J. Astron. Space Sci. 23(4), 435-444 (2006)

인공우주물체 추적/관측을 위한 다중 광학계 탑재용 가대 설계 및 구조해석†

설경환, 김상준‡, 장민환, 민상웅, 문병식
경희대학교 우주과학과 우주과학기술연구실

DESIGN & STRUCTURAL ANALYSIS OF MULTI-OPTICAL MOUNT SYSTEM FOR TRACKING/OBSERVING ARTIFICIAL SPACE OBJECTS†

K. H. Seol, S. J. Kim‡, M. Jang, S. W. Min, and B. S. Mun
SSNT, Dept. of Astronomy & Space Science, Kyung Hee Univ., Yongin 449-701, Korea
E-mail: sjkim1@khu.ac.kr

(Received August 1, 2006; Accepted October 27, 2006)

요 약

인공우주물체는 출현 시간이 비교적 짧고 운동 특성이 고정적이지 않기 때문에 한 번의 관측으로 측광 및 분광 데이터를 획득하기 어렵다. 따라서 인공우주물체의 측광 및 분광 동시 관측을 위해서 경희대학교 인공위성 추적 및 관측시스템에 다중 광학계를 탑재할 수 있는 가대를 설계하였다. 이 연구에서는 구조해석을 통해 다중 광학계 탑재 시에 개조된 가대의 변형을 계산하고 인공우주물체 추적 및 관측 시 발생할 수 있는 가대의 지향오차를 추론하여 관측시야에서 인공우주물체를 안정적으로 추적할 수 있음을 보였다. 또한 등가응력 해석을 수행하여 가대의 구조적 안전성을 확인하였다.

ABSTRACT

Since artificial space objects are observable only in a short period of time and the characteristics of their motion is not exactly predictable, it is difficult to obtain both photometric and spectroscopic data by a set of observations. We have, therefore, designed a mount to load multi-optical instruments on the Kyung Hee University (KHU) satellite tracking and observation system for both photometric and spectroscopic observations of artificial space objects. In this paper, we have calculated the deformation of the remodeled mount using structural analyses for the loading of the multi-optical instruments. We have also deduced pointing errors of the mount occurring at tracking and observing artificial space objects. we have derived tracking reliably artificial space objects in our field of view and confirmed structural safety test of mount utilizing equivalent (von-mises) stress distribution.

Keywords: structural analysis, multi-optical mount system, artificial space objects

†이 연구는 BK21의 연구지원을 받아 수행되었습니다.
‡corresponding author

1. 서 론

저궤도 인공우주물체는 운동 특성이 빠르고 속도 변화가 큰 특징을 가지고 있으므로 이를 관측하기 위해서는 빠른 추적속도를 가진 가대 시스템과 F수가 작아 화각이 넓고 밝기가 밝아 관측기기의 노출시간을 줄일 수 있는 광학계가 필요하다(이동규 2004). 그러나 상용화되어 있는 천체관측용 망원경 시스템은 저궤도 인공우주물체와 비교하여 천구상의 움직임이 상대적으로 느린 일반 천체를 대상으로 하기에 이를 이용한 인공우주물체의 관측에는 한계가 있다. 따라서 경희대학교 우주과학기술연구실(Space Science & Technology laboratory, SS&T)은 인공위성의 빠른 운동성분 변화에 능동적으로 대처할 수 있도록 경위대 방식의 상용가대 제어부와 구동부를 개조하여 인공위성 추적 및 관측 시스템을 개발하였다(민상웅 2004).

민상웅(2004)에 의해 개발된 인공위성 가대 시스템의 경우 추적 정밀도는 우수하나 관측 목적에 따른 광학계의 교체가 불가능하고 측광과 분광을 동시에 관측할 수 없는 문제점이 있었다. 따라서 이 연구에서는 기존의 가대시스템의 광학계 탑재부를 관측 목적에 따라 유연하게 다중 광학계를 탈/부착할 수 있도록 새롭게 설계하였으며, 탑재 중량에 따른 구조적 안전성 및 관측오차를 최소화하기 위한 구조해석을 수행하였다.

