

인공위성 패널 열해석모델 간소화 알고리즘 연구

김정훈,^{*1} 전형열,¹ 김승조²

¹한국항공우주연구원 위성열/추진팀

²한국항공우주연구원

A STUDY ON THERMAL MODEL REDUCTION ALGORITHM FOR SATELLITE PANEL

Jung-Hoon Kim,^{*1} Hyoung Yoll Jun¹ and Seung Jo Kim²

¹Satellite Thermal/Propulsion Team, Korea Aerospace Research Institute

²Korea Aerospace Research Institute

Thermal model reduction algorithms and techniques are introduced to condense a huge satellite panel thermal model into the simplified model on the purpose of calculating the thermal responses of a satellite on orbit. Guyan condensation algorithm with the substitution matrix manipulation is developed and the mathematical procedure is depicted step by step. A block-form LU decomposition method is also invited to compare the developed algorithm. The constructed reduced thermal model induced from the detailed model based on a real satellite panel is satisfying the correlation criterion of $\pm 2^\circ\text{C}$ for the validity accuracy. Guyan condensation algorithm is superior to the block-form LU decomposition method on computation time.

Key Words : 인공위성(Satellite), 열제어(Thermal Control), 열해석(Thermal Analysis), 모델 간소화(Model Reduction), 가이안 압축(Guyan Condensation)

1. 서 론

세대가 지날수록 우리가 사용하는 전자제품은 많은 기능을 가지고 콤팩트해져 가고 있다. 인공위성의 임무도 시간이 흐를수록 높은 사양 및 긴 수명을 요구하게 되었다. 이에 따라 위성의 구조물인 패널에는 많은 수의 전장품이 탑재되며 효과적인 열제어를 위하여 히트파이프와 같은 열제어 부품이 다량 장착된다.

복사열전달이 주요 열전달 메커니즘이 되는 인공위성의 열해석에서는, 잘 만들어진 상용 소프트웨어조차도 많은 수의 노드로 수립된 열해석모델의 해석이 불가능하다. 그 원인은 복사열전달컨덕터(radiative heat transfer conductor)의 계산을 위해 현재 널리 사용되는 몬테카를로 광선추적법(Monte-Carlo

ray tracing) 방법[1] 때문인데, 이 방법은 근본적으로 많은 계산시간을 요구하며 엄청난 컴퓨터의 리소스를 사용하기 때문이다.

작은 패널에 적은 수의 전장품이 탑재되는 경우에는 열해석모델을 단순화하기가 용이하다. 대부분 엔지니어가 직관적으로 간소화된 열모델을 수립하고 모델의 디버그가 편한 형태로 만든다. 그러나 대형 패널에 많은 수의 전장품과 히트파이프 등이 탑재될 경우 간소화된 열모델을 직관으로만 만드는 것은 매우 어렵다.

복잡한 패널의 상세열모델은 허니콤 샌드위치패널, 전장품, 더블러, 히트파이프 및 열복사 enclosure 등에 대하여 형상, 위치, 접촉열저항 및 열광학물성치의 입력으로 구성된다. 이러한 구성으로 COMSTAP[2]과 같은 자동 모델생성기를 통하여 SINDA[3] 또는 ESATAN[4] 솔버에 필요한 입력값을 생성한다. 전장품의 국부 열소산량이 증가함에 따라 실제 요구되는 열해석의 정밀도를 유지하기 위해서는 열소산 노드(heat dissipation node)에 대하여 비선형의 퍼짐효과(spreading effect)[5] 식이 들어가서는 안 되며 선형열전도만 고려하는 것이 유리하다. 즉 비선형 관계식이 열전도식에 들어가면 열모

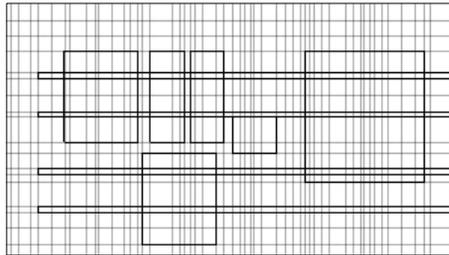
Received: August 24, 2012, Revised: October 29, 2012,

Accepted: October 31, 2012.

