

技術論文

지구관측위성의 블레이드형 광학탑재체 지지구조물 설계

김경원*, 김진희*, 이주훈*, 진익민*, 김종우**, 박종성**

Design of the Blade-Type Optical Bench for Earth Observation Satellite

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

ABSTRACT

This paper is a study on the blade-type optical bench satisfying stiffness and thermal pointing error requirements for earth observation satellite. According to shape requirements, optical bench is designed. Because it does not satisfy the stiffness requirement, the stiffener is added on the outer/inner area of optical bench. But it does not meet the thermal pointing error requirement. So symmetrical structure is suggested with platform support structure attached on the upper/lower part of platform. Although it has better value than previous case, it still does not meet the thermal pointing error requirement. Based on the results of prior cases, optical bench finally designed, which satisfied both the stiffness and thermal pointing error requirements. Next conclusions follow from this design. It is efficient to increase thickness of platform facesheet, add stiffener and increase blade number to raise stiffness. It is effective to connect component consisting of same material and design optical bench having symmetrical structure to lower thermal pointing error.

초 록

본 논문은 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 만족하는 지구관측위성의 블레이드형 광학탑재체 지지구조물 개발에 대한 연구이다. 먼저 형상 요구조건을 만족하는 광학탑재체 지지구조물을 설계하였으나, 강성 요구조건을 만족하지 못하여 광학탑재체 지지구조물의 외부와 내부에 보강재를 추가하여 이를 해결하였다. 그러나, 열지향오차 요구조건을 만족시키지 못하여, 플랫폼 지지 구조물을 플랫폼 상/하단에 모두 장착한 대칭형 구조로 설계하였다. 이 경우 이전 모델에 비해서 열지향오차가 많이 줄어들기는 하였지만 역시 열지향오차 요구조건을 만족시키지는 못하였다. 이전 설계 결과를 바탕으로 측면형 플랫폼 지지 구조물을 설계하여 강성요구조건 및 열지향오차 요구조건을 만족하는 광학탑재체 지지구조물을 최종적으로 설계하였다. 본 설계를 통해서 다음의 결론을 얻을 수 있었다. 강성측면에서는 플랫폼의 면재 두께 증가나 보강재 추가 그리고 블레이드의 개수를 늘려서 강성을 증가시킬 수 있었다. 열지향오차측면에서는 가능한 같은 재료를 가진 구성품들을 서로 결합시키고, 광학탑재체 지지구조물을 대칭형 구조물로 설계함으로써 열지향오차를 감소시킬 수 있었다.

Key Words : Optical bench(광학탑재체 지지구조물), Stiffness analysis(강성 해석), Blade (블레이드), Thermal pointing error analysis(열지향오차 해석)

† 2005년 2월 3일 접수 ~ 2005년 10월 13일 심사완료

* 정희원, 한국항공우주연구원 위성본체그룹

연락처자, E-mail : kwkim74@kari.re.kr

** 정희원, 대한항공기술연구원

I. 서 론

저궤도 지구관측위성은 일반적으로 지상으로부터 최소 수백 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 되어 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 그곳에 탑재체와 자세제어 센서들을 장착하는 방법이 이용되고 있다[1][2][3][4]. 본 논문에서는 두 가지 방법 중 열지향오차 요구조건을 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.

II. 광학탑재체 지지구조물 형상 1

2.1 설계요구조건

광학탑재체 지지구조물과 그 곳에 장착될 탑재체의 형상 요구조건은 Table 1과 같고, 설계요구조건은 Table 2와 같다[5][6].

2.2 형상

광학탑재체 지지구조물은 Fig. 1과 같이 크게 탑재체, 플랫폼, 플랫폼 지지부로 구성되어 있으

Table 1. Shape requirements for payload and optical bench

	탑재체	광학탑재체 지지구조물
지름	1050mm	1100mm
폭	-	1306mm
전체 높이	1950mm	-
상단 높이	1150mm	-
하단 높이	800mm	-
무게	180kg	-
분포하중	-	20kg
강성	>75Hz	-
지지형태	스트럿	블레이드

