위성용 대구경 반사경의 광기계 변형 연구

An Optomechanical Study of Large Mirrors for Satellites

이준호[1], 엄태경[2], 이완술[2], 윤성기[2]
[1]한국과학기술원, 인공위성연구센터, [2]한국과학기술원, 기계공학과

I. 서론

위성을 이용한 원격탐사에 사용되는 지구관측 탑재체는 물론 위성용 천문 망원경의 개발에 있어, 광학계의 구경은 요구되는 해상도 및 광량 징집도에 의해 결정되어진다. 지구관측탑재체의 경우 군사 목적의 정밀 관측을 (적어도 잠재적으로) 목표로 하고 있어 해상도가 1m이하로 정밀해지고 있고, 이에 따라 광학탑재체 즉 카메라의 구경이 대구경화되고 있다. 예로 고도 681km에서 해상도 1m(흑백)/2m(칼라)의 영상을 촬영하는 IKONOS 위성 카메라의 구경은 70cm에 달한다.

위성용 카메라의 이미지 특성은 지구상 또는 우주상의 여러 가지 환경 요건에 영향을 받으며, 주위 환경에 의한 영향은 주경을 원래의 모양으로부터 변형시켜서 이미지를 나쁘게 하는 역할을 하며 크게 다음의 세 종류로 나눌 수 있다.

a. 위성 발사 시의 진동이나 과부하에 의한 변형
b. 태양 복사열 또는 위성 내부의 전자회로의 발열에 의한 열적 변형
c. 우주 상에서 중력효과가 사라짐으로 인해 생기는 변형.

이러한 효과를 최소화하기 위해 직경이 커짐에 따라 광학 주경부의 무게를 최소화하며, 발사 및 운용환경에서 주어진 광학성능을 만족하게 설계, 가공하는 것이 중요하게 된다.

특히, 인공위성의 탑재체의 경우 발사비만 고려하여도 평균적으로 kg당 $10,000~20,000나 되어 광학계의 경량화가 강조되고 있다. 주경이 70cm인 경우 주경의 형태에 따라 무게가 11~87kg로 차이가 나므로 그 영향은 크다고 할 수 있고, 더 나아가 무게의 제약에 따른 발사체 선정과 탑재체 및 위성 전체의 기계진동 및 구조 설계에 어려움이 따른다.

반사경 경량화 및 최적화에 대한 연구로 NASA Ames SIRTF(Space Infrared Telescope Facility)의 주경 설계에 대한 4가지 모델에 대하여 유한요소법을 이용한 기계 구조 해석 및 최적화 연구가 수행되어졌으며, 비슷한 모델에 대한 수학적 해석을 Vukobratovich가 수행하였고, 국내에서는 보현산 천문대의 주경 설계에 관한 연구가 진행된 바 있다. 반사경의 열해석과 관련하여, Pearson은 직경 7.5m 벌집 형태의 주경의 열해석을 수행하였으며, Appelwhite는 직경 35cm의 싱글 아치(Single Arch) 형태의 Mars Observer Camera에 대하여, Pepi는 벌집 형태의 반사경에 대한 수학적 해석을 제시하였다.

본 논문에서는 NASA Ames SIRTF의 연구에서 사용되었던 싱글 아치 반사경, 더블 아치 반사경, 벌집 샌드위치 반사경과 비교 대상으로 플랫 백 반사경의 4가지 형태의 직경 300mm 반사경에 대하여 구조해석은 물론 열 해석을 포함한 다음의 해석을 동시에 수행함으로써, 기존의 연구 결과를 통합 및 보완하였다.

