

저궤도 지구관측위성의 광학탑재체 지지구조물 설계 연구 A Study on the Optical Bench for LEO Earth Observation Satellite

김경원* · 김진희** · 이주훈** · 진익민** · 김종우***

Kyung-Won Kim, Jin-Hee Kim, Ju-hun Rhee, Ik-Min Jin and Jong-Wo Kim

Key Words : Optical Bench(광학탑재체 지지구조물), Stiffness Analysis(강성해석), Blade(블레이드), Thermal Pointing Error Analysis(열지향오차 해석)

ABSTRACT

This paper is a study on an optical bench satisfying stiffness and thermal pointing error requirements for LEO earth observation satellite. According to shape and stiffness requirements, optical bench type 1 is designed. Because type 1 does not satisfy the thermal pointing error requirement, an optical bench type 2 is suggested. Although the type 2 has better results than type 1, it still does not meet the thermal pointing error requirement. Using the results of optical bench type 1&2, the optical bench type 3 is finally designed, which satisfies both the stiffness and thermal pointing error requirements.

1. 서론

저궤도 지구관측위성은 일반적으로 지상으로부터 최소 수 백 km 이상의 고도에 위치하여 관측을 수행한다. 이 때 위성의 자세는 별추적기와 같은 자세제어 센서들에 의해서 추정되며, 이를 바탕으로 탑재체가 지향하는 지구표면상의 위치를 계산하게 된다. 높은 고도에서의 탑재체의 미세한 지향오차는 지구표면상의 관측위치 오차를 수 m에서 수 km에 이르게까지 발생시키게 되고, 이는 고정밀 지구관측위성의 관측 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 지향오차를 발생시키는 원인으로는 탑재체의 조립/장착 오차, 센서류 자체의 에러 그리고, 궤도상에서의 열하중을 꼽을 수 있다. 이 중에서 열하중에 의한 열지향오차는 궤도나 계절 등에 따라 변화의 정도가 심하여 지향오차를 유발시키는 가장 큰 원인으로 생각할 수 있다. 이러한 열지향오차를 최소화하기 위해 여러 방안이 강구되고 있는데, 주로 탑재체에 직접 자세제어 센서들을 장착하거나 광학탑재체 지지구조물을 만들어 그 곳에 탑재체와 자세제어 센서들을 장착하는 방법이 이용되고 있다[1]. 본 논문에서는 두 가지 방법 중 열지향오차 요구조건

을 만족하는 광학탑재체 지지구조물 설계를 목적으로 한다. 한편, 광학탑재체 지지구조물의 설계시 고려해야 할 또 다른 요구조건으로 강성 요구조건이 있다. 열지향오차는 주로 광학탑재체를 지지하는 지지방법 및 재료와 밀접한 관계가 있는 반면, 강성의 경우 지지방법 뿐 아니라 지지구조물의 형상과도 큰 관련이 있다. 따라서 초기 설계단계에서는 강성 요구조건을 만족시키기 위한 광학탑재체 지지구조물의 형태와 지지방법을 결정한다. 이후 열지향오차 해석과 강성 해석을 수행하여 열지향오차 요구조건과 강성 요구조건을 모두 만족시키는 광학탑재체 지지구조물을 설계한다.

2. 광학탑재체 지지구조물 형상 1

2.1 설계 요구조건

광학탑재체 지지구조물의 설계 요구조건은 Table 1과 같다[2].

2.2 형상

광학탑재체 지지구조물은 크게 플랫폼, 탑재체, 플랫폼 지

* 한국항공우주연구원 위성본체그룹
E-mail : kwkim74@kari.re.kr
Tel : (042) 860-2086, Fax : (042) 860-2003

** 한국항공우주연구원 위성본체그룹

*** 대한항공기술원

Table 1 Shape requirements for optical bench

Stiffness	>40Hz
Thermal pointing error	<0.005deg
Service Temperature	263K~323K

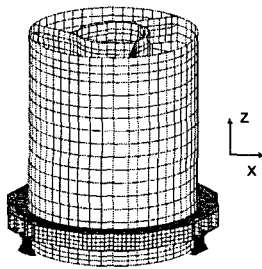


Fig. 1 FEM of optical bench type 1

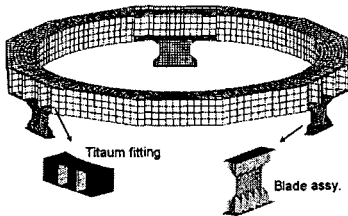


Fig. 2 FEM of optical bench type 1 platform

지부로 구성되어 있으며, 유한요소모델은 Fig. 1과 같다. 플랫폼은 8.1-1/8-0.002P(5056)의 알루미늄 허니콤 심재와 M55J-UD의 복합재 면재로 이루어진 샌드위치 구조물로 이루어져 있다.