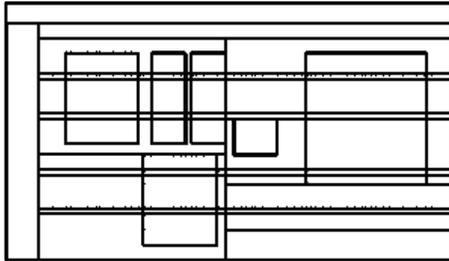
* Corresponding author, E-mail: jungkim@kari.re.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.4.009

© KSCFE 2012



(a) Detailed model (1138 nodes)



(b) Reduced model(33 nodes)

Fig. 1 Example of thermal model

델의 전체 노드의 수는 줄일 수 있으나 요구되는 해석의 정밀도를 유지할 수 없으므로 다수의 노드를 사용하더라도 비선형 항을 배제할 수 있도록 하여야 한다. 때에 따라서 위성체 패널 하나에 40,000개 이상의 거대한 노드가 사용될 수도 있고 이 경우 전체 위성시스템을 위한 계산 시간은 상상할 수 없다. 따라서 위성체 수준의 열해석에서는 가능한 최적화되고 간소화된 열해석모델의 수립이 불가피하다.

본 연구에서는 인공위성 궤도상 복사열전달계수의 계산 및 위성체 열해석을 위한 열전달 방정식의 계산을 위하여 필요한 간소(축소) 인공위성 패널 열해석모델을 상세열모델로부터 얻을 수 있는 알고리즘을 개발하고, 실무에 적용한 예를 소개한다. 본 논문에서의 상세열모델이란 위성체 패널, 전장품, 히트파이프 등의 실제 형상이 직접 고려된 수 만개의 노드모델을 말하며, 축소열모델은 상세열모델의 물리적 특징을 그대로 간직한 채 노드의 수를 수백 개로 줄인 것을 지칭한다. 즉 축소열모델은 물리적 거동은 상세열모델과 동일하며 다만 그 노드 수만을 최적화된 것이다.

2. 열모델 간소화 개요

Fig. 1은 위성패널의 상세열모델 및 축소열모델의 예를 나타내었다. 1138개의 상세노드가 33개의 축소노드로 1/34의 크기로 간소화되었고 이 축소열모델은 복사열전달 및 전도열전달 계산을 위하여 사용된다.

2.1 열모델 간소화 절차

기 수립된 상세열모델로부터 축소열모델의 수립은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- 축소노드 정의 :
 - 상세열모델의 노드로 부터 축소열모델의 노드를 정의한다. 이 때 만족할 만한 축소열모델을 얻기 위해 등온노드(isothermal node) 및 퍼짐효과를 고려하여 상세열모델의 노드들을 선택하는데, 이 경우 숙련된 엔지니어의 경험이 필요하다.
- 컨덕터 생성 :
 - 축소열모델에 대하여 복사컨덕터(radiative conductor)를 자동으로 생성하고, 수동 또는 자동으로 전도컨덕터(conductive conductor)를 계산한다.
- 축소열모델 correlation :
 - 상세열모델과 축소열모델의 해석결과 온도를 고온 및 저온조건(two extream conditions)에서 비교하고 축소열모델의 전체 노드에 대하여 열유속(heat flux)이 만족할 만한 평형을 가질 때까지 전도컨덕터를 수동으로 수정하고 업데이트 한다.

2.2 열모델 간소화 특징

이러한 열모델의 간소화는 이웃하는 노드 사이의 전도열전달을 사용자가 알기 쉽게 해독할 수 있는 형태로 나타나고 특별히 복잡한 수치기법이 적용되지 않아도 된다는 장점이 있으며 다른 특징들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 축소열모델에 대하여 하나 또는 두 가지 경우의 correlation을 수행해야 함.
- Correlation 작업 중 물리적인 성질이 간과될 수 있음.
- 상세열해석 결과와 수치검증 후 축소열모델을 업데이트 해야 함.
- 간소화는 열 엔지니어의 경험에 의존함.
- 패널의 설계가 바뀌면 매번 다시 수행해야 함.
- 축소열모델의 노드 수가 전체적인 정밀도에 영향이 큼.
- 상세열모델과의 온도차이가 ±2℃ 이내(ECSS criteria[6])가 되는 정밀도를 얻기가 쉽지 않음.
- Correlation을 포함한 전체 간소화 절차에 많은 시간이 소요

3. 열모델 간소화 이론

열해석모델에서 주어진 노드 i 및 j 에 대하여 정상상태 열전달방정식을 선형으로 나타냈을 때 에너지방정식은 식 (1)과 같다.