가대의 구조해석은 가대의 자중과 관측 시 사용하게 될 관측 장비의 탑재 중량을 동시에 고려하여, 가대의 고도각을 0°부터 90°까지 10° 간격으로 변화시키면서 전체 변형(Total Deformation, TD) 및 등가응력(Equivalent Stress, ES) 해석을 수행하였다. 이를 통해, 전체 변형을 이용하여 가대의 지향오차를 도출하였다. 가대에 적용된 재질의 항복응력에 대한 안전계수를 이용하여 허용응력을 구하고, 시스템에서 발생된 최대 등가응력 값과 비교하여 구조적 안전성을 확인하였다.

이 연구에서는 Autocad 2004, Pro Engineer wildfire2.0을 설계 및 모델링에 각각 사용하였고, 유한 요소 모델링 및 구조해석을 위한 소프트웨어로는 ANSYS Workbench 9.0(ANSYS Inc.)을 사용하였다.

2. 가대 구조 및 모델링

단일 광학계를 탑재하여 사용했던 기존의 가대는 관측 목적이나 방법에 따른 광학계의 교체가 불가능하고, 탑재되는 광학계의 F수가 커서 인공위성을 관측하는데 효율성이 높지 않을 뿐만 아니라 측/분광 관측이 동시에 이루질 수 없는 문제점이 있었다. 따라서 이 연구에서 개발된 가대는 기존의 가대 탑재부에 관측 목적에 따라 다양한 광학계의 조합으로 유연하게 다중 광학계를 탈/부착할 수 있도록 설계하였다. 또한 가대 경량화와 광학계 탑재 시 발생하는 변형을 최소한으로 줄이기 위해서 개조된 가대의 중심이 기존 가대 암(arm)에 끼워지는 중심축에 일치되도록 그림 1과 같이 설계하였다.

그림 2는 측광 관측 시 사용되는 6인치 및 8인치 광학계와 각각의 광학계에 CCD가 부착된 모습을 보여주고 있다. 6인치 망원경에 VIDEO CCD를 부착하여 관측 대상을 지속적이고 정밀하게 추적할 수 있도록 실시간 촬영을 하고, 6인치 광학계에서 추적한 인공우주물체를 8인치 광학계로 측광 관측 임무를 수행하게 된다. 이 연구에서 구조해석 한 모델(ⓐ+①+ⓑ+②) 조합 이외에도 관측 목적에 맞게 탈/부착이 가능한 다양한 광학계(ⓐ~ⓒ)와 관측 장비(①~⑥)의 모습을 보여주고 있다. 광학계 및 관측 장비의 모습과 구체적인 사양은 그림 2와 표 1, 2에 나타냈다.

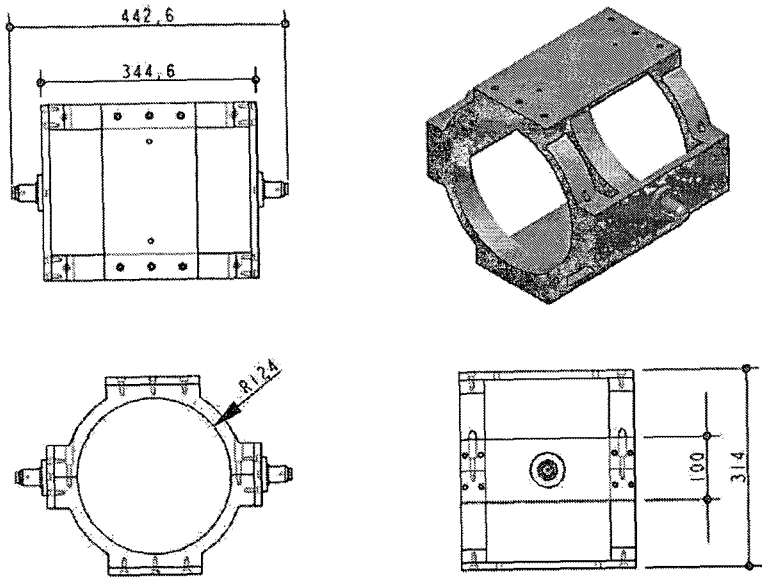

그림 1. 다중 광학계 탑재용 가대 설계도(단위: mm).

