

## 열해석 모델 간략화 및 동적특성에 관한 연구

전형열,\* 김정훈

한국항공우주연구원 위성본체실 위성 열/추진팀

### A STUDY ON THERMAL MODEL REDUCTION AND DYNAMIC RESPONSE

Hyoung Yoll Jun\* and Jung-Hoon Kim

Satellite Thermal & Propulsion Team, KARI.

*A detailed satellite panel thermal model composed of more than thousands nodes can not be directly integrated into a spacecraft thermal model due to its node size and the limitation of commercial satellite thermal analysis programs. For the integration of the panel into the satellite thermal model, a reduced thermal model having proper accuracy is required. A thermal model reduction method was developed and validated by using a geostationary satellite panel. The temperature differences of main components between the detailed and the reduced thermal model were less than 1°C in steady state analysis. Also, the dynamic responses of the detailed and the reduced thermal model show very similar trends. Thus, the developed reduction method can be applicable to actual satellite thermal design and analysis with reasonable accuracy and convenience.*

**Key Words :** 정지궤도 위성(Geostationary Satellite), 열해석(Thermal Analysis), 모델 간략화(Model Reduction), 위성체패널(Satellite Panel), 동적특성(Dynamic Response)

### 1. 서 론

위성체패널의 열설계는 위성 열제어 설계에 있어서 매우 중요한 부분이며, 초기 위성 개발 단계에서 패널 열설계가 결정되어야 한다. 일반적으로 위성체패널의 상세 열해석에는 수 만개의 격자(노드)가 사용된다. 패널의 상세 격자는 부품의 배치 및 히트파이프의 배열에 의해 결정되며, 초기 설계 단계에서 쉽게 변경되어 질 수 있다. 패널의 상세 격자가 만들어 지면, 그에 따른 각각의 전도 및 복사 컨덕터를 구하고, 이를 바탕으로 열해석을 수행하게 된다. 이와 같은 열해석, 즉 패널 및 주요 부품의 온도를 계산하기 위해서는 일반적으로 위성 열해석에 사용되는 상용 프로그램인 SINDA[1]와 ESATAN[2], Temperature Solver[3] 등이 이용된다. 초기 수행된 위성체패널 열해석에서 문제가 발생하면, 부품이나 히트파이프 배치 등이 변경되며, 다시 위의 작업을 반복하여 최

종적으로 패널의 열해석 및 열설계를 수행하게 된다. 수 만개의 노드로 구성된 상세 격자 생성에 있어서는 많은 시간이 소요되며, 반복적이고 단순하여, 열제어 엔지니어의 많은 수고와 노력이 필요하게 된다.

일단, 위성체패널의 열설계가 확정되어지면, 위성체 열해석 모델에 통합이 필요하다. 패널의 상세 열해석 모델은 수 만개의 노드를 사용하기 때문에, 계산 시간이 많이 필요한 복사 열교환 계수 및 열유입량 계산을 위한 위성체 열해석 모델에 통합하기에는 적당하지 않다. 따라서 간략화 되고 최적화된 위성체패널 모델이 필요하다. 과거에는 열제어 엔지니어의 경험 및 반복적인 계산에 의해 간략화 된 모델을 만들었다. 하지만 최근에는 이와 같은 시간과 노력을 줄이기 위한 효율적인 방법들이 개발되고 있으며[4,5], 실제 위성 제작 업체에서도 사용되고 있다.

항공우주연구원에서는 정지궤도 위성인 천리안위성의 개발 초기부터 모델 간략화 방법 및 그 프로그램 개발에 착수 하였다. 또한 내장형 및 외장형 히트파이프가 장착된 패널의 상세해석을 위한 프로그램을 자체적으로 개발하였으며, 패널 모델 간략화를 위한 거대 행렬 연산자도 개발하였다.

본 논문은 항공우주연구원에서 개발한 위성체 패널 모델

Received: October 17, 2014, Revised: December 2, 2014,

Accepted: December 2, 2014.

\* Corresponding author, E-mail: [hyj@kari.re.kr](mailto:hyj@kari.re.kr)

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.4.037>

© KSCFE 2014

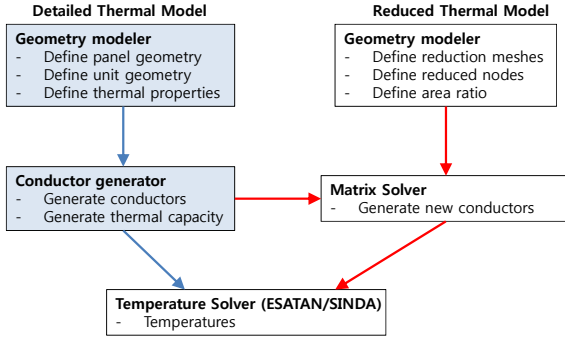


Fig. 1 Flow chart for the model reduction

간략화 방법 및 그 검증, 간략화 모델의 동적특성에 관한 내용을 다루고 있다.

