技術論文

저궤도 위성에서 별센서의 가시성을 위한 Yaw Motion에 따른 열적 영향 고찰

김희경*, 이장준*, 현범석*

An Investigation in the Thermal Effect on a Low Earth Orbit Satellite under Yaw Motion for the Visibility of a Star Sensor

Hui-Kyung Kim*, Jang-Joon Lee* and Bum-Seok Hyun*

ABSTRACT

Thermal condition according to the operation attitude of a satellite in orbit would be essential to be known because the orbit attitude is a dominant factor to affect satellite thermal design. In this paper, the change in space thermal environment and the thermal effect in thermal design are studied for a low earth orbit satellite according to the yaw motion.

The present satellite retains sun-pointing attitude during daylight due to the fixed type solar arrays. And it also moves along the orbit with constant yaw motion in a longitudinal axis so that a star tracker which is a star sensor for satellite's attitude control always looks into the deep space. This attitude is considered in its better visibility to the stars for a successful mission operation. Also, it is required to access the corresponding thermal effects due to the yaw motion. Therefore, we try to verify these by the thermal analysis for the satellite thermal model with the yaw motion.

초 록

위성 궤도 자세는 위성 열설계에 영향을 주는 중요한 요소로서, 궤도 운용 자세에 대한 열적 조건을 정확히 파악하는 것을 필요로 한다. 본 연구에서는 저궤도 위성의 yaw motion의 운영 자세에 따른 우주 열환경의 변화와 열설계의 열적 영향을 검토하였다.

본 위성은 고정형의 태양 전지판을 가지고 있기 때문에 태양광 구간 동안에 태양지향(sun-pointing)자세를 유지하고, 위성에 장착되는 별센서인 별추적기의 가시 방향이 심층 우주 방향을 향하도록 하기 위하여 위성의 길이 방향을 축으로 일정한 각속도로 회전을 하는 yaw motion을 하도록 운용된다. 이것은 위성이 정밀한 자세 제어의 성능을 발휘할 수 있도록 별추적기가 별의 시야각을 확보하기 위한 것이다. 또한 위성 열설계 측면에서는 이러한 운용을 위한 자세 변화에 따른 열적 영향을 파악하는 것을 필요로 한다. 연구에서는 위성의 열모델에 이러한 궤도 운용 자세를 반영한 후의 궤도 열해석을 통하여 이를 알아보고자 한다.

Key Words : Low Earth Orbit Satellite(저궤도 위성), Satellite Thermal Design(위성 열설계), Satellite Thermal Analysis(위성 열해석), Satellite Thermal Model(위성 열모델), Satellite Orbit Attitude(위성 궤도 자세), Space Thermal Environment(우주 열환경)

† 2009년 2월 27일 접수 ~ 2009년 5월 28일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 위성열추진팀
교신저자, E-mail : harry@kari.re.kr
대전광역시 유성구 어은동 과학로 115번지

Ⅰ. 서 론

위성의 방열판 설계는 위성 궤도와 운용 자세에 따른 우주 열환경 조건에 대하여 위성의 내부 열을 방출하도록 적절한 크기의 방열 면적을 확보하여 허용온도 범위를 유지하도록 하는 것이다.

이러한 점에서 최악의 hot 조건에 대한 열해석을 통하여 필요로 하는 방열판을 허용하는 면적 안에서 설정하여 열적 안전성을 확보하게 된다. 내부열을 방출하기 위하여 방열판을 이용하는 것은 수동형 열제어 방법으로, 적용이 쉽고 안정적인 특징을 가지고 있다. 그래서 가능한 방열판 설계로 최대 허용 온도 조건을 만족하도록 하고, 방열 면적의 효율적인 설정을 위해 부품의 위치 선정이나 이동 시에 방열판을 장착하는 패널이 바라보는 방향에 따른 외부 열환경에 대한 열적 조건을 고려하는 것이 필요하다. 이것은 위성의 궤도 자세 변화가 외부 열환경의 변화와 그에 따른 패널의 열적 조건의 변화에 가장 큰 영향을 주는 요소이기 때문이다.