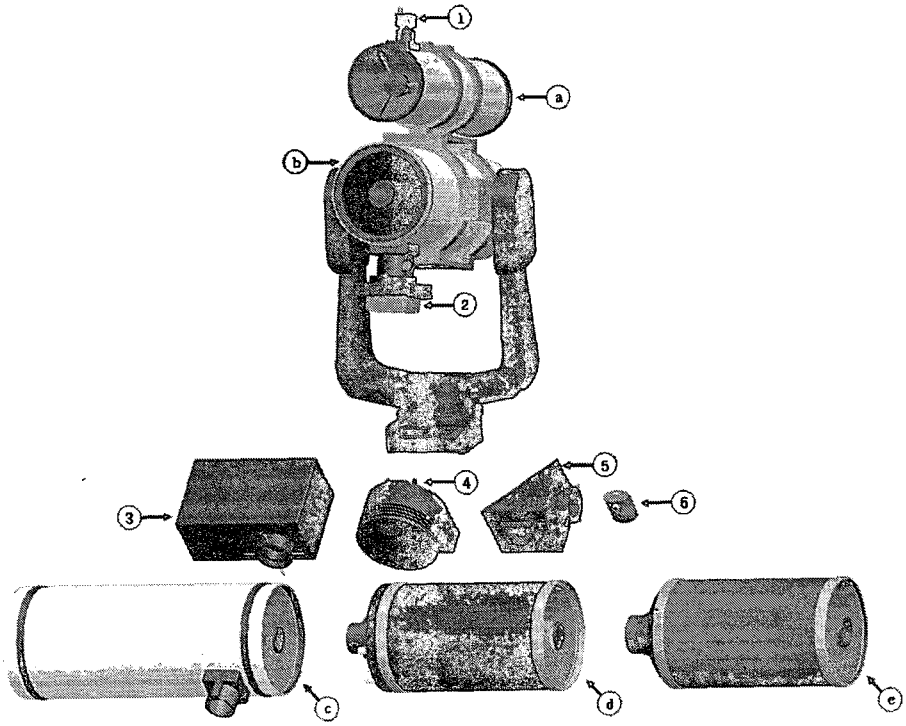

그림 2. 측광 관측 시 사용되는 다양한 광학계(ⓐ~ⓔ)와 관측 장비(①~⑥).

표 1. 인공우주물체 추적/관측 시스템에 사용되는 광학계 사양.

Index	Aperture mm(inch)	Optical Design (Product Name)	Focal Length (mm)	Focal Ratio	Weight (kg)
ⓐ	152.4 (6″)	Newtonian (Vixen R150S)	750	f/5	4.2
ⓑ	203.2 (8″)	Schmidt-Newtonian (Meade LXD75 SN-8)	812	f/4	9.61
ⓒ	254 (10″)	Schmidt-Newtonian (Meade LXD75 SN-10)	1016	f/4	13.6
ⓓ	254 (10″)	Schmidt-Cassegrain (Meade LX200GPS)	2500	f/10	28.1
ⓔ	203.2 (8″)	Schmidt-Cassegrain (Celestron C8-A)	2032 406.4	f/10 f/1.95	5.9

표 2. 인공우주물체 추적/관측 시스템에 사용되는 관측 장비 사양.

Index	Product name	weight[kg]	function
①	Neptune 100	0.08	Video CCD
②	AP-6EP	1.4	Photometric CCD
③	DSS-7	1.36	Spectrograph
④	ST-7E	0.9	Photometric CCD
⑤	AO-7	0.5	Adaptive Optics
⑥	ToUcam Pro II (PCVC 840K)	0.1	Video CCD

표 3. 재료 물성치(Matweb 2006; http://www.matweb.com/search/SearchSubcat.asp/).