$$\sum_{j \neq i} C(i,j)(T_j - T_i) + P_i = 0 \tag{1}$$

여기서 $C(i,j)$ 는 전도열전달컨덕터(conductive heat transfer conductor)이다. P_i 는 복사열전달을 포함하며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = Q_i + \sigma \sum_{j \neq i} GR(i,j)(T_j^4 - T_i^4) \tag{2}$$

여기서 $GR(i,j)$ 는 복사열전달컨덕터를 나타낸다. 식 (1)은 축소열모델에서 삭제될 상세열모델의 노드 N_j 와 축소열모델에서도 그대로 남아있을 열제어노드 N_i 를 별도로 분리된 형태로 유지하면서 식 (3), 식 (4) 및 식 (5)와 같이 행렬식과 선형대수방정식 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_{ii} & C_{ij} \\ C_{ji} & C_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_i \\ P_j \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{3}$$

$$C_{ii}T_i + C_{ij}T_j + P_i = 0 \tag{4}$$

$$C_{ji}T_i + C_{jj}T_j + P_j = 0 \tag{5}$$

축소열모델을 위한 축소노드 N_k (상세열모델에서 삭제될 노드들을 대표하는 압축된 노드)들은 식 (6)과 같은 가정으로 식 (4), 식 (5)에 대입할 수 있다. 여기서 축소노드는 물리적으로 해당되는 상세열모델 노드의 면적 가중된(surface-weighted) 평균온도를 가진다.

$$T_k = \sum_j a_{kj}T_j \tag{6}$$

여기서 $\sum_j a_{kj} = 1$, $\sum_j a_{kj}(T_j - T_k) = 0$, $a_{kj} = A_j/A_k$ 로 정의된다. 또한 상세열모델 노드의 복사열플럭스는 축소노드 N_k 의 표면적으로 가중된다는 물리적 가정을 도입하면 식 (7)과 같다.

$$P_j = a_{jk}P_k \tag{7}$$

여기서 $a_{jk} = A_k/A_j$ 이다. 이상의 방정식으로 부터 식 (2)는 N_i (열제어노드), N_j (삭제노드)와 N_k (N_j 와 N_k 의 관계적인 식 (6) 및 식 (7)로 부터)를 도입하여 온도와 플럭스를 연관 짓는 새로운 축소열모델의 식 (8)을 유도할 수 있다.

$$M_u T_i + P_i = 0 \tag{8}$$

여기서 T_i 은 축소열모델의 온도벡터(즉, T_i 와 T_k), P_i 은 축소열모델의 파워벡터(즉, P_i 와 P_k), M_u 은 축소열모델의 선형컨덕터 행렬(linear conductor matrix)이다. 추가적으로 식 (9)와 같은 행렬식을 생각할 수 있다.

$$X_j = C_{jk}T_i \tag{9}$$

여기서 X_j 는 T_j 벡터를 포함하는 벡터이고, C_{jk} 은 축소열모델의 온도와 상세열모델의 온도를 연결하는 변환행렬(transformation matrix)이다. 식 (9)로 부터 축소열모델의 온도 T_i 로 부터 삭제되는 노드의 온도 T_j 를 거꾸로 얻을 수 있다. 이를 이용하면, 축소열모델 계산 결과로 부터 상세열모델에서만 확인할 수 있는 다음과 같은 정보도 도출할 수 있다.

- 히트파이프의 성능변수인 전달능력량(transport capability)
- 패널의 상세온도 분포
- 노드에서의 열유속 교환량
- 열변형해석을 위한 입력값

최종적인 축소열모델의 행렬 M_u 은 대칭행렬이며, 각 행에 대하여 식 (10)이 성립한다.

$$\sum_n M_{ln} = 0 \tag{10}$$

식 (8)의 M_u 행렬에 대하여 l 행 n 열의 선형컨덕터(linear conductor)는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$GL(l,n) = M_{ln} \tag{11}$$

일반적으로 선형컨덕터(Fourier의 전도법칙에서는 보통 L/kA 에 해당함)는 양의 값을 갖지만 간소화 알고리즘으로부터 도출된 GL (linear conductor)은 음의 값을 가질 수도 있다. 즉 축소열모델에서의 GL 은 물리적으로 전도열저항의 역수로 이해해서는 안 되며, 수학적인 연계계수(coupling coefficient)로 해석하여야 한다. 이상을 정리하면 식 (12)와 같은 행렬식이 되며, 간단하게 식 (13)과 같이 선형대수학에서 많이 사용되는 Guyan reduction[7] 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_{ii} & \mathbf{0} & C_{ij} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} \\ C_{ji} & \mathbf{0} & C_{jj} & a_{jk} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} & a_{kj} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_k \\ T_j \\ P_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_i \\ P_k \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{12}$$