본 위성은 정의된 궤도 기본 운용 자세에 추가적으로 태양광 구간에서 위성 길이방향의 축을 기준으로 yaw motion의 운용을 함으로써 별센서인 별추적기(star tracker)의 장착 방향이 심층 우주(deep space)를 향하도록 자세를 가진다. 정밀한 위성 자세에 사용되는 별추적기의 성능을 향상시키기 위하여 별의 시야각 확보가 중요하기 때문에 이러한 운용을 필요로 한다. 본 연구는 열해석을 통하여 저궤도 관측 위성의 yaw motion 궤도 자세에 따른 열적 영향을 알아보고자 한다.

본문에서는 열해석을 하기 위한 해석 조건과 가정, 기하 열모델의 형상, 궤도 기본자세를 먼저 언급하였고, 다음으로 열해석 결과에서 yaw motion의 위성 자세에 대한 열적 영향을 검토하였다.

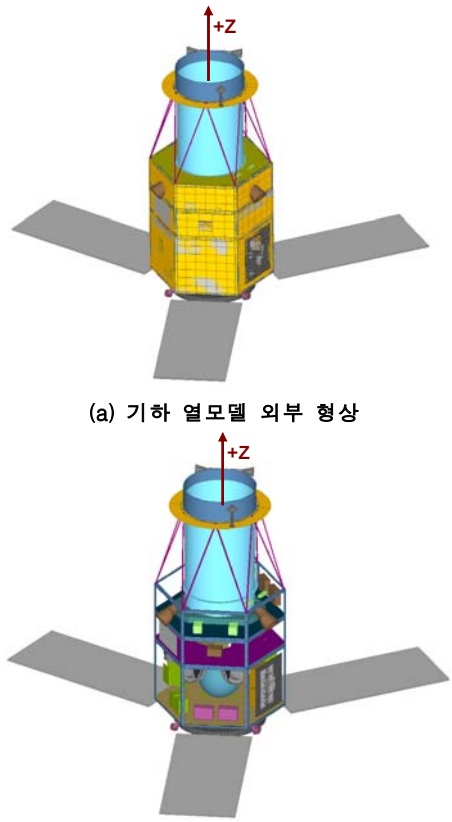
Ⅱ. 본 론

2.1 해석 조건과 위성 열모델

본 저궤도 위성의 기본 궤도 조건, 열환경 조건은 다음과 같다.

설계궤도조건

고도(Altitude) : 685.13 km
궤도 경사각(Inclination) : 98.13 deg
LTAN : PM 1:30



(a) 기하 열모델 외부 형상

(b) 기하 열모델 내부/외부 형상

Fig. 1. 위성 기하 열모델 형상

외부 열환경 해석조건(Worst hot condition)

태양상수(Solar constant) : 1420 W/m^2
Albedo : 0.35
지구복사열(Earth Radiation) : 249 W/m^2
EOL (End Of Life)의 광학 물성값

위성 해석 열모델은 위성의 형상정보를 가지고 있는 기하 열모델(geometric math model)과 해석 온도결과를 얻는 수치 열모델(thermal math model)로 구분되고, 두 열모델은 각각 상용프로그램인 Thermal Desktop/RadCAD와 SINDA/F로 개발되어 해석하였다.

Fig. 1은 기하 열모델에서 위성의 외부 형상과 내부 형상을 보여주는 그림으로, 열모델에서의 위성의 형상은 복잡한 실제 설계형상을 열해석에 적절하도록 단순화하여 개발된다.

