

위성용 대구경 반사경의 광 기계변형 연구

이준호*

한국과학기술원 인공위성연구소

④ 305-701 대전 유성구 구성동 373-1번지

염태경 · 이안솔 · 윤성기

한국과학기술원 기계공학과

④ 305-701 대전 유성구 구성동 373-1번지

(2001년 9월 10일 발송, 2002년 1월 24일 수정본 발송)

지구관측위성의 해상도가 정밀해짐에 따라 광학 탑재체 즉 카메라의 구경이 대구경화 되고 있으며, 이에 따라 발사 및 운용 환경에서 주어진 광학성능을 만족하는 설계/가공/조립과 함께 광학계의 경량화가 주요 요구 사항이 되어왔다. 반사경은 수차 및 광경로 등의 광학적 이유와 가공성 등의 이유로 대구경 광학계에서 사용되고 있으며, 위성용 광학계의 경량화의 상당 부분이 반사경 경량화를 통하여 이뤄지고 있다. 본 논문에서는 직경 30cm의 플랫 백, 싱글 아치, 더블 아치, 벌집 샌드위치 반사경에 대하여 위성용 반사경의 주요 형상 변형 요인을 대표할 수 있는 구조해석과 열 해석을 동시에 수행하여 각 반사경의 변형을 구하였고 광학 성분(Zemike 다항식)과 이의 효과를 분석하였다. 더 나아가, 이러한 결과와 비교의 범칙 및 Valente의 무게 예상 공식을 사용하여 직경이 300~1000mm까지의 반사경의 기계변형을 추정하였으며, 이를 바탕으로 네 가지 모델의 적용 가능 구간 및 자동조정기능을 적용하였을 때의 성능향상을 계산하였다.

주제어 : optical instrumentation.

I. 서 론

위성을 이용한 원격탐사에 사용되는 지구관측 탑재체는 물론 위성용 천문 망원경의 개발에 있어, 광학계는 최절연계능을 갖도록 설계하는 것이 일반적이고, 따라서 광학계의 구경은 요구되는 해상도 및 광량 집중도에 의해 결정되어진다. 지구관측탑재체의 경우 군사 목적의 정밀 관측을(적어도 잠재적으로) 목표로 하고 있어 해상도가 1m이하로 정밀해지고 있고,^[1] 이에 따라 광학탑재체 즉 카메라의 구경이 대구경화 되고있다. 예로 고도 681 km에서 해상도 1 m(혹백)/2 m(칼라)의 영상을 촬영하는 IKONOS 위성 카메라의 구경은 70 cm에 달한다.

이러한 대구경 위성 카메라는 기본적으로 위성발사 및 우주 환경에서의 주어진 광학 성능을 만족시키기 위하여 설계, 조립 및 제작에 상당한 주의가 주워진다. 여기서 더 나아가 인공위성의 탑재체의 경우 발사비만 고려하여도 평균적으로 kg 당 \$10,000~20,000나 되어 대구경 광학계의 설계 및 제작 시 경량화가 강조되고 있다. 반사경이 70 cm인 경우 형태에 따라 무게가 11~87 kg(표 1)^[2]로 차이가 나므로 그 영향은 크다고 할 수 있고, 더 나아가 무게의 제약에 따른 발사체 선정과 탑재체 및 위성 전체의 기계 진동 및 구조 설계에 어려움이 따른다. 따라서, 광학성능 요구조건을 만족하는 대구경 광학계의 경량화는 우주용 광학계의 개발에 있어 주요 요구 조건 중에 하나가 되고 있으며, 광학계의 경량화는 상당 부분 반사경 경

량화를 통하여 이뤄지고 있다.