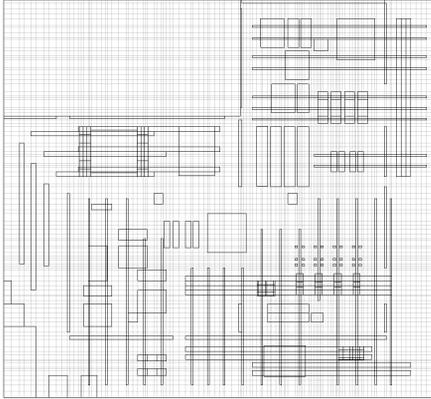


Fig. 2 Detailed thermal model of the panel

$$\begin{bmatrix} D_{ll} & D_{lm} \\ D_{ml} & D_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_l \\ X_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_l \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)의 계수행렬은 히트파이프의 대류열전달계수항 등때문에 전도열전달만을 고려하는 경우와 달리 희소행렬(sparse matrix)이 되지 않고, 전행렬(full matrix)이 된다. 따라서 식 (13)의 해는 iterative 방법 대신 direct 방법을 사용하여 구한다. 식 (13)의 행렬식을 풀어쓰면 식 (14) 및 식 (15)와 같다.

$$D_{ll}T_l + D_{lm}X_m + P_l = 0 \quad (14)$$

$$D_{ml}T_l + D_{mm}X_m = 0 \quad (15)$$

식 (15)는 식 (16)으로 정리할 수 있으며, 식 (16)을 식 (14)에 대입하면 식 (17)을 얻을 수 있다.

$$X_m = -D_{mm}^{-1}D_{ml}T_l \quad (16)$$

$$(D_{ll} - D_{lm}D_{mm}^{-1}D_{ml})T_l + P_l = 0 \quad (17)$$

식 (17)에서 T_l 의 계수행렬은 축소열모델의 선형컨덕터 행렬이며 식 (18)과 같이 정의할 수 있다.

$$M_{ll} = D_{ll} - D_{lm}D_{mm}^{-1}D_{ml} \quad (18)$$

M_{ll} 을 구하기 위해 거대행렬인 D_{mm} 의 역행렬을 구해야 한다. Gauss-Seidel 방법과 같은 고전적인 방법으로 거대행렬의 역행렬을 직접 구하는 것은 현재의 고사양의 컴퓨터로도 빠른 계산 속도를 기대하기 어렵다. 본 연구에서는 효율적인 계산을 위해 A_{ml} 이라는 대체행렬(substitution matrix)을 정의하

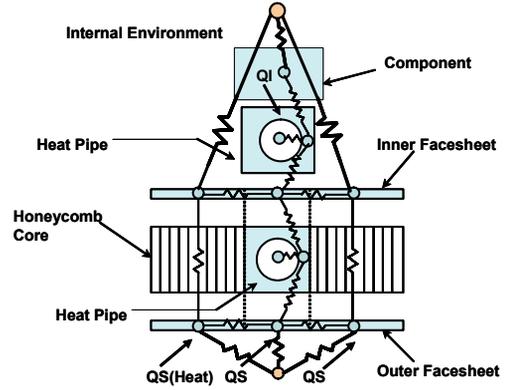


Fig. 3 Thermal couplings through the panel

고 식 (18)에 대입하여 식 (19)와 같이 유도하였다.

$$M_{ll} = D_{ll} - D_{lm}A_{ml} \quad (19)$$

여기서 $A_{ml} = D_{mm}^{-1}D_{ml}$ 이며, 다시 정리하면 식 (20)과 같다.

$$D_{mm}A_{ml} = D_{ml} \quad (20)$$

식 (20)에서 A_{ml} 는 LU 분해법으로 구할 수 있으며, 이를 식 (19)에 대입하면 축소열모델의 선형컨덕터 행렬인 M_{ll} 을 별도의 역행렬 계산 없이 구할 수 있다. 결과적으로 식 (18)에서와 같이 상세열모델의 컨덕터 행렬인 D_{ll} , D_{lm} , D_{mm} 및 D_{ml} (대칭행렬이므로 D_{lm} 와 동일)를 알면, 축소열모델의 컨덕터행렬 M_{ll} 을 구할 수 있다. 또한 식 (11)에 의해 축소열모델의 l 노드와 n 노드 사이의 컨덕터를 직접 찾을 수 있다.