2.2 위성 궤도 기본자세와 Yaw Motion의 정의

본 저궤도 위성의 궤도 기본자세는 태양광의 영향을 받게 되는 daylight 구간과 지구 그림자

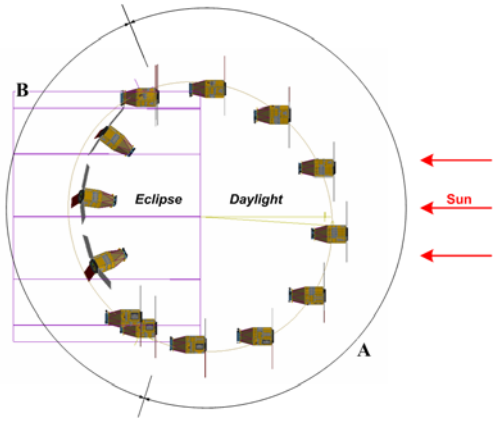
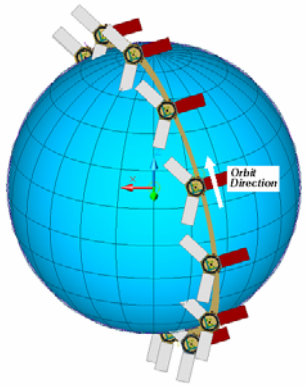


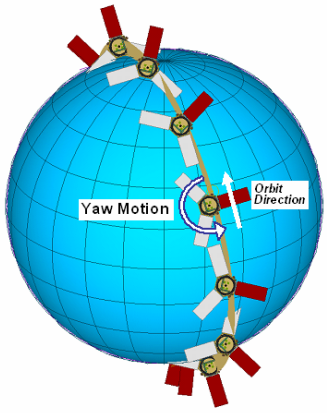
Fig. 2. 위성 궤도 자세 정의

구간인 eclipse 구간에서 다른 자세를 가진다. 주어진 Fig. 2가 궤도에서의 위성의 자세를 보여주는 그림으로, A구간이 daylight 구간이고, B구간이 eclipse 구간이다. 본 위성은 daylight 구간(A구간)에서는 고정형 태양 전지판을 가지고 있기 때문에 항상 태양 지향하는 sun-pointing 자세를 가지고, eclipse 구간(B구간)에서는 태양전지판의 장착 조건과 무관하게 탑재체인 관측용 카메라 부분이 지구 중심을 향하도록 하는 nadir-pointing 자세를 가지도록 하여 지구 복사열의 혜택을 받을 수 있도록 운영된다.

이러한 궤도 자세 조건에 자세 제어용 별센서인 별추적기의 별의 가시성(visibility)을 확보하기 위하여 sun-pointing 자세를 유지하는 daylight 구간 동안에 위성의 길이 방향 축 +Z를 기준으로 일정한 각속도로 회전하는 yaw motion을 한다. 이것은 위성의 공전 주기와 1회전 yaw motion의 주기를 동일하게 하는 각속도로 회전하기 때문에 위성의 패널면이 일정한 방향을 향하도록 유지하는 역할을 한다. 별에 대한 시야각 확보를 위한 yaw motion의 의미를 확인할 수 있는 그림이 Fig. 3에 주어져 있다. Fig. 3-(a)와 (b)가 각각 yaw motion의 유무에 따른 궤도 각 위치에서의 위성의 자세이고, 위성 패널면의 방향 변화를 쉽게 알 수 있도록 그림에 태양 전지판 중에 한 개를 구분되도록 나타내었다. 궤도면을 따라 위성이 진행할 때 sun-pointing의 자세를 유지하기 때문에 적도 부근에서는 두 가지 위성의 자세에 따른 방향이 거의 동일하지만, 극지방으로 진행하면서 차이가 나게 된다. Fig. 3의 그림을 비교해 보면, yaw motion을 하지 않는 경우 북극 부근에서 심층우주를 향하는 면이 남극 부근을 지나면서 지구표면을 향하게 되어 반



(a) Yaw Motion을 하지 않는 경우



(b) Yaw Motion을 하는 경우

Fig. 3. 태양에서 바라본 위성 궤도 자세

대로 바뀐다. 하지만, yaw motion을 하는 경우는 남극과 북극 부근에서 동일한 면이 심층우주를 향하는 자세를 유지하여 이 방향으로 별추적기가 장착되면 기존의 yaw motion을 하지 않는 경우, 지구에 의하여 센서가 가려지는 것을 피할 수 있다.

