콜리메이터와 파면측정기를 이용한 고해상도 전자광학 탑재체의 제2 반사경 정렬법

장홍술*, 정대준**, 육영춘***, 김성희****, 고대호*****, 이승훈******

Alignment method of the secondary mirror of high resolution electro-optical payload using collimator and wave front sensor

Hong-Sul Jang, Dae-Jun Jung, Young-Chun Youk, Seonghui Kim, Dai-Ho Ko, Seunghoon Lee

Abstract

For high resolution electro-optical payload, the alignment and assembly of the secondary mirror with respect to the primary mirror is the most important step of the whole camera assembly process. For the purpose of the secondary mirror alignment, Wave front sensor and Collimator would rather be useful than the interferometer because of its small size and easiness of handling. In this paper the brief alignment procedure and method of the secondary mirror of a high resolution electro-optical camera system was introduced.

초 록

고해상도 전자광학 탑재체의 주 반사경과 제2 반사경 간 조립 정렬은 전체 카메라 시스템의 조립 단계 중 가장 중요한 단계이다. 제 2 반사경의 정렬에는 파면센서와 콜리메이터를 사용하였는데 간섭계 보다는 크기가 작고 다루기가 편하기 때문이다. 본 논문에서는 고해상도 전자광학 탑재체의 제 2 반사경에 대한 정렬 방법과 절차에 대해 소개 하고자 한다.

키워드 : 광정렬(optical alignment), 제2반사경(secondary mirror), 콜리메이터(collimator), 파면측정기(wave front sensor)

1. 서 론

반사경을 이용하는 망원경이나 카메라의 광학적 정렬은 외부환경에 민감하고 높은 측정 정밀도가 요구되는 고난이도의 작업이다. 특히 제2 반사경의 정렬이 가장 예민한 부분인데, 광학적 형태에 따라 다소 차이가 나지만 대부분의 경우 두 면의 반사경을 이용하는 카세그레인 형태를 기본으로 한 설계를 이용하므로 제 2 반사경의 민감도가 높게 된다.

접수일(2011년 9월 15일), 수정일(1차 : 2011년 10월 17일, 2차 : 2011년 10월 19일, 게재 확정일 : 2011년 11월 1일)
*위성탑재체광팀/hsjang@kari.re.kr **위성탑재체광팀/djjung@kari.re.kr ***위성탑재체광팀/ycyouk@kari.re.kr
****위성탑재체광팀/barlow@kari.re.kr *****위성탑재체광팀/dhko@kari.re.kr *****위성탑재체실/shlee@kari.re.kr

일반적으로 알려진 반사경 광학계의 정렬은 간섭계를 이용하는 방법이다. 파면오차 등의 광학적 성능이나 특성을 측정하는 방법으로는 간섭계가 최고의 정밀도를 구현하기 때문이다. 한편 정렬 작업의 편이성과 외부환경에 덜 민감한 특징을 갖는 파면측정기(wave front sensor) 등이 일부 사용되기도 한다.

본 논문에서는 파면오차 측정기를 사용한 고해상도 전자광학 탑재체 정렬방법과 절차에 대해 소개 하고자 한다. 정밀도 면에서는 파면오차 측정기가 간섭계 보다 불리 하지만, 간섭계가 상대적으로 무겁고 최종 초점면 정렬시에는 측정각도에 따른 간섭계 구동 기구를 구현하기가 까다롭기 때문이다. 그리고 간섭계의 경우 진동이나 공기 불안정 등 측정 환경에 대한 영향이 많은 반면 파면 오차 측정기는 외부 환경에 대한 영향이 작고 또한 실시간으로 정렬 상태를 각도로 확인할 수 있다는 장점이 있다.

2. 제2 반사경의 정렬 기법

전자광학탑재체의 광학적 정렬은 기본적으로 순차적 절차에 의해 이루어지며, 정렬을 위한 광구조 장비와 정렬용 파면측정기(wave front sensor)를 이용한다.

주반사경이나 제2 반사경의 경우 반사경의 형태가 축대칭이므로 축대칭 정렬 개념을 적용하며 정렬 후, 비축상태의 시야각에서 정렬 상태를 확인한다. 제 2 반사경 정렬은 우선 주반사경의 정렬 후, 주반사경에서 찾아진 광축을 기준으로 정렬하게 된다.

일반적인 광학 정렬의 경우 간섭계를 이용하여 측정하나 간섭계의 경우 부피와 무게 문제, 그리고 각도 조정의 어려움 등으로 인해 사용이 간편한 파면측정기를 이용하였다.

2.1 파면센서 특징

광학계의 특성을 측정하는 파면측정기는 Fig.1과 같이 반사되거나 굴절된 파면을 측정하여 광학계의 정렬과 수차를 유추하는 장치로 핀홀을 이용한 하트만(Hartmann)센서와 마이크로 렌즈가 추가되어 성능을 향상시킨 샥하트만(Shack-Hartmann) 센서로 나뉜다. 하트만 센서는 1900년 초에 개발되었는데 센서의 초점면 전반부에 작은 홀을 배치하여 되돌아온 빛이 입사하는 각도를 측정하여 파면과 수차를 계산하는 방식이다. 홀을 통과하는 빛이 집적된 초점을 만드는 형상이 아니므로 정밀도가 떨어진다. 반면 샥하트만 센서는 홀 대신에 마이크로 렌즈를 배치시켜 초점면에 결상시키므로 측정 정밀도가 높다.

