J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(3), 243-249(2021)
DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.3.243
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

천리안 2A호 별추적기 태양 차폐각 궤도상 운영 검증

강우용[1], 백광열[2], 김승균[3]

Verification of the Star Tracker Sun Exclusion Angle of GEO-KOMPSAT-2A Through In-Orbit Operation

Woo-Yong Kang[1], Kwangyul Baek[2] and Seungkeun Kim[3]
Korea Aerospace Research Institute[1,2]
Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University[3]

ABSTRACT

The star tracker detects microscopic star light in space and compares it with a stored list of stars to calculate the satellite's position in the inertial coordinate system. If other light, such as the sun or the earth, enters the optical head, the star cannot be recognized and the star tracker cannot be operated. In particular, strong light such as the sun affects not only operation but also the performance of the star tracker. The sun exclusion angle of the star tracker is one of the important factors determining the performance of the star tracker. This paper performs the verification of the star tracker's sun exclusion angle. In order to verify the sun exclusion angle, we predict the sun exclusion time of the star tracker and compare it to the actual sun exclusion time of the GEO-KOMPSAT-2A star tracker. In addition, the performance of the star tracker is analyzed for normal operations against the sun exclusion in the optical head. It shows that the actual sun exclusion is maintained under the range of 26 degrees, the performance requirement of the star tracker, and the star tracker operates normally in spite of the sun exclusion.

초 록

별추적기는 우주공간에서 미세한 별 빛을 감지한 후 저장된 별 목록과 비교하여 관성좌표계상에서 위성의 자세 정보를 제공한다. 별 이외에 태양이나 지구와 같은 다른 빛이 광학계(OH : Optical Head)로 들어가게 될 경우 별을 인식할 수 없음으로 별추적기를 운영할 수 없다. 특히, 태양과 같은 강한 빛이 들어올 경우 별추적기 운영뿐 아니라 성능에도 영향을 미친다. 별추적기의 태양 차폐각(SEA : Sun Exclusion Angle)은 별추적기의 성능을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 본 논문에서는 별추적기의 태양 차폐각에 대한 검증을 수행하였다. 태양 차폐각 검증을 위해서 별추적기의 태양 차폐 시간을 예측하였으며 실제 천리안 2A호 별 추적기에서 발생한 태양 차폐 시간과 비교하였다. 또한, 광학계에 태양에 의한 차폐가 발생할 경우 별추적기가 정상적으로 동작하는지에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과 별추적기는 성능 요구사항인 26° 이내에서 태양 차폐가 발생하였으며 태양 차폐가 발생할 경우에도 정상 동작함을 확인하였다.

Key Words : Star Tracker Assembly(별추적기), Optical Head(광학계), Multiple-heads STA(다중머리별추적기), Sun Exclusion Angle(태양 차폐각)

† Received : September 22, 2020 Revised : December 29, 2020 Accepted : February 3, 2021
[1,2] Senior Researcher, [3] Professor
[3] Corresponding author, E-mail : skim78@cnu.ac.kr, ORCID 0000-0001-6163-622X
© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Ⅰ. 서 론

2010년 발사한 천리안 1호(COMS : Communication, Ocean and Meteorological Satellite)를 대체하기 위해서 2011년부터 정지궤도복합위성 사업의 일환으로 기상관측위성인 천리안 2A(GK2A : GEO-KOMPSAT-2A)호와 해양, 환경관측위성인 천리안 2B(GK2B : GEO-KOMPSAT-2B)호 개발 사업을 시작하였다. 그 중 천리안 2A호는 2018년 12월 4일 20시 37분(UTC)에 기아나 우주센터에서 발사되었다. 이후 위성체 및 탑재체의 초기 운영을 거쳐서 현재 정상 운영되고 있다.

천리안 2A개발에서는 국내에서 제작한 정지궤도 위성 최초로 별추적기(STA : Star Tracker Assembly)를 사용하였다. 별추적기는 우주 공간에서 촬영한 별 영상을 저장된 별 목록(Star Catalogue)과 비교 분석하여 위성의 자세를 제공해 주는 장치이며 자이로와 함께 위성자세결정에 있어서 중요한 역할을 담당한다[1]. 이를 위해 천리안 2A호는 SODERN사(프랑스)의 다중머리별추적기(Multiple-heads STA)인 HYDRA 별추적기를 사용하여 자세를 측정한다[2].