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,^[3-5] 비산한 모델에 대한 수학적 해석을 Vukobratovich가 수행하였고,^[6] 국내에서는 보현산 천문대의 주경 설계에 관한 연구가 진행된 바 있다.^[7] 반사경의 열 해석과 관련하여, Pearson은 직경 7.5 m 벌집 형태의 주경의 열 해석을 수행하였으며,^[8,9] Appelwhite는 직경 35 cm의 싱글 아치(Single Arch) 형태의 Mars Observer Camera에 대하여,^[10] Pepi는 벌집 형태의 반사경에 대한 수학적 해석을 제시하였다.^[11]

본 논문에서는 NASA Ames SIRTf의 연구에서 사용되었던 싱글 아치, 더블 아치, 벌집 샌드위치 반사경과 비교 대상으로 플랫 백 반사경의 4가지 형태의 직경 300 mm 반사경에 대하여 위성용 주경의 주요 형상 변형 요인을 대표할 수 있는 구조해석과 열 해석을 포함한 다음의 해석을 동시에 수행함으로써, 기존의 연구 결과를 통합 및 보완하였다.

표 1. 반사경의 종류에 따른 무게 예상 공식 및 직경 70cm의 예^[2]

종 류	무게 공식	예상무게
Conventional solid	$W = 246D^{2.92}$	W = 86.8 kg
Contoured mirrors	$W = 106D^{2.71}$	W = 40.3 kg
Structured Mirrors (Sandwich)	$W = 68D^{2.90}$	W = 24.2 kg
Beryllium Mirrors	$W = 26D^{2.31}$	W = 11.4 kg

*E-mail: jhl@satrec.kaist.ac.krr

- a. 주경의 광 축 방향(수직방향)으로의 증력에 의한 변형
- b. 주경의 광 축에 수직인 방향(수평방향)으로의 증력에 의한 변형
- c. 광 축 방향 온도 기율기에 의한 열적 변형
- d. 반지름 방향 온도 기율기에 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^[3]의 비례의 법칙을 이용하여 유효한 직경 1 m까지의 경

우에 대해서까지 해석 결과를 확장하여 구경에 따른 반사경의 종류적 특성을 파악하였다.

II. 주경의 형상

주경의 해석 모델로 플랫 백 반사경, 싱글 아치 반사경, 더블 아치 반사경, 벌집 샌드위치 반사경이 고려되었다. 반사경은 f/2로 직경 및 내경이 각각 $\Phi 300$ mm, $\Phi 60$ mm로 물질은 위성 광학계에 많이 사용되는 저 열팽창의 제로더(Zerodur)를 사용하였다. 제로더의 기계적 물성치는 표 2에 정리되어 있다.

본 논문에서는 NASA Ames SIRTf의 최적화 연구결과,^[3-5] Valente의 연구결과^[6]를 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

표 2. 제로더(Zerodur)의 물성치

물성치	값
Young's modulus	90.6 GN/m ²
포아송 수(Poisson's ratio)	0.24
밀도	2.53 g/cm ³
열팽창 계수	0.05 ppm/°C

표 3. 4가지 반사경 모델의 형상 및 특성(R은 주경의 반지름)

모 델	형 상	단 면
플랫 백 (Flat back mirror) 무게: 7.8 kg 지지: 0.6R ^[8]		
싱글 아치 (Single Arch Mirror) 무게: 3.8 kg 지지: 0.3R ^[5]		
더블 아치 (Double Arch Mirror) 무게: 4.8 kg 지지: 0.55R		
벌집 샌드위치 무게: 4.4 kg 지지: 0.6R		

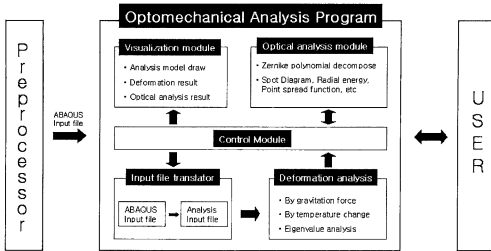


그림 1. 광기계 해석 프로그램의 개념.

따른 반사경 형상의 최적화 작업은 수행되지 않았다. 단 최적화 했을 경우 각 모델은 Valente¹²⁾에 의해 추정되는 무게를 갖는다고 가정하고, 각 모델의 해석 결과를 비례의 법칙을 이용하여 Valente의 예상 무게를 갖는 반사경의 경우의 값으로 환산하여 기계변형 및 광학적 효과를 서로 비교하였다.