## 2. 열해석 모델 간략화

### 2.1 열해석 이론

위성의 패널이나 부품의 온도를 계산하기 위해서는 열전달이 일어나는 격자(노드)를 집중 열용량법(lumped parameter method)으로 모사하고 격자(노드)간 열저항으로 연결시켜 해를 구하는, 식 (1)과 같은 네트워크 해석법[1-3]을 사용한다. 위성 열해석을 위해서는 일반적으로 널리 사용되는 상용프로그램인 SINDA나 ESATAN를 이용한다.

$$m_i c_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_j C_{ij} (T_j - T_i) + \sigma \sum_j R_{ij} (T_j^4 - T_i^4) + QS_i + QI_i + QR_i \quad (1)$$

여기서, 하첨자  $i, j$ 는 노드를 나타내며,  $m_i c_i$ 는 노드의 열용량(J/K),  $T$ 는 온도(K),  $C_{ij}$ 는 노드  $i$ 와  $j$ 사이 전도 연결 계수(W/K),  $R_{ij}$ 는 노드  $i$ 와  $j$ 사이 복사 연결 계수( $m^2$ ),  $QS$ 는 외부 태양에 의한 열유입량(W),  $QI$ 는 내부의 발열량,  $QR$ 는 히터의 발열량(W)을 각각 나타낸다.

### 2.2 모델 간략화 방법

상세 모델은 노드 수가 너무 많아 실제적으로 위성체 열해석 모델 통합에는 계산 시간 및 상용 프로그램의 한계 등을 고려했을 때 적합하지 않다. 따라서 수백 개의 노드로 패널 모델을 간략화 하여 위성체 열해석 모델에 통합하는 것이 일반적이다. 기존의 패널 모델 간략화는 열제어 엔지니어의 경험 및 반복적인 계산에 의해 수행되어 왔다. 하지만 최근에는

이보다는 편리하고 계산의 정확도가 높은 방법이 사용되고 있는데 이 방법은 일반적으로 구조해석 및 유한요소 해석 프로그램에 적용되는 Guyan 방법[4]을 이용한다.

모델 간소화 방법은 수학적으로 상세 모델의 전도 컨덕터 행렬과 동등한 간략화 된 행렬을 자동적으로 구성한다. 열제어 엔지니어의 수동적인 계산 및 반복적인 계산이 필요 없이 수학적으로 동등한 결과를 갖는 간소화 모델을 만들 수 있다. 반면에 이 패널 모델의 간략화를 수행하기 위해서는 열제어 엔지니어의 경험과 상세 격자의 온도 분포 등을 참고하여 간략화 된 격자의 생성이 필수적이다. 모델 간소화 절차는 Fig. 1과 같이, 상세 모델의 전도 컨덕터, 노드 정보등이 필요하며, 또한 간략화 된 격자 정보를 이용하여, 제거되어야 할 노드 및 유지 노드 등을 지정해 주어야 한다.

식 (1)을 정상상태(steady state)로 바꾸면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$0 = \sum_j C_{ij} (T_j - T_i) + P_i \quad (2)$$

$$P_i = \sigma \sum_j R_{ij} (T_j^4 - T_i^4) + Q_i \quad (3)$$

행렬의 형태로 식 (1)을 나타내면 아래와 같은 형식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_{ii} & C_{ij} \\ C_{ji} & C_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_i \\ P_j \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

간략화 된 노드(condensed node or reduced node,  $T_k$ )는 상세 노드의 면적 가중치 방법, 식 (5)와 식 (6)을 통해 만들어진다.

$$T_k = \sum_j A_{kj} T_j \quad (5)$$

$$\sum_j A_{kj} = 1, \quad \sum_j A_{kj} (T_j - T_k) = 0 \quad (6)$$

따라서 식 (4)에서 열유속이 없다고 가정하면 식 (7)과 같이 만들어진다. 이때  $T_j$ 은 제거되어야 할 노드(eliminated node)를,  $T_i$ 는 유지되어야 할 노드(kept node)를 각각 나타낸다. 행렬[C]도 [G]의 형태로 바뀐다.

$$[G] \begin{bmatrix} T_i \\ T_k \\ T_j \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

식 (7)을 다시 아래와 같은 형식으로 바꿀 수 있다.