HYDRA 별추적기는 하나의 전자박스(EU : Electric Unit)에 여러 개의 광학계(OH : Optical Head)를 연결하여 사용하는 구조를 가지고 있다. 그러므로 광학계에 태양 또는 지구의 간섭이 발생하더라도 간섭이 발생하지 않는 다른 광학계에서 획득한 별 영상을 이용하여 계속적인 자세 정보 제공이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이에 비해서 전자박스에 하나의 광학계만으로 이루어지는 단일머리 별추적기(Single-head STA)의 경우 태양 및 지구 간섭이 발생하는 경우 자세 정보를 제공하지 못한다.

본 논문에서는 천리안 2A에서 사용한 별추적기의 성능 요구사항 중의 하나인 태양 차폐각을 궤도상 데이터를 이용하여 검증해 보았다. 이를 위해 2절에서는 천리안 2A에서 사용하는 별추적기의 형상 및 성능을 간략히 소개한다. 3절에서는 별추적기가 태양 차폐각 성능 사양대로 동작하는지를 검증하기 위하여 임무 궤도에서의 운영 데이터를 이용하여 예측된 태양 차폐 시각에서 태양 차폐가 발생하는지 확인을 한 후 태양 차폐가 발생할 경우 정상적으로 별추적기가 동작하는지를 확인하였다. 마지막으로 4절에서는 결론 및 향후 계획으로 마무리한다.

Ⅱ. 별추적기 형상 및 성능

2.1 별추적기 형상

SODERN사에서 제작하는 HYDRA 별추적기는 하나의 전자박스에 1~4개의 광학계를 결합시켜 사용할 수 있으며 천리안 2A호에서는 Fig. 1과 같이 2개의

Fig. 1. HYDRA Configuration

전자박스와 3개의 광학계로 된 별추적기를 구성하였다. 각 광학계는 태양, 지구, 달, 위성체 반사광 등의 빛을 차단하는 배플(Baffle)이 장착되어 있다. 22° 크기의 FOV(Field Of View) 안에 들어오는 별 영상을 CMOS 센서로 획득하는 역할을 수행하며 획득한 별 영상의 픽셀 정보를 전자박스로 보내게 된다. 전자박스에서는 각 광학계에서 받은 정보를 취합하여 자세를 계산한다[3]. 두 개의 EU는 Y자 형태의 하니스(harness)를 통하여 3개의 광학계 모두와 연결되며 정/부(Primary/Redundant) 개념으로 운영된다.

2.2 별추적기 성능

천리안 2A호 사용한 HYDRA 별추적기의 강건성(Robustness)과 자세 정확도(Attitude Accuracy)와 관련된 주요 성능은 Table 1과 같다[4]. 별추적기의 강건성을 나타내는 항목인 태양 차폐각(SEA)과 지구 차폐각(EEA)은 각각 26°, 18.5°이다. 광학계의 중심에서 이 각도 안에 태양이나 지구가 들어오게 되면 광

Table 1. HYDRA Technical Specification [4]

Robustness			
SEA (Sun Exclusion Angle)			26 deg
EEA (Earth limb Exclusion Angle)			18.5 deg
Attitude Accuracy (in arcsec)			
	Single OH		Multi OH
	X-Y	Z	X-Y-Z
Bias	11	11	11
LFE (Low Frequency Error)	2.2	5	1.5
NEA (Noise Equivalent Angle)	9.6	77	9.7

학계에서는 별빛을 인식하지 못하게 된다. 태양 차폐각과 지구 차폐각이 작을수록 태양과 지구가 광학계의 FOV 영역에 가까워지더라도 별 빛을 인식할 수 있으므로 주변 환경에 강건하고 동작할 수 있다.

광학계에 태양이나 지구가 들어올 경우 해당 광학계는 사용하지 못하게 되며 이로 인하여 별추적기의 자세 정확도는 감소한다. 광학계를 1개만 사용하는 경우(Single OH) 저주파 오차(LFE)와 잡음각(NEA) 오차가 증가함을 확인할 수 있다. 그러므로 별추적기 광학계의 장착각을 정할 때 지구 및 태양에 의한 광학계의 차폐 발생이 최소화되면서 다수의 별 영상을 획득할 수 있도록 설정한다[5,6].

III. HYDRA 별추적기 차폐각 검증

3.1 HYDRA 별추적기 차폐 구간 예측

천리안 2A호 임무궤도에서는 위성은 지구 지향 모드(EPM : Earth Pointing Mode)로 운영된다. 지구 지향 모드에서의 위성 좌표계는 Fig. 2에서와 같이 지구를 향하는 방향이 +Z축, 태양 전지판이 놓여 있는 방향이 +Y축, 위성 진행방향이 +X축이 된다.