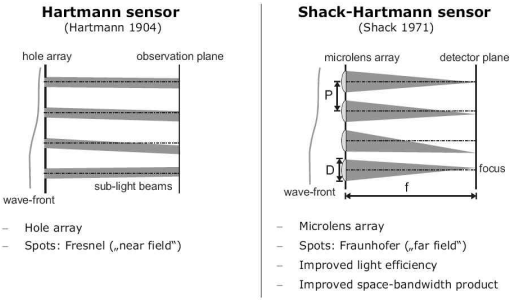

Figure 1. Comparison of Hartmann sensor and Shack-Hartmann sensor[1]

간섭계와 파면측정기는 동일한 기능을 하지만 약간 다른 특성을 가지고 있는데, 우선 작동 원리가 다르다. 간섭계는 기준 파면과 되돌아 온 측정 파면의 간섭현상으로 측정 대상의 광학적 상태를 측정하는 반면 파면측정기는 측정 파면이 파면측정기에서 결상하는 위치 정보를 이용한다.

파면측정기는 정렬상태를 실시간으로 모니터링 할 수 있는데, 일차적인 정렬 상태를 각도 값으로 보여 주기 때문에 작업자는 쉽게 정렬 상태를 확인 할 수 있다.

Table 1. Shack-Hartmann sensor vs. Interferometer[1]

	Shack-Hartmann	Interferometer
Lateral resolution	medium ~ 100x100	high ~ 1000x1000
Dynamic range	high	low
Reference wave	optional	necessary
Evaluation rate	high	low

일반적으로 간섭계는 Table 1 과 같이 측정 정밀도가 높지만 실시간으로 정렬상태와 성능을 측정할 수 있는 파면센서가 간섭계를 대신하여 광학계의 광정렬에 사용되기도 한다.

2.2 정렬 개념

주반사경(primary mirror), 제 2 반사경(secondary mirror)의 광학적인 구조는 Fig.2와 같다. 파면측정기와 콜리메이터에서 나온 광선이 제2반사경과 주반사경을 거친 후 평면경(flat mirror)에서 반사되어 다시 돌아와 파면측정기에 결상되는 구조이다.

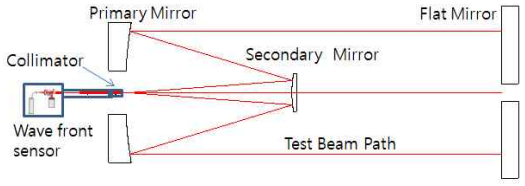

Figure 2. Secondary mirror alignment concept

삼반사경식 탑재체의 광학계 특성상 주반사경과 제 2 반사경 만의 조립 상태에서는 광학적 성능이 좋지 않고 파면센서 자체가 평행광을 입사시키는 구조이므로 콜리메이터라는 보조 광학계를 추가로 이용한다. 이 방법은 간섭계와 보조광학계(null lens)를 이용하는 방법과 유사하나, 콜리메이터는 주반사경과 제 2 반사경에 의해 발생하는 전체 수차를 다 보정하는 것이 아니고 구면수차(spherical aberration)보정이 주목적이다.

파면측정기로 제 2반사경의 축상 위치와 각도를 측정하면서 최적의 위치에 반사경을 정렬하도록 한다.

2.3 정렬 절차와 방법

주반사경(M1)이 조립되고 광축이 찾아진 후에는 제 2 반사경 조립체를 기본 위치에 위치시키고 정렬을 시작한다. 먼저 파면측정기와 조립된 제 2 반사경 조립용 콜리메이터를 기본 위치에 위치시킨다.

평면경은 제 1 반사경에서 나오는 광선 전체를 반사시킬 만큼 크기가 충분해야 하며 짐발(Gimbal) 형태에 장착되어 축정렬이 가능해야 한다(Fig.3). 파면측정기와 콜리메이터는 Fig.3과 4의 그림에서와 같이 조립된 형태로 사용되는데, 콜리메이터는 제 2반사경용으로 설계 제작된 것이다.

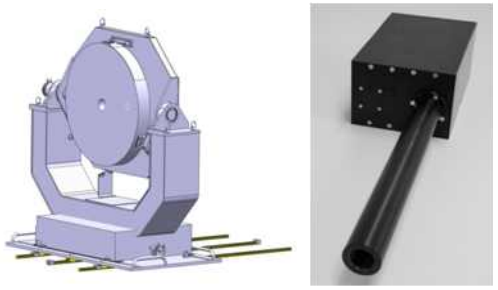

Figure 3. Flat mirror(left) and wave front sensor(right)

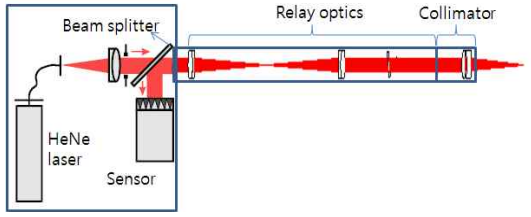

Figure 4. Detail of the wave front sensor with collimator

실제 정렬의 구성은 광학계를 지지해주는 짐발, 파면 측정기와 제 2 반사경 조립체를 지지하고 미세하게 움직일 수 있는 6축 헥사포드(hexapod), 파면센서를 움직일 수 있는 이송장치 등이 필요하다.