Structural Spec. \ Materials	Aluminum alloy	Aluminum6061 T6	Aluminum2024 T4
Young's Modulus, MPa	71×10^3	68.9×10^3	73.1×10^3
Poisson's Ratio	0.33	0.33	0.33
Density, mg/mm^3	2.77	2.7	2.78
Tensile Yield Strength, MPa	280	276	324
Tensile Ultimate Strength, MPa	310	310	469
비고	기존의 가대와 광학계에 적용	경통 밴드와 플레이트 부품에 적용	기존의 가대 암부분에 끼워지는 축 부품에 적용

3. 구조해석

3.1 재료 물성치

선형 구조해석에 필요한 물성치들을 표 3에 정리 하였다. 안전계수(n, Factor of Safety)와 허용응력(Allowable Stress)을 구하고 등가응력 해석 결과로 나온 최대응력 값과 비교하기 위해 극한강도(Ultimate Strength)와 항복강도(Yield Strength)가 사용되었다. 축은 하중을 많이 받기 때문에 강도가 높은 환봉 형태의 Al2024를 적용했고, 경통을 고정시키는 밴드와 플레이트는 중간정도의 강도이며 가대를 경량화시킬 수 있는 후판 형태의 Al6061을 택하였으며(Sungjin Aluminum 2005; http://www.sjaluminum.co.kr/alu/main.htm), 경통은 상용화된 제품이기 때문에 일반적인 알루미늄 합금으로 물성치를 주었다.

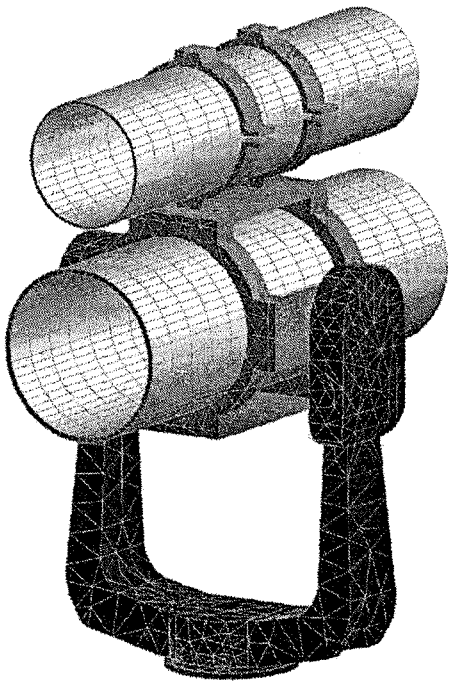

그림 3. 실제 해석에 사용되는 유한 요소 모델 (고도각 0°).

표 4. FE Model의 요소 수와 절점 수에 따른 TD와 ES의 변화.

	Elements	Nodes	TD(μm)	ES(MPa)	Elapsed Time(sec)
Relevance (0)	43797	83427	5.73	6.252	1003
Relevance (5)	44804	86675	5.79	5.838	1068
Relevance (10)	44886	88123	5.88	6.384	1111

3.2 유한 요소(Finite Element, FE) 모델

실제 FE 해석에 사용된 모델(그림 3)은 실제 모델(그림 2)처럼 분광 및 측광 장비가 부착되어 있지 않다. 이로 인해 생기는 해석 오차를 줄이기 위해서, FE 모델에서 분광 및 측광 장비의 장착 위치와 무게를 고려하여 경통의 무게 균형을 맞추어 모델링하였다. 또한, 절점수와 요소수를 결정하는 Relevance(ANSYS Workbench에서 mesh의 형상 및 밀도의 정도를 조정해주는 값)는 기본 값(0)을 사용하였고, 변형률이 가장 클 것으로 예상되는 고도각 90°에서 Relevance 값을 증가시키면서 전체 변형(TD)과 등가응력(ES) 해석 결과를 표 4에 정리하였다. 그 결과, 전체변형 변화폭이 2.6% 미만으로 작았고 등가응력이 허용응력(32.4MPa) 범위 안에 들기 때문에 굳이 해석시간이 오래 걸리는 값을 선택하지 않았다.

3.3 하중조건 및 경계조건

시스템에 작용하는 하중은 가대의 고도각을 0°부터 90°까지 10° 간격으로 변화시키면서, 6인치

표 5. 구조해석에 사용되는 단품들의 물리적 사양.