4. 모델링 예 및 계산결과

상세열모델로 부터 축소열모델을 도출하는 간소화 예를 2010년도에 발사되어 운용되고 있는 국내 최초의 정지궤도위성인 천리안위성의 +Y 패널을 기준으로 설명하고자 한다.

4.1 상세열모델

Fig. 2는 +Y 패널의 상세열모델의 격자구성을 나타내었으며 총 23,859개의 노드가 생성되었다. 패널에 장착되는 각 부품(전장품, 히트파이프)은 3차원적으로 내/외부 스킨에 적층되며 Fig. 3과 같이 전도 및 복사컨덕터로 연결된다. 컨덕터들은 COMSTAP을 사용하여 생성하였다. COMSTAP은 부품의 좌표 및 패널 격자 정보, 열전달 파라미터를 입력하여 전도 및 복

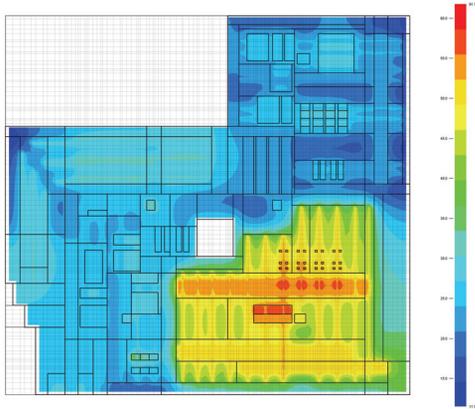


Fig. 4 Temperature map of the detailed model and reduce nodes

사킨덕터를 계산하는 프로그램이다. 이 때 전도뿐만 아니라 복사컨덕터를 계산하기 위해, 패널 내/외부의 복사 환경 및 광학물성치 등이 필요하다. COMSTAP을 통해 생성된 복사 및 전도컨덕터는 온도를 계산하기 위한 상용 프로그램 (SINDA 또는 ESATAN)의 입력값으로 사용된다.

축소열모델 생성을 위해 상세열해석이 먼저 선행되어야 한다. 상세열모델을 이용하여 계산한 패널 내부 스킨의 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 계산조건으로는 전장품에서 총 853W의 열소산이 발생하며, 외부 열환경(external heat sink)은 -180°C, 내부 열환경(internal heat sink)은 40°C로 정하였다.

4.2 축소열모델

패널 스킨 상세열모델의 온도분포 결과를 기준으로 스킨의 축소노드를 선정한다. 주로 등온으로 판단할 수 있거나 노드 간 온도 구배가 작은 상세노드들을 묶어서 하나의 축소노드를 생성하며 Fig. 4에서 굵은 선으로 표기된 부분이 축소노드의 영역이다. 축소열모델에서 반드시 해석되어야 할 부품인 전장품과 히트파이프 증기 노드는 상세열모델로 부터 그대로 유지한다. 결과적으로 간소화 과정에서 축소되는 것은 패널의

Table 1 Thermal node number comparison

Nodal breakdown	Detailed nodes	Reduced nodes
Inner skin nodes	11,232	180
Outer skin nodes	11,232	99
Internal components	95	95
Components on external heat pipes	83	83
Components on external skin	6	6
Surface heat pipes	20	20
Embedded heat pipes	26	26
Heat pipes skeleton nodes	1152	0
Internal and external environments	13	13
Total	23,859	522