임무궤도에서의 별추적기의 광학계는 진향 방향의 반대편인 -X축에 위치하며 배치 형상은 Fig. 3과 같다. 위성 좌표계에서의 별추적기 광학계가 향하는 방

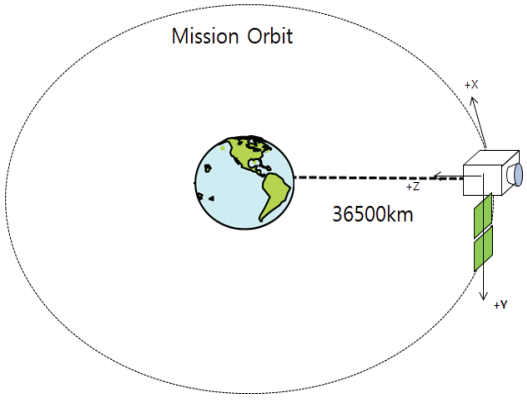

Fig. 2. Earth Pointing Mode(EPM)

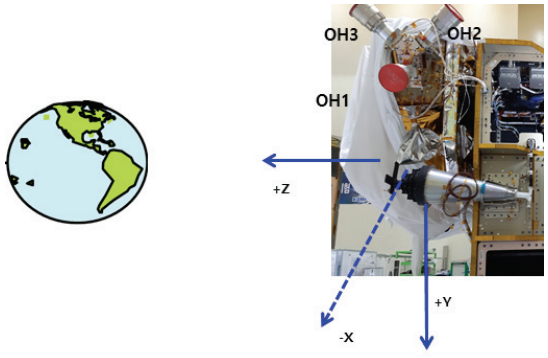

Fig. 3. STA Configuration in EPM

Table 2. OH ZOH axis Direction

No.	X	Y	Z
OH1	-0.8192	0.5736	0.0
OH2	-0.4029	-0.5811	-0.7071
OH3	-0.4029	-0.5811	0.7071

향벡터(Z_{OH})를 계산하면 Table 2와 같다. 별추적기 광학계의 방향벡터를 통해서 광학계 1번은 -X축과 +Y 축을 향하는 배치를 가짐을 알 수 있다. 또한, 광학계 2번은 -X축과 -Y축, 지구 반대 방향인 -Z축을 향하는 배치를 가짐을 확인할 수 있으며 광학계 3번은 광학계 2번과 동일한 X, Y축 배치를 가지나 Z축은 지구를 바라보는 +Z축을 향하는 배치를 가짐을 확인할 수 있다.

태양 차폐각 예측을 위해서 먼저 지구 지향 모드에서 위성 좌표계 상의 태양 방향 벡터($\vec{S}$)를 Fig. 4에서 같이 정의한 후 아래 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} S_x &= -\cos(\beta)\cos(\theta) \\ S_y &= -\sin(\beta) \\ S_z &= \cos(\beta)\sin(\theta) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, θ는 XZ 평면상에서의 태양의 위치로서 지구 지향 모드이므로 +Z축을 원점으로 반시계 방향으로 각도를 계산하며 β는 XZ 평면을 기준으로 태양의 고도(-23.5°~23.5°)이다.

식 (1)에서 구한 태양 벡터는 위성의 위치를 고려하지 않았다. 정지궤도 위성의 경우 경도에 따라서 태양 벡터가 달라진다. 그러므로 식 (1)에서 정의한 θ 값에서 천리안 2A호 경도(Longitude)인 128.25°를 더해서 태양 벡터를 계산해야 한다.

식 (1)에서 구한 태양 벡터와 Table 2에서 정의한 별 추적기 광학계가 향하는 방향 벡터(Z_{OH})를 아래 식 (2)와 같이 내적하게 되면 각 광학계의 중심과 태양 사이의 각도를 계산할 수 있다. 광학계 중심에서의 태양 각도가 태양 차폐각인 26° 이내로 들어오게 되면 태양 차폐 구간으로 판단하였다[7].

$$OH_n^{Sa} = \cos^{-1}\left(\overrightarrow{OH_n} \cdot \vec{S}\right) \tag{2}$$

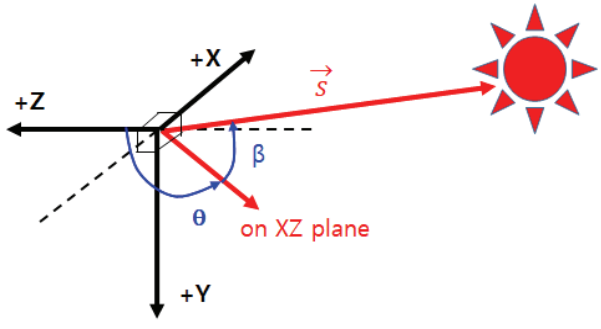

Fig. 4. Sun Direction Vector

여기서, OH_n^{Sa}는 n번째 광학계에서의 태양 각도를 의미하며, $\overrightarrow{OH}$는 위성 좌표계에서 광학계의 방향 벡터(Z_{OH}), $\vec{S}$는 위성 좌표계에서 본 태양의 방향 벡터를 의미한다.