$$\begin{bmatrix} G_{ll} & G_{lm} \\ G_{ml} & G_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_l \\ T_m \end{bmatrix} = 0, [T_i] = \begin{bmatrix} T_i \\ T_k \end{bmatrix}, [T_m] = \begin{bmatrix} T_j \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)을 전개하면 다음의 선형대수행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$G_{ll}T_l + G_{lm}T_m = 0 \quad (9)$$

$$G_{ml}T_l + G_{mm}T_m = 0, T_m = -G_{mm}^{-1}G_{ml}T_l \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)으로부터 새로운 전도 컨덕터 행렬을 구할 수 있다.

$$(G_{ll} - G_{lm}G_{mm}^{-1}G_{ml})T_l \quad (11)$$

$$M_{ll} = (G_{ll} - G_{lm}G_{mm}^{-1}G_{ml}) \quad (12)$$

또한 상세 모델과 간략화 된 모델의 평균 복사 열교환의 오차는 다음과 같이 정의 된다.

$$T_j = T_k + \Delta T_j \quad (13)$$

$$\sum_j A_{kj}T_j^4 - T_k^4 = 6T_k^2 \sum_j A_{kj} \Delta T_j^2 + 4\Delta T_j^3 \cdot \dots \quad (14)$$

식 (14)에서 알 수 있듯이 평균 복사 열교환 오차는  $\Delta T_j^2$ 에 비례하며,  $\Delta T_j^3$ 이상의 항들은 생략하였다. 또한 식 (12)를 통해 최종적으로 간략화 된 모델의 전도 컨덕터 ( $G_{ll}-G_{lm}G_{mm}^{-1}G_{ml}$ )를 구할 수 있다. 이 전도 컨덕터를 계산하기 위해 거대 행렬 연산자(Matrix Solver)를 개발하였다. 이 연산자의 주된 기능은 거대 Sparse행렬의 역행렬을 구하는 것으로, Maximum Pivot Strategy[6]을 이용하는 Gauss-Jordan 방법과 block form을 이용하는 LU분해 방법을 적용하였다. 2750 x 2750 행렬을 이용하여 개발된 프로그램과 상용코드인 MATLAB[7]의 결과와 비교 검증을 수행하였다.

식 (12)에 의해 새로이 생성된 전도 컨덕터는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

Table 1 Input main parameters for model reduction

Parameter	Comment
$[C_{ij}]$	all conductive conductor value
$T_i, T_j, T_k$	kept, eliminated & condensed node
$A_{kj}$	detailed node vs. reduced node area

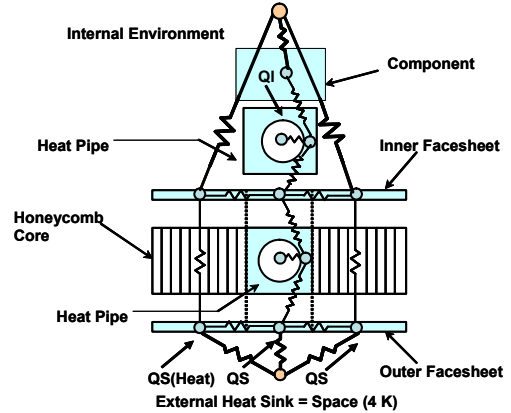


Fig. 2 Thermal couplings through the panel

- 1) 새로이 생성된 전도 컨덕터 행렬은 대칭 행렬이며, 각 행 및 열의 합은 0을 나타낸다.
- 2) 이 전도 컨덕터 행렬은 각 요소를 개별적으로 구분해서 고려할 수 없다. 일종의 전도 컨덕터 셋(conductor set)으로 간주 하여야 한다.
- 3) 간략화 된 모델의 전도 컨덕터는 바로 이웃한 노드뿐만 아니라 전혀 이웃하지 않은 노드으로도 구성된다. 또한 일부 컨덕터 값은 음(negative)의 값을 가진다.

### 2.3 모델 간략화를 위한 입력 자료

위성체패널의 상세모델 간략화를 위해서는 Table 1과 같은 입력 자료들이 필요하다. 우선, 식 (4)에서와 같이 상세 모델의 전도 컨덕터( $[C]$ )에 대한 정보가 필요하다. 또한 상세모델의 모든 노드 정보, 유지 노드 정보( $T_i$ ), 간략화 노드( $T_k$ ) 및 상세 노드 및 간략화 된 노드의 면적비, 즉 식 (5)의  $A_{kj}$ 를 구성하기 위한 정보 등이 필요하다. 이와 같은 입력 자료들을 바탕으로 거대 행렬 연산자를 이용하여 최종적으로 간략화 된 전도 컨덕터, 식 (12)를 구할 수 있다.