No.	Name	Material	Mass (kg)	Volume (mm^3)
1	left arm	Aluminum Alloy	6.91	2.49×10^6
2	right arm	Aluminum Alloy	6.91	2.49×10^6
3	center mount	Aluminum Alloy	4.42	1.59×10^6
4	6 inch optics	Aluminum Alloy	4.38	1.58×10^6
5	8 inch optics	Aluminum Alloy	11.01	3.97×10^6
6	right axis	Al 2024-T4	0.11	0.38×10^6
7	left axis	Al 2024-T4	0.11	0.40×10^6
8	6-inch-band	Al 6061-T6	0.8	0.29×10^6
9	6 inch band	Al 6061-T6	0.8	0.29×10^6
10	8 inch lower band	Al 6061-T6	1.26	0.46×10^6
11	8 inch lower band	Al 6061-T6	1.26	0.46×10^6
12	8 inch upper band	Al 6061-T6	1.23	0.45×10^6
13	8 inch upper band	Al 6061-T6	1.23	0.45×10^6
14	horizontal bottom plate	Al 6061-T6	1.34	0.49×10^6
15	horizontal top plate	Al 6061-T6	1.34	0.49×10^6
16	vertical left plate	Al 6061-T6	0.89	0.32×10^6
17	vertical right plate	Al 6061-T6	0.89	0.32×10^6

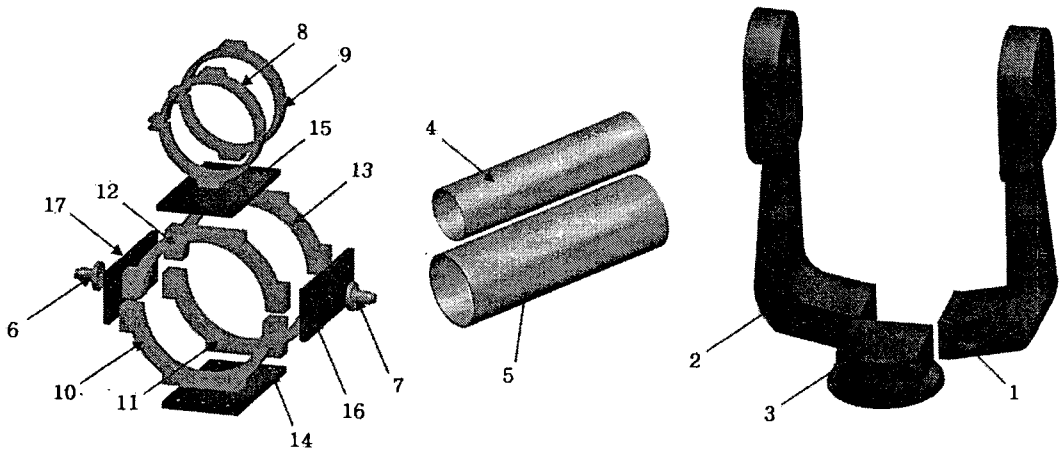

그림 4. 구조해석에 사용되는 단품들의 모델링.

광학계(4.3kg)에는 동영상 촬영용 VIDEO CCD(0.08kg)와, 8인치 광학계(9.61kg)에는 측광관측용 1K CCD(1.4kg)를 장착하면 총 15.39kg이다. 각 관측 장비의 위치와 무게 균형을 고려하여 그림 3과 같이 모델링 하였다. 열에 의한 변형과 외력에 대한 영향은 무시할 정도로 작다는 가정 하에 자중에 의한 선형 구조해석을 수행하였다. 자중 해석에 사용되는 17개 부품들의 재질, 질량, 부피를 표 5에 정리하였다.

경계조건은 그림 4에서 3번 부품 바닥면을 고정시켰고, 그 외의 부품들 간의 접촉형태는 부품사이의 상대적인 움직임을 막기 위해 강성을 매우 높게 설정시켜주는 Bonded 방법을 적용하였다.

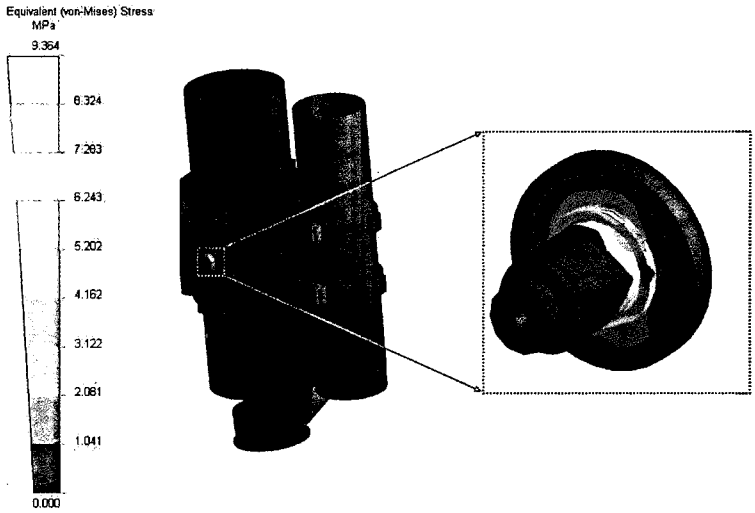

그림 5. 고도각 80°에서 해석한 등가응력 해석 결과.