탑재체와 플랫폼 지지부가 연결되는 부분에는 Fig. 2와 같이 타이타늄 피팅 구조물이 장착되어 있다. 플랫폼 지지부의 경우 Fig. 2와 같이 3개의 타이타늄 블레이드 구조물로 구성되어 있다.

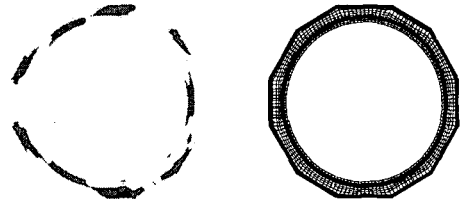
2.3 강성해석

초기 형상으로 강성 해석을 수행하였다. Fig. 1의 유한요소모델을 해석한 결과 첫 번째 고유진동수는 28.2Hz로 설계 요구조건인 40Hz를 만족하지 못하였다. 따라서 강성 증가를 위해 다음과 같은 일련의 과정을 수행하였다.

1. 플랫폼의 면재 두께 증가
2. 플랫폼의 면재에 보강재 추가
3. 블레이드의 형상 변경

먼저 플랫폼의 면재 두께를 증가시켜서 플랫폼의 강성을 증가시켰다. 초기 1.872mm에서 3.744mm로 면재 두께를 2배로 증가시켰다.

다음으로 플랫폼의 면재에 보강재를 추가하였다. 보강위치를 결정하기 위하여 Fig. 2의 유한요소모델을 이용하여 스트레인 에너지분포 해석을 수행하였다. 유한요소모델에서 요소스트레인 에너지는 구조물의 요소에 저장된 탄성에너지의 의미이다. 동해석시 해당 모드에서 탄성에너지가 높은 요



(a) Strain energy(percent of total) (b) Stiffener position
Fig. 3 Strain energy(percent of total) and Stiffener position

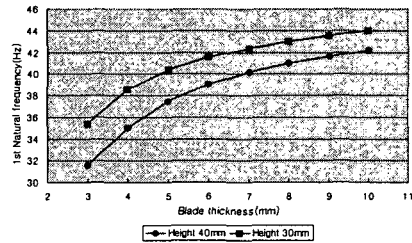


Fig. 4 The results of type 1 stiffness analysis

소는 탄성 변형이 크게 되고, 이는 그 요소들이 그 모드의 변형에 가장 큰 영향을 줄을 의미한다. 따라서 스트레인 에너지가 큰 요소들의 물성치를 변경할 경우 고유 진동수와 모드 형상에 큰 영향을 줄 수 있다[3]. 스트레인 에너지 분포는 Fig. 3(a)와 같다[4]. Fig. 3(a)의 결과를 보면 플랫폼의 최외각과 최내각 부분에 스트레인 에너지가 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3(a)의 결과를 바탕으로 Fig. 3(b)와 같이 플랫폼의 위/아래 면재의 최외각과 최내각에 L자형 보강재를 추가하였다. 보강재를 추가한 후 고유진동수는 37.4Hz로 초기에 비해서 많이 증가하였으나 아직 설계 요구조건인 40Hz를 만족하지 못하였다. 이후 강성증가는 블레이드의 형상 변경을 통해서 확보하였다.

블레이드의 높이와 두께 변화에 따라 광학탑재체 지지구조물의 강성 해석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 해석결과를 보면 블레이드의 높이가 40mm인 경우 두께가 최소 7mm, 높이가 30mm인 경우에는 최소 5mm가 되어야 강성 요구조건을 만족함을 알 수 있다.

2.4 열지향오차 해석

다음으로 열지향오차 해석을 수행하였다. 열지향오차는 열하중 부여시 카메라가 장착되는 세 지점이 이루는 평면의 수직방향 벡터와 별 추척기가 연결되는 평면의 수직방향 벡터가 이루는 상대적인 각도로 정의된다. 열지향오차를 계산하기 위하여 궤도상에서 열하중 조건을 다음과 같이 3가지의 경우로 가정하였다.

- (1) 열하중조건 1

설계 요구조건에 따라서 광학탑재체 지지구조물에 30K의 온도변화를 부여하였다.