정렬에 있어 두 대의 헥사포드가 각각 제2반사경과 파면측정기의 미세 위치 조절용으로 필요하며, 그리고 헥사포드와 제 2 반사경을 연결하는 별도의 구조물인 어댑터가 헥사포드위에 장착되어 있으며 파면측정기는 이송장치에 의해 헥사포드와 연결된다(Fig.5). 파면의 측정 결과에 대

해서는 정렬 각도와 수차의 항을 분석하는데, 주반사경과 제 2 반사경 및 파면측정기의 콜리메이터는 파면오차(wave front error)를 최소화하는 구조가 아니므로 제 2 반사경의 정렬 각도와 위치에 민감한 절대 각도, 코마수차 및 구면 수차 값을 참고하여 정렬 결과를 판단한다.

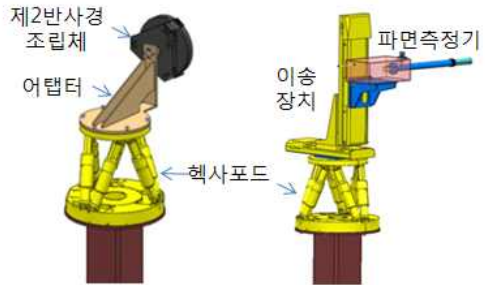

Figure 5. Secondary mirror(left) and WFS(right) control setup

2.4 정렬 결과

파면센서에서 감지되는 최종 정렬 각도가 10' 내외 일 경우를 목표로 하였는데 이는 공차해석을 통해 계산된 M2의 정렬각도 공차를 만족하는 값이기 때문이다.

정렬 각도가 만족된 후에는 정렬각도의 변화가 거의 없는 상태에서 미세 정렬을 통해 파면 오차 값을 최적화 시키는데 측정된 파면 오차의 결과는 Fig.6과 같다. 모델1과 2 모두, 측정파면의 형태가 대칭적인 것은 정렬이 전반적으로 양호하게 되었다는 것을 보여주며, 헥사포드를 분리한 최종 값을 보면 코마와 구면수차가 각각 0.1이하로 사전에 계산된 공차 값 이내인 것을 확인 할 수 있다. 피스톤(piston), 틸트(tilt)와 디포커스(defocus) 및 아스티그(Ast)은 정렬과 무관한 항목이고 15번 항목인 radial term은 반사경의 비구면 계수의 영향을 나타내므로 정렬 상태와는 무관하다. 기타 항목은 정렬에는 영향이 거의 없는 항목이다.

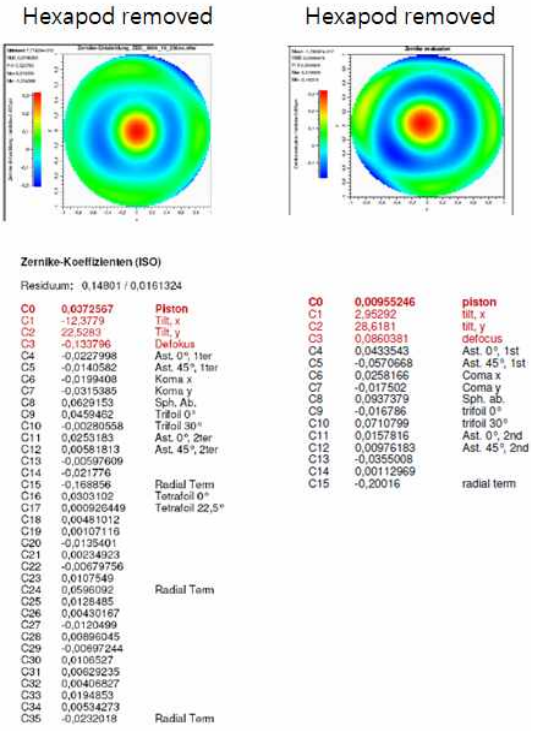

Figure 6. Wave Front Error map after Hexapod remove of FM1(left[2]) and FM2(right)

3. 결 론

본 논문에서는 파면측정기와 콜리메이터로 구성된 광학계를 이용한 제2반사경을 광정렬 기법을 소개 하였다. 간섭계와는 달리 보상광학계가 없이 정렬이 가능하며 파면측정기를 이용할 경우 정렬 결과 값은 각도 및 파면오차 값(코마와 구면수차)으로 실시간 표시가 가능하므로 실시간 정렬이 용이하다.

REFERENCE

1. Technical Tutorial, Optocraft GmbH
2. Optical Performance Test Report OM1, K3-AST-RP-172, Rev.1, KARI