

대구경 광학계의 팽창 전개용 원형 박막 두께 최적화에 관한 연구

A study on thickness optimization of inflatable circular membrane for large optical system

소민관¹, 조지현¹, 이준호², 윤성기^{1,2}

¹한국과학기술원 기계공학과, ²한국과학기술원 인공위성 연구센터

veritas@kaist.ac.kr

최근 들어 지구 관측 위성 및 천문 관측 위성의 정밀한 해상도를 얻기 위한 대안으로 대구경 광학계에 대한 요구가 커져 왔다. 이는 기존의 광학계와 다른 방식으로 광학면을 구성해야 할 필요성이 제시되며, 크게 두 가지의 방법으로 전개용 광학 시스템(Deployable optical system)과 팽창용 광학 시스템(Inflatable optical system)을 제안된다. 이 두 방법은 기존의 방법에 비해 광학계의 부피와 무게를 크게 줄일 수 있다. 게다가 같은 해상도를 가지는 광학계를 구현할 경우, 광학면의 크기를 증가로 인해 위성을 현재보다 높은 궤도에서 운영할 수 있으며 이로 인해 위성의 수명을 늘릴 수 있다.

일반적으로 전개용 광학 시스템의 경우 광학면의 지름이 4~10m (large system)일 때 주로 사용되며, 팽창용 광학 시스템의 경우 이보다 좀 더 큰 10m 이상(ultra-large system)의 광학계에 주로 사용될 것으로 예상된다. 현재 전개용 광학 시스템의 경우, 이를 망원경(NGST)에 적용시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반면 팽창용 광학 시스템의 경우에는, 통신용 안테나(IAE: Inflatable antenna experiment)의 범주에서만 진행되어 왔다.^[1] 본 연구에서는 팽창용 광학 시스템에서 광학 면의 형상을 조절하여 이상적인 광학 면과의 오차 범위를 줄임으로써 가시 광선 영역에서의 적용 가능 여부를 살펴보고자 한다. 팽창 구조물(Inflatable structure)은 광학계에 아래 그림과 같은 원리로 사용된다. 원형의 두 개의 얇은 박막을 붙인 다음, 두 개의 박막 사이에 압력을 가해 박막을 부풀린다. 두 박막 중 하나는 빛을 통과시키는 창 박막(window membrane)으로써 사용하며, 다른 하나는 두께 최적화의 대상인 거울 박막(mirror membrane)으로 사용된다.

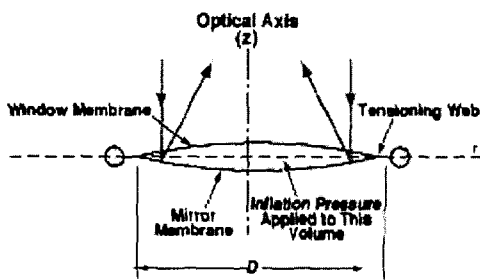


그림 1 팽창 전개용 광학계의 개념도

설계 목표로서는 주 반사경의 크기가 3 m, 가해진 내부 압력은 0.322 Pa 이고 F-number가 10.03인 경우에 광학적 오차의 최소화로 설정하며, 광학적인 오차는 FEM 해석 결과(Abaqus)로부터 광학적인 성능을 제니케(Zernike) 다항식을 이용해 표현한다.^[2] 우선 광학적 오차를 보상하는 대상을 기존의 연구에서처럼 광학계 전체 시스템이 아닌 주반사경 즉, 거울 박막으로 제한한다. 이 경우, 이상적인 광학면은 포물면으로 설정되며, 광학면 오차의 제곱 평균 근호 값은 제니케 다항식에서 강체 운동을 포함한 값이다.

박막의 두께 분포를 일정한 경우, 선형적인 경우, 짝수차 다항식 및 비구면 표현(aspherical expression:

$$k(r) = A_s \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - c^2 r^2}} + A_0 + A_1 r^2 + A_2 r^4 + \dots + A_i r^{2i}$$

)을 함수를 이용하여 각 항에서의 계수를 최적화의 변수로 설정한 경우와 함수를 이용하지 않고 임의의 분포를 가지는 경우로서 반경방향 박막의 두께 하나하나를 최적화의 변수로 설정한 경우로 나누어진다. 최적화 된 후의 제곱 평균 근호 값은 약 25~300 μ m의 값을

가지며, 이는 IAE의 프로토타입의 약 10% 까지 줄어든 결과를 보여준다.^[3] 게다가, 비구면 표현식에서 r^4 (A_1, A_0, A_1, A_2)까지 포함된 경우 변형 후 광축 방향에서 포물면과의 일정한 차이를 유지하는 구간($0 \sim 0.5 [r/R]$)이 발견되었으며, 이 구간에서 최적화를 수행하였을 경우 약 $0.75\mu\text{m}$ 의 제곱 평균 근호 값을 가졌다.