### 3. 간략화 된 열해석 모델의 검증

모델 간략화 방법의 검증을 위해 정지궤도 위성체패널이 사용되었다. 이 위성체패널의 열제어는 고발열부품의 열분산을 위해, 내장형 및 외장형 히트파이프가 사용되며, 내부열을 외부로 방출하기 위한 방열판(OSR:Optical Solar Reflector) 및 방열판을 제외한 다른 부분은 우주공간과 열적으로 분리하기 위해 다층박막단열재(MLI:Multi-layer Insulation)등이 사용된다. Fig. 2는 위성 패널의 부품, 히트파이프, 하니콤 면재 및 외부 환경과의 열적 연결을 보여준다.

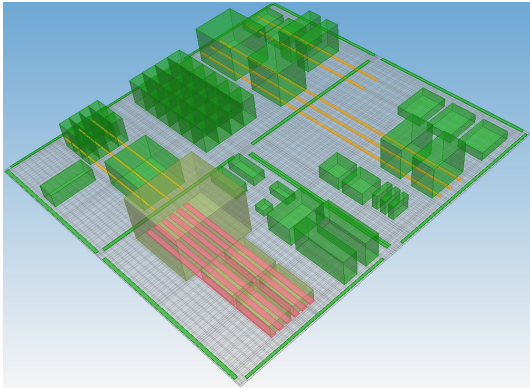


Fig. 3 Detailed satellite panel model

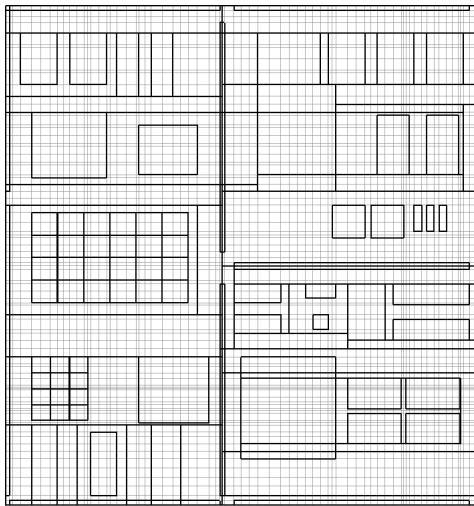


Fig. 4 Reduced satellite panel model

**3.1 위성체패널을 이용한 검증**

Fig. 3는 정지궤도위성 북쪽패널의 내부 및 외부 상세 패널 격자를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 내장형 및 외장형 히트파이프가 사용되었으며, 다수의 전자부품들이 장착되어 있다. Fig. 4는 상세모델 격자위에 작성된 간략화 된 패널 내부 격자 및 외부 격자를 나타낸다. 전체적으로 수 만개의 상세모델 격자에서, 수 백개의 간략화 된 모델로 바뀌게 된다.

간략화 된 격자가 만들어 지면, 모델 간략화 프로그램을 통해서, 전체 계수 행렬을 만들고, 이 행렬의 역행렬을 계산하여 최종적으로 축소된 전도 컨덕터 행렬, 식 (12)를 구하게 된다. Fig. 1에서와 같이 온도 해석 툴(ESATAN 혹은 SINDA)을 이용하여 최종적으로 정상상태(steady state) 온도를 계산한 후, 상세 모델의 온도 결과와 비교하였다.

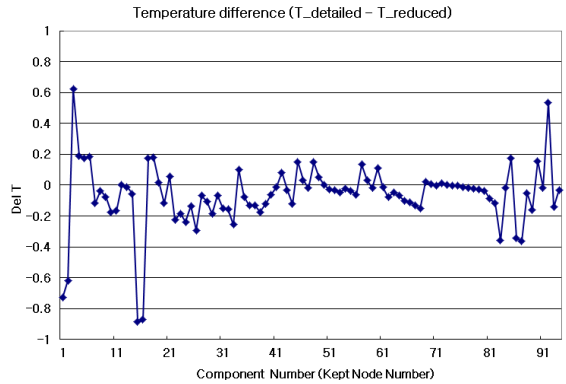


Fig. 5 Temperature difference of components between detailed model and reduced model

Table 2는 상세 패널 모델과 간략화 된 패널 모델의 노드 수를 나타낸다. Table 2에서도 알 수 있듯이, 11836개의 노드가 310개의 노드로 변화된다. 이때 위성체패널의 열제어를 위해 주 관심을 갖는 부품(80개)은 그대로 유지되며, 550개의 히트파이프 노드(구조+증기노드)는 14개의 히트파이프 증기노드로 변환된다. 가장 많은 수의 노드가 제거된(간략화 된) 부분은 위성체패널로 패널의 노드 수는 11200에서 210개로 간략화 됨을 알 수 있다.