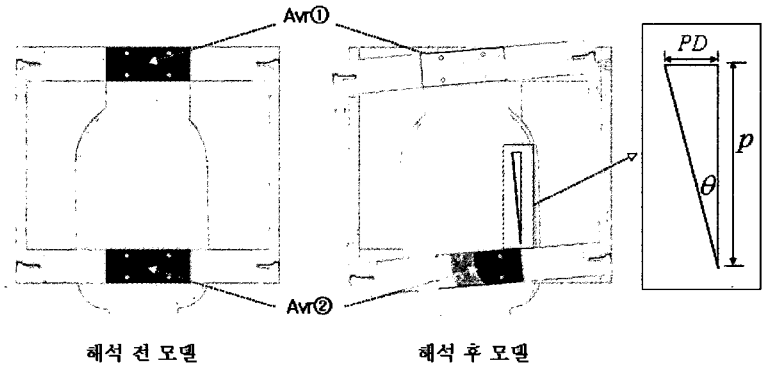

그림 6. 고도각 90°에서 자중에 의해 가대가 변형된 모습.

3.4 해석 결과

앞에서 기술한 재료 물성치, 유한요소모델, 하중 및 경계조건을 바탕으로 해석한 결과, 등가응력은 고도각 80°에서 최대이었고, 전체 변형은 고도각 90°에서 가장 크게 나타났다.

등가응력 해석 결과(그림 5)는 기존의 가대와 개조한 가대를 연결해주는 축(그림 5의 확대된 부분)에서 최대값(9.364MPa)을 보이고 있다. 일반적으로 구조물의 실제 강도는 요구 강도보다 커야 한다. 또한, 요구 강도에 대한 실제 강도의 비를 안전계수라 하고, 파손을 일으키지 않도록 하려면 1보다 커야 한다(Gere 2003).

이 연구에서 개발한 시스템의 안전계수의 결정 사항으로는 설계하중을 초과하는 하중에 의해 우발적인 과대하중을 받을 확률, 하중의 종류, 하중이 한번만 작용할 것인지 또는 반복될 것인지 여부, 하중의 정확한 평가방법, 부식이나 기타 환경적 영향에 의한 열화, 해석방법의 정밀도, 파손이 점진

표 6. 인공우주물체 추적/관측 시스템의 고도각에 따른 구조해석 결과(PD, PE, ES).

Deg. (°)	Max① (μm)	Min① (μm)	Max② (μm)	Min② (μm)	Avr① (μm)	Avr② (μm)	PD (μm)	PE (arcsec)	ES (MPa)
0	3.77	3.49	3.10	3.03	3.63	3.06	0.56	0.485	1.391
10	3.02	2.60	4.89	3.99	2.81	4.44	-1.63	-1.400	2.561
20	3.80	2.77	5.68	4.20	3.28	4.94	-1.66	-1.422	0.880
30	5.90	4.02	6.94	4.56	4.96	5.75	-0.79	-0.678	1.060
40	8.29	5.71	7.75	4.59	7.00	6.17	0.83	0.713	1.106
50	10.80	7.70	8.20	4.47	9.25	6.33	2.91	2.505	1.370
60	12.90	9.60	8.13	4.09	11.25	6.11	5.14	4.417	1.165
70	14.50	11.30	7.91	3.36	12.90	5.63	7.26	6.243	1.217
80	22.4	17.2	9.40	8.80	19.8	9.10	10.70	9.195	9.364
90	22.7	18.1	7.65	1.15	20.4	4.4	16.0	13.750	6.343

적인지 또는 급진적인지 여부 등을 고려하여(Gere 2003) 해석한 결과 안전계수가 10으로 나타났다.