(2) 열하중조건 2

광학탑재체 지지구조물의 열지향오차는 광학탑재체 지지구조물 자체 온도 변화에 의해서 발생하는 오차외에도, 광학탑재체 지지구조물과 연결된 위성체가 팽창하거나 수축함으로 인해 발생하는 오차도 고려되어야 한다. 이를 위해 위성체와 광학탑재체 지지구조물이 연결되는 부분에 강제변위를 부여하였다. 현재 30K의 온도변화를 부여하고 있으므로 위성체가 반지름 방향으로 30K만큼 팽창하거나 수축할 수 있다고 가정할 수 있다. 이를 계산해 보면 팽창량은 0.42mm이다. 따라서 블레이드와 위성체가 연결되는 부위에 반지름 방향으로 0.42mm의 강제변위를 부여하였다.

(3) 열하중조건 3

실제 열하중은 30K 온도변화와 반지름 방향으로의 강제변위가 모두 고려되어야 한다. 따라서 광학탑재체 지지구조물에 30K 온도변화를 부여하고 블레이드와 위성체가 연결되는 부위에 0.42mm의 강제변위를 동시에 적용하였다.

(4) 해석결과

블레이드의 높이가 40mm인 경우 두께 변화시 각 열하중조건에 따른 열지향오차를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5를 보면 열하중조건 1의 경우에는 블레이드의 크기 변화에 상관없이 열지향오차가 거의 일정함을 알 수 있다. 이는 자체 온도변화에 의한 열지향오차는 플랫폼이 얼마나 다양한 재료들로 구성되었는가에 따라서 결정되기 때문이다.

열하중조건 2의 경우에는 블레이드의 두께가 증가할수록 열지향오차가 크게 나옴을 알 수 있다. 열하중조건 2에서는 위성체와 광학탑재체 지지구조물이 연결되는 부위에 반지름 방향으로 강제변위를 주게 되고, 이로 인해서 플랫폼은 인장력이나 압축력을 받아서 뒤틀리게 된다. 만약 블레이드가 이러한 하중을 충분히 받을 수 있을 정도로 유연하다면 블레이드만 변형하고 플랫폼에는 하중을 가하지 않을 것이다. 따라서 블레이드의 두께를 감소시켜 유연성을 증가시킬수록 Fig. 5와 같이 열지향오차는 작아지게 된다.

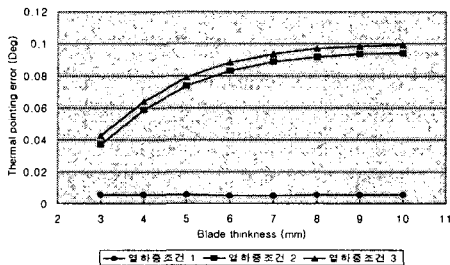


Fig. 5 The results of type 1 thermal pointing error analysis

Fig. 4와 Fig. 5의 결과를 보면 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 동시에 만족하는 경우가 없음을 알 수 있다. 따라서 현재의 형상에서 새로운 형상으로서의 구조변경을 필요로 한다.

3. 광학탑재체 지지구조물 형상 2

3.1 형상

열하중조건 2에서 열지향오차값이 큰 이유는 반지름 방향의 강제변위를 주는 위치가 플랫폼의 중립면과 동떨어져 있기 때문이다. 이로 인해 블레이드 구조물의 하단면에 강제변위 부여시 플랫폼에 인장력이나 압축력이 작용하여 플랫폼을 뒤틀리게 만든다. 이를 해결하기 위해서 플랫폼의 하단면 뿐 아니라 상단면에도 블레이드 구조물을 추가하여 Fig. 6과 같이 대칭구조로 만들었다.

3.2 강성 및 열지향오차 해석 결과

형상 1과 마찬가지로 강성 해석과 열지향오차 해석을 수행하였다. Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 보면 형상 1에 비해서 강성 및 열지향오차가 많이 향상되었음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 8의 결과를 살펴보면 형상 1에 비하여 열하중조건

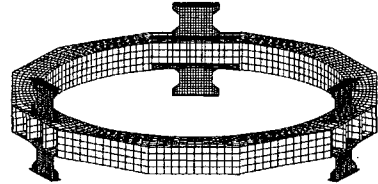


Fig. 6 FEM of optical bench type 2 platform

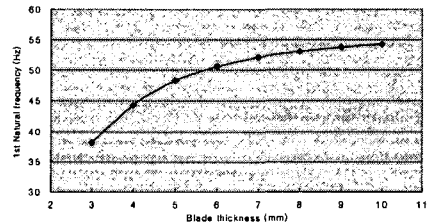


Fig. 7 The results of type 2 stiffness analysis

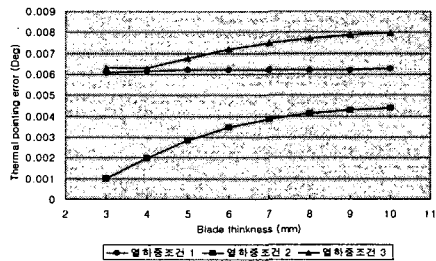


Fig. 8 The results of type 2 thermal pointing error analysis

2에서의 결과는 매우 좋아졌지만, 열하중조건 1에서의 결과는 0.005deg에서 0.006deg로 나빠졌음을 알 수 있다. 이는 플랫폼과 재료가 다른 블레이드 구조물의 추가로 인해, 형상 1에 비해서 플랫폼의 상/하단에서 플랫폼을 뒤틀리게 하는 힘이 증가하였기 때문이다.