또한, Fig. 5는 패널에 장착된 80개 모든 전자부품과 14개 히트파이프 증기노드 등의 간략화 된 모델과 상세 패널 모델과의 온도 차이를 나타낸다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 총 94개의 주요 노드의 온도차가 최대 1℃를 넘지 않는다.

**3.2 간략화온도를 이용한 상세 온도의 생성 검증**

다음은 간략화 온도를 이용한 상세 온도의 생성에 관한 내용으로 고발열량의 전자장비가 탑재된 비교적 간단한 위성 패널의 모델을 사용하였다. 상세노드는 2750개로 구성되며, 간략화 모델은 77개의 노드를 이용하여 상세온도의 재생성에 관한 연구를 수행하였다. 간략화 된 노드의 온도를 알고 있다면, 역으로 식 (10)을 이용하여, 상세노드 특히, 제거된 노드의 온도를 구할 수 있다. 이와 같이 만들어진 제거된 노드의 온도를 이용하여, 히트파이프 열 수송량 및 열변형 해석 등을 수행 할 수 있다.

Table 2 Node number of detailed vs. reduced model

Node	Detailed model	Reduced model
Environment	6	6
Panel	11200	210
Component	80	80
Heat pipe	550	14
Total	11836	310

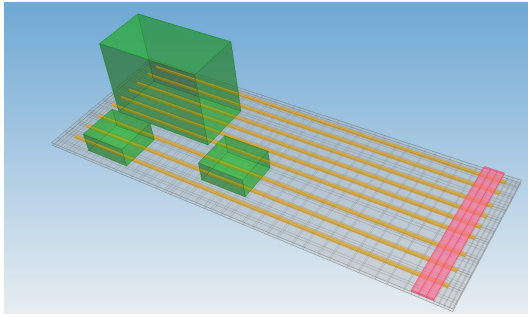


Fig. 6 Detailed panel model for high dissipating electronics units

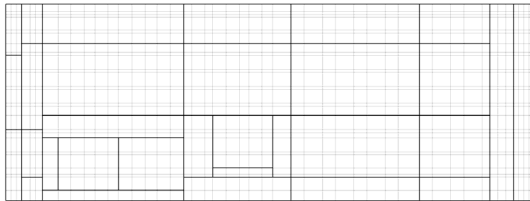


Fig. 7 Reduced panel model for high dissipating electronics units

Fig. 6는 세 개의 고 발열 전자장비가 탑재된 위성체패널로 내장형 히트파이프와 외장형 히트파이프를 이용하여 이중적인 히트파이프 네트워크를 구성하여 부품의 열제어를 수행한다.

패널의 크기는 750 mm x 2016 mm이며, 외부는 OSR이 장착된 방열판이며, 내부는 검은색 페인트가 칠해져 있다고 가정하였다. 내부 및 외부 환경온도는 각각 20°C 및 -50°C로 가정하였다. Fig. 7은 77개의 노드로 구성된 간략화 된 모델을

Table 3 Temperature & heat transport capability

Node number	Item	Det T (°C)	Red T (°C)	Det H (Wcm)	Red H (Wcm)
270017	Unit 1	31.845	31.934		
270018	Unit 2	26.422	26.459		
270019	Unit 3	27.28	27.34		
610000	Heat pipe 1	16.339	16.21	1312.3	1374.9
610100	Heat pipe 2	17.845	17.887	573.7	557.2
610200	Heat pipe 3	24.382	24.439	3545	3564.8
610300	Heat pipe 4	25.057	25.152	3359.4	3377.9
610400	Heat pipe 5	25.123	25.231	3365.3	3370.5
610500	Heat pipe 6	24.799	24.887	3543.2	3549.3
610600	Heat pipe 7	20.976	21.055	710.3	721.3
610700	Heat pipe 8	21.228	21.267	1177.6	1186.4
610800	Heat pipe 9	18.99	18.944	1095.8	1101.1
640200	Heat pipe 10	20.929	20.97	298.6	304.3
640300	Heat pipe 11	21.023	21.06	274.5	280.7
640400	Heat pipe 12	20.739	20.774	294.6	302.4
Average of Del T			-0.042		
Standard deviation of Del T			0.060		

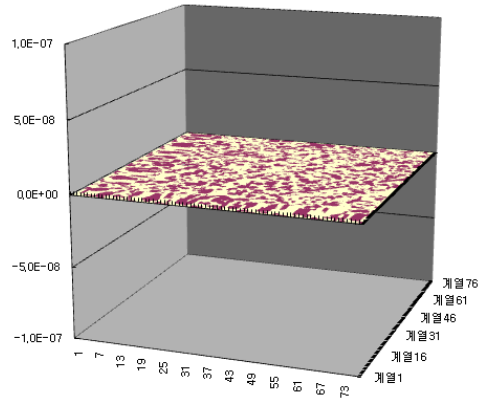


Fig. 8 Error of the reduced conductor matrix(77 x 77)