광학계에서 본 태양각도는 위성에 장착된 광학계가 고정되어 있으므로 위성 좌표계에서의 태양의 방향벡터에 따라 달라지게 된다. 그러므로 태양 고도가 0°인 춘·추분(Equinox), 태양 고도가 23.5°로 최대가 되는 하지(Summer Solstice)와 태양 고도가 -23.5°로 가장 낮은 동지(Winter Solstice)에서 태양 차폐 기간을 계산하였다.

광학계 1번의 경우 Fig. 5에서와 같이 동지에서 태양 차폐가 최대로 발생하며 태양 차폐 시간은 7.6~11.2시(UTC)로 3.6 시간으로 예측이 되었으며 빨간색으로 표시를 하였다. 광학계 2와 3번은 Figs. 6, 7에서와 같이 하지에서 최대의 태양 차폐가 발생하며 광학계 2번의 경우 3.6~7.2시(UTC), 광학계 3번은 11.6~15.2시(UTC)에서 태양 차폐가 발생하는 것으로 예측되었다. 춘·추분(Vernal Equinox, Autumn Equinox)에서는 모든 광학계에서 태양 차폐가 발생하지 않는다.

이는 별추적기의 배치 및 태양의 위치를 고려했을 때 태양의 고도가 낮은 동지에서는 위성의 아래쪽 방향인 +Y쪽으로 향해있는 광학계에 태양이 들어가게 되며 반대로 태양의 고도가 높은 하지 때에는 -Y축을 향하도록 배치된 광학계 2, 3번에 태양이 들어가게 된다. 이를 통하여 천리안 2A호 운영기간 동안 하지에서는 최대 7.2시간의 태양 차폐가 발생하며 동지에서는 3.6시간의 태양 차폐 구간이 발생함을 예측할 수 있다.

참고로 천리안 2A호 임무궤도에서는 지구에 의한 간섭은 발생하지 않는다. 식 (3)을 이용하여 광학계 중심에서의 지구의 각도를 계산하면 광학계 1번은 90°, 광학계 2번은 134.9°, 광학계 3번은 45°로 계산이 된다. 태양과 달리 정지궤도에서는 지구의 크기를 고려해야 한다. 식 (4)를 이용하여 천리안 2A호에서 보이는 지국의 각 크기 절반(Earth Aspect Half Angle)인 E_{AHA}를 계산하면 8.48°이다. 광학계의 중심과 지구 사이의 각이 지구의 각 크기 절반과 지구 차폐각(EEA, 18.5°)을 더한 값보다 크게 되므로 광학계에서 지구 차폐는 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

$$OH_n^{Ea} = \cos^{-1}\left(\overrightarrow{OH_n} \cdot \vec{E}\right) \tag{3}$$

여기서, OH_n^{Ea}는 n번째 광학계에서의 지구 각도를 의미하며, $\vec{E}$는 위성 좌표계에서 본 지구의 방향 벡터로서 지구 지향이므로 [0 0 1]이다.