표 3에 4가지 모델의 형상, 단면, 무게 및 지지점의 위치를 정리하여 놓았다. 각 모델은 지정된 위치의 고정된(Clamped) 3점 지지를 가정하였다.

III. 해 석

전처리기(Preprocessor)로 I-DEAS를 사용하였고, 해석을 위하여 ABAQUS 및 자체적으로 개발된 프로그램¹¹⁾을 사용하였다. 그림 1은 자체 개발된 광기계 해석 프로그램¹²⁾의 개념을 보여주고 있다.

계산된 기계 변형은 광학적 의미를 갖고 있는 RMS 및 Zernike 다항식으로 분해되어 변형(수차)의 형태를 알 수 있었다. 기계적 변형을 광학적 변형으로 변형 시 사용된 기준 파장으로 632.8 nm를 사용하였다.

해석의 내용으로는 아래의 다섯 가지가 수행되었으며, 축 방향 온도 기울기에 의한 열적 변형은 주경의 초기온도를 25°C로 하고 주경의 뒷면이 그대로 25°C로 남아 있고 앞면의 온도가 1°C만큼 변할 때의 온도 분포에 대한 열적 변형을 나타낸다. 마찬가지로 반지를 방향 온도 기울기에 의한 열적 변형의 경우 주경의 초기온도를 25°C로 하고 주경의 안쪽면이 그대로 25°C로 남아 있고 바깥쪽면의 온도가 1°C만큼 변할 때의 온도 분포에 대한 열적 변형을 나타낸다. 그리고 주경의 전체 온도 변화에 의한 열적 변형은 초기온도를 25°C일 때 주경의 전체 온도가 1°C만큼 변할 때의 온도 분포에 대한 열적 변형을 나타낸다

- 주경의 광 축 방향(수직방향)으로의 중력에 의한 변형
- 주경의 광 축에 수직인 방향(수평방향)으로의 중력에 의한 변형

- 광 축 방향 온도 기울기에 의한 열적 변형
- 반지를 방향 온도 기울기에 의한 열적 변형
- 주경의 전체 온도 변화에 의한 열적 변형

IV. 해석 결과 및 논의

각 반사경의 중력 및 열 온도 변화에 따른 변형은 RMS 및 Zernike 다항식으로 분해되어 각 변형의 전체 값 및 변형의 종류를 알 수 있으며, 표 4에 정리되어 있다. 그림 2는 광 축 방향으로는 중력에 의한 반사경 변형을 보여 주고 있다.

표 4로부터 광 축 방향의 중력에 의한 각 반사경의 형상 변형은 모든 모델에서, 평행 강체 이동(Z1, Piston)과 곡률의 변화(Z4)와 구면수차(Z11)의 형태로 이뤄짐과, 광 축과 수직인 방향의 중력에 의해서는 각 반사경이 강체 기울임(Z2, Tilt)과 코마(Z8, Coma)의 형태로 이루어져 있는 형태로 변형을 발생시킨다는 것을 알 수 있다. 세가지 경우 온도 변화에 의한 기계 변형은 광 축 방향의 중력에 의한 효과와 상당히 유사하게 평행 강체 이동(Z1, Piston)과 곡률의 변화(Z4)와 구면수차(Z11)의 형태로 이뤄져 있으나, 각 구성 형태간의 비와 상대적 크기는 차이를 보이고 있다(표 4).

실제 광학계를 구성할 경우, 반사경의 기계 변형은 최종 광학 파면의 왜곡에 영향을 준다. 우주용 망원경으로 가장 많이 사용되는 카세그레인 망원경의 경우, 주경의 평행 강체 운동은 주경 및 부경의 거리 변화를 발생시켜, 광학 파면상의 초점이동을 발생시키고, 주경의 기울기는 광면 상의 상의 이동(Tilt)과 코마와 함께, 약간의 초점이동 및 비점수차를 발생시킨다. 또한, 주경의 곡률 변경 변화는 초점을 이동시켜 실제 광학계의 구성 관점에서는 주경의 강체 이동과 동일한 효과를 가지고 있다. 표 5에 $\Phi 300$ mm의 한 카세그레인 망원경의 주경 변형에 따른 광파면의 왜곡을 정리하여 놓았으며,¹³⁾ 주경의 기계적 변형에 의한 파면 왜곡은 초점이동, 코마 및 구면수차의 형태로 이뤄져 있으며, 이 중 초점 이동 및 구면수차는 상면의 이동으로 상당히 제거할 수 있다는 것을 알 수

