

곡률감지방법을 이용한 망원경의 수차 측정
MEASUREMENT OF TELESCOPE ABERRATIONS
USING CURVATURE SENSING TECHNIQUE

육인수, 선광일
한국천문연구원

IN-SOO YUK AND KWANG-IL SEON

Korea Astronomy Observatory, Daejeon, 305-348, Korea

E-mail: yukis@kao.re.kr

(Receive December 2, 2004; Accepted December 28, 2004)

ABSTRACT

We have developed a tool for measuring optical aberrations of telescope. We adopt curvature sensing technique and use the least square method for finding the amplitudes of the Zernike polynomials. This tool runs under the PC Linux system and the PC windows system with Linux emulators such as Cygwin. The program for UNIX system is used for optical alignment of 1.8M optical telescope at the Bohyunsan Optical Astronomical Observatory (BOAO) and the PC based program is used for the Korea Astronomy Observatory (KAO) wide field telescope (named NEOPAT-3). Our tool is found to be efficient for precise measurement of the optical aberrations of telescopes.

Key words : telescopes, optical testing, wave fronts

1. 서론

망원경의 광학적 성능은 망원경을 구성하는 광학 부품의 가공 정밀도와 조립 정밀도에 의해 결정된다. 광학 부품의 정밀도는 일단 가공이 끝나면 개선하기 매우 어렵지만, 광학 부품의 배치는 필요할 때마다 광학계를 재조정함으로써 최상의 상태를 유지할 수 있다. 망원경의 경면을 새로 코팅하고 광학계를 조정하는 작업을 정기적으로 수행하고, 최근에는 다수의 소형 망원경을 설치하여 특화된 임무를 수행하거나 광학계 정렬 상태에 민감한 광시야 망원경을 사용하고 있는 추세이므로 광학계 성능 측정은 점점 더 중요해지고 있다.

망원경의 광학계의 전체적인 성능은 최종적으로 얻어진 영상의 질로 판단할 수 있다. 따라서 망원경의 광학계를 조정하는 작업은 망원경으로 천체를 직접 관측하면서 진행해야 한다. 이 때 조정 시간의 제약과 기상 조건 등 여러 가지 어려움이 따르기 때문에 간편하고 신속하게 망원경의 성능을 정량적으로 측정하는 장비의 도움이 절실히 필요하다.

대기는 국부적인 온도 변화로 인하여 시시각각 공기 덩어리들이 단열적으로 팽창과 수축을 거듭하여 위치마다 굴절률이 달라져 천체로부터 오는 빛의 파면이 왜곡되어 영상이 일그러진다. 적응광학은 이러한 파면의 왜곡

을 감지하여 보정하는 기술로서 대표적으로 하트만 방법 (Shack Hartmann Method) (Ghozeil and Simmons 1974)과 곡률감지방법 (Curvature Sensing Technique) (Roddier 1988)이 있다. 곡률감지방법은 파면의 기울기를 측정하는 하트만 방식에 비해서 자료 분석이 복잡하지만 파면 측정 장치는 무척 간단하여 CCD 카메라 외에 추가로 요구되는 장비가 없다.

우리는 곡률감지방법을 응용하여 파면을 측정하고 이로부터 망원경 광학계의 수차를 측정하는 방법을 개발하여 보현산천문대 1.8미터 광학 망원경과 지구접근천체 감시 목적인 한국천문연구원 광시야 망원경 3호기 (NEOPAT-3)의 광학계 조정에 사용하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 곡률감지방법에 기반한 수차 측정 원리에 대하여 기술하였고, 3장에서는 수차 측정 프로그램의 개발에 대하여 다루었다. 4장에서는 수차 측정 프로그램을 이용하여 보현산천문대 1.8미터 광학 망원경과 한국천문연구원 광시야 망원경 3호기의 수차 측정 과정과 결과에 대하여 설명하였다. 마지막으로 5장은 연구 결과에 대한 요약과 결론을 정리하였다.

