적 초점에서 동일한 거리만큼 떨어진 곳에서 얻은 영상이 아니기 때문이다. 표 6은 곡률감지법으로 측정된 수차이다. Defocus는 비초점 영상이 초점면을 기준으로 얻어지지 않아서 발생한 것으로 망원경의 광학계 정렬과는 무관한 값이다. Defocus 수차로부터 계산한 최적 초점 위치는 비초점 영상을 얻은 위치의 중심보다 주경쪽으로 0.65mm 가까운 것으로 나타났다. 비축수차에 의한 Strehl ratio값이 0.53정도로 수차가 전반적으로 크지 않기 때문에 광학계 정렬 상태가 그리 나쁘지 않은 것으로 보이나 아직 만족한 만한 수준은 아니다. 뿐만아니라 망원경의 수차가 계산된 부분이 시야의 중심 영역에 해당하므로 반드시 시야의 외곽에서 얻은 비초점 영상으로 수차를 계산하여 망원경의 광학계를 확인하여야 한다. 현재 목표는 전체 시야에 걸쳐서 Strehl ratio값이 0.7이상이 되도록 망원경의 수차를 조정할 계획이다. 아직까지 광학계 조정 작업이 완료되지 않았으나 전반적인 성능은 나쁘지 않다고 판단되며 망원경 전체 시야에 걸쳐서 수차를 측정하여 decenter를 제거할 계획이다.

8. 요약

광시야 망원경 3호기는 지구접근천체를 감시하기 위하여 개발된 구경 60cm, 초점비 f/2.92인 직

표 6. 곡률감지법으로 측정된 수차.

k (aberration)	amplitude [nm]
4 (defocus)	4,587
5 (x-astigmatism)	278
6 (y-astigmatism)	-315
7 (x-coma)	-132
8 (y-coma)	-122
9 (x-tr. coma)	243
10 (y-tr. coma)	-161
11 (spherical)	231
12 (x-sph. astig.)	-33
13 (y-sph. astig.)	20
14 (x-quad. astig.)	223
15 (y-quad. astig.)	-16

초점 방식의 망원경이다. 광시야 망원경 3호기처럼 초점비가 작은 망원경은 광학 성능이 광축의 정렬 상태에 매우 민감하기 때문에 광학계를 최대한 정밀하게 맞추어야 한다. 우리는 광학계 정렬 상태에 따라 광시야 망원경 3호기가 발생할 수 있는 수차를 면밀히 조사하여 광학계 조정 기준을 마련하였다. 광시야 망원경 3호기가 장착할 검출기의 시야각인 2도×2도 내에서 성상의 RMS 반경을 8 μ m 이내로 맞추려면 다음의 조건을 만족해야 한다.

1. 초점비가 작기 때문에 CCD가 초점면에서 약간만 벗어나도 비초점 현상이 발생하므로 관측기는 초점면에 대하여 0.05도 이상 기울어지면 안 된다.
2. CCD의 중심에서 decenter와 tilt는 상호간에 비축수차와 비점수차를 상쇄시킬 수 있지만, 시야각이 큰 곳에서는 비축수차는 제거되는 반면 비점수차는 남는다. 이런 이유로 주경과 보정렌즈의 decenter의 크기를 1.0mm 이내로 맞추어야 한다.
3. 주경과 보정렌즈를 설계가 제시한 최적 거리에 두지 않으면 구면수차가 발생한다. 주경과 보정렌즈 사이를 최적 거리에서 2.3mm 이내로 맞추어야 한다.

곡률감지법을 이용한 수차측정법을 사용하여 망원경의 광학계를 조정하고 있으며, 현재 마무리 단계에 있다. 현재 대덕전파천문대 옥상에 임시로 설치되어 시스템 정상화와 인공위성 관측을 수행하고 있다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업의 지원으로 수행된 것입니다. 연구 지원에 대해 감사드립니다.

참고문헌

Morrison, D., Binzel, R., Bowell, E., Chapman, C., Friedman, L., Gehrels, T., Helin, E., Marsden, B., Maury, A., Morgan, T., Muinonen, K., Ostro, S., Pike, J., Rahe, J., Rajamohan, R., Rather, J., Russell, K., Shoemaker, E., Sokolsky, A., Steel, D., Tholen, D., Veverka, J.,

- Vilas, P., & Yeomans, D. 1992, *The Spaceguard Survey: Report of the NASA International Near-Earth Object Detection Workshop* (Pasadena: Jet Propulsion Laboratory), p.24
- Rabinowitz, D. L., Helin, E. F., Lawrence, K., & Pravo, S. 2000, *Nature*, 43, 165
- Roddier, F. 1988, *Applied Optics*, 27, 1223
- Suiter, H. R. 1995, *Star Testing Astronomical Telescopes* (Virginia: Willmann-Bell, Inc.), p.253
- Welford, W. J. 1989, *Aberrations of Optical Systems* (Philadelphia: Adam Hilger), p.120