4. 광학탑재체 지지구조물 형상 3

4.1 형상

지금까지 살펴본 형상 1과 형상 2의 해석결과를 바탕으로 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 만족시키는 광학탑재체 지지구조물을 Fig. 9와 같이 설계하였다. 강성축면의 경우 블레이드의 개수를 증가시킴으로써 강성을 높였으며, 열지향오차축면에서는 타이타늄 블레이드 구조물을 플랫폼 면재에 연결하는 대신 같은 재료로 이루어진 타이타늄 피팅 구조물에 직접 연결함으로써 열하중조건 1에서의 열지향오차를 줄였다. 또한 블레이드 구조물을 플랫폼의 중립면에 결합함으로써 열하중조건 2에서의 열지향오차 또한 효과적으로 줄일 수 있었다.

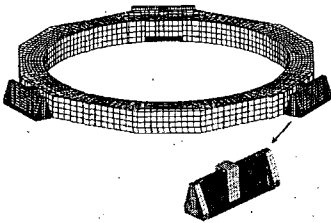


Fig. 9 FEM of optical bench type 3 platform

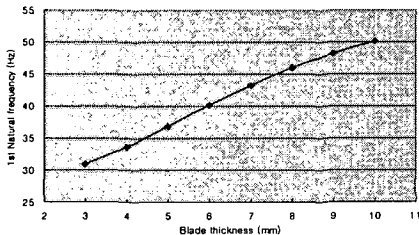


Fig. 10 The results of type 3 stiffness analysis

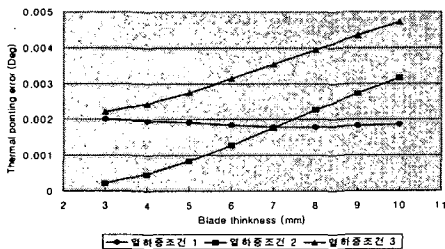


Fig. 11 The results of type 3 thermal pointing error analysis

4.2 강성 및 열지향오차 해석

블레이드의 두께 변화에 따른 강성 해석과 열지향오차 해석결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 이 결과를 바탕으로 블레이드의 두께를 8mm로 선정하는 경우 고유진동수는 45.97Hz, 열지향오차는 0.00395deg로 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 모두 만족할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 만족하는 광학탑재체 지지구조물을 설계하였다. 먼저 광학탑재체 지지구조물 형상 1을 설계하였으나 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 만족하지 못하여 구조변경을 통하여 형상 2를 설계하였다. 형상 2는 형상 1에 비하여 강성 및 열지향오차가 많이 향상되었으나, 여전히 열지향오차 요구조건을 만족하지 못하였다. 하지만 형상 1과 2의 해석 결과로부터 강성을 높이고 열지향오차를 줄일 수 있는 구조물의 형태를 예측할 수 있었고 최종적으로 형상 3을 설계하였다. 본 논문을 통해서 광학탑재체 지지구조물을 설계한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 광학탑재체 지지구조물의 강성을 높이기 위하여 플랫폼 면재의 두께를 증가하거나 보강재를 추가한다.
2. 블레이드 구조물의 경우 블레이드 개수를 늘려서 강성을 증가시킨다.
3. 열지향오차를 낮추기 위해서 가능한 같은 특성을 갖는 재료를 사용하고, 같은 재료를 가진 구성품들을 서로 결합시키도록 한다.
4. 플랫폼 구조물은 가능한 대칭 구조로 설계하고, 블레이드 구조물은 플랫폼의 중립면에 연결한다.

참 고 문 헌

- (1) 김진희 등, 2001, "Thermal Pointing Error Analysis on LEO Spacecraft", MSC 12th Korea Users' Conference
- (2) 김종우 등, 2004, "A Study on Design of Optical Bench for Earth Observation Satellite", Proceedings of the 2004 KSAS Fall Conference, pp.46~50
- (3) 장동연 등, 2004, "The Optimum Design for Location of Damping Materials for NVH Improvement", 14th Korea VPD Conference
- (4) "MSC/NASTRAN Linear Static Analysis User's Guide Version 2001", Volume 2, The MacNeal-Schwendler Corporation