$$E_{AHA} = \tan^{-1}\left(\frac{R_E}{R_G + R_E}\right) \tag{4}$$

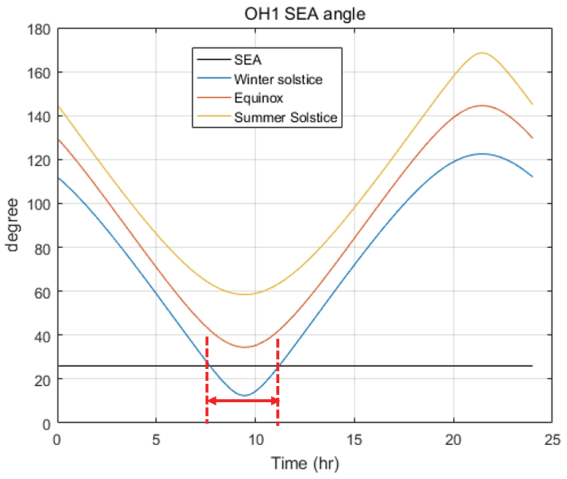

Fig. 5. OH1 SEA Prediction Results

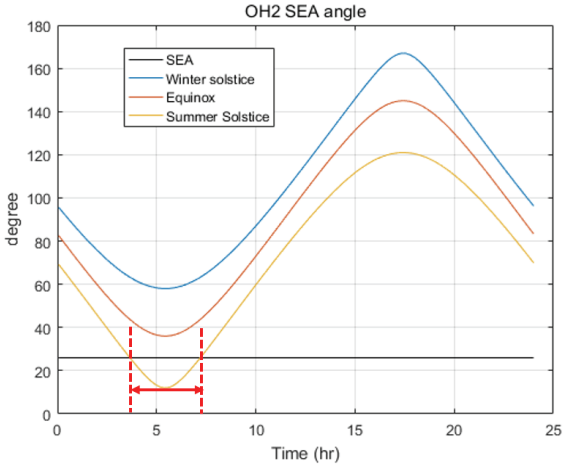

Fig. 6. OH2 SEA Prediction Results

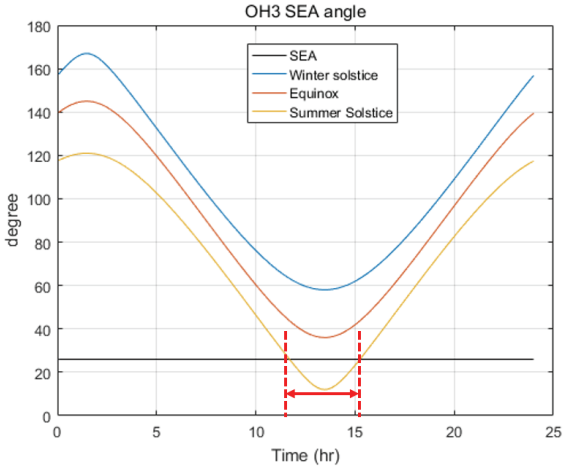

Fig. 7. OH3 SEA Prediction Results

여기서, R_G는 지구와 천리안 2A 임무궤도(정지궤도) 사이의 거리인 36,500km, R_E는 지구 반지름 6,400 km를 의미한다.

3.2 HYDRA 별추적기 태양 차폐각 검증

천리안 2A호 실제 운영 데이터 중에서 춘·추분, 하지, 동지 기간에 받은 데이터(TM : Telemetry)를 이용하여 광학계와 태양 사이의 각도를 계산한 결과(OH1 TM, OH2 TM, OH3 TM)와 식 (2)를 이용하여 예측한 광학계와 태양 사이의 각도(OH1 Sim, OH2 Sim, OH3 Sim) 비교하였다. 춘분점에 대한 두 값의 비교 결과 광학계 3개 모두 -2°~2° 범위에서 각도 차이가 발생함을 확인할 수 있다.

식 (1)은 궤도 경사각이 0°인 원 궤도로 가정하여 위성과 태양이 이루는 각만을 이용하여 광학계와 태양 사이의 각도를 계산한다. 그러나 천리안 2A호는 지상국에서 궤도 결정을 통하여 계산한 정밀한 궤도를 이용한다. 이를 바탕으로 태양 방향 벡터를 계산하므로 식 (2)에서 구한 광학계와 태양이 이루는 각도는 차이가 있을 수 있다. 그러나 실제 운영에서 발생하는 태양 차폐 구간을 예측을 위해서 사용하는 경우 식 (1)을 사용하는 전체적인 경향성은 일치하므로 문제가 없다.

비교 결과 Figs. 9, 10에서와 같이 춘·추분에서는 모든 광학계에서 태양 차폐가 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 하지 부근에서는 Fig. 11에서와 같이 광학계 2번과 3번에서 태양 차폐가 발생하며 동지에서는 Fig. 12에서와 같이 광학계 1번에서 태양 차폐가 발생한다.

별추적기 성능 요구사항인 태양 차폐각 26°도 부근에서 태양 차폐가 정상적으로 이루어지는지 확인하기 위해서 천리안 2A호 운영 데이터를 이용하여 계산한 광학계 중심에서 태양각도가 이루는 각이 26°가 되는 시간과 유효한 광학계 정보(OH Validity TM) 값이 변화되는 시간을 비교하여 보았다. 유효한 광학계 정보의 경우 위성에서 전송되는 데이터 중에