Table 2. Design requirements for optical bench with camera

강성	>40Hz
열지향오차	<0.005deg
작동 온도	-10℃ ~ 50℃

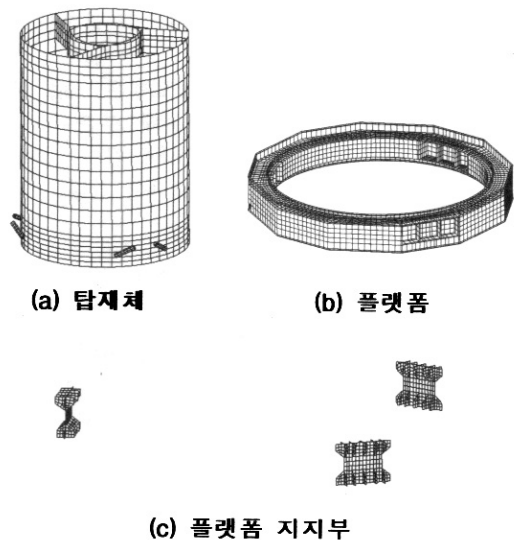


Fig. 1. Components of optical bench

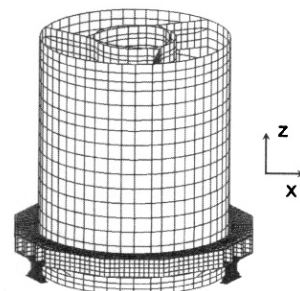


Fig. 2. FEM of optical bench type 1

며, 전체 유한요소모델은 Fig. 2와 같다. 플랫폼은 8.1-1/8-0.002P(5056)의 알루미늄 허니콤 심재와 M55J-UD의 복합재 면재로 이루어진 샌드위치 구조물로 이루어져 있다. 알루미늄 심재의 경우 두께는 101.6mm, 면재는 $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/90^\circ/-60^\circ/-30^\circ]_{2s}$, 24ply로 대칭적으로 적층되어 있다.

탑재체와 플랫폼 지지부가 연결되는 부분에는 Fig. 3과 같이 타이타늄 피팅 구조물이 장착되어 있다. 탑재체의 경우 형상 요구조건에 맞추어 모델링 되었으며, 플랫폼 지지부의 경우 Fig. 1(c)와 같이 3개의 블레이드 구조물로 구성되어 있다. 플랫폼을 지지하는 부분이 3개인 이유는 열하중에 의한 열지향오차를 최대한으로 줄이기 위해서이다. 플랫폼과 지지부는 서로 다른 재료로 구성되어 있기 때문에 열하중이 가해질 경우 열팽창률의 차이로 인해서 연결부에 인장력이나 압축력이 가해지게 된다. 특히 Fig. 2의 z 방향으로 인장력이나 압축력이 가해질 경우 플랫폼은 기울어지게 된다. 만약 지지부가 3개라면 플랫폼이 동일한 평면을 유지한 채 기울어지므로 열지향오차는 매우 작게 된다.

블레이드 구조물의 유한요소모델은 Fig. 4와 같다. 블레이드 구조물에서 가운데 부분이 블레이드이며 높이 40mm, 두께 5mm, 길이 104mm이다. 재질은 타이타늄으로 구성되어 있다.

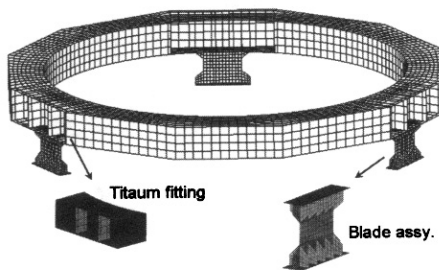


Fig. 3. FEM of optical bench type 1 platform

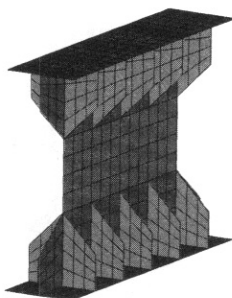


Fig. 4. FEM of blade assembly

Table 3. Element & property of optical bench FEM

	Element	Property
탑재체	QUAD4 ,BAR CONM2, RBE2	PSHELL, PBAR
플랫폼	HEXA, QUAD4 BAR,	PSOLID, PCOMP, PBAR
플랫폼 지지부	QUAD4	PSHELL

2.3 유한요소모델링

본 논문에서 MSC/Nastran을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 주요 유한요소들은 Table 3과 같다.