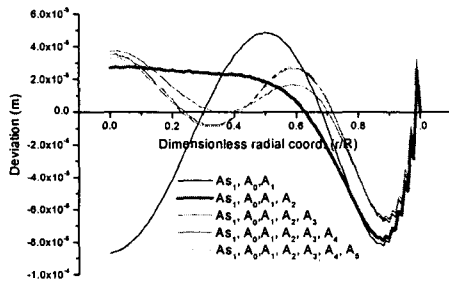


그림 2 변형 후 거울 박막의 형태와 이상적인 포물면과의 광축 방향의 차이

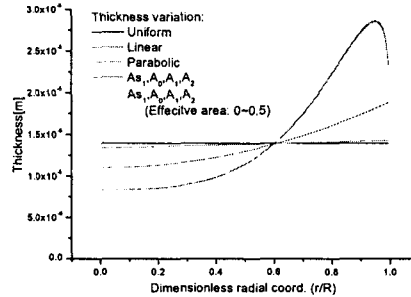


그림 3 최적화 후 박막의 두께 분포 (강체 운동을 포함하였을 경우)

또한, 광학적 오차를 보상하는 대상이 광학계 전체 시스템, 주로 부반사경에서 이루어지는 경우를 고려한다. 따라서 광학적으로 쉽게 보정되는 강체 운동을 제외한 제곱 평균 근호 값을 목적 함수로 정의한 뒤 이를 최적화한다. 최적화 과정에서 광학적 오차를 줄이도록 설정된 유효 면적은 일반적인 광학계에서 적용되는 것처럼 $0.15 \sim 0.9 [r/R]$ 로 정의된다. 이 경우, 변형 후의 거울 박막의 형상이 포물면이 될 필요는 없으며 강체 운동을 포함한 오차가 훨씬 커진 경우라 하더라도 포함하지 않은 경우에는 작아지는 결과를 보인다. 아래 표에서 제시된 두께 분포 중에서 강체 운동을 제외한 제곱 평균 근호 값이 약 $10\mu\text{m}$ 이 내에 들어오는 값일 경우 이는 적용 광학을 적용하여 광학적인 오차를 보상할 수 있다. 이와 같이, 팽창용 광학 시스템의 경우 가시 광선 영역에서 쓰이긴 위해서는 광학계 전체에서의 오차를 보상할 필요성이 야기된다.

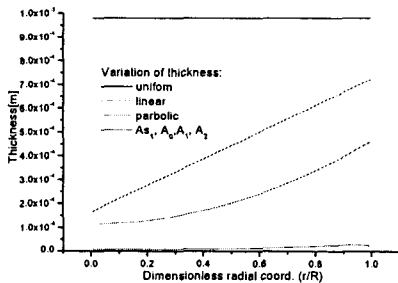


그림 4 최적화 후 박막의 두께 분포 (강체 운동을 포함하지 않을 경우)

Variation of thickness	e_{rms} [m] with rigid body modes	e_{rms} [m] w/o rigid body modes
Uniform	9.175mm	16.654 μm
Linear	8.303mm	6.825 μm
Parabolic	7.253mm	8.111 μm
A_{s1}, A_0, A_1, A_2	81.033 μm	7.272 μm

표 1 최적화 후 제곱 평균 근호 값 (강체 운동을 포함하지 않을 경우)

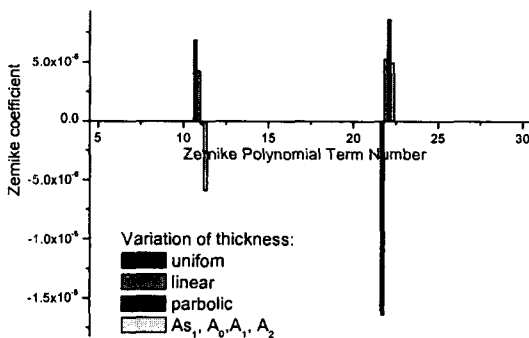


그림 5 최적화 후 각각의 두께 분포에서의 제니케 다항식의 계수 값

참고 문헌

1. "Aviation week and space technology", January 25, 1999
2. Robert J. Noll, "Zernike polynomial and atmosphere turbulence", J. Opt. Soc. Am., 1976, 66(3):207~211
3. G. Grescik and M.M. Mikulas, "Sensitivity study of precision pressurized membrane reflector deformation", AIAA, Vol39, No. 2, pp 308~314, February 2001