이러한 yaw motion에 따른 위성 궤도자세 변화는 위성 자세제어를 위한 측면 외에 패널면의 열환경 조건의 변화를 의미하기 때문에 이에 대한 열적 영향의 검토와 열적 안전성을 확보하기 위한 열설계에 대한 검증의 단계도 필수적이다.

2.3 Yaw motion 첨가에 따른 위성의 열환경 조건의 변화

Yaw motion을 반영한 열모델의 구체적인 온도 해석결과에서 영향을 검토하기 전에 위성 기하 열모델에서 알 수 있는 궤도에서의 위성자세 그림으로부터 패널면이 향하는 방향에 대한

hot/cold 열적 조건의 구분과 위성의 자세에 따른 각 패널면의 실제적인 열적 조건에 대한 검토가 먼저 이루어 졌다.

궤도면을 따라 운행을 하면서 위성 운영 자세에 따라 패널면이 향하는 방향은 정해기지 때문에 궤도 각 위치에서 태양광, Albedo, 지구복사열 등의 외부 열환경의 입사 조건에 따른 hot/cold 방향을 구분하게 되면 본 위성 각 패널의 실제적인 열적 조건을 판단할 수 있다. 이것은 위성의 초기 설계 단계에서 부품 박스의 배치와 위치를 선정할 때 열적인 면을 고려하게 되는 기준이 된다.

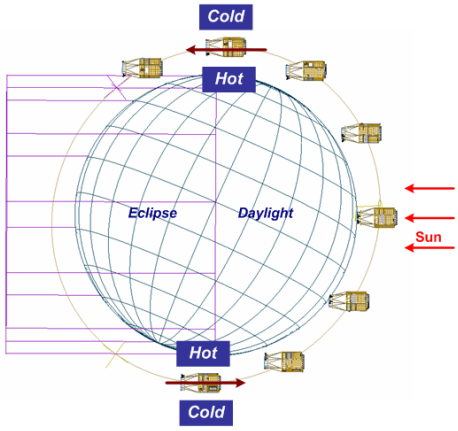
일반적으로 방열판을 장착하는 부분의 외부 열환경에 의한 hot/cold 열적 조건은 태양을 향하는 면과 그 반대 방향을 향하는 면으로 구분을 하게 된다. 이것은 저궤도 위성의 외부 열환경인 태양광, 지구 복사열, Albedo 세 가지 요소 중에서 태양광이 가장 지배적인 영향을 주는 요소이기 때문이다. 하지만, 본 연구의 저궤도 위성은 daylight 구간에서 sun-pointing 자세를 가지기 때문에 패널면이 태양광과 평행 상태를 유지하게 되어 직접적인 태양광은 입사하지 않고 지구 표면으로부터의 지구 복사열과 Albedo의 영향만을 받는다. 이러한 조건은 패널의 방향에 따른 패널간의 열적 조건을 태양 방향 기준이 아닌 지구 표면에 대한 영향의 정도로 구분이 가능하다.

주어진 그림 Fig. 4를 보면 궤도의 각 위치에서 sun-pointing의 자세에서의 지구 표면에 대한 위성의 자세를 알 수 있다.

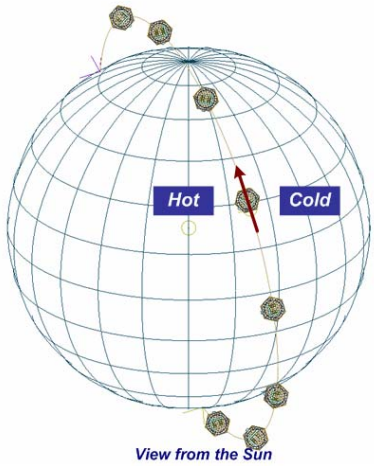
구체적으로 Fig. 4-(a)는 북극과 남극에서의 패널면의 방향에 따른 외부 열환경 조건으로 지구 방향을 향하는 면이 hot 조건이 되고, 반대 방향으로 심층우주를 향하는 면은 cold 조건이 된다.