2. 수차 측정 원리

그림 1과 같이 I_1 과 I_2 를 각각 초점 거리가 f 인 망원경의 초점면으로부터 안쪽과 바깥쪽으로 동일한 거리 l 만큼 떨어진 곳에서 별과 같은 평행 광원을 찍은 비초점 영상이라고 할 때 파면 W 와 감지 신호 (sensor signal) S 는 아래와 같은 관계를 갖는다 (Roddier et al. 1988).

$$S \equiv \frac{l}{f(f-l)} \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right) = P \nabla^2 W - \frac{\partial W}{\partial n} \delta_c \quad (1)$$

여기서 δ_c 는 델타 함수이며 P 는 주경영역 (pupil)에서는 "1"의 값을 갖고 그 외의 영역에서는 "0"의 값을 갖는다. 식 (1)을 살펴보면 주경의 경계에서 감지 신호는 파면의 법선방향 기울기와 같고 내부에서는 파면의 곡률 (curvature)임을 알 수 있다.

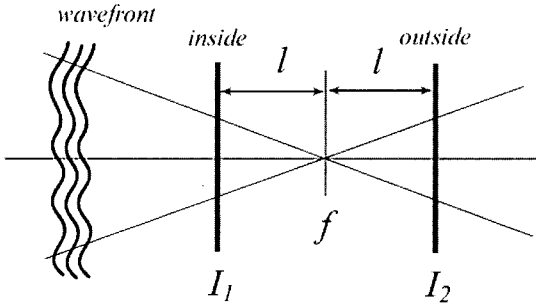


그림 1. 곡률감지방법을 이용한 수차 측정 원리

식 (1)으로부터 구한 파면을 수차로 나타내기 위하여 수차를 의미하는 다항식인 Zernike 다항식을 도입하여 아래와 같이 수차를 Zernike 다항식의 합으로 표현하였다 (Geary 1995).

$$W(\rho, \theta) = \sum_k a_k Z_k(\rho, \theta) \quad (2)$$

Zernike 다항식의 각항의 의미와 형태를 표 1에 제시하였다.

수차의 크기를 의미하는 Zernike 다항식의 계수 a_k 를 구하는 방법은 두 가지가 있다. 첫째는 노이만 경계조건의 포아송 방정식을 풀어서 파면을 구한 후에 최소자승법 등을 이용하여 파면을 Zernike 다항식으로 분해하는 방법이고, 둘째 방법은 식 (1)의 파면에 식 (2)를 대입한 후 최소자승법으로 Zernike 다항식의 계수를 직접 구하는 방법이다. 식 (1)은 일반적인 노이만 경계 조건의 포아송

방정식이지만 주경영역의 경계가 비정형이기 때문에 해를 구하기가 쉽지 않으므로 우리는 두 번째 방법을 택하여 프로그램을 개발하였다.

감지 신호로부터 Zernike 다항식의 계수를 직접 구하는 방법은 두 단계로 나뉜다. 먼저 Zernike 다항식 중 곡률이 '0'이 아닌 항의 계수를 주경 영역의 감지신호로부터 구한 후, 주경 영역의 경계 위치를 삼각함수로 근사시켜 구한 계수를 곡률 영역에서 구한 계수와 조합하여 Zernike 다항식의 나머지 계수를 구한다.

표 1. Zernike 다항식의 함수 형태

k (aberration)	$Z_k(\rho, \theta)$
2 (x-tilt)	$\rho \sin \theta$
3 (y-tilt)	$\rho \cos \theta$
4 (defocus)	$2\rho^2 - 1$
5 (x-astigmatism)	$\rho^2 \sin 2\theta$
6 (y-astigmatism)	$\rho^2 \cos 2\theta$
7 (x-coma)	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$
8 (y-coma)	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$
9 (x-tr. coma)	$\rho^3 \sin 3\theta$
10 (y-tr. coma)	$\rho^3 \cos 3\theta$
11 (spherical)	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$
12 (x-sph. astig.)	$\rho^4 \sin 4\theta$
13 (y-sph. astig.)	$\rho^4 \cos 4\theta$
14 (x-quad. astig.)	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \sin 2\theta$
15 (y-quad. astig.)	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \cos 2\theta$

곡률신호 영역에서는 Zernike 다항식 중에 $\nabla^2 W \neq 0$ 인 항만을 취하여 아래와 같이 최소자승법으로 근사시켜 계수 a_k 를 구한다.

$$S = \nabla^2 W = \sum_k a_k \nabla^2 Z_k \quad (3)$$

이때 계산되는 수차는 $Z_4, Z_7, Z_8, Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}$ 이다.