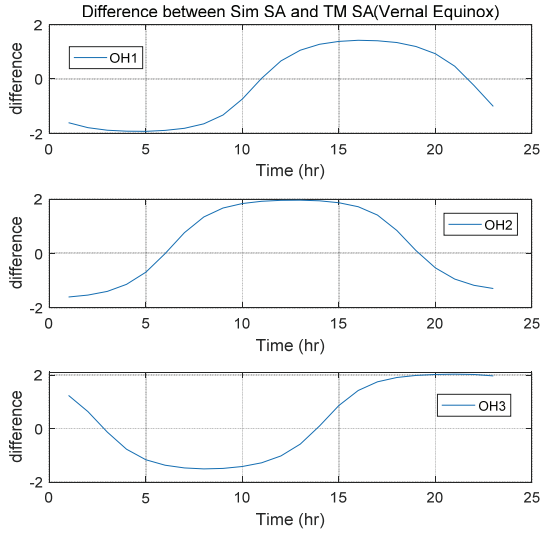

Fig. 8. Difference between Sim SA and TM SA (Vernal Equinox)

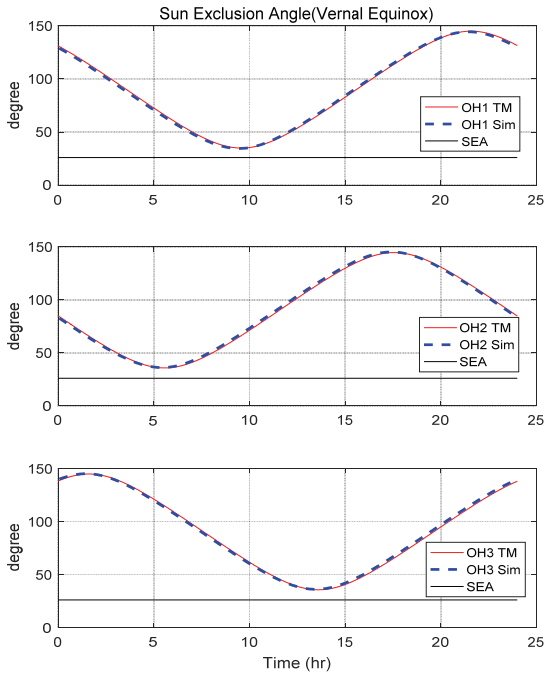

Fig. 9. Sun Angle(Vernal Equinox)

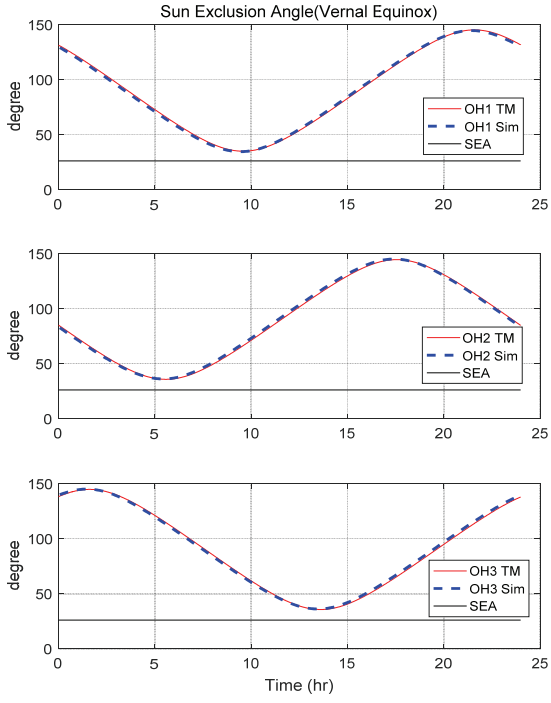

Fig. 10. Sun Angle(Autumn Equinox)

하나로서 현재 별추적기에서 사용하고 있는 광학계의 정보를 표시한다. 사용하고 있는 광학계에 태양 차폐가 발생하게 되면 별추적기는 차폐가 발생한 광학계를 제외하고 정상으로 동작하는 광학계만을 이용해서 자세를 계산하게 된다. 이를 유효한 광학계 정보라는 항목으로 4초 주기로 지상으로 전송한다. 이에 대한 정의는 Table 3과 같다.