2.4 강성 해석

초기 형상으로 강성 해석을 수행하였다. Fig. 2의 유한요소모델을 해석한 결과 첫 번째 고유진동수는 28.2Hz로 설계요구조건인 40Hz를 만족하지 못하였다. 따라서 강성 증가를 위해 다음과 같은 일련의 과정을 수행하였다.

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

먼저 플랫폼의 면재 두께를 증가시켜서 플랫폼의 강성을 증가시켰다. 초기 24ply에서 $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/90^\circ/-60^\circ/-30^\circ]_{4s}$, 48ply로 면재 두께를 2배로 증가시켰다.

다음으로 플랫폼의 면재에 보강재를 추가하였다. 플랫폼의 면재에 보강재를 추가하기 위해서는 먼저 보강위치를 결정하고 보강재의 형상 및 크기를 결정하여야 한다. 보강위치를 결정하기 위하여 Fig. 2 유한요소모델을 이용하여 스트레인 에너지 분포 해석을 수행하였다. 유한요소모델에서 요소스트레인 에너지는 구조물의 요소에 저장된 탄성에너지지를 의미한다. 동해석시 해당 모드에서 탄성에너지가 높은 요소는 탄성 변형이 크게 되고, 이는 그 요소들이 그 모드의 변형에 가장 큰 영향을 줌을 의미한다. 따라서 스트레인 에너지가 큰 요소들의 물성치를 변경할 경우 고유진동수와 모드 형상에 큰 영향을 줄 수 있다 [7]. 스트레인 에너지 분포 결과는 Fig. 5와 같다 [8]. Fig. 5의 결과를 보면 플랫폼의 최외각과 최내각 부분에 스트레인 에너지가 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5의 결과를 바탕으로 Fig. 6과 같이 플랫폼의 위/아래 면재의 최외각과 최내각에 L자형

보강재를 추가하였다. 보강재의 재료는 M60J Fabric 이며, $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{3s}$, 30ply로 적층하였다. 보강재를 추가한 후 고유진동수는 37.4Hz로 초기에 비해서 많이 증가하였으나 아직 설계요구조건인 40Hz를 만족하지 못하였다. 이후 강성증가는 블레이드의 형상 변경을 통해서 확보하였다.

현재 광학탑재체 지지구조물은 블레이드 구조물에 의해서 위성본체와 연결되어 있다. 따라서 블레이드 구조물의 강성이 광학탑재체 지지구조물 전체 강성에 큰 영향을 미치게 된다. 블레이드 구조물에서 가장 강성이 약한 부분은 두께가

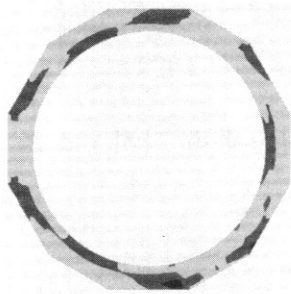


Fig. 5. Strain energy(percent of total)

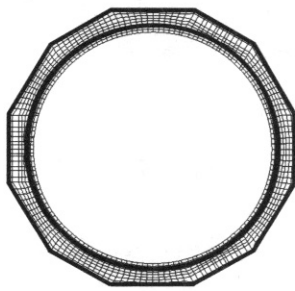


Fig. 6. Stiffener position

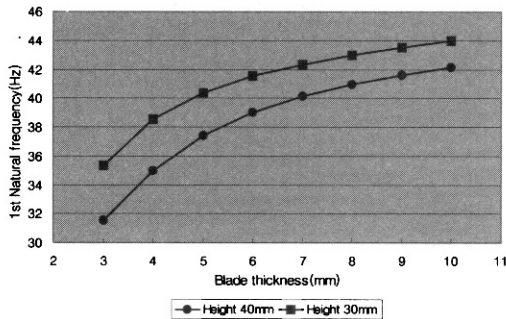


Fig. 7. The results of type 1 stiffness analysis

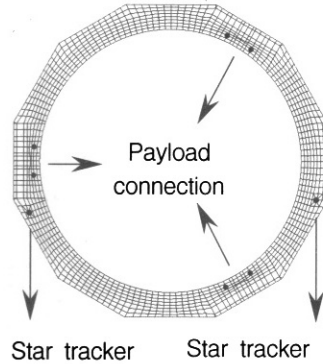


Fig. 8. Thermal pointing error measure point

Table 4. Thermal load conditions

열하중조건 1	광학탑재체 지지구조물에 30℃ 온도변화
열하중조건 2	반지름 방향으로의 강제변위
열하중조건 3	열하중조건 1+ 열하중조건 2

얇은 블레이드이므로 이 곳의 강성을 증가시켜서 광학탑재체 지지구조물의 강성을 증가시킨다. 블레이드의 높이와 두께 변화에 따라 광학탑재체 지지구조물의 강성 해석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 해석결과를 보면 높이가 40mm인 경우 두께가 최소 7mm, 높이가 30mm인 경우에는 최소 5mm가 되어야 강성 요구조건을 만족함을 알 수 있다.