종류	전체 형상	Contour
플랫 백 반사경		
싱글 아치 반사경		
더블 아치 반사경		
벌집 샌드위치 반사경		

그림 2. 광 축 방향으로의 중력에 의한 각 반사경의 변형.

있다.

300 mm급 반사경의 해석결과를 바탕으로 하여 구경이 점점 커질 때 파면오차의 크기가 어떤 양상으로 변화하는지 알아보기 위하여 참고문헌⁽⁶⁾의 비례의 법칙과 Valente의 무게 예상공식⁽⁷⁾을 사용하였다.

$$RMS = \left[\frac{r}{r_{ref}} \right] \left[\frac{E_{ref}}{E} \right] \left[\frac{A}{A_{ref}} \right] RMS_{ref} \quad (1)$$

여기서 RMS는 평균근호제곱 파면오차를 나타내고 A는 반사경의 단면적을 나타낸다. 그리고 E는 영의 계수(Young's modulus), ρ 는 밀도를 나타내며 아래 첨자 "ref"는 참조가 되는 반사경 형상과 관련된 값이나 변수를 나타낸다. 같은 재료

를 사용한다고 가정할 경우 반사경 구경이 증가함에 따라 RMS 파면오차는 (2)식과 같이 증가하게 된다.

$$RMS = \left[\frac{A}{A_{ref}} \right] RMS_{ref} \quad (2)$$

여기서 각 반사경은 구경의 변화에 따라 각 최적화 작업을 거쳐 무게 W는 직경 D의 함수로 주워진다(Valente의 공식).

$$W = CD^Z \quad (3)$$

각 반사경의 형상에 따른 계수 C와 지수 Z의 값은 표 1에 있다. 각 반사경 모델은 직경의 변화에 따라 형상이 변화하여도 닮은 꼴이므로, 식 (2)와 (3)으로부터 식 (4)를 유도할 수

표 4. 중력 및 온도 변화에 따른 반사경의 변형(단위: λ@632.8nm)