경계 신호의 위치는 주경의 경계와 같으므로 반경 $\rho = 1$ 에 해당한다. Zernike 다항식에 $\rho = 1$ 로 대입하면 Zernike 다항식은 삼각함수의 형태로만 남게 되므로 경계 신호영역에서는 아래와 같이 감지 신호를 삼각함수로 근사시킬 수 있다.

$$S(\theta) = const + \sum_{k=1}^4 b_k \cos k\theta + \sum_{k=1}^4 c_k \sin k\theta \quad (4)$$

여기서 감지 신호 $S(\theta)$ 는 $R_1(\theta)$ 와 $R_2(\theta)$ 를 각각 안쪽

과 바깥쪽 비초점 영상에서 방위각 θ 에 따른 중심으로부터 경계 신호까지의 거리이고 R_{pup} 를 수차가 없는 경우 주경의 반경이라고 하면

$$S(\theta) = -\frac{f}{f-l} \frac{1}{R_{pup}} (R_1(\theta) - R_2(\theta)) \quad (5)$$

로 표현된다. 주경 영역 내부의 무게 중심을 계산하여 이를 주경의 중심 위치로 하였으며, 주경의 반경 R_{pup} 는 망원경의 초점거리와 비초점 영상이 얻어진 거리로부터 구하였다. 그리고 방위각 θ 에 따른 주경 경계의 위치는 비초점 영상에서 임계값을 조정하여 주경의 형태를 정한 후 위치를 계산하였다.

표 2. Zernike 다항식의 계수 결정 식

k (aberration)	amplitude a_k	region
2 (x-tilt)	$b_1 - 7a_7$	경계 위치
3 (y-tilt)	$c_1 - 7a_8$	경계 위치
4 (defocus)	a_4	곡률 영역
5 (x-astigmatism)	$b_2/2 - 5a_{12}$	경계 위치
6 (y-astigmatism)	$c_2/2 - 5a_{13}$	경계 위치
7 (x-coma)	a_7	곡률 영역
8 (y-coma)	a_8	곡률 영역
9 (x-tr. coma)	$b_3/3$	경계 위치
10 (y-tr. coma)	$c_3/3$	경계 위치
11 (spherical)	a_{11}	곡률 영역
12 (x-sph. astig.)	a_{12}	곡률 영역
13 (y-sph. astig.)	a_{13}	곡률 영역
14 (x-quad. astig.)	$b_4/4$	경계 위치
15 (y-quad. astig.)	$c_4/4$	경계 위치

경계 영역에서 얻은 삼각함수의 계수와 곡률영역에서 구한 계수를 조합하여 표 2에 정리한 관계식을 이용하여 나머지 Zernike 다항식의 계수를 구한다. 표 2를 보면 $Z_9, Z_{10}, Z_{14}, Z_{15}$ 의 계수는 삼각함수로 근사한 계수로부터 바로 구할 수 있지만, Z_2, Z_3, Z_5, Z_6 의 계수는 곡률 영역에서 구한 계수를 조합하여 구해야 한다.

3. 수차 측정 프로그램 개발

수차 측정 프로그램의 초기 버전은 SunOS 4.1.3이 운영체제인 워크스테이션 (Sun SparcStation)에서 X-윈도우의 모티프 (Motif) (<http://www.opengroup.org/motif/>) 환경을 기반으로 하여 개발되었다. 그러나 지금은 대부분 윈도우즈 (Windows XP)나 리눅스가 운영체제인 PC를 사용하고 있기 때문에, 망원경의 광학계를 조정하는 작업을 할 때

이동이 편리한 노트북이나 주변의 컴퓨터를 사용할 수 있도록 기존의 프로그램을 수정 보완하여 PC 환경에서 실행되도록 하였다.

그림 2는 PC 환경에서 실행되는 수차 측정 프로그램의 모습이다. 상단의 윈도우에 보이는 세 개의 영상은 안쪽과 바깥쪽의 비초점 영상과 이들로부터 계산된 감지 신호이다. 사용자가 좌측 하단의 윈도우에서 임계값을 조정하여 주경의 중심 위치와 반경을 구할 수 있도록 하였으며, 계산된 수차를 우측 하단의 윈도우에 표시하였다.