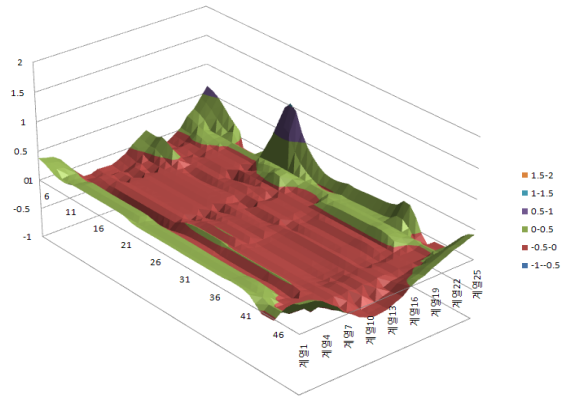


Fig. 9 Temperature differences between  $T_i$  obtained from Eq. (7) and Eq. (10) : internal skin of reduced model

각각 나타낸다.

식 (12)의  $[M_H]$  행렬의 크기는 (77 x 77)이다. 개발된 거대 행렬 연산자를 이용해 얻은 간략화 모델의 컨딕터 행렬 각각의 결과를 MATLAB의 행렬 결과와 비교하였다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 그 차가 매우 작음을 알 수 있다.

모델 간략화를 통해, 식 (11)의  $T_i$ 를 구할 수 있다. 이렇게 구해진  $T_i, G_{mm}^{-1}, G_{mi}$ 를 이용하여,  $T_m$ 를 얻게 된다. 즉 유지되어야 할 노드( $T_i$ )와 간략화 된 노드( $T_k$ )의 온도를 이용하여 역으로 간략화 과정에서, 제거된 상세 모델 노드( $T_j$ )의 온도를 구할 수 있다. Table 3는 간략화 된 모델에서 얻은 상세모델과 간략화 된 모델의 부품 및 히트파이프 증기 온도 및 히트파이프의 열수송량을 나타낸다. Table 3의 5열은 간략화 된 모델에서 얻은 상세모델의 열수송량을, 6열은 간략화 된 모델의 열 수송량을 각각 나타낸다.

Fig. 9은 식 (10)을 통해서 생성된  $T_j$ 와 식 (7)로부터 직접

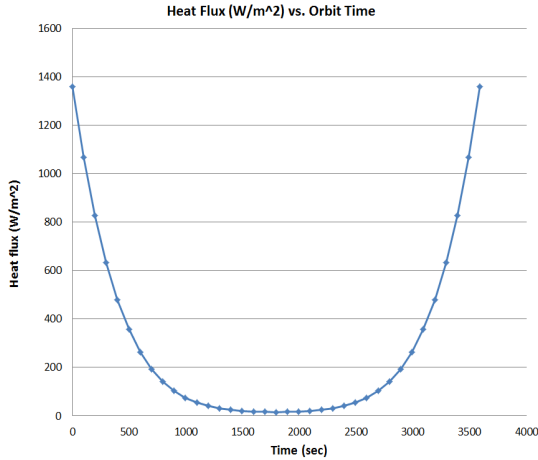


Fig. 10 Heat flux vs. orbit time(1 hour period)

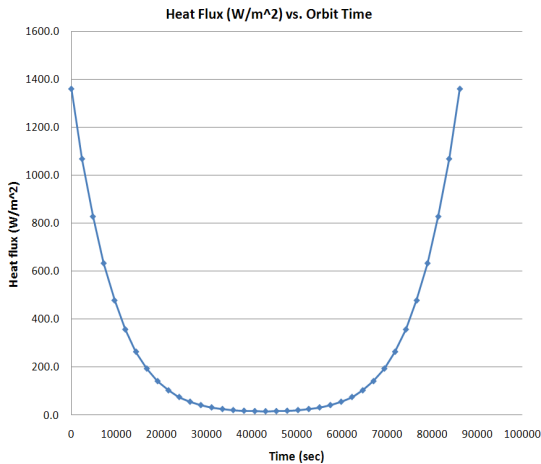


Fig. 11 Heat flux vs. orbit time(24 hours period)

적으로 계산된 내부 패넬의  $T_j$  차이를 각각 나타내며, Table 4는 전체 2735개 제거노드( $T_j$ )에 대한 평균 및 표준편차를 나타낸다.