Type	Loading	RMS	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11
Flat back mirror	Vertical g	1.5e-02	1.5e-02	1.4e-19	3.9e-20	9.6e-04	6.5e-21	2.9e-19	3.8e-20	-3.4e-20	3.4e-06	6.8e-04	-4.3e-05
	Horizontal g	8.3e-02	1.8e-05	-1.3e-20	5.4e-19	-3.8e-06	7.2e-03	1.4e-03	4.5e-20	-7.3e-20	7.2e-20	-8.2e-20	-2.9e-06
	Axial temp	6.1e-03	1.7e-03	2.2e-22	-9.4e-23	6.0e-03	1.5e-20	-2.0e-20	-6.8e-21	1.7e-20	1.1e-05	-4.2e-06	-2.1e-05
	Radial temp	1.9e-03	-1.9e-03	-1.7e-20	-3.6e-21	4.1e-04	1.9e-21	-3.5e-20	-4.9e-22	-2.4e-21	4.5e-07	-9.2e-05	4.9e-05
	Bulk temp	2.8e-03	-2.8e-03	-3.5e-20	-5.3e-21	8.9e-04	-5.2e-23	-6.5e-20	-7.9e-21	-1.4e-21	7.8e-07	-1.7e-04	-1.2e-04
Single arch mirror	Vertical g	1.3e-02	1.3e-02	8.8e-20	-8.8e-21	2.8e-03	-4.4e-21	7.8e-20	-8.2e-21	8.1e-21	-7.2e-09	2.7e-04	-1.8e-04
	Horizontal g	2.5e-02	2.23e-06	-1.7e-19	1.4e-18	8.7e-07	2.2e-02	1.6e-03	-4.7e-20	-3.4e-19	3.5e-19	-1.3e-19	-1.5e-07
	Axial temp	1.2e-02	8.6e-03	-1.2e-20	-2.3e-20	7.8e-03	8.1e-21	-1.5e-20	-9.7e-21	1.3e-20	6.2e-09	-8.3e-07	8.8e-04
	Radial temp	3.6e-03	2.8e-03	-7.7e-21	1.2e-21	2.2e-03	-6.1e-21	-2.0e-21	5.2e-21	1.2e-20	4.0e-09	4.3e-06	-3.4e-05
	Bulk temp	2.3e-03	-2.3e-03	-2.8e-20	6.6e-22	5.3e-04	-6.1e-21	-4.7e-20	-2.3e-22	-5.9e-21	4.8e-10	-1.2e-04	-9.0e-05
Double arch mirror	Vertical g	8.8e-03	8.6e-03	2.2e-19	3.9e-21	1.1e-03	1.7e-20	3.3e-19	3.1e-21	1.8e-20	4.5e-09	8.6e-04	-1.0e-04
	Horizontal g	7.9e-03	7.78e-08	2.4e-19	4.7e-19	-3.3e-08	6.7e-03	2.1e-03	8.5e-20	5.5e-20	-7.8e-20	-1.2e-19	7.6e-09
	Axial temp	7.1e-03	3.3e-03	2.1e-20	-5.9e-21	6.1e-03	-1.5e-20	2.4e-20	1.2e-21	1.5e-20	1.0e-08	6.9e-05	6.0e-04
	Radial temp	1.7e-03	-1.5e-03	-6.3e-20	-6.9e-22	7.9e-04	-1.4e-21	-1.0e-19	2.8e-21	-1.8e-20	2.3e-09	-2.8e-04	6.9e-05
	Bulk temp	2.8e-03	-2.4e-03	-1.0e-19	-6.1e-21	1.7e-03	-6.0e-21	-1.6e-19	6.0e-21	-2.5e-20	4.8e-09	-4.4e-04	-3.1e-04
Honeycomb mirror	Vertical g	9.4e-03	9.3e-03	-7.6e-20	-1.6e-19	1.0e-03	2.4e-19	-1.6e-19	1.9e-21	-3.1e-21	4.6e-05	7.3e-04	7.6e-06
	Horizontal g	5.9e-03	-1.8e-05	-1.7e-19	3.9e-19	5.5e-07	-5.0e-03	1.2e-03	4.3e-20	-1.5e-20	8.6e-21	6.8e-20	2.5e-07
	Axial temp	6.8e-03	2.0e-03	1.9e-20	-5.0e-22	6.6e-03	-1.7e-20	4.9e-21	5.4e-21	-4.6e-21	-3.3e-06	1.2e-05	-1.3e-05
	Radial temp	2.0e-03	-1.8e-03	1.5e-20	3.1e-20	9.0e-04	-4.8e-20	3.4e-20	9.3e-21	7.5e-21	-4.2e-06	-1.6e-04	-3.3e-05
	Bulk temp	2.9e-03	-2.7e-03	3.1e-20	5.6e-20	1.4e-03	-8.6e-20	6.3e-20	2.2e-20	9.0e-21	-1.7e-05	-2.8e-04	-2.1e-04

표 5. Φ300 mm 카세그레인 망원경의 주경 변형에 따른 광파면의 왜곡(예) (단위: @632.8 mm)

Terms	양	RMS	P-V	Zernike Polynomials								
				Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	
거리이동 (Piston)	-0.01 mm	0.113	0.385	0	0	-0.274	0	0	0	0	0	0.013
중심이동 (Decenter)	-0.1 mm	0.133	1.022	-0.36	0	-0.296	0	0	-0.179	0	0	0.012
기울기 (Tilt)	3 min	0.075	1.281	0	0.45	-0.04	0.016	0	0	0.222	0	0.012
곡률 (Radius)	-0.02 %	1.129	3.839	0	0	2.635	0	0	0	0	0	-0.002
	0.02%	1.154	3.925	0	0	-2.713	0	0	0	0	0	0.026