2.5 열지향오차 해석

다음으로 열지향오차 해석을 수행하였다. 열지향오차는 열하중 부여시 Fig. 8과 같이 카메라가 장착되는 세 지점이 이루는 평면의 수직방향 벡터와 별 추적기가 연결되는 평면의 수직방향 벡터가 이루는 상대적인 각도로 정의된다. 열지향오차를 계산하기 위해서 궤도상에서 열하중 조건을 Table 4와 같이 3가지의 경우로 가정하였다.

2.5.1. 열하중조건 1

설계요구조건에 따라서 광학탑재체 지지구조물에 30℃의 온도변화를 부여하였다.

2.5.2. 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 강제

변위를 부여한다. 현재 30℃의 온도변화를 부여하고 있으므로 위성체가 반지름 방향으로 30℃만큼 팽창하거나 수축할 수 있다고 가정할 수 있다. 팽창량은 $\delta = \alpha \Delta T l$ 식으로 계산되어지며, 위성본체가 알루미늄이므로 $\alpha = 2.16e-5/^\circ C$, 온도변화는 $\Delta T = 30^\circ C$, 장착면의 반지름은 $l = 1300mm/2$ 이므로 $\delta = (2.16e-5/^\circ C) * (30^\circ C) * (1300mm/2) = 0.42mm$ 이다. 따라서 블레이드와 위성체가 연결되는 부위에 반지름 방향으로 0.42mm의 강제변위를 부여하였다.

2.5.3 열하중조건 3

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

2.5.4 해석결과

열지향오차는 앞에서 언급한 것처럼 지지방식에 따라서 많은 차이를 보인다. 이런 경향을 확인하기 위해 광학탑재체 지지구조물을 지지하는 블레이드의 높이와 두께 변화에 따라서 열지향오차의 변화를 살펴보았다. 블레이드의 높이가 40mm인 경우 각 열하중조건에 따른 열지향오차를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9를 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.

재료가 다른 구성품들이 많을 경우 열팽창률의 차이로 인해서 결합되는 부위에서 뒤틀림 현상이 많이 발생하므로, 될 수 있는 한 같은 특성의 재

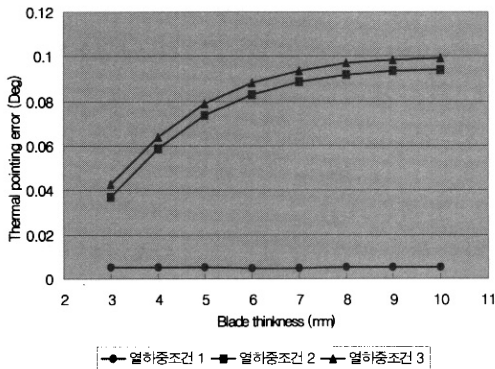


Fig. 9. The results of type 1 thermal pointing error analysis

료를 사용하는 것이 열지향오차면에서 유리하다.

열하중조건 2의 경우에는 블레이드의 두께가 증가할수록 열지향오차값이 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. 9와 같이 열지향오차는 작아지게 된다. Fig. 7과 Fig. 9의 결과를 보면 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 동시에 만족하는 경우가 없음을 알 수 있다. 따라서 현재의 형상에서 새로운 형상으로서의 구조변경을 필요로 한다.