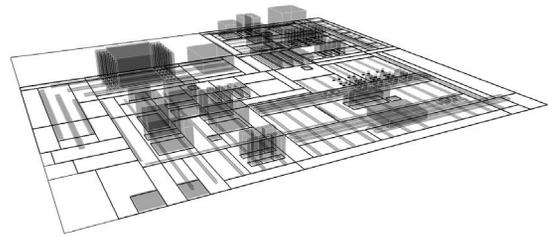


Fig. 5 Reduced thermal model of the panel

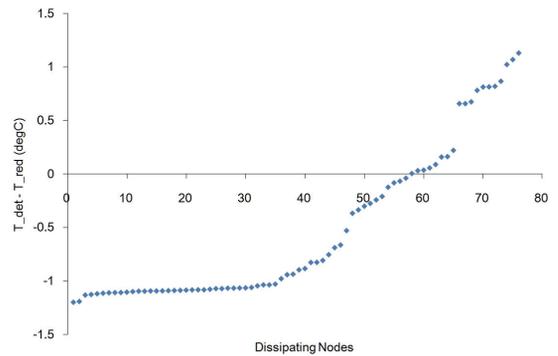


Fig. 6 Delta-T for each nodes

스킨노드들이다. Fig. 5는 축소열모델의 3차원 형상이다. Table 1에서는 상세열모델과 축소열모델에서 사용된 노드의 수를 비교하였다. 생성된 축소열모델은 상세열모델 대비 1/46의 크기로 간소화 되었다.

축소노드가 선정되면, 상세열모델로 부터 상세 전도컨덕터와 축소노드 대 상세노드의 면적 비를 추출하여 식 (12)의 행렬식을 수립하고, 식 (18)과 같은 축소열모델의 전도컨덕터를 구하여야 한다. 이 때 복사컨덕터는 상세 및 축소열모델에서 같은 조건으로 계산되어야만 한다.

4.3 계산조건 및 결과

상세열모델의 경우와 동일하게 외부 복사열환경은 -180°C, 내부 복사열환경은 40°C로 하고, 두 모델에서 공히 사용되는 전장품들의 열소산량도 853W로 동일하다. 계산은 HP c8000 유닉스 워크스테이션에서 수행하였다. 76개의 발열 노드에 대하여 상세열모델의 해석결과를 기준으로 축소열모델의 해석 결과의 차이를 Fig. 6에 도시하였다. 최대 온도 차이는 ±1.1°C이며, 모든 발열노드의 온도는 correlation 한계인 ±2°C 이내로 나타났다. 상세열모델로 부터 간소화된 축소열모델의 스킨노드는 해당 영역이 등온임을 나타내는 것이 아니라 열소스와 열싱크를 연결하는 역할만을 하기 때문에 그 영역의 국소 온도를 나타내는 것이 아님을 유의해야 한다.

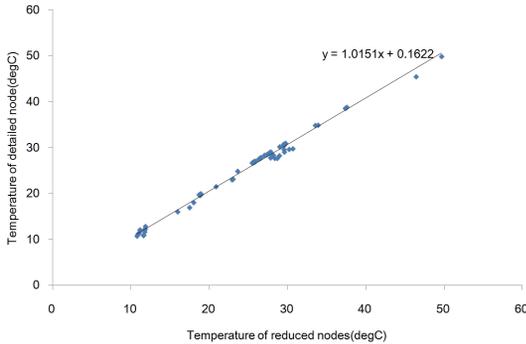


Fig. 7 Temperature comparison curve to both thermal models

Fig. 7은 축소열모델 및 상세열모델 각 노드의 온도를 비교한 것이다. 축소열모델과 상세열모델의 결과가 정확히 일치하면 $y = x$ 인 추세선을 나타낼 것이다. 계산결과 두 모델간의 상관관계는 $y = 1.015x + 0.1622$ 의 선형 추세선을 가지며 이 때 결정계수(coefficient of determination) $R^2=0.9932$ 이다.

5. 간소화 알고리즘 계산시간

5.1 Block-form LU 분해법[8]

축소열모델의 전도컨덕터를 계산하기 위해 거대 행렬연산자를 개발하였다. 이 연산자의 주된 기능은 거대 희소행렬의 역행렬을 구하는 것으로, maximum pivot strategy를 이용하는 Gauss-Jordan 방법과 block-form을 이용하는 LU 분해 방법을 적용한다. 상세열모델의 노드 수 증가에 따른 어려움을 해결하기 위해서는 block form을 이용한 LU 분해 방법이 효과적이었다. 최종적으로 개발된 프로그램은 계수 행렬 [G]를 아래와 같이 4개의 작은 행렬로 나누는 경우(case-I), 계수 행렬을 16개로 나누는 경우(case-II)로 개발하였다. 프로그램은 포트란으로 코딩되어 있고, 식 (21)은 4개의 부분행렬로 나누는 경우 행렬식을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 [G]^{-1} &= \begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix}^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} A^{-1} + A^{-1}BS_A^{-1}CA^{-1} & A^{-1}BS_A^{-1} \\ S_A^{-1}CA^{-1} & S_A^{-1} \end{bmatrix} \quad (21)
 \end{aligned}$$