있어 직경의 변화에 따른 각 반사경의 변형을 예상할 수 있다.

$$RMS = \left[\frac{D}{D_{ref}} \right]^{\frac{2}{3}} RMS_{ref} \quad (4)$$

단, 여기서 해석된 각 반사경 모델은 부재가 서로 다르고, Valente의 공식으로 예상한 것과도 차이가 나므로 이 Valente의 공식으로 예상되는 부재를 갖는 모델을 기준으로 삼기 위하여, 계산된 RMS값을 예상되는 부재(M_{ref})와 실제 모델의 부재(M_{cal})의 비율 곱한 값을 RMS_{ref} 으로 사용하였다.

$$RMS_{ref} = \left[\frac{M_{ref}}{M_{cal}} \right] RMS_{cal} \quad (5)$$

그림 3는 식 (4) 및 (5)을 사용하여 예측한 직경 변화에 따른 반사경의 변형 RMS 값을 보여주고 있으며, 그림 4는 반사경이 망원경의 주경으로 사용되고, 자동 초점면 이동(Focusing Mechanism)을 적용한 경우의 RMS 값을 보여주고 있다.

통상적인 우주 망원경의 경우 주경의 형상 변화에 의한 파

면 왜곡에 대한 허용 정도가 λ/20 RMS 보다 작게끔 되어 있다(예로 다목적위성2호의 주경은 λ/35 RMS의 가공 정밀도를 가지고 있다). 광 축 방향의 중력에 의한 효과만을 고려하였을 경우, 그림 3을 보면, 직경 350 mm 정도까지는 모든 4가지 모델이, 350-550 mm의 범위에서는 다름아치 및 벌집 샌드위치 반사경이, 직경 550-750 mm 이상에서는 벌집 샌드위치 반사경만이 λ/20 RMS 조건을 만족하고 있으며, 직경 750 mm 이상에서는 일반적인 벌집 샌드위치 반사경으로도 λ/20 RMS 조건을 만족할 수 없다는 것을 알았다.

열적 변형에 의한 유향요소해석 시 1°C의 온도변화에 대하여 해석을 하였지만 실제 우주상에서의 열적 환경조건은 이보다 큰 온도차를 가질 수가 있으며 따라서 온도차가 증가함에 따라 RMS 파면오차가 얼마나 증가하는 지를 살펴보는 것이 중요하다. 열 변형의 경우, 광 축 방향의 온도 변화에 가장 민감한 것으로 나타나며, 주경의 1°C의 온도변화가 광 축 방향의 중력과 비슷한 효과(그림 3)를 갖고 있으므로 광 축 방향으로 온도 변화(Thermal gradient)가 발생하지 않도록 설계/제어하지 않으면 주경의 변형에 상당한 영향을 줄 수 있다.

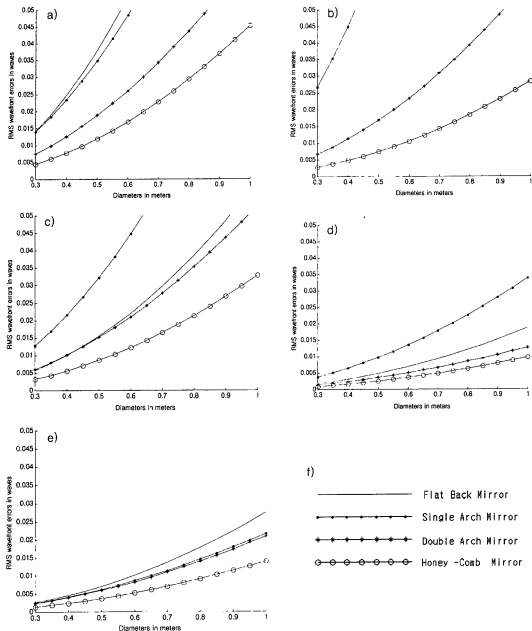


그림 3. 직경 변화에 따른 각 반사경의 변형 RMS 값 (단위: $\lambda@632.8$ nm). a) 광 축 방향의 중력에 의한 변형, b) 수직 방향의 중력에 의한 변형, c) 광 축 방향의 온도 변화(1°C)에 의한 변형, d) Radial 방향의 온도 변화(1°C)에 의한 변형, e) 전체 온도 변화(1°C)에 의한 변형, f) 반사경 종류.