하지만, 적도 부근에서는 위성이 궤도면을 따라 진행할 때, 패널면이 지구표면을 바라보는 정도에 따른 지구 복사열과 Albedo의 영향으로 구분되지만 극지방과 같이 구분의 경계가 확실하게 나누어 지지 않는다. 태양에서 위성을 바라보는 방향의 그림인 Fig. 4-(b)를 보면 적도 부근에서 궤도면의 왼쪽 방향이 오른쪽 방향보다 지구표면을 넓게 바라보기 때문에 hot 조건이 되고 오른쪽 방향은 cold 조건이 된다.

위성 궤도 각 위치에서 패널의 실제적인 열적 조건은 외부 열적 조건과 운영 자세에 따른 패널면의 방향을 동시에 고려할 때 가능하다. 본 연구의 위성 자세 변화에 대하여 패널면의 열적 조건의 변화를 비교하기 위하여 Fig. 5-(a)와 같이 각 방향으로 패널면에 고유번호를 부여하였다.



(a) 극지방 부근에서의 외부 열환경 조건- 궤도 수직 방향에서 본 방향

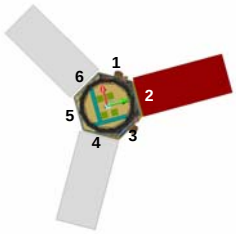


(b) 적도 부근에서의 외부 열환경 조건- 태양에서 바라보는 방향

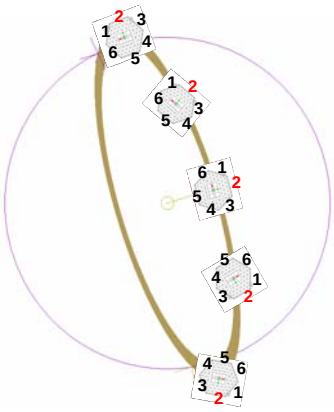
Fig. 4. Yaw Motion하에서 외부 열환경 조건

이 번호를 기준으로 yaw motion의 유무에 따른 궤도 위치에서의 패널면 방향의 차이에 대한 그림이 Fig. 5-(b), Fig. 5-(c)에 주어져 있다.

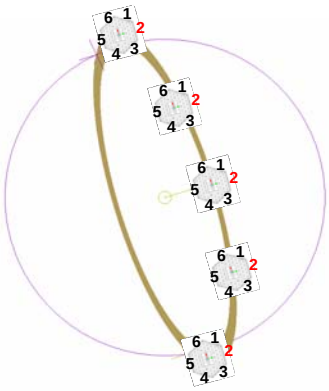
적도 근처에서는 yaw motion의 여부에 따른 각 패널면의 방향이 거의 동일하여 열적 조건 또한 같지만, 극지방으로 진행함에 따라 외부 열적 조건에 대한 패널면 방향의 차이가 나타난다. Yaw motion을 하지 않는 경우는 북극과 남극에서 hot 조건의 지구표면을 향하는 면과 cold 조건의 심층우주를 향하는 면이 반대로 된다. 하지만, yaw motion을 하는 경우 북극과 남극에서 지구표면을 향하는 면과 심층우주를 향하는 면이 동일한 면이 유지되어 패널면의 열적 조건 또한 그와 같도록 유지된다. 이것은 앞에서도 언급하



(a) 방향 기준의 위성 패널번호



(b) Yaw Motion을 하는 경우



(c) Yaw Motion을 하지 않는 경우

Fig. 5. 태양에서 바라보았을 때 Yaw Motion의 여부에 따른 위성 패널 방향

였듯이 별추적기 장착 방향이 항상 심층우주를 볼 수 있도록 yaw motion 운영을 하게 되는 개념과 동일하다. Table 1에서 yaw motion의 유무에 따른 북극, 적도, 남극 부근에서 위성 패널면의 실제적인 열적 조건을 패널면 번호로 정리한 표가 주어져 있다. 그 결과를 보면 yaw motion을 하지 않는 경우는 hot/cold 조건이 순차적으로 바뀌면서 나타나지만, yaw motion을 하는 경우는 모든 위치에서 hot/cold 조건이 동일하게