가대의 항복강도와 안전계수를 이용하여 축에서 견뎌낼 수 있는 허용응력을 구하였다. 축 재질인 A2024-T4의 항복강도는 324MPa이다. 따라서 허용응력은 식 (1)에 의해 32.4MPa이 나오고, 등가응력 최대값(9.364 MPa)이 허용응력 보다 작은 것을 볼 수 있다.

$$\sigma_{allow} = \frac{\sigma_Y}{n} \tag{1}$$

여기서 σ_{allow}는 허용응력[MPa], σ_Y는 항복응력[MPa], n은 안전계수이다.

전체변형 해석은 탑재된 광학계의 자중에 의해서 가대의 변형이 생기는데 이 때, 그림 6과 같이 이 연구에서 설계한 가대를 중심으로 해석하여 지향오차를 추론하였다.

인공우주물체 측광 및 분광 동시 관측을 위해 다중광학계를 가대에 탑재했을 경우 탑재중량에 따라 가대의 변형이 발생한다. 이러한 가대의 변형은 인공우주물체를 추적 및 관측하는 데 있어 관측 정밀도를 낮추고, 심한 경우 대상 자체가 화각에서 벗어나는 현상을 초래할 수 있다. 따라서 가대의 변형량을 이용하여 지향오차(Pointing Error, PE)를 식 (2)와 같이 도출하였다.

$$PE(\text{arcsec}) = \tan^{-1}(PD/p) \times \frac{180}{\pi} \times 3600 \tag{2}$$

여기서 PD는 ①과 ②영역의 변형차이[mm], p는 ①영역 중심에서 ②영역 중심까지의 거리[mm]이다.

해석 방법은 플레이트와 경통을 고정시켜주는 밴드와의 접촉부분에 해당되는 ①영역의 최대 변형량(Max①)과 최소 변형량(Min①)을 구하고 두 값의 평균값(Avr①)을 구한다. 마찬가지 방법으로 ②영역의 Avr②를 구한다. 결국 Avr①과 Avr②값의 차이가 ①영역과 ②영역의 변형량 차이 값인 PD가 되고, PD값과 ①영역의 중심과 ②영역의 중심 사이의 거리인 p(240mm)값을 식 (2)에 대입하여 지향오차를 계산할 수 있다. 고도별 PD, PE, ES 해석 결과를 표 6과 그림 7에 각각 나타내었다.

그림 7a는 그림 6의 ①영역과 ②영역의 고도각 변화에 따른 변형량 차이를 나타내는 플레이트 변형으로, 그래프를 살펴보면 30° ~ 90°까지 선형적으로 값이 증가하는 것으로 보아 고도가 높아질수록 가대의 변형이 커지는 것을 볼 수 있다. 10° ~ 30° 사이에 (-)부호가 붙은 것은 그림 6에서 변형되는 방향이 반대인 것을 의미하고, 광학계의 무게중심축과 구동축이 정확히 일치하지 않기 때문에