이 또한 열팽창계수가 매우 작은 재료들을 사용하였으므로 다른 재료를 사용할 경우 파면오차가 이 경우보다 훨씬 커질 수가 있다. (본 연구에서는 온도 변화에 의한 반사경만의 변형을 고려하였을 뿐이고, 반사경과 경통 및 렌즈의 왜곡 등을 동시에 고려하면 다른 결과를 줄 수 있다.)

그림 4에서 보여지듯 자동 초점면 이동(Focusing Mechanism)을 가지고 있는 경우에는, 광 축 방향의 중력의 효과에 의한 반사경의 변형은 네 모델에 대하여 모두 $\lambda/20$ RMS보다 작게끔 되어있고, 주경에 대한 별다른 열 제어 없이도 만족스러운 결과를 얻을 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 플랫 백 반사경, 싱글 아치 반사경, 더블 아치 반사경, 벌집 샌드위치 반사경의 네 가지 모델에 대한 중력 및 온도 변화에 대한 기계적 해석을 위한 요소법을 통하여 해석하고, 해석 결과를 RMS 및 Zernike 다항식으로 분해하여 분석하였다.

분석 결과 광 축 방향의 중력에 의하여는 반사경은 평행 강제 이동, 초점면 및 구면수차의 형태가 주를 이뤘으며, 온도 변화에 의한 기계 변형 또한 광 축 방향의 중력에 의한 결과

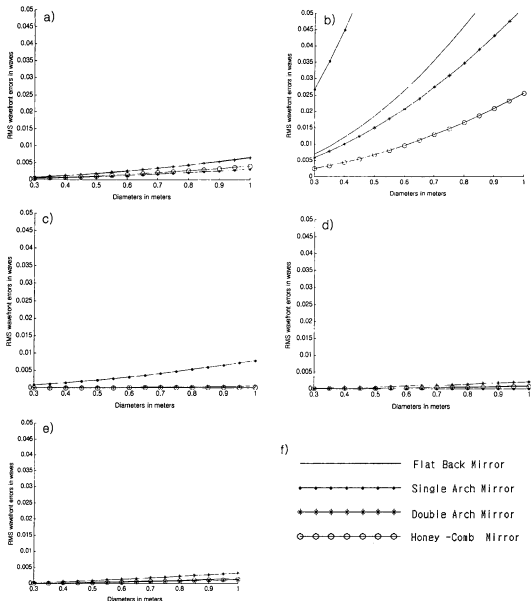


그림 4. 자동 초점면 이동 적용 시 직경 변화에 따른 각 반사경의 변형 RMS 값 (단위: (@632.8nm). a) 광 축 방향의 중력에 의한 변형, b) 수직 방향의 중력에 의한 변형, c) 광 축 방향의 온도 변화(1°C)에 의한 변형, d) Radial 방향의 온도 변화(1°C)에 의한 변형, e) 전체 온도 변화(1°C)에 의한 변형, f) 반사경 종류.

와 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 300~1000 mm까지의 반사경의 왜곡을 추정하여 보았으며, 추정 결과 직경 ~350 mm까지는 모든 모델이 350~450 mm까지는 더블아치와 벌집 샌드위치 반사경이, 450~750 mm 이상에서는 벌집 샌드위치 반사경이 통상적인

요구 조건인 $\lambda/20$ RMS를 만족하였으며, 750 mm 이상에서는 통상적인 벌집 샌드위치 반사경도 자동초점기능의 기능이 없는 통상적인 요구 조건인 $\lambda/20$ RMS를 만족할 수 있음을 알았다.