Table 1. Yaw Motion의 여부에 따른 위성 패널 열적 조건의 구분

(Yaw motion이 있는 경우)

궤도 위치 / 패널 열적조건구분	Hot	Cold
북극 부근		
적도 부근	4,5,6	1,2,3
남극 부근		

(Yaw motion이 없는 경우)

궤도 위치 / 패널 열적조건구분	Hot	Cold
북극 부근	3,4,5	6,1,2
적도 부근	4,5,6	1,2,3
남극 부근	6,1,2	3,4,5

유지된다는 것을 알 수 있다. 이것을 통하여 yaw motion 운용이 위성 패널면 간의 hot/cold 조건을 심화시켜 각 면의 상대적인 열적 구분을 확실하게 하는 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

2.4 Yaw motion 첨가에 따른 위성 열해석 결과의 검토

본 절에서는 위성의 내부 박스 배치와 해당 부분에 대한 방열판 설정 등의 기본 열설계가 된 상태에서 yaw motion의 운영 자세에 대한 열적 영향성을 궤도 열해석을 통하여 검토해 보고자 한다.

이전에는 위성의 구체적인 설계 조건을 고려하지 않고 단지 궤도와 자세에 따른 패널 자체 열적 조건만을 구분하였다. 하지만, 실제적인 열적 영향성의 파악은 각 패널의 각 방열판에 입사는 heat flux의 비교와 부품 배치를 반영한 기계적인 설계, 부품 박스 발열량이 고려된 해석을 통한 온도 변화로 가능하다. 즉, 궤도에서의 위성 자세를 통하여 본 위성이 yaw motion을 하는 경우에 각 패널면에 부여된 패널 번호(Fig. 5-(a))를 기준으로 1, 2, 3번 패널면이 cold 조건이 되고, 4, 5, 6번 패널면이 hot 조건이 된다는 것을 예상할 수 있었다. 이러한 결과를 확인하기 위해서 각 패널의 입사 heat flux와 부착된 부품 박스의 해석 온도결과의 변화를 검토하였다.

주어진 Table 2는 부품 박스가 장착된 패널면으로 입사는 궤도 평균 heat flux를 정리한 것이다. 표를 보면 yaw motion 전에는 비슷한 정도의 heat flux를 가지고 있지만 yaw motion에 따

Table 2. Yaw Motion 여부에 따른 패널면 Heat Flux 결과

(Yaw motion 반영 전후 부품박스 장착면의 Heat Flux 변화량)

단위 :W /m^2	Yaw Motion 전 입사 Heat Flux	Yaw Motion 후 입사 Heat Flux	Heat Flux 변화량	
Yaw motion에 따른 Hot 열적 조건 패널면				
4	69.89	79.37	9.48	
5	64.57	123.72	59.15	Heat Flux 증가
6	67.25	81.70	14.45	
Yaw motion에 따른 Cold 열적 조건 패널면				
3	61.17	28.89	-32.28	Heat Flux 감소

Table 3. Yaw Motion 여부에 따른 부품 박스 온도 해석결과

(Yaw motion 반영 전후 부품박스의 최고 온도 변화량)

단위 :도	부품장착방향 패널번호	Yaw Motion 전 부품 최고 온도	Yaw Motion 후 부품 최고 온도	온도변화	
Yaw motion에 따른 Hot 열적 조건면					
XTX1	4	38.1	40.2	2.1	
PCDU	4	37.8	39.2	1.4	온도상승
XTX3	5	25.3	28.6	2.3	
APD	5	25.5	28.4	2.9	
IBMU	6	43.0	44.5	1.5	
Yaw motion에 따른 Cold 열적 조건면					
Battery	3	24.2	19.1	-5.1	온도하강
GPS Antenna 2	3	46.7	44.9	-1.8	

라 위성 자세그림으로 구분된 hot 조건 패널면은 heat flux가 증가하였고 cold 조건 패널면은 heat flux가 감소한다는 것을 수치적으로 확인할 수 있다. 그 변화량은 패널면의 방향에 따라 차이가 있지만 두 배정도까지 증가나 감소하는 면도 있어 그에 따른 패널 간 격차는 더욱 크게 되는 결과를 보여준다.