Table 2 Calculation time comparison to reduction algorithms

Calculation procedures	Block-form LU decomposition	Guyan condensation
Sub-matrix generation	25m 4s	6m 46s
Reduction	9h 12m 50s	2m 48s
Other manipulation	1m 54s	1m 54s
Total sum	9h 40m 24s	11m 28s

여기서 $S_A = D - CA^{-1}B$ 이다. 예를 들어 4GB의 RAM을 가진 컴퓨터에서 2차원 변수의 최대크기가 (15000, 15000)이면, case-I의 block-form에서는 (30000, 30000) 행렬을 case-II에 적용하면 (60000, 60000) 행렬을 처리 할 수 있다. 새로이 생성된 전도컨덕터는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 새로이 생성된 전도컨덕터 행렬은 대칭 행렬이며, 각 행 및 열의 합은 0을 나타낸다.
- 전도컨덕터 행렬은 각 요소를 개별적으로 구분해서 고려할 수 없다. 일종의 전도컨덕터 세트(conductor set)로 간주 하여야 한다.
- 간소화된 모델의 전도컨덕터는 바로 이웃한 노드뿐만 아니라 전혀 이웃하지 않은 노드로도 구성된다. 일부 컨덕터 값은 음(negative)의 값을 가진다.

5.2 대체행렬을 이용한 Guyan 압축법

Guyan 압축법 계산을 위하여 서울대학교에서 개발한 Static-condensation 코드를 사용하였다. 이 코드는 C++로 작성되었으며 인텔 MKL(math kernel library)를 사용하여 64비트 멀티스레드 컴퓨팅이 가능하도록 작성되었다. 3장에서 기술한 대체행렬을 이용한 Guyan 압축법을 적용하였을 때와 block-form LU 분해법을 적용했을 때의 계산 속도를 비교하기 위하여 인텔 i7(3.2GHz) CPU, 24GB RAM의 컴퓨터 환경에서 계산을 수행하였다. 각 간소화 알고리즘에 따른 계산시간을 Table 2에 나타내었다. Block-form LU 분해법에 비해 대체행렬을 이용한 Guyan 압축법을 사용했을 경우 모델의 간소화 시간은 약 553분에서 3분으로 단축되었으며, 약 184배의 속도 향상을 가져왔다.

6. 결 론

인공위성의 열해석을 위하여 필요한 패널의 축소열모델을 상세열모델로 부터 얻을 수 있는 알고리즘 및 프로그램을 개발하고, 천리안위성의 패널에 사용한 예를 소개하였다. 해석 예로부터, 상세열모델 및 축소열모델의 주요 부품에 대한 온도차는 최대 1.2°C를 넘지 않았다. 간소화 알고리즘에 대하여, 역행렬을 구하기 위해 개발된 block-form LU 분해법보다 대체행렬을 이용한 Guyan 압축법을 사용했을 때 우월한 계산 속도를 보였다.

후 기

Static-condensation 코드를 만들어 준 서울대학교 항공우주 구조연구실 김민기 박사에게 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] 1998, J. R. Howell, "The Monte Carlo Method in Radiative Heat Transfer," *Journal of Heat Transfer*, Vol.20, pp.547-560.
- [2] 2006, H.Y. Jun, and J.H. Kim, "Thermal Analysis of Surface Heat Pipe Installed Panel of Geostationary Satellite," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.11, No.3, pp.8-13.
- [3] 2002, *SINDA/G User's Guide (v2.2)*, Network Analysis Inc.
- [4] 2004, *ESATAN User Manual*, ALSTOM Power Technology Centre.
- [5] 2010, J.H. Kim, H.Y. Jun, C.Y. Han, and B.S. Kim, "Thermal Modeling Technique for Geostationary Ocean Color Imager," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.15, No.2, pp.28-34.
- [6] 2000, *Space Engineering, Mechanical-Part 1: Thermal Control*, ECSS-E-30 Part 1A, European Cooperation for Space Standardization.
- [7] 1964, R. J. Guyan, "Reduction of Stiffness and Mass Matrices," *AIAA Journal*, Vol.3, No.2, pp.380.
- [8] 2010, H.Y. Jun, J.H. Kim, C.Y. Han, and J.W. Chae, "Development of Thermal Analysis Program for Geostationary Satellite Panel," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.15, No.3, pp.66-72.