III. 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. 10과 같이 대칭구조로 만들었다.

3.2 강성 및 열지향오차 해석 결과

형상 2는 대칭구조로 인해서 플랫폼에 작용하는 인장력이나 압축력이 서로 상쇄가 되어 열지향오차가 크게 향상될 뿐 아니라, 블레이드 구조물의 추가로 인해 강성증가의 효과도 가져올 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12의 결과를 보면 형상 1에 비해서 강성 및 열지향오차가 많이 향상되었음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 12의 결과를 살펴보면 형상 1에 비해서 열하중조건 2에서의 결과

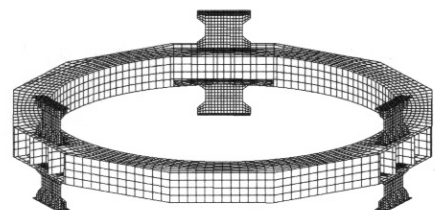


Fig. 10. FEM of optical bench type 2 platform

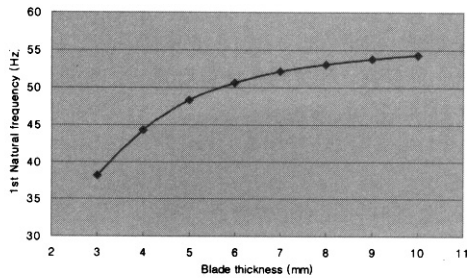


Fig. 11. The results of type 2 stiffness analysis

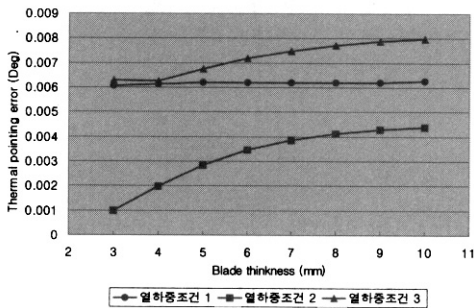


Fig. 12. The results of type 2 thermal pointing error analysis

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

IV. 광학탑재체 지지구조물 형상 3

4.1 형상

지금까지 살펴본 형상 1과 형상 2의 해석결과를 분석해 보면 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 강성을 증가시키기 위해서는 플랫폼의 면재 두께 증가, 보강재 추가 또는 블레이드의 강성 증가가 필요하다.
2. 열하중조건 1에서의 열지향오차를 줄이기 위해서는 블레이드 구조물의 개수를 최소한으로 하고, 가능한 같은 재료를 이용하여 구조물을 구성해야 한다.
3. 열하중조건 2에서의 열지향오차를 줄이기 위해서는 플랫폼과 블레이드 구조물의 연결 위치가 플랫폼의 중립면이거나 또는 플랫폼 구조물이 대칭이어야 한다.

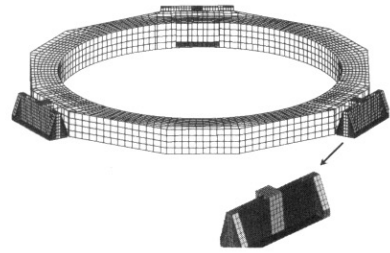


Fig. 13. FEM of optical bench type 3 platform

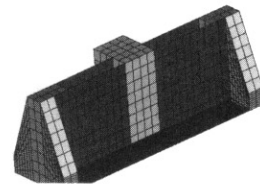


Fig. 14. FEM of lateral blade assembly

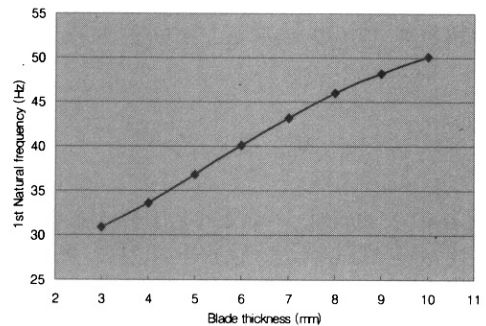


Fig. 15. The results of type 3 stiffness analysis

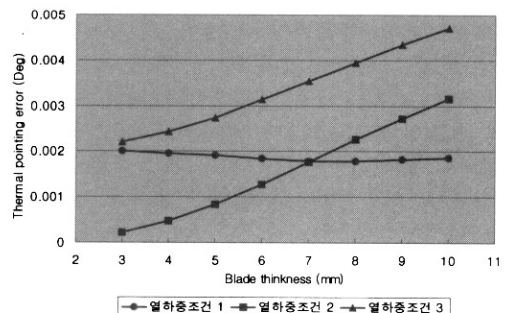


Fig. 16. The results of type 3 thermal pointing error analysis

위의 세 가지 사항을 바탕으로 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 만족시키는 광학탑재체 지지구조물을 Fig. 13과 같이 설계하였다. 강성측면의 경우 형상 1이나 형상 2의 구조가 형상

3보다는 유리하기는 하지만, 형상 3에서는 블레이드의 개수를 증가시킴으로써 이를 해결하였다. 열지향오차측면에서는 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.