주어진 Table 3이 해석을 통한 개별 부품 박스의 궤도상에서의 최고 온도의 변화를 통하여 위성 설계에서 실제적인 영향을 알 수 있는 표이고, Fig. 6이 각 부품 박스의 장착 위치를 보여주는 그림이다.

그 결과를 보면 yaw motion을 첨가한 후에 hot 조건이 되는 방향의 장착 부품 박스들은 온도가 상승하였고, cold 조건이 되는 방향의 부품 박스들은 온도가 하강하였다. 이러한 온도 변화를 해당 패널의 입사 heat flux와 함께 궤도 자세 변화로 구분한 패널의 열적 조건과 동일한 결과이다.

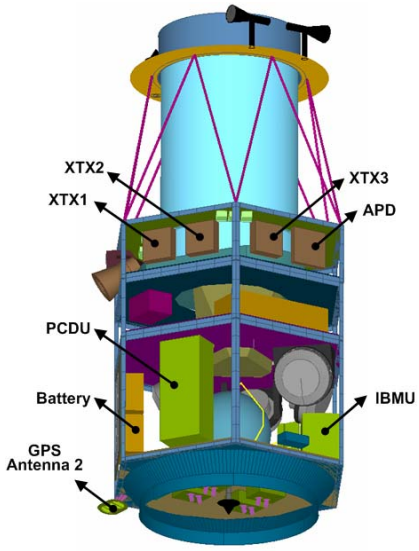


Fig. 6. 주요 부품 박스의 장착 위치

위성 열해석 결과는 부품 박스의 발열량, 장착 위치에 따른 패널 열적 조건과 동시에 방열판의 크기, 장착 방법, 인접한 발열 부품 박스의 영향 등의 여러 가지 실제적인 요소에 의하여 결정된다. 해석을 통한 부품 온도의 변화가 패널면의 hot/cold 조건으로 변화와 일치하지만 해석 결과로만 알 수 있는 온도 변화폭은 개별 부품 박스마다 차이가 있다. 본 위성은 궤도 기본자세가 패널면이 지구 복사열과 Albedo의 영향만을 받게 되는 sun-pointing 이기 때문에 비록 yaw motion을 하게 됨으로써 패널의 열적 조건이 hot/cold 조건으로 명확하게 구분되지만, 현재의 패널간의 heat flux의 변화로 인한 온도의 변화폭이 크지 않다는 것을 알 수 있다.

Yaw motion 전후의 해석 온도 결과와 온도 변화가 정리된 Table 3을 보면 주요 부품의 온도가 2도 정도로 상승하거나 하강하였다. 하지만 battery의 경우는 장착 패널이 cold 조건이 되면서 5도 하강하여 다른 부품 박스에 비하여 온도의 변화가 크게 나타났다. Battery는 좁은 허용온도 범위의 요구조건으로 본체와 분리되어 독립적인 열제어를 적용한다. 그래서 battery가 부착되는 패널은 위성 본체와 단열되어 자체적인 방열판을 가지고 있기 때문에 자세 변동에 따른 외부 열입사 조건의 변화에 쉽게 영향을 받아 온도 변화가 크게 되는 것이다.

마지막으로, 위성 궤도 자세 변화의 반영에 따른 부품 박스 온도의 변화는 기존 열설계에 설계된 방열판의 방열면적 조절을 통하여 온도 마진 요구 조건을 만족하도록 재설정이 필요한 부분이다.

Ⅲ. 결 론

본 연구는 위성에 장착되는 별센서인 별추적기의 가시성 향상을 위한 yaw motion의 궤도 자세 변화에 대하여 열적인 측면의 영향을 검토하고 그것의 의미를 제시하고자 하였다.