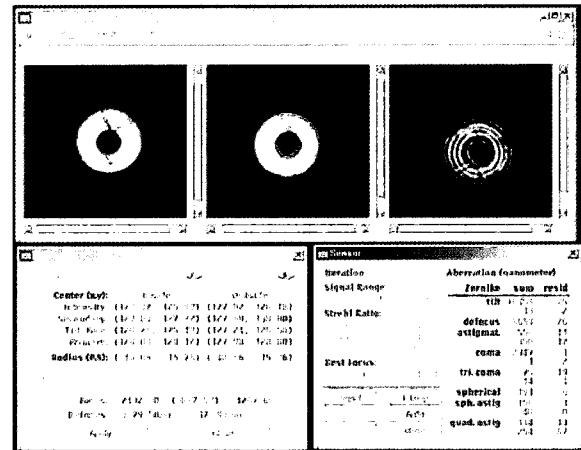


그림 2. 수차 측정 프로그램의 모습.

PC 환경으로 이식하기 위하여 수정하거나 개선한 부분은 다음과 같다: (1) 기존의 수차 측정 프로그램이 X-윈도우용 영상 출력 프로그램인 IRAF의 XImtool이나 SAOimage와 마찬가지로 8bit pseudo color 환경이기 때문에 PC 윈도우 시스템에서 영상을 제대로 화면에 출력하지 못했는데 프로그램을 32bit true color 환경으로 바꾸어 줌으로써 이 문제를 해결하였다. (2) 리눅스 시스템이 유닉스 시스템과 유사하지만 데이터를 기록하는 바이트 순서가 다르고 시스템 함수의 형태가 서로 다른 것들이 존재할 뿐만 아니라 X-윈도우 시스템이 상호간에 완전히 일치하지 않기 때문에 이들을 찾아서 일일이 수정하였다. (3) 초기에 개발된 프로그램이 모티프 라이브러리를 사용하고 있기 때문에 다른 시스템으로 이식을 하려면 이를 설치하여야 한다. 하지만 모티프 라이브러리는 상용이기 때문에 구매하여야 한다. 단지 이 프로그램을 사용하기 위하여 모든 PC 마다 모티프 라이브러리를 구매하는 것은 낭비라고 생각하여 우리는 모티프 라이브러리를 흉내 낸 무료 소프트웨어인 레스티프 (LessTif) 라이브러리 (<http://www.lesstif.org/>)로 모티프 라이브러리를 대체하였다. 그러나 레스티프 라이브러리는 모티프 라이브러리와 완벽하게 호환되지 않기 때문에 레스티프 라이브러리에서 작동하지 않는 몇몇 모티프 함수를 제거하고 새로운

프로그램을 작성하였다. (4) 데이터 질이 좋지 않은 자료를 분석하기 위하여 계산에 포함할 영역을 선택 할 수 있는 기능을 추가하였다. (5) Redhat사에서 무료로 제공하는 윈도우즈에서 실행되는 Cygwin (<http://cygwin.com/>)이라는 리눅스 에뮬레이터를 사용함으로써 PC용 윈도우즈 환경에서도 프로그램이 실행되도록 하였다.