더 나아가, 자동 초점 기능(Focusing mechanism)을 가지고 있는 경우 모든 반사경이 광 축 방향의 중력에 대하여 $\lambda/20$ RMS 조건을 만족하였으며, 온도 변화에 의해 발생하는 수차도 거의 제거할 수 있음을 알았다.

참고문헌

[1] 박성동, “고해상도 위성영상과 지구관측위성 개발동향,” 향

공유주 무기체계 세미나, 1999.

[2] T. M. Valente, "Scaling laws for light-weight optics," *Proc. SPIE*, vol. 1340, pp. 47-66, 1990

[3] M. K. Cho, R. M. Richard, and D. Vukobratovich, "Optimum mirror shapes and supports for light weight mirrors subjected to self-weight," *Proc. SPIE*, vol. 1167, pp. 2-19, 1989.

[4] M. K. Cho and R. M. Richard, "Structural and optical properties for typical solid mirror shapes," *Proc. SPIE*, vol. 1303, pp. 78-95, 1990.

[5] M. K. Cho, R. M. Richard, and E. A. Hileman, "A comparison of performance of lightweight mirrors," *Proc. SPIE*, vol. 1340, pp. 67-81, 1990.

[6] T. M. Valente and K. Vukobratovich, "A comparison of the merits of open-back, symmetric sandwich, and contoured back mirrors as light-weighted optics," *Proc. SPIE*, vol. 1167, pp. 20-36, 1989.

[7] I. K. Moon, I. W. Han, B. S. Chang, H. K. Kim, and M. K. Cho, "Design study of a KAO telescope with a 1-m double arch primary mirror," *Proc. SPIE*, vol. 2542, pp. 154-166, 1995.

[8] E. Pearson and L. Stepp, "Response of large optical mirrors to thermal distributions," *Proc. SPIE*, vol. 748, pp. 215-228, 1987.

[9] E. Pearson, "Thermo-elastic analysis of large optical systems," *Critical Review Vol. CR43, Optomechanical Design*, ed. P. R. Yoder, Jr., pp. 123-130, 1992.

[10] R. W. Applewhite, "The effects of thermal gradients on the Mars Observer Camera primary mirror," *Proc. SPIE*, vol. 1690, pp. 376-386, 1992.

[11] J. W. Pepi, "Analytical predictions for lightweight optics in a gravitational and thermal environment," *Proc. SPIE*, vol. 748, pp. 172-179, 1987.

[12] W.-S. Lee, B.-K. Kim, K.-C. Kwon, J.-H. Cho, T.-K. Uhm, K.-S. Park, and J.-h. Lee, E. D. Kim, and S.-K. Youn, "Development of an optomechanical analysis software," *한중 대구경 워크샵*, 2001.

[13] 이준호, 김용민, 이용식, 유상근, 김이을, 최영환, 박동준, "소형 위성용 고해상도 광학카메라 광학설계," *한국광학회지*, vol. 11, no. 1, pp. 6-12, 2000.

An optomechanical study of large mirrors for satellites

J. H. Lee[†]

KAIST Satellite Technology Research Center, Daejeon 305-701, KOREA

[†]*E-mail: jhl@satrec.kaist.ac.kr*

T. K. Uhm, W. S. Lee, and S. K. Youn

KAIST Mechanical Engineering Department, Daejeon 305-701, KOREA

(Received September 10, 2001 ; revised manuscript received January 24, 2002)

Optical payloads for earth-observation satellites become bigger as the required resolution becomes finer. For example, the diameter of the primary mirror of IKONOS, which has ground sampling distances of 1m/4m in panchromatic/multi spectral bands, is about 700 mm. As the size of optical payload becomes bigger, the light-weighting of the mirrors becomes more significant. This paper presents the FEM results of the following four mirror types of 300 mm diameter under gravity release and temperature changes: flat back mirror, single arch mirror, double arch mirror, and honeycomb sandwich mirror. Furthermore, this paper extends the FEM results to larger mirrors up to the diameter of 1m based on a general scaling law and Valenete's equation.

Classification code : SM.020.