열해석을 통한 검토를 위해 먼저 위성 열모델에 yaw motion을 성공적으로 구현하였다. 그에 따른 열적 영향을 열모델에서 외부 열환경에 대한 위성 자세로부터 각 패널의 열적 조건을 구분하는 것과 열모델의 수치 열해석에서 패널의 입사 heat flux, 내부에 부착된 부품 박스의 온도 변화를 비교하는 것으로 검토하였다.

Yaw motion의 자세는 별센서 방향이 심층우주를 향하도록 하는 자세를 유지하도록 하기 때문에 그와 동일 방향의 패널도 지속적으로 심층우주를 바라보게 된다. 이러한 위성의 궤도 자세를 열모델에서 확인하였고, 기존에 yaw motion의 기동을 하지 않을 때는 각 패널의 열적 조건을 구분하는 것이 모호했지만 yaw motion을 하게 됨으로써 hot과 cold 조건으로 명확하게 구분되는 결과로 나타났다. 이것은 각 패널에 입사 heat flux의 변화로 확인할 수 있었다. 그리고 현시점의 위성 설계를 반영한 수치 열해석의 온도 결과는 패널의 열적 조건과 동일하게 해당 패널에 부착된 부품 박스의 온도가 상승하거나 하강하였다. 해석된 부품 박스의 온도 변화는 직접적인 태양광의 영향을 받지 않는 sun-pointing 자세 때문에 대체적으로 2도 내외 정도이었다.

본 연구를 통하여 위성 열설계를 위한 열해석 모델의 개발에서 정확한 궤도 자세 반영이 중요한 요소임을 확인할 수 있었다. 위성의 발열 부품 박스를 배치하는 설계 초기 단계에서 위성의 궤도 자세에 따른 방열판이 장착되는 패널의 열적 조건을 고려한다면 필요이상의 열제어를 줄일 수 있어 효율적인 열설계가 가능하다. 또한 설계 중간 단계에서의 위성 운용 자세의 변동은 이를 반영한 열해석으로 열적 영향을 검토하고 부분적으로 방열판 면적 조정 등의 열설계 변경을 필요로 한다.

참고문헌

1) David G. Gilmore, Spacecraft Thermal Control Handbook, The Aerospace Press, 2002.

2) 김희경, 현범석, 이장준, 김상호, 김형동, 유재호, "저궤도 관측위성 열해석을 위한 예비 열설계 단계의 열모델의 개발", 한국우주과학회보, 제16권 1호, 2007, p. 133.

3) 김희경, 현범석, 이장준, 김상호, 김형동, "저궤도 관측위성 예비 열설계 단계의 열해석", 한국우주과학회보 제16권 1호, 저궤도 관측위성 예비 열설계 단계의 열해석, 2007, p. 134.

4) 이장준, 김희경, 현범석, “저궤도 인공위성의 임무자세 변화에 따른 열적 영향“, 한국우주과학회보, 제16권 1호, 2007, p. 162.

5) Bum-Seok Hyun, Hui-Kyung Kim, & Jang-Joon Lee, "Thermal Evaluation on Yaw Motion of a Low Earth Orbit Satellite with Fixed Solar Panels", 한국우주과학회보, 제16권 1호, 2007, p. 188.

6) 이장준, 김희경, 현범석, 김상호, “인공위성 열설계와 궤도환경의 상관관계”, 한국우주과학회회보, 제16권 2호, 2007, p. 126.

7) 김희경, 이장준, 현범석, “저궤도 위성의 궤도 운용자세에 관한 열해석”, 한국항공우주공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 1582-1585.

8) 김희경, 이장준, 현범석, “지구 저궤도 위성의 영상임무 자세에 따른 열적 영향 고찰”, 한국항공우주학회지, 제36권 제12호, 2008, pp. 1216-1221.

9) Timothy D. Panczak, Steven G. Ring, Mark J. Welch, & David Johnson, Thermal Desktop User’s Manual Version 4.8, Colorado, C & R Technologies, Inc., 2005.

10) B. A. Cullimore, S. G. Ring, & D. A. Johnson, SINDA/FLUINT User’s Manual Version 4.8, Colorado, C & R Technologies, Inc., 2005.