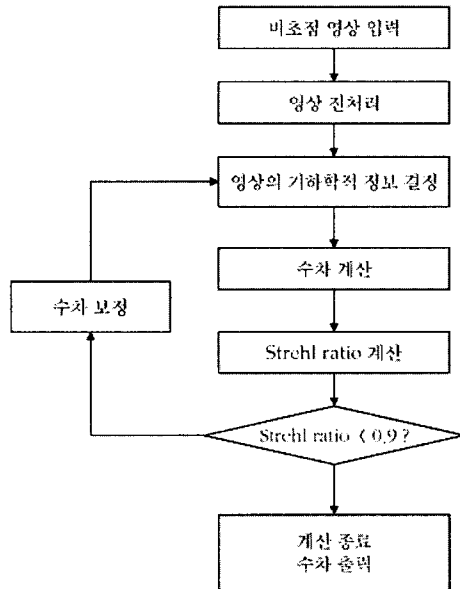


그림 3. 수차 계산 알고리즘 3

수차를 계산하는 알고리즘은 그림 3과 같다. 비초점 영상에서 수차를 계산하고 이를 보정한 다음, 수차가 보정된 영상에서 잔여 수차를 계산하여 이로부터 구한 strehl ratio 값이 0.9 보다 크면 보정된 영상의 수차가 매우 작으므로 수렴한 것으로 판단하여 계산을 끝내고 0.9보다 작으면 반복 계산을 하였다. 보통 15회 이내에 계산이 수렴하였다. 자세한 순서는 다음과 같다: (1) 초점면 안쪽과 바깥쪽에서 얻어진 비초점 영상의 파일 이름과 관측 정보인 비초점 거리 및 망원경의 초점 거리를 입력한다. (2) CCD 영상은 우주선 등에 쏘여 나타나는 뜨거운 화소 (hot pixel) 또는 불량 화소 (bad pixel) 등을 포함할 수 있다. 이러한 데이터를 먼저 중간값 (median) 필터 등을 써서 제거하고, 계산을 빠르게 하기 위하여 영상에서 필요한 영역만 잘라 낸다. 초점면 바깥쪽의 영상은 초점면 안쪽의 영상에 대하여 좌표계가 180도 회전되어 있으므로 이를 보정한다. (3) 비초점 영상에서 임계값을 조정하여 주경 영역을 결정하고 주경의 중심과 반경 그리고 방위 각에 따른 주경 경계의 위치를 계산한다. (4) 2장에 기술한 방법에 따라 수차를 계산한다. (5) 비초점 영상에 계산된 수차값을 적용하여 수차가 보정된 새로운 비초점

영상을 만든다. (5) 수차로부터 strehl ratio를 계산하여 이 값이 기준 값인 0.9보다 크면 수렴한 것으로 간주하여 계산을 끝내고 작으면 수차가 보정된 영상을 입력 값으로 수차 계산을 반복한다.

4. 적용

4.1. 비초점 영상 관측시 주의점

곡률감지방법에 사용되는 자료는 초점면을 기준으로 전후 동일한 거리에서 얻어진 별과 같이 평행한 광원의 영상이다. 무작위로 발생하는 대기의 요동 효과가 영상 전체에 걸쳐 통계적으로 균일해질 정도로 긴 시간 동안 노출을 해야 한다. 상층 대기가 고요하면 비초점 영상에서 회절 링이 뚜렷하지만 바람이 심하게 불면 회절 링의 윤곽이 흐릿하고 개수도 줄어든다. 노출 시간이 작으면 회절 링의 형태가 고르지 않고 주위에 섬광 형태가 나타난다 (Suiter 1995). 이런 현상이 나타나면 노출 시간을 늘려서 다시 관측해야 한다. CCD가 포화되지 않도록 관측하려면 필터를 사용하여 광량을 줄이거나 적당한 밝기의 천체를 선정하도록 한다. 또한 배경과 뚜렷하게 구분이 되도록 주경 영역에 해당하는 화소의 값을 충분히 크게 하는 것이 중요하다. 별의 선택은 기기 및 그날의 날씨에도 관계하기 때문에 경험에 의해서 알아내야 한다. 대체로 보현산천문대에서 대기의 효과가 사라지는 노출 시간은 30초 정도이며 1.8미터 광학 망원경의 경우 R 필터를 사용하였을 때 10등급 정도의 별이 적당하였다.

영상이 얻어진 위치와 초점면 사이의 거리는 수차의 정량적인 크기를 결정하는 중요한 요소이다. 일반적으로 초점면에서 멀수록 공간 분해능은 향상되나 감지율이 떨어진다. 한편 영상이 초점면에서 너무 가까우면 광선에서 교차하여 곡률감지방법으로 분석할 수가 없게 되므로 주의해야 한다.

경험에 의하면 CCD로 관측한 경우 비초점 영상에서 주경 지름이 200화소 이상이 되어야 계산에 사용되는 데이터의 수가 충분히 확보된다. 이 값은 보현산천문대 1.8미터 광학 망원경 f/8 부경으로 관측하는 경우 CCD가 초점면에서 대략 35mm 정도 떨어진 상태에 해당한다. 200화소보다 작으면 데이터 분석의 정밀도가 떨어지게 되고 수차가 큰 경우에는 계산이 불가능한 경우도 발생할 수 있다. 이는 수차 계산 알고리즘이 주경의 경계 위치 정보를 사용하기 때문으로 위치 정보의 정밀도가 주경 영역의 반경이 클수록 증가하기 때문이다. 영상이 너무 작은 경우에는 곡률 영역에 해당하는 화소의 수가 적어져 계산의 정밀도가 떨어지게 된다.