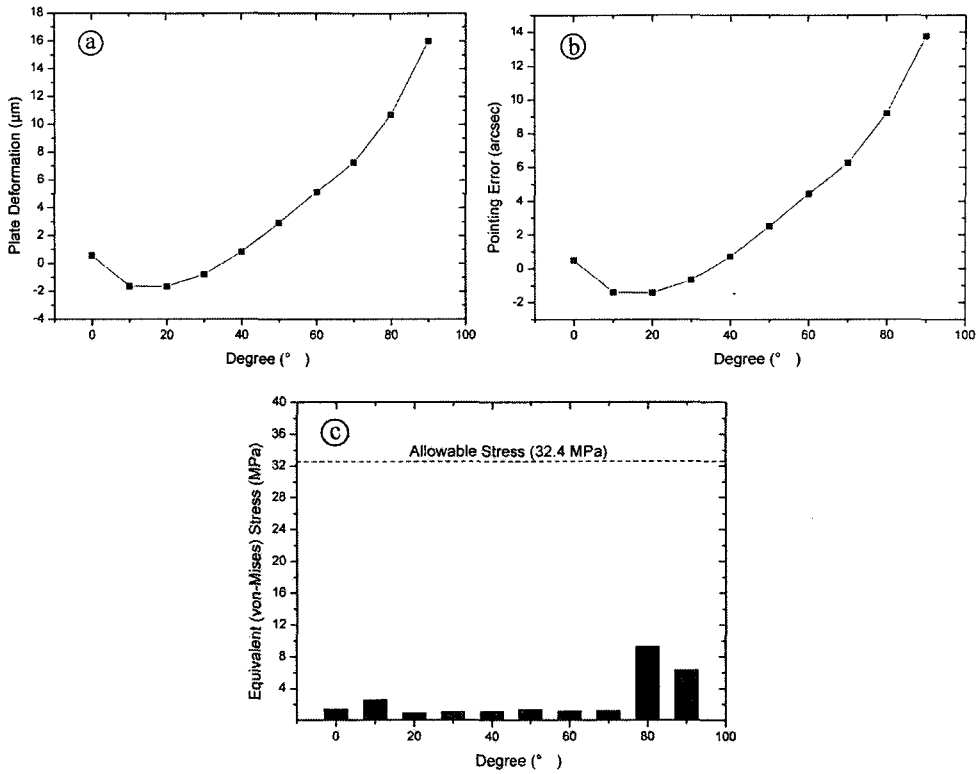

그림 7. 고도각 변화에 따른 PD, PE, ES 그래프.

생기는 현상이다. 그림 7b는 고도각 변화에 따른 개조된 가대의 지향오차를 나타내는 것으로, PD와 마찬가지로 고도각이 커질수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 7c는 고도각 변화에 따른 다중광학계 탑재용 가대 시스템에서 발생하는 등가응력을 나타내며, 고도각 80°에서 최대치를 보이며, 허용응력의 1/4 정도가 발생하는 것을 알 수 있다.

4. 결론 및 토의

SS&T에서 기존에 개발했던 인공위성 추적 및 관측용 가대는 관측 목적이나 방법에 따른 광학계의 교체가 불가능하고 또한 탑재된 광학계의 F수가 커서 저궤도 인공위성을 관측하는데 효율성이 높지 않았다.

이 연구에서 개발된 가대는 측광 및 분광 동시 관측이 가능하고 관측 목적에 따라 유연하게 다중광학계를 탈/부착할 수 있도록 설계하였다. 관측 시 사용되는 시스템의 무게를 고려하여 자중에 의한 하중조건을 주었고 가대에 발생하는 등가응력 해석 결과, 고도각 80°에서 축 부품에서 최대값(9.364MPa)을 보였고, 이 값은 허용응력(32.4MPa)의 약 20% 미만으로 구조적인 안전성을 확인하였다(Gere 2003). 또한 인공우주물체 추적 및 관측 시에 생기는 고도별 지향오차를 추론하기 위하여 하중에 의해 직접적으로 영향이 미치는 지점의 전체 변형을 해석하였다. 고도각 90°에서 가

대 변형 최대값(16μm)이 나왔고 고도별 관측 지향 오차 13.75arcsec 미만으로, 6인치 f/5 뉴토니언식 망원경에 Neptune100 Video CCD를 조합한 결과, 대상이 중심에 있다고 가정할 때 관측시야(44 × 38arcmin)에서 거의 벗어나지 않음을 보여 이 연구에서 설계한 다중광학계 탑재용 가대가 인공우주물체를 추적/감시하는 데 안정적이라는 결론을 얻었다. 또한 일반 상용 천체관측용 망원경을 인공우주물체 추적용 가대로 변형하여, 이를 구조해석으로 검증한 논문으로 향후 전문적인 망원경 가대를 설계하는 데 유용할 것으로 판단된다.

향후 작업으로는 형상 최적화 해석을 통해서 모델에 작용하는 하중의 경로를 토대로 불필요 하거나 보강해야 할 영역을 검토하고, 다중광학계 탑재용 가대를 제작하여, 실제 관측에서 생기는 관측오차와 이 연구에서 수행한 구조해석을 통해 생긴 지향오차를 비교/분석하는 과정 등을 계획하고 있다.

참고문헌

민상웅 2004, 석사학위 논문, 경희대학교

이동규 2004, 박사학위 논문, 경희대학교

Gere, J. M. 2003, SI 재료역학 5판 (서울: 인터비전), pp.3-25