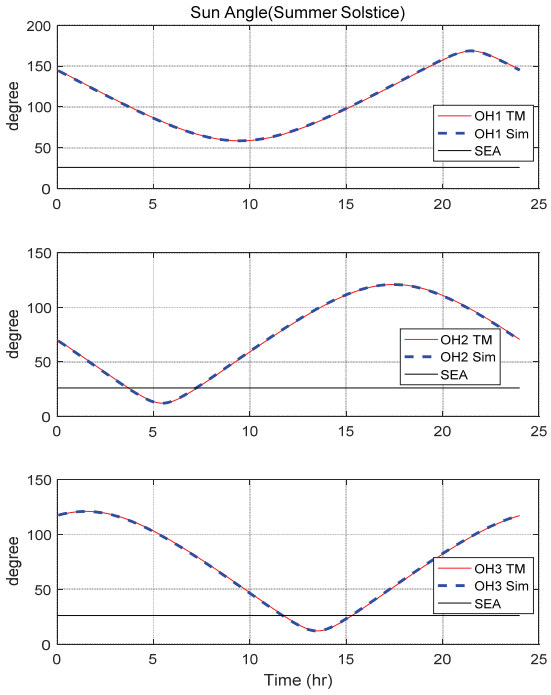

Fig. 11. Sun Angle(Summer Solstice)

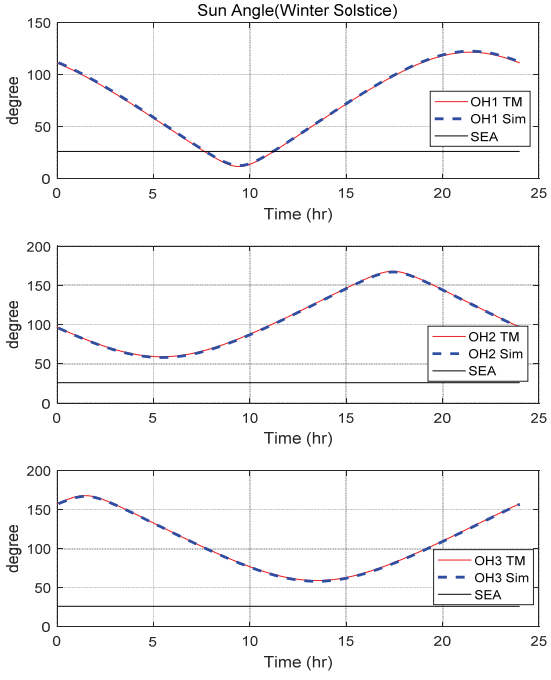

Fig. 12. Sun Angle(Winter Solstice)

광학계 차폐가 발생하지 않는 춘·추분에서는 Fig. 13에서와 같이 유효한 광학계 정보 값이 전체 구간에서 7로 나옴을 확인할 수 있다. 광학계에 차폐가 발생하고 있는 하지와 동지에서는 유효한 광학계 정보의 값이 광학계의 차폐에 따라 변화됨을 Fig. 14와 15를 통하여 확인할 수 있다. 동지에서는 Fig. 14와 같이 광학계 1번 중심에서 태양과 이루는 각이 태양

Table 3. OH Validity

OH Valid	Value
No OH	0
OH1	1
OH2	2
OH3	3
OH1, OH3	4
OH2, OH3	5
OH1, OH2	6
OH1, OH2, OH3	7

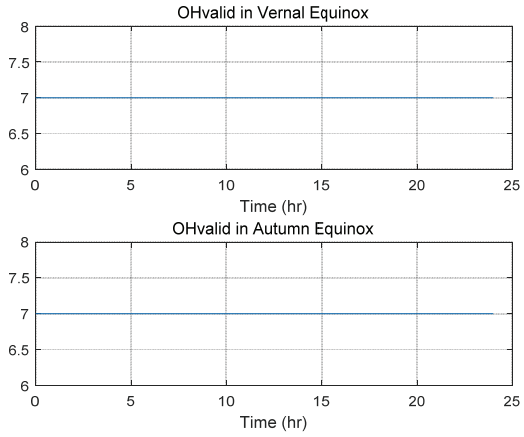

Fig. 13. OHvalid in Vernal and Autumn Equinox

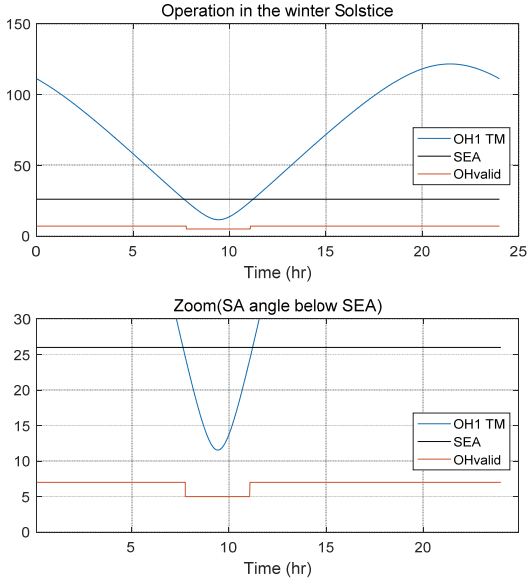

Fig. 14. Operation in the Winter Solstice

차폐각인 26° 이하가 되면 유효한 광학계 정보 값은 5가 된다. 하지에서는 Fig. 15와 같이 광학계 2번, 3번과 태양 사이의 각이 태양 차폐각인 26° 이하로 되는 구간에서 유효한 광학계 정보 값이 4와 6으로 변경됨을 확인할 수 있다.