4.2. 보현산천문대 1.8미터 광학 망원경

그림 4의 (a)는 보현산천문대 1.8미터 광학 망원경의 광

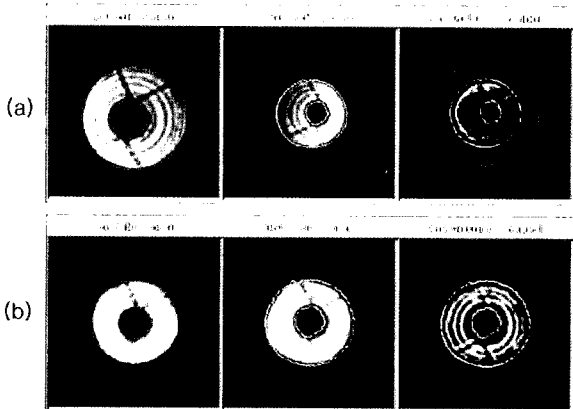


그림 4. 보현산천문대 1.8미터 광학 망원경의 수차 측정 영상. (a) 망원경으로 얻은 비초점 영상. (b) 수차를 보정한 비초점 영상

표 3. 보현산천문대 1.8미터 광학 망원경의 수차 측정 결과

k (aberration)	final[nm]	residual[nm]
2 (x-tilt)	16,476	-46
3 (y-tilt)	44	-14
4 (defocus)	-8,545	11
5 (x-astigmatism)	-353	12
6 (y-astigmatism)	-515	-8
7 (x-coma)	-2,398	2
8 (y-coma)	-27	1
9 (x-tr. coma)	272	26
10 (y-tr. coma)	227	-1
11 (spherical)	185	1
12 (x-sph. astig.)	165	0
13 (y-sph. astig.)	52	-1
14 (x-quad. astig.)	37	6
15 (y-quad. astig.)	-157	4

축을 조정하는 과정 중에 얻은 비초점 영상으로 왼쪽이 초점면 안쪽에 해당하고 가운데가 초점면 바깥쪽에 해당한다. 비초점 거리는 38mm이지만 두 영상을 초점면을 기준으로 동일한 거리만큼 떨어진 곳에서 얻은 것이 아니기 때문에 영상의 크기가 서로 다르다. 왼쪽과 가운데 영상에서 스파이더의 방향이 일치하는 이유는 좌표계를 일치시키기 위하여 가운데 영상을 180도 회전시켰기 때문이다. 비초점 영상에 회절 고리가 잘 나타나 있는 것으로 보아 노출 시간이 적당하고 상층 대기가 비교적 고품질을 알 수 있다. 오른쪽 영상은 왼쪽과 가운데 영상으로부터 구한 감지 신호이다.

그림 4의 (b)는 수차를 계산한 후에 입력 영상 (a)의 수차를 보정하여 계산한 영상이므로 크기가 같고 광량의

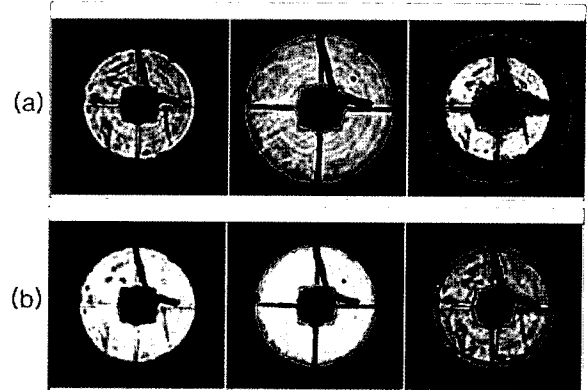


그림 5. 한국천문연구원 광시야 망원경 3호기의 수차 측정 영상. (a) 망원경으로 얻은 비초점 영상. (b) 수차를 보정한 비초점 영상

표 4. 한국천문연구원 광시야 망원경 3호기의 수차 측정 결과

k (aberration)	final[nm]	residual[nm]
2 (x-tilt)	536	-61
3 (y-tilt)	-1,166	-174
4 (defocus)	4,587	10
5 (x-astigmatism)	278	-32
6 (y-astigmatism)	-315	-18
7 (x-coma)	-132	4
8 (y-coma)	-122	-2
9 (x-tr. coma)	243	3
10 (y-tr. coma)	-161	0
11 (spherical)	231	0
12 (x-sph. astig.)	-33	2
13 (y-sph. astig.)	20	1
14 (x-quad. astig.)	223	-2
15 (y-quad. astig.)	-16	2

분포가 고른 형태를 보인다. 수차가 보정된 영상으로부터 구한 수차를 잔여 수차라고 할 때 잔여 수차로 계산한 *strehl ratio*가 0.97이 되기까지 12회의 반복 계산을 하였다.