또한, 히트파이프의 열 수송량을 상세모델에서 구한 값과 식 (10)으로부터 구한 값과 비교하였다. Table 3에서 알 수 있듯이, 열 수송량이 최대 5%의 오차 범위 안에서 일치함을 알 수 있다. 상세모델의 온도 없이, 역으로 식 (10)을 이용하여 얻은 값으로도 충분히 상세모델의 온도 및 히트파이프 수송량 등을 예측할 수 있다.

Table 4 Average and standard deviation of del  $T_j$

Item	Reduced Model
Average	-0.007
Standard deviation	0.143

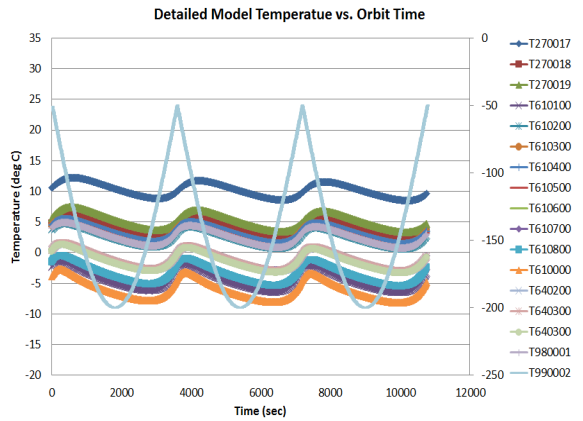


Fig. 12 Detailed model temperature vs. orbit time(1 hour)

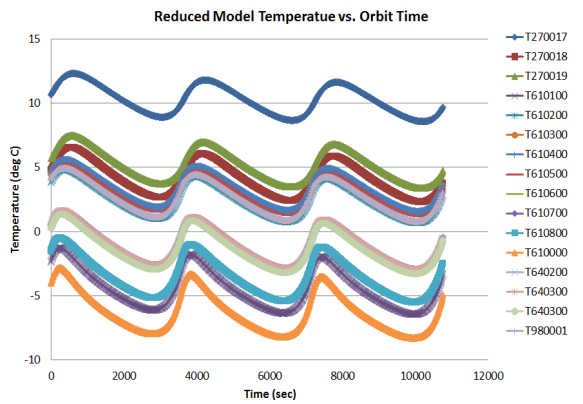


Fig. 13 Reduced model temperature vs. orbit time(1 hour)

### 3.3 위성체패널 간략화 모델의 동적특성

본절에서는 시간에 따른 77개 노드(Fig. 7)의 간략화 모델의 동적 특성을 고려하였다. 간략화 된 노드의 열용량은 상세 모델의 작은 열용량의 합으로 표시 될 수 있다. 따라서 간략화 된 모델은 상세 모델에 비해 상대적으로 큰 열용량 값을 갖고 있다. 앞에서 언급한 간략화 된 모델에서 태양에 의한 열유입량을 아래 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 시간에 대한 함수라고 가정하였으며, 각각 1시간(저궤도) 및 24시간 궤도(정지궤도) 세 주기에 대해 온도를 계산하였다.

77개 노드로 구성된 간략화 모델의 동적특성은 다음과 같다. 열유입량은 Fig. 10 및 Fig. 11을 바탕으로 세 주기에 대한 주요 부품 및 히트파이프 증기 노드에 대한 온도를 계산하였다.

Fig. 12는 1시간 궤도에서의 상세모델 온도를, Fig. 13은 간략화 된 모델의 주요 부품의 온도를 각각 나타낸다. 앞 그림들에서 알 수 있듯이 상세모델과 간략화 모델의 동적 특성은



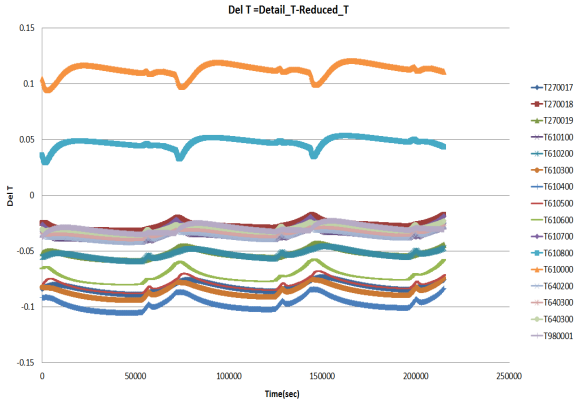


Fig. 14 Temperature difference between detailed model and reduced model vs. orbit time(1 hour)

