

적외선용 비축 광시야 반사 광학계 제작

Fabrication of The Off-Axis IR Reflecting Optical System

*김상혁^{1,2}, #박수봉(soojong@khu.ac.kr)², 김진표¹, 양순철¹, 국영호¹, 이상용³, 장승혁⁴

*S. Kim^{1,2}, #S. Pak², G. H. Kim¹, S. C. Yang¹, M. H. Kook¹, S. Y. Lee³, S. H. Chang⁴

¹ 한국기초과학지원연구원, ² 경희대학교 우주과학과, ³ (주)하늘엔지니어링, ⁴ 삼성중합기술원

Key words : off-axis, wide field of view, reflecting optical system, IR optical system

1. 서론

최근 적외선 광학계에 대한 관심이 점차 높아지면서 적외선 광학계 개발의 중요성이 매우 높아지고 있다. 하지만 차세대 적외선 망원경과 카메라의 개발에 있어서 굴절 광학계는 중적외선 이상의 파장에서 색수차를 보정할 수 있는 렌즈의 재질을 찾기에 어려움이 있다. 동축(on-axis) 반사 광학계는 색수차의 문제는 없지만 부경과 그 지지부의 중앙차폐로 인한 광량손실과 회절현상에 의한 콘트라스트 저하가 발생하며 시야각이 좁은 단점을 가지고 있다. 반면, 비축(off-axis) 반사 광학계는 색수차가 없고 중앙 차폐 문제를 해결할 수 있기 때문에 광시야 설계가 가능하다.^{1,2)}

기존의 비축 반사 광학계는 선형 비점수차 및 3차 이상의 고차 수차가 발생하는 문제를 가지고 있지만 최근에 개발한 비축 기하광학 이론을 적용하면 비축 반사 광학계의 선형 비점수차를 완전히 제거할 수 있으며 3차 이상의 고차 수차를 최소화 할 수 있다. 기존의 비축 광학계는 광축 주변부의 반사경 일부를 잘라서 사용하는 방법이었다. 그러나 본 연구에서 개발하는 비축 광학계는 장승혁 박사의 비축 광학 이론을 이용하여 광축 주변부를 잘라서 사용하는 방식이 아닌 비대칭 곡면의 형상을 갖는 반사경을 사용하는 방식을 채택하였다.³⁾

본 논문에서는 비축 광학계에 사용될 반사경의 비대칭 형상을 분석, 가공, 측정하여 그 결과를 분석한다. 그리고 광학계의 정렬 및 조립을 수행한다. 광학계에 사용될 반사경 가공은 Freeform700A(Precitech 사)를 사용하여 가공하였으며 UA3P(Parasonic 사)를 사용하여 측정되었다. 가공한 반사경의 측정 결과를 바탕으로 반사경의 형상을 재분석하였다. 마지막으로 새로운 비축 광학계의 정렬 방법을 모색하였다.

2. 광학계 설계 및 초정밀 가공

가공한 반사경의 본 논문의 광학 설계 Schwarzschild-Chang Type은 Fig.1 과 같이 주경이 빛을 퍼트리고 부경에서 모아주는 역 카세그레인 광학계의 반을 자른 것과 유사한 형태의 비축 광학계이다. EPD는 50 mm이며 주경은 70mm, 부경은 130 mm이다. 광학계에 사용될 검출기의 FOV는 6° x8° 이지만 10° x10° 의 시야에서도 광학계의 성능에 문제가 없다. MTF는 45µm pixel size의 한계 분해능인 11 cycle/mm에서 80%에 가까운 성능을 보여주고 있다.

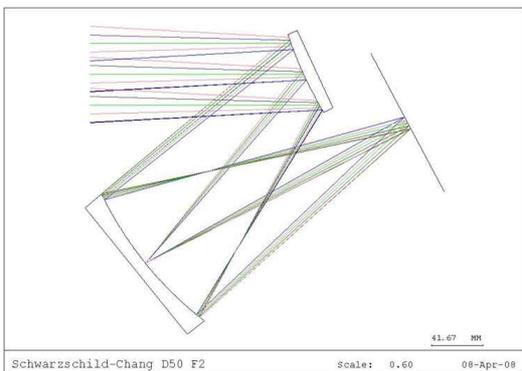


Fig. 1 Design of Schwarzschild-Chang Off-Axis Reflecting System

주경과 부경은 모두 식(1)과 같은 자유곡면의 형상을 가지고 있으며 x의 홀수 항의 계수가 모두 0이기 때문에 Fig.2 에서와 같이 y축에 대해서는 대칭이지만 x축에 대해서는 비대칭 곡면의 형상을 가지고 있다.

$$z(x,y) = a_0x + a_1y + a_2x^2 + a_3xy + y^2 + \dots + a_{64}y^{10} \quad (1)$$

광학계의 공차분석 결과 단일 공차는 X축 방향 공차가 ± 2mm의 가장 큰 허용공차를 가지고 있었으며 좌우 회전에 관한 공차는 6분의 가장 작은 허용 공차를 가지고 있다.