블레이드 구조물은 Fig. 14와 같으며 4개의 블레이드로 구성되어 있다. 블레이드의 너비는 80mm이며, 높이는 100mm이다.

4.2 강성 및 열지향오차 해석 결과

블레이드의 두께 변화에 따른 강성 해석과 열지향오차 해석결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 15와 Fig. 16의 결과를 바탕으로 블레이드의 두께를 8mm로 선정하는 경우 고유진동수는 45.97Hz, 열지향오차는 0.00395deg로 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 모두 만족할 수 있었다.

V. 결 론

탐재체의 미세한 지향오차는 저궤도 지구관측 위성의 관측 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다. 특히 열하중에 의해 발생하는 열지향오차는 지향오차를 유발하는 가장 큰 원인으로 알려져 있다. 따라서 이러한 열지향오차를 최소화 하는 광학탐재체 지지구조물의 설계가 요구된다. 본 논문에서는 강성 요구조건과 열지향오차 요구조건을 만족하는 블레이드형 광학탐재체 지지구조물을 설계하였다. 먼저 형상 요구조건과 강성 요구조건을 만족하는 광학 탐재체 지지구조물을 설계하였다. 그러나 열지향오차 요구조건을 만족하지 못하여 플랫폼 지지 구조물을 플랫폼 상/하단에 모두 장착하여 광학탐재체 지지구조물을 대칭형으로 설계하였다. 이 경우 열지향오차가 이전에 비해서 많이 줄어들기는 하였지만 여전히 열지향오차 요구조건을 만족하지는 못하였다. 이전의 설계 결과를 바탕으로 최종적으로 측면형 플랫폼 지지구조물을 설계하여 강성 요구

조건과 열지향오차 요구조건을 모두 만족하는 광학탐재체 지지구조물을 설계하였다.

본 논문을 통해서 광학탐재체 지지구조물의 설계시 다음의 결론을 얻을 수 있었다. 광학탐재체 지지구조물의 강성을 높이기 위해서는 플랫폼의 면재 두께 증가나 보강재 추가로 플랫폼의 강성을 높인다. 또한 플랫폼 지지 구조물의 경우 블레이드의 개수를 늘려서 강성을 증가시킨다. 열지향오차를 낮추기 위해서는 가능한 같은 특성을 갖는 재료를 사용하고, 같은 재료를 가진 구성품들을 서로 결합시키도록 한다. 그리고, 광학탐재체 지지구조물은 가능한 대칭 구조로 설계하고, 플랫폼 지지 구조물은 플랫폼의 중립면에 연결하도록 한다.

참고문헌

- 1) Keith B. Doyle, Victor L. Genberg, Gregory J. Michels, "Integrated optomechanical analysis", SPIE PRESS, Washington, 2002, pp. 99-116.
- 2) A. M. Cruise, J. A. Bowles, T. J. Patrick, C. V. Goodall, "Principles of Space Instrument Design", Cambridge University Press, 1998, pp. 295-302.
- 3) 김진희 외, "LEO 인공위성의 열지향오차해석", 2001년 MSC/NASTRAN User's Conference
- 4) Holz Jill M, Kunt, Cengiz, Lashley Chris, McGuffey Douglas B, "Development of a lightweight near-zero CTE optical bench for the Wide-Field Camera 3 instrument", Proceedings of SPIE, Vol. SPIE-4854, 2003, pp. 435-446.
- 5) 김종우 외, "지구관측위성의 광학탐재체 지지구조물 설계 연구", 2004년 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, pp. 46~50.
- 6) Thermal Control Subsystem, "Spacecraft Temperature Distribution", Oct. 5, 2000, KARI
- 7) 장동연, 유희, 고재경, "자동차 판넬 진동-소음 저감을 위한 제진재 최적 위치 설계", 2004년 Korea VPD Conference.
- 8) MSC/NASTRAN Linear Static Analysis User's Guide Version 2001, Volume 2, The MacNeal-Schwendler Corporation.