최종적으로 얻어진 수차와 잔여 수차를 표 3에 정리하였다. 이 중 *tilt*와 *defocus* 수차는 무시하여도 좋다. *tilt*는 영상의 중심이 벗어난 정도를 표시한 것이므로 경면의 상태와는 직접 관계가 없으며 *defocus*는 비초점 영상이 초점면을 중심으로 동일한 거리에서 얻어진 것이 아니기 때문에 발생한 것으로 망원경의 수차와는 무관하다. 계산을 통하여 초점 위치는 부경의 위치를 비초점 영상이 얻어진 위치의 중심보다 8.75mm 뒤에 있음을 알아냈다. 표 3을 보면 가장 큰 수차는 비축수차이고 다음으로 비접수

차로 나타났다.

4.3. 한국천문연구원 광시야 망원경 3호기

한국천문연구원 광시야 망원경 3호기는 구경이 60cm이고 초점비가 $f/2.92$ 이며 주경과 3개의 보정렌즈로 구성된 직 초점 방식의 망원경이다. 그림 5의 (a)는 한국천문연구원 광시야 망원경 3호기의 수차를 측정하기 위하여 초점면의 안쪽과 바깥쪽으로 6.27mm에서 떨어진 곳에서 얻은 시야 중심 부근의 비초점 영상이다. 11회의 반복 계산 후에 잔여 수차로 인한 *strehl ratio*가 0.96이 되었다. 수차가 보정된 영상은 그림 5의 (b)와 같으며 수차 값을 표 4에 정리하였다. Defocus 수차로부터 계산한 최적 초점 위치는 비초점 영상을 얻은 위치의 중심보다 주경 쪽으로 0.65mm 가까운 것으로 나타났다.

5. 결론

소형 망원경을 대규모로 설치하여 전천 감시를 하는 프로그램을 수행하거나 대형 망원경을 운영할 때에 정기적으로 광학계를 점검해야 하기 때문에 간편하게 광학계를 정렬시킬 수 있는 도구가 절실하게 필요하게 되었다. 광학계의 정렬은 망원경의 광학 성능에 직접적인 영향을 미치고 즉시 관측에 반영되기 때문에 항상 망원경의 광학계를 최상의 상태로 갖출 필요가 있다. 그러나 망원경의 상태를 정량적으로 측정할 수 없다면, 망원경의 상태를 최상으로 유지하기도 어렵거니와 광학계 조정에 쓸데 없이 많은 시간이 소요될 수 있다. 이런 이유로 망원경의 광학계 상태를 쉽게 측정할 수 있는 본 프로그램은 광학계 조정 작업에 매우 큰 도움을 주리라고 예상된다.

곡률감지방법을 응용하여 개발된 본 프로그램은 보현산천문대의 1.8미터 광학 망원경의 광학계 정렬에 사용되었다. 이후 프로그램을 수정 보완하여 PC용 윈도우즈 시스템과 리눅스 시스템에서도 실행될 수 있도록 함으로써 사용이 편리하게 하였으며, 한국천문연구원 광시야 망원경 3호기의 광학계 정렬 작업에 사용하였다.

프로그램이 비초점 거리를 요구하기 때문에 얻어진 영상이 초점면에서 얼마나 벗어났는지를 측정할 수 있는 망원경에서만 수차를 측정할 수 있지만, 향후 카메라 내에서 자체적으로 CCD의 위치를 이동시켜 비초점 영상을 찍을 수 있는 전문 카메라를 개발한다면, 부경의 위치를 알려주는 인코더가 없는 망원경에서도 정량적인 측정이 가능할 것이다.

참고문헌

- Ghozeil, I, and Simmons, J. 1974, *Applied Optics*, 13, 1773
 Geary, J. M. 1995, *Wavefront Sensors*, (Washington: SPIE), p.8

Roddier, F. 1988, *Applied Optics*, 27, 1223

Roddier, F., Roddier, C., & Roddier, N. 1988, *SPIE*. 976, 203

Suiter, H. R. 1995, *Star Testing Astronomical Telescopes*, (Virginia: Willmann-Bell, Inc.), p.24