자유곡면의 가공은 5축 제어 초정밀가공기인 Freeform700A를 이용하였다. X,Z,C의 3축을 제어하여 가공하였으며 주축의 회전과 다이아몬드 바이트의 위치를 동기화시켜 실시간으로 제어하였다. 자유곡면의 가공은 주축이 회전하며 동시에 X,Z 축이 제어되기 때문에 초정밀 가공기의 주축 회전은 50RPM의 매우 낮은 속도로 제어되었다. 반사경의 재료는 AL6061-T6이며 반사경의 가공시간의 단축을 위하여 자유곡면의 형상과 가장 차이가 적은 최적의 구면을 가공한 후 비대칭 곡면을 가공하였다. 또한 비축 광학계의 경우에 반사경이 축에 대한 대칭이 아니기 때문에 반사경의 축을 구분하기 위하여 반사경의 뒷부분을 사각형으로 가공하였으며 반사경이 바깥쪽에 2mm의 평면을 가공하여 광학계의 정렬에 용이하게 가공하였다.

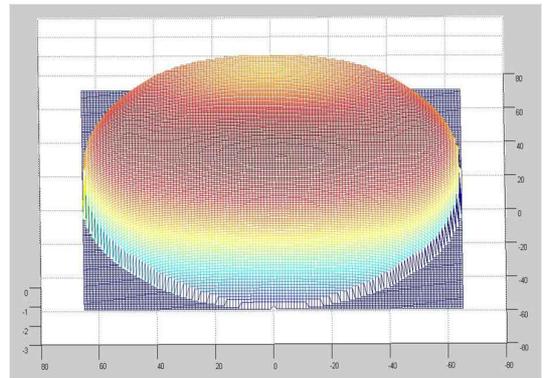


Fig. 2 Asymmetry of Off-Axis Reflecting Mirror

3. 반사경의 측정 및 분석

가공한 반사경의 표면 거칠기는 NT2000(Veeco 사)를 사용하였으며 국부영역의 표면 거칠기를 측정하여 Ra 5.27 nm의 결과를 얻을 수 있었다. 반사경의 형상정밀도는 비점축식 3차원 비구면 측정 장비인 UA3P(Panasonic 사)로 측정하여 PV 0.598 µm와 RMS 0.122 µm의 결과를 얻었다. 오차는 Fig.3 과 같이 회전 중심에서 멀어질수록 커지는 경향을 가지고 있다. 이러한 에러의 패턴은 50RPM의 동일한 회전 속도로 주축을 회전시켰기 때문에 반사경의 안쪽보다 바깥쪽에서의 선속도가 상대적으로 빠르기 때문인 것으로 사료된다.

측정한 반사경의 결과를 IDL의 mpfit_2D를 이용하여 반사경의 설계식과 같은 형태의 다항식을 도출한 결과 측정한 반사경과 IDL에서 얻은 다항식으로 표현한 반사경의 평균 오차는 1.1223nm 이다. 측정한 반사경의 다항식을 광학계에 적용시켜 최적화하고 역설계 하였다. 공차분석을 한 결과 가공한 반사경을 사용할 경우 상의 형태가 변하면서 RMS 크기가 1.5 µm 증가하였지만

광학계의 성능에는 큰 영향을 주지 않는다.

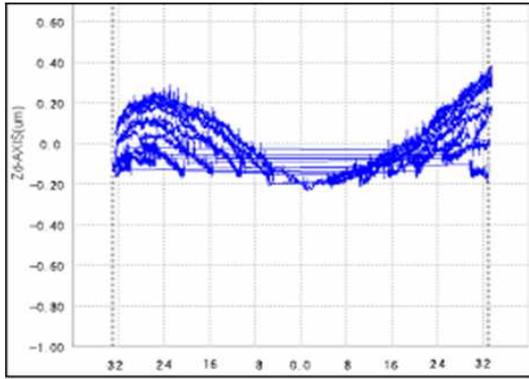


Fig. 3 Measurement data of Fabricated mirror

X, Y, Z축 및 회전에 대한 공차들을 가장 민감한 공차인 반사경의 좌우 회전에 대한 공차의 크기를 변화시키며 랜덤으로 부여하여 광학계의 조립, 정렬 과정에서 나타날 수 있는 공차의 유형을 분석하였다. 공차분석 결과 Fig.4 에서 볼 수 있듯이 X축 방향 공차와 Y축 방향 공차가 -0.2mm 이상 들어지는 경우에는 상의 크기가 CCD 화소의 성능 이상으로 커지기 때문에 정렬시 가장 민감한 공차인 좌우 회전에 대한 공차와 함께 정밀한 조립이 요구된다.