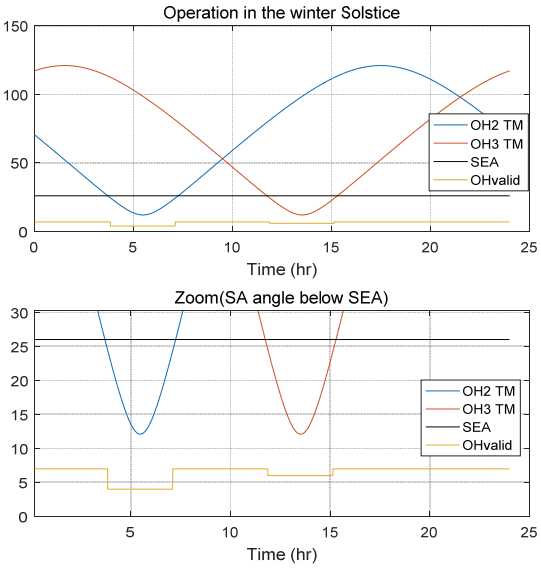

Fig. 15. Operation in the Summer Solstice

차폐 구간에 대한 확대한 그림을 보게 되면 태양 간섭이 발생하는 광학계와 태양의 각도가 이루는 각이 24.5°에서 광학계를 제외하고 있음을 확인할 수 있다. 26° 이하에서 태양 차폐가 발생한 광학계를 제외하고 있으므로 성능 요구사항대로 동작하고 있음을 확인할 수 있다. 별추적기는 광학계 내부로 들어오는 태양광을 측정하여 광학계의 태양 간섭 여부를 판단하므로 주변 상황에 따라서 광학계와 태양이 이루는 각이 26°보다 작아져도 광학계를 제외하지 않고 사용이 가능하다. 그러나 주변 상황에 따라 달라지므로 26° 미만의 범위에서는 사용 여부를 보장하지는 않는다. 만약 26°보다 큰 범위에서 광학계를 제외한다고 하면 성능 요구사항을 만족하지 못하게 된다.

Ⅳ. 결 론

태양 차폐각은 별추적기 성능을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 이에 대해서 실제 운영되는 천리안 2A 위성의 별추적기 데이터를 이용하여 검증을 수행하였다. 검증결과 예측된 구간에서 각 광학계서 차폐가 발생함을 확인하였다. 또한, 별추적기 성능 요구사항인 26° 범위에서 태양 차폐가 발생하고 태양 차폐가 발생할 경우 해당 광학계를 배제하고 별추적기가 자세 계산을 수행하고 있음을 검증하였다. 태양 차폐가 가장 많은 시간 발생하는 하지에서도 하나의 광학계만 태양 차폐가 발생하므로 별추적기의 성능 유지에는 문제가 없음을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 국내 최초로 정지궤도에서 다중머리 별추적기의 운영 데이터를 확보할 수 있었으며 확보된 데이터는 앞으로 사용할 다중머리 별추적기 운영에 활용할 수 있다.

References

1) Ju, G. H. and Lee, S. R., “Overview of Star Tracker Technology and Its Development Trends,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 3, 2010, pp. 300~308.

2) Shin, I. S., Rhee, S. H., Ryu, C. W. and Nam, M. R., “EM Development of Dual Head Star Tracker for STSAT-2,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 34, No. 2, 2006, pp. 96~100.

3) Kang, W. Y., Park, K. J. and Park, W. Y., “Result Analysis of GEO-KOMPSAT-2A Star Tracker in the Launch and Early Orbit Phase,” *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences spring Conference*, November 2019, pp. 482~483.

4) http://www.sodern.com

5) Baek, K., Kwon, J. and Park, Y., “Star Visibility Analysis of Star Tracker for Korean Pathfinder Lunch Orbiter,” *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences fall Conference*, November 2017, pp. 635~636.

6) Lee, H. G., “A Study on the Determination of Star Sensor Mounting Direction for Remote Sensing Satellite,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 35, No. 8, 2007, pp. 735~740.

7) Kang, W. Y. and Baek, K. Y., “Verification of the Sun Exclusion Angle of the Star Tracker Assembly,” *Proceeding of Avionics System Symposium Korea*, 2019, p. 81.