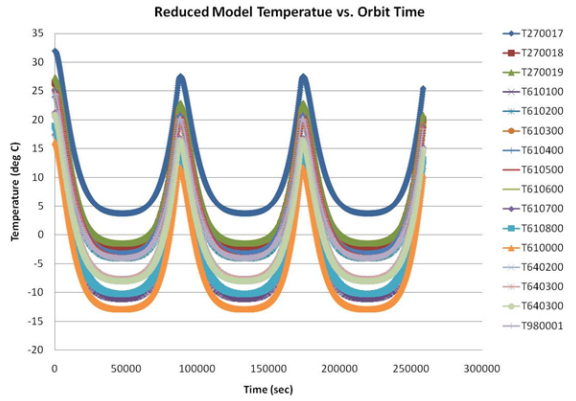


Fig. 16 Reduced model temperature vs. orbit time(24 hours)

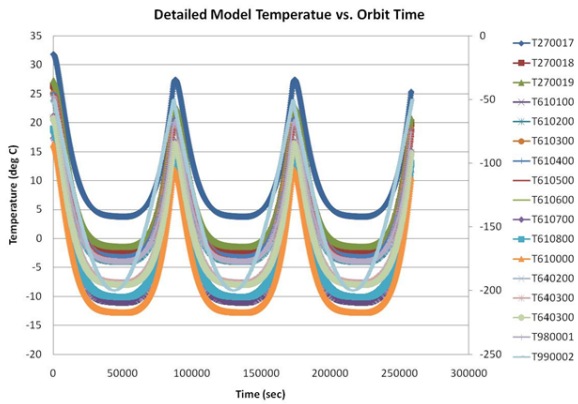


Fig. 15 Detailed model temperature vs. orbit time(24 hours)



Fig. 17 Temperature difference between detailed model and reduced model vs. orbit time(24 hours)

매우 유사하며, Fig 14에서 알 수 있듯이, 두 모델의 차는,  $-0.11^{\circ}\text{C} < \text{del } T < 0.12^{\circ}\text{C}$ , 매우 작음을 알 수 있다.

Fig 15은 24시간 궤도에서의 상세모델 온도를, Fig 16은 간략화 된 모델의 주요 부품의 온도를 각각 나타낸다. Fig 17에서 알 수 있듯이, 두 모델의 차는,  $-0.17^{\circ}\text{C} < \text{del } T < 0.25^{\circ}\text{C}$ , 매우 작음을 알 수 있다.

1시간 및 24시간 궤도의 결과 분석을 통해 간략화 모델의 동적특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 일반적으로 간략화 모델은 열용량 값이 크므로 동적 특성의 변화는 상세모델에 비해 다소 둔감하나, 그 차이는 작은 값을 나타낸다.
- (2) 실제 정지궤도상에서는 남쪽과 북쪽 패널의 외부 환경이 계절에 따라 일정하여, 오히려 정상상태(Steady State)와 유사하다. 따라서 정지궤도 위성에 적용된 간략화 모델의 동적특성은 상세모델과 일치할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

히트파이프가 장착된 정지궤도 위성체패널의 상세 열해석 및 패널 모델 간략화를 위한 항공우주연구원 자체의 프로그램 개발을 수행하였으며, 또한 실제 위성체패널을 이용하여 개발된 프로그램을 검증 하였다. 정지궤도 위성체패널 상세 모델과 간략화 된 위성체패널 모델의 주요 부품의 온도차는 매우 적었으며, 최대  $1^{\circ}\text{C}$ 를 넘지 않았다. 또한 간략화 모델과 상세모델의 동적 특성이 매우 유사하였으며 그 차이가  $0.25^{\circ}\text{C}$ 를 넘지 않는 정확성을 보여 주었다.

따라서, 상세 모델을 이용하여 열해석 모델 간략화 방법을 검증한 결과 실제 위성 열해석에 적용 가능한 수준의 정확성과 편리성을 갖고 있으며, 본 방법은 항공우주연구원에서 개발 중인 정지궤도 복합위성의 열해석에 적용되고 있다.

### References

- [1] 2001, *SINDA FLUENT User's Manual*, Cullimore and Ring Technologies.
- [2] 2005, *ESATAN User's Manual*, ALSTOM Power Technology Centre.
- [3] 2005, *Temperature Solver v4.0.29*, EADS Astrium, Toulouse.
- [4] 2004, Appel, S., Patricio, R., Peter, H. and Pin, O., "Automatic Conductor Generation for Thermal Lumped Parameter Models," *34th international Conference on Environmental System*, Colorado Springs.
- [5] 2006, Molina, M. and Clemente, C., "Thermal Model Automatic Reduction: Algorithm and Validation Techniques," *36th international Conference on Environmental System*, Norfolk Virginia.
- [6] 1969, Camahan, B., Luther, H.A. and Wise, D.S., *Applied Numerical Methods*, John Wiley&Sons, New York.
- [7] 2005, *MATLAB Manual*, MathWorks, Massachusetts.