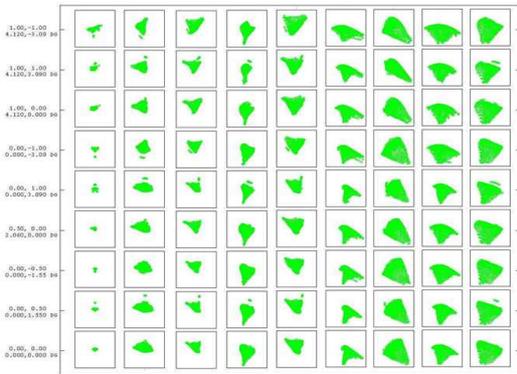


Fig. 4 Tolerance Analysis of System using Fabricated Mirror

4. 광학계의 정렬

비축 광학계의 가장 큰 단점은 반사경이 동일한 광축을 공유하지 않기 때문에 광학계의 정렬이 어렵다는 것이다. 때문에 본 연구에서는 광학계의 조립과 정렬을 위하여 핀 홀과 미러의 가장자리 부분의 평면을 이용하였다. 광학계는 주경과 부경, CCD와 3개의 스테이지, 그리고 밀판으로 구성된다.

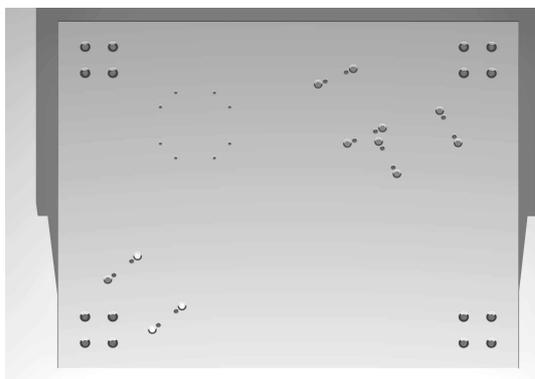


Fig. 5 Pin Hole for calibration and Assemble

스테이지는 X, Y, Z축의 초기값 정렬을 수행한 후 반사경과 조립이 이루어진다. 이때 조립 공차를 최소화하기 위하여 반사경의 뒷면과 스테이지에 4개의 핀 구멍을 사용하였다. 또한 Fig.5와 같이 스테이지와 밀판의 조립부분에도 각각 4개의 핀 구멍을 사용하였다. 밀판과의 조립공차 및 높이 차이는 광학계의 성능에서 회전에 대한 공차로 나타나기 때문에 반사경과 조립된 스테이지는 밀판에 조립된 상태로 회전에 대한 초기값 정렬을 수행하였다. 밀판과 수평 방향으로 주경과 부경 그리고 CCD의 스테이지가 조립될 수 있도록 8개의 핀 구멍을 만들었으며 반사경의 가장자리에 가공된 평면과 WyKO 6000의 시준기를 사용하여 회전에 대한 초기값 정렬을 수행하였다. 그림(6)에서 반사경의 바깥쪽 평면 부분이 간섭계에 찍히는 모습을 볼 수 있으며 평면 부분의 간섭무늬를 이용하여 초기값 정렬을 수행하였다.



Fig. 6 G-tilt Calibration using Interferometer

주경의 중심에 맺힌 광선은 부경의 중심부를 지나 CCD의 중심에 상을 맺히는 성질을 이용하여 광학계의 X, Y축의 정렬은 평행 광선을 사용한 광선 추적 방법으로 수행하였다. Z축과 회전축의 정렬은 WYKO 6000의 632.8 μ m의 평행 광선을 이용해야 하지만 가공한 반사경의 정밀도로는 불가능하다. 하지만 가공한 반사경의 중심 부분의 정밀도는 632.8 μ m의 가시광 영역에서도 충분히 사용 가능하기 때문에 정밀도가 높은 반사경의 중심부만을 사용할 경우 간섭계의 평행 광선을 사용한 정렬이 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 굴절 광학계와 동축 반사 광학계 그리고 기존의 비축 반사 광학계가 증적외선 이상의 파장영역에서 갖는 문제점을 해결한 비축 반사 광학계의 개발을 수행하였다. 비축 반사광학계의 문제점으로 알려진 반사경 가공의 난해성은 국부영역 표면 거칠기 Ra 5.27 nm와 형상정밀도 PV 0.598 μ m와 RMS 0.122 μ m의 결과를 얻었으며 시뮬레이션 결과 광학계의 성능에 문제를 보이지 않았다. 또한, 비축 반사 광학계의 가장 큰 단점인 광학계의 조립과 정렬에 핀 홀과 간섭계를 사용하여 조립 공차를 최소화하였다. 향후 반사경의 정밀도를 향상시키고 광학계 정렬과 조립의 완료 후 시스템의 냉각과 하우징에 관한 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

1. 김건희, 양순철, 김효식, 이인제, 국명호, 이대희, "천문우주용 적외선 광학계 초정밀가공기술," 한국정밀공학회지 Vol 24, No 2, pp. 25-32 2007.
2. 양순철, 김건희, 김효식, 이상용, 김명상, 원종호, "항공우주용 적외선 광학계 초정밀가공기술," 한국정밀공학회지 Vol 24, No 2, pp. 19-24, 2007.
3. Chang, S., "Off-axis reflecting telescope with axially-symmetric optical property and its applications," Proceedings of SPIE--the international society for optical engineering, Vol. 6265 No.2, pp. 626548-, 2006.