a. 주경의 광 축 방향(수직방향)으로의 중력에 의한 변형

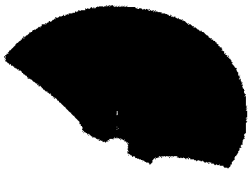
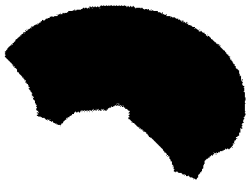
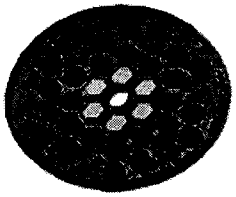
b. 주경의 광 축에 수직한 방향(수평방향)으로의 중력에 의한 변형
c. 광 축 방향 온도 기울기에 의한 열적 변형
d. 반지름 방향 온도 기울기에 의한 열적 변형
e. 주경의 전체 온도 변화에 의한 열적 변형

각 해석 결과의 기계 변형은 광학적 의미를 갖기 위하여 Zernike 다항식으로 분석되고, 해석결과를 Valente[2] 및 참고 문헌[5]의 비례의 법칙을 이용하여 유효한 직경 1m까지의 경우에 대해서까지 해석 결과를 확장하여 구경에 따른 반사경의 종류적 특성을 파악하였다.

II. 본론

주경의 해석 모델로 플랫 백 반사경, 싱글 아치 반사경, 더블 아치 반사경, 벌집 샌드위치 반사경이 고려되었다. 반사경은 f/2로 직경 및 내경이 각각 300mm, 30mm로 물질은 위성 광학계에 많이 사용되는 저 열팽창의 제로더(Zerodur)를 사용하였다.

본 논문에서는 NASA Ames SIRTF의 최적화 연구결과 및 Valente의 연구결과를 바탕으로 각 반사경의 형상을 구성하였다. 각 반사경 모델의 형상 최적화 작업은 반사경 뿐만 아니라, 반사경을 기계적으로 지지하여 주는 지지 판(Backing plate)과 반사경과 지지판 사이의 연결 구조물(flexure)을 동시에 고려하여야 하므로, 본 연구에서는 물질 및 직경의 변화에 따른 반사경 형상의 최적화 작업은 수행하지 않았다. 따라서, 본 논문에서 사용한 각 모델은 Valente의 직경에 따른 반사경의 무게 예상 값과 차이를 보이고 있어, 각 모델의 해석 결과를 비례의 법칙을 이용하여 Valente의 예상 무게를 갖는 반사경의 경우의 값으로 환산하여 기계변형 및 광학적 효과를 서로 비교하였다.

플랫 백 미러 (Flat back mirror)	싱글 아치 미러 (Single Arch Mirror)	더블 아치 미러 (Double Arch Mirror)	벌집 미러 (honey-comb mirror)
			

III. 결론

분석 결과 광 축 방향의 중력에 의하여는 반사경은 평행 강체 이동, 초점이동 및 구면수차의 형태가 주를 이뤘으며, 온도 변화에 의한 기계 변형 또한 광 축 방향의 중력에 의한 결과와 유사한 형태를 보였다. 즉, 광 축 방향의 중력에 잘 설계한 반사경은 열 변형에 의한 강한 반사경이 되는 것을 의미한다.

더 나아가, 실제 광학계를 형태로 구성할 경우, 주경의 평행 강체 운동 및 기울기 및 구면수차 형태의 왜곡은 주로 상면의 광학 파면상의 초점이동을 이동시키는 효과를 가지고 있어, 자동초점기능(Focusing mechanism)을 구현할 경우 주경에 의한 대부분의 효과를 제거할 수 있다.

본 논문에서는 또한, 비례의 법칙 및 Valente의 무게 예상 공식을 사용하여 직경이 300~1000mm까지의 반사경의 왜곡을 추정하여 보았으며, 추정 결과 직경 300mm까지는 모든 모델이 300~450mm까지는 더블 아치와 벌집 샌드위치 반사경이, 450mm이상에서는 벌집 샌드위치 반사경이 통상적인 요구 조건인 /20 RMS을 만족하였으며 다른 반사경의 경우 열 제어가 필